



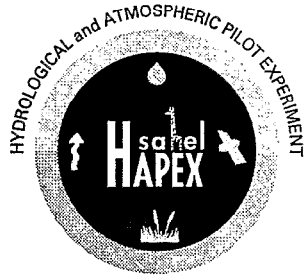
HYDROLOGIE ET MÉTÉOROLOGIE DE MÉSO-ÉCHELLE DANS HAPEX-SAHEL

*DISPOSITIF DE MESURES AU SOL
ET PREMIERS RÉSULTATS*



Éditeur scientifique
Thierry LABEL

ORSTOM
éditions



HYDROLOGIE ET MÉTÉOROLOGIE DE MÉSO-ÉCHELLE DANS HAPEX-SAHEL

*DISPOSITIF DE MESURES AU SOL
ET PREMIERS RÉSULTATS*

Éditeur scientifique
Thierry LEBEL

ORSTOM Éditions

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION
PARIS 1995

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

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

SOMMAIRE

Préface	
Thierry LEBEL	5
Une première étape vers la cartographie des états de surface du degré carré de Niamey : prétraitement géométrique et radiométrique des images Spot	9
Franck TIMOUK, Jacques NOËL	
Les mesures météorologiques d'encadrement de l'expérience Hapex-Sahel	17
Pierre BESSEMOULIN, Dominique PUECH	
Rainfall Monitoring: The Epsat-Niger setup and its use for Hapex-Sahel	31
Thierry LEBEL, Jean Denis TAUPIN, Michel GRÉARD	
Bilan hydrologique de surface à partir du suivi des mares temporaires sur une zone test de 600 km²	69
Jean Christophe DESCONNETS, Thierry LEBEL, Jean Denis TAUPIN	
Étude de la recharge de la nappe du Continental Terminal 3 en rive gauche du Niger	115
Christian LEDUC, François LENOIR	
The semi-arid groundwater recharge study (SAGRE)	161
John BROMLEY, Joost BROUWER, Steve GAZE	
Bases écologiques pour une spatialisation des données recueillies dans le cadre de l'expérience HAPEX-SAHEL	181
Jean-Marc d'HERBÈS, Éric DELABRE et Maud LOIREAU	

PRÉFACE

T. LABEL

Groupe PRAO, ORSTOM

L'expérience HAPEX-Sahel s'inscrit dans le cadre du programme mondial de recherche sur le climat (PMRC) dont un des thèmes est l'amélioration de la modélisation de l'interface continent-atmosphère au sein des Modèles de Circulation Générale Atmosphérique (MCGA). Le Sahel constitue le plus vaste ensemble continental en zone tropicale sèche et représente de ce fait une aire d'intérêt prioritaire pour cette question. Il va également de soi que toute recherche visant à améliorer notre compréhension des processus du climat sahélien devrait bénéficier à terme aux populations qui y vivent dans un état d'équilibre particulièrement précaire avec leur environnement.

Le schéma expérimental adopté pour HAPEX-Sahel a visé à prendre en compte les variabilités rencontrées à différentes échelles dans cette région (GOUTORBE *et al.*, 1994¹).

Dans l'espace, l'échelle de référence est la maille élémentaire des MCGA, qui mesure 100 à 200 km de côté. Pour HAPEX-Sahel on a donc choisi d'instrumenter un degré carré (soit une surface d'environ 110 x 110 km²), 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 situe dans la partie ouest de la zone (Fig. 1). Le propos de ce recueil est de rendre compte des acquisitions réalisées par les réseaux d'observation au sol couvrant l'ensemble de cette zone, les acquisitions satellitaires étant décrites dans un autre volume (KERR *et al.*, à paraître).

Deux autres échelles spatiales ont été privilégiées dans HAPEX-Sahel. Il s'agit tout d'abord du super-site, d'une surface de quelques centaines de km². Trois super-sites (Fig. 1) destinés à rendre compte du gradient pluviométrique et de la diversité des conditions de surface ont été instrumentés de manière dense en mesures de micro-météorologie, de bilan hydrique dans les sols, de flux de carbone et de vapeur d'eau dans la couche limite atmosphérique. Un suivi hydrologique global a également été réalisé sur le super-site Central Est. Les activités menées sur les super-sites font l'objet d'un rapport spécifique pour chacun d'eux (WALLACE *et al.*², 1994; MONTENY *et al.*³, 1994, KABAT *et al.*, à paraître). Le super-site constitue une zone d'intégration intermédiaire, réalisée notamment grâce aux mesures météorologiques aéroportées. L'échelle spatiale inférieure est celle de la parcelle d'un ha environ, le WAB (Wind Affected Blob), sur lequel sont instrumentés conjointement et pour un état de surface homogène les flux dans les sols et dans la couche limite atmosphérique. Ces mesures sont également décrites dans les rapports de super-site.

1 GOUTORBE J.P., T. LABEL, A. TINGA, P. BESSEMOULIN, J. BROUWER, H. DOLMAN, E.T. ENGMAN, J.H.C. GASH, M. HOEFFNER, P. KABAT, Y.H. KERR, B. MONTENY, S. PRINCE, F. SAÏD, P. SELLERS, and J. WALLACE, 1994, HAPEX-SAHEL: a large-scale study of land-atmosphere interactions in the semi-arid tropics. *Ann. Geophysicae*, 12, 53-64.

2 WALLACE *et al.*, 1994. HAPEX-Sahel Southern Super-Site Report: An overview of the site and the experimental programme during the intensive observation period in 1992. Institute of Hydrology, Wallingford, UK. 55P.

3 MONTENY *et al.*, 1994. HAPEX-Sahel-1992 : Campagne de mesures sur le super-site Central Est. Edition provisoire multi-graphiée.

Sur le plan temporel deux périodes principales ont été identifiées : une période de « suivi à long terme » de trois ans (1991-1993), jugée nécessaire pour pouvoir échantillonner la variabilité inter-annuelle du climat sahélien, et une Période d'Observation Intensive (POI) qui a duré du 17 août au 9 octobre 1992, au cours de laquelle se sont déroulées les mesures par instrumentation aéroportée. A l'exception du réseau de stations météorologiques automatiques qui n'a fonctionné qu'en 1992, les autres actions décrites dans ce volume ont démarré dès 1990 ou 1991 et ont couvert l'ensemble des trois années du suivi à long terme.

Dès le début de l'expérience, il est apparu que la couverture cartographique de la région de Niamey était insuffisante pour fournir une description adéquate des conditions de surface de la zone d'étude. La couverture topographique complète n'existait qu'au 1/200 000, les feuilles au 1/50 000 n'étant disponibles que pour le Sud de la zone. Grâce à l'étude de GAUVAUD (1966)⁴, on dispose d'une carte au 1/500 000 des sols du Niger occidental. Néanmoins, tant du fait de sa résolution que de la nature des variables cartographiées, cette carte n'est pas adaptée aux études de bilan hydrique menées dans HAPEX-Sahel, ce dernier étant grandement conditionné par les états de surface. Aucun document cartographique n'étant disponible dans ce domaine il a fallu en établir en se basant à la fois sur l'imagerie satellitaire haute résolution (SPOT) et sur une campagne de validation au sol. Ce travail a été initié par D. COURAULT en 1990, puis repris par TIMOUK et NOËL, qui décrivent ici les opérations réalisées afin de rendre les images SPOT exploitables dans l'optique de la réalisation de spatio-cartes. Deux spatio-cartes, disponibles dans la banque de données HAPEX-Sahel, ont ainsi été réalisées : une carte des états de surface au 1/200 000 couvrant l'ensemble du degré carré, et une carte d'occupation des terres au 1/50 000 couvrant le super-site Central-Est. Un important travail de terrain a également été effectué pour valider ces cartes, qui restent néanmoins des documents intermédiaires dont l'usage à des fins de modélisation spatialisée des transferts hydriques et radiatifs doit être envisagé avec précaution. Plusieurs équipes travaillent actuellement à leur actualisation et à leur enrichissement en utilisant des données satellitaires multi-temporelles (SPOT, LandSat TM, NOAA...).

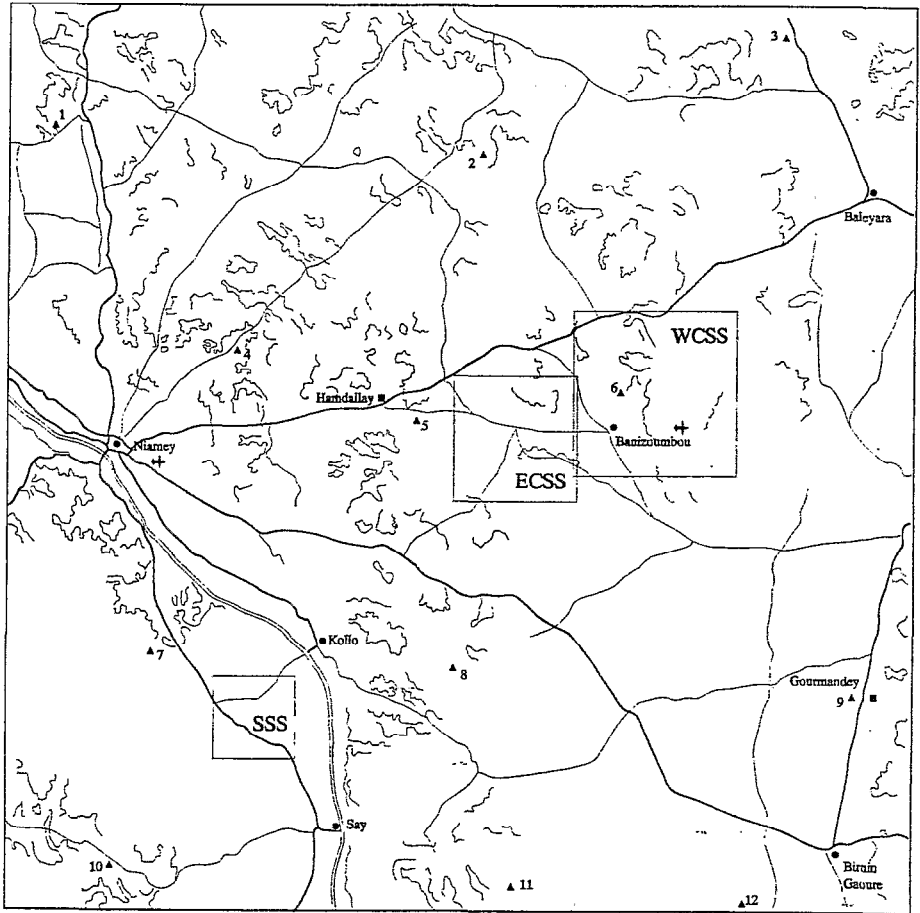
Une deuxième série de dispositifs visait à contrôler les entrées de la composante atmosphérique sur le degré carré. Cet objectif a été atteint, d'une part, grâce au réseau de stations automatiques de METEO-France (BESSEMOULIN et PUECH), d'autre part, à l'aide du réseau de pluviographes à mémoire statique et du radar météorologique de l'expérience EPSAT-Niger (LEBEL, TAUPIN et GRÉARD).

La dernière série de campagnes de mesure décrites dans ce rapport concerne l'étude du bilan hydrologique de surface et souterrain. Du fait de la dégradation des réseaux hydrologiques, il est impossible de disposer au Sahel d'un intégrateur naturel de la composante ruissellement de surface, habituellement fourni par un grand bassin versant. Il a donc été procédé à l'instrumentation de plusieurs endoréismes, jouant le rôle d'intégrateurs locaux (DESCONNETS, LEBEL et TAUPIN). La composante souterraine a été de son côté suivie de façon extrêmement détaillée, par une équipe ORSTOM-DRE (Direction des Ressources en Eau) sur la rive gauche du fleuve Niger et par une équipe Institute of Hydrology-DRE sur la rive droite. Ces travaux sont décrits dans les contributions de LEDUC et LENOIR, d'une part, de BROMLEY, BROUWER et GAZE, d'autre part.

Les données recueillies par ces différentes équipes serviront à évaluer directement certains termes du bilan hydrique à l'échelle du degré carré (précipitations, recharge des aquifères). Elles serviront également de vérité sol pour valider l'imagerie satellitaire, afin d'étendre les résultats obtenus sur le degré carré de Niamey à des zones plus vastes.

4 GAUVAUD, M., 1966. Etude pédologique du Niger occidental. Monographie des sols et carte des sols au 1/500 000. Orstom Ed., Bondy.

HAPEX - SAHEL



IM LAPETITE

Légende générale

- Ville principale
- + Aéro(port)/(drome)
- ~ Fleuve Niger
- Route principale
- - - Route secondaire
- ⊞ Bords de plateaux

Schéma d'instrumentation de la zone d'étude

Carte 1 : Mesures météorologiques d'encadrement

- ▲ Station automatique Météo France
- Sites de radio-sondages (autres que super-sites)

Figure 1 : La zone d'étude d'HAPEX-Sahel.

UNE PREMIÈRE ÉTAPE VERS LA CARTOGRAPHIE DES ÉTATS DE SURFACE DU DEGRÉ CARRÉ DE NIAMEY : PRÉTRAITEMENTS GÉOMÉTRIQUE ET RADIOMÉTRIQUE DES IMAGES SPOT DU 24 OCTOBRE 1988

Franck TIMOUK, Jacques NOËL

*Mission technique Télédétection, ORSTOM
BP 11416, Niamey, Niger*

RÉSUMÉ

On présente ici les traitements qui ont été réalisés pour homogénéiser les données des six scènes SPOT dont l'acquisition est nécessaire pour couvrir le degré carré de Niamey. Les données concernées par ces traitements sont celles des deux radiomètres Haute Résolution Visible (HRV1 et HRV2) multispectraux embarqués à bord de SPOT1, en date du 24 octobre 1988. Il s'agissait d'obtenir une spatio-carte préalable à la cartographie des états de surface au 1/200 000 du degré carré et de mettre au point une méthode de traitement réutilisable pour d'autres dates. Les principales étapes de ce traitement sont : la calibration radiométrique, la mosaïque des six images, l'atténuation du gradient bioclimatique et enfin la correction géométrique. Les spatio-cartes ainsi réalisées sur le degré carré au 1/200 000 et sur le Super-Site Central au 1/50 000 sont fournies comme illustration de ce travail.

ABSTRACT

The processing carried out to homogenize the data from the six SPOT images needed to cover the Niamey one by one degree square is presented. The data concerned, in date of 24 October 1988, come from the two multi-channels High Resolution Visible radiometers embarked aboard SPOT1. The aim was to design a method that could be used for any other date and to obtain a preliminary document from which a land surface features map could be derived. The main steps of the processing are: the radiometric calibration, the building of a mosaic of the six images, the attenuation of the bioclimatic gradient, and, finally, the geometric correction. The maps resulting from these treatments are given to illustrate this work.

1. INTRODUCTION

Cette étude reprend et complète un travail commencé par Dominique COURAULT en 1991. Le traitement de six images satellites SPOT1 multispectrales du 24 octobre 1988 couvrant l'ensemble du degré carré de Niamey (13° N-14° N, 2° S-3° S) a permis d'établir une spatio-carte à l'échelle 1/200 000. Ce document intermédiaire est une première approche vers l'identification d'unités d'états de surface sahéliens par télédétection et de prospection de sites pilotes pour l'expérience HAPEX-Sahel (composition colorée en figure 1). On décrit ici l'ensemble des opérations qui ont été nécessaires à la réalisation d'une spatio-carte superposable à la feuille topographique de Niamey. Il s'agit, d'une part, des corrections géométriques et de l'homogénéisation radiométrique, et, d'autre part, de la discrimination des confusions radiométriques pour la classification.

2. MATÉRIEL UTILISÉ

Les systèmes de traitement d'images, fonctionnant sur station SUN, PLANETES (RAKOTO M., 1992) et TEIS développés à l'ORSTOM par Jacques NOËL, ont permis la réalisation de l'ensemble des opérations. Deux programmes en langage C ont été développés au standard « PLANETES » pour faciliter les opérations de localisations géographiques et de navigation sur images satellites « hautes résolutions » par Franck TIMOUK et Jean-Yves LAISNE. Ils ont été inspirés par les modules de même type du logiciel TRISKEL mis au point par D. DAGORNE de l'antenne ORSTOM au Centre de météorologie spatiale de Lannion. Pour les traitements thématiques, la visualisation et l'échantillonnage se sont réalisés sur la console 24 bits d'un PERICOLOR 3000. La restitution graphique des résultats s'est réalisée sur imprimante CALCOMP grâce à l'intégration du matériel de l'unité de traitement d'images de l'ORSTOM-Niger dans la chaîne d'acquisition-traitement-restitution de données satellitaires du centre AGRHYMET (Comité inter-États de lutte contre la sécheresse au Sahel).

3. CARACTÉRISTIQUES DES IMAGES DU DEGRÉ CARRÉ DE NIAMEY

Six images SPOT sont nécessaires pour couvrir le degré carré de Niamey. Dans la grille de référence SPOT, elles sont centrées sur les nœuds des K 61 et 62 et des J 322, 323 et 324. Les données images sont acquises simultanément par les deux instruments Haute Résolution Visible multispectraux de SPOT1.

Une première stratification du degré carré a dans un premier temps permis d'identifier cinq domaines physiographiques à partir des cartes pédologiques au 1/500 000 et d'un indice de végétation NOAA (COURAULT *et al.*, 1991). Ils mettent principalement en évidence un gradient nord-sud et la répartition spatiale de grands ensembles géomorphologiques. A ces latitudes de transition soudano-sahélienne, l'ensemble du degré carré, d'une surface d'environ 12 000 km², est marqué par un fort gradient bioclimatique nord-sud. Nous avons dans un premier temps observé le long de ce gradient, les signatures spectrales d'un taxon facilement identifiable par les thématiciens. Les bordures de plateaux cuirassés présentent cet avantage. Les écarts de comptes numériques entre le nord et le sud sont de 1 à 20 dans le canal proche infrarouge, de 1 à 10 dans le rouge et inexistant dans le vert. Ces écarts sont dus, dans ce cas, aux implantations arbustives, qui se densifient vers les latitudes méridionales, sur les ruptures de pentes et les ravines qui festonnent le talus des plateaux. Pour cette première cartographie, nous avons uniquement retenu l'importance du gradient, contrainte majeure pour l'identification des structures.

4. PRÉTRAITEMENTS DES IMAGES

Nous décrivons ici les prétraitements élémentaires pour la mise en conformité géographique et radiométrique des images.

4.1. Calibration radiométrique

Il est entendu par calibration radiométrique, l'ajustement des données acquises par l'instrument HRV2 de SPOT1 sur celles de l'HRV1. Le manque de données sur l'état de l'atmosphère ne nous a pas permis d'effectuer une transformation de compte numérique en réflectance sol. A partir de zones échantillons prélevées sur les bandes de recouvrement commun des images, nous avons ajusté la dynamique des valeurs (tableau 1). Cette étape permet d'homogénéiser les images avant leur assemblage.

4.2. Mosaïque des six images SPOT

Cette étape consiste à reconstituer le segment d'images ouest puis à injecter les images ajustées une à une dans un fichier de réception (9 140 lignes, 7 660 colonnes). Après repérage de points d'appui d'injection, la mosaïque en ligne s'est effectuée en supprimant les 150 pixels correspondant aux trois kilomètres de recouvrement.

4.3. Atténuation du gradient bioclimatique

La nature linéaire de ce gradient autorise une partition arbitraire de l'image du degré carré en 10 bandes de 6 minutes chacune. Les valeurs de chaque bande, pour les canaux nécessitant une homogénéisation, ont subi les corrections nécessaires, soit l'addition dans la direction nord-sud d'un incrément de 1 pour le canal XS2 et de 2 pour le canal XS3. Cette étape est essentiellement guidée par le choix délibéré de faciliter la synthèse cartographique des paysages du degré carré au dépend de la réalité du thème « végétation ».

Tableau 1 : Ajustement dynamique par segmentations à partir des zones échantillons prélevées sur la bande de recouvrement des images ouest et est (K61 : HRV1 et K62 : HRV2); scènes SPOT1 du 24 octobre 1998.

	Coordonnées des zones prélevées sur la bande de recouvrement				Ajustement des comptes numériques des images du K62 sur celles du K61					
	Lignes		Colonnes		XS1		XS2		XS3	
	K61	K62	K61	K62	K61	K62	K61	K62	K61	K62
J 322	59; 308	662; 811	3642; 3791	170; 319	0; 57 58; 110 111; 255	0; 59 60; 116 117; 255	0; 50 51; 70 71; 90 91; 110 111; 120 121; 255	0; 58 59; 81 82; 104 105; 126 127; 137 138; 255	0; 70 71; 110 111; 130 131; 255	0; 76 77; 115 116; 134 135; 255
J 323	59; 308	662; 811	3642; 3666	168; 182	0; 50 51; 60 61; 80 81; 255	0; 52 53; 63 64; 84 85; 255	0; 50 51; 60 61; 70 71; 80 81; 85 86; 255	0; 57 58; 69 70; 81 82; 93 94; 99 100; 255	0; 70 71; 80 81; 90 91; 100 101; 255	0; 73 74; 84 85; 95 96; 106 107; 255
J 324	362; 862	866; 1366	3623; 3723	150; 250	0; 50 51; 60 61; 70 71; 80 81; 90 91; 255	0; 51 52; 62 63; 73 74; 84 85; 95 96; 255	0; 50 51; 60 61; 70 71; 80 82; 92 81; 90 91; 255	0; 58 59; 69 70; 81 82; 92 93; 103 104; 255	0; 80 81; 120 121; 255	0; 85 86; 125 126; 255

4.4. Correction géométrique

Nous avons disposé de la feuille topographique IGN 1/200 000 de Niamey (1980), seul document assez précis et disponible pour cette opération. Après repérage des points d'appui de correspondance entre les pixels et les coordonnées cartographiques kilométriques (*ellipsoïde de Clark 1880, projection U.T.M 31*), il a été calculé à l'aide du programme « Grille » (TEIS) deux polynômes du second degré (en ligne et colonne), sur les trois meilleurs points d'appui (tableau 2). La formule, une fois validée, a servi à l'anamorphose du fichier (translation, rotation, mise à l'échelle de sortie), ce qui induit une déformation des pixels de base. La taille moyenne du pixel est de 25,346 mètres en colonne et 25,287 mètres en ligne à l'échelle 1/200 000.

Tableau 2 : Table de correspondance entre les points d'appui satellitaires de la mosaïque des 6 images SPOT et cartographiques de la feuille topographique IGN de Niamey (en kilomètres).

Amers	Ligne	Colonne	Latitude	Longitude
A	2 266	5 889	496.0	1 534.4
B	6 622	6 558	496.3	1 446.2
C	5 164	1 323	397.2	1 490.8
D	4 805	3 311	437.6	1 491.6
E	6 858	3 131	427.9	1 451.7
F	2 699	1 090	400.0	1 539.9

Les polynômes ont été calculés sur A, F et E et validés sur B, C et D. La formule d'anamorphose s'établit comme suit (l et c étant respectivement les numéros de ligne et de colonne) :

$$X = (-0,29768 [l]) + (1,97356 [c]) + 386,52$$

$$Y = (-1,97692 [l]) + (-0,29928 [c]) + 1596,45$$

La précision planimétrique est de l'ordre de 150 m. Les imprécisions du document cartographique de référence et du modèle de déformation ne nous permettent pas de diminuer cette erreur qui reste acceptable à l'échelle 1/200 000.

5. EXEMPLE DE RÉALISATION D'UNE SPATIO-CARTE EN RELATION AVEC LES ÉTATS DE SURFACE OBSERVÉS AU SAHEL

La notion d'état de surface correspond à la définition, à l'échelle du mètre carré, d'une unité fonctionnelle homogène d'un point de vue hydrodynamique. Cette unité est décrite par le couvert végétal, l'organisation pédologique superficielle, l'utilisation du sol et la géomorphologie du site. La reconnaissance de ces états de surface par télédétection, notamment avec la résolution de vingt mètres des satellites SPOT, implique la recherche d'une ou plusieurs unités élémentaires jointives. Pour les images du mois d'octobre 1988, nous avons identifié les objets composites selon le recouvrement par la végétation et la couleur de la surface du sol, mais aussi par la reconnaissance des organisations caractéristiques d'un site. Les caractéristiques spectrales des principales organisations de la surface des sols au Niger nous ont été fournies par Dominique COURAULT (COURAULT *et al.*, 1990).

5.1. Identification des structures « plateaux »

Cette première étape consiste à éliminer les confusions existantes entre les bordures de plateaux cuirassés et les jachères. Sur l'ensemble du degré carré, les plateaux ont été masqués à l'écran en se servant de la limite extérieure des bordures cuirassées latéritiques. Dans le cas où celles-ci n'étaient pas apparentes, deux critères tenant compte des formes de l'objet et de la couleur de la surface ont permis de déterminer une limite de transition géomorphologique :

- 1 - organisation de la végétation (référence aux formations arbustives typiques de plateaux);
- 2 - homogénéité du plateau en composition colorée ou des niveaux de gris dans le canal proche-infrarouge.

Certaines surfaces, plus ou moins tabulaires, le plus souvent ensablées, recouvertes de formes de végétation sans organisation régulière et entaillées par des vallées étroites ont posé des problèmes particuliers de reconnaissance de limites. Il s'agit de lambeaux de surfaces au sud du degré carré qui représentent moins de 10 % de l'espace occupé par les plateaux du degré carré. Ce masque a permis la création de six plans d'information, trois « glacis et bas-fond » et trois « plateau » (XS1, XS2, XS3).

5.2. Discrimination des unités

Sur le canal proche-infrarouge des plateaux, les comptes numériques de 69 à 77 identifient les bordures. Le masque permet de dissocier sans équivoque les bordures de plateaux des jachères. La phase d'apprentissage sur la composition colorée du site central de Banizoumbou (20 x 20 km) a mis en évidence, selon une échelle de perception au 1/50 000, 39 types d'états de surface. Les paramètres de statistique descriptive des zones échantillons (moyenne et écart-type) ont permis d'extrapoler les thèmes à l'ensemble du degré carré lors de la classification (méthode sebestyen du logiciel PLANETES). Les canaux « plateau » et « glacis, bas-fond » ont été classés à part. Les deux plans classés ont ensuite été superposés. En interaction avec la connaissance du terrain des thématiciens, les 40 classes élémentaires ont ensuite été agrégées afin d'obtenir douze unités d'états de surface pertinents au 1/200 000 (d'HERBÈS *et al*, 1992). Le lissage des contours et l'élimination des pixels isolés se sont réalisés avec un filtre majoritaire (fenêtre glissante de 5 x 5).

6. PERSPECTIVES

L'hétérogénéité du degré carré décrite entre les grands domaines physiographiques n'a, jusqu'à présent, pas été prise en compte. Elle reste pourtant une des contraintes importantes pour l'identification d'unités fonctionnelles.

Les données atmosphériques collectées lors de la Période d'Observation Intensive d'HAPEX-Sahel permettront de corriger les 21 scènes SPOT2 acquises pendant l'expérience pour une meilleure interprétation du comportement spectral des unités de surface.

La validation des travaux sur les images satellites de 1992 qui compléteront cette première approche de cartographie par télédétection des états de surface pourront s'appuyer sur les photographies aériennes à différentes échelles géographiques acquises lors de la Période d'Observation Intensive du programme HAPEX-Sahel.

La cartographie des états de surface à l'échelle 1/50 000 sur le site central de Banizoumbou, qui a suivi cette première carte, a requis une plus grande précision planimétrique (composition colorée en figure 2). L'utilisation des coordonnées géographiques acquises à l'aide de l'instrument du Geodetic Positioning System (GPS) ont permis de placer des transects phyto-écologiques avec une précision de l'ordre de 40 à 60 mètres. Une campagne de relevés de points d'appui sur l'ensemble du degré carré nous permettra à la fois d'améliorer la qualité cartographique des images de 1992, et de poser les références géographiques pour toute intégration et combinaison de données géographiques avec ces informations satellitaires.

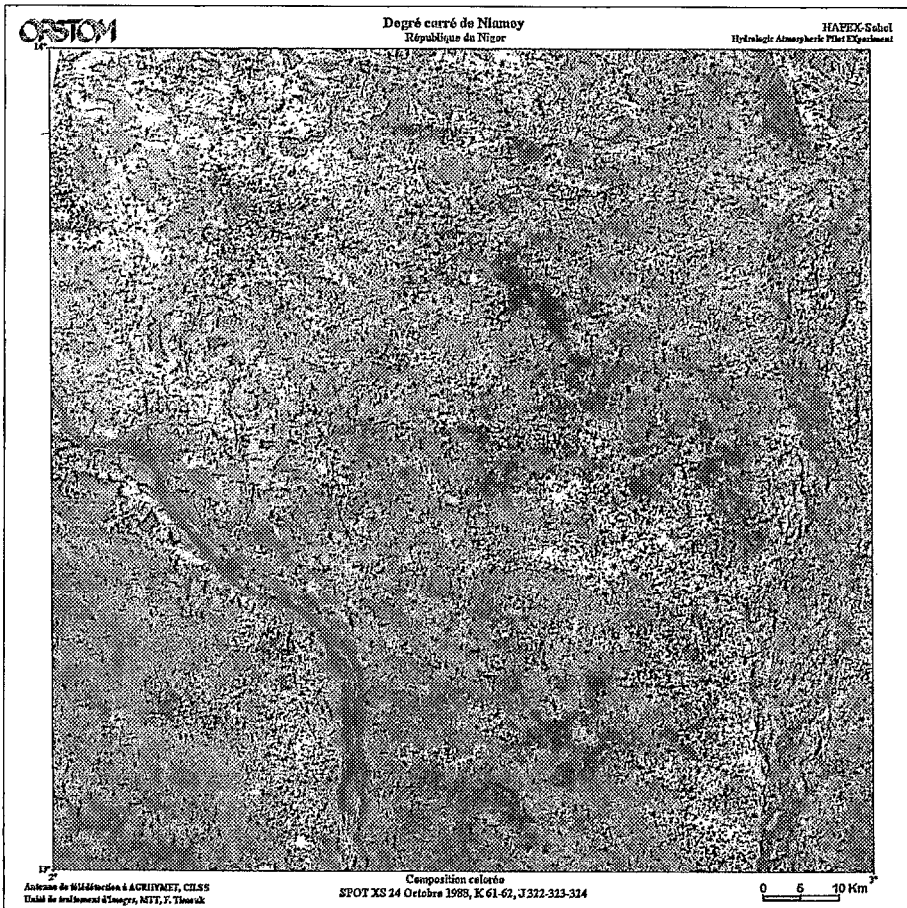


Figure 1 : Mosaïque des images SPOT corrigées géométriquement et radiométriquement sur le degré carré 13° N - 14° N; 2° E - 3° E.

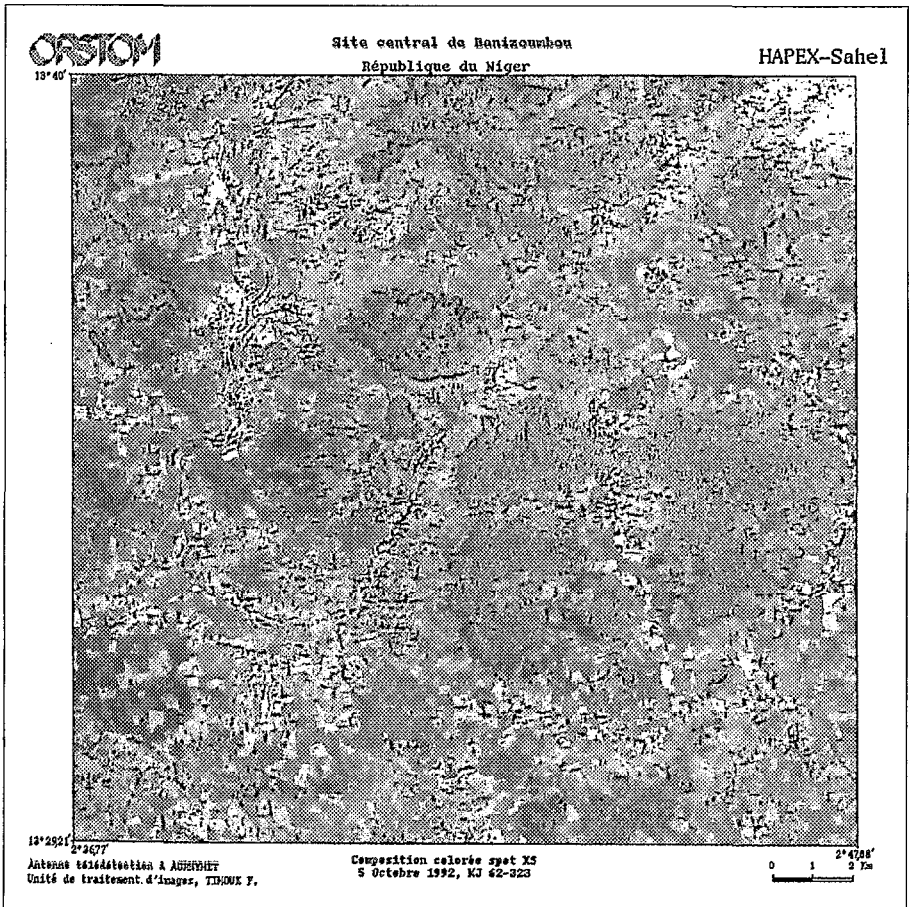


Figure 2. Détail sur le super-site central de la carte de la figure 1
(13° 29,21' - 13° 40'; 2° 36,77' - 2° 47,88').

RÉFÉRENCES

- COURAULT D., J.M. D'HERBES, C. VALENTIN, 1990, Caractéristiques spectrales des principales organisations de la surface des sols au Niger, in *Caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides et tropicales*, compte rendu des deuxièmes journées de télédétection de l'ORSTOM - Bondy 4-6 décembre, Editions de l'ORSTOM, collection Colloques et Séminaires, pp. 39-47.
- COURAULT D., J.M. D'HERBES, C. VALENTIN, D. RÉMY, 1991, Etude de la variabilité spatiale du comportement hydrodynamique des sols au Niger à partir d'images satellitaires, in *Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, compte rendu du V^e colloque international - Courchevel, 14-18 janvier, ESA SP-319, pp. 601-604.
- D'HERBÈS J.M., D. COURAULT, F. TIMOUK, C. VALENTIN, 1992, Spatio-carte des états de surface du degré carré de Niamey au 1/200 000, Unité de traitement d'images MTT de l'antenne de télédétection ORSTOM au centre AGRYMET-Cilss, ORSTOM-Niger.
- RAKOTO, M., 1992, logiciel PLANETES version 2.0, ORSTOM-SEAS, La Réunion (2 disquettes SUN).

LES MESURES MÉTÉOROLOGIQUES D'ENCADREMENT DE L'EXPÉRIENCE HAPEX-SAHEL

Pierre BESSEMOULIN, Dominique PUECH

*Centre national de recherches météorologiques
METEO-FRANCE, 31057 Toulouse cedex*

RÉSUMÉ

Cet article décrit les mesures météorologiques d'encadrement de l'expérience HAPEX-Sahel. Il s'agit principalement : a) des moyens de radiosondages venant compléter la station OMM de Niamey, destinés à suivre l'évolution de la structure de la couche limite, et à dériver les paramètres nécessaires aux corrections atmosphériques des données télédéctées; b) d'un réseau de douze stations automatiques, permettant d'estimer la variabilité des paramètres météorologiques et d'interpréter les flux à méso-échelle.

ABSTRACT

This paper describes the meteorological measurements conducted during HAPEX-Sahel, mainly: a) radiosoundings in addition to those performed at the Niamey WMO station, aiming at documenting the time evolution of the boundary layer structure and at deriving the parameters necessary to atmospheric corrections of remotely sensed data; b) a network of 12 automatic weather stations scattered over the experimental area, allowing to estimate the variability of meteorological parameters and to interpret the fluxes at the meso-scale.

1. OBJECTIFS GÉNÉRAUX

Du fait de la densité insuffisante du réseau météorologique nigérian, des mesures complémentaires ont été implantées pour les besoins de l'expérience pendant la Période d'Observations Intensives (POI) de l'expérience HAPEX-SAHEL qui s'est déroulée près de Niamey au Niger, du 17 août au 12 octobre 1992 :

- i) deux stations de radiosondage tenues l'une par le Centre national de recherches météorologiques (CNRM, équipe 4M) et l'autre par l'Institute of Hydrology (IH), destinées :
 - à documenter la structure de la couche limite et son évolution diurne, en particulier dans des situations où cette évolution est pilotée par les flux de surface;
 - à fournir des profils permettant de corriger les données de télédétection des effets atmosphériques;
- ii) un réseau de douze stations météorologiques réparties sur le degré carré de manière uniforme, qui s'ajoutent à l'unique station météorologique présente dans la zone (Niamey Aéroport), destiné à décrire la variabilité des conditions météorologiques sur le degré carré.

L'ensemble de ces informations doit en outre servir de données de calibration/validation des modèles 3D méso-météorologiques, ou 1D décrivant les échanges verticaux entre le sol, la végétation et l'atmosphère.

2. DÉLIMITATION GÉOGRAPHIQUE ET TEMPORELLE

Les sites des 12 stations du réseau météorologique sont portés sur la carte générale figurant dans l'avant-propos de ce volume. Le tableau ci-après rappelle les périodes d'opération de ces stations :

Station n°	Date d'installation	de démontage
1	04/08	25/10
2	28/07	23/10
3	23/07	22/10
4	03/08	23/10
5	22/07	17/10
6	26/07	29/10
7	21/07	19/10
8	31/07	21/10
9	02/08	18/10
10	20/07	27/10
11	27/07	20/10
12	24/07	21/10

En ce qui concerne les radiosondages, les programmes de lâcher de l'IH et du CNRM figurent dans les Annexes 1 et 2.

3. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

3.1. Réseau sol

Les stations météorologiques automatiques implantées par le CNRM sont entièrement configurables. Pendant HAPEX-SAHEL, les paramètres suivants ont été mesurés :

PARAMETRE	RESOLUTION
Vitesse du vent à 10 m	0.1 m/s
Direction du vent à 10 m	degré
Pression	0.01 hPa
Température à 2 m (sous abri avec ventil. naturelle)	0.01 °C
Humidité (<i>idem</i>)	1 %
Rayonnement total (0.3 - 60 u) montant et descendant	1 W/m ²
Température du corps noir du pyrradiomètre	1 °C
Précipitations	0.1 mm
Sigma T (sur stations 6 et 9)	0.01 °C

Chaque station construit un message toutes les 10 minutes, et toutes les 30 minutes envoie trois messages via le satellite METEOSAT. Pendant l'expérience HAPEX-SAHEL, ces données étaient reçues quelques minutes plus tard à la fois sur le site de l'AGRHYMET à Niamey, et au CNRM à Toulouse.

3.2. Données d'altitude

Trois stations de radiosondage ont été activées pendant HAPEX-SAHEL :

- **la station permanente de radiosondage de l'aéroport de NIAMEY** de la Direction de la météorologie du NIGER (DMN), qui a effectué des sondages systématiques à 0 et 12 TU, données envoyées en temps réel sur le Système mondial de transmission (SMT) de la Veille météorologique mondiale (VMM) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Les caractéristiques géographiques de la station sont les suivantes :

* latitude : 13° 29' N

* longitude : 02° 10' E

* altitude : 222 m

- **la station de l'équipe 4M du CNRM**, implantée sensiblement au milieu du degré carré, près du Peace Corps à HAMDALLAYE, sur un petit plateau dominant le village d'une dizaine de mètres. Cette station avait pour objectifs de fournir des données permettant d'effectuer les corrections atmosphériques sur des données de télédétection provenant de satellites de ressources terrestres (SPOT, LANDSAT, ERS1), et d'effectuer des sondages à cadence intensive, principalement de la couche limite, dans le but d'en dériver des flux représentatifs de l'échelle régionale; sauf exceptions, les journées de sondage coïncident avec les opérations aéroportées. Les caractéristiques géographiques de la station sont les suivantes :

* latitude : 13° 33' N

* longitude : 02° 24' E

* altitude : 242 m

- **la station de l'Institute of Hydrology (IH)**, qui a assuré lors de programmes concertés avec le CNRM des sondages libres, et des sondages basses couches sous ballon captif incluant parfois une mesure de l'écart type des fluctuations de température (Sigma T), grâce à laquelle on peut remonter à des flux sensibles en utilisant la paramétrisation de TILLMAN.

Ces moyens ont été déplacés en cours d'expérience sur différents sites : l'annexe 1 récapitule les différents sites visités, ainsi que les techniques utilisées.

Les stations de radiosondage mises en œuvre tant par la DMN que par le CNRM sont des bancs DIGICORA de VAISALA, associés à des sondes RS80 VAISALA mesurant Pression (P), Température (T), Humidité (U), et localisées grâce au système de radionavigation OMEGA, ce qui permet le calcul du vent. Les deux systèmes diffèrent par le traitement opéré sur les données :

- sur le banc DMN, un filtrage est opéré à la fois sur les données P, T, U et vent. Pendant la majorité de la campagne, le système a tourné avec le plus fort filtrage possible (fenêtre glissante de 250 s); celle-ci a été ramenée à 130 s dans les basses couches à compter du 6-10-1992.
- sur le banc CNRM, un programme spécial (RESEARCH) permet de n'opérer aucun filtrage sur les données PTU. Un filtrage minimum sur les données de vent est appliqué dans les basses couches (fenêtre de 130 s).

Le filtrage opéré sur le banc DMN pour les données PTU a eu souvent pour résultat de générer des suradiabatismes irréalistes sur une grande partie de l'épaisseur de la couche limite : on note au contraire, sur les sondages CNRM et IH opérés en milieu de journée, une couche suradiabatique de quelques dizaines de mètres d'épaisseur, surmontée d'une couche bien mélangée adiabatique jusqu'au sommet de la couche limite.

Les caractéristiques des mesures sur la sonde VAISALA sont les suivantes :

- vitesse ascensionnelle du ballon : environ 300 m par minute;
- Pression : capsule anéroïde
 - résolution : 0.1 hPa
 - précision : < 1 hPa de 1 060 à 100 hPa
 - < 0.5 hPa de 100 à 3 hPa
- Température : élément capacitif
 - résolution : 0.1 °C
 - précision : 0.2 °C
 - gamme : + 60 à - 90 °C
- Humidité : film capacitif
 - résolution : 1 %
 - précision : 3 %
 - gamme : 0 à 100 %
- Vent : la mesure est obtenue à partir de la localisation du ballon par le réseau de radio-navigation OMEGA; la précision sur la vitesse du vent est donnée à 0.5 m/s hors couche limite.

Les données ont été archivées toutes les 5 secondes pour les sondages CNRM, toutes les 10 secondes pour les sondages DMN. Les consignes d'arrêt du sondage étaient les suivantes pour les différents équipements :

- DMN : éclatement (généralement entre 25 et 30 km);
- CNRM : jusqu'à 50 hPa (en fait souvent bien plus haut, régulièrement jusqu'à 25 km);
- IH : tant que la sonde est reçue, c'est-à-dire rarement au-dessus de 8 km.

A noter que les heures de réseaux indiquées pour les sondages CNRM et IH correspondent aux heures de lâcher (TU), alors que la règle OMM est appliquée pour les sondages DMN. Il faut toutefois remarquer que, en raison d'impératifs de transmission, les heures de lâcher à la station DMN de NIAMEY sont H-90 à 105 minutes, alors que la règle habituelle est H-45 minutes.

La station de NIAMEY a réalisé l'ensemble des sondages de 0 et 12 TU pendant l'expérience. La liste des sondages du CNRM est fournie en annexe 2 (151 au total). Les jours d'opération des moyens IH figurent dans l'annexe 1.

Pour ce qui est des sondages DMN et CNRM, les paramètres suivants sont livrés à la base de données :

- * nom du sondage : code comprenant le lieu, la date et l'heure TU de lâcher;
- * chronomètre : nombre de secondes écoulées depuis le lâcher;
- * altitude (en m) calculée avec la formule de Laplace;
- * Pression (en hPa et 1/10);
- * Température (en °C et 1/10);
- * Humidité (en %);
- * Température du point de rosée (en °C et 1/10);
- * Direction du vent (en degrés);
- * Vitesse du vent (en m/s).

Les données manquantes ont été codées selon l'usage par des - 999. A l'aide de ces données, on a calculé pour les besoins des télédétecteurs le contenu intégré en vapeur d'eau sur les épaisseurs d'atmosphère sol à 300 hPa, et sol jusqu'au sommet du sondage. Ces valeurs exprimées en mm (ou $g/cm^2 * 10$) figurent dans l'annexe 2.

4. EXEMPLES DE TRAITEMENT

Pour chaque « jour sélectionné » (voir annexe 2), on a réalisé un quick look d'une page sur lequel figurent trois sondages représentatifs de la journée (en général 05, 11 et 17 TU), dans une représentation type « masse d'air », où les profils de température d'état et de température du thermomètre mouillé sont représentés dans un diagramme altitude - température potentielle. La température correspondant à la courbe en pointillé est la température potentielle saturée ($T_{eta'ws}$: température de la parcelle ramenée à 1000 hPa suivant une adiabatique saturée), alors que l'échelle de température de la courbe en trait plein est la température pseudo-potentielle du thermomètre mouillé ($T_{eta'w}$), qui est la température du thermomètre mouillé ramenée à 1000 hPa également selon l'adiabatique saturée.

Un exemple d'une telle présentation est fourni en figure 1. L'ensemble de ces quick looks figure dans le catalogue des données d'altitude (P. BERGUE and P. BESSEMOULIN: Catalogue of CNRM Radiosoundings during HAPEX-SAHEL).

Pour les mêmes dates, on a également réalisé des figures présentant l'évolution de la structure de la couche limite, tant d'un point de vue thermique (en termes de température potentielle), que d'un point de vue humidité (en termes de rapport de mélange). Un exemple est donné dans les figures 2 et 3.

A noter que dans des conditions où advection et subsidence sont négligeables, ces données permettent le calcul de flux moyens pendant la période séparant deux radiosondages successifs (2 heures), qui est simplement proportionnel à la variation de stock thermique de la couche limite pendant la période considérée.

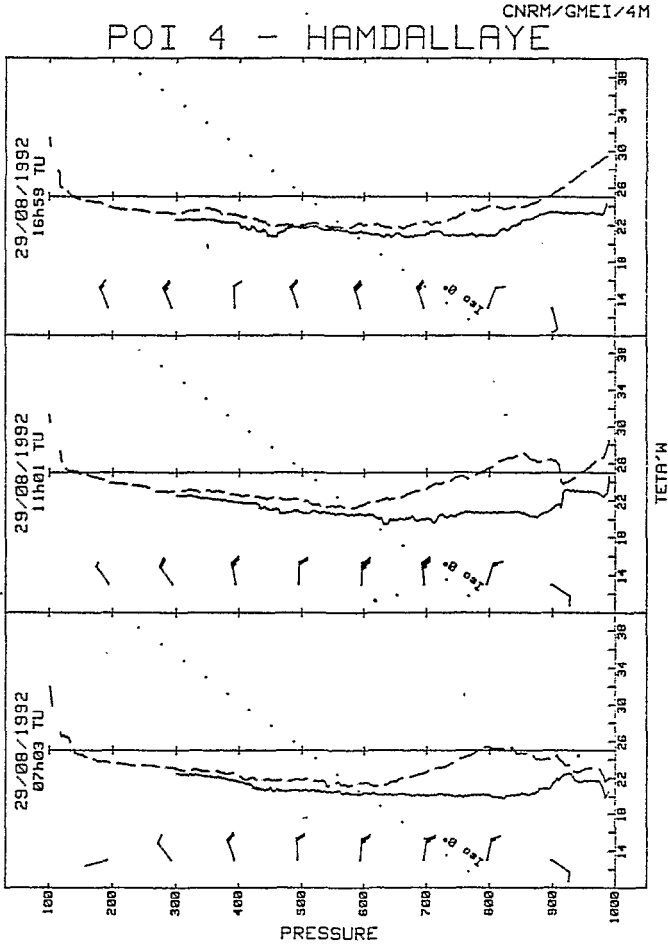


Figure 1. Évolution des profils de température potentielle saturée (courbe pointillée) et de la température pseudo-potentielle du thermomètre mouillé (courbe pleine) au cours de la journée du 29 août 1992.

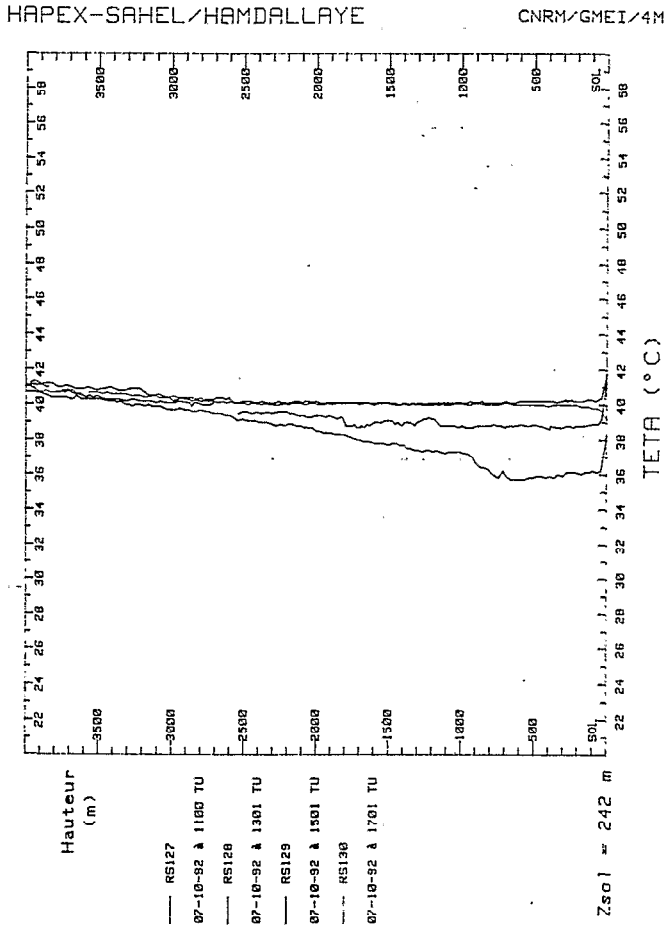


Figure 2. Évolution du profil de température potentielle au cours de la journée du 7 octobre 1992.

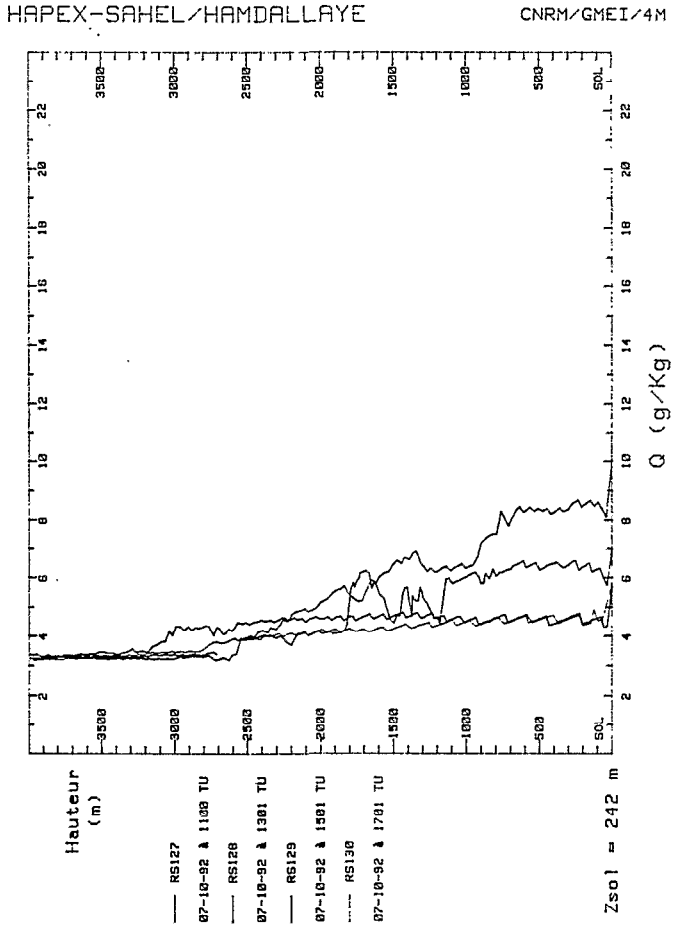


Figure 3. Évolution du profil de rapport de mélange au cours de la journée du 7 octobre 1992.

ANNEXE 1

PROGRAMME DE SONDAGE DE L'INSTITUTE OF HYDROLOGY

DATE	SITE	TECHNIQUE	COMMENTAIRES
21 AUG 92	SSF	RS	
24 AUG 92	SSF	TS	
25 AUG 92	SSF	RS, TS	
27 AUG 92	DB	RS, TS, ST	Peu de données (pluie)
28 AUG 92	DB	TS, ST	Interrompu cf. pluie
29 AUG 92	DB	RS, TS	
01 SEP 92	DB	TS	
02 SEP 92	DB	TS	
03 SEP 92	DB	TS	
07 SEP 92	SSF	TS	Après-midi seulement
08 SEP 92	SSF	TS	
09 SEP 92	SSF	RS	
10 SEP 92	SSF	RS	Interrompu 1320 GMT (pluie)
11 SEP 92	SSF	TS	
12 SEP 92	SSF	RS, TS	
14 SEP 92	SST	TS, ST	
15 SEP 92	SST	RS	Interrompu 1100 GMT (pluie)
16 SEP 92	SST	TS, ST	
17 SEP 92	SST	RS, TS	
18 SEP 92	SST	RS, ST	
21 SEP 92	DG	TS	
22 SEP 92	DG	TS	
23 SEP 92	DG	RS	
25 SEP 92	DG	RS, ST	
26 SEP 92	DG	RS	Sondage toute la nuit fin à 0500 GMT
28 SEP 92	WCT	TS, ST	
29 SEP 92	WCT	TS, ST	
30 SEP 92	WCT	TS, ST	
01 OCT 92	WCT	TS, ST	
03 OCT 92	SSF	RS, ST	
06 OCT 92	SSF	RS	
08 OCT 92	SSF	RS	
09 OCT 92	SSF	RS, ST	

Liste des symboles :

RS : radiosondage

TS : Ballon captif

ST : SIGMA T

Coordonnées géographiques :

1) SSF : Southern Supersite-Fallow Wab/13 °14' N, 02 °15' E

2) SST : Southern Supersite-Tiger Bush Wab/13 °12' N, 02 °14' E

3) DG : Danguéy Gorou/13 °48' N, 02 °01' E

4) WCT : Central West-Tiger Bush Wab/13 °29' N, 02 °35' E

5) DB : Dallol Bosso (Gourmandey)/13 °14' N, 02 °57' E

6) Hamdallaye (CNRM)/13 °33' N, 02 °24' E Altitude :242 m

7) Niamey Airport (DMN)/13 °29' N, 02 °10' E Altitude :222 m

ANNEXE 2

PROGRAMME DE RADIOSONDAGE DU CNRM

N° du jour sélectionné	N° de code du sondage	Date	Heure de lâcher(GMT)	Zmax (m)	VIWC(mm) à : 300h Pa	Jusqu'à Zmax	
	NIHAM92081511	15/08	10.19	26696	38.52	38.61	
G	1	NIHAM92082105	21/08	05.09	21225	42.47	42.73
O	1	NIHAM92082107	21/08	06.59	20841	39.81	40.00
L	1	NIHAM92082110	21/08	09.16	21314	42.26	42.45
D	1	NIHAM92082113	21/08	13.02	10754	41.12	41.19
E	1	NIHAM92082115	21/08	14.59	21818	44.44	44.55
N	1	NIHAM92082117	21/08	17.01	21143	42.57	42.67
	2	NIHAM92082507	25/08	07.01	21947	37.79	37.91
	2	NIHAM92082509	25/08	08.45	24321	27.62	27.82
	2	NIHAM92082511	25/08	11.04	20958	45.58	45.76
	2	NIHAM92082513	25/08	13.07	22076	50.08	50.30
	2	NIHAM92082515	25/08	15.05	20790	48.65	48.80
		NIHAM92082610	26/08	10.03	21494	42.80	42.89
	3	NIHAM92082705	27/08	05.03	10318	40.18	40.21
	3	NIHAM92082707	27/08	07.02	21586	43.90	44.11
	3	NIHAM92082709	27/08	09.01	20870	44.09	44.33
	3	NIHAM92082712	27/08	11.27	20891	44.02	44.21
	3	NIHAM92082713	27/08	13.02	20873	39.64	39.89
	3	NIHAM92082715	27/08	15.01	20909	41.32	41.61
	3	NIHAM92082717	27/08	17.02	20820	41.90	42.15
	4	NIHAM92082907	29/08	07.03	20851	45.55	45.73
	4	NIHAM92082909	29/08	09.02	22315	47.20	47.38
	4	NIHAM92082911	29/08	11.01	21090	45.29	45.45
	4	NIHAM92082913	29/08	13.00	23001	47.05	47.15
	4	NIHAM92082915	29/08	15.01	21291	50.71	50.81
	4	NIHAM92082917	29/08	16.59	20753	51.78	51.85
		NIHAM92083110	31/08	10.03	21106	37.55	37.60
		NIHAM92090110	01/09	10.06	20343	37.50	37.59
	5	NIHAM92090208	02/09	07.29	15729	37.98	38.06
	5	NIHAM92090209	02/09	08.54	16658	39.83	39.93
	5	NIHAM92090211	02/09	11.09	20838	43.21	43.29
	5	NIHAM92090213	02/09	12.57	16654	43.43	43.55
	5	NIHAM92090215	02/09	14.55	16694	45.24	45.52
	5	NIHAM92090217	02/09	16.56	20726	38.25	38.56
		NIHAM92090314	03/09	13.52	17507	38.41	38.56
		NIHAM92090410	04/09	09.35	21680	39.68	39.85
	6	NIHAM92090507	05/09	06.56	20900	39.17	39.35
	6	NIHAM92090509	05/09	08.59	20251	40.00	40.17

G	7	NIHAM92090607	06/09	07.04	19952	42.76	42.90
O	7	NIHAM92090609	06/09	09.04	19084	41.70	41.78
L	7	NIHAM92090611	06/09	10.58	19471	42.64	42.71
D	7	NIHAM92090613	06/09	13.05	19643	43.40	43.47
E	7	NIHAM92090616	06/09	15.28	16746	41.74	41.81
N	7	NIHAM92090617	06/09	17.05	19587	39.65	39.73
	8	NIHAM92090907	09/09	06.59	20794	34.10	34.31
	8	NIHAM92090909	09/09	08.55	17295	36.37	36.50
	8	NIHAM92090911	09/09	10.56	21481	32.48	32.64
	8	NIHAM92090913	09/09	12.54	20891	32.03	32.15
	8	NIHAM92090915	09/09	14.50	18062	28.92	29.00
	8	NIHAM92090917	09/09	16.54	20778	26.57	26.65
		NIHAM92091007	10/09	06.56	16743	33.29	33.47
		NIHAM92091009	10/09	08.58	18867	29.77	29.88
		NIHAM92091011	10/09	10.50	21134	30.33	30.44
		NIHAM92091013	10/09	12.54	17270	47.74	47.88
		NIHAM92091015	10/09	14.55	17913	37.78	37.98
		NIHAM92091017	10/09	16.51	21180	37.00	37.08
G	9	NIHAM92091207	12/09	06.57	21029	39.96	40.19
O	9	NIHAM92091209	12/09	09.02	17094	35.13	35.33
L	9	NIHAM92091211	12/09	10.53	20817	34.46	34.64
D	9	NIHAM92091213	12/09	13.01	18783	36.52	36.67
E	9	NIHAM92091215	12/09	14.55	18125	36.19	36.35
N	9	NIHAM92091217	12/09	16.52	20828	38.14	38.32
		NIHAM92091315	13/09	14.58	20320	35.88	35.93
		NIHAM92091415	14/09	14.56	21696	42.85	42.96
	10	NIHAM92091507	15/09	06.58	20920	47.52	47.70
	10	NIHAM92091509	15/09	08.58	16673	46.49	46.68
		NIHAM92091615	16/09	14.57	21079	37.72	37.83
G	11	NIHAM92091707	17/09	06.57	21142	29.76	29.87
O	11	NIHAM92091709	17/09	08.56	17928	26.87	26.94
L	11	NIHAM92091711	17/09	11.01	20805	28.48	28.55
D	11	NIHAM92091713	17/09	12.56	18548	30.00	30.06
E	11	NIHAM92091715	17/09	14.54	20935	29.93	29.99
N	11	NIHAM92091717	17/09	16.53	20873	27.84	27.92
	12	NIHAM92091807	18/09	06.57	20877	29.37	29.42
	12	NIHAM92091809	18/09	08.55	17667	26.78	26.84
	12	NIHAM92091811	18/09	10.53	21255	29.02	29.10
	12	NIHAM92091813	18/09	13.00	21140	27.69	27.77
	12	NIHAM92091815	18/09	14.59	18452	27.56	27.67
	12	NIHAM92091817	18/09	16.52	20706	32.83	32.88
		NIHAM92092215	22/09	14.35	17342	30.25	30.27

28 Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans Hapex-Sahel : dispositif de mesures au sol et premiers résultats

G	13	NIHAM92092505	25/09	05.01	24434	28.60	28.63
O	13	NIHAM92092507	25/09	07.11	16790	24.72	24.74
L	13	NIHAM92092509	25/09	09.10	16684	24.79	24.80
D	13	NIHAM92092511	25/09	10.58	23882	27.54	27.56
E	13	NIHAM92092513	25/09	13.00	23643	32.55	32.59
N	13	NIHAM92092515	25/09	15.00	23237	30.43	30.45
	13	NIHAM92092517	25/09	17.00	25680	29.43	29.45
D	13	NIHAM92092519	25/09	19.00	25814	30.19	30.22
A	13	NIHAM92092521	25/09	20.57	25181	28.37	28.39
Y	13	NIHAM92092523	25/09	22.58	24206	27.41	27.44
	13	NIHAM92092601	26/09	01.00	24524	28.30	28.33
	13	NIHAM92092603	26/09	03.00	23889	28.44	28.45
	13	NIHAM92092605	26/09	05.01	12943	31.71	31.73
	13	NIHAM92092607	26/09	07.01	25925	33.17	33.20
	13	NIHAM92092609	26/09	09.01	26257	34.22	34.25
	13	NIHAM92092611	26/09	11.01	23817	31.24	31.26
	13	NIHAM92092613	26/09	12.58	24182	30.54	30.56
	13	NIHAM92092615	26/09	15.01	26363	30.21	30.24
	13	NIHAM92092617	26/09	17.00	20955	29.21	29.23
		NIHAM92092807	28/09	07.01	26527	26.89	26.91
		NIHAM92092809	28/09	09.00	25407	25.64	25.66
		NIHAM92092811	28/09	11.00	26291	24.85	24.87
		NIHAM92092813	28/09	13.01	25358	20.74	20.75
		NIHAM92092816	28/09	15.34	16602	21.13	21.15
		NIHAM92092817	28/09	16.59	20763	21.93	21.95
	14	NIHAM92093005	30/09	05.00	25282	35.18	35.35
	14	NIHAM92093007	30/09	07.00	26252	34.91	35.05
	14	NIHAM92093009	30/09	09.01	26751	34.47	34.63
	14	NIHAM92093011	30/09	11.12	26214	35.86	35.98
	14	NIHAM92093013	30/09	13.00	24032	36.81	36.94
	14	NIHAM92093015	30/09	15.01	23376	37.87	38.00
	14	NIHAM92093018	30/09	17.15	20727	36.04	36.19
		NIHAM92100116	01/10	15.47	2644	—	—
G	15	NIHAM92100305	03/10	05.00	25867	29.56	29.61
O	15	NIHAM92100307	03/10	07.00	25234	29.84	29.90
L	15	NIHAM92100309	03/10	09.02	26583	28.74	28.79
D	15	NIHAM92100311	03/10	11.00	23128	27.77	27.81
E	15	NIHAM92100314	03/10	13.21	21504	32.81	32.84
N	15	NIHAM92100315	03/10	14.59	26640	37.86	37.89
	15	NIHAM92100317	03/10	17.00	21172	35.16	35.19
	16	NIHAM92100705	07/10	05.00	21207	25.05	25.08
	16	NIHAM92100707	07/10	07.02	25979	23.92	23.94
	16	NIHAM92100709	07/10	09.00	26260	25.81	25.83
	16	NIHAM92100711	07/10	11.00	22184	23.31	23.34
	16	NIHAM92100713	07/10	13.01	24715	20.11	20.14
	16	NIHAM92100715	07/10	15.01	24530	18.75	18.78
	16	NIHAM92100717	07/10	17.01	24831	17.73	17.75

G	17	NIHAM92100805	08/10	05.02	24787	19.99	20.03
O	17	NIHAM92100807	08/10	07.01	25618	21.67	21.71
L	17	NIHAM92100809	08/10	09.00	26205	22.25	22.29
D	17	NIHAM92100811	08/10	10.59	25440	22.66	22.69
E	17	NIHAM92100813	08/10	13.00	25592	23.50	23.53
N	17	NIHAM92100815	08/10	15.00	24522	23.53	23.56
	17	NIHAM92100817	08/10	16.59	24979	21.41	21.45
	18	NIHAM92100905	09/10	05.07	25002	31.59	31.65
	18	NIHAM92100907	09/10	07.01	26007	33.57	33.62
	18	NIHAM92100909	09/10	09.01	25791	30.69	30.73
	18	NIHAM92100911	09/10	11.00	24400	32.08	32.12
	18	NIHAM92100913	09/10	13.00	26203	35.27	35.31
	18	NIHAM92100915	09/10	15.00	21107	32.54	32.58
	18	NIHAM92100917	09/10	17.00	21275	31.80	31.84
	19	NIHAM92101205	12/10	05.04	25077	38.77	38.84
	19	NIHAM92101207	12/10	07.00	22813	37.55	37.60
	19	NIHAM92101209	12/10	09.00	25087	34.02	34.07
	19	NIHAM92101211	12/10	11.01	25939	34.75	34.80
	19	NIHAM92101213	12/10	13.00	26012	37.49	37.55
	19	NIHAM92101215	12/10	14.59	26183	38.80	38.85
	19	NIHAM92101217	12/10	17.00	21105	38.50	38.55

RAINFALL MONITORING: THE EPSAT-NIGER SETUP AND ITS USE FOR HAPEX-SAHEL

T. LEBEL, J.D. TAUPIN, M. GRÉARD

*Groupe PRAO, ORSTOM
BP 53 X, 38041 Grenoble cedex 9*

ABSTRACT

The EPSAT-Niger (Estimation des Précipitations par SATellite au NIGER) experiment has been designed to improve our understanding of the precipitation systems of Sudano-Sahelian Africa, particularly with the aim of developing operational rainfall estimation algorithms for this region. It is based on the combined use of a very dense raingauge network (107 raingauges over a study area of 16 000 km² in 1992) and C-band weather radar system. The experiment has lasted for five years (1989-1993), the complete setup having operated for four years (1990-1993). Each field campaign was the object of a detailed report (LEBEL *et al.*, 1991, TAUPIN *et al.*, 1992 and 1993). The aim of this paper is thus to summarize the main features of the experimental setup and its evolution since the start of the project. A first analysis of the raingauge data set is also presented. The Sahelian rainfall appears to be highly intermittent both in time and space. Despite significant differences in the seasonal totals for each year, the characteristics of the rainfall events were found to vary little from one year to another. A more detailed study of the rainfall distribution is presented for 1992.

RÉSUMÉ

L'expérience EPSAT-Niger (Estimation des Précipitations par SATellite au NIGER) a été conçue pour améliorer la compréhension des systèmes précipitants de l'Afrique soudano-sahélienne, particulièrement en vue de favoriser le développement d'algorithmes opérationnels d'estimation des pluies sur cette région. Le dispositif est constitué d'un réseau dense de pluviographes à mémoire statique (107 appareils couvrant une surface de 16.000 km² en 1992 associé à un radar météorologique bande C. Il a fonctionné pendant cinq années (1989-1993) dont les quatre dernières au complet. Chaque campagne a fait l'objet d'un rapport détaillé annuel rédigé en français (LEBEL *et al.*, 1991, TAUPIN *et al.*, 1992 and 1993). Le but de cet article est donc uniquement de résumer les principaux traits de l'expérience et de son évolution. Une première analyse du jeu de données pluviographiques est également présentée. La pluie au Sahel apparaît comme fortement intermittente à la fois dans l'espace et dans le temps. Cependant, malgré des différences significatives entre les totaux observés chaque année, les caractéristiques moyennes des événements pluvieux restent stables d'une année sur l'autre. Une présentation plus détaillée de la répartition spatio-temporelle de la pluie est fournie pour 1992.

1. GENERAL OBJECTIVES

The EPSAT-Niger experiment was started even before the experimental design of HAPEX-Sahel was definitely determined. The original goal of EPSAT-Niger, as stated in LEBEL *et al.* (1992) was six fold:

- 1 - providing an understanding of the dynamics of the Mesoscale Convective Systems in the Sahel and the associated space-time distribution of rainfall;
- 2 - studying the influence of ground truth accuracy on the satellite data validation;
- 3 - comparing ground and satellite-based rainfall estimates;
- 4 - investigating the dependence of the spatial variability on the rainfall integration in time;
- 5 - deriving from the above the optimal combination of sensors to be used for rainfall estimation at these scales, taking into account the required degree of accuracy and the size of the elementary zones of estimation;
- 6 - improving the current satellite algorithms or developing new ones by using different types of data or calibration procedures.

For that purpose it was decided that a combination of a dense recording raingauge network and of a weather radar system was necessary. This setup became part of HAPEX-Sahel at the beginning of the long-term monitoring period, in 1991, with the particular objective of providing accurate areal rainfall estimates over the required space (from $1 \times 1 \text{ km}^2$ to $100 \times 100 \text{ km}^2$) and time (from 5 minutes to the rainy season) scales. The regular and complete coverage of the one degree square would also allow to characterize the spatial variability over the entire study area, both during the Intensive Observation Period (IOP) and the long-term monitoring period. Since the measurements began in 1989 and were to continue until 1993, another important objective was to provide the relevant long-term perspective and to observe at least some of the interannual rainfall variability.

2. SPATIAL AND TEMPORAL COVERAGE

2.1. Area of study

The EPSAT-Niger project is located in the Sahel around the town of Niamey (Niger). The relief is fairly uniform, between 175 m and 275 m, and so has little effect on the region's rainfall systems. The mean annual rainfall is about 560 mm (564 for the 1905-1989 period, and 562 for the 1950-1989 period) with a north to south increasing gradient of about 100 mm per degree of latitude, in the order of 1 mm/km (fig. 1). The past twenty years (1968-1989) have seen a lasting drought with an average annual rainfall of 495 mm.

The preliminary study in 1989 covered the Degree Square (DS) bounded by latitudes 13° N - 14° N and longitudes 2° E - 3° E . However as this zone coincides with less than 25% of the working area of the Niamey Airport radar it was decided to extend the network to the west from 1990. While the initial situation only allowed the study of the attenuation patterns across the convective front of the passing squall lines, the extension zone allows the same surveillance of the stratiform part which follows after. Thus the EPSAT-Niger Study Area (SA) was enlarged to a rectangle of latitudes 13° N - 14° N and longitudes $1^\circ 40' \text{ E}$ - 3° E ($\approx 16\,000 \text{ km}^2$; fig. 2). As for the radar, it permits the survey of an area of about $400\,000 \text{ km}^2$, with a quantitative assessment of rainfall possible over an inner circle of 120 km in radius (that is a surface of around $50\,000 \text{ km}^2$).

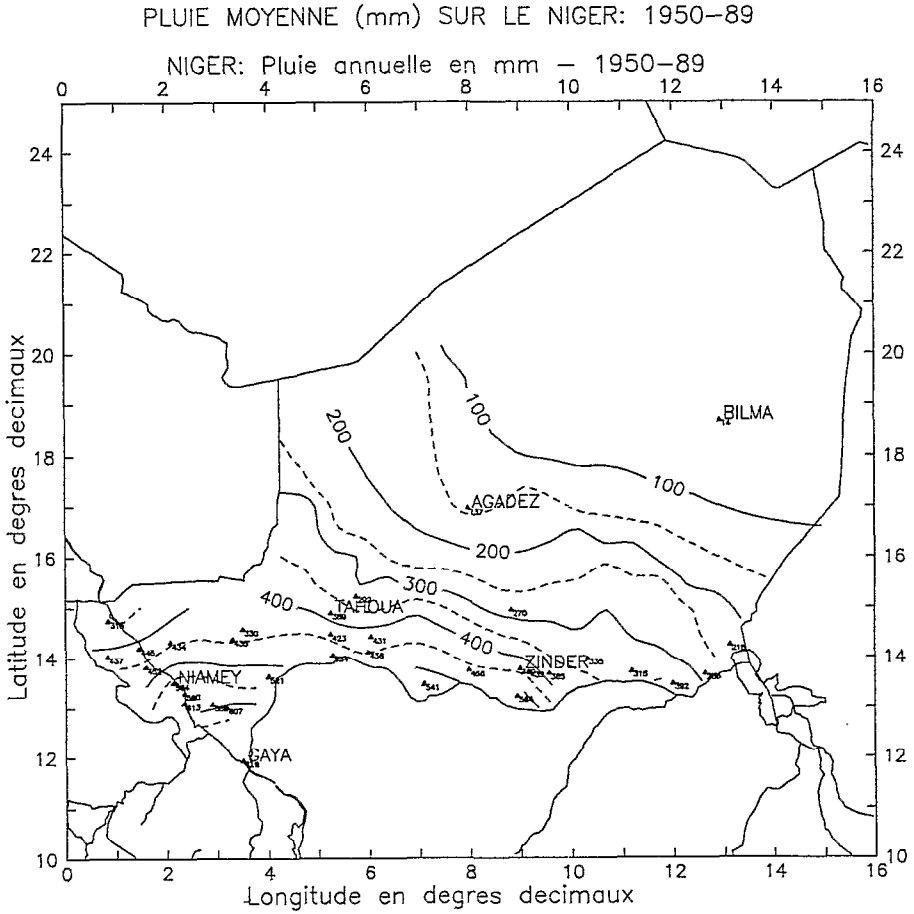


Figure 1. Mean annual rainfall map over the Niger (1950-1989).
The EPSAT-Niger study area is the square surrounding Niamey.

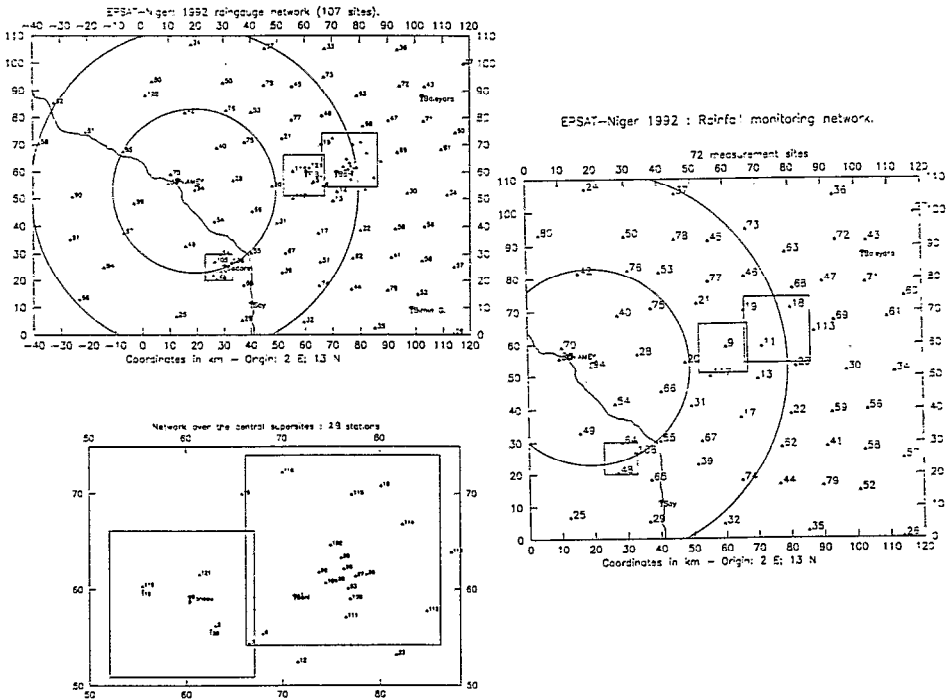


Figure 2. The recording raingauge network in 1992. a: Entire network; b: Target Area network; c: Basic monitoring network. The basic network is evenly distributed and is used in sampling studies at the DS scale, the local effect of the Target Areas oversampling being removed. See definitions of these various networks in the text.

EPSAT-Niger 1993 : Rainfall monitoring network.

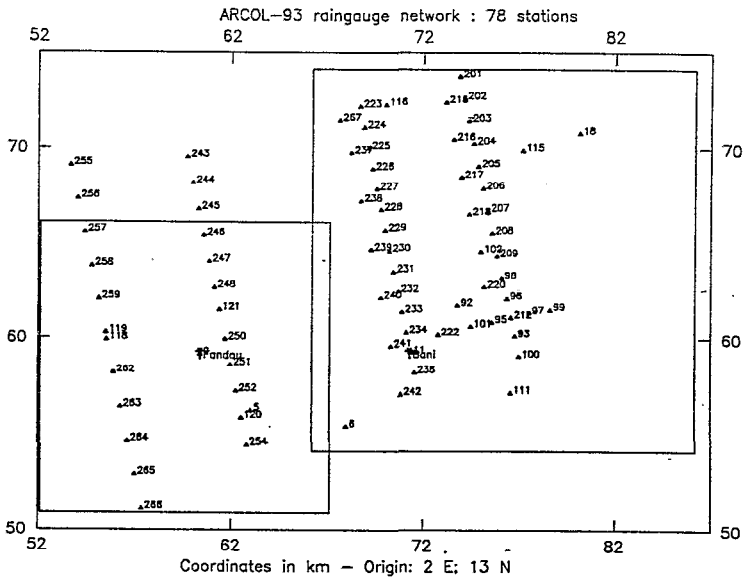
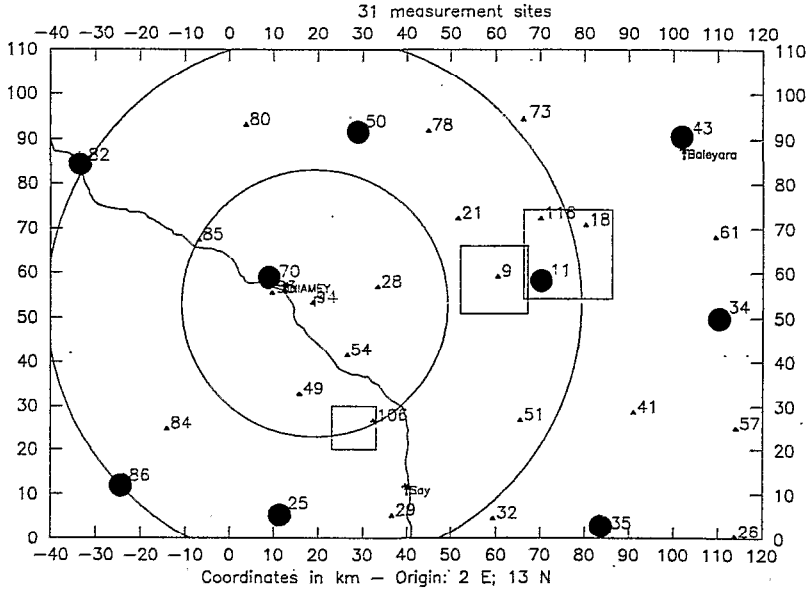


Figure 3. The recording raingauge network in 1993. The stations marked with an heavy circle are intended at being left in operation for the next decade.

$$Z = \int N(D)D^6 dD$$

where D is the diameter of the hydrometeors and $N(D)$ is the probability density function of the number of hydrometeors of diameter D per unit of volume.

Z may be converted into a rainfall intensity (R) averaged over the radar pixel volume, through a so-called Z - R relationship; its general form is:

$$Z = aR^b$$

where Z is given in $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$ and R in mm/h . First values of $a = 200$ and $b = 1.6$ were derived from the raindrop size distribution proposed by MARSHALL and PALMER (1948) for stratiform rainfall. Since then many different sets of values have been proposed for a and b , typically ranging from 150 to 500 for a and from 1 to 2 for b .

The raingauge network provides direct point rainfall measurements over the ENSA (16,000 km^2). Tip-bucket raingauges of cone diameter 400 cm^2 were used. To prevent severe problems of blockage by sand and to allow full protection of the apparatus with 1.2 m fencing, the rims were set at 1.5 m above ground-level. Two sites were equipped with a second ground-level raingauge for control purposes. These were installed in a square pit and surrounded by a slatted metal grid to prevent insplash.

Each tip, being equivalent to 0.5 mm of rainfall, is recorded to the nearest second on EPROM or EEPROM cartridge. Thus it is possible to produce an accurate hyetogram. The recorder batteries are recharged by solar panel either directly or through a regulator. Both systems were used although the first was preferred due to frequent regulator failure during 1989. Initially cadmium-nickel batteries were used, however they were found to be unsuited to the Sahelian climate and so were gradually replaced with lead batteries. Normal working voltage for the apparatus was 12 v but functioning is unaffected as long as the voltage remains greater than 11 v.

3.2. Temporal resolution

Since the raingauge acquisition system records the time of tipping to the nearest second, the temporal resolution is a function of the rainfall intensity, as shown in table 1.

The radar measurement is instantaneous. It takes about one minute at normal speed to complete one revolution. A radar image is thus made of instantaneous reflectivities with a time separation of one minute between the first and the last radial.

Table 1. Time separation (= period of integration), in seconds, between two successive bucket tipplings as a function of rainfall intensity (mm/h).

Rainfall intensity	1	5	10	20	30	60	120	180	360	900
Period of integration	1 800	360	180	90	60	30	15	10	5	2

Table 2. Width (tangential resolution) and altitude (both in metres) of the beam centre for an elevation angle of 0.8° . The sphericity of the earth is taken into account. Distance in kilometres.

Distance	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	150	200	250	300
Width	523	785	1 046	1 308	1 570	1 832	2 093	2 355	2 617	3 140	3 926	5 234	6 542	7 852
Altitude	302	471	652	845	1 049	1 265	1 493	1 733	1 984	2 522	3 417	5 145	7 172	9 482

3.3. Spatial resolution

The raingauge measurement is considered a point measurement, since the area of the collector is only 400 cm².

The radar provides an area-averaged value over pixels of increasing area when moving away from the radar. The radial resolution, as set by the SANAGA digitization procedure, is 500 m when working in the 250 km range mode, and 750 m when working in the 350 km range mode. This resolution is decreased to 250 m when working either in the 50 km or 100 km range modes. The tangential resolution is equal to $r\alpha$, where r is the distance from the radar and α is the beam width in radians ($\alpha = 0.0262$ for the Niamey radar). Since most of the HAPEX-Sahel study area is within the 100 km circle centred on the radar, the tangential resolution of the radar data remains below 2.6 km. It is between 1.3 and 2.0 km over the Central Super-Sites (table 2).

3.4. Temporal sampling

The temporal sampling of the raingauge measurement is equal to the temporal resolution. That is, the raingauge measures every q seconds a value accumulated over the period θ (table 1). θ is not a constant since, as shown in table 1, it varies with the intensity of precipitations.

During rainy events the radar was running permanently. The temporal sampling of the acquisition was set to 15 minutes when the storm was outside the DS, to 10 minutes when the storm was entering the DS, but not still covering the Central Super-Sites, and to 5 minutes when intense rainfall was recorded over the Central Super-Sites (this is the period when sampling at the low elevation angle of 0.8°; sampling at the medium elevation angle of 1.2° was performed every 15 minutes).

3.5. Spatial sampling

The density of the raingauge network varies depending on the zone considered (table 3). The less heavily instrumented zone is the adjoining extension zone to the west of the DS, with an average of gauge area of 400-500 km². Over the DS, one has to distinguish between the basic monitoring network and the Target Area (TA)¹ network (table 4). The basic monitoring network is evenly distributed, its pattern being a regular grid with nodes spaced at about 13 km, that is an average density of one gauge for 170 km². The location and the extension of the TA changed between 1990 and 1992. In 1990 it was a 400 km² covered by 18 gauges. The minimum distance between gauges was decreased to 1 km at the centre of the TA. In 1991 the TA was moved 10 km to the east and 5 km to the west so as to coincide with the East Central Super-Site (ECSS). The number of gauges and the pattern of their distribution were kept. In 1992 the TA was enlarged to the west so as to include both the ECSS and WCSS (West Central Super-Site). Several sub-target areas may be identified (table 5), labelled C0 (875 km²; 29 gauges; 30.2 km² per gauge) to C4 (25 km²; 9 gauges; 2.8 km² per gauge). The raingauge distribution is shown for 1992 in figure 2 and for 1993 in figure 3.

¹ Whereas the Super-site refers to a concept defined specifically for HAPEX-Sahel (GOUTORBE *et al.*, 1994), the Target Areas correspond only to a local increase of the raingauge network density so as to provide better insight into the small-scale rainfall variability. Changes were made in 1991 and 1992 in the network design over the main Target Area so as to make it coincide with the Central Super-site.

Table 3. The raingauge network over the EPSAT-Niger study area (16,000 km²).

	1990	1991	1992	1993
Total number of sites	93	96(99)*	107	107
Basic Network	79	88	82	31
Extension zone only : 1° 40' - 2° 00' E/ 13° 00' - 14° 00' N (4,000 km ²)				
Number of sites	10	8	10	4
Area per site (km ²)	400	500	400	1000

* 3 stations in Ouallam, north to the 14° latitude boundary.

Table 4. The raingauge network over the one Degree Square (Reference Zone).

Reference zone (area = 12 000 km ²)				
	1990	1991	1992	1993
Total number of sites	83	88	97	103
Number of sites of the basic network	69	70	72	27
Area per site (km ²) (basic network)	174	171	166	444
Target zone (area = 400 km ² ; coordinates changed between 1990 and 1992)				
Number of sites	18	18	19	
area per site (km ²)	22	22	21	NA

Table 5. The raingauge network over the Super-Sites in 1992.

	East Central Super-Site			Central (East + West)*		South
	C4 (5 x 5)	C3 (13 x 13)	C2 (20 x 20)	C1 (30 x 25)	C0 (35 x 25)	S0 (10 x 10)
Coordinates : EPSAT	X: 73.7 - 78.7 Y: 60.0 - 65.0	X: 70.0 - 83.0 Y: 59.3 - 72.3	X: 66.2 - 86.2 Y: 54.1 - 74.1	X: 57 - 87 Y: 50 - 75	X: 52 - 87 Y: 50 - 75	X: 23 - 33 Y: 20 - 30
Geographic Longitude (X)			2°36. 77' 2°47. 88'	2°31. 61' 2°48. 32'	2°28. 83' 2°48. 32'	2°12. 75' 2°18. 30'
Latitude (Y)			13°29. 21' 13°40. 00'	13°26. 96' 13°40. 50'	13°26. 96' 13°40. 50'	13°10. 80' 13°16. 20'
Area (km ²)	25	169	400	750	875	100
Numb. of gauges	9	15	19	27	29	5
Area/gauge (km ²)	2.8	11.3	21.1	27.8	30.2	20

* EPSAT coordinates of the WCSS: X = 52.1 - 67.1; Y = 50.9 - 66.1

Table 6. The periods of operation of the EPSAT-Niger raingauge network, and the number of stations available for the calculation of the seasonal rainfall. The rainy season is taken as the period 15-04-15-10, except in 1991, where the storm of the 14-04 is included, and in 1992, where the two storms observed the 10-04 are also included. For the basic network (last column), the first number is for the DS only, while the second is for the whole SA.

Year	End of installation	First rain (> = 1 mm)	First DS event	Last DS event	Total number of stations rainy season	Number stations basic network, rainy season
1990	15.05	19.05	28.05	17.09	74	60 (60)
1991	15.05	14.04	14.04	4.10	52	36 (41)
1992	1.05	7.04	10.04	15.09	98	70 (80)
1993	15.04	27.04	30.05	9.10	99	26 (30)

Table 7. Proportion of the seasonal rain falling during the DS events. The raw values, corresponding to the bucket tipplings are given in column 3 (DS-averaged, computed by kriging of the point measurements), and then corrected by the annual average bottle/bucket ratio in order to obtain values (R1) that are comparable to the reference bottle seasonal rainfall (R2).

Year	Total number	CER: Cumulative Event Rainfall	Correction factor bucket -> bottle	Corrected CER (R1)	Seasonal rainfall(R2)	R1/R2 (%)
1990	39	408 mm	- 8.6%	373 mm	396	94
1991	47	520 mm	- 5.4%	491 mm	522	94
1992	48	505 mm	- 4.5%	482 mm	511	94
1993	38	424 mm	- 5.0%	403 mm	460	88
Total	172			437 mm	472	93

3.6. Data collected

3.6.1. Raingauge data

At the end of the rainy season, all the raingauges but a dozen are removed from the field in order to be checked in the laboratory. This also protects the gauges from the dust and the heat of the dry season, and lowers the gardien costs. Possible rain during the dry season is monitored by the dozen gauges left permanently in the field (see fig. 3). The installation for the next rainy season is started in March so as to get the entire network in operation for mid-April: the long-term (1905-1989) statistics of the Niamey meteorological station show that 99% of the rainfall is recorded between the 15th of April and the 15th of October, and 95% between the 15th of May and the 15th of October. In 1991, the installation started latter and the network was fully operational only in mid-May. Unluckily the rainy season started especially early that year: 40 mm of rainfall was recorded over the DS between the 15th of April and the 15th of May, that is 8% of the seasonal total. Table 6 summarizes the periods of operation of the network for each year.

A total of 172 rainy events were observed over the period 1990-1993. A rainy event is defined with respect to the network observations as follows: at least 30% of the raingauges in operation must record rainfall over the event period; at least one station must record more than 2.5 mm of rainfall; the rainfall must not stop over the entire network for longer than half an hour (otherwise the event is considered to have ended at the time when it stopped at the station(s) having recorded the last rainfall). Obviously this definition is contingent upon the area of the study zone (these

events will therefore be referred to as "DS events" thereafter) as well as the network density. Nevertheless, the EPSAT-Niger network appeared to be dense enough so as to give a good estimation of the rainy areas. When simulating networks of smaller density in 1990, 1991 and 1992, down to the density of the 1993 basic network, the number of DS events changed only by one or two units. On the other hand the SA is relatively small as compared to the extension of the Sahelian Mesoscale Convective Systems (MCS's), which often cover several hundred of kilometres in the south-to-north direction, while affecting a still larger area in the east-to-west direction (these systems move westward at an average speed of 60 km/h and their life time is normally of several hours). Consequently the "DS events" account for most of the DS rainfall as may be seen from table 7. Only MCS's which circulate far to the north or south and that affect only the DS at its margins, or very local convection do not belong to the DS events sample. The characteristics of the DS events and their comparison with those of what may be defined as "point events" are further studied in section 5. The comprehensive list of the 172 events is given in appendix 2.

3.6.2. Radar data

Radar data were acquired only on an alert-to-storm basis. The protocol called for the DMN personnel on duty to inform the EPSAT-Niger team when a storm was approaching the DS: Generally this procedure proved to be efficient, except for a few cases (especially in 1990 and 1991). In addition to these 'storm miss', failures of either the external power supply or of various components of the radar system were other causes of no radar acquisition. Major breakdowns, leading to an early stop of the acquisition campaign, were undergone in 1990 (13 September) and in 1993 (19 August). In spite of these various problems, about two thirds of the major DS events were recorded by the radar. In 1992 37 acquisition were carried out, 26 of them corresponding to a major DS event. The radar was out of operation until the 20 of June. Thus, the 10 first rainy events of the season were missed. After that date all the major events except three (30 June, 31 July, 30 August) were recorded by the weather radar system. Table 8 gives a summary of the radar operations from 1990 to 1993 (see also LEBEL *et al.*, 1991, TAUPIN *et al.*, 1992 and TAUPIN *et al.*, 1993b).

Table 8. The periods of operation of the weather radar.

Year	Period of full operation	Total number of events recorded	Number of DS events recorded
1990	8.6 - 13.09	25	17
1991	7.6 - 17.09	26	22
1992	20.6 - 14.09	37	26
1993	29.5 - 19.08	24	18

4. MEASUREMENT ACCURACY

The raingauge measurement is prone to three types of errors: i) the bucket tipping occurring for a rain depth slightly different from the normal value of 0.5 mm, resulting in an overestimation or underestimation of the cumulative rainfall; ii) a possible drift of the internal clock of the recording system, resulting in time lags between the raingauges and thus a distorted view of the rainfall field at small time steps; iii) the aerodynamic effect of the sensor onto the airflow around it, resulting generally in an underestimation of the precipitation.

The first type of error is checked by collecting the rain water after tipping in a bottle. The bottle cumulative rainfall depth was compared, each year and for all the stations, to the bucket tipping recorded rain depth. In average it was found that the bucket values overestimated the bottle value

by a factor 1.05 (TAUPIN *et al.*, 1992, 1993b). This is due to an early tipping of the bucket, caused by the wind and/or high rainfall intensities. To account for this overestimation, two data bases were developed: one at the time step of 24 hours is bottle-corrected, thus eliminating the bucket-induced errors in the computation of cumulative rainfall for time steps equal or greater than one day; the other at a time step of 5 minutes is not corrected since it is impossible to determine which correction to apply (it should not be a constant, since it likely depends on the rainfall intensity).

The second type of errors is easily corrected since it was verified that, when they exist, the drifts of the internal clocks are constant. The exact time is noted when installing the EEPROM memory and when unloading it. A linear correction of all the tipping times recorded on the memory is then applied in the laboratory when processing it.

The last type of errors is never known exactly. For a given gauge design, it mostly depends on the site of the gauge, the wind speed and the rainfall intensity. To obtain an estimate of this error two ground raingauges were installed beside two standard EPSAT-Niger raingauges at Banizoumbou (station N° 11) and Kollo (station N° 54). The comparison between the ground and the 1.5 m measurements showed no significant differences between the two, neither at the 5 minutes time step, nor at the event time scale (TAUPIN *et al.*, 1993, TAUPIN and LEBEL, 1994). At Banizoumbou for instance the equation of the regression curve between the event ground rainfall (Y) and the event 1.5 m rainfall (X) is: $Y = -0.19 + 1.006 X$, with a determination coefficient r^2 equal to .996 ($n = 33$). Other comparisons carried out on the Southern Super-Site, using ground gauges set up by the team of the Institute of Hydrology of Wallingford, brought in similar results, with the exception of one site where differences of up to 30% were measured for some periods. A water balance study carried out by GAZE (1993), using the soil moisture measurements available to him concluded that the EPSAT-Niger value was the most realistic of the two measurements. Other comparisons were carried out with the data of the CNRM/4M team of Meteo-France (each unit of the 12 automatic weather stations network was collocated with an EPSAT-Niger gauge, see BESSEMOULIN and PUECH, this volume, for details), showing no great differences between the EPSAT-Niger and 4M measurements.

Regarding the radar, the possible sources of error are numerous (see WILSON and BRANDES, 1979, and ZAWADZKI, 1984, for a review). At this stage of the data processing no meaningful figure on the accuracy of the radar derived rainfall estimates can be given.

5. PRELIMINARY ANALYSIS OF THE RAINGAUGE DATA SET

5.1. Rainfall climatology during the long-term monitoring period

5.1.1. Seasonal rainfall

The rainy season is defined as the period extending from the 10th of April to the 10th of October. In average over the period 1990-1993, 99% of the annual rain fell during that period, which is in agreement with the long-term statistics of the Niamey meteorological station. As already mentioned in section 3.6, the number of available measurements of the point seasonal rainfall is function of the date of completion of the raingauge installation. It is also a function of the possible lacunae in the records. Nevertheless, the bottle cumulative rainfall may allow to make up for buckets rainfall lacunae. The installation of the network was generally not completed until the beginning of May. In 1990 and 1992, this did not prevent from knowing the seasonal rainfall at most stations (74 in 1990, 98 in 1992, table 6). In 1991 the rainfall started earlier and the seasonal rainfall was measured at only 52 stations. In 1993 the installation of the basic

network of 31 stations was completed by the 10th of April. The statistics of the seasonal rainfall for the stations of **the basic network over the DS** are given in table 9 (the stations of the extension zone and of the target area are put aside so as to obtain a regular sampling of the DS). In 1992 for instance the seasonal rainfall is available at 98 stations (out of a total of 107 gauges), 70 of which are part of the DS basic network (the seasonal rainfall is thus missing at only 2 stations of the DS basic network).

The area-averaged values over the DS and the super-sites are also given in table 10. The DS average over the period 1990-1993 (472 mm) is a little smaller than the 1968-1989 average (495 mm) of the Niamey station, 1968-1989 being a dry period (25% less rainfall than during the years 1950-1967).

The year 1990 was especially dry with an average over the DS of less than 400 mm. The years 1991 (522 mm) and 1992 (511 mm) were wetter than the 1968-1989 period, slightly in deficit as compared to the 1950-1989 long-term average (566 mm) recorded at the Niamey-Aéroport station. The west and east central super-sites recorded a 1990-1993 average (481 and 479 mm) close to the DS average and the southern super-site recorded an expectedly higher value (538 mm). The ECSS rainfall was within 10 mm of the DS averages for each year except in 1991, where it was 38 mm (7%) greater than the DS average.

The rainfall observed over the DS reflected the general trend over the entire Niger, with the years 1990 and 1993 being dry and the years 1991 and 1992 receiving a reasonable amount of rain (fig.4). In 1991 the rainfall over the country was globally equivalent to the 1950-1989 average and the DS was comparatively drier even though it was the wettest of the four years of HAPEX-Sahel.

TAUPIN *et al.* (1993) have evidenced that the spatial variability of the seasonal rainfall was much larger than generally expected. Most of the variability is concentrated in the first 30 to 50 kilometres, so that two stations separated by more than 50 kilometres are, in average, uncorrelated. No systematic pattern of low or high rainfall was observed, and the areas of maximum and minimum rainfall changed from one year to another (fig. 5). Gradients of more than one hundred mm of rain over a few kilometres have been recorded: 150 mm over 6 kilometres in 1990 in the ECSS; 320 mm over 27 kilometres in 1991 (TAUPIN *et al.*, 1993), 275 mm over 9 kilometres in 1992 in the SSS (see fig. 11 below). Each year the minimum value recorded over the network was half of the maximum.

Table 9. Statistics of the point rainfall values recorded by the basic network stations of the DS over the rainy season (10-04 - 10-10), compared to the statistics of the Niamey Aéroport station (N.A.) for three periods. Rainfall values are in mm.

Sample	N. Stat. n	Mean (μ_p)	S.D. (s)	Mini (m)	Maxi (M)	C.V.(%) (s/ μ_p)	(M-m)/ μ_p (%)	Niamey Aero/ORST.
EPSAT 1990	60	396	63	292	659	16,0	93	474/399
EPSAT 1991	36	523	95	341	725	18,2	74	434/541
EPSAT 1992	70	513	71	389	782	13,9	77	607/488
EPSAT 1993	30	459	83,9	315	622	18,6	65	399/447
N.A. 50-89	40	566	123	294	980	22	114	Median: 549
N.A. 50-67	18	654	145	454	940	22	74	Median: 627
N.A. 68-89	22	495	108	294	689	22	80	Median: 499

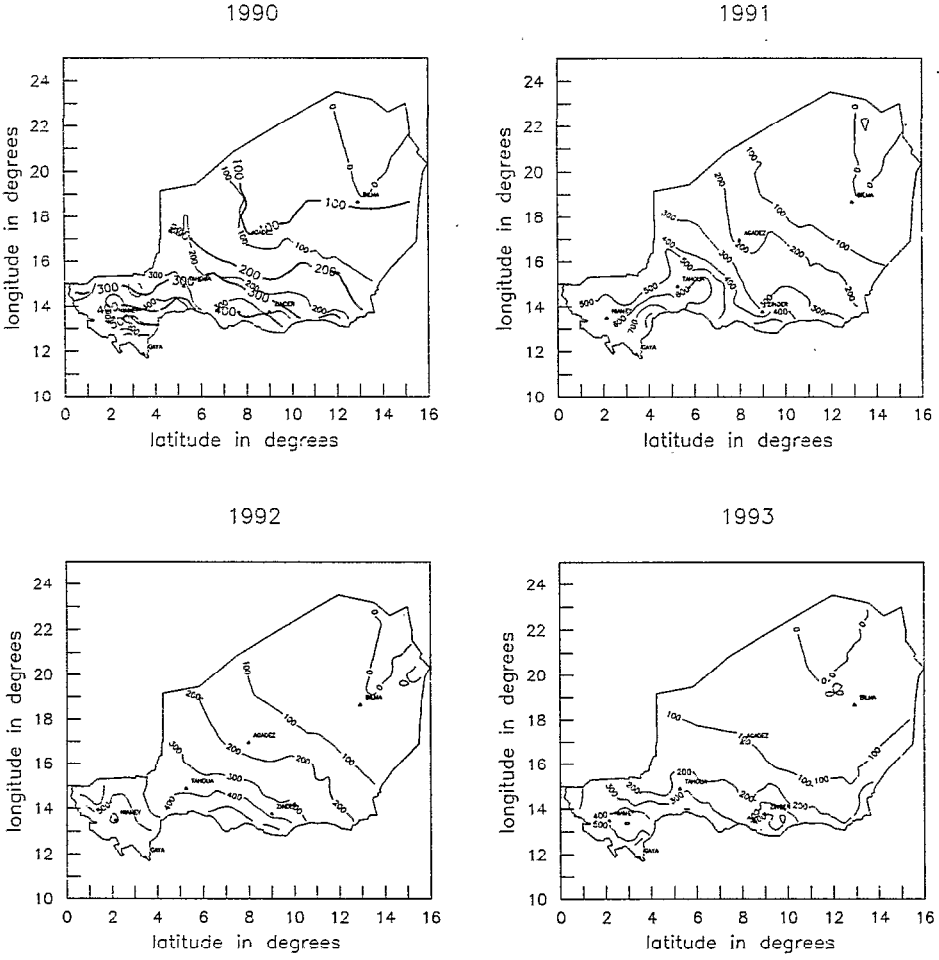


Figure 4. Annual rainfall over the Niger for each year of the period 1990-1993. Overlaid on the 1990 map are the isohyets of the mean annual rainfall over the dry period 1968-1989 (thick lines). The 1990 isohyets are shifted southward as compared to the 1968-1989 isohyets indicating a dry year all over Niger. In 1991 the isohyets are shifted northward and in 1992 as well, even though less markedly. 1993 was drier than both 1990 and the mean over 1968-1989.

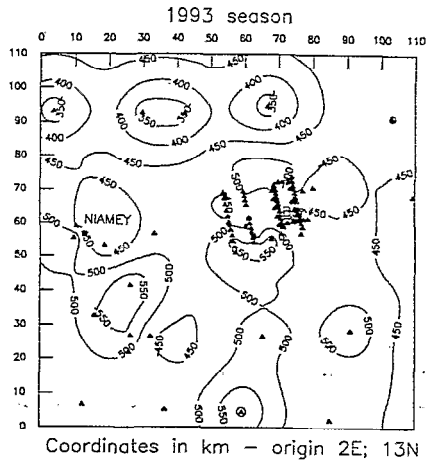
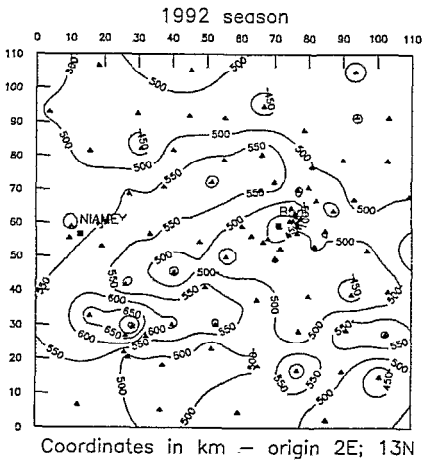
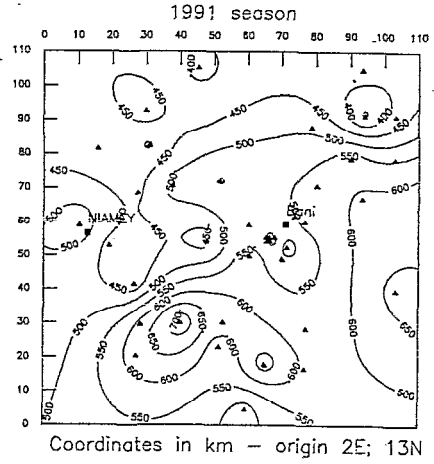
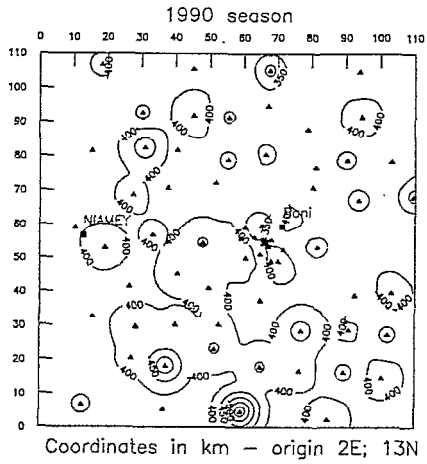


Figure 5. Isohyets of the seasonal rainfall over the EPSAT-Niger study area (1990, 1991, 1992, 1993).

Table 10. Area-averaged seasonal rainfall (10-04 - 10-10) over the DS and the Super-Sites, computed by kriging of the point values. Areal estimates are given with their standard deviation of estimation error. The point value recorded at Banizoumbou is given to illustrate the spatial averaging effect.

	H_p (basic net.)	Mean of all stations	DS (12,000 km ²)	SSS (100 km ²)	WCSS (225 km ²)	ECSS (400 km ²)	Banizoum. (ECSS)
1990	396	405 (74)	396 ± 2	419 ± 23	386 ± 15	385 ± 15	402
1991	523	524 (52)	522 ± 4	627 ± 19	537 ± 16	560 ± 14	494
1992	513	513 (98)	511 ± 3	603 ± 10	493 ± 14	500 ± 6	410
1993	459	477 (99)	460	502 ± 13	501 ± 6	470 ± 3	458
Mean	473	480	472	538	481	479	441

Table 11. Statistics of the rainfall events (rainfall in mm; durations in hours: minutes). Mean ± Stan. Dev. are the mean and the standard deviation of the series of the DS-averaged event rainfall, obtained by kriging of the bucket values. The corrected values are obtained after correcting the bucket value by the bottle/bucket ratio given in table 7.

	Number	Mean and Stan. Dev.	Corrected Values	Minimum over the DS	Maximum over the DS	Maximum point value	Minimum duration	Maximum duration
1990	39	10.5 ± 8.1	9.6 ± 7.4	0.9	27.2	103	2:50	11:10
1991	47	11.2 ± 8.9	10.5 ± 8.4	0.5	36.4	162	2:10	16:40
1992	48	10.5 ± 9.9	10.0 ± 9.5	0.5	43.4	92	1:35	11:45
1993	38	11.1 ± 9.0	10.5 ± 8.5	0.2	37.3	96	0:30	9:05

Table 12. Proportion of the seasonal rainfall and of the number of events accounted for by the storms covering: a) 70% (or over) of the study area; b) 90% (or over) of the study area. For the percentage of rainfall, two figures are given: the first is with respect to the rain associated to DS events, while the second is with respect to the total DS-averaged seasonal rainfall (hence including rainfall associated to isolated, or small extension, showers).

	70% of raingauges recording rainfall				90% of raingauges recording rainfall			
	% Number	% Rainfall	Average 70-100%	Average 30-70%	% Number	% Rainfall	Average 90-100%	Average 30-90%
1990	60	84-79	14,7	3,8	32	61-57	19,6	5,9
1991	72	91-85	13,2	3,6	39	65-61	17,6	6,0
1992	60	89-84	16,2	3,0	33	64-60	20,9	5,9

5.1.2 Rainy events

The concept of DS event has been defined above (section 3.6.1). It allows to identify the storms that are significant in terms of their spatial extension. From table 7 it is seen that those DS events account for a stable proportion of the seasonal rainfall (94-95% each year). The DS event rainfall is the DS-averaged rainfall, accumulated over an entire event. It will be further denoted as $R_{DS/E}$, the point event rainfall being noted $R_{p/E}$. The mean of $R_{DS/E}$ for all the events of a given season is stable from one year to another. Some elementary statistics are given in table 11. Note that the maximum point value (the maximum event cumulative point rainfall measured over the whole network for all the events of a given season) seems to be loosely connected to the maximum $R_{DS/E}$. The strongest value of $R_{DS/E}$ was observed in 1992 (43.4 mm), the very same year where the maximum of $R_{p/E}$ was the smallest. The typical duration of a DS event is a few hours. It has never exceeded 17 hours.

A more precise classification of the rainy events was carried out based on their spatial extension as measured from the gauge network (fig. 6). Between 80 and 85% of the seasonal rainfall (85-90% of the event seasonal rainfall) is produced by storms affecting more than 70% of the study area, even though they represent only 60% of the number of DS events. As for events affecting more than 90% of the study area, they still account for about 60% of the seasonal rainfall (65% of the event seasonal rainfall), despite the fact that they represent only one third of the DS events. Moreover for this category of storms the average of $R_{DS/E}$ is almost twice as large as that of the whole sample (18-20 mm against 10.5 mm, table 12).

Additional information about the 1990 and 1991 campaigns may be found in LEBEL *et al.* (1991) and TAUPIN *et al.* (1992).

5.2. Some features of the rainfall distribution in 1992

5.2.1. Distribution in time

The 1992 seasonal rainfall was relatively abundant over the DS, at least by the standards of the past 20 years (fig. 7). However its distribution in time along the season was far from normal, with a drought until mid-July and heavy rainfall concentrated after the 15th of August, as may be seen from the daily rainfall hyetograms given for six stations in figure 8 and the list of rainfall events given in appendix 2. The isohyetal maps of the 10 day rainfall (fig. 16 at the end of this paper) show that, until the end of June, the centre of the DS has been regularly drier than the average except for the last ten day period. This is especially true for the period 11-05 - 31-05 and for the period 11-06 - 20-06. The east was also generally drier than the average, except during the period 01-06 - 10-06. Note that during this early part of the rainy season the north of the DS received more rain than the central super-sites (see the 21-05 - 31-05 and 01-06 - 10-06 maps). The first ten day period of July was unusually dry everywhere, with nevertheless some rain in the south. The period 11-07 - 31-07 was rainy, but again the centre of the DS received less rainfall than most of the study area. The 20-07 was the starting of a dry period in the north that will last for one month. The rainfall for the period 01-08 - 20-08 was far below normal with only the south-western and south-eastern parts of the DS receiving more than 50 mm. Then the rainfall became less abundant in the south than in the north for the remaining of the rainy season. The third ten day period of August marked the beginning of a series of rain events that were especially productive over the central super-sites, as may be seen from the graph of the scaled cumulative rainfall over the ECSS shown in figure 9. The rainy season virtually ended the 15th of September (last DS event), even though some isolated showers were still observed until early October. The concentration of most of the major rain events over the central super-sites after mid-August resulted in heavy surface runoff (DESCONNETS *et al.*, this volume).

5.2.2. Rainfall over the super-sites

The areal seasonal rainfall over the two central super-sites (493 mm over the WCSS and 500 mm over the ECSS) was only slightly inferior to the DS average rainfall (511 mm, table 10). This is the result of the heavy rainfall that was observed during the IOP, which was much stronger over the centre of the DS than elsewhere. The contribution of the IOP to the seasonal total is 49% for the WCSS, whereas it is 38% for the DS, and 31% for the SSS. In fact, whereas the SSS recorded 100 mm more rainfall than the central super-sites over the season (fig. 10), its deficit relative to the WCSS was about 50 mm during the IOP (fig. 11). It should also be noted that the absolute point maximum seasonal rainfall (782 mm) was recorded in the SSS (Diokoti), and that the minimum value of the ECSS (Banizoumbou: 410 mm) is hardly larger than the absolute minimum (389 mm

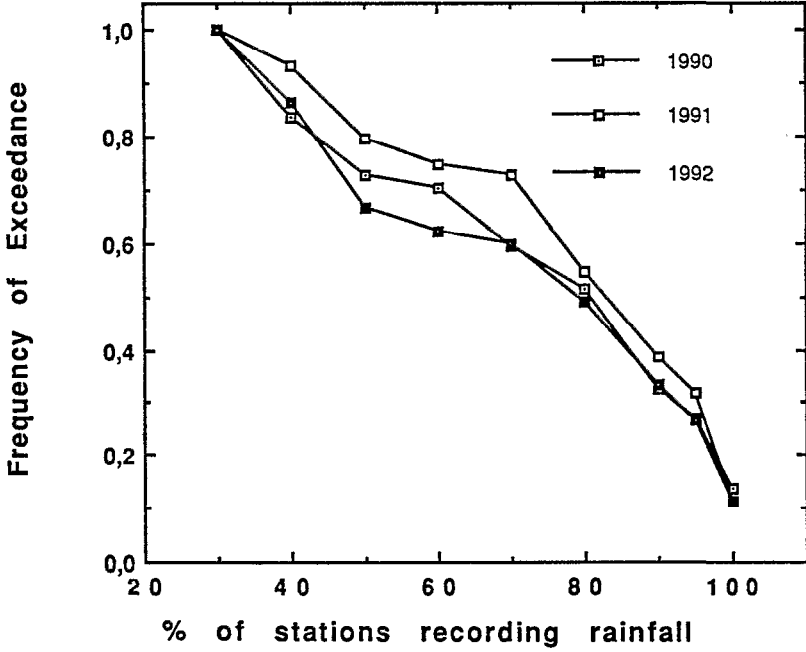


Figure 6. Cumulative distribution of the number of rainy events as a function of their spatial extension.

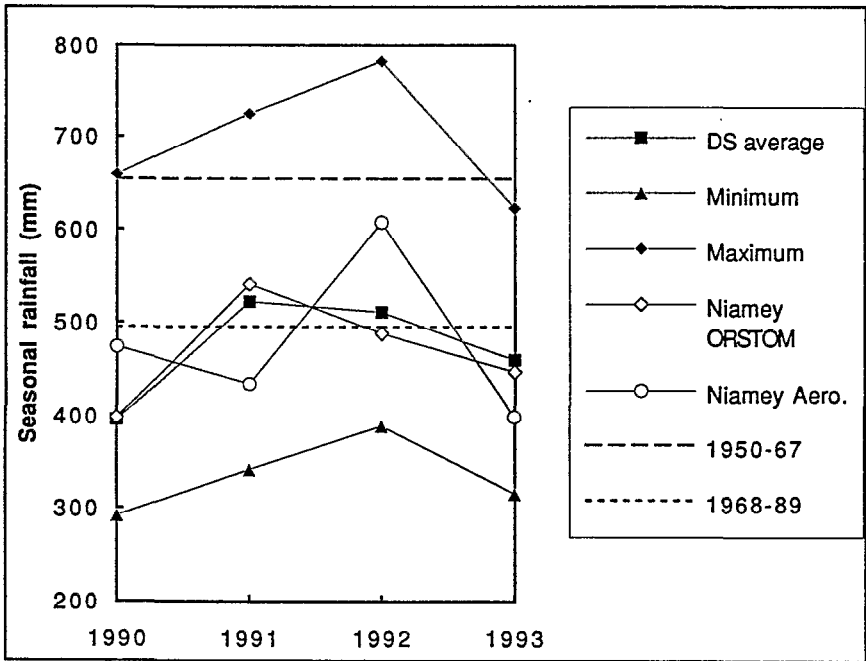


Figure 7. Seasonal rainfall 1990-1993: DS average and extrema.

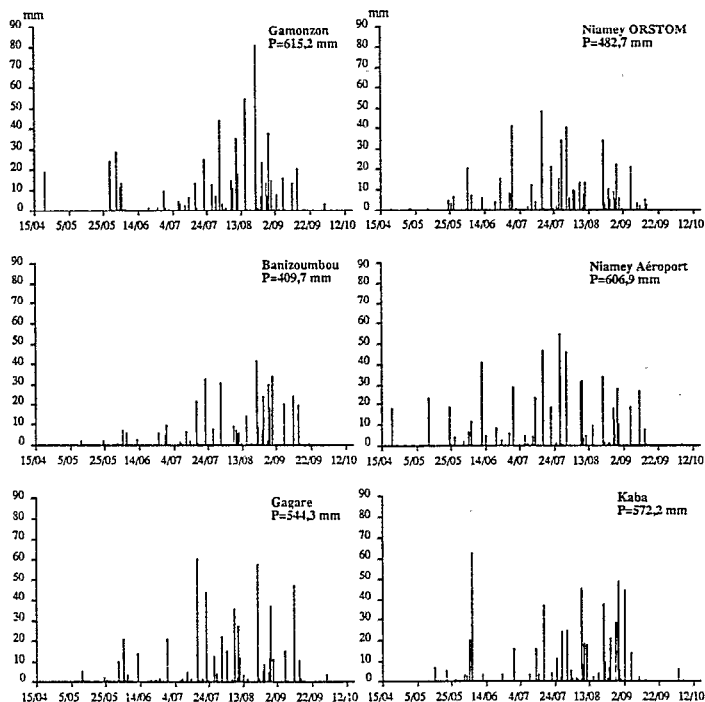


Figure 8. Daily rainfall at six stations in 1992.

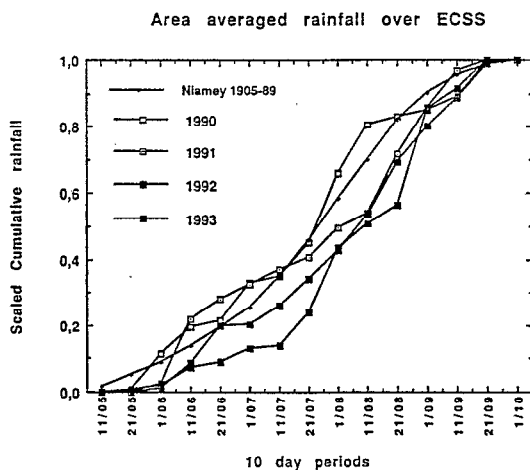


Figure 9. Cumulative time distribution of the 10 day rainfall over the East Central Super-site.

at Tierendji). The rainfall gradients over the SSS were especially steep, whether considered over the whole season or during the IOP only (fig. 10 and 11). Another interesting feature of the 1992 rainy season is that the minimum total was observed in the south of the DS. This confirms earlier statements by LEBEL *et al.* (1991) and TAUPIN *et al.* (1992) that, for a given year, the south-to-north rainfall gradient is strongly noised by a local variability independent of the latitude.

5.2.3. Rainfall events

The rainy season was made of 48 DS storms accounting for 94% of the seasonal DS rainfall (table 7). Thus, the isolated convective storms and the MCS's passing over the margins of the DS contributed weakly to the DS rainfall. The mean DS event rainfall was similar to that of the other years, but the variability was greater. The coefficient of variation of the series of DS event rainfall was close to 1.0 in 1992, whereas it was around 0.8 in 1991 (table 11). A Pearson III distribution (fig. 12) was fitted to the experimental event rainfall distribution. The distribution of the point event rainfall ($R_{p/E}$) at Diokoti is also shown in figure 13 and can be compared to that of the DS event rainfall $R_{DS/E}$ (the event separation criteria for the point series are: rainfall must exceed 1 mm and 30 minutes of no rainfall must separate two consecutive events).

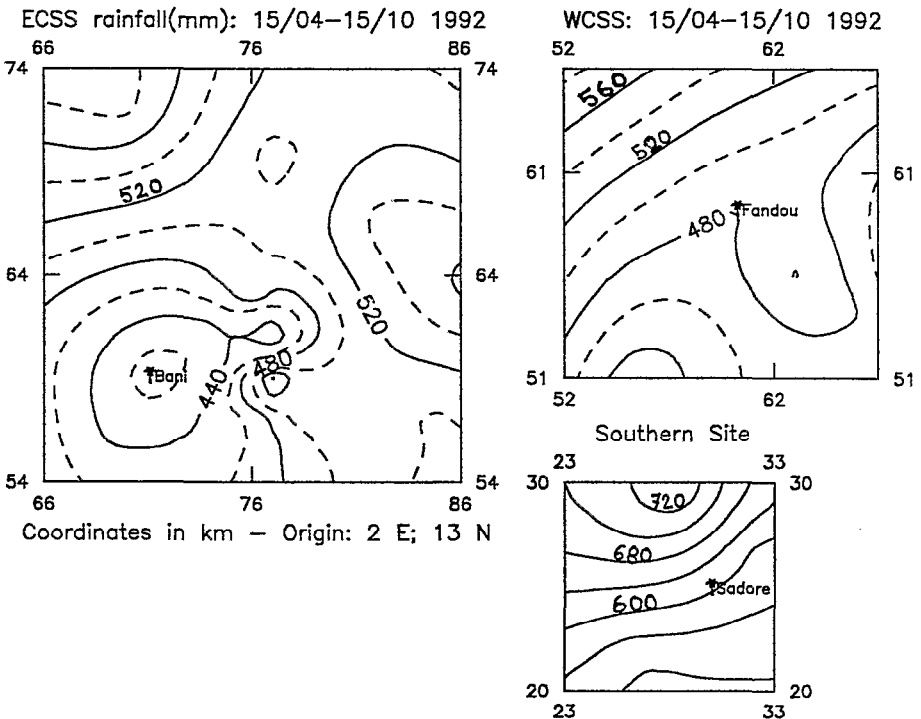


Figure 10. Isohyets of the 1992 seasonal rainfall over the Super-Sites.

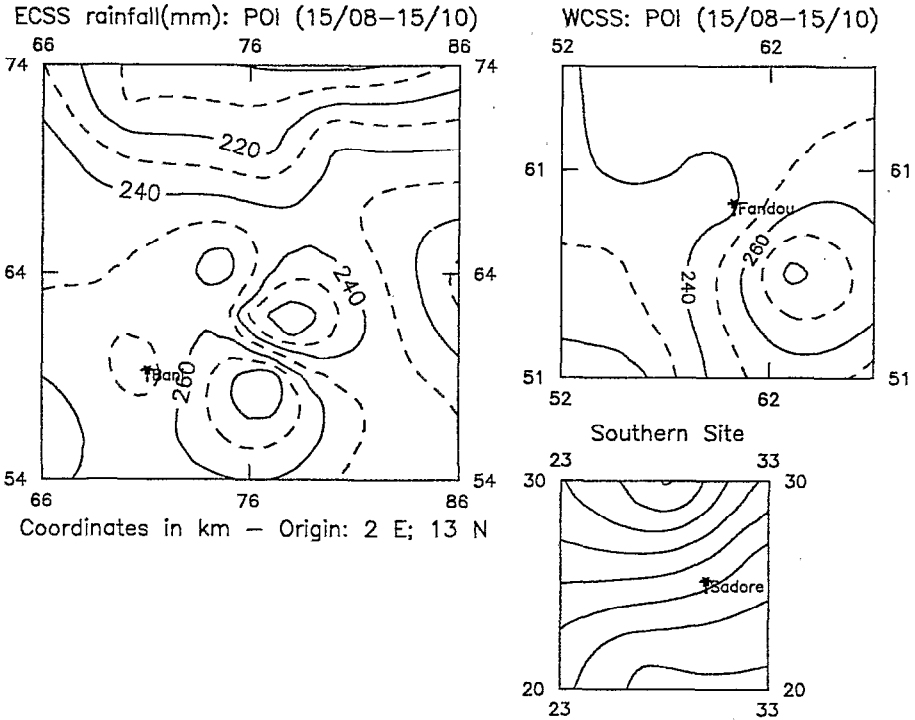


Figure 11. Isohyets of the IOP rainfall over the Super-Sites.

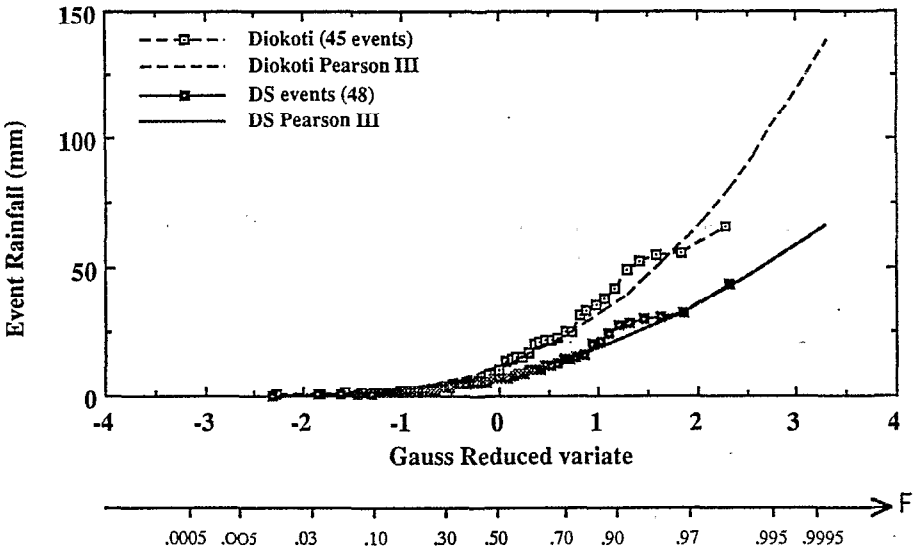


Figure 12. Distribution of the event rainfall for Diokoti (mean = 17.3 mm; standard deviation = 17.4 mm; coefficient of variation = 1.02) and over the DS (mean = 10.5 mm; standard deviation = 9.8 mm; coefficient of variation = 0.94), in 1992. The model fitted to the observations is a two parameters Pearson III distribution (the third parameter, the position parameter, is set equal to 0).

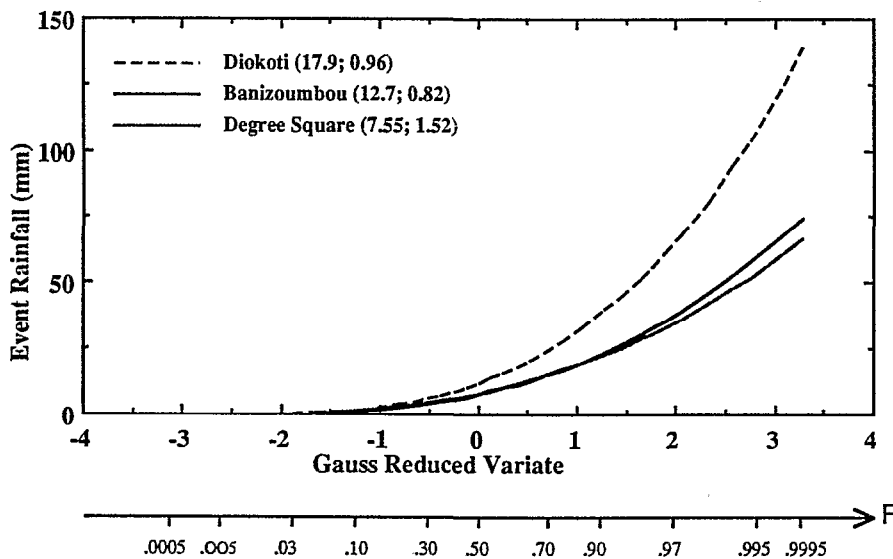


Figure 13. Comparison of the three Pearson III models fitted to the event rainfall distributions at Banizoumbou (seasonal rainfall : 410 mm), Diokoti (seasonal rainfall : 782 mm) and over the DS (seasonal rainfall : 511 mm). The figures in parenthesis are the parameters of the model (scale parameter; shape parameter).

With this definition of the point rainfall event, the number of events at Diokoti (45), Banizoumbou (44) and over the DS (48) is very similar. Since the season rainfall was almost twice as large at Diokoti as it was at Banizoumbou, the mean event rainfall is consequently much higher for Diokoti (17.3 mm) than for Banizoumbou (10.4 mm). Even though TAUPIN *et al.* (1993a) have shown that, in average, the seasonal total is well correlated to the number of rainfall events, the above figures point to the possibility of exceptionally large mean event rainfall at a given location as a main factor in getting large seasonal totals (this is different from having a single extremely strong event creating alone a local high of the seasonal rainfall). The stationarity in space and time of the moments of the mean event rainfall distribution will thus have to be thoroughly investigated since it is the basic assumption of many rainfall models (see e.g. RODRIGUEZ-ITURBE and EAGLESON, 1987).

The event rainfall distribution models for Banizoumbou, Diokoti and the DS are shown in figure 13. The smoothing effect of space-averaging is apparent, the DS distribution model having the smallest scale parameter s , and the largest shape parameter λ . The coefficient of asymmetry (equal to $1/(2\lambda^{1/2})$, for a Pearson III distribution) is 2.2 at Banizoumbou, while it is 1.6 for the DS, the two distributions having a similar mean event rainfall of 10.5 mm.

Another important parameter of the space-time distribution of the rainfall events is the number of days between two consecutive storms. If one considers that the rainy season started the 11th of may (the first two storms observed in early April having been followed by a drought of one month), the average number of days between two consecutive storms was equal to 3.5 for the period before the IOP, while it was equal to 1.6 for the rainy part of the IOP (17th August - 15th September). In figures 14 and 15 are given the isohyetal map of the event rainfall and the corresponding hyetograms at six stations, for one of the last storm of 1992 (12th September, which is a golden day). The rainfall was maximum over the centre of the study area.

Evenement du 11-12 septembre 1992

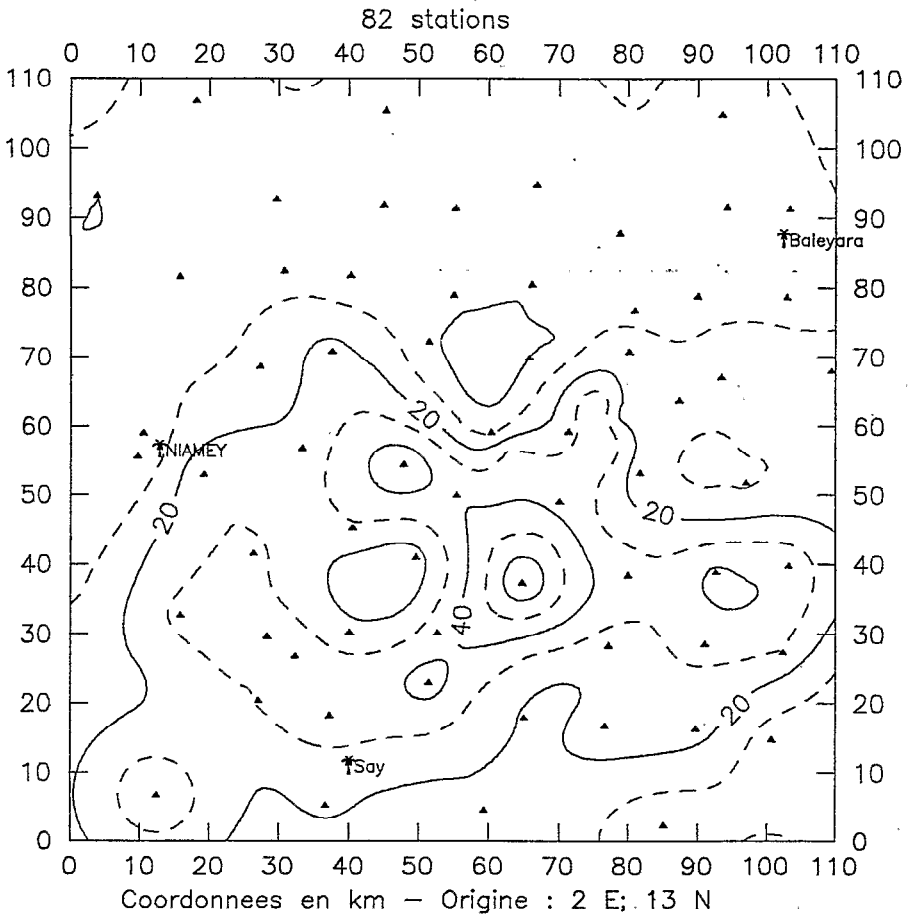


Figure 14. Isohyetal map of the September 12 storm.

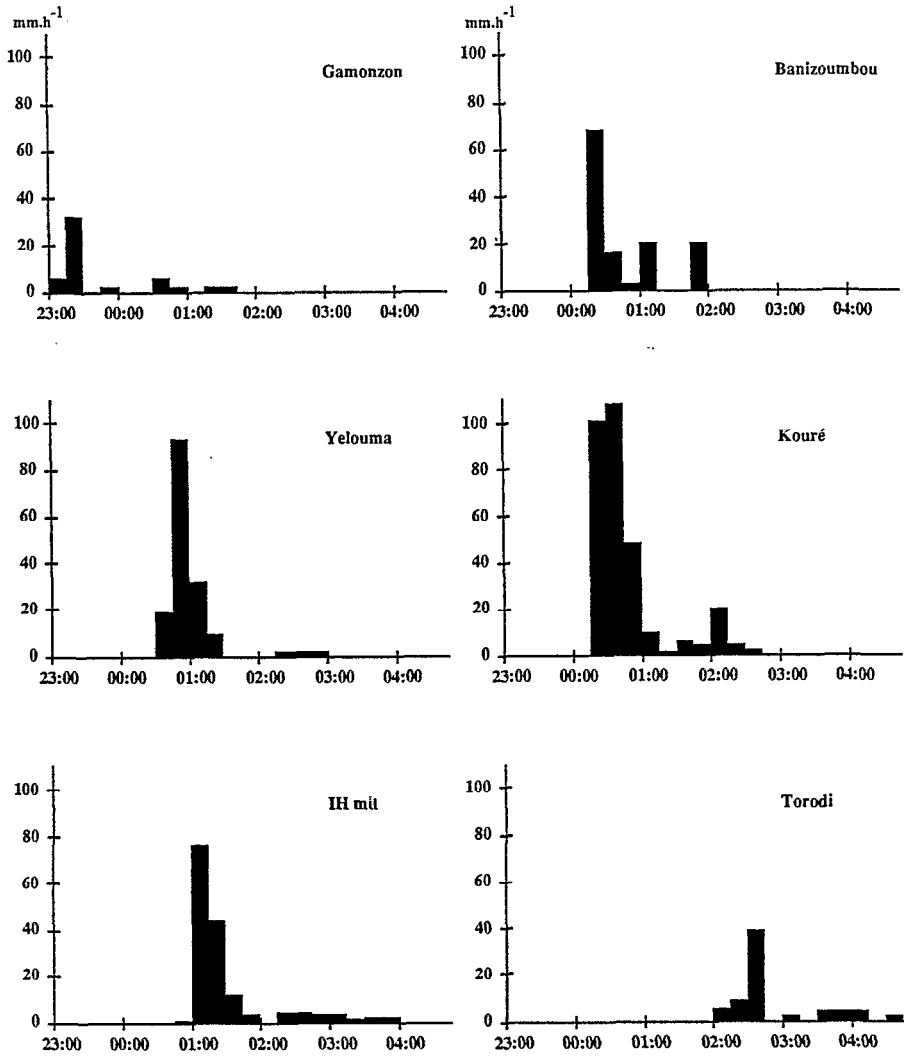


Figure 15. Hyetograms of the September 12 storm (time step: 5 minutes) for six stations from the north-east to the south-west, through the super-sites (Stations Banizoumbou, ECSS and IH Mil, SSS).



Figure 16. Ten day rainfall isohyetal maps (1992).

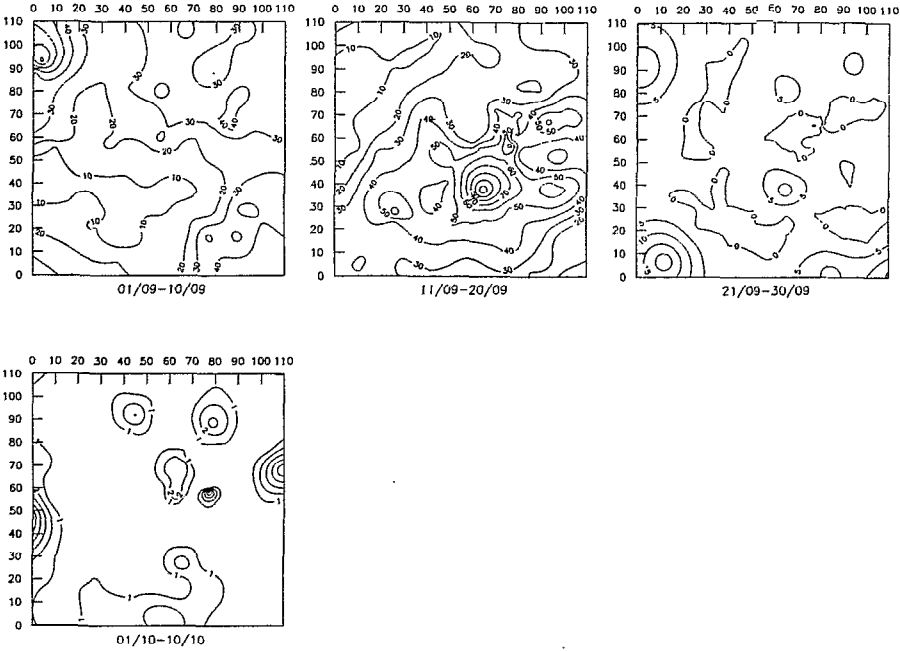


Figure 16. (continued). Ten day rainfall isohyetal maps (1992).

6. CONCLUSION

The four years of full operation of the EPSAT-Niger experimental setup lead to the collection of a rainfall data set for the Sahelian zone that is unique from the point of view of both the spatial and temporal sampling frequencies. It has permitted to monitor the rainfall conditions during the long-term monitoring period of HAPEX-Sahel, indicating that the 1990-1993 average rainfall over the study area was close to the average of the past twenty years dry period. The year 1992 was wetter than the 1990-1993 average, but the rainfall distribution along the rainy season was unusual with a deficit of more than 50% of the scaled cumulative rainfall at mid-July. The first half of the IOP (17th August-15th September) was especially rainy, accounting for almost 50% of the seasonal rainfall over the central super-sites. Except for an isolated shower in the west of the study area in early October, no rain was recorded during the second half of the IOP, allowing for the observation of the drying down of the soil and the vegetation.

The main rainfall statistics at the season and event time scales were consistent from one year to another. The spatial variability of the seasonal rainfall was always large, with strong local gradients. A seasonal rainfall difference of 275 mm was observed over a distance of 9 kilometres in 1992. The mean event rainfall was 10.0 ± 0.5 mm each year. Despite the high spatial variability, it is believed that the EPSAT-Niger network was sufficiently dense, over the DS and over the super-sites, so as to permit an appropriate estimation of the rainfall over the various areas of interest to most of the HAPEX-Sahel investigators. These areas range from the NOAA pixel (1×1 km²) to the whole DS (110×110 km²) and it will be analysed in a forthcoming paper how the requirements of the different teams can be met.

REFERENCES

- GAZE S.R., 1993, Rainfall at the HAPEX southern super-site (1993), interim draft report, Institute of Hydrology, Wallingford.
- GOUTORBE J.P., T. LEBEL, A. TINGA, P. BESSEMOULIN, J. BROUWER, H. DOLMAN, E.T. ENGMAN, J.H.C. GASH, M. HOEPPFNER, P. KABAT, Y.H. KERR, B. MONTENY, S. PRINCE, F. SAÏD, P. SELLERS, and J. WALLACE, 1994, HAPEX-SAHEL: a large-scale study of land-atmosphere interactions in the semi-arid tropics. *Ann. Geophysicae*, 12, 53-64.
- LEBEL T., F. CAZENAVE, R. GATHÉLIER, M. GRÉARD, R. GUALDE, J. KONG, and T. VALERO, 1991, EPSAT-NIGER, campagne 1990. Rapport ORSTOM-DMN, 66 p.
- LEBEL T., H. SAUVAGEOT, M. HOEPPFNER, M. DESBOIS, B. GUILLOT, and P. HUBERT, 1992, Rainfall estimation in the Sahel: the EPSAT-NIGER experiment. *Hydrol. Sci. J.* 37(3), 201-215.
- MARSHALL J.S., and W. MCK. PALMER, 1948, The distribution of raindrops with size. *J. Meteor.*, 5, 165-166.
- RODRIGUEZ-ITURBE I., and P.S. EAGLESON, 1987, Mathematical models of rainstorm events in space and time, *Water Resources Research*, 23(1), 181-190.
- TAUPIN J.D., T. LEBEL, F. CAZENAVE, F. CHIRON, R. GATHÉLIER, M. GRÉARD, R. GUALDE, J. KONG, and T. VALERO, 1992, EPSAT-NIGER, campagne 1991. Rapport ORSTOM-DMN, 86 p.
- TAUPIN J.D., A. AMANI, and T. LEBEL, 1993a, Small-scale spatial variability of the annual rainfall in the Sahel, in: BOLLE H.-J., FEDDES, R.A. and KALMA, J. (Editors), *Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales* (Proceedings of the Yokohama Symposium, July 1993), IAHS Publ. N° 212, pp. 593-602.

- TAUPIN J.D., T. LEBEL, F. CAZENAVE, M. GRÉARD, J. KONG, J. LECOCQ, M. ADAMSON, N. D'AMATO, and A. BEN MOHAMED, 1993b, EPSAT-NIGER, campagne 1992. Rapport ORSTOM-DMN, 98 p.
- TAUPIN J.D., and T. LEBEL, 1994, Comparison of rainfall measurements between 1.5 m and ground-level raingauges in the Sahelian zone. To be presented at the *European Conference of the Global Energy and Water Cycle*, London, July 1994.
- THAUVIN V., and T. LEBEL, 1991, EPSAT-NIGER: Study of rainfall over the Sahel at small time steps using a dense network of recording raingauges. *Hydrol. Processes*, 5, 251-260.
- WILSON J.W., and E.A. BRANDES, 1979, Radar measurement of rainfall-A summary; *Bull. Amer. Meteor. Soc.*; 60(9); 1043-1058.
- ZAWADZKI I., 1984, Factors affecting the precision of radar measurements of rain; *22nd conference on radar meteorology, Zurich, Switzerland*; Proceedings published by the American Meteorological Society, 251-256.

APPENDIX 1

Coordinates of the raingauge stations

All the raingauges were positioned using a GPS positioning system, providing an accuracy in the order of 20 metres. From that, two set of coordinates were used for rainfall mapping and areal averaging. The first, called the EPSAT Coordinates system, is a cylindrical projection, with the origin set at 13° N, 2° E. The second is the UTM system corresponding to the projection used for the IGN 1/200,000 map of 1975 (Clark ellipsoid, 1880). The best fit between the two systems is obtained by superposing the center of the one degree square in each system (13° 30', 2° 30').

Table A1-1. List of the EPSAT-Niger stations, with their years of operation:
EPSAT-Niger 1990-1992 and basic network of 1993.

N°	NAME	Latitude (° ')	Longit. (° ')	X EPSAT	Y EPSAT	X UTM	Y UTM	Years Oper.
1	Gassanamari NW	13 29.87	2 36.36	65,48	55,36	457372	1492085	90-91
2	Gassanamari NE	13 29.87	2 36.91	66,47	55,36	458364	1492084	90-91
3	Gassanamari SE	13 29.34	2 36.94	66,53	54,38	458392	1491101	90-92
4	Gassanamari SW	13 29.30	2 36.39	65,54	54,30	457400	1491041	90-91
5	Bazanga Bangou	13 30.33	2 34.99	63,01	56,21	454878	1492949	90-92
6	Komakoukou	13 29.89	2 37 74	67,96	55,40	459837	1492112	90-93
7	Fetokadie	13 28.76	2 37.22	67,21	53,30	458902	1490055	90
8	Balal Sagui	13 27.60	2 35.93	64,72	51,15	456583	1487909	90
9	Fandou Beri	13 31.91	2 33.52	60,36	59,14	452238	1495872	90-93
10	Banka Dey	13 32.12	2 36.21	65,20	59,53	457108	1496232	90
11	Banizoumbou	13 31.97	2 39.62	71,34	59,25	463239	1495947	90-93
12	Gasseйда	13 28.29	2 39.75	71,59	52,43	463470	1489158	90-92
13	Kampa zarma	13 26.48	2 38.89	70,05	49,08	461902	1485843	90-92
14	Fandobong	13 26.47	2 37.72	67,95	49,06	459797	1485815	90
15	Yelouma est	13 26.96	2 33.57	60,47	49,97	452312	1486749	90-91
16	Gassan Kournie	13 30.06	2 32.84	59,14	55,71	450999	1492465	90
17	Koure	13 20.19	2 35.93	64,75	37,42	456561	1474240	90-93
18	Darey	13 38.20	2 44.53	80,14	70,80	472119	1507424	90-93
19	Tafakoira	13 37.75	2 36.56	65,80	69,96	457756	1506614	90-92
20	Gagare	13 29.37	2 26.56	47,83	54,43	439693	1491198	90-92
21	Beri koira	13 38.99	2 28.61	51,49	72,26	443428	1508914	90-93
22	Tollo	13 20.76	2 44.40	80,01	38,48	471844	1475294	90-92
23	Tigo zeno	13 28.70	2 45.34	81,66	53,19	473543	1489914	90-92
24	Foy Fandou	13 57.62	2 10.09	18,13	106,79	410138	1543353	90-92
25	Debere Gati	13 03.66	2 06.86	12,38	6,78	403987	1443932	90-93
26	Koure Kobade	13 00.28	3 03.00	13,71	0,52	505422	1437530	90-93
27	Damana	13 53.83	3 05.53	17,79	99,76	509964	1536225	90-92
28	Berkiawal	13 30.68	2 18.51	33,33	56,86	425178	1493662	90-93
29	Kare	13 02.87	2 20.31	36,65	5,32	428289	1442384	90-93
30	Zouzou Beri	13 27.95	2 53.82	96,94	51,8	488845	1488521	90-92
31	Winde gorou	13 22.14	2 27.51	49,57	41,03	441377	1477862	90-92

N°	NAME	Latitude (° ')	Longit. (° ')	X EPSAT	Y EPSAT	X UTM	Y UTM	Years Oper.
32	Tanaberi	13 02.50	2 32.88	59,34	4,63	450997	1441658	90-93
33	Dey Tegui	13 56.77	2 37.42	67,25	105,21	459343	1541661	90-92
34	Gamonzon	13 27.67	3 01.90	111,49	51,28	503428	1487997	90-93
35	Yiladde	13 01.27	2 47.16	85,12	2,35	476807	1439351	90-93
36	Ko Fandou	13 56.57	2 51.99	93,43	104,84	485567	1541265	90-92
37	Tomgom	13 56.85	2 25.17	45,23	105,36	437289	1541859	90-92
38	Niamey Poudrie	13 30.29	2 08.03	14,46	56,14	406266	1492984	90
39	Gorbikoi Kaina	13 12.42	2 28.52	51,43	23,02	443144	1459950	90-92
40	Wari	13 37.09	2 15.22	27,39	68,74	419262	1505475	90-92
41	Harikanassou	13 15.46	2 50.47	90,99	28,65	482787	1465517	90-93
42	Hassou Bangou	13 44.06	2 08.72	15,69	81,66	407588	1518386	90-92
43	Alkama	13 49.31	2 57.46	103,32	91,39	495437	1527899	90-93
44	Maroberi Zeno	13 09.02	2 42.47	76,61	16,72	468329	1453643	90-92
45	Kiran Mili	13 49.34	2 30.75	55,29	91,44	447313	1527982	90-92
46	Kolo Diogono	13 43.44	2 36.77	66,15	80,51	458133	1517088	90-92
47	Agharous	13 42.52	2 50.02	89,99	78,8	482009	1515372	90-92
48	Djakindji	13 11.04	2 15.04	27,12	20,46	418786	1457462	90-92
49	Guilahel	13 17.69	2 08.75	15,77	32,79	407479	1469756	90-93
50	Gardama Kouara	13 50.06	2 16.55	29,78	92,78	421738	1529399	90-93
51	Koure Sud	13 14.51	2 36.30	65,45	26,89	457206	1463795	90-93
52	Tierendji	13 07.96	2 55.81	100,68	14,75	492443	1451690	90-92
53	Bangou Bobo	13 44.15	2 22.36	40,22	81,82	432187	1518464	90-92
54	Kollo	13 22.45	2 14.66	26,42	41,61	418187	1478507	90-93
55	Sekoukou	13 16.37	2 22.21	40,04	30,34	431785	1467256	90-92
56	Kolbou Zarma	13 21.47	2 57.26	103,18	39,79	495067	1476570	90-92
57	Sandideye	13 13.52	3 03.23	114,01	25,06	505839	1461918	90-93
58	Gourmandey	13 14.78	2 56.75	102,32	27,39	494132	1464253	90-92
59	Niabere Djambe	13 20.99	2 51.36	92,56	38,90	484418	1475683	90-92
60	Borgoberi	13 40.15	3 03.67	114,57	74,41	506609	1511004	90-92
61	Kaligorou	13 36.74	3 00.78	109,40	68,09	501412	1504706	90-93
62	Kodo	13 15.32	2 42.78	77,13	28,39	468915	1465253	90-92
63	Djoure	13 47.41	2 43.78	78,73	87,87	470786	1524413	90-92
64	Diokoti	13 16.05	2 15.75	28,39	29,75	420107	1466705	90-92
65	Ganki Bassarou	13 09.84	2 20.63	37,21	18,24	428895	1455222	90-92
66	Guessel Bodi	13 24.46	2 22.46	40,46	45,33	432274	1482184	90-92
67	Karabeji	13 16.33	2 29.23	52,69	30,26	444453	1467166	90-92
68	Nine Founo	13 41.44	2 44.98	80,93	76,80	472936	1513383	90-92
69	Tondi Kire	13 36.21	2 51.86	93,35	67,11	485336	1503758	90-92
70	Niamey ORSTOM	13 31.87	2 05.80	10,44	59,07	402248	1495917	90-93
71	Holo	13 42.42	2 57.21	102,93	78,62	494984	1515182	90-92
72	Timborane Soli	13 49.42	2 52.35	94,13	91,59	486220	1528086	90-92
73	Kokorbe Fandou	13 51.16	2 37.18	66,85	94,82	458906	1531341	90-93

N°	NAME	Latitude (° ')	Longit. (° ')	X EPSAT	Y EPSAT	X UTM	Y UTM	Years Oper.
74	Borne 253	13 09.69	2 36.05	65,02	17,96	456741	1454887	90-92
75	Bangou Tawey	13 38.23	2 20.90	37,61	70,85	429514	1507565	90-92
76	Tondi Gamey	13 44.51	2 17.11	30,78	82,49	422728	1519166	90-92
77	Mare Kire	13 42.60	2 30.61	55,07	78,95	447047	1515573	90-92
78	Massi Koubou	13 49.61	2 25.00	44,95	91,94	436956	1528528	90-93
79	Nioumey	13 08.81	2 49.71	89,67	16,33	481425	1453262	90-92
80	Gorou Goussa	13 50.30	2 02.13	3,83	93,22	395770	1529920	90-93
81	Karma	13 40.24	1 48.48	- 20,79	74,58	371089	1511474	90-92
82	Koyria	13 46.00	1 42.00	- 32,38	85,25	359458	1522165	90-93
83	Niamey IRI	13 30.00	2 05.35	09,63	55,60	401424	1492480	90-93
84	Bololadie	13 13.48	1 52.20	- 14,06	24,98	377563	1462133	90-93
85	Boubon Golf	13 36.40	1 56.15	- 6,93	67,46	384879	1504344	90-93
86	Torodi	13 07.00	1 47.10	- 23,27	12,97	368294	1450225	90-93
87	Gouroua	13 20.24	1 56.24	- 6,78	37,51	384900	1474543	90-92
88	Kaba	13 38.00	1 38.92	- 37,94	70,43	353819	1507447	90-92
89	Bougoum	13 26.00	1 58.36	- 2,95	48,19	388795	1485156	90-92
90	Kare Bangou	13 27.28	1 45.72	- 25,72	50,56	365980	1487627	90-92
91	Kossey	13 19.00	1 45.20	- 26,67	35,21	364971	1472362	90-92
92	SD Rive droite	13 33.31	2 40.99	73,80	61,73	465707	1498432	90-93
93	SDC1 Sofia Bang	13 32.44	2 42.64	76,77	60,12	468681	1496800	90-93
94	Niamey Aero.	13 28.79	2 10.39	18,71	53,36	410496	1490205	90-93
95	SDC2 Jupe	13 32.84	2 41.97	75,56	60,86	467479	1497539	91-93
96	SDC3	13 33.50	2 42.41	76,35	62,09	468292	1498766	91-93
97	SDC4	13 33.09	2 43.05	77,51	61,33	469434	1497997	91-93
98	SD Rive gauche	13 34.10	2 42.25	76,06	63,20	467993	1499872	91-93
99	SD Plateau 2 No	13 33.19	2 43.67	78,62	61,51	470546	1498180	91-93
100	SD Plateau 1 Su	13 31.85	2 42.76	76,99	59,03	468920	1495725	91-93
101	SD Exutoire	13 32.72	2 41.36	74,47	60,64	466397	1497325	91-93
102	SD Village	13 34.85	2 41.66	74,99	64,59	466943	1501256	91-93
103	Ouallam B	14 18.92	1 58.11	- 3,39	146,27	388765	1582702	91
104	Ouallam C	14 17.82	1 56.03	- 7,12	144,23	385011	1580691	91
105	IH Jachere	13 14.63	2 14.65	26,41	27,11	418113	1464100	91-93
106	IH Mil	13 14.48	2 17.94	32,35	26,84	424041	1463806	91-93
107	IH Plateau	13 11.89	2 14.37	25,91	22,04	417586	1459033	91-93
108	Ouallam D	14 17.58	1 55.60	- 7,89	143,78	384230	1580264	91
111	Korto	13 30.82	2 42.51	76,55	57,12	468467	1493821	93
112	Tigo Tegui	13 31.17	2 47.10	84,81	57,77	476734	1494457	92
113	Boundou Warou	13 34.41	2 48.51	87,33	63,77	479294	1500445	92
114	Kokaina	13 36.04	2 45.73	82,31	66,79	474278	1503429	92
115	Darey Bangou	13 37.72	2 42.87	77,16	69,91	469113	1506537	93
116	Wankama	13 39.00	2 38.91	70,02	72,28	461996	1508911	93
117	Yelouma village	13 26.97	2 30.80	55,48	49,98	447320	1486758	92

62 Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans Hapex-Sahel : dispositif de mesures au sol et premiers résultats

N°	NAME	Latitude (° ')	Longit. (° ')	X EPSAT	Y EPSAT	X UTM	Y UTM	Years Oper.
118	WC jachère	13 32.54	2 30.81	55,47	60,31	447371	1497018	93
119	WC mil	13 32.33	2 30.83	55,50	59,92	447400	1496649	93
120	WC brousse tigré	13 30.13	2 34.72	62,52	55,84	454396	1492582	93
121	WC jachère deg.	13 33.19	2 34.08	61,36	61,51	453264	1498205	93
122	Danguéy Gorou	13 47.49	2 00.73	01,31	88,01	393227	1524739	92

Table A1-2. List of the ARCOL stations.

N°	NAME	Latitude (° ')	Longit. (° ')	X EPSAT	Y EPSAT	X UTM	Y UTM	Years Oper.
201	LA1SA	13 39.80	2 41.05	73,87	73,78	465843	1510381	93
202	LA1SB	13 39.17	2 41.18	74,11	72,60	466082	1509213	93
203	LA1SC	13 38.53	2 41.31	74,36	71,43	466321	1508045	93
204	LA1SD	13 37.90	2 41.44	74,60	70,25	466529	1506878	93
205	LA1SE	13 37.27	2 41.58	74,84	69,08	466798	1505710	93
206	LA1SF	13 36.63	2 41.71	75,09	67,90	467037	1504543	93
207	LA1SG	13 36.00	2 41.84	75,33	66,73	467246	1503375	93
208	LA1SH	13 35.36	2 41.98	75,57	65,55	467515	1502208	93
209	LA1SI	13 34.73	2 42.11	75,82	64,38	467754	1501040	93
212	LA1SL	13 32.97	2 42.52	76,56	61,10	468472	1497783	93
215	LA2SA	13 39.07	2 40.65	73,17	72,41	465120	1509030	93
216	LA2SB	13 38.01	2 40.87	73,57	70,46	465508	1507094	93
217	LA2SC	13 36.95	2 41.10	73,98	68,50	465926	1505128	93
218	LA2SD	13 35.90	2 41.32	74,38	66,54	466314	1503192	93
220	LA2SF	13 33.84	2 41.75	75,17	62,72	467091	1499382	93
222	LA2SH	13 32.48	2 40.43	72,80	60,20	464713	1496897	93
223	LE1SA	13 38.94	2 38.15	68,66	72,18	460613	1508791	93
224	LE1SB	13 38.36	2 38.27	68,88	71,10	460822	1507746	93
225	LE1SC	13 37.78	2 38.39	69,11	70,02	461031	1506670	93
226	LE1SD	13 37.20	2 38.52	69,33	68,94	461270	1505595	93
227	LE1SE	13 36.61	2 38.64	69,55	67,87	461478	1504520	93
228	LE1SF	13 36.03	2 38.76	69,78	66,79	461717	1503444	93
229	LE1SG	13 35.45	2 38.88	70,00	65,71	461926	1502369	93
230	LE1SH	13 34.87	2 39.00	70,22	64,64	462135	1501293	93
231	LE1SI	13 34.29	2 39.13	70,45	63,56	462374	1500218	93
232	LE1SJ	13 33.71	2 39.25	70,67	62,48	462583	1499173	93
233	LE1SK	13 33.13	2 39.37	70,89	61,40	462791	1498098	93
234	LE1SL	13 32.55	2 39.49	71,12	60,33	463000	1497022	93
236	LE1SN	13 31.38	2 39.74	71,56	58,17	463448	1494871	93
237	LE2SA	13 37.65	2 37.89	68,20	69,78	460129	1506426	93
238	LE2SB	13 36.27	2 38.18	68,73	67,23	460666	1503876	93
239	LE2SC	13 34.90	2 38.47	69,26	64,69	461173	1501356	93
240	LE2SD	13 33.52	2 38.76	69,78	62,14	461710	1498806	93
241	LE2SE	13 32.15	2 39.04	70,31	59,59	462188	1496286	93
242	LE2SF	13 30.78	2 39.33	70,84	57,05	462725	1493767	93
243	LISA	13 37.52	2 33.15	59,68	69,55	451595	1506195	93
244	LISB	13 36.78	2 33.31	59,96	68,18	451893	1504843	93
245	LISC	13 36.04	2 33.47	60,25	66,81	452161	1503460	93
246	LISD	13 35.30	2 33.62	60,53	65,44	452429	1502108	93
247	LISE	13 34.56	2 33.78	60,82	64,07	452727	1500755	93

64 Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans Hapex-Sahel : dispositif de mesures au sol et premiers résultats

N°	NAME	Latitude (° ')	Longit. (° ')	X EPSAT	Y EPSAT	X UTM	Y UTM	Years Oper.
248	LISF	13 33.82	2 33.93	61,10	62,69	452995	1499373	93
250	LISH	13 32.34	2 34.25	61,67	59,95	453562	1496638	93
251	LISI	13 31.60	2 34.40	61,95	58,58	453830	1495286	93
252	LISJ	13 30.86	2 34.56	62,24	57,21	454128	1493934	93
254	LISL	13 29.38	2 34.87	62,80	54,47	454665	1491199	93
255	LOSA	13 37.29	2 29.80	53,64	69,12	445555	1505776	93
256	LOSB	13 36.34	2 30.00	54,01	67,36	445912	1504025	93
257	LOSC	13 35.39	2 30.20	54,37	65,60	446269	1502273	93
258	LOSD	13 34.44	2 30.40	54,74	63,84	446626	1500521	93
259	LOSE	13 33.49	2 30.60	55,10	62,07	446983	1498770	93
262	LOSH	13 31.43	2 31.04	55,90	58,25	447757	1494990	93
263	LOSI	13 30.48	2 31.24	56,26	56,49	448115	1493238	93
264	LOSJ	13 29.52	2 31.44	56,63	54,73	448472	1491456	93
265	LOSK	13 28.57	2 31.64	56,99	52,97	448829	1489704	93
266	LOSL	13 27.62	2 31.84	57,36	51,20	449187	1487953	93
267	Wankama Ouest	13 38.56	2 37.55	67,58	71,46	459531	1508116	93

APPENDIX 2

Rainfall events recorded by the EPSAT-Niger raingauges network from 1990 to 1993

Table A2-1. List of the 39 DS events for 1990. N is the number of gauges having recorded rainfall for the given event. DS average in mm, other rainfall values in 1/10 mm.

Beginning of rain over the network	End of rain over the network	Spatial characteristics			Maximum of the point rainfall over the period T					
		Duration (mn)	DS Average	N	T = 5'	T = 10'	T = 15'	T = 30'	T = 60'	Event
7/05 19h10'	7/05 22h20'	195	4.0	24	104	190	276	391	425	425
23/05 4h10'	23/05 6h35'	150	3.4	35	106	202	267	394	425	425
28/05 22h25'	29/05 5h20'	420	29.9	68	146	241	323	569	747	775
7/06 3h 0'	7/06 4h30'	95	2.8	25	120	239	314	442	455	455
7/06 23h50'	8/06 3h45'	240	6.8	57	115	214	325	586	726	745
12/06 23h30'	13/06 4h35'	310	4.9	63	85	154	215	254	288	300
17/06 17h25'	17/06 21h 5'	225	6.6	47	119	206	303	509	588	590
22/06 1h20'	22/06 5h20'	245	4.2	58	80	108	131	226	315	320
24/06 21h 5'	25/06 3h 5'	365	28.9	80	214	359	493	660	705	790
27/06 16h45'	28/06 5h55'	795	3.9	40	121	196	271	347	451	595
29/06 20h20'	29/06 23h20'	185	4.9	32	85	153	222	318	325	325
3/07 8h30	3/07 13h35'	310	8.1	73	67	130	176	282	480	570
5/07 16h55'	5/07 21h10'	260	8.0	32	132	204	275	449	670	685
8/07 1h25'	8/07 4h55'	215	6.9	42	300	453	523	615	625	645
9/07 3h55'	9/07 6h40'	170	1.0	35	56	104	155	240	295	295
12/07 5h30'	12/07 14h45'	560	17.3	81	132	222	298	425	530	600
15/07 8h 5'	15/07 10h30'	150	4.3	36	147	267	358	526	570	570
15/07 12h35'	15/07 15h30'	180	6.1	74	76	141	171	200	210	230
18/07 8h20'	18/07 15h40'	445	10.5	70	137	261	357	470	470	470
21/07 11h45'	21/07 15h55'	255	5.8	51	111	221	311	440	465	465
21/07 20h55'	22/07 2h45'	355	3.1	41	69	107	144	188	190	215
22/07 3h35'	22/07 11h30'	480	5.3	63	44	79	107	150	185	400
23/07 5h20'	23/07 11h 0'	345	17.8	77	108	186	266	383	430	430
27/07 8h15'	27/07 13h50'	340	25.6	80	114	210	290	460	541	600
31/07 2h40'	31/07 7h10'	275	12.6	68	120	215	296	406	545	550
2/08 22h45'	3/08 2h30'	230	5.0	42	107	156	210	297	340	350
4/08 0h35'	4/08 8h40'	490	26.9	82	139	250	339	489	525	580
8/08 18h15'	9/08 1h40'	450	20.9	83	120	222	319	374	420	490
14/08 13h45'	14/08 16h40'	180	1.2	28	29	45	53	70	70	85
17/08 18h10'	18/08 1h20'	435	17.0	71	150	242	317	451	551	820
24/08 22h10'	25/08 4h40'	395	12.1	74	201	277	332	392	410	480
28/08 21h30'	29/08 2h25'	300	3.5	55	75	112	161	215	215	250
29/08 11h 0'	29/08 15h30'	275	4.5	74	78	155	201	274	285	285
1/09 22h 0'	2/09 6h55'	540	22.3	86	159	261	359	592	662	1025
5/09 0h15'	5/09 5h25'	315	10.6	82	142	243	331	470	480	495
7/09 11h10'	7/09 16h40'	335	14.0	71	100	189	269	472	643	720
11/09 0h55'	11/09 5h45'	295	2.3	33	90	175	256	361	432	500
13/09 21h50'	14/09 2h35'	290	16.4	87	131	249	308	423	455	480
17/09 17h35'	18/09 0h40'	430	18.5	86	140	258	341	520	735	830

Table A2-2. List of the 47 DS events for 1991. N is the number of gauges having recorded rainfall for the given event. DS average in mm, other rainfall values in 1/10 mm.

Beginning of rain over the network		End of rain over the network		Spatial characteristics			Maximum of the point rainfall over the period T					
				Duration (mn)	DS Average	N	T = 5'	T = 10'	T = 15'	T = 30'	T = 60'	Event
14/04	9h 5'	14/04	10h55'	115	0.5	6	63	110	146	219	288	330
28/04	3h 5'	28/04	7h55'	295	8.4	30	62	121	170	239	344	425
4/05	8h 5'	4/05	13h15'	315	23.5	44	84	165	229	377	512	655
16/05	0h25'	16/05	6h25'	365	5.0	36	97	175	226	377	420	520
20/05	9h50'	20/05	13h 5'	200	4.5	61	67	112	133	190	250	300
24/05	6h45'	24/05	19h25'	765	20.1	61	105	203	290	478	694	1105
25/05	13h20'	25/05	15h30'	135	0.9	33	54	90	97	135	135	135
25/05	15h45'	25/05	21h 0'	320	3.9	35	86	171	252	473	645	660
26/05	1h10'	26/05	8h 0'	415	11.4	75	61	110	149	293	450	645
26/05	13h40'	27/05	6h15'	1000	33.6	76	119	201	249	471	845	1620
27/05	11h40'	27/05	16h 0'	265	1.4	32	46	69	88	100	170	190
28/05	10h25'	28/05	15h40'	320	4.7	57	72	121	140	201	220	225
1/06	0h 5'	1/06	2h10'	130	7.0	56	115	171	206	210	315	315
3/06	1h 5'	3/06	7h 0'	360	14.1	82	136	208	255	329	335	380
7/06	11h 0'	7/06	13h45'	170	6.2	72	104	165	214	245	245	245
11/06	20h50'	12/06	0h25'	220	11.9	74	150	294	320	425	432	480
15/06	5h30'	15/06	9h10'	225	10.7	74	157	269	378	521	545	545
20/06	22h40'	21/06	5h25'	410	3.9	54	72	135	183	319	410	435
19/06	5h40'	21/06	8h25'	170	0.9	66	21	32	39	50	65	70
23/06	4h30'	23/06	6h55'	150	2.8	82	61	101	115	115	115	125
26/06	20h35'	27/06	4h20'	470	26.8	87	115	227	319	512	732	815
30/06	8h20'	30/06	11h10'	175	8.8	48	164	307	412	475	530	535
4/07	6h35'	4/07	11h50'	320	8.1	73	122	188	250	343	389	440
8/07	5h20'	8/07	10h15'	300	13.4	75	86	167	233	364	470	500
14/07	6h20'	14/07	11h40'	325	16.9	75	129	232	310	446	528	600
17/07	9h50'	17/07	14h40'	295	11.6	68	107	173	215	365	650	675
18/07	7h45'	18/07	10h50'	190	1.0	47	37	63	69	70	85	90
20/07	8h25'	20/07	16h35'	495	19.6	89	147	246	322	425	607	700
25/07	14h55'	25/07	19h35'	285	12.1	86	120	193	228	346	380	405
26/07	16h25'	26/07	18h25'	125	3.5	40	103	186	251	275	275	275
30/07	16h20'	30/07	20h55'	280	6.6	59	110	203	260	358	395	475
3/08	21h25'	4/08	7h10'	590	36.4	85	110	204	296	517	623	825
6/08	14h40'	6/08	18h 5'	210	1.6	58	53	100	144	185	195	235
7/08	3h35'	7/08	7h15'	225	4.9	51	81	138	201	270	305	330
8/08	7h50'	8/08	14h35'	410	15.1	85	83	158	211	323	365	405
10/08	17h25'	11/08	0h50'	450	15.9	79	135	243	324	514	690	770
14/08	3h30'	14/08	6h50'	205	3.5	27	71	135	174	214	215	215
17/08	2h30'	17/08	7h40'	315	19.8	87	157	286	377	463	520	565
18/08	5h35'	18/08	11h20'	350	7.6	80	74	135	200	312	345	375
20/08	6h20'	20/08	11h50'	335	30.9	87	130	201	249	364	440	530
23/08	10h15'	23/08	15h15'	305	5.4	61	92	179	264	412	445	495
26/08	1h55'	26/08	7h20'	330	14.7	86	116	219	294	433	470	510
29/08	18h15'	30/08	0h30'	380	15.1	91	106	180	253	331	360	580
31/08	21h 0'	1/09	2h 5'	310	8.6	88	66	117	160	266	368	400
2/09	19h55'	3/09	0h45'	295	11.7	90	108	173	236	356	410	440
3/10	23h25'	4/10	4h30'	310	21.4	74	103	183	238	338	425	490
4/10	5h15'	4/10	7h55'	165	3.4	63	15	24	29	48	75	90

Table A2-3. List of the 48 DS events for 1992. N is the number of gauges having recorded rainfall for the given event. DS average in mm, other rainfall values in 1/10 mm.

Beginning of rain over the network		End of rain over the network		Spatial characteristics			Maximum of the point rainfall over the period T					
				Duration (mn)	DS Average	N	T = 5'	T = 10'	T = 15'	T = 30'	T = 60'	Event
10/04	9h25'	10/04	11h45'	145	1.2	21	21	31	44	65	65	65
10/04	20h40'	11/04	1h40'	305	5.0	31	70	131	186	260	270	350
11/05	18h 5'	12/05	1h15'	435	6.0	97	173	263	312	384	450	500
25/05	14h 5'	25/05	17h25'	205	5.6	42	115	182	250	338	517	520
28/05	0h 5'	28/05	4h55'	295	3.1	32	71	130	171	278	292	420
1/06	16h40'	1/06	20h50'	255	12.6	78	213	316	385	522	626	630
3/06	22h30'	4/06	1h10'	165	1.5	38	60	106	124	135	135	135
4/06	20h40'	5/06	4h 0'	445	9.0	88	95	158	205	370	435	505
6/06	18h10'	6/06	23h40'	335	10.6	93	204	305	408	569	620	625
12/06	23h15'	13/06	2h30'	200	7.4	75	152	277	353	513	515	515
20/06	5h10'	20/06	10h35'	330	7.7	59	111	208	257	311	325	335
23/06	22h35'	24/06	1h 0'	150	4.9	38	107	188	231	260	260	260
25/06	7h30'	25/06	10h45'	200	1.9	55	73	128	166	260	305	340
30/06	4h55'	30/06	9h45'	295	20.5	100	289	380	423	472	551	570
7/07	14h30'	7/07	17h30'	185	4.1	91	86	171	189	215	220	220
11/07	10h55'	11/07	14h35'	225	7.4	82	87	140	165	228	270	290
13/07	13h 5'	13/07	18h 5'	305	12.4	88	85	160	227	296	440	555
18/07	0h10'	18/07	8h25'	500	27.8	103	126	247	343	488	567	700
20/07	13h10'	20/07	16h55'	230	2.2	32	79	136	184	267	295	295
22/07	14h30'	22/07	19h40'	315	30.1	102	157	276	389	582	688	745
27/07	14h50'	27/07	20h45'	360	8.8	98	106	199	302	405	560	570
28/07	12h 5'	28/07	15h20'	200	3.2	44	119	234	303	439	565	565
31/07	13h15'	31/07	20h20'	430	31.7	101	134	236	319	476	580	885
4/08	14h45'	4/08	19h10'	270	5.0	42	85	168	243	460	673	680
5/08	15h 5'	5/08	18h25'	205	2.9	40	114	207	295	403	425	575
8/08	13h20'	8/08	21h20'	485	24.3	98	159	253	352	626	660	700
10/08	3h45'	10/08	12h25'	525	29.3	100	91	178	252	447	565	680
11/08	21h25'	12/08	2h 0'	280	7.1	92	108	147	185	275	280	305
13/08	6h25'	13/08	12h 0'	340	2.4	32	84	126	141	167	200	350
15/08	23h 0'	16/08	4h25'	330	14.3	85	100	198	280	481	745	910
18/08	6h55'	18/08	10h55'	245	2.6	51	53	92	106	135	146	175
21/08	21h20'	22/08	9h 0'	705	43.4	104	105	167	227	395	560	920
22/08	22h25'	23/08	0h25'	125	0.6	43	98	123	129	160	185	185
24/08	20h 5'	25/08	0h45'	285	2.3	62	80	130	162	247	265	265
25/08	8h20'	25/08	12h25'	250	5.9	80	113	163	175	202	265	270
25/08	16h25'	25/08	18h 0'	100	0.4	34	54	78	93	125	130	140
25/08	19h 5'	26/08	0h45'	345	19.9	89	79	143	206	285	414	510
27/08	9h45'	27/08	14h10'	270	10.1	97	102	195	280	407	415	425
28/08	5h35'	28/08	8h55'	205	0.9	36	31	48	50	50	55	80
28/08	10h15'	28/08	17h10'	420	11.8	100	136	252	312	371	375	420
29/08	1h55'	29/08	6h55'	305	5.9	84	78	132	191	287	380	480
30/08	2h10'	30/08	10h10'	485	26.9	105	112	204	264	326	355	430
30/08	17h 0'	30/08	21h20'	265	10.4	88	152	278	339	380	380	410
2/09	12h15'	2/09	20h30'	500	7.3	56	96	180	244	362	478	590
6/09	22h25'	7/09	5h 5'	405	15.1	101	122	234	270	331	370	460
11/09	23h 0'	12/09	4h40'	345	16.2	88	136	242	336	547	667	715
14/09	20h 0'	15/09	2h35'	400	14.3	105	62	110	159	222	257	425
15/09	12h 0'	15/09	14h55'	180	0.5	47	48	69	77	80	85	90

Table A2-4. List of the 38 DS events for 1993. N is the number of gauges having recorded rainfall for the given event. DS average in mm, other rainfall values in 1/10 mm.

Beginning of rain over the network	End of rain over the network	Spatial characteristics			Maximum of the point rainfall over the period T					
		Duration (mn)	DS Average	N	T = 5'	T = 10'	T = 15'	T = 30'	T = 60'	Event
30/05 16h15'	30/05 17h55'	105	1.1	41	70	136	151	200	200	200
31/05 2h20'	31/05 2h45'	30	0.2	34	18	22	25	25	25	25
1/06 23h10'	2/06 2h50'	225	12.6	84	101	186	268	418	480	485
3/06 6h 0'	3/06 10h55'	300	5.6	90	62	113	138	220	235	245
6/06 2h 0'	6/06 7h55'	360	10.4	97	74	137	191	235	284	370
13/06 20h45'	14/06 3h25'	405	25	97	111	208	294	439	689	790
16/06 19h20'	17/06 0h10'	295	7	86	120	222	289	315	315	315
30/06 0h40'	30/06 4h35'	240	5.6	34	69	124	159	229	250	260
3/07 7h 0'	3/07 9h 0'	125	6.5	34	100	168	220	314	320	325
6/07 7h55'	6/07 10h40'	170	2.8	85	95	173	248	289	315	315
7/07 20h35'	8/07 4h 0'	450	12.5	96	142	250	326	591	715	740
10/07 6h10'	10/07 13h10'	425	16.9	65	120	206	292	438	728	915
14/07 0h20'	14/07 4h50'	275	9.8	101	114	190	253	320	320	335
16/07 17h 0'	16/07 18h 5'	70	2.8	76	117	173	235	285	285	285
16/07 20h40'	17/07 0h40'	245	4.4	101	71	119	150	177	185	185
19/07 0h10'	19/07 5h40'	335	11.6	104	97	191	248	352	458	470
21/07 20h45'	22/07 2h10'	330	15	104	111	193	280	448	490	525
23/07 15h20'	23/07 19h35'	260	9.1	51	130	213	291	365	370	375
30/07 6h20'	30/07 11h 0'	285	20	104	115	196	251	333	340	385
31/07 14h50'	31/07 18h50'	245	4.9	97	90	151	215	260	270	275
2/08 19h15'	2/08 21h15'	125	9	34	118	230	289	418	500	500
5/08 5h45'	5/08 11h35'	355	25.2	103	96	175	240	306	341	410
8/08 2h55'	8/08 8h20'	330	19.6	100	93	162	220	358	499	530
9/08 18h15'	9/08 22h50'	280	8.8	59	88	150	190	287	530	540
13/08 14h25'	13/08 22h40'	500	37.3	104	124	232	316	453	583	695
17/08 21h40'	18/08 3h 5'	330	28.7	105	109	183	247	350	405	450
19/08 11h35'	19/08 13h50'	140	4.3	96	121	173	215	220	220	220
22/08 2h25'	22/08 10h15'	475	28	105	115	220	311	541	808	955
27/08 4h 5'	27/08 7h45'	225	2.9	43	39	61	81	129	135	135
29/08 23h50'	30/08 8h50'	545	16.4	90	117	203	286	425	519	595
30/08 18h30'	30/08 23h30'	305	2.6	62	51	76	103	188	210	275
31/08 9h10'	31/08 13h40'	275	5.4	36	107	205	301	404	415	425
1/09 6h20'	1/09 9h40'	205	2.1	61	51	95	113	125	130	130
3/09 3h 0'	3/09 8h10'	315	18.6	103	143	248	341	559	641	660
13/09 7h45'	13/09 12h10'	270	6.2	90	139	256	339	477	595	610
18/09 1h25'	18/09 7h 5'	345	19.3	105	81	157	206	303	330	370
26/09 21h35'	26/09 22h55'	85	2.5	79	105	186	229	308	320	320
9/10 3h50'	9/10 6h 0'	135	2.9	87	44	85	109	195	205	205

BILAN HYDROLOGIQUE DE SURFACE DURANT LA PÉRIODE DE SUIVI À LONG TERME DE HAPEX-SAHEL À PARTIR DU SUIVI DES MARES TEMPORAIRES SUR UNE ZONE TEST DE 600 KM²

Jean Christophe DESCONNETS, Thierry LEBEL, Jean Denis TAUPIN

*ORSTOM, laboratoire d'hydrologie
BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1*

RÉSUMÉ

Le fonctionnement hydrologique de la zone sahélienne est marqué par la dégradation du système de drainage. Le calcul de bilans hydrologiques par agrégation de bassins emboîtés est de ce fait impossible. Pour fournir les éléments d'une modélisation du bilan hydrologique régional, un suivi des systèmes endoréiques qui constituent des unités hydrologiques de base a en conséquence été entrepris sur une zone test de 600 km². Ce sont les éléments caractéristiques de ce suivi qui sont présentés ici. Après un rappel sur les objectifs et le dispositif expérimental proprement dit, on examine les incertitudes liées aux mesures effectuées. Puis on présente le fonctionnement hydrologique et une quantification du bilan pour 1991 et 1992 de deux mares situées l'une sur plateau latéritique, l'autre sur bas-fonds sableux colmaté, ces deux milieux représentant l'essentiel du paysage de la zone d'étude. Un aperçu des résultats obtenus sur d'autres mares est également fourni. Le suivi a été poursuivi en 1993 avec une instrumentation très voisine de celle de 1992.

ABSTRACT

In the Sahel, the degradation of the hydrological network produces a particular mode of surface runoff redistribution. This creates many temporary stockage zones during the wet season and a short period of the interseason and makes it impossible to calculate the water budget by aggregation of connected watersheds. The concentration and storage of surface runoff is governed by the structural endoreic zones of the lateritic plateaux and the catchment areas of dry valleys in the form of basins blocked by sand deposits. A monitoring of several endoreic systems over a 600 km² test zone was thus undertaken to provide the basis for the calculation of the water balance at a sub-regional scale. The main features of this monitoring are presented here. The objectives of the study and the experimental setup are first described, as well as the uncertainties of the measurements. Then the hydrologic behaviour of two pools, one located on a plateau and the other in a valley bottom, are analysed. The water budget is computed for 1991 and 1992. First results are also given for other pools of the test zone. The pool monitoring was continued in 1993 with a setup very similar to that of 1992.

1. OBJECTIFS GÉNÉRAUX

Au Sahel, la dégradation des réseaux hydrologiques du fait notamment des conditions climatiques et édaphiques contraignantes, est à l'origine d'un mode particulier de redistribution des eaux d'écoulement. Cet aspect spécifique de l'hydrologie régionale se traduit par la présence de nombreuses zones de stockage temporaires durant l'hivernage et une courte partie de l'intersaison. On peut distinguer différents types de milieu de concentration et de stockage des eaux d'écoulement tels que des zones endoréiques structurales (plateau du Continental Terminal) ou bien des bassins versants de vallée sèche en forme de cuvettes « verrouillées » par des dépôts sableux. Ces zones représentent les deux tiers du système hydrologique du degré carré.

Le principal objet du programme de « suivi des mares » est d'établir le bilan hydrologique régional des eaux de surface, notamment leur partition : d'une part évaporation vers l'atmosphère et d'autre part infiltration vers la zone saturée et les nappes profondes durant la saison d'hivernage et la saison sèche.

Quatre étapes ont été identifiées :

- * la connaissance et la typologie des zones de stockage et de leur système endoréique ;
- * la compréhension et la modélisation des mécanismes de stockage et déstockage au sein de la mare ;
- * le bilan hydrologique de la mare ou la quantification de la reprise évaporatoire et la redistribution de l'eau dans la zone non saturée et les nappes profondes et accessoirement les ponctions par le bétail et les végétaux ;
- * la régionalisation du bilan hydrologique à partir des observations sur les sites « échantillons » par photos aériennes sur un secteur de 600 km².

2. DÉLIMITATION GÉOGRAPHIQUE ET TEMPORELLE

2.1. Délimitation géographique

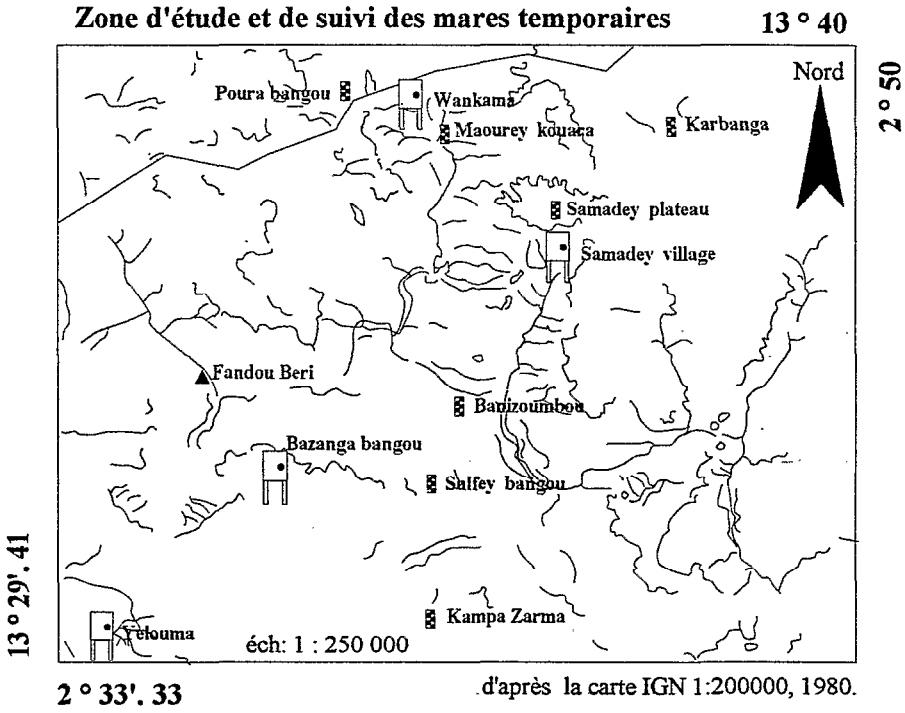
La connaissance des milieux de stockage temporaire dans cette région et, plus généralement dans l'ensemble du Sahel n'a suscité jusqu'à ce jour qu'un faible intérêt, et à notre connaissance, peu de travaux de recherche existent. Cette étude, démarrée en 1991, revêt de ce fait un caractère exploratoire et il a fallu l'adapter progressivement, notamment en ce qui concerne le choix et le nombre des sites d'étude.

Dans une première phase nous avons choisi de suivre un secteur nettement moins étendu que le degré carré tout en respectant d'un point de vue géomorphologique l'homogénéité et la représentativité des deux tiers du degré carré. Ce secteur couvre une surface de 20 x 30 km² (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 (Fig. 1). Deux sites étudiés sont extérieurs à ce secteur : la mare de Sorey et la mare de Massi Koubou, ayant respectivement les coordonnées suivantes : 13° 30, 0' N - 2° 13, 3' E ; 13° 50, 31' N - 2° 24, 56' E.

Des vols de reconnaissance ont permis de repérer et d'identifier la grande majorité des systèmes 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 a été inventoriée à l'intérieur du secteur d'étude. Cet inventaire est présenté en annexe 1, tableau A1-1.

2.2. Délimitation temporelle

Par leur caractère sporadique et concentré sur une courte période de l'année, les écoulements de surface dans cette région nécessitent des observations intensives. D'autre part, 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 paraît nécessaire.



Légende

	mare équipée d'échelle limnimétrique
	mare équipée de sonde limnigraphique
	village
	bord de plateau cuirassé
	cours d'eau temporaire

Figure 1. Secteur d'étude des mares et position des mares instrumentées.

Le programme s'est déroulé sur trois années (1991-1993); seuls les travaux des années 1991 et 1992 sont présentés ici. Ces 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 telles que l'étude des sols du bassin versant, de la végétation, ont été menées en parallèle aux mesures. Ces observations visaient essentiellement à mettre en rapport les caractéristiques écologiques de chaque site choisi avec leur comportement hydrologique.

3. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

En 1991, seules quatre mares avaient été instrumentées et analysées. Elles constituaient à priori, un échantillon représentatif des zones de stockage du degré carré. Les mesures effectuées durant l'année 1992 ont été la prolongation de la campagne précédente avec un renforcement du dispositif expérimental : limnimétrie sur 16 mares dont 6 à l'aide de limnigraphes enregistreurs à mémoire statique; couverture aérienne plus systématique pour suivre l'évolution des stocks d'eau en fin de saison des pluies jusqu'à l'assèchement total des mares. Les 16 mares sont réparties sur l'ensemble du secteur d'étude, 8 étant situées sur les cuirasses du Continental Terminal et 8 dans des bas-fonds de vallée et anciens cours d'eau. L'instrumentation de base de 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 les 10 autres sites). Le tableau A2-1 en annexe 2 présente le nom et la localisation des sites instrumentés durant toute l'étude.

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

- étude précise du fonctionnement hydrologique (cycle crue - décrue et recharge rapide des nappes) sur les 6 sites équipés de limnigraphes enregistreurs;
- extension spatiale avec résolution temporelle dégradée sur les 10 mares échantillons équipées uniquement d'échelles limnimétriques;
- extension spatiale du bilan des mares échantillons sur la zone d'étude de 20 x 30 km² grâce au suivi aérien de 40 mares représentant les 2/3 en nombre et plus de 90 % en capacité de stockage sur cette zone de 600 km².

Des études annexes ont été entreprises durant cette année. Il s'agit entre autres de l'étude de la dynamique de la population herbacée autour des mares durant les périodes de fortes variations de niveaux, à travers un inventaire de la végétation aux alentours des mares. Ces études visent à raffiner la typologie résultant de simples considérations géomorphologiques ou hydrologiques, tout en apportant des éléments de connaissance supplémentaires sur l'évolution temporelle du milieu écologique que constitue la mare et sur l'impact qui en découle sur le fonctionnement hydrologique.

3.1. 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 (stockage) et de vidange (déstockage), en vue d'établir des bilans à une résolution temporelle la plus fine possible. La mesure réalisée est celle de la cote du plan du plan d'eau, le volume stocké correspondant étant déduit par le biais des relations hauteur/volume établies pour chaque mare en saison sèche.

3.1.1. Mesures en continu

Les mares jugées les plus intéressantes sont équipées de stations limnimétriques constituées 1) d'une sonde piézo-résistive mesurant la hauteur d'eau par différence entre la pression hydrostatique du liquide et la pression atmosphérique; 2) 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 programmables jusqu'aux valeurs limites inférieures de 1 cm et d'une minute. Le stockage des acquisitions est réalisé sur un support électronique interchangeable (cartouche à mémoire statique).

En saison des pluies, le pas d'échantillonnage intéressant s'est avéré être un seuil de déclenchement de 1 cm 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 (saison sèche), le seuil d'acquisition est augmenté en temps (15 ou 30 minutes) pour éviter les acquisitions parasites provoquées par le batillage dû au vent et à la venue du bétail.

Les périodes de fonctionnement sont consignées dans le tableau A2-2 (annexe 2). On remarquera que deux mares ont eu des interruptions de mesures durant la saison 1991 et 1992. Ces interruptions ont été provoquées par une mauvaise étanchéité des sondes (mare de Bazanga Bangou - saison 1991) et par la montée des eaux provoquant un court-circuit de la station d'acquisition lors d'une crue exceptionnelle (mare de Wankama - saison 1992).

3.1.2. Mesures instantanées

Les mesures limnimétriques instantanées concernent un ensemble de 10 mares qui ont été suivies à partir de la saison 1992. Ces 10 mares font partie d'un dispositif qui a pour objet de compléter l'échantillonnage réalisé par les 6 sites équipés de limnigraphes enregistreurs mais surtout elles servent de site de validation pour la modélisation des mécanismes de vidange et la spatialisation du bilan hydrologique par photographies 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. Ce protocole présente un défaut. Il ne permet pas de connaître la hauteur de deux crues successives. Pour cela, les visites doivent être le plus rapprochées possible. Ce suivi a commencé en juin avec une fréquence d'une visite par semaine augmentée à deux par semaine en juillet. La fréquence de visite au mois d'août a presque été quotidienne. Elle est redevenue bihebdomadaire jusqu'à la fin du mois de novembre, période à laquelle les mares se sont asséchées. Pour chaque mare suivie, 60 relevés ont été effectués en 25 semaines (tableau A2-3 en annexe 2).

3.2. 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 bangou, Wankama et Yélouma, présentant des caractères morphologiques et écologiques bien distincts.

Le protocole a été le suivant : un prélèvement d'eau avec une mesure *in situ* du Ph, de la température et de la conductivité électrique. La cote de l'échelle est aussi notée à chaque visite. Le stockage de l'eau se fait dans des récipients de 125 ml. L'échantillon est filtré à 1 puis 0,45 µ

car les eaux des mares présentent des M.E.S en quantité importante et de taille très fine. Un titrage rapide à l'acide chlorhydrique est réalisé pour déterminer la teneur en carbonates. Puis l'échantillon est envoyé au laboratoire de chimie de l'ORSTOM à Bondy pour analyser les teneurs en cations et anions majeurs ainsi qu'en aluminium, silice et fer.

Nous avons effectué des relevés du mois de juillet 1991 jusqu'au mois de novembre 1991 pour Yélouma, jusqu'au mois de décembre pour Bazanga et jusqu'au mois de février 1992 pour Wankama. La fréquence des relevés a été hebdomadaire et nous a permis de récolter 24 échantillons pour la mare de Bazanga (tableau A3-1 en annexe 3), 26 pour la mare de Wankama (tableau A3-2 en annexe 3) et 18 pour la mare de Yélouma (tableau A4-2 en annexe 4).

3.3. Suivi isotopique

Conjointement au suivi des teneurs en anions et en cations des eaux de trois mares, ont été réalisés des prélèvements de 20 ml d'eau aux mêmes dates et dans les mêmes conditions 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 pertes de volumes de la mare. En effet, lors d'une période d'évaporation, les teneurs en Oxygène 18 et Deutérium de l'eau des mares vont s'enrichir au cours du temps. Cet enrichissement est dû uniquement au fractionnement isotopique entre la phase évaporée et la phase liquide restante. Cette méthode permet de suivre le phénomène évaporatoire sans signal interférent comme cela peut être le cas pour la méthode chimique. Les résultats de ce suivi sont donnés dans les tableaux A3-1 et A3-2 pour 1991 et dans les tableaux A3-3 et A3-4 pour 1992 (annexe 3).

3.4. Mesure de l'évaporation par bac

Pour compléter et recouper les méthodes d'investigation visant à évaluer les pertes par évaporation des mares, deux bacs à évaporation de type Colorado ont été mis en place aux abords immédiats des mares de Bazanga bangou et de Wankama en septembre 1992. Remplis avec l'eau de chaque mare, nous avons mesuré à chaque visite les volumes d'eau manquant et rajouté le volume nécessaire pour revenir au 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 perte de volume. Ainsi à chaque visite, nous obtenons un jeu de trois données : lame d'eau évaporée dans le bac, le volume d'eau de la mare et la teneur en isotopes. Ces données devraient servir à modéliser de façon très précise les pertes par évaporation. La fréquence des visites a été très variable (les tableaux A3-3 et A3-4, annexe 3, donne les détails de ce suivi pour 1992).

3.5. Pluviométrie

Nous avons mis à profit l'existence du réseau pluviométrique EPSAT-NIGER présent dans le degré carré pour estimer la pluviométrie sur les bassins versants qui alimentent les mares. Ces appareils sont des pluviographes à augets basculeurs fonctionnant à 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 limnigraphes enregistreurs (pour plus de précision voir *LEBEL et al.*, ce volume).

On dispose généralement d'au moins un poste pluviométrique sur chaque bassin versant de nos sites étudiés. Le tableau A4-1 (annexe 4) présente l'association mare étudiée - pluviomètre le plus proche, pour chaque site, avec ses coordonnées et sa période de fonctionnement.

3.6. Photographie aérienne

Le bilan hydrologique à une échelle sub-régionale est l'un des objectifs de cette étude. Compte tenu de la taille des mares (beaucoup ont un miroir de moins de 1 000 m²), l'inventaire et le suivi par satellite sont insuffisants, voire impossibles, du fait de la trop faible résolution spatiale et de l'échantillonnage temporel trop irrégulier (surtout en saison des pluies). La photographie aérienne apparaît donc comme le seul moyen fiable pour obtenir une couverture complète, renouvelable régulièrement, de la zone étudiée.

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 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 échantillons afin de disposer des surfaces mesurées de chaque mare dans un même repère de hauteur.

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

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

- * des missions de couverture aérienne des bassins versants des mares équipées en limnimétrie (tableau A5-1, annexe 5);
- * des missions aériennes de suivi de 40 mares sur le secteur d'étude (tableau A5-3).

La nature et les dates des missions aériennes sont récapitulées dans les tableaux A5-1 et A5-2 de l'annexe 5. La totalité des photographies prises pour l'une ou l'autre des missions a été inventoriée et référencée (tableaux A5-4 à A5-6 de l'annexe 5).

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 servi : 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 mares).

3.7. Relevés écologiques

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

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 - octobre) avec une fréquence de suivi bimensuelle en début de saison puis une fréquence hebdomadaire en fin de saison des pluies. Les méthodes d'étude choisies sont de deux types :

- * méthode linéaire d'étude de la végétation (population herbacée);
- * méthode des auréoles concentriques (population de ligneux).

L'inventaire de la végétation de toutes les mares du secteur d'étude s'est déroulé du 15 au 30 octobre 1992. Il a concerné un ensemble de 36 mares.

3.8. 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 super site central. Ce sont les mares de Bazanga bangou, Kampa zarma, Sulfey bangou, Banizoumbou, Sama Dey, Maourey, Karbanga, Wankama et Poura bangou. L'enquête a consisté en une permanence d'une journée sur chaque site, durant laquelle l'enquêteur questionne les bergers et compte le bétail. Ce questionnaire doit éclaircir les points suivants : composition du troupeau (espèces, sexe) et le nombre de têtes, la fréquence de venue sur la mare, la proximité des pâturages.

3.9. Mesures d'humidité neutroniques

L'instrumentation et les mesures d'humidité neutroniques ont été réalisées par une équipe ORSTOM (GOUTORBE *et al.*, 1992). Seul, le site de Wankama est équipé d'un transect de quatre tubes neutroniques. Ce transect long d'une cinquantaine de mètres, commence dans la cuvette de la mare et remonte un versant sableux.

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.

3.9.1. Fréquence des mesures

Les mesures sont faites en fonction de la pluie, aux jours suivants :

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 une fois par semaine en saison des pluies et une fois tous les quinze jours, puis une fois par mois, en saison sèche. Le protocole est interrompu à chaque nouvelle pluie, le suivi redémarre alors au jour J de cette nouvelle pluie (est considérée comme événement pluvieux une précipitation de plus de 5 mm sur une station du site central au moins).

Afin de tenir compte des variations des sources radioactives et du compteur de neutrons, cinq comptages sont effectués dans un fût d'eau avant et après les mesures dans les sols. Les profondeurs de mesures sont les suivantes : 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, puis tous les 20 cm jusqu'au fond du tube. Les comptages sur l'ensemble des tubes se font dans la journée. (Les dates de mesures effectuées à Wankama sont consignées dans les tableau A6-1 et A6-2).

3.9.2. Étalonnage

L'étalonnage d'une sonde à neutrons est nécessaire pour avoir une valeur d'humidité volumique. Il nous permet d'obtenir une relation entre les comptages neutroniques et l'humidité volumique. La méthode d'étalonnage choisie est la méthode gravimétrique. Elle consiste en prélèvements d'échantillons à la tarière lors de l'implantation du tube associés à des mesures neutroniques et gamma métriques.

3.10. Remarque sur la transformation des hauteurs en volumes : cubatures des mares

Chaque site suivi en limnimétrie automatique ou manuelle a fait l'objet d'un levé planimétrique et altimétrique permettant d'appréhender avec le plus de précision possible la forme de chaque cuvette de mare et faire ainsi correspondre un volume à une cote donnée à l'échelle. 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 bangou, de Wankama et de Yélouma. Ces levés planimétriques et altimétriques couvrent la cuvette de la mare à la cote maximum atteinte durant les deux années d'étude, par un maillage régulier de 10 mètres par 10 mètres. En décembre 1992 et en janvier 1993, une deuxième campagne topographique a permis de lever les mares de Kampa Zarma, Sulfey bangou, Banizoumbou, Sama Dey village, Sama Dey plateau, Maourey, Karbanga, Poura bangou 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 points 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 et 1/500.

4. INCERTITUDES DES MESURES

La mesure d'un volume d'eau à un instant donné ne peut pas être faite par une mesure directe. La connaissance de cette valeur oblige plusieurs opérations tels que la mesure de la cote du plan d'eau à ce même instant et l'établissement pour cette mare d'une relation ou courbe de tarage qui relie la hauteur d'eau au volume (fonction de la morphologie de la cuvette réceptrice de la mare).

A chacune de ces opérations, on peut associer une incertitude de mesure ou reproduction plus ou moins fidèle du milieu, qui peut être difficilement estimable dans le cas par exemple du levé topographique de la cuvette de la mare.

4.1. Mesure de la hauteur d'eau

4.1.1. Mesure par le capteur piézo résistif (sonde limnimétrique)

Le constructeur donne une précision de lecture en hauteur de plus ou moins un centimètre et une vitesse de poursuite des niveaux de 1 cm dans son domaine de profondeur (15 mètres). 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 du support de la sonde dans la vase;
- un envasement partiel du capteur.

Une visite hebdomadaire permet de diminuer significativement les risques de dérives de hauteur. Par contre, il semble que l'horloge de l'acquisition soit très fiable et reproduise de façon très correcte les montées et les descentes de niveaux rapides lors du remplissage par les eaux de ruissellement. Il faut noter que la phase ultime de l'assèchement est entachée d'erreur de mesures donc d'appréciation de volume. Ces erreurs sont liées au mouvement de l'eau qui est d'autant plus sensible que la hauteur du plan d'eau est plus faible, donnant des mesures s'écartant à plus ou moins 3 cm du niveau réel.

4.1.2. Mesures instantanées

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 intensité. Seule une mesure de la cote maximum, présumée être la hauteur du plan d'eau lors de la crue, est donnée par la lecture de l'échelle à maximum.

L'équipement permettant l'estimation de la cote maximum s'est avéré mal adapté à ce type de site et de suivi. En effet, nous avons assisté à un engorgement de l'échelle à maximum tout au long de la saison, cela a eu pour conséquence une augmentation du décalage entre les deux échelles, souvent associée à une lecture peu précise de la part de l'observateur. Une partie des données de crue sera difficilement utilisable pour certaines mares telles que Kampa Zarma.

La lecture directe de la cote à l'échelle ne représente pas les mêmes problèmes et leur fiabilité est de l'ordre du centimètre, ce qui correspond à la graduation de l'échelle.

4.2. Courbe de tarage d'une mare

Un levé topographique à l'échelle du 1/500 effectué par un nivellement direct permet d'appréhender le relief à plus ou moins 1 cm en altitude et plus ou moins 3 cm en plan. A partir de ce levé donnant un semis de points assez dense, nous calculons par interpolation (méthode du krigeage) des courbes de niveau tous les cinq centimètres.

Le volume ainsi que la surface du plan d'eau correspondant à une cote à l'échelle limnimétrique est ensuite calculé pour toute la gamme de hauteur (tous les cinq cm) observée durant la saison des pluies. Enfin, la dernière étape pour obtenir la courbe de tarage centimètre par centimètre consiste à caler une fonction mathématique qui décrive au mieux la relation hauteur volume trouvée. La fonction obtenue donne le volume à plus ou moins 5 % environ.

Les surfaces des mares obtenues grâce aux photographies aériennes à plusieurs périodes de la phase d'assèchement en concomitance avec les relevés limnimétriques donnent un moyen d'estimer l'exactitude de nos courbes d'étalonnage pour plusieurs cotes à l'échelle.

5. PREMIERS RÉSULTATS

5.1. Les conditions pluviométriques

Les années 1991 et 1992 ont été marquées par des pluviométries assez contrastées sur le plan de leur chronologie. Alors que le cumul saisonnier moyen sur l'ensemble du degré carré a été proche pour les deux années (respectivement 522 et 511 mm, *LEBEL et al.*, 1994) la zone du site Central est restée très déficitaire jusqu'à la mi-juillet, puis a connu une série de pluies importantes au début de la POI (c'est-à-dire durant la deuxième quinzaine d'août). Les ruissellements très différents enregistrés d'une année sur l'autre (voir le tableau 2 en section 5.2) s'expliquent en grande partie par la répartition temporelle particulière en 1992. Ce fait est illustré par les figures 2 et 3 où a été représentée l'évolution au pas de temps de 24 heures des cumuls pluviométriques. Ces cumuls ont été normés par le cumul saisonnier afin de pouvoir comparer plus facilement les distributions temporelles entre elles. Les cumuls pour les pluviomètres représentatifs de la mare de Wankama, d'une part, de Bazanga Bangou, d'autre part. Pour Wankama l'analyse des cumuls journaliers ne peut se faire qu'à partir de la station proche de Darey (fig. 2), car en 1991 seul un pluviomètre totalisateur relevé une fois par semaine était disponible sur le site même de la mare.

On observe bien dans les deux cas l'écart plus important en 1992 qu'en 1991 par rapport à la droite théorique d'une répartition temporelle uniforme, les cumuls saisonniers étant par ailleurs du même ordre. Le tableau 1a montre bien également que la pluie de 1992 a démarré très tard : sur Darey par exemple 35 % de la pluie est tombée avant le 1^{er} juin en 1991, alors qu'en 1992, cette proportion n'a été que de 5 %.

Le tableau 1b donne les valeurs de l'aire comprise entre la droite de distribution temporelle uniforme et la droite des cumuls observés. Contrairement à la représentation graphique des figures 2 et 3, les valeurs ne sont ici pas normées. Cette aire peut être assimilée à un indice d'intermittence temporelle, permettant de quantifier l'irrégularité pluviométrique et de procéder à des comparaisons chiffrées entre deux années.

Tableau 1a. Pluviométrie (mm) enregistrée sur les postes des bassins de Wankama (Wankama; Darey) et Bazanga (Bazanga; Gassanamari) en 1991 et 1992.

	Saison des pluies (15 avril - 15 octobre)					1 ^{er} juin - 15 septembre	
	Degré carré	Wankama	Darey	Bazanga	Gassa.	Darey	Gassa.
1991	522	/	532	/	577	353	381
1992	511	591	507	511	484	489	475

Tableau 1b. Indices d'intermittence temporelle pour les postes dont la pluviométrie est donnée dans le tableau 1a (valeurs en mm/jj).

	Saison des pluies (15 avril - 15 octobre)					1 ^{er} juin - 15 septembre	
	Degré carré	Wankama	Darey	Bazanga	Gassa.	Darey	Gassa.
1991	/	/	38	/	32	39	14
1992	/	69	95	75	91	64	67

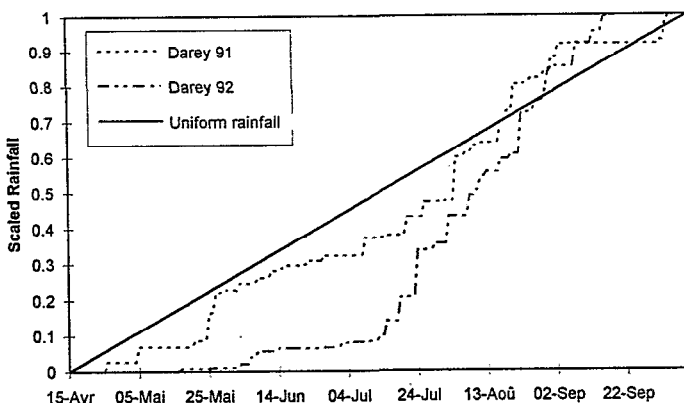


Figure 2. Cumuls pluviométriques journaliers, normés par le cumul saisonnier pour la station de Darey (mare de Wankama).

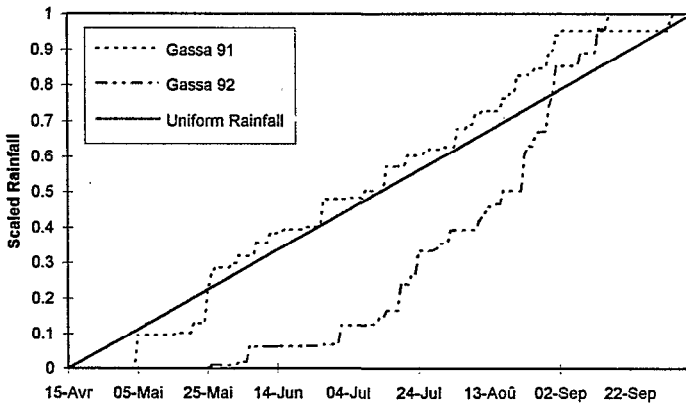


Figure 3. Identique à la figure 2, mais pour la station de Gassanamari (mare de Bazanga).

5.2. Étude du fonctionnement de deux mares échantillons

Les systèmes endoréiques de Wankama (bas-fond de kori) et de Bazanga Bangou (plateau latéritique) offrent un bon aperçu du fonctionnement hydrologique de la majorité des petits systèmes hydrologiques de notre secteur d'étude. La situation géographique de ces deux mares se trouve en figure 1, leurs coordonnées figurant dans le tableau A1-1 (annexe 1).

5.2.1. Présentation des deux systèmes endoréiques

5.2.1.1. Le système endoréique de bas-fond de Wankama

D'une taille d'environ 2 km², le bassin versant topographique de la mare de Wankama présente une dénivellée de pente moyenne égale à 3 % sans ruptures importantes. De forme très allongée, il est drainé par un grand collecteur, interrompu en son milieu par une zone d'épandage des eaux associée à la disparition momentanée du drain principal (entre les cotes 222 et 226 m sur la carte de la figure 4).

D'un point de vue géomorphologique, le bassin de Wankama présente de l'amont vers l'aval une séquence typique pour la région d'une vallée sableuse (COURAULT *et al*, 1989). Le bassin versant a pour exutoire la mare de Wankama. Sa cuvette est située dans un ancien axe de drainage : le Kori de Dantiandou. Ce système fait partie d'un sous-ensemble régional qui, sous les conditions climatiques actuelles, fonctionne de façon discontinue.

5.2.1.2. Le système endoréique de plateau de Bazanga Bangou

Morphologiquement et pédologiquement très différent, le bassin topographique de la mare de Bazanga Bangou est de taille inférieure à celui de Wankama : 0.3 km². De pente faible (environ 1 %), il ne présente pas de réseau hydrographique. En surface il est constitué de deux zones bien distinctes : la première qui s'organise sous forme de brousse tigrée, et la seconde présentant un réseau de bourrelets sableux ou dunettes, fixés par la strate herbacée entre lesquelles s'intercalent des surfaces à croûtes argileuses indurées, siège de l'écoulement. Schématiquement, la mare est située au centre de son bassin d'alimentation.

Si, actuellement, il est délicat de quantifier en termes de concentration de l'écoulement, l'importance des mares dans les milieux latéritiques, on signalera que les plateaux latéritiques représentent plus de 25 % dans le paysage du degré carré et 19 % sur le Super Site Central Est.

Carte topographique du bassin de Wankama

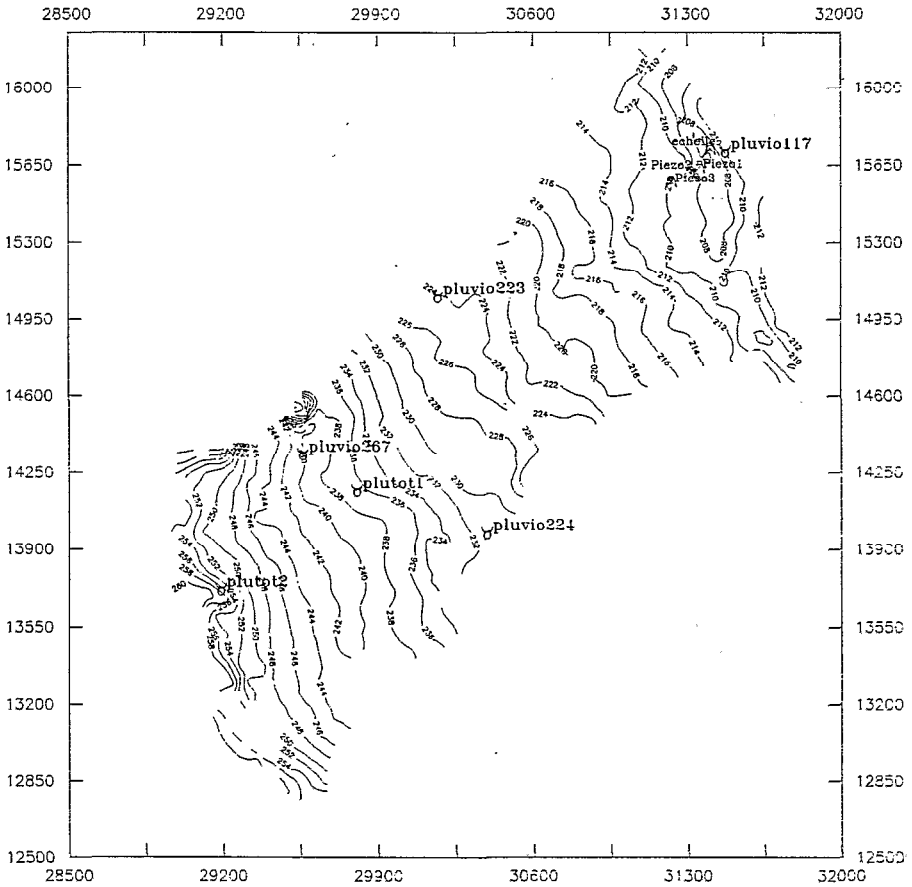


Figure 4. Carte topographique du bassin versant de la mare de Wankama. La mare (dans l'angle Nord-Est de la carte), est installée dans l'axe de drainage du kori de Dantiandou qui se prolonge vers le sud en direction de Banizoubou. On remarquera que le bassin versant s'étend presque entièrement au sud-ouest de la mare. Le dispositif de mesure présenté est celui de 1993. Les mesures limnimétriques et piézométriques sont concentrées dans la zone d'inondation de la mare ou juste à l'extérieur. Les deux pluviomètres « plutot » sont des pluviomètres totalisateurs relevés après chaque événement majeur, alors que les quatre autres sont des pluviographes à mémoire statique.

5.2.2. Les événements hydrologiques mesurés en 1991 et 1992

L'implantation tardive des capteurs limnimétriques en 1991 ainsi que les diverses pannes survenues tout au long des deux années de mesures (déjà mentionnées en section 3.1.1), n'a permis l'acquisition que de 40 % des événements en 1991 sur les deux mares. En 1992, les pourcentages ont été de 100 % à Bazanga et 70 % à Wankama. Un aperçu des caractéristiques de ces événements est proposé dans le tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques des événements mesurés à Bazanga et Wankama (saisons 1991 et 1992).

	Bassin versant de Bazanga Bangou						
	Lame précipitée mm	Lame ruisselée mm	Coefficient ruissellement %	Volume de la crue m ³	Débit moyen l/s	Débit maxi. l/s	Temps de concentration min.
Événements mesurés	23	23	23	23	23	23	23
Moyenne	24.3	6.7	0.2	2 007	460	1 074	31.1
Minimum	7.5	0.8	0.1	246	33	77	10.0
Maximum	66.5	17.3	0.5	5 180	1 340	2 814	85.0
Etendue interquartile	14.5	9.9	0.2	2 965	536	1 436	15.0
	Bassin versant de Wankama						
Événements mesurés	23	23	23	23	23	17	17
Moyenne	26.2	4.8	0.2	7 238	1 227	2 410	54.7
Minimum	4.5	0.1	0.0	191	30	50	15.0
Maximum	69.5	20.9	0.5	31 314	5 076	11 605	175.0
Etendue interquartile	29.5	6.3	0.3	9 382	1 417	2 596	40.0

La comparaison des différentes caractéristiques des événements hydrologiques sur les deux bassins permettent de remarquer :

- * une série de pluies identiques quant à leur valeur moyenne et à leur valeur maximum. La pluie minimum ayant provoqué un écoulement de surface est de 7.5 mm à Bazanga et de 4.5 mm à Wankama;
- * une lame ruisselée moyenne plus importante à Bazanga (6.7 mm) qu'à Wankama (4.8 mm), mais avec des valeurs extrêmes assez proches (le maximum est plus important sur Wankama que sur Bazanga);
- * des volumes de crue moyens fortement supérieurs à Wankama (7 238 m³ pour 2 007 m³ à Bazanga). L'amplitude en volume des événements extrêmes à Wankama est particulièrement élevée, suggérant un comportement très variable selon les caractéristiques des événements pluvieux (intensités et localisation des zones de pluie forte par rapport aux différents états de surface);
- * des débits maximums moyens sensiblement différents (1.07 m³/s à Bazanga et 2.41 m³/s à Wankama) avec des extrêmes quatre fois supérieurs à Wankama (11.60 m³/s le 18-7-1992), ceci étant à relier à la taille respective des bassins concernés;
- * des temps de concentration allant du simple au double selon que l'on s'intéresse à l'un ou l'autre des bassins; on peut l'expliquer par la forme de chaque bassin (compact dans le cas de Bazanga et allongé pour Wankama).

Trois hydrogrammes caractéristiques de chaque bassin sont présentés en figure 5. Il est à noter les réponses très rapides convergeant vers des valeurs identiques pour des pluies à forte intensité.

On a porté en figure 6 la relation entre la lame précipitée et la lame ruisselée en fonction de l'indice d'humidité IK. Cet indice 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, par le biais d'une pondération exponentielle :

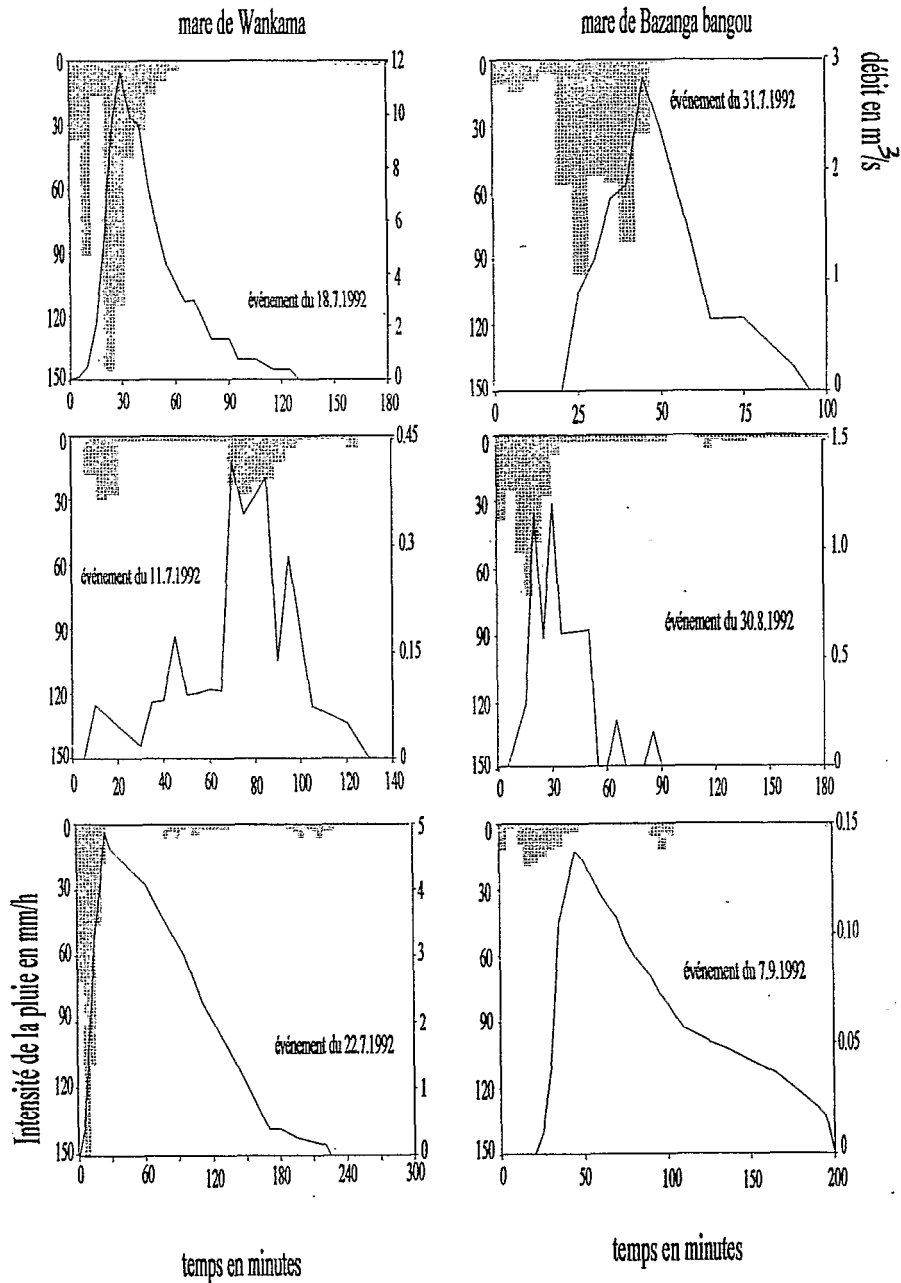


Figure 5. Trois hydrogrammes caractéristiques des bassins de Wankama et de Bazanga.

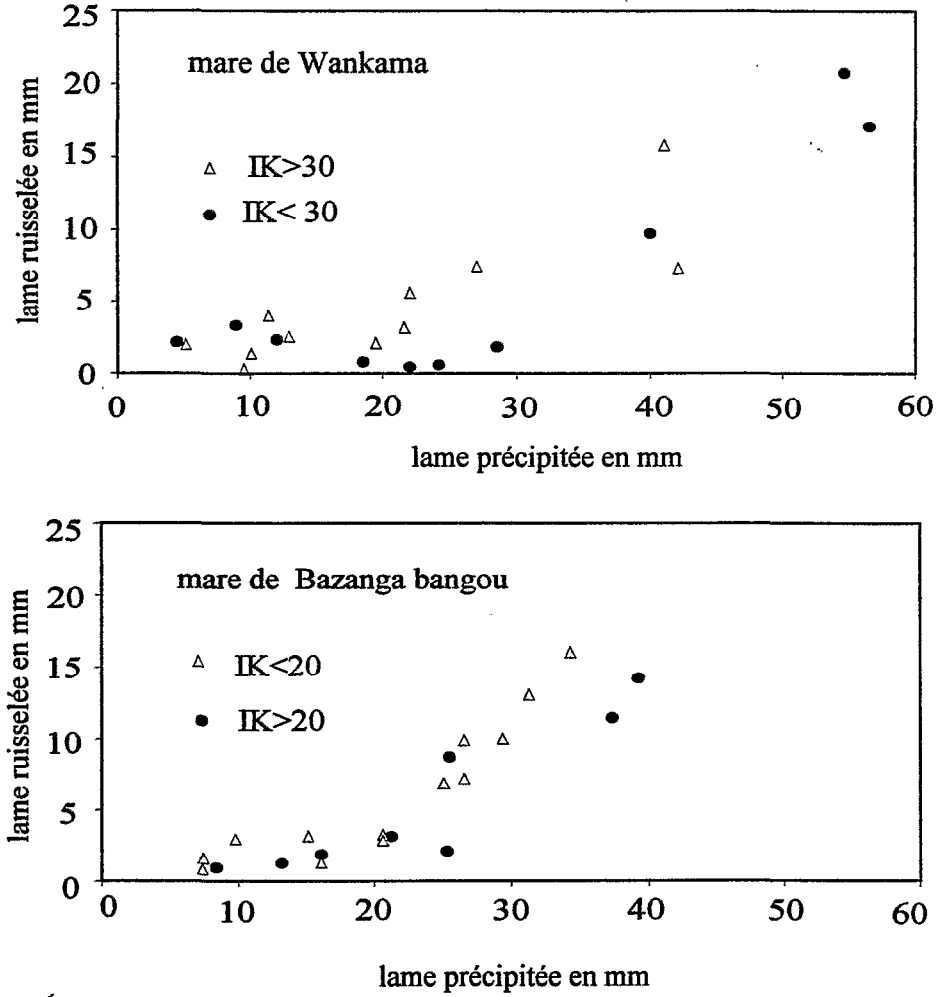


Figure 6. Relation lame précipitée-lame ruisselée en fonction de l'indice d'humidité IK.

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

où IK_n est la valeur de l'indice avant la pluie n , IK_{n-1} est la valeur de l'indice avant la pluie $n-1$, P_{n-1} est la hauteur de la pluie $n-1$, t est le temps, en fraction de jours, séparant la fin de la pluie $n-1$ du début de la pluie n , α est le coefficient ajusté à 0.15 pour nos sites (BOEMARE, 1992).

La figure 6 appelle les commentaires suivants :

- * dans les deux cas, une relation de même type que l'on pourrait diviser en deux ensembles : une réponse faible et constante du bassin pour des pluies allant jusqu'à 20-25 mm où la lame ruisselée reste inférieure à 5 mm. Le deuxième ensemble de points met en évidence une relation plus nette entre la lame ruisselée et la lame précipitée;
- * une dispersion non négligeable des points au sein de ces deux sous ensembles ;
- * une diminution sensible de cette dispersion en ce qui concerne le bassin de Bazanga si l'on partage la série de données en deux classes d'indice d'humidité IK.

Ces constatations, nous amènent aux réflexions suivantes :

- * les relations caractéristiques d'un bassin versant telles que l'on peut les décrire actuellement ne sont pas satisfaisantes et mettent en évidence la complexité de fonctionnement de ces bassins;
- * d'autres paramètres doivent être pris en compte pour comprendre et arriver à modéliser leur réponse moyenne.

Le coefficient moyen de ruissellement, calculé à partir des limites topographiques des bassins a été de 5 % environ en 1991 et 21 % en 1992 pour Wankama et de 23 % pour le bassin de Bazanga Bangou, sensiblement constant sur les deux années. Cependant, les bassins topographiques n'ont pas une signification hydrologique comparable à ce qu'elle est en zone d'écoulements continus, car, bien souvent, les écoulements qui parviennent à la mare ne proviennent que d'une aire plus restreinte. Les coefficients donnés ci-dessus permettent donc difficilement d'avoir une idée de l'intensité du ruissellement local.

5.2.3. Fonctionnement de la mare et régime saisonnier

Afin de lever toute ambiguïté quant à la signification des termes utilisés dans cette étude, nous appellerons **coefficient de ruissellement** le pourcentage de la lame d'eau précipitée sur le bassin arrivant à la mare et **coefficient de perte par infiltration** (noté K_{ib} dans le tableau 4) le pourcentage de la lame d'eau précipitée sur le bassin qui est perdu par **infiltration au sein de la mare**.

Les mares de Wankama et de Bazanga ont été décrites de manière détaillée dans DESCONNETS *et al* (1993). La présence d'une zone colmatée d'origine sédimentaire a été constatée. Dans les deux cas, la perméabilité au sein de cette zone semble très réduite. D'autre part, cette zone tend à disparaître graduellement pour laisser la place à un matériau perméable à très perméable selon que l'on s'intéresse à Bazanga ou Wankama. Ces discontinuités de matériaux et leurs caractéristiques hydrodynamiques régissent en grande partie le régime de vidange de la mare en saison des pluies (DESCONNETS *et al*, 1993).

L'examen des variations de niveau des deux mares au cours des années 1991 et 1992 (Fig. 7) montre le caractère temporaire de ces réservoirs. On observe pour les deux mares et au cours des deux années, une période durant laquelle les variations de niveau atteignent un régime de hautes eaux et s'y stabilisent jusqu'à la fin de la période pluvieuse. Ces niveaux maximums correspondent au maximum pluviométrique se produisant généralement au mois d'août.

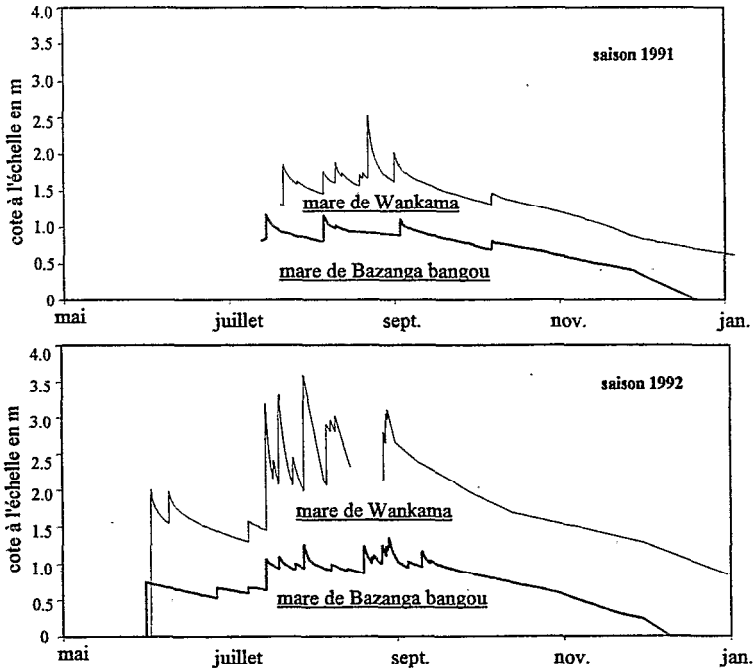


Figure 7. Variations des niveaux des mares de Wankama et Bazanga pour les années 1991 et 1992.

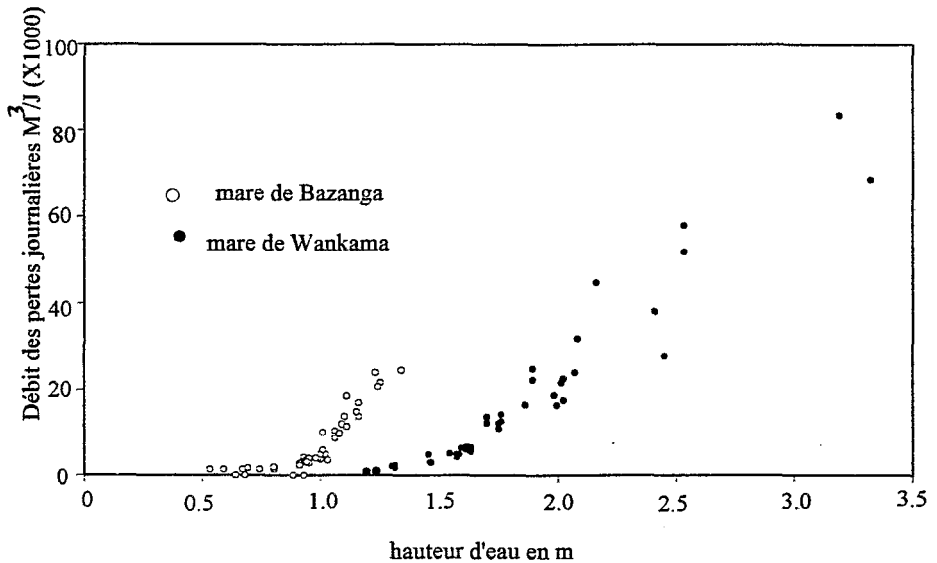


Figure 8. Débit moyen des pertes journalières en fonction de la hauteur d'eau.

Pour chaque mare, l'alimentation en eau de ruissellement par son bassin induit une brusque montée de niveau d'une amplitude souvent plus forte pour Wankama. De même, les baisses de niveau qui suivent l'alimentation de la mare ont une intensité nettement supérieure lorsque l'on s'intéresse à la mare de Wankama.

Une analyse de chaque période de vidange montre une vidange d'autant plus rapide que le niveau initial de la mare est élevé. D'autre part, à un pas de temps horaire, on constate que les pertes de niveau ou de volume ne sont pas linéaires mais de forme exponentielle avec une tendance à la linéarité en fin de période, et ce d'autant plus que la période est longue.

Si l'on caractérise une période de vidange par une valeur initiale et une valeur finale de son débit journalier, on peut établir pour tous les événements mesurés une relation spécifique à chacune des mares (Fig. 8). On constate que le débit des pertes de la mare croît avec la hauteur d'eau mais de façon non linéaire. Cette relation de type exponentiel est autant valable pour les phases initiales que les phases finales des périodes de vidange. Il s'agit de la loi de vidange de la mare qui est spécifique à chacune d'entre elles. Sa forme peut s'expliquer par la nature pédologique du lit de la mare et ses caractéristiques hydrodynamiques.

L'infiltrabilité instantanée décroît avec la hauteur d'eau. Elle tend vers une valeur faible et à peu près constante à partir d'une cote propre à chaque mare. Par exemple, cette cote est proche de 0.90 m à Bazanga et de 1.5 m à Wankama. Les valeurs d'infiltrabilité à cette hauteur sont du même ordre de grandeur que l'évaporation moyenne journalière.

Schématiquement, on peut diviser le lit de la mare en deux parties : une partie haute ayant un matériau très perméable et une partie basse ayant un matériau beaucoup moins perméable. A l'approche de la partie moins perméable, l'infiltrabilité sera contrôlée non plus par les matériaux poreux mais par la couche colmatée, diminuant ainsi très rapidement l'infiltrabilité. En termes de bilan, ce passage va se traduire par le changement de régime de la mare. En effet, il correspond au passage du régime d'infiltration (pertes par infiltration > 50 %) à un régime d'évaporation (pertes par évaporation > 50 %).

Tableau 3. Estimation des volumes évaporés pour les mares de Wankama et de Bazanga Bangou pour la saison sèche 1992 d'après DESCONNETS et TAUPIN (1993), en % du volume annuel transitant dans la mare et en m³.

	Méthode d'estimation			
	Bac enterré in situ	Bac classe A corrigé	Isotopique	Écart maximum (%)
	Mare de plateau (Bazanga Bangou)			
%	80,7	76,2	75	5.7
m ³	1 918	1 818	1 783	
	Mare de bas-fond (Wankama)			
%	41,6	43,8	35	8.8
m ³	2 348	2 471	1 974	

Pour une mare donnée, on appellera point d'inversion du régime, la cote à partir de laquelle on passe d'un régime d'infiltration à un régime d'évaporation. On comprend donc que plus ce point sera proche des hauteurs maximums de la mare, plus souvent la mare sera en régime d'évaporation. On constate que les mares de plateau comme Bazanga ont souvent un point d'inversion

très proche de leur cote maximum. Inversement, les mares de bas-fond ont un point d'inversion très bas ce qui laisse présager qu'en saison des pluies, la mare fonctionnera toujours (sauf sécheresse exceptionnelle) en régime d'infiltration.

Enfin, on peut caractériser le comportement hydrologique par un dernier paramètre qui est la constance du régime d'infiltration maximum en fonction de la cote. Ce paramètre est matérialisé dans la figure 9 par la forme de la relation pourcentage des pertes par infiltration versus cote à l'échelle.

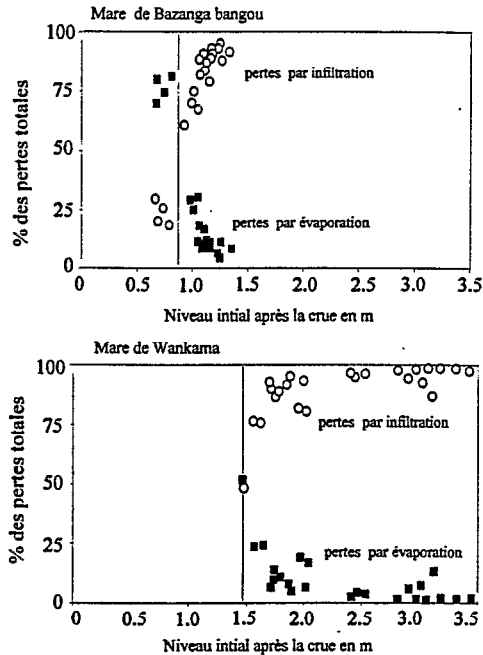


Figure 9. Parts respectives de l'infiltration et de l'évaporation dans le bilan de la mare en fonction de la hauteur du plan d'eau à la fin de l'épisode pluvieux (mares de Wankama et Bazanga).

5.2.4. Bilan hydrologique

5.2.4.1. L'évaporation

De la même manière que l'on a établi une relation entre la hauteur d'eau et le débit journalier de vidange, on peut établir une relation entre la hauteur d'eau et le rapport entre la baisse journalière de la mare et l'évaporation moyenne journalière d'un bac de classe A corrigé (DESCONNETS *et al*, 1993). On constate que ce rapport est souvent supérieur à 1 allant jusqu'à 70 pour Wankama pour les hauteurs maximums observées sur les deux ans. Néanmoins, pour les faibles hauteurs d'eau (hauteur inférieure à 0.90 m pour Bazanga et 1.40 m pour Wankama), et essentiellement dans le cas de la mare de plateau, ce rapport varie entre 0.5 et 1.5. Si l'on veut déterminer réellement les pertes par infiltration souvent très supérieures aux pertes par évaporation, il est tout d'abord nécessaire d'estimer d'une manière précise une évaporation journalière. Ceci sera d'autant plus nécessaire que la mare est dans une phase de vidange longue.

En 1992, une étude effectuée sur les mares de Bazanga et de Wankama a porté sur la comparaison de différentes méthodes d'estimation de l'évaporation (DESCONNETS et TAUPIN, 1993) : une mesure par bac enterré *in situ*; une correction de la mesure bac classe A à l'aide d'une relation empirique tirée de POUYAUD (1986) ($E_{lac} = 0,368E_{bac} + 3,035$, avec E_{lac} et E_{bac} en mm/j); une estimation par bilan isotopique. Les résultats de ces trois méthodes vont dans le même sens (tableau 3) :

- un régime d'évaporation en saison sèche contrasté entre mare de plateau (pertes par évaporation comprises entre 75 et 80,7 %) et la mare de bas-fond (entre 35 et 43,6 %).
- une estimation convergente de l'évaporation, l'écart maximal d'estimation étant de 8,8 % sur le bilan saisonnier de la mare de Wankama et de 5,7 % 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 sur des surfaces élémentaires. Par contre, l'estimation par correction de la mesure bac classe A est, de manière inattendue, proche des mesures *in situ*. En effet, sa comparaison à nos valeurs aurait logiquement dû 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 de nos mares.

En termes de bilan hydrologique, ces résultats sont satisfaisants, permettant d'obtenir une précision minimum de 10 % sur les lames évaporées. 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 les conséquences de l'imprécision de son estimation pour le calcul du bilan de la mare.

Dans ce contexte hydrologique la méthode isotopique paraît la plus fiable, les pertes par évaporation et par infiltration étant de grandeur comparable et la méthode étant à l'abri des pollutions possibles par les apports extérieurs. Par ailleurs, l'obligation de connaître précisément la correspondance hauteur volume nécessaire pour le calcul des lames évaporées par la modélisation isotopique n'est pas pénalisant, car on a pu calculer des relations hauteur volume précises pour chacune des mares. Une relation de transposition bac-mare a été calculée, en comparant les estimations par méthode isotopique avec les mesures du bac de classe A de l'aéroport de Niamey. Cette relation est de la forme $E_{mare} = K.E_{bac}$, où E_{mare} est la lame évaporée calculée par la méthode isotopique en mm/j, E_{bac} est la lame évaporée mesurée sur un bac de classe A (Niamey - Aéroport) en mm/j, et K est le coefficient de transposition moyen.

Le coefficient K est de 0.56 (écart type 0.08) pour la mare de plateau pour laquelle les conditions d'évaporation sont maximales et de 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. On notera la forte variabilité de K pour la mare de vallée (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 grand éventail de régimes de vidange) aurait sans doute mis à jour une corrélation du coefficient K avec la hauteur initiale de l'épisode.

5.2.4.2. Estimation de l'infiltration

D'une manière générale, le bilan d'une mare peut s'écrire de la façon suivante pour un intervalle de temps dt donné :

$$DV = R - (E + I + Ca)$$

où E est la variation de volume par évaporation directe, I est la variation de volume par infiltration, Ca est la variation de volume par la consommation animale, et R est la variation de volume par apport des écoulements de surface. Durant un intervalle de temps compris entre deux pluies, on peut négliger la consommation animale et le ruissellement n'intervient pas. On peut donc écrire :

$$I(dt) = (V(t_f) - V(t_i)) - E(dt)$$

où t_i et t_f sont les temps initial et final du calcul du bilan et $dt = t_f - t_i$.

L'application de cette équation au pas de temps de la mesure qui varie de 5 minutes à une journée donne le détail de l'évolution des pertes par infiltration pour chaque période de vidange.

Nous présentons dans la figure 10, les volumes infiltrés cumulés en pourcentage des pertes totales enregistrées durant un épisode de vidange. Pour chacune des mares, nous avons sélectionné deux événements de vidange avec des hauteurs d'eau initiales représentatives des valeurs extrêmes enregistrées.

On remarque que :

- * quelle que soit la mare, le pourcentage des volumes infiltrés est nettement supérieur pour l'épisode démarrant en cote haute par rapport à ce qu'il est pour l'épisode démarrant en cote basse,
- * cette différence est d'autant plus marquée pour la mare de bas-fond,
- * l'évolution de ces pertes par infiltration par rapport au temps est de type exponentiel et souvent linéaire en fin d'épisode. Pour une hauteur initiale donnée, ceci se vérifie d'autant plus que l'épisode est de longue durée.

D'une manière générale, la part infiltrée sera proportionnelle à la hauteur initiale en début d'épisode et d'autant plus importante par rapport à l'évaporation si cet épisode est de courte durée.

5.2.4.3. Variabilité du bilan saisonnier

La figure 9 matérialise l'évolution du bilan en fonction de la cote initiale de l'épisode de vidange. Elle met en évidence le point d'inversion du régime. D'autre part, cette représentation montre une autre caractéristique hydrologique : l'amplitude de chacun de ces régimes (différence entre les pertes par infiltration et les pertes par évaporation exprimée en % des pertes totales). On constate que cette amplitude est nettement plus grande pour la mare de bas-fond que pour la mare de plateau.

Le tableau 4 donne un aperçu du bilan des deux mares sur les années 1991 et 1992. Il ressort de ces valeurs :

- * des apports à la mare, exprimés en % de la lame d'eau précipitée sur le bassin, variant d'un facteur 5 d'une saison sur l'autre pour Wankama;
- * une infiltration des apports nettement supérieure pour la mare de bas-fond, pour les deux saisons; cette infiltration est par ailleurs d'autant plus importante que les apports sont grands, et ce pour les deux mares;
- * les coefficients d'infiltration varient assez peu d'une année sur l'autre sur la mare de plateau, mais sont multipliés par 5 sur la mare de bas-fond.

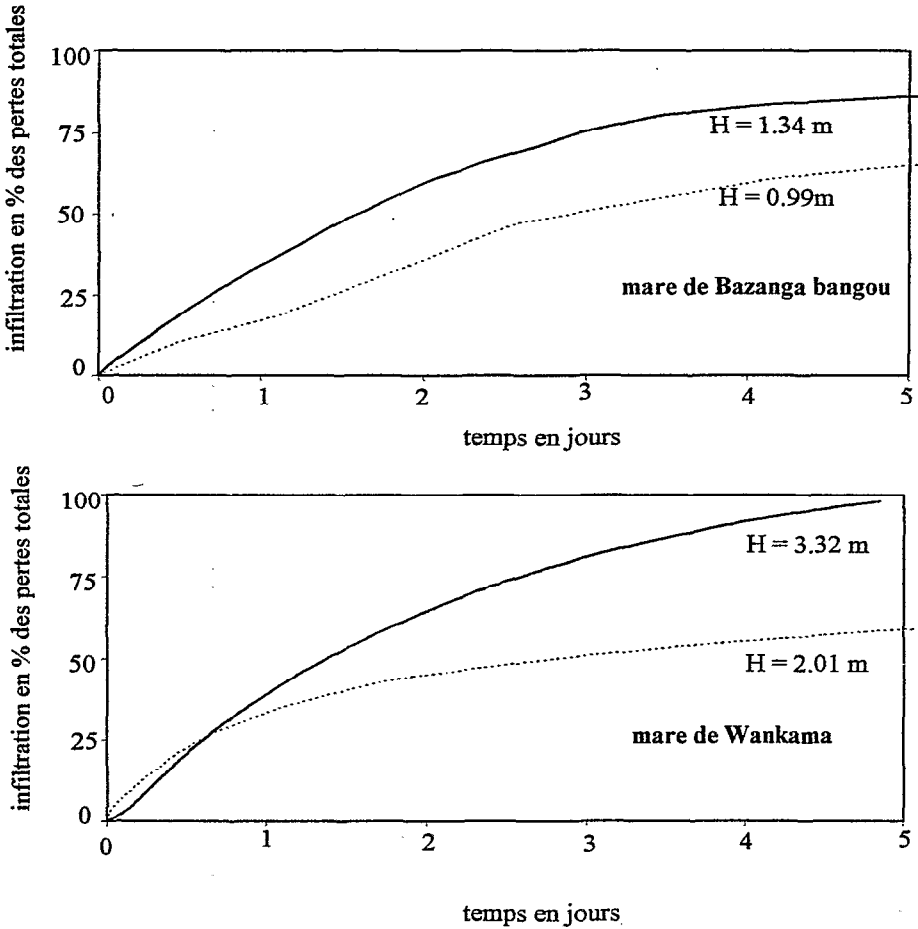


Figure 10. Courbe d'infiltration cumulée en fonction du temps pour deux hauteurs du plan d'eau à la fin de l'épisode pluvieux (mares de Wankama et Bazanga).

La forte variabilité du coefficient de pertes par infiltration constaté dans le système de bas-fond peut s'expliquer par une distribution temporelle des pluies très différente (déjà soulignée en section 5.1) d'une année sur l'autre associée à des événements ayant des caractéristiques exceptionnelles (intensités moyennes en 5 minutes de plus de 100 mm/h avec des hauteurs totales allant jusqu'à 60 mm : événements du 18, 22 et 31 juillet 1992). Cette variabilité montre la forte sensibilité du système de bas-fond au régime pluviométrique. Ceci se traduit par un régime permanent et maximum d'infiltration lorsque de fortes lames précipitées se succèdent à des intervalles de temps très réduits (période du 18 au 31 juillet 1992). La mare de Wankama a atteint lors de cette dernière crue une cote exceptionnelle, noyant l'acquisition de la sonde piézo-résistive et interrompant les enregistrements.

Tableau 4. Bilan saisonnier des mare de Wankama et Bazanga. K_{ib} est le coefficient de perte par infiltration tel que défini en début de section 5.2.3.

Saison 1991							
	Période de mesures	Pluie (mm)	Lame ruisselée mm (%)		Apports à la mare (m ³)	Part apports infiltrés (%)	K_{ib} %
Système de bas-fond (Wankama)	à partir du 20-7-1991	333.5	14.9	4.5	22 340	84.8	4
Système de plateau (Bazanga)	à partir du 14-7-1991	189	38.7	20.5	11 623	61.5	12
Saison 1992							
Système de bas-fond (Wankama)	11-04-11-08 29-08-30-08*	440.9	96.3	21.8	14 4432	93.6	20.4
Système de plateau (Bazanga)	toute la saison	511	115	22.5	34 468	72.7	16

* Interruption suite à crues exceptionnelles ayant submergé l'acquisition.

Tableau 5. Bilan saisonnier pour les mares de Banizoumbou, Maourey Kouara, Kampa Zarma et Poura Bangou.

Saison 1992							
	Période de mesures	Pluie (mm)	Lame ruisselée mm (%)		Apports à la mare (m ³)	Part apports infiltrés (%)	K_{ib} %
Bas-fond :	idem						
Maourey Kouara	Wankama	440.9	53.6	12.2	14 2753	88.4	10.8
Bas-fond :	toute la saison						
Banizoumbou	toute la saison	410.0	59.2	14.4	3 2167	83.1	11.6
Plateau :	toute la saison						
Kampa Zarma	toute la saison	455.5	86.9	19.1	20 778	56.2	10.7
Plateau :	toute la saison						
Poura Bangou	toute la saison	394.5	135.3	34.3	20 360	67.7	23.2

5.3. Aperçu sur l'extension et comparaison du bilan

Nous présentons dans le tableau 5, le bilan saisonnier sur quatre des mares appartenant à l'ensemble des sites suivis par échelles limnimétriques à partir de 1992. On retrouve le contraste existant entre les mares de bas-fond et les mares de plateau. Les ordres de grandeurs des pertes par infiltration (K_{ib}) sont tout à fait comparables pour chaque type de système.

5.4. Perspectives d'études

En 1993, le suivi limnimétrique de toutes les mares s'est continué avec un protocole de mesures identique. Par contre, le site de Wankama a été instrumenté de façon à suivre et comprendre les processus d'infiltration dans la zone colmatée et dans la zone perméable sableuse par l'implantation de deux tubes d'accès permettant le suivi de l'humidité par sondes à neutrons et ceci jusqu'à 6 mètres de profondeur. Cette instrumentation a été complétée par la mise en place d'un transect de piézographes perpendiculaire au lit de la mare. Ces instrumentations devraient permettre de valider les hypothèses émises quant aux processus qui régissent le fonctionnement de la mare mais aussi de quantifier les flux sortant de la mare et arrivant à la nappe.

D'autre part, on s'efforcera de relier les processus de l'infiltration déjà mis en évidence à des caractéristiques hydrodynamiques des différents milieux pédologiques présents sous les mares. Ce travail devrait aboutir à la paramétrisation des processus d'infiltration afin d'établir un modèle d'infiltration pour chaque type de mare identifié.

Enfin, la mise en place d'une typologie tenant compte à la fois des caractères morphologiques et pédologiques des cuvettes, des lois de vidange établies pour chacune de celles-ci, des relations mare-sous-sol servira à étendre le bilan sur toutes les mares de notre secteur d'étude. Une extension de cette typologie par la télédétection est envisageable mais requerra des études spécifiques.

6. CONCLUSION

Les études hydrologiques régionales en zone sahélienne se heurtent à des difficultés propres à ce type de milieu : *intermittence temporelle des écoulements et discontinuité spatiale des réseaux hydrographiques*. Un suivi des bassins endoréiques qui forment l'ossature hydrologique dans ces régions a été mis sur pied sur une zone test de 600 km². Son but était de fournir les éléments en vue d'une modélisation hydrologique, à l'échelle du super-site central est de HAPEX-Sahel dans un premier temps, puis éventuellement à celle du degré carré dans la mesure où les méthodes de spatialisation du milieu s'avéreront pertinentes. Le jeu de données recueillies n'a pas été aussi riche qu'on l'espérait au départ, du fait de difficultés météorologiques. Néanmoins, le suivi durant trois ans (seuls les résultats initiaux sur les deux premières années 1991 et 1992 ont été présentés ici) d'un certain nombre de mares témoins à l'aide d'enregistreurs de niveau a permis de se faire une bonne idée du fonctionnement général des systèmes endoréiques de plateau, d'une part, de bas-fonds, d'autre part. En ce qui concerne le ruissellement, les systèmes de plateau montrent une sensibilité bien moindre au régime pluviométrique (coefficient de ruissellement moyen annuel de l'ordre de 20 %, pratiquement constant) que les systèmes de bas-fonds où ce même coefficient peut varier de quelques % (1991) à plus de 25 % (1992) selon le rythme et l'intensité des pluies. Par ailleurs, l'infiltration depuis les mares de plateau ont été faibles par rapport à l'évaporation, alors que sur les mares de bas-fonds elle peut atteindre 22 % de la lame d'eau précipitée sur le bassin. Cette eau infiltrée depuis la mare est susceptible de rejoindre les nappes,

représentant ainsi le principal contributeur à leur recharge. Des études ultérieures à celles présentées ici (DESCONNETS *et al.*, 1993; LEDUC et DESCONNETS, 1994) ont effectivement confirmé qu'après une phase de saturation de la zone intermédiaire l'infiltration depuis la mare de bas-fonds de Wankama parvenait jusqu'à la nappe. On comprend donc l'importance d'approfondir les études sur ces mécanismes. Un observatoire a été mis en place à cette fin sur la mare de Wankama.

RÉFÉRENCES

- BOMAERE A., 1992, Bilan hydrologique du bassin versant de Wankama. Rapport de stage. Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier / ORSTOM- Mission au Niger.
- COURAULT D., J.M. D'HERBES, C. VALENTIN, 1990, Le bassin versant de Sama Dey, premières observations pédologiques et phytoécologiques (programme HAPEX-Sahel), *rapport ORSTOM-LIA*, 41 p.
- DESCONNETS J.C. and J.D. TAUPIN, 1993, Comparison of various methods for estimating pools evaporation in the Sahel during the dry season, in: SEVRUK B. and M. LAPIN (Editors), *Evaporation, water balance and deposition: Proceedings of the International Symposium on Precipitation and Evaporation*, September 1993, vol. 3, 62-67. Printed by Slovak Hydrometeorological Institute.
- DESCONNETS J.C., J.D. TAUPIN and T. LEBEL, 1993, Le rôle des mares dans le bilan hydrologique d'une région sahélienne, in : BOLLE H.-J., FEDDES, R.A. and KALMA, J. (Editors), *Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales* (Proceedings of the Yokohama Symposium, July 1993), IAHS Publ. N° 212, pp. 299-311.
- GOUTORBE J.P., T. LEBEL, A. TINGA, H. DOLMAN, E.T. ENGMAN, J.H.C. GASH, P. KABAT, Y.H. KERR, B. MONTENY, S. PRINCE, P. SELLERS, J. WALLACE, M. HOEPFFNER, 1992, Experiment Plan for HAPEX-SAHEL CNRM, Toulouse (à paraître aux Editions ORSTOM).
- LEBEL T., J.D. TAUPIN and M. GRÉARD, 1994, Rainfall Monitoring: The EPSAT-Niger Setup And Its Use For HAPEX-Sahel, in: « *Hydrologie et Météorologie de méso-échelle dans HAPEX-Sahel : dispositif de mesures au sol et premiers résultats* ». (ORSTOM Ed.)
- LEDCUC C. and J.C. DESCONNETS, 1994, Pools and recharge of the continental terminal phreatic aquifer near Niamey, Niger, proceedings of the *International Workshop on groundwater monitoring and recharge in semi-arid areas*, Hyderabad, India, 18-20 janvier 1994, SV13-SV22, edited by the National Geophysical Research Institute.
- POUYAUD B., 1986, Contribution à l'évaluation de l'évaporation des 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.

ANNEXE 1

LISTE DES MARES DU SECTEUR D'ÉTUDE
POOLS OF THE STUDY AREA

Tableau A1-1.

Liste des mares inventoriées dans le secteur d'étude ; coordonnées en degrés, minutes et centièmes de minute. Les mares marquées par le symbole £, sont les mares équipées d'échelles (voir tableau A1-2).

Pool inventory over the study area; coordinates in degrees, minutes and hundredth of minutes. The pools marked with the symbol £ are those equipped with a staff gauge (see table A1-2).

Nom	Latitude Nord*	Longitude Est*	Situation
Gassan ouest	13° 29 84	2° 30 14	plateau ensablé
£ Yelouma	13° 26 97	2° 30 80	vallée fermée
Gassan ouest2	13° 28 34	2° 31 81	plateau ensablé
Yelouma est3	13° 27 95	2° 32 58	plateau ensablé
Yelouma est4	13° 27 95	2° 32 58	plateau ensablé
Yelouma est1	13° 27 46	2° 32 72	plateau ensablé
Yelouma est2	13° 27 46	2° 32 72	plateau ensablé
Samsani bgo1	13° 34 23	2° 33 96	plateau de brousse tigrée
Samsani bgo3	13° 34 43	2° 34 13	plateau de brousse tigrée
Samsani bgo2	13° 33 94	2° 34 31	plateau de brousse tigrée
Kalasi	13° 31 17	2° 34 61	bas-fond de vallée
Balal segui 1	13° 28 80	2° 34 64	plateau ensablé
Balal segui 2	13° 28 80	2° 34 64	plateau ensablé
Samsani bgo4	13° 36 12	2° 34 91	plateau de brousse tigrée
£ Bazanga Bangou	13° 30 35	2° 35 11	plateau de brousse tigrée
Dolohi	13° 27 32	2° 35 60	plateau ensablé
Samsani bgo5	13° 33 42	2° 35 86	plateau de brousse tigrée
Dantiandou te	13° 36 73	2° 36 69	bas-fond de vallée
Komakk1	13° 29 79	2° 36 83	plateau de brousse tigrée
Komakk2	13° 29 56	2° 37 01	plateau de brousse tigrée
£ Poura Bangou	13° 38 71	2° 37 09	plateau de brousse tigrée
Fandobong 1	13° 26 34	2° 37 06	plateau ensablé
Komakk3	13° 29 60	2° 37 23	plateau de brousse tigrée
£ Kampa Zarma1	13° 26 09	2° 38 33	plateau ensablé
Kampa Zarma 2	13° 26 10	2° 38 33	plateau ensablé
Boundou	13° 33 32	2° 38 34	ancien cours d'eau
£ Wankama Ech.	13° 39 00	2° 38 91	ancien cours d'eau
£ Maourey kouara 1	13° 38 32	2° 38 96	ancien cours d'eau
£ Maourey kouara 2	13° 38 12	2° 39 15	ancien cours d'eau
Maourey kouara 4	13° 35 84	2° 39 03	ancien cours d'eau
£ Sulfey bangou	13° 30 03	2° 39 12	plateau de brousse tigrée
Maourey kouara 3	13° 36 56	2° 39 27	ancien cours d'eau
Wankama vill.3	13° 39 87	2° 39 32	vallée fermée
Wankama vill.2	13° 39 79	2° 39 39	vallée fermée
Wankama vill.1	13° 39 29	2° 39 42	ancien cours d'eau
Maourey kouara 5	13° 35 55	2° 39 73	ancien cours d'eau

	Nom	Latitude Nord*	Longitude Est*	Situation
£	Banizoumbou	13° 32 00	2° 39 73	ancien cours d'eau
	Wankama vill.4	13° 39 31	2° 39 97	ancien cours d'eau
	Kampa, Zarma Ech	13° 26 92	2° 40 08	Plateau
	Sama dey Pl.1	13° 35 99	2° 41 34	plateau de brousse tigrée
£	Sama dey Ech.	13° 36 09	2° 41 42	plateau de brousse tigrée
	Korto	13° 29 95	2° 41 53	vallée fermée
	Yerima dey	13° 28 93	2° 41 59	vallée fermée
	Filin 1	13° 39 51	2° 41 61	plateau de brousse tigrée
	Filin 2	13° 39 20	2° 41 68	plateau de brousse tigrée
	Sama dey Pl.3	13° 36 21	2° 41 70	plateau de brousse tigrée
£	Sama dey Village	13° 35 12	2° 42 07	vallée fermée
	Sama dey 4	13° 36 20	2° 42 11	plateau de brousse tigrée
	Sama dey 5	13° 36 22	2° 42 12	plateau de brousse tigrée
£	Sofia bangou	13° 32 42	2° 42 62	plateau de brousse tigrée
	Filin 5	13° 40 00	2° 43 02	plateau de brousse tigrée
	Filin 3	13° 39 37	2° 43 29	plateau de brousse tigrée
	Filin 4	13° 39 48	2° 43 65	plateau de brousse tigrée
	Darey Bangou	13° 37 94	2° 44 41	plateau ensablé
	Dahel bgo2	13° 34 31	2° 45 73	plateau de brousse tigrée
	Dahel bgo1	13° 33 66	2° 45 99	plateau de brousse tigrée
	Bagoua	13° 29 76	2° 46 04	ancien cours d'eau
	Sofi bgo 3	13° 34 22	2° 46 45	plateau de brousse tigrée
£	Karbanga	13° 34 64	2° 46 73	plateau de brousse tigrée
	Sofi bgo 3	13° 39 78	2° 49 59	plateau de brousse tigrée
	Sofi bgo 1	13° 38 71	2° 49 95	plateau de brousse tigrée
	Sofi bgo 2	13° 39 49	2° 49 97	plateau de brousse tigrée

ANNEXE 2

HYDROMÉTRIE/HYDROMETRY

Tableau A2-1. Nom, position et instrumentation des sites étudiés.
Name, location and level sensor for each sample site.

Nom (name)	Latitude Nord	Longitude Est	Situation (location)	Instrumentation (gauge)	Période de suivi (measurement period)
Yelouma	13° 26 97	2° 30 80	cuvette	station CHLOE	voir TabA2-2
Bazanga					
Bangou	13° 30 35	2° 35 11	plateau	station CHLOE	voir TabA2-2
Poura					
Bangou	13° 38 71	2° 37 09	plateau	échelle limnimétrique	08-06 au 09-10
Kampa					
zarma	13° 26 09	2° 38 33	plateau ensablé	échelle limnimétrique	02-06 au 09-10
Maourey					
kouara 1	13° 38 32	2° 38 96	ancien cours d'eau	échelle limnimétrique	13-06 au 09-08
Wankama	13° 39 00	2° 38 91	ancien cours d'eau	station CHLOE	voir TabA2-2
Maourey					
kouara 2	13° 38 12	2° 39 15	ancien cours d'eau	échelle limnimétrique	13-06 au 09-10
Banizoumbou	13° 32 00	2° 39 73	ancien cours d'eau	échelle limnimétrique	08-06 au 09-10
Sulfey					
bangou	13° 30 03	2° 39 12	plateau	échelle limnimétrique	08-06 au 09-10
Sama dey					
plateau	13° 36 09	2° 41 42	plateau	échelle limnimétrique	15-06 au 09-10
Sofia bangou	13° 32 42	2° 42 62	plateau	échelle limnimétrique	non suivie en 1992
Karbanga	13°34 64	2°46 73	plateau	échelle limnimétrique	15-06 au 09-10
Sama Dey					
Village	13°35 12	2° 42 07	cuvette	station CHLOE	voir TabA2-2
Massi					
koubou*	13° 50 31	2°24 56	cuvette	station CHLOE	voir TabA2-2
Sorey*	13° 26 40	2° 14 11	ancien cours d'eau	station CHLOE	voir TabA2-2

* En dehors de la zone 30 x 20 km²; *outside the boundaries of the 30 x 30 km² study area.*

Ancien cours d'eau : *dry valley*

Cuvette : *depression*

Échelle limnimétrique : *staff gauge*; station CHLOE : *automatic level recording station.*

Tableau A2-2. Périodes de fonctionnement des stations limnigraphiques CHLOE.
Dates of operation of the recording gauges CHLOE.

Nom de la mare	Période de fonctionnement saison 1991	Période de fonctionnement saison 1992	Observations
Bazanga Bangou	juillet à novembre	mai à décembre	arrêt 13-8-91 au 28-8-91 mare pérenne arrêt en août 1992-suivi par lecture d'échelle
Massi koubou	non installée	mai à octobre	
Sama dey	non installée	août à octobre	
Sofia bangou	avril à novembre	site abandonné	
Sorey		installée en juin	
Wankama	juillet à décembre	mai à août	
Yélouma	juin à novembre	juin à novembre	

Tableau A2-3. Surveillance des mares équipées d'échelles limnimétriques (relevés ORSTOM).
 Dates of visit for the pools equipped with staff gauges (ORSTOM survey).

JOUR DE RELEVÉ	10-6-92	17-6-92	24-6-92	1-7-92	8-7-92	15-7-92
Kampa zarma	10:20	11:10	10:13	10:15	9:45	13:05
Sulfey bangou	10:52	11:35	10:51	11:25	10:15	12:40
Banizoumbou	11:27	11:58	11:20	11:48	10:30	12:25
Sama dey pl.	12:35	12:57	12:20	12:35	11:00	11:35
Maourey 1	13:50	14:00	12:50	13:20	11:35	11:05
Maourey 2	-	14:30	13:04	13:33	11:40	10:50
Zankay bangou	15:53	14:46	13:50	14:10	12:10	10:25
Poura bangou	16:10	15:22	14:18	15:00	12:35	9:45
JOUR DE RELEVÉ	22-7-92	23-7-92	29-7-92	7-8-92	8-8-92	9-8-92
Kampa zarma	11:35	17:30	10:35	11:30	13:53	19:15
Sulfey bangou	12:53	17:00	11:26	12:10	14:25	19:39
Banizoumbou	13:39	15:40	13:16	13:31	8:33	17:00
Sama dey pl.	14:44	-	14:15	14:19	9:42	-
Maourey 1	16:30	14:51	15:15	17:34	10:36	17:20
Maourey 2	-	14:15	15:37	16:53	11:10	17:37
Zankay bangou	-	12:25	16:10	15:19	11:55	18:05
Poura bangou	-	11:50	16:47	16:11	12:23	18:28
JOUR DE RELEVÉ	10-8-92	12-8-92	16-8-92	19-8-92	27-8-92	28-8-92
Kampa zarma	-	10:30	19:02	10:15	12:40	18:35
Sulfey bangou	-	11:00	18:36	10:45	13:25	19:20
Banizoumbou	-	11:34	21:30	13:00	14:27	14:00
Sama dey pl.	-	12:23	16:56	12:10	15:20	-
Maourey 1	16:20	14:30	-	-	0:00	-
Maourey 2	16:30	15:11	16:30	14:25	16:40	16:50
Zankay bangou	-	16:34	17:16	15:20	16:04	-
Poura bangou	-	17:00	17:45	15:55	17:10	-
JOUR DE RELEVÉ	29-8-92	31-8-92	1-9-92	2-9-92	10-9-92	19-11-92
Kampa zarma	-	16:48	-	15:30	11:05	10:22
Sulfey bangou	-	17:42	-	14:55	11:25	-
Banizoumbou	14:00	8:30	16:00	13:50	11:56	11:00
Sama dey pl.	10:00	9:30	18:50	-	12:30	11:35
Maourey 1	-	-	-	-	-	-
Maourey 2	11:58	11:09	-	11:15	13:30	12:31
Zankay bangou	11:15	10:28	-	10:32	13:02	12:00
Poura bangou	12:44	11:54	-	12:21	14:04	12:43

JOUR DE RELEVÉ	6-7-92	13-7-92	20-7-92	27-7-92	4-8-92	10-8-92	14-8-92
Kampa zarma	10:50	10:07	10:46	11:32	10:17	11:53	10:49
Sulfey bangou	11:26	10:35	11:13	12:10	10:44	12:19	11:20
Banizoumbou	10:47	10:55	11:35	12:28	11:02	13:01	11:36
Sama dey pl.	12:30	11:31	12:13	13:01	11:40	13:36	12:12
Maourey 1	14:07	12:05	12:55	13:44	12:19	14:27	13:09
Maourey 2	14:16	12:22	13:28	14:17	-	15:08	13:40
Zankay bangou	13:30	12:49	14:03	14:45	15:37	15:39	14:07
Poura bangou	14:33	13:26	14:31	15:23	15:59	16:13	14:33
JOUR DE RELEVÉ	17-8-92	24-8-92	28-8-92	31-8-92	4-9-92	7-9-92	11-9-92
Kampa zarma	11:09	10:50	10:05	10:30	10:27	-	10:45
Sulfey bangou	11:38	11:22	10:34	12:08	11:00	10:52	11:11
Banizoumbou	11:55	11:38	10:54	12:36	11:21	11:11	11:30
Sama dey pl.	12:30	12:25	11:40	13:22	12:00	12:05	12:12
Maourey 1	13:24	13:20	12:30	-	13:05	13:40	13:10
Maourey 2	13:55	14:08	13:05	-	13:40	13:02	13:48
Zankay bangou	14:20	14:35	13:35	15:35	14:13	14:26	14:15
Poura bangou	14:45	15:00	14:00	15:08	14:37	14:59	14:42
JOUR DE RELEVÉ	14-9-92	17-9-92	21-9-92	25-9-92	28-9-92	2-10-92	5-10-92
Kampa zarma	11:03	10:43	10:19	9:50	9:56	10:00	10:30
Sulfey bangou	11:37	11:15	10:44	10:17	10:22	10:23	10:54
Banizoumbou	12:00	11:45	11:04	10:35	10:42	10:39	11:13
Sama dey pl.	12:30	12:23	11:47	11:11	11:13	11:20	11:42
Maourey 1	13:05	13:13	12:27	12:00	11:47	12:00	12:17
Maourey 2	13:37	14:07	12:55	12:30	12:05	12:18	12:33
Zankay bangou	14:05	14:35	13:21	13:05	12:31	-	13:02
Poura bangou	14:30	15:02	13:52	13:30	12:50	12:43	13:30
JOUR DE RELEVÉ	9-10-92	12-10-92	16-10-92	23-10-92	26-10-92	30-10-92	2-11-92
Kampa zarma	9:55	10:10	9:20	9:35	10:18	10:30	10:42
Sulfey bangou	10:20	10:35	9:54	10:09	10:47	10:53	11:07
Banizoumbou	10:38	10:53	10:13	10:20	11:04	11:08	11:22
Sama dey pl.	11:08	11:40	10:42	10:46	11:37	11:44	11:50
Maourey 1	11:42	12:21	-	-	-	-	-
Maourey 2	12:00	13:30	11:53	11:37	12:21	12:22	12:30
Zankay bangou	12:25	14:02	12:30	12:00	12:49	12:52	12:55
Poura bangou	12:55	14:25	12:54	12:20	13:14	13:20	13:16
JOUR DE RELEVÉ	6-11-92	9-11-92	13-11-92	16-11-92	20-11-92	23-11-92	27-11-92
Banizoumbou	12:02	10:46	10:16	10:02	10:04	10:07	11:02
Kampa zarma	11:25	10:14	9:40	9:25	9:33	9:53	10:38
Maourey 2	13:09	11:42	11:15	11:05	11:16	11:07	11:57
Poura bangou	14:01	12:40	12:07	11:55	12:07	12:05	12:38
Sama dey pl.	12:32	11:10	10:41	10:28	10:40	10:33	-
Sulfey bangou	11:48	10:35	10:03	9:46	9:55	-	-
Zankay bangou	13:33	12:05	11:40	11:30	11:40	11:28	12:18

Tableau A3-2. Évolution des teneurs chimiques, et isotopiques de la mare de Wankama pour la saison 1991.
Hydrochemical and isotopes analysis for Wankama (1991).

Date	18O ‰	2H ‰	Volume m ³	Temp. Eau °C	Conduc- tivité µS	pH	Tac mg/l	Cl	Ca	Mg	K	Na	NO ₃	SO ₄	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
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	1 377.2	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	-	-	3 456.5	25.4	30.0	7.0	10.4	1.3	0.5	1.1	1.0						
15-08-1991	- 3.43	24.40	1 377.2	26.3	44.4	7.1	14.0	1.8	0.6	1.4	1.0						
22-08-1991	10.10	72.40	4 565.8	23.3	18.0	7.1	4.3	0.6	1.0	1.1	1.0						
29-08-1991	-	-	1 647.8	30.2		6.8	14.0	1.3	1.0	2.0	0.9						
05-09-1991	-	-	1 893.0	28.8	35.4	6.6	15.3	1.5	0.6	1.2	0.8						
12-09-1991	- 4.22	40.80	1 204.4	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 A3-3. Teneurs isotopiques et mesures bac sur la mare de Bazanga Bangou pour la saison 1992.

Isotopes analysis and pan measurements for Bazanga Bangou (1992).

Date	Cote échelle m	Volume m ³	Lame évaporée du bac enterré mm	Conductivité µS	¹⁸ O ‰	² H ‰
23-09-1992	0.93	2 384.8	8	23	- 1.1	- 11.7
24-09-1992	0.92	2 284.9	5	21		
28-09-1992	0.88	1 913.8	22	36	0.8	- 5.1
01-10-1992	0.87	1 827.9	18	52	2.0	
07-10-1992	0.82	1 437.9	33	74	3.9	11.7
08-10-1992	0.79	1 233.7	10	80		
10-10-1992	0.78	1 170.4	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 A3-4. Teneurs isotopiques et mesures bac sur la mare de Wankama pour la saison 1992.*Isotopes analysis and pan measurements for Wankama (1992).*

Date	Cote échelle m	Volume m ³	Lame évaporée du bac enterré mm	Conductivité µS	¹⁸ O ‰	² H ‰
23-09-1992	2.12	6 045.5	0	35	-3.1	-22.5
24-09-1992	2.09	5 731.0	6	-		
25-09-1992	2.06	5 306.2	8	-		
28-09-1992	1.98	4 457.5	16	48		
01-10-1992	1.92	3 839.0	16	53	-1.5	-16.2
06-10-1992	1.83	3 011.5	30	64	-0.8	-11.5
08-10-1992	1.80	2 762.1	10	74	-0.2	
10-10-1992	1.77	2 487.5	11	89	0.1	
14-10-1992	1.69	1 925.2	25	94	0.9	
17-10-1992	1.66	1 767.7	17	103	1.8	-0.6
21-10-1992	1.62	1 533.2	30	95	2.7	4.5
23-10-1992	1.61	1 423.2	12	97		
28-10-1992	1.57	1 225.1	34	86	4.2	
02-11-1992	1.52	1 048.5	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

ANNEXE 4

MESURES DE PLUIE/
RAINFALL MEASUREMENTS**Tableau A4-1.** Postes pluviométriques (réseau EPSAT-Niger) des mares instrumentées.
EPSAT-NIGER raingauges closest to the instrumented pools.

Mares étudiées	Station EPSAT-Niger	Position	N° EPSAT	Longitude Latitude	Période de fonctionnement
Banizoumbou	Banizoumbou	dans le bassin	11	02 39 62 13 31 97	permanent
Bazanga Bangou	Bazanga bangou	<i>idem</i>	5	02 34 99 13 30 33	17-4 -23-10
Karbanga	Darey	<i>idem</i>	18	02 44 53 13 38 20	12-05-23-10
Sulfey bangou	Gasseйда	éloigné du bassin	12	02 39 75 13 28 29	10-04 - 23-10
Sulfey bangou	Koma koukou	<i>idem</i>	6	02 37 74 13 29 89	permanent
Kampa zarma	Kampa zarma	dans le bassin	13	02 38 89 13 26 48	07-05 - 23-10
Massi koubou	Massi koubou	<i>idem</i>	78	02 25 00 13 49 61	09-04 - 20-10
Sorey	Niamey aéroport	éloigné du bassin	94	02 10 39 13 28 79	permanent
Sama dey village	SD village	dans le bassin	102	02 41 66 13 34 85	permanent
Sama dey plateau	SD village	proche du bassin	<i>idem</i>	<i>idem</i>	<i>idem</i>
Wankama	Wankama	dans le bassin	116	02 38 91 13 39 00	20-02 - 27-10
Maourey	Wankama	proche du bassin	<i>idem</i>	<i>idem</i>	<i>idem</i>
Yélouma	Yélouma village	<i>idem</i>	117	02 30 80 13 26 97	16-04 - 23-10

Dans le bassin versant : *within the watershed boundaries.*

Proche du bassin versant : *outside but close to the watershed (< 2 km).*

Eloigné du bassin versant : *watershed relatively far (> 2 km) from the watershed.*

Tableau A4-2. Composition chimique des cumuls hebdomadaires pluviométriques à la station de Yélouma-Est (campagne 1991).
Chemical analysis of weekly cumulative rainfall at Yelouma-East (1991 campaign).

Echantillonnage	Ca	Mg	K	Na	Tac	Cl	NO ₃	SO ₄	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
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 04-7-91	0.621	0.438	5.318	1.334	2.563	2.128	2.604	3.362	16.65	9.83	2.24
Période du 04-7-91 au 11-7-91	0.681	0.085	0.156	0.414		1.418	1.240	1.921			
Période du 11-7-91 au 18-7-91	0.381	0.061	0.313	0.483		1.418		1.441			
Période du 18-7-91 au 25-7-91	0.060	0.012	0.235	0.253		1.418		0.961			
Période du 25-7-91 au 01-8-91	1.323	0.085	0.156	0.345		1.064	0.620	1.441			
Période du 01-8-91 au 08-8-91	0.401	0.024	0.078	0.230		0.709		0.865			
Période du 08-8-91 au 15-8-91	0.782	0.049	0.196	0.506		2.128	0.620	1.441			
Période du 15-8-91 au 22-8-91	0.100	0.024		0.069		0.355		0.480			
Période du 22-8-91 au 29-8-91	0.621	0.158	0.039	0.184		1.808	0.248	0.672	0.00	0.21	0.00
Période du 29-8-91 au 05-9-91	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 03-10-91 au 10-10-94	0.240	0.085				0.426		0.336	0.00	0.15	0.00

ANNEXE 5

PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES
AERIAL PHOTOGRAPHS

Tableau A5-1. Missions photographiques de couverture des bassins versants (1992).
Catchment survey (1992).

Date de la mission	Bassin versant <i>Catchment</i>	Coordonnées du site <i>Coordinates</i>	Altitude de prise de vue (pieds) <i>Altitude (feet)</i>
11-6-92	Couverture du bassin de Sama dey	13° 31.63 - 13° 35.95 N 02° 38.77 - 02° 47.77 E	7 500
2-7-92	Couverture du site central Ouest	13° 27.67 - 13° 32.07 N 02° 29.25 - 02° 37.75 E	7 500
2-7-92	<i>idem</i> (complémentaire)	13° 33.17 - 13° 35.37 N 02° 29.25 - 02° 37.75 E	7 000
23-7-92	Couverture des bassins des mares de : Kampa Zarma Banizoumbou Sama dey Maourey Kouara Wankama Darey Bangou Poura bangou	13° 26.92 N - 2° 40.08 E 13° 32.00 N - 2° 39.73 E 13° 36.09 N - 2° 41.42 E 13° 38.32 N - 2° 38.56 E 13° 39.00 N - 2° 38.91 E 13° 37.94 N - 2° 44.41 E 13° 38.71 N - 2° 37.03 E	3 000
24-8-92	Couverture des bassins des mares de : Bazanga Bangou Sulfey bangou Maourey Kouara Sama Dey Village Massi Koubou	13° 30.35 N - 2° 35.11 E 13° 30.03 N - 2° 39.12 E 13° 38.12 N - 2° 39.15 E 13° 35.12 N - 2° 42.07 E 13° 50.31 N - 2° 24.56 E	3 300
18-9-92	Couverture du bassin de Wankama	13° 39.00 N - 2° 38.91 E	3 300
5-11-92	Couverture du bassin de la mare de Yélouma	13° 26.97 N - 2° 30.80 E	6 500

Les missions photographiques ayant pour objet la couverture de bassins versants ont été réalisées avec un CESSNA 185 et une HASSELBLAD 553 ELX monté avec un objectif Distagon 50 mm. *Catchment survey missions were carried out using an HASSELBLAD 553 ELX camera equipped with a 50 mm objective.*

Tableau A5-2. Récapitulatif des missions photographiques pour la surveillance des niveaux des mares en 1992.
Survey of pool levels (1992).

Mission	Jour Day	Avion Plane	Type film Type of film	Observations
1	21-9-92	Ulm mustang	125 asa 12 p.	RAS
2	8-10-92	Ulm weedhopper	125 asa 70 p.	RAS
3	16-10-92	Ulm weedhopper	125 asa 70 p.	RAS
4	23-10-92	Ulm weedhopper	125 asa 70 p.	Panne moteur : rte 1 + 3 mares de rte 2
5	4-11-92	Ulm weedhopper	125 asa 70 p.	Vent
6	13-11-92	Ulm weedhopper	125 asa 70 p.	Route 1 puis arrêt cause trop de vent
7	18-11-92	Cessna185 F	125 asa 70 p.	RAS

Tableau A5-3. Routes suivies pour la surveillance des mares.
Aerial routes used for the pools survey.

Route n° 1	Coordonnées Coordinates	Route n° 2	Coordonnées Coordinates	Route n° 3	Coordonnées Coordinates
Sulfey bgo	13° 30'.04 2° 39'.15	Karbanga	13° 34'.64 2° 46'.73	Banizoumbou	13° 32'.00 2° 38'.38
Koma	13° 29'.60	Sofi Bangou 1	13° 38'.71 2° 49'.95	Kalasi	13° 31'.17 2° 34'.61
Koukou 3	2° 37'.23	Sofi Bangou 2	13° 39'.49 2° 49'.97	Samsani	13° 33'.42 2° 35'.86
Koma	13° 29'.56	Darey Bangou	13° 37'.94 2° 44'.41	Bangou 5	13° 33'.94 2° 34'.31
Koukou 2	2° 37'.01	Wankama 1	13° 39'.29 2° 39'.42	Samsani	13° 34'.23 2° 33'.96
Koma	13° 29'.79	Wankama 2	13° 39'.79 2° 39'.39	Bangou 1	13° 34'.43 2° 34'.13
Koukou 1	2° 36'.83	Wankama 3	13° 39'.87 2° 39'.32	Samsani	13° 36'.12 2° 34'.91
Bazanga	13° 30'.35	Wankama	13° 39'.00 2° 38'.91	Bangou 4	13° 38'.60 2° 37'.03
Bangou	2° 35'.11	Maourey	13° 38'.32 2° 39'.00		
Yélouma	13° 26'.97	Kouara 1	13° 38'.08 2° 39'.16		
Dolohi	13° 27'.32 2° 35'.60	Maourey	13° 36'.56 2° 39'.27		
Kampa	13° 26'.09	Kouara 2	13° 35'.99 2° 41'.34		
Zarma 1	2° 38'.38	Maourey 3	13° 36'.09 2° 41'.42		
Kampa	13° 26'.10	Sama dey 1	13° 36'.21 2° 41'.70		
Zarma 2	2° 38'.38	Sama dey Ech.	13° 36'.20 2° 42'.11		
Yérima dey	13° 28'.93 2° 41'.59	Sama dey 3			
Bagoua	13° 29'.76 2° 46'.04	Sama dey 4 et 5			

Tableau A5-4. Inventaire des photographies aériennes pour les mares de la route n° 1.
Focale de 50 mm.

Inventory of the aerial photographs for route n° 1. Focal: 50 mm.

N° : « planche »/« photo »/reference of the photo inventory.

Alt. : altitude en mètres/altitude in metres.

Echelle : échelle théorique négatif/theoretical scale of the negatives.

Date vol/date of flight	21-9-92			8-10-92		
	N°	Alt.	Echelle	N°	Alt.	Echelle
Sulfey bangou	5.03	457.2	9 144	1.01	200	4 000
Koma koukou 1	5.04	457.2	9 144	1.02	200	4 000
Koma koukou 2	5.05	457.2	9 144	1.03	200	4 000
Koma koukou 3	5.06	457.2	9 144	-	200	4 000
Bazanga bangou	5.07	304.8	6 096	1.05	160	3 200
Yélouma	5.10	304.8	6 096	1.06	160	3 200
Dolohi 1	5.08	304.8	6 096	1.07	160	3 200
Dolohi 2	5.09	304.8	6 096	1.08	160	3 200
Kampa zarma 2	7.02	295.7	5 913.12	1.09	200	4 000
Kampa zarma ech.	7.03	295.7	5 913.12	1.10	200	4 000
Yérima dey	7.04	225.6	4 511.04	1.11	200	4 000
Bagoua	7.05	317.0	6 339.84	1.12	250	5 000
Date vol/date of flight	16-10-92			23-10-92		
	N°	Alt.	Echelle	N°	Alt.	Echelle
Sulfey bangou	1.01	150	3 000	1.03	200	4 000
Koma koukou 1	1.05	120	2 400	-	-	-
Koma koukou 2	1.04	120	2 400	1.01	140	2 800
Koma koukou 3	1.02	100	2 000	1.02	180	3 600
Bazanga bangou	1.06	175	3 500	1.07	220	4 400
Yélouma	1.09	120	2 400	1.06	200	4 000
Dolohi 1	1.08	150	3 000	-	160	3 200
Dolohi 2	1.07	150	3 000	-1.05	-	-
Kampa zarma 2	1.11	200	4 000	1.04	220	4 400
Kampa zarma ech.	1.12	200	4 000	1.08	220	4 400
Yérima dey	1.10	150	3 000	-	-	-
Bagoua	1.13	210	4 200	1.09	240	4 800

Date vol/ <i>date of flight</i>	4-11-92			13-11-92		
	N°	Alt.	Echelle	N°	Alt.	Echelle
Sulfey bangou	1.03	180	3 600	-	-	-
Koma koukou 1	-	-	-	-	-	-
Koma koukou 2	1.01	160	3 200	1.03	150	3 000
Koma koukou 3	1.02	160	3 200	1.04	150	3 000
Bazanga bangou	1.06	220	4 400	1.01	180	3 600
Yélouma	1.05	200	4 000	-	-	-
Dolohi 1	-	-	-	-	-	-
Dolohi 2	-	-	-	-	-	-
Kampa zarma 2	1.04	220	4 400	1.08	180	3 600
Kampa zarma ech.	1.07	220	4 400	1.10	180	3 600
Yérima dey	-	-	-	-	-	-
Bagoua	1.08	220	4 400	1.06	-	-
Date vol/ <i>date of flight</i>	18-11-92					
	N°	Alt.	Echelle			
Sulfey bangou	-	-	-			
Koma koukou 1	-	-	-			
Koma koukou 2	-	-	-			
Koma koukou 3	-	-	-			
Bazanga bangou	1.04	499.2	9 984			
Yélouma	-	-	-			
Dolohi 1	-	-	-			
Dolohi 2	-	-	-			
Kampa zarma 2	1.06	473.6	9 472			
Kampa zarma ech.	1.08	473.6	9 472			
Yérima dey	-	-	-			
Bagoua	2.01	467.2	9 344			

Tableau A5-5. Inventaire des photographies aériennes pour les mares de la route n° 2.
Focale de 50 mm.

Inventory of the aerial photographs for route n° 2. Focal: 50 mm.

N° : « planche », « photo » / *reference of the photo inventory.*

Alt. : altitude en mètres / *altitude in metres.*

Echelle : échelle théorique négatif / *theoretical scale of the negatives.*

Date vol	21-9-92			8-10-92		
	N°	Alt.	Echelle	N°	Alt.	Echelle
Sofi bangou 1	7.06	224	4 480		-	
Sofi bangou 2	7.07	224	4 480	2.03	220	4 400
Darey bangou	7.08	224	4 480	2.02	220	4 400
Karbanga	7.09	288	5 760	2.06	200	4 000
Wankama 1	4.03	185.6	3 712	2.05	180	3 600
Wankama 2	4.01	185.6	3 712	2.04	180	3 600
Wankama 3	4.02	185.6	3 712	2.09	180	3 600
Kori 93	4.04 et 05	192	3 840	2.08	260	5 200
Maourey5	4.06 et 07	224	4 480	2.10	280	5 600
Maourey2	6.09,10 et 11	240	4 800	2.11 et 12	355	7 100
Maourey1	6.12	284.8	5 696	3.02	300	6 000
Sama dey 1	4.12	192	3 840	3.01	200	4 000
Sama dey 2	4.10	192	3 840	3.04	200	4 000
Sama dey 3	4.11	192	3 840	3.05	200	4 000
Sama dey 4	4.08	192	3 840	3.06	200	4 000
Sama dey ech.	4.09	192	3 840	3.07	200	4 000
Date vol	16-10-92			23-10-92		
	N°	Alt.	Echelle	N°	Alt.	Echelle
Sofi bangou 1	2.03	180	3 600	-	-	
Sofi bangou 2	2.01	180	3 600	1.10	240	4 800
Darey bangou	2.02	180	3 600	1.11	220	4 400
Karbanga	2.04	180	3 600	arrêt de la mission		
Wankama 1	2.05	180	3 600			
Wankama 2	2.06	180	3 600			
Wankama 3	2.08	180	3 600			
Kori 93	2.07	200	4 000			
Maourey5	2.11	200	4 000			
Maourey2	2.12 3.01 et 02	180	3 600			
Maourey1	-	-	-			
Sama dey 1	3.06	180	3 600			
Sama dey 2	3.04	180	3 600			
Sama dey 3	3.05	180	3 600			
Sama dey 4	3.03	180	3 600			
Sama dey ech.	3.07	180	3 600			
Date vol	4-11-92			18-11-92		
	N°	Alt.	Echelle	N°	Alt.	Echelle
Sofi bangou 1	-	-	-	-	-	-
Sofi bangou 2	-	-	-	-	-	-
Darey bangou	1.10	200	4 000	-	480	9 600
Karbanga	1.11	200	4 000	3.10	480	9 600
Wankama 1	1.12	220	4 400	-	-	-
Wankama 2	2.11	220	4 400	-	-	-
Wankama 3	2.10	220	4 400	-	-	-
Kori 93	2.12	200	4 000	2.07	480	9 600
Maourey5	2.07	200	4 000	-	-	-
Maourey2	2.8 et 9	200	4 000	2.09	480	9 600
Maourey1	-	-	-	-	-	-
Sama dey 1	-	-	-	-	-	-
Sama dey 2	-	-	-	-	-	-
Sama dey 3	-	-	-	-	-	-
Sama dey 4	2.05	220	4 400	-	-	-
Sama dey ech.	2.06	220	4 400	3.01	480	9 600

Nota : Vol du 13-11-92 - Pas de prises de vue. *No photos on the 13-11-92.*

Tableau A5-6. Inventaire des photographies aériennes pour les mares de la route n° 3.
Focale de 50 mm.

Inventory of the aerial photographs for route n° 3. Focal : 50 mm.

N° : « planche » / « photo » / *reference of the photo inventory.*

Alt. : altitude en mètres / *altitude in metres.*

Echelle : échelle théorique négatif / *theoretical scale of the negatives.*

Date vol	21-9-92			8-10-92		
	N°	Alt.	Echelle	N°	Alt.	Echelle
Banizoumbou	6.01	256	5 120	4.03	180	3 600
Kalassi	6.02	192	3 840	4.02	150	3 000
Samsani bangou 1	6.03	249.6	4 992	4.01	200	4 000
Samsani bangou 2	6.04	172.8	3 456	4.05	200	4 000
Samsani bangou 3	6.05	192	3 840	4.04	200	4 000
Samsani bangou 4	6.06	160	3 200	4.07	200	4 000
Samsani bangou 5	6.07	160	3 200	4.06	200	4 000
Poura bangou	6.08	192	3 840	4.09	200	4 000
Date vol	16-10-92			4-11-92		
	N°	Alt.	Echelle	N°	Alt.	Echelle
Banizoumbou	4.01	200	4 000	3.02	180	3 600
Kalassi	4.03	160	3 200	3.01	150	3 000
Samsani bangou 1	4.04	120	2 400	2.03	150	3 000
Samsani bangou 2	4.05	140	2 800	-	-	-
Samsani bangou 3	4.06	120	2 400	-	-	-
Samsani bangou 4	4.07	160	3 200	2.04	170	3 400
Samsani bangou 5	4.08	170	3 400	-	-	-
Poura bangou	4.09	?	?	2.01	200	4 000
Date du vol	18-11-92					
	N°	Alt.	Echelle			
Banizoumbou	1.01	480	9 600			
Kalassi	1.03	480	9 600			
Samsani bangou 1	-	-	-			
Samsani bangou 2	-	-	-			
Samsani bangou 3	-	-	-			
Samsani bangou 4	-	-	-			
Samsani bangou 5	-	-	-			
Poura bangou	3.07	480	9 600			

Nota : Vols du 23-10-92 et du 13-11-92 - Pas de prises de vue. *No photos on the 23-10-92 and 13-11-92.*

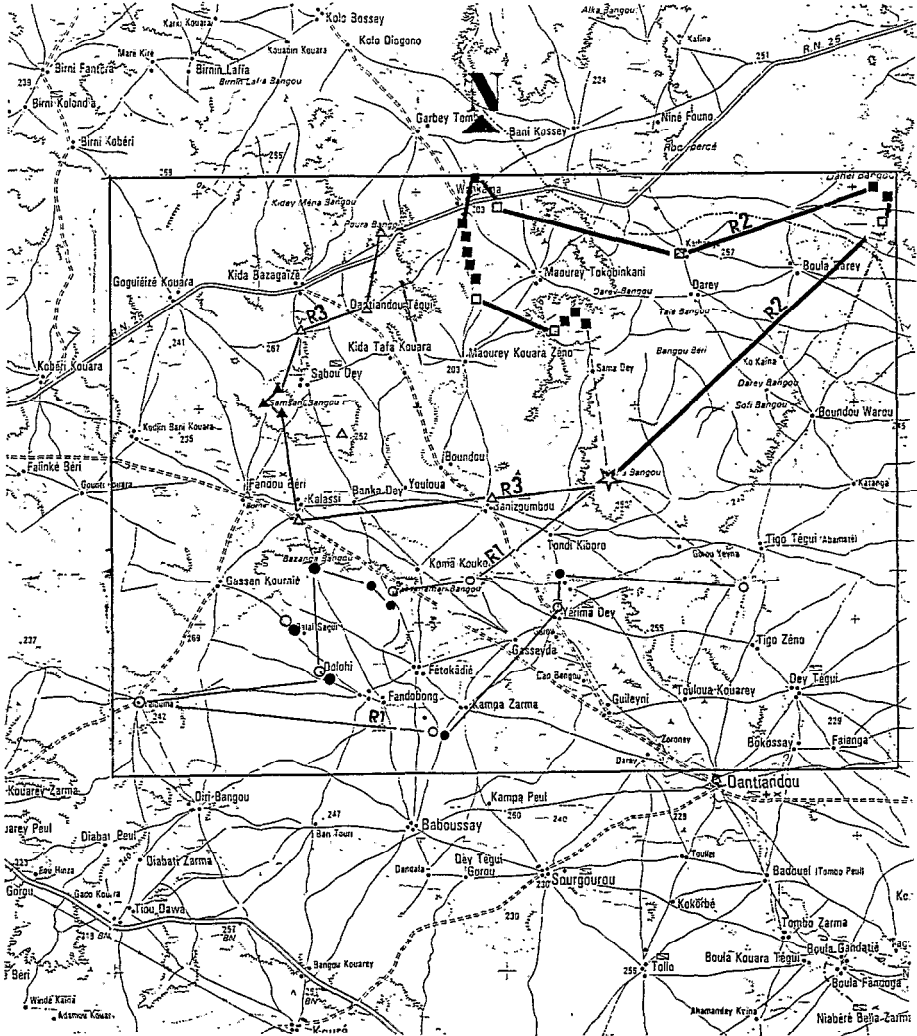


Figure A5.1. Organisation des missions aériennes de suivi des niveaux de mares. Map of the three routes used for the aerial survey of the pools.

Tableau A6-2. Dates des mesures de sondes sur le site de Wankama-(Campagne 1992).
Measurement dates at Wankama (1992 campaign).

	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1							1	1	1		1	
2								2			2	
3							3		3		3	
4								4			4	
5						5						
6												
7								7	7	7		
8							8		8			
9												9
10								10				
11											11	
12					12		12	12	12			
13									13			
14							14	14		14		
15							15		15			
16								16	16			
17							17	17				
18							18		18			
19								19	19			
20												
21							21			21		
22								22	22			
23	23			23			23					23
24							24					
25			25		25						25	
26		26				26	26					
27												
28							28	28				
29							29	29		29		
30						30						
31							31	31				

ÉTUDE DE LA RECHARGE DE LA NAPPE DU CONTINENTAL TERMINAL 3 EN RIVE GAUCHE DU NIGER

Christian LEDUC, François LENOIR

ORSTOM, Mission au Niger,
BP 11416, NIAMEY, NIGER

RÉSUMÉ

Afin d'évaluer la part des précipitations qui s'infiltré en profondeur, une étude hydrogéologique de la nappe phréatique du Continental Terminal 3 (CT3) a été entreprise pendant trois ans sur le degré carré de Niamey au nord du fleuve Niger, soit environ 9 000 km². Elle consiste principalement en observations piézométriques à périodicité variable, relevés *in situ* de la conductivité et du pH, analyses chimiques (ions majeurs et isotopes). Le dispositif expérimental est présenté ainsi que les incertitudes pesant sur les différentes mesures. Les premiers résultats montrent que la recharge de la nappe phréatique est un phénomène extrêmement variable dans le temps et l'espace. Elle est essentiellement due à l'infiltration des eaux stockées dans les mares endoréiques temporaires.

ABSTRACT

In order to estimate the part of annual rainfall really infiltrating, the hydrogeological survey of the phreatic Continental Terminal 3 (CT3) aquifer has been conducted for three years across the degree square of Niamey, north of River Niger (i.e. about 9 000 km²). It consists of a piezometric monitoring, *in situ* measurements of conductivity and pH, chemical analyses (major ions and isotopes). This experiment is detailed, as well as uncertainties about the different measurements. First results show the heterogeneity of subsurface flows even in a simple sedimentary context. The aquifer recharge, highly variable in time and space, is mainly due to the infiltration of water accumulated in the small temporary endoreic pools.

1. OBJECTIFS GÉNÉRAUX

Dans le cadre de Hapex-Sahel, les investigations hydrogéologiques cherchent à évaluer la part des précipitations qui s'infiltré au travers du sol et contribue ainsi à la recharge de la nappe phréatique du degré carré, contenue dans les sédiments du Continental Terminal 3 (CT3).

L'évaluation globale des volumes entrants à l'échelle du degré carré est réalisée de manière indirecte en appréciant l'impact de la saison des pluies sur la nappe. Elle nécessite donc une connaissance détaillée des mouvements piézométriques au cours de l'année et des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère. Ces estimations peuvent être contrôlées ou précisées par d'autres moyens comme des calculs directs d'infiltration sous les mares, des profils d'humidité du sol ou des analyses isotopiques.

L'évaluation de l'infiltration nécessite une compréhension de l'ensemble des mécanismes qui régissent le fonctionnement de la nappe du CT3. C'est pourquoi une étude hydrogéologique complète a été entreprise. Dans l'état actuel, elle comprend principalement :

- des mesures piézométriques, instantanées ou continues,
- des mesures de conductivité,
- des analyses chimiques (ions majeurs et isotopes).

Par manque d'un nombre suffisant de forages dédiés à l'observation scientifique, les mesures sont essentiellement effectuées dans des ouvrages exploités, ce qui diminue la qualité des données.

Les caractéristiques hydrodynamiques n'ont pas encore été approchées par des mesures de terrain. La vérification des quelques données bibliographiques est indispensable pour entreprendre la modélisation numérique des écoulements souterrains qui synthétisera les recherches hydrogéologiques de Hapex Sahel.

2. DÉLIMITATION GÉOGRAPHIQUE ET TEMPORELLE

2.1. Délimitation horizontale

A l'intérieur du degré carré (2°/3° Est, 13°/14° Nord), la présente étude hydrogéologique est limitée à la zone comprise entre le fleuve Niger et le dallol Bosso, soit près de 9 000 km².

Le fleuve constitue une limite évidente de la nappe du CT3 : les sédiments secondaires et tertiaires ont été entièrement érodés le long du Niger, laissant apparaître le socle cristallin. Les deux compartiments de Continental Terminal de part et d'autre du fleuve sont donc hydrauliquement indépendants.

Une équipe de l'Institut d'hydrologie de Wallingford étudie l'hydrogéologie de la partie du degré carré au sud du fleuve (BROMLEY *et al.*, dans ce volume).

Le dallol Bosso apparaît comme une zone singulière dans les circulations du CT3 puisque la nappe est presque affleurante sur une vaste surface. Cette limite est donc plus judicieuse que la ligne arbitraire du 3° Est. Des mesures ont été faites régulièrement en bordure et dans cette dépression marquée.

La limite du 2° Est correspond à peu près à la bordure de l'aquifère du CT3 reposant en biseau plus ou moins épais sur le socle.

Au-delà de la frontière nord du degré carré, l'aquifère se prolonge continûment. La coupure du 14° parallèle n'a donc pas de signification hydrogéologique.

2.2. Délimitation verticale

Les séries sableuses et argileuses du Continental Terminal peuvent contenir trois nappes superposées séparées par des horizons semi-perméables. Elles sont dénommées CT1 pour la plus profonde, CT2 pour la moyenne et CT3 pour la plus récente.

Selon les endroits, ces nappes peuvent être bien distinctes ou se rapprocher pour éventuellement se confondre. Ainsi au sud du 13° 30' N, il semble que le CT2 et le CT3 forment un seul niveau aquifère. De même en bordure du fleuve en aval de Say, le CT3 et le CT1 ne seraient pas différenciés.

L'épaisseur des sables et silts du CT3 varie de quelques mètres en bordure de l'aquifère à quelques dizaines de mètres.

Les deux nappes les plus profondes du CT1 et CT2 semblent hydrauliquement peu actives (faible recharge, circulations réduites) ; elles sont toutes les deux captives, la plus profonde étant la plus en charge.

La nappe superficielle du CT3 est au contraire régulièrement réalimentée par la pluie. Les volumes y circulant sont nettement plus importants que dans les niveaux sous-jacents.

L'étude actuelle s'est cantonnée à l'analyse du CT3 en supposant que la participation des horizons plus profonds par drainage est négligeable devant les apports par infiltration de la pluie. Cette hypothèse est fondée sur les travaux antérieurs (rapports du projet PNUD-DCTD NER86001 notamment).

2.3. Délimitation temporelle

Les échelles de temps des écoulements souterrains et des phénomènes de surface ne sont pas comparables. C'est pourquoi l'observation hydrogéologique ne peut se limiter à quelques semaines d'une période d'observation intensive ni même à une seule année du fait de la très forte irrégularité du climat sahélien.

Les mesures effectuées en 1991 ne concernent que la piézométrie d'un nombre limité de puits pendant deux campagnes (août et décembre). En 1992 et 1993, les informations recueillies concernent à la fois la piézométrie et la physico-chimie de l'eau.

Pour la piézométrie, les campagnes principales de 1992 ont été effectuées en avril, juillet-août et novembre ; celles de 1993 en février, mai-juin, septembre et décembre. Des observations plus limitées pendant et au-delà de la saison des pluies les complètent.

Les fluctuations piézométriques de ces trois années doivent être comparées avec les évolutions à moyen terme, déduites des mesures mensuelles réalisées depuis 1987 sur une trentaine de puits, qui nous ont été gracieusement transmises par P. SCHROETER (coopération suisse au Niger).

Les mesures de conductivité sont effectuées en même temps que le suivi piézométrique.

Les échantillons pour analyses chimiques (ions majeurs et isotopes) ont été prélevés en plusieurs fois : décembre 1991, avril 1992, janvier-février 1993, septembre 1993 et novembre 1993.

Un suivi piézométrique et hydrochimique plus léger a également été réalisé en 1994.

3. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Des relevés de piézométrie et/ou conductivité ont été effectués dans plus de 300 puits et forages (fig. 1), dont la liste est donnée en annexes 1 et 2. La plupart de ces ouvrages ont fait l'objet d'un suivi régulier (trois campagnes générales en 1992, quatre en 1993, compléments localisés à périodicité variable) alors que d'autres n'ont été visités que très occasionnellement. Sept sites ont été équipés d'enregistreurs en continu de niveau.

Des prélèvements pour analyse chimique ont eu lieu dans plus de 120 puits différents afin de préciser la minéralisation de la nappe (fig. 2).

Pour établir les cartes piézométriques du degré carré, un repérage altimétrique d'au moins une partie des puits du réseau piézométrique était indispensable. Ceci a été réalisé par l'Institut géographique national du Niger (IGNN) pour plus de 90 puits (annexe 1) et complété en quelques points par l'ORSTOM.

3.1. Piézométrie

3.1.1. Mesures instantanées

De très nombreux puits du degré carré ont été visités, sélectionnés et régulièrement mesurés : de 118 en août 1991, leur nombre a dépassé 220 un an après et continue d'augmenter selon les besoins de précision supplémentaire en certaines zones et les découvertes de quelques nouveaux ouvrages. Au total, près de 1 300 observations ont été réalisées en 1991 et 1992 dans plus de 300 puits, et encore plus en 1993 (1 400 mesures).

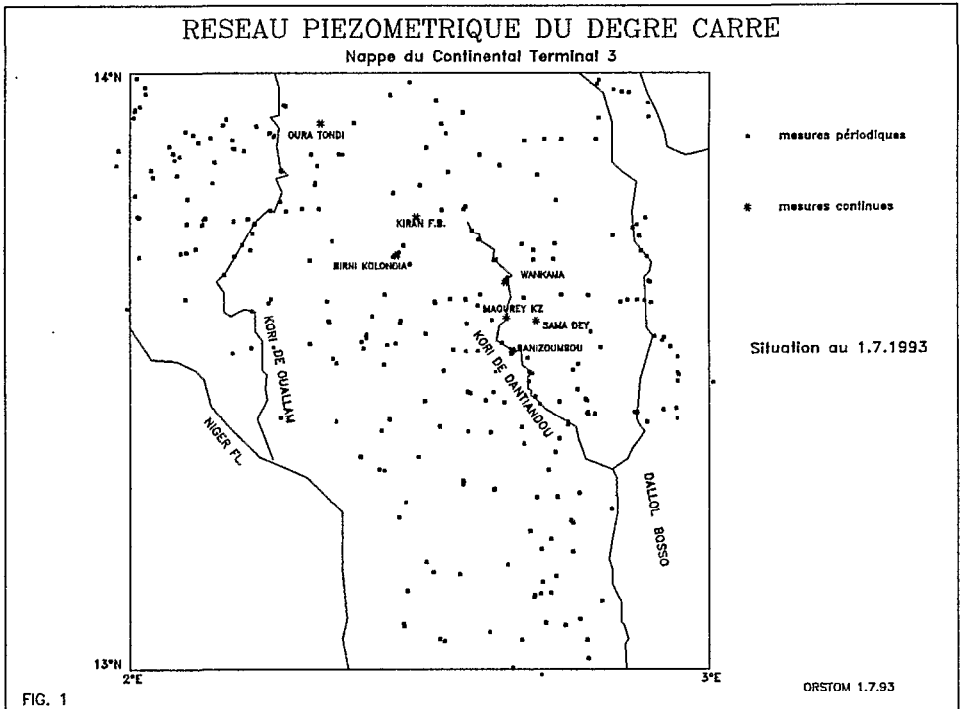


Figure 1. Réseau piézométrique du degré carré.

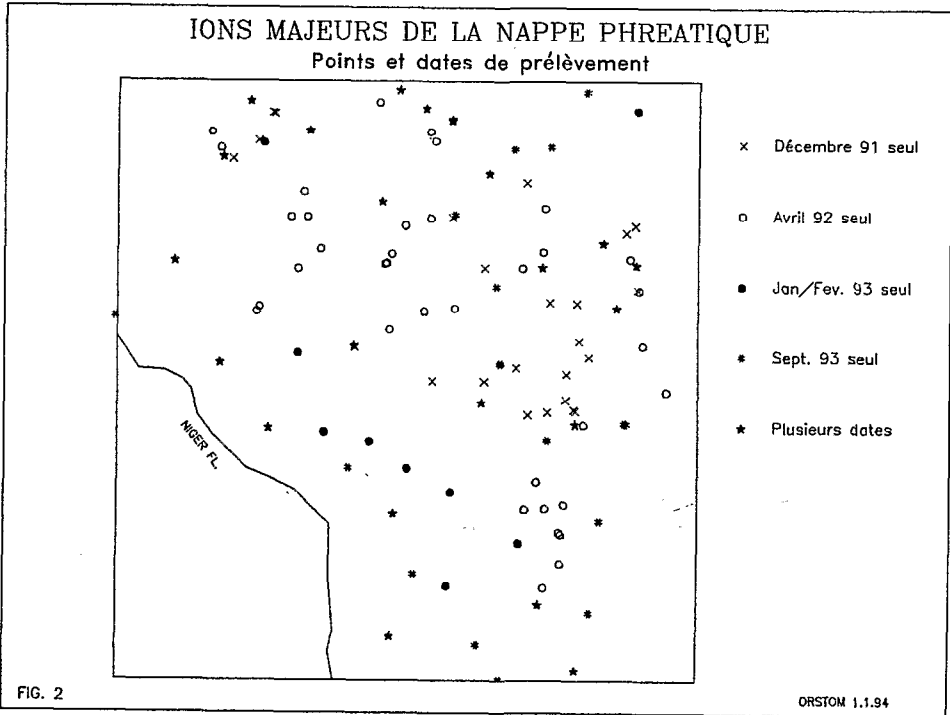


Figure 2. Chimie du CT3 : points de prélèvement.

Le rythme de mesure s'est accéléré : deux campagnes couvrant le degré carré en 1991 (août et décembre), trois en 1992 (avril, été, novembre), quatre en 1993 (février, mai-juin, septembre et décembre). Ces données sont complétées par de très nombreux relevés intermédiaires (parfois hebdomadaires ou bimestriels, souvent mensuels).

Ces importantes campagnes de terrain n'ont pu être réalisées que grâce à la collaboration de la Direction des ressources en eau du ministère de l'Hydraulique, qui a mis à la disposition de cette étude un technicien particulièrement efficace en la personne de M. Sani IBRAHIM.

Période	Piézométrie	Conductivité	Autres mesures
Août 91	118		
Décembre 91	183		
Hiver 91-92	37		
Avril 92	212	143	85 pH, 93 eH, 142 temp.
Printemps 92	52	8	
Été 92	219	78	
Sept. oct. 92	110	58	
Novembre 92	239	138	
Décembre 92	128	128	
Janvier 93	62	46	
Février 93	253	241	
Printemps 93	47	6	
Mai-juin 93	273	248	
Juil. août 93	100	70	
Sept. 93	251	226	81 pH
Oct. nov. 93	120	111	44 pH
Décembre 93	274	265	238 pH

La plupart des puits du réseau piézométrique sont exploités pour l'alimentation humaine et/ou l'abreuvement du bétail. Les niveaux sont donc beaucoup plus souvent dynamiques que statiques. Lors de l'arrivée de l'observateur sur le puits, les personnes utilisant l'ouvrage sont comptées et les prélèvements sont provisoirement arrêtés, le temps de faire le relevé. L'interprétation ultérieure des variations piézométriques doit impérativement prendre en compte l'influence des pompages.

La mesure n'a qu'une valeur limitée, même si l'on suppose l'ouvrage bien fait (pénétration suffisante dans l'aquifère, pas de défaut de réalisation de l'ouvrage, non communication avec un autre niveau aquifère ou les écoulements superficiels) et une absence de pompage. La représentativité spatiale d'une observation est le reflet de ce que l'on connaît ou suppose de la variabilité de l'aquifère.

Sa signification temporelle dépend de l'adéquation entre fréquence des observations et rapidité de l'évolution naturelle. Le seul moyen d'apprécier la représentativité d'une mesure instantanée est de disposer d'une chronique continue !

Les processus hydrogéologiques découverts au cours de cette étude dépendent donc largement de la densité des mesures dans le temps et l'espace.

La répartition spatiale des points d'observation n'est pas parfaitement homogène, à la fois parce que les puits et forages sont très irrégulièrement distribués (absence quasi totale de puits sur les plateaux latéritiques) et que certains secteurs paraissent mériter plus d'attention.

Pour certains points ou zones qui se sont révélés plus intéressants à suivre au fur et à mesure de l'avancement de l'étude, on ne disposera que d'une couverture temporelle réduite.

3.1.2. Enregistrements en continu

Une mesure discontinue n'est pas pleinement satisfaisante tout d'abord parce que certains processus d'infiltration sont rapides (quelques jours) et donc non repérables avec des campagnes espacées de plusieurs semaines et que, d'autre part, certains puits n'atteignent leur niveau statique que quelques rares heures par jour, du fait des pompages.

C'est pourquoi l'installation d'enregistreurs automatiques permet une bien meilleure compréhension des phénomènes de recharge. Le coût de ces équipements est la seule limitation à leur utilisation. Le matériel utilisé provient de deux constructeurs, Elsylde et CR2M. Le système Chloe, fabriqué par Elsylde, est constitué d'une sonde de pression piézorésistive reliée à une centrale qui enregistre les informations sur une mémoire EEPROM extractible qui est lue au laboratoire. L'enregistreur multivoie AGM de CR2M est assez comparable, moins cher et plus polyvalent; la récupération des données se fait grâce à un micro-ordinateur de terrain.

Les sept enregistreurs installés sur le degré carré (fig. 1) sont :

Site	Longitude	Latitude	Début	Remarque
Banizoumbou	2° 39.64	13° 31.96	27-09-90	Doublet depuis 13-12-93
Sama Dey	2° 42.07	13° 35.12	29-01-92	Inondation été 92
Oura Tondi	2° 19.79	13° 54.92	12-03-92	
BirniKolondia	2° 27.65	13° 41.66	13-08-92	
Kiran F.B.	2° 29.67	13° 45.49	25-08-92	Défaut en décembre 92
Maourey K.Z.	2° 39.04	13° 35.44	12-11-92	
Wankama	2° 38.80	13° 38.97	10-6-93	Doublet

Les mesures sont effectuées tous les quarts d'heure avec une résolution verticale de 1 cm ; les premières observations avaient une moindre précision.

La chronique la plus longue est celle de Banizoumbou puisqu'on dispose de la fin de saison des pluies de 1990, de 1991 et 1992 en entier et d'une partie de 1993 (lacune de mars à juin). On peut ainsi apprécier la diversité de réaction de la nappe face à des répartitions temporelles différentes des pluies. Le forage, inexploité, est situé à une centaine de mètres de la mare dont le fond surmonte la nappe d'environ 14 m. Un nouveau piézomètre, plus proche de la mare, a été foré en 1993 ; il est équipé lui aussi d'un enregistreur en continu depuis le 13-12-93. Deux puits situés à 550 et 750 m de la mare font partie du dispositif piézométrique général et permettent d'apprécier spatialement l'impact de l'infiltration depuis la mare.

Sama Dey est situé en bordure d'une mare qui se vidange très vite et alimente donc massivement et rapidement la nappe. Ce type de mare est peu répandu dans le degré carré. Le puits est exploité par les villageois et les pasteurs pendant toute la saison sèche. Les chroniques du mois de février 1992 montrent quelques mesures plus hautes que le niveau statique apparent, peut-être dues à un défaut de fonctionnement de l'appareil. D'autres « aberrations » sont cependant survenues en été 1993 alors que l'enregistreur avait été changé. L'interprétation des données doit donc être particulièrement prudente. A la fin du mois de juillet 1992, une crue plus forte a submergé le puits et entraîné des volumes importants de boue dans l'ouvrage, rendant les mesures sans signification jusqu'à la fin de l'année 1992. Plusieurs tentatives de foration d'un vrai piézomètre ont échoué en 1993.

Le puits d'Oura Tondi est exploité pour l'alimentation en eau du village. Il est situé en bordure d'un kori qui n'est en eau que pendant de courts moments. Il a probablement été submergé pendant quelques minutes suite à la pluie du 13 juillet 1992 (55,5 mm en 4 heures à la station de Tongom), ce qui a provoqué une hausse du niveau dans le puits de 15 cm. Le même phénomène s'est produit le 28 août 1992 avec une hausse brutale de 2 m. L'enregistreur a été démonté à la fin de l'année 1993.

Le puits de Birni Kolondia n'est presque jamais exploité, d'autres ouvrages étant utilisés par le village. Il est situé à quelques centaines de mètres d'une mare de taille réduite qui reste en eau durant toute la saison des pluies.

Le puits de Kiran Fandou Béri est situé en contrebas du village. Aucune mare ne se trouve à proximité. L'exploitation se traduit par un rabattement variant le plus souvent entre 20 et 50 cm. De mi-décembre 1992 à début février, les enregistrements sont aberrants.

Le puits de Maourey Kouara Zéno est utilisé par les villageois et jouxte une mare qui est en eau durant toute la saison des pluies. Le rabattement induit par les pompages varie entre 10 et 30 cm.

L'installation la plus récente est celle de Wankama. Trois piézomètres ont été forés en 1993 selon une perpendiculaire à l'une des mares à des distances de 30, 80 et 180 m. Les deux les plus proches de la mare sont enregistrés en continu depuis juin 1993. Deux puits, plus ou moins exploités, situés à 5 et 500 m d'une seconde mare, complètent le dispositif. Wankama est remarquable par la forte amplitude piézométrique qui dépasse 5 m.

Les sites de Banizoumbou, Maourey Kouara Zéno et Wankama sont tous les trois situés dans le kori de Dantiandou, ancien lit de cours d'eau actuellement tronçonné par des dépôts dunaires. Les différences notables de réaction au cours de la saison des pluies soulignent l'intérêt d'une observation piézométrique détaillée.

3.2. Hydrochimie

3.2.1. Mesures *in situ*

3.2.1.1. Conductivité

Plus de 550 mesures de conductivité ont été effectuées en 1992 dans 266 puits (cf. répartition dans le temps au paragraphe 3.1.1). En 1993, ce nombre a dépassé 1 200.

L'absence répétée de données sur certains points au début de Hapex-Sahel (la conductivité n'était mesurée que si le puits visité était exploité) et le besoin de précision supplémentaire dans deux secteurs a amené une campagne systématique de relevé en décembre 1992. En 1993, les conductivités ont été mesurées quelle que soit l'utilisation de l'ouvrage.

Au-delà du suivi ordinaire des puits du réseau piézométrique, des investigations poussées ont été conduites dans deux zones particulières : le dallol Bosso et le Nord-Ouest du degré carré où de nombreux puits et forages ont été recherchés pour cartographier finement les fortes variations de conductivité.

3.2.1.2. Autres mesures

En avril 1992, les pH, eH et température ont été mesurés lors de la campagne piézométrique : 85 pH, 93 eH et 142 températures. Des mesures complémentaires de pH ont été effectuées en 1993 : 81 en septembre, 44 en novembre et 238 en décembre.

3.2.2. Mesures au laboratoire

3.2.2.1. Ions majeurs

Les analyses portent sur les huit éléments majeurs (calcium, magnésium, sodium, potassium, chlorure, sulfate, bicarbonate et nitrate). Les oxydes de fer et d'aluminium ainsi que la silice n'ont pas été mesurés sur tous les échantillons.

Les 36 prélèvements de décembre 1991 et les 51 d'avril 1992 ont été confiés au laboratoire de géochimie des sols et des solutions à l'ORSTOM de Bondy. Parmi eux, 11 correspondent aux mêmes puits. Les 10 prélèvements de janvier et les 11 de février 1993 ont été analysés par le laboratoire de la faculté des sciences de Niamey, alors que les 27 de septembre 1993 l'ont été par l'ORSTOM Bondy. Quelques prélèvements seront réalisés en 1994. L'ensemble se répartit en 86 analyses uniques, 23 doubles et une triple.

3.2.2.2. Isotopes

En 1992 et 1993, des puits et forages ont été échantillonnés pour analyses isotopiques : 98 oxygène 18, 35 deutérium, 8 tritium et 1 carbone 14. D'autres résultats devraient être obtenus en 1994 par une étude de l'AIEA.

Toutes les analyses ont été réalisées au laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique (université de Paris-Orsay) ; une partie a été traitée directement par J. D. TAUPIN (ORSTOM Niamey).

3.2.2.3. Autres

Quatre échantillons en provenance des aquifères captifs (CT2/CT1) ont également été analysés. On se reportera à la thèse de C. LE GAL LA SALLE pour plus de détails concernant l'hydrochimie des aquifères en charge du CT, notamment la composante isotopique.

A. BEN MOHAMED a réalisé une spectrométrie par fluorescence aux rayons X (TXRF) à l'Institut des radio-isotopes de Niamey sur 23 échantillons. Les valeurs fournies concernent les éléments S, Cl, K, Ca, Fe, Zn, Br, Sr.

3.3. Nivellement

Plus de 80 puits ont été nivelés en 1992 par l'IGNN, soit par nivellement classique soit par méthode GPS. Quelques difficultés d'exploitation des résultats ont été rencontrées (non concordance des points IGNN avec le réseau piézométrique, erreurs de calcul, non repérage en longitude et latitude de certains points).

L'absence d'informations dans les environs de Niamey et l'apparition d'une singularité vers Kokiré ont nécessité une campagne complémentaire de dix nivellements IGNN en 1993. Quelques points supplémentaires ont été nivelés par l'ORSTOM (J.M. LAPETITE). On aboutit ainsi à un total d'une centaine d'altitudes.

Une telle densité de points cotés, inconnue jusqu'à présent au Niger, permet d'éditer les premières cartes piézométriques fiables de la nappe du CT3 dans le degré carré.

4. INCERTITUDE SUR LES MESURES

4.1. Mesures piézométriques

4.1.1. Mesures instantanées

4.1.1.1. Influence des pompages

Le rabattement du niveau piézométrique dans un puits sous l'effet d'un pompage va dépendre des caractéristiques hydrodynamiques locales de l'aquifère, des pertes de charge éventuelles dues à la réalisation imparfaite de l'ouvrage, du débit soutiré, de la durée du prélèvement et, éventuellement du temps écoulé depuis la fin du pompage.

Dans la réalité, on ne connaît jamais toutes ces informations. On en sera alors réduit à émettre quelques hypothèses permettant d'approcher la réalité.

Les caractéristiques hydrodynamiques actuellement connues ne concernent que le département de Tillabéri et l'imperfection de réalisation des puits et les conditions parfois douteuses d'exécution des essais rendent les résultats peu fiables. Les valeurs médianes sont d'environ $2,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ pour le débit spécifique et $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ pour la transmissivité.

Selon les villages, les heures de prélèvement varient de manière significative : tôt le matin comme à Oura Tondi, en milieu de journée comme à Sama Dey. Il n'est donc pas possible de savoir, sauf par des indices visuels ou l'interrogation des habitants, si le puits a été utilisé juste avant le passage de l'observateur.

En période normale, on peut supposer que le débit extrait est compris entre 1 et $3 \text{ m}^3/\text{h}$ pendant une période de pointe qui ne dure que quelques heures d'affilée pour les puits villageois.

Les volumes prélevés varient selon les saisons. En période d'hivernage, les nombreuses mares temporaires constituent des points d'alimentation des hommes et des bêtes particulièrement sollicités. L'extraction des eaux souterraines est alors très sensiblement réduite.

Enfin, les pompages sont très variables d'un puits à un autre selon la densité de population, la taille des troupeaux nomades et sédentaires, la qualité de l'eau, la profondeur de la nappe, l'éloignement du village et des autres puits,... Lors du suivi piézométrique, certains puits ont paru sollicités quelle que soit l'heure du jour alors que pour d'autres aucune trace d'exploitation n'a jamais été relevée.

Si l'on retient, pour un puits « moyen », un débit spécifique de $2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ et une exploitation de $2 \text{ m}^3/\text{h}$, on aboutit à un rabattement prévisible de 1 m, c'est-à-dire l'ordre de grandeur des fluctuations naturelles connues au cours d'une année. Si c'est le cas, le suivi piézométrique a très peu de chance d'atteindre une finesse suffisante pour quantifier la recharge naturelle de la nappe.

Cependant, le calcul effectué à partir de la transmissivité donne des résultats plus rassurants. Avec un pompage de $2 \text{ m}^3/\text{h}$ pendant trois heures dans un puits de 1 m de rayon, le rabattement est d'environ 30 cm pour des valeurs moyennes de transmissivité T et de porosité S . Le tableau ci-après donne les variations prévisibles. Une heure après la fin d'un tel pompage, le rabattement résiduel n'est plus que de quelques centimètres (1 à 12 pour une transmissivité de $5 \cdot 10^{-3}$ à $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$).

Rabattement à 3 h	$S = 1 \%$	$S = 5 \%$
$T = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	8 cm	7 cm
$T = 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	34 cm	27 cm
$T = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	63 cm	49 cm

Les évaluations ci-dessus doivent être comparées avec les informations en provenance des puits équipés d'enregistreurs. Ainsi les rabattements journaliers en saison sèche sont compris :

- entre 40 et 120 cm à Sama Dey,
- entre 40 et 90 cm à Oura Tondi,
- entre 20 et 50 cm à Kiran Fandou Béri,
- entre 10 et 30 cm à Maourey Kouara Zéno.

Les ordres de grandeur des rabattements calculés et effectivement mesurés sont donc identiques.

De mesures ponctuelles mais rapprochées on peut également tirer quelques renseignements. Ainsi, certains puits fréquemment visités n'ont pas montré de variation sensible selon l'heure ou le nombre de personnes pompant alors que d'autres accusent des décalages importants.

La prudence s'impose donc pour définir des évolutions piézométriques à partir d'ouvrages exploités. La connaissance du terrain et les remarques faites lors des tournées piézométriques sont indispensables pour apprécier l'incertitude sur la mesure.

4.1.1.2. Incertitude de mesure

Même avec un observateur consciencieux, des erreurs rares mais grossières peuvent arriver pendant le relevé ou son report, comme une confusion entre les chiffres des mètres ou des dizaines de mètres. A ces erreurs, parfois difficiles à repérer ou rectifier, se rajoutent les incertitudes de mesure.

Comme toute mesure physique, le relevé de la profondeur est sujet à une incertitude de lecture, qui correspond théoriquement à une demi-graduation soit 0,5 cm.

Les mesures sont effectuées en posant le support de sonde sur le bord cimenté du puits. La non-horizontalité de cette margelle peut amener une variation de quelques centimètres.

Dans les rares cas où le puits visité est un puits traditionnel (Sama Dey par exemple), toute idée de précision doit être abandonnée puisque ces ouvrages sont régulièrement réhaussés par adjonction de poutres irrégulières.

Enfin, également importante est la variation liée au matériel utilisé : la sonde du ministère de l'Hydraulique indique des profondeurs plus fortes de un pour mille que celle de l'ORSTOM. Négligeable pour les faibles profondeurs, ce décalage atteint 6 cm pour une nappe à 60 m.

4.1.1.3. Non-représentativité du piézomètre

Un certain nombre d'ouvrages ont été implantés de manière fort maladroite dans des points bas de la topographie. Ils bénéficient ainsi de submersion périodique lors de fortes crues qui introduisent de l'eau et des particules argileuses dans le puits. D'autres présentent des cuvelages fissurés ou décalés qui laissent les eaux de surface se déverser en abondance et participer d'une manière non conventionnelle à la recharge de la nappe (Boubourey Fandou par exemple).

Les mesures réalisées après une crue dans ces ouvrages n'ont donc pas de signification et on ignore la perturbation induite par un éventuel colmatage argileux des parois.

Ces puits situés en zone inondable ont été identifiés dans la base de données.

4.1.1.4. Confusion des puits visités

De nombreux villages disposent de plusieurs puits. Une confusion est donc possible entre les différents ouvrages, et donc les profondeurs de la nappe, pour certaines campagnes piézométriques où le repérage des coordonnées par système GPS n'a pas été systématique.

Lorsque le décalage altimétrique à l'intérieur d'un village est fort (il peut atteindre une dizaine de mètres), le risque d'erreur est faible : une importante variation attire l'attention et amène à vérifier rapidement l'information. Dans le cas le plus fréquent d'un décalage entre puits de quelques décimètres à un ou deux mètres, l'erreur ne sera pas forcément détectée.

4.1.2. Enregistrements en continu

Les enregistreurs limnimétriques ont assez bien fonctionné en 1992 et 1993. Quelques problèmes sont néanmoins apparus. L'uniformisation des seuils (1 cm) et des fréquences de mesure (15 mn) a accru la précision des chroniques recueillies.

Pour le site de Sama Dey, la principale difficulté rencontrée est l'enfouissement de la sonde suite au déversement des eaux de la mare dans le puits à la fin juillet 1992. La boue ainsi entraînée a colmaté l'ouvrage et la mesure de pression a perdu toute signification. Les résultats des mois d'août à décembre ne sont pas corrélables avec les mesures ponctuelles effectuées depuis la surface du sol et sont donc complètement inexploitables.

Pour ce même site, des variations non encore élucidées ont été enregistrées en février 1992. Ces hausses bizarres peuvent être dues à un mauvais fonctionnement de la sonde ou à une raison naturelle inconnue, sauf à supposer que la nappe n'est jamais en équilibre en saison sèche. D'autres bizarreries sont apparues en été 1993 : variations surprenantes de la nappe, remontée après une première décrue, etc avec un enregistreur différent de celui du début 1992.

Les variations anormales enregistrées à Kiran Fandou Béri à partir de la mi-décembre 1992 sont attribuées à un dérèglement de la sonde. Le retour à la normale, tout aussi inexplicable, a eu lieu en janvier 1993. Un arrachement du système de fixation de la sonde a également entraîné des perturbations, notamment une lacune complète du 3 juillet au 18 août 1993.

Les deux courtes submersions décelées au puits d'Oura Tondi ne semblent avoir eu aucune conséquence sur les caractéristiques de l'ouvrage et la fiabilité des mesures.

L'enregistreur du forage de Banizoumbou a cessé de fonctionner entre mars et juin 1993. Le début de la saison des pluies manque donc.

Aucune dérive dans le temps n'a été relevée.

4.2. Mesures hydrochimiques

4.2.1. Conductivité *in situ*

Les différences de résultats entre appareils de terrain est inévitable. Une confrontation des sondes de conductivité pendant quelques jours a montré que celle de l'ORSTOM donnait des valeurs plus élevées que celle du ministère de l'Hydraulique avec un décalage moyen de 20 $\mu\text{S/cm}$. Cependant, cet écart n'est pas toujours régulier ni constant.

La plupart des mesures ont été réalisées avec le matériel de l'ORSTOM. Des dysfonctionnements sont apparus brutalement ; ainsi les mesures du 10-2-1993 sont manifestement fausses.

Les interprétations d'éventuelles variations doivent donc tenir compte de cette précision limitée.

4.2.2. pH *in situ*

L'évaluation *in situ* du pH, plus délicate que celle de la conductivité, nécessite un étalonnage régulier de la sonde. Le matériel de terrain est assez peu précis.

Les mesures d'avril 1992, septembre et novembre 1993 semblent assez homogènes : médianes et moyennes sont d'environ 6,1. Par contre, la plus grosse campagne, en décembre 1993, montre une baisse non encore expliquée de l'ordre de 0,5 pH.

4.2.3. Analyses chimiques

Le calcul de la balance ionique est un bon critère global de qualité. Sur les 139 résultats disponibles, neuf montrent un déséquilibre supérieur à 20 % : 3 pour les analyses Orstom de décembre 1991 et 6 pour les analyses de l'université de Niamey de janvier-février 1993 avec des déséquilibres pouvant dépasser 50 % dans le deuxième cas. Parmi les analyses douteuses, celles de décembre et une partie des autres correspondent à de faibles conductivités où les décalages sont plus compréhensibles. Il reste cependant un certain nombre d'analyses déséquilibrées explicables soit par une erreur d'analyse soit par la forte teneur d'un ion autre que les 8 ions majeurs.

La précision des analyses réalisées par l'ORSTOM est la suivante. Pour les cations, le dosage par absorption atomique aboutit à une précision de 0,01 mg/l. Le dosage potentiométrique du bicarbonate est à 0,5 mg/l près alors que les autres anions, dosés par chromatographie ionique, sont connus à 0,1 mg/l près. Pour Si, Al et Fe, la précision est de 0,02 mg/l.

Nous n'avons pas d'indication sur la précision des résultats de l'université de Niamey.

4.3. Nivellement

Dans le cadre de Hapex Sahel, plus de 90 puits ont fait l'objet d'un nivellement, classique ou GPS. La méthode GPS est plus rapide mais moins fiable : la précision du calage altimétrique fournie par l'IGNN est de quelques centimètres ; au pire, l'erreur est de 20 cm pour un point situé à 40 km d'un repère connu.

L'incertitude majeure réside dans la confusion entre plusieurs puits d'un village puisque certains ouvrages n'ont pas été identifiés par l'IGNN en longitude et latitude mais seulement en altitude. L'IGNN a alors arbitrairement attribué à l'ouvrage nivelé les coordonnées du puits visité par l'ORSTOM sans autre vérification. Un contrôle ultérieur a permis de rectifier quelques erreurs mais il n'est pas certain que les données actuelles soient toutes irréprochables.

5. EXEMPLES DE PREMIERS RÉSULTATS

On trouvera ci-après quelques exemples de premiers résultats. Ces analyses sommaires seront affinées ultérieurement.

5.1. Carte des conductivités (fig. 3)

Les conductivités sont généralement faibles (médiane égale à 90 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ; elles peuvent cependant atteindre des maxima élevés (exceptionnellement, près de 7 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à Tokobinkani Zarma).

Les fortes variations de conductivité entre des puits peu distants peuvent être causées par :

- une contamination depuis un aquifère plus profond (naturellement au travers d'un aquitard peu épais ou artificiellement par des forages artésiens s'écoulant librement),
- des changements rapides dans la lithologie de l'aquifère, surtout quand des dépôts évaporitiques sont présents,
- une pollution locale, notamment à cause des troupeaux à l'abreuvement.

Trois zones apparaissent nettement :

- le Nord-Ouest du degré carré, où la minéralisation est très variable sur de courtes distances. Cette hétérogénéité est reliée au biseauage du Continental Terminal sur le socle cristallin : les ressources en eau du CT3 sont limitées, l'aquitard entre CT3 et CT1 s'amenuise voire disparaît et permet une contamination depuis les niveaux aquifères plus profonds, CT1 ou socle, qui sont beaucoup plus minéralisés.
- une large zone centrale où la conductivité est généralement basse (moins de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Ponctuellement, de rares puits minéralisés sont connus.
- le Dallol Bosso, en bordure est du degré carré. Les variations de la conductivité, de 100 à 1 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, peuvent être expliquées par des singularités sédimentologiques locales et aussi par une évaporation importante (la nappe phréatique n'est qu'à quelques mètres sous la surface du sol).

La corrélation entre conductivité et composition ionique est nette.

5.2. Carte piézométrique (fig. 4)

A partir des puits nivelés, une carte piézométrique peut être proposée pour chacune des campagnes couvrant la totalité de la nappe (avril, été, novembre). En illustration a été retenue celle de novembre 1992.

Deux secteurs inégaux se différencient : la plus grande partie de la nappe, à l'est et au sud, est homogène alors que le coin nord-ouest est beaucoup plus tourmenté. Il n'y a pas une direction régionale pour les circulations dans le CT3 mais un ensemble d'écoulements en tous sens.

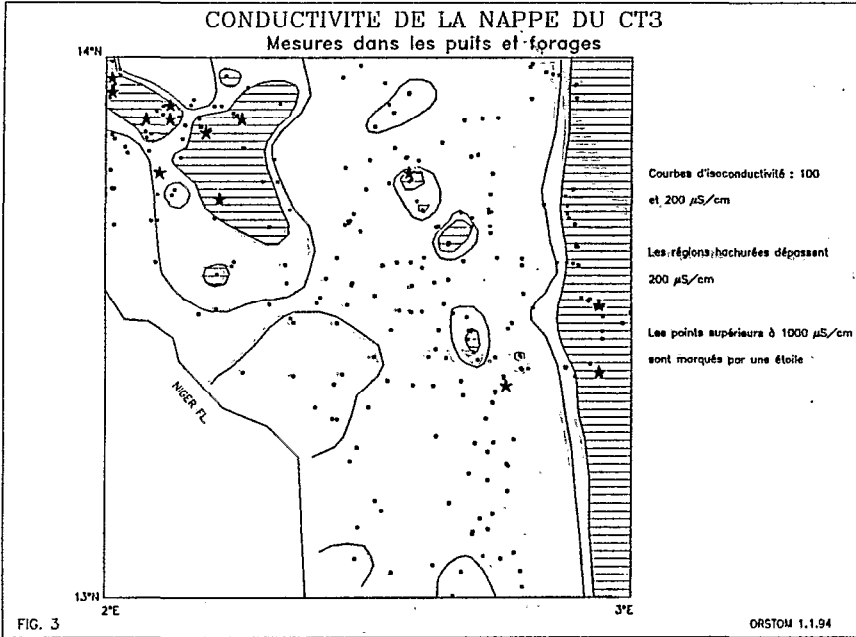


Figure 3. Conductivité de la nappe du CT3.

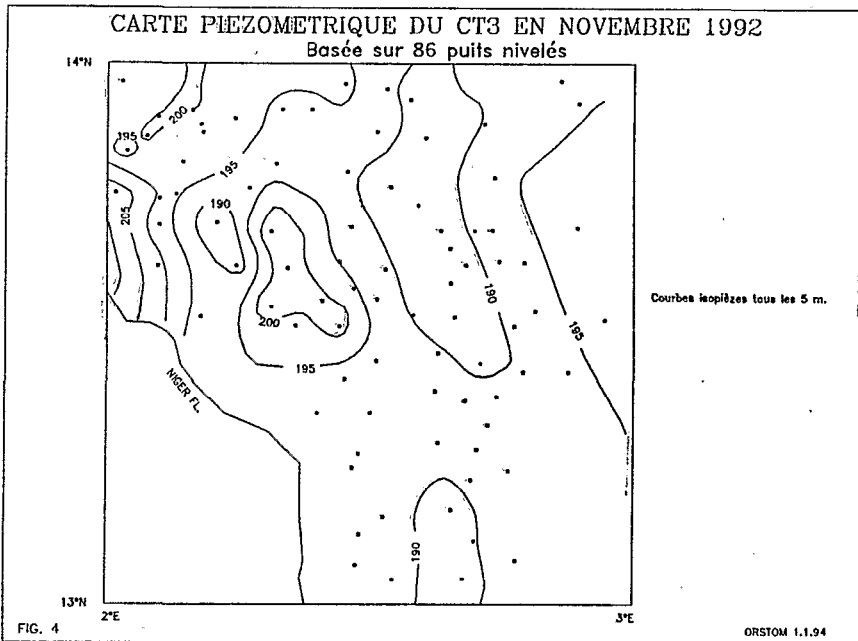


Figure 4. Carte piézométrique du CT3 en novembre 1992.

La grande zone à l'est et au sud présente des gradients hydrauliques très faibles. Les niveaux hauts se situent dans la partie nord du Dallol Bosso, qui serait donc une zone d'apport pour le degré carré, et les niveaux bas dans une dépression piézométrique apparemment fermée et plus ou moins axée sur le kori de Dantiandou.

Le Nord-Ouest a une piézométrie très variable sur de faibles distances. On y trouve les niveaux extrêmes de la nappe (plus de 210 m et moins de 185 m). Un dôme piézométrique net existe au nord-est de Niamey, autour de Barkiawel, Dey Tégui, Tokobinkani et Gagare. A proximité, le niveau particulièrement bas de Kokiré est unique et correspondrait à une petite dépression fermée. Comme pour d'autres paramètres hydrogéologiques (chimiques par exemple), l'explication proposée pour cette forte hétérogénéité du Nord-Ouest est l'amenuisement du CT au-dessus du socle, la faiblesse des réserves et le contact de plusieurs niveaux aquifères.

5.3. Évolution piézométrique décembre 1991-novembre 1992 (fig. 5)

L'impact de la saison des pluies 1992 peut être apprécié en comparant les niveaux de la nappe à des dates proches en 1991 et 1992. La comparaison des niveaux d'été est risquée puisque dépendante d'un éventuel décalage dans le déroulement de la saison des pluies ou le début du processus de réalimentation de la nappe. La comparaison des niveaux de fin d'année est probablement plus révélatrice de l'impact réel de la saison des pluies.

Les variations apparentes des 177 puits communs se répartissent en :

- 12 baisses, de 0,62 m en moyenne,
- 26 stabilités,
- 139 hausses, dont les 134 inférieures à 3 m ont une moyenne de 0,62 m.

Ceci représente une hausse moyenne de 0,44 m. Le tableau ci-dessous fournit la répartition des variations inférieures à 3 m.

		Pompage nov. 92		Pas de pompage nov. 92	
Pompage déc. 91	88	8 baisses 0,51	45	2 baisses 0,21	
		11 stabilités		4 stabilités	
		69 hausses 0,60		39 hausses 0,71	
Aucun pompage déc. 91	17	1 baisse 2,78	22	1 baisse 0,11	
		5 stabilités		6 stabilités	
		11 hausses 0,61		15 hausses 0,48	

Les chiffres bruts sont bien sûr influencés par les prélèvements. Ainsi, les trois baisses supérieures à 0,5 m sont dues aux pompages, comme le montrent les mesures complémentaires effectuées en janvier 1993. Après correction, ces trois points apparaissent plus hauts en 1992 qu'en 1991. La moyenne des 9 autres baisses est alors de 0,21 m, ce qui est ininterprétable du fait de leur dispersion géographique et des diverses incertitudes sur les mesures.

Les cinq puits ayant une hausse supérieure à 3 m entre 1991 et 1992 connaissent tous une montée rapide de la nappe en été suivie d'une baisse plus lente après la fin de la saison des pluies. Le décalage d'un mois dans la comparaison (novembre 1992 et décembre 1991) peut donc la fausser. De plus, trois d'entre eux sont submersibles, c'est-à-dire qu'ils sont situés à proximité de mares, zones d'infiltration présumées où l'amplitude piézométrique est plus grande que dans le reste de la nappe.

La seule hausse comprise entre 2 et 3 m est probablement surestimée puisqu'elle est la résultante d'une hausse régionale (0,5 à 1,8 m dans les puits voisins) et d'une absence de pompage en novembre 1992, alors que le puits était utilisé en décembre 1991.

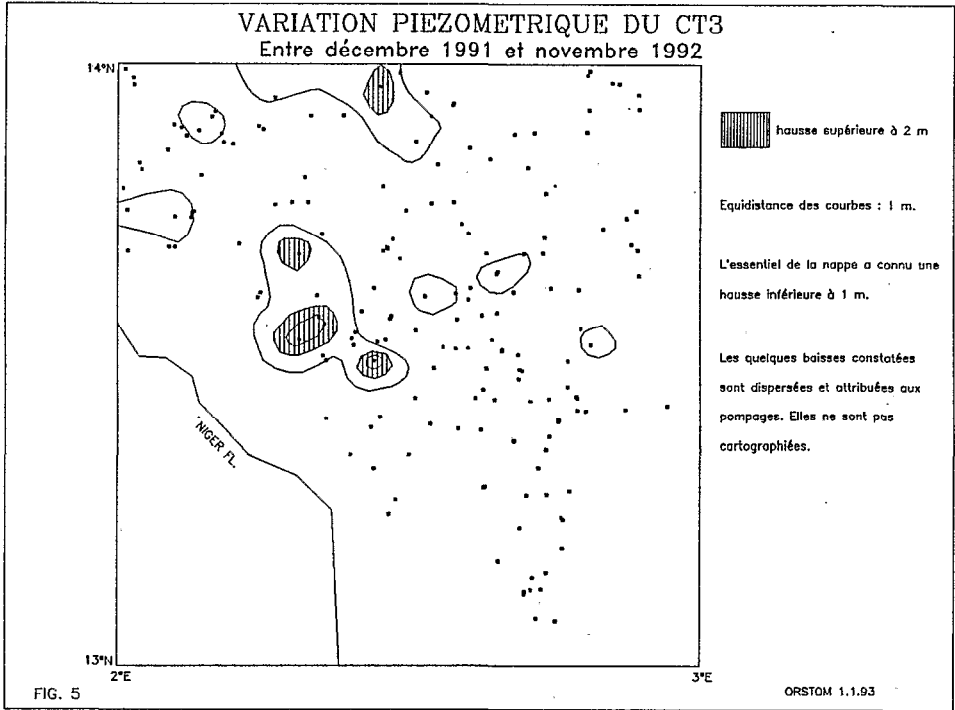


Figure 5. Évolution piézométrique entre décembre 1991 et novembre 1992.

Parmi les 23 hausses comprises entre 1 et 2 m, 9 correspondent à des puits exploités en décembre 1991 et non exploités en novembre 1992. La remontée de la nappe y est donc surestimée. Deux autres puits sont situés en zone inondable.

Des traitements plus détaillés seront nécessaires pour produire une synthèse rigoureuse de la hausse entre 1991 et 1992. La carte fournie (fig. 5) n'est qu'une étape dans ce travail.

5.4. Évolution piézométrique du site de Wankama (fig. 6)

Le site de Wankama est sommairement décrit au paragraphe 3.1.2. L'évolution piézométrique à moyen terme peut être approchée à partir des mesures mensuelles du puits P07 de Wankama effectuées depuis 1987 par le ministère de l'Hydraulique grâce à la coopération suisse (P. SCHROETER, 1993). Malgré les inexactitudes qui entachent ces relevés, plusieurs remarques s'imposent :

- le total pluviométrique annuel ne suffit pas à définir les bonnes ou mauvaises années pour la réalimentation de la nappe. Ainsi, un même total de pluie en 1991 et 1993 (480 et 500 mm) s'est traduit par des amplitudes piézométriques différentes (2 et 3 m). La recharge de l'aquifère dépend de la répartition et de l'intensité des précipitations au cours de la saison des pluies.
- la tendance régionale, confirmée en d'autres sites, est à une reconstitution des réserves depuis la sécheresse de 1984. La forte remontée de la nappe souligne l'importance de l'alimentation récente, ce qui n'est pas toujours le cas en zone sahéenne, et donc la sensibilité aux fluctuations climatiques. Dans une telle situation, les chroniques piézométriques longues sont fondamentales pour une analyse hydrogéologique sérieuse.

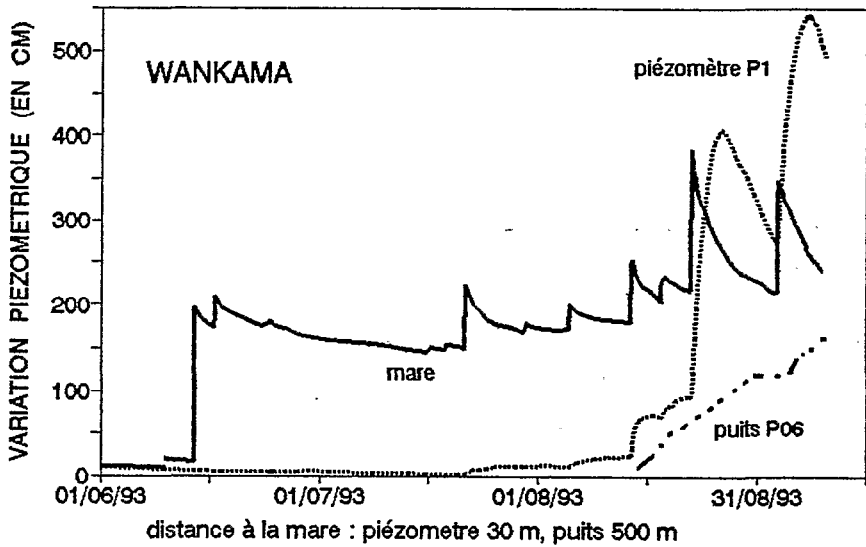
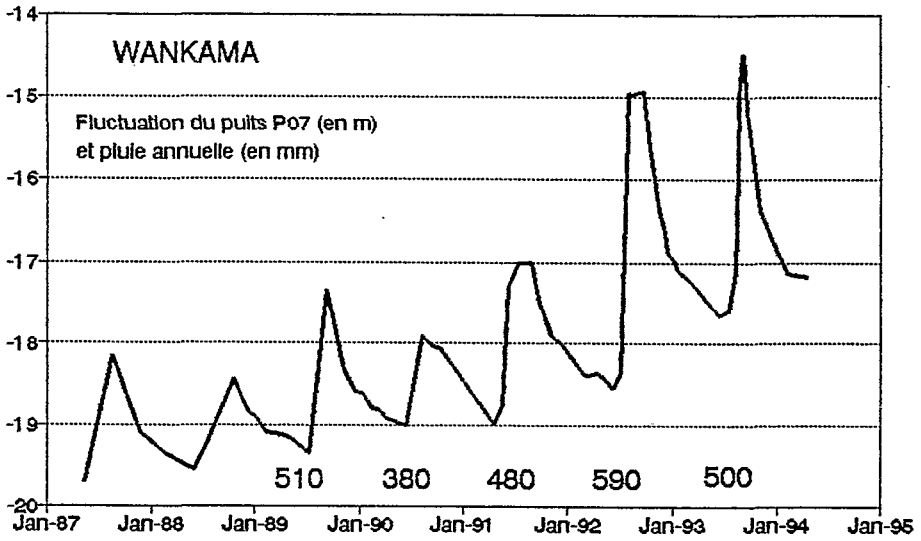


Figure 6. Variations piézométriques du site de Wankama.

Les enregistrements en continu des niveaux de la mare et aussi de la nappe en plusieurs piézomètres au cours de l'année 1993 illustrent l'intérêt de mesures denses et précises à proximité des lieux privilégiés d'infiltration que sont les mares temporaires. A Wankama, les premières crues dans la mare imprègnent la zone non saturée mais n'ont pas d'impact immédiat sur le niveau de la nappe qui ne commence à monter que vers le 20 juillet (quelques cm). Les deux grandes hausses brusques dans l'aquifère sont survenues le 22 août et le 3 septembre (entre 2,5 et 3 m d'amplitude à chaque fois). Le décalage temporel entre début de crue dans la mare et dans la nappe diminue en fin de saison des pluies (une à deux heures pour les deux derniers épisodes). La juxtaposition des chroniques des différents piézomètres permet en outre de calculer différents coefficients de diffusivité correspondant à différentes tranches de l'aquifère.

La comparaison de ces chroniques continues de Wankama avec celles de Banizoumbou est instructive : les deux sites se trouvent dans des contextes géomorphologiques apparemment très proches (kori de Dantiandou) mais leurs réactions sont très différentes : faible amplitude piézométrique et rapide amortissement dans l'espace à Banizoumbou mais réaction plus rapide de la nappe en début de saison.

5.5. ACP sur hydrochimie (fig. 7)

Une analyse en composantes principales effectuées sur les 87 premières analyses chimiques confiées au laboratoire de Bondy a mis en évidence des corrélations entre certains éléments (Ca et Mg en premier, et ensuite ces deux ions avec NO_3 , Na, Cl et la conductivité). Au contraire, certaines variables sont indépendantes des autres (K, HCO_3 , SO_4 , pH).

6. CONCLUSION

Les estimations de la recharge des aquifères en zone sahélienne varient énormément selon les auteurs, les régions et les méthodes utilisées. Dans bien des cas, ces propositions reposent sur une quantité limitée de données peu fiables.

Les très nombreuses mesures hydrogéologiques réalisées en 1991, 1992 et 1993 ont permis une première description de l'évolution piézométrique de la nappe et de sa variabilité hydrochimique.

Les données piézométriques sont exploitables en variations relatives, compte tenu des pompages éventuels, et en valeurs absolues pour les puits nivelés.

La recharge de l'aquifère par infiltration se marque sur la plupart des chroniques piézométriques par une remontée du niveau de la nappe, généralement inférieure à 1 m. Les plus hauts niveaux sont atteints à des dates variables, en cours ou après la saison des pluies. Les points les plus variants (jusqu'à 9 m) sont situés à proximité immédiate des mares temporaires qui apparaissent donc comme des lieux privilégiés de réalimentation. A l'intérieur d'un processus pluriannuel de reconstitution des réserves souterraines, la saison des pluies 1992 semble avoir eu un impact plus fort sur la nappe que 1991 ou 1993. Le Nord-Ouest du degré carré est un secteur hétérogène, en bordure de l'aquifère qui se biseaute sur le socle cristallin.

Les mesures de conductivité montrent des zones limitées à forte minéralisation s'opposant au reste de la nappe et confirment donc le particularisme du Nord-Ouest. Les analyses chimiques précisent les ions responsables de l'essentiel de la minéralisation (nitrate et bicarbonate pour les anions, calcium et sodium pour les cations), mais les fortes teneurs en nitrate de certains points ne sont pas encore expliquées.

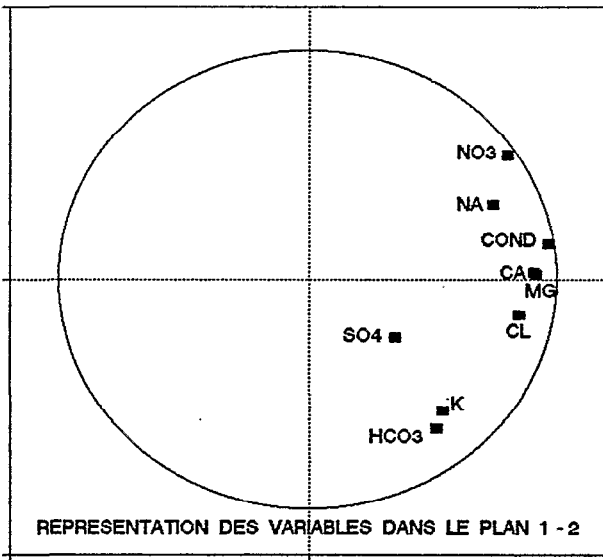
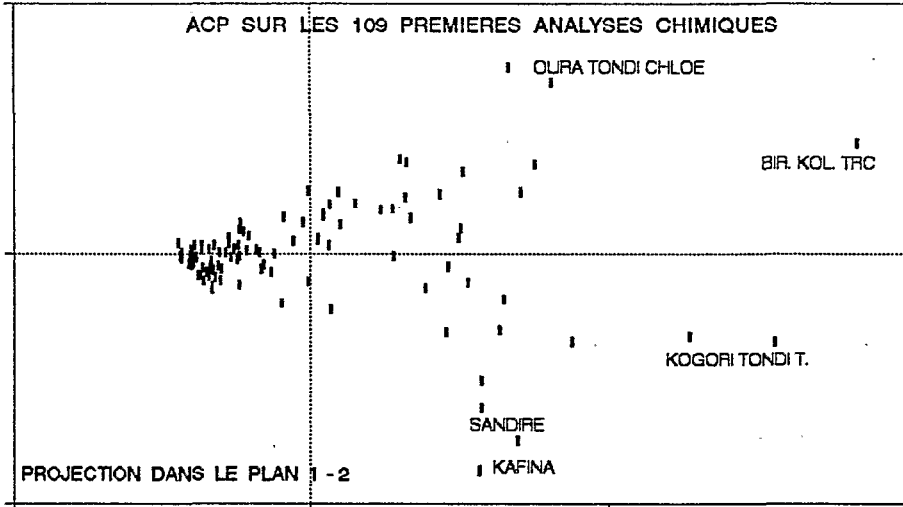


Figure 7. ACP sur les 109 premières analyses chimiques.

Les analyses isotopiques différencient très clairement le CT3 des deux autres niveaux plus profonds du CT, qui contiennent des eaux beaucoup plus anciennes s'étant infiltrées dans d'autres conditions climatiques.

Les mesures instantanées de piézométrie et de conductivité, les résultats d'analyses chimiques, les caractéristiques géographiques des ouvrages visités sont disponibles dans la base de données Hapex-Sahel H2SIS.

RÉFÉRENCES

- BRGM, *Les eaux souterraines de la république du Niger*, par J. GREIGERT. Rapport BRGM 68/ABI/006/NIA, 1968.
- BRGM, *Atlas des eaux souterraines*. Rapport BRGM 79/AGE/001, Orléans 1979.
- BRGM, *Mise à jour de l'Atlas des eaux souterraines du Niger*. 1986.
- LEDUC C. et J.C. DESCONNETS, *Pools and recharge of the Continental Terminal phreatic aquifer near Niamey, Niger*. International workshop on groundwater monitoring and recharge in semi-arid areas, Hyderabad janvier 1994, SV13-SV22, UNESCO/IAH ed.
- LEDUC C. et J.C. DESCONNETS, *Variability of groundwater recharge in the Sahel: piezometric survey of the Continental Terminal aquifer (Niger)*. International conference on future groundwater resources at risk, Helsinki juin 1994, IAHS publ. à paraître.
- PNUD, *Atlas des ressources en eau du Continental Terminal*. Projet DCTD NER86001, Niamey, octobre 1990.
- PNUD, *Synthèse des ressources en eau du département de Tillabéri*. Projet DCTD NER86001, Niamey, octobre 1990.
- PNUD, *Les ressources en eau du département de Dosso*. Projet DCTD NER86001, Niamey, janvier 1991.
- SCHROETER P., *Les fluctuations des niveaux d'eau dans les nappes du Continental Terminal et de la formation du Tchad*. Programme hydraulique Niger-Suisse, Niamey, décembre 1993.

ANNEXE 1

Liste des puits visités, classés par numéro géographique, avec indication des points nivelés, du nombre de mesures *in situ* et d'analyses chimiques

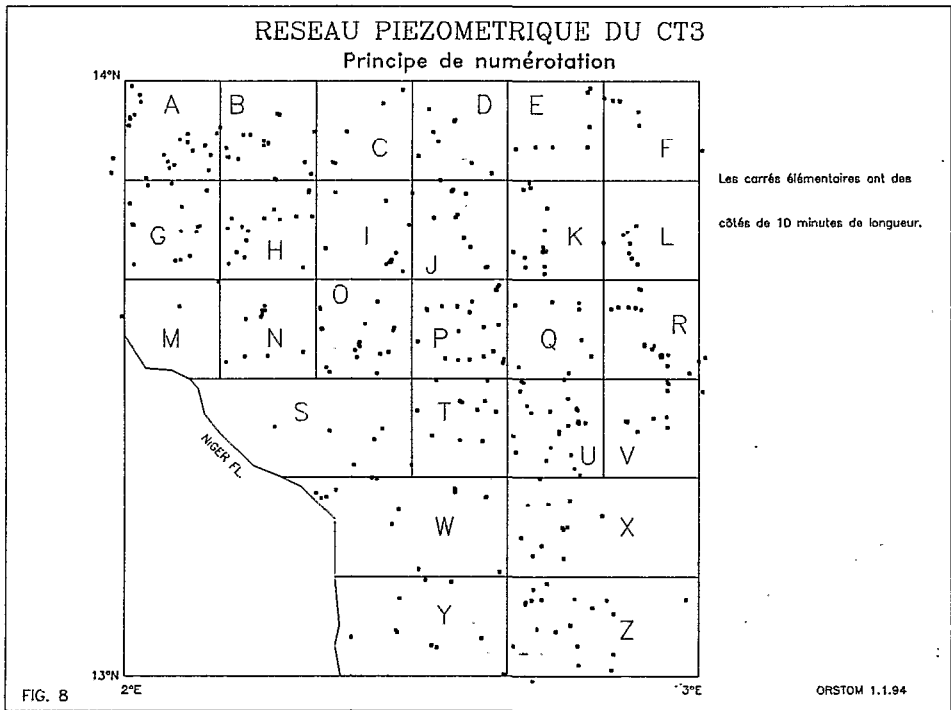


Figure 8. Principe de numérotation des puits visités.

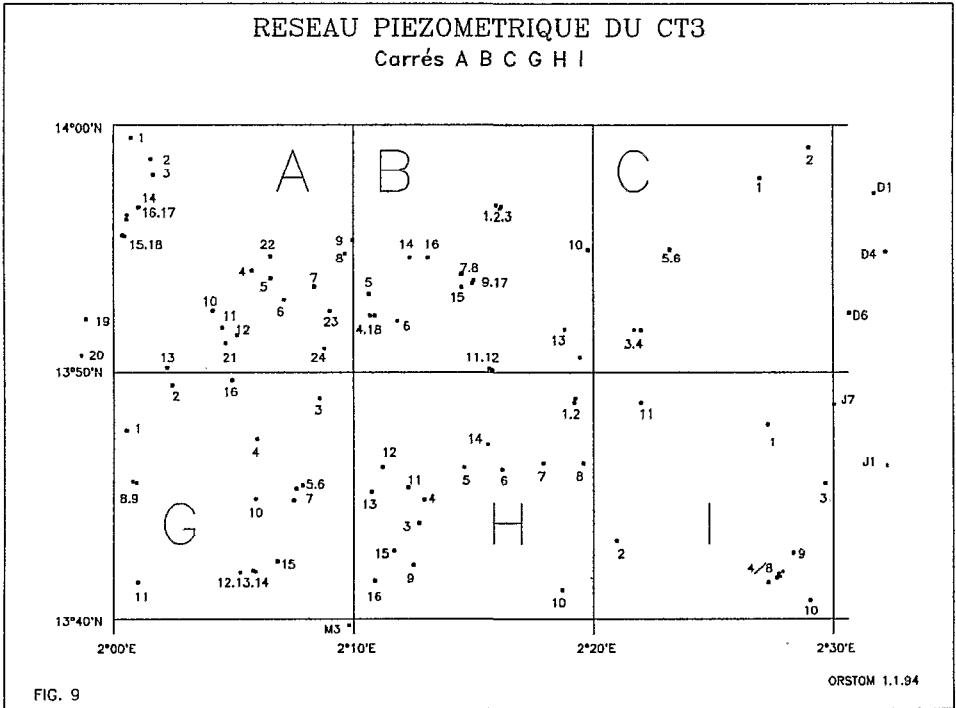


Figure 9. Détail de numérotation des puits des zones ABCGHI.

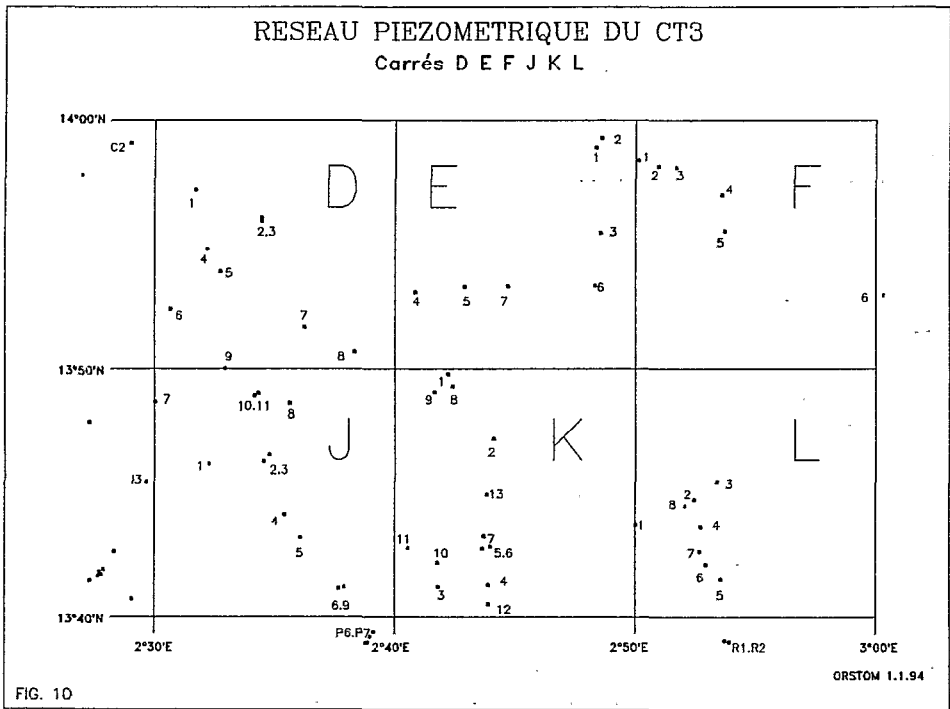


Figure 10. Détail de numérotation des puits des zones DEFJKL.

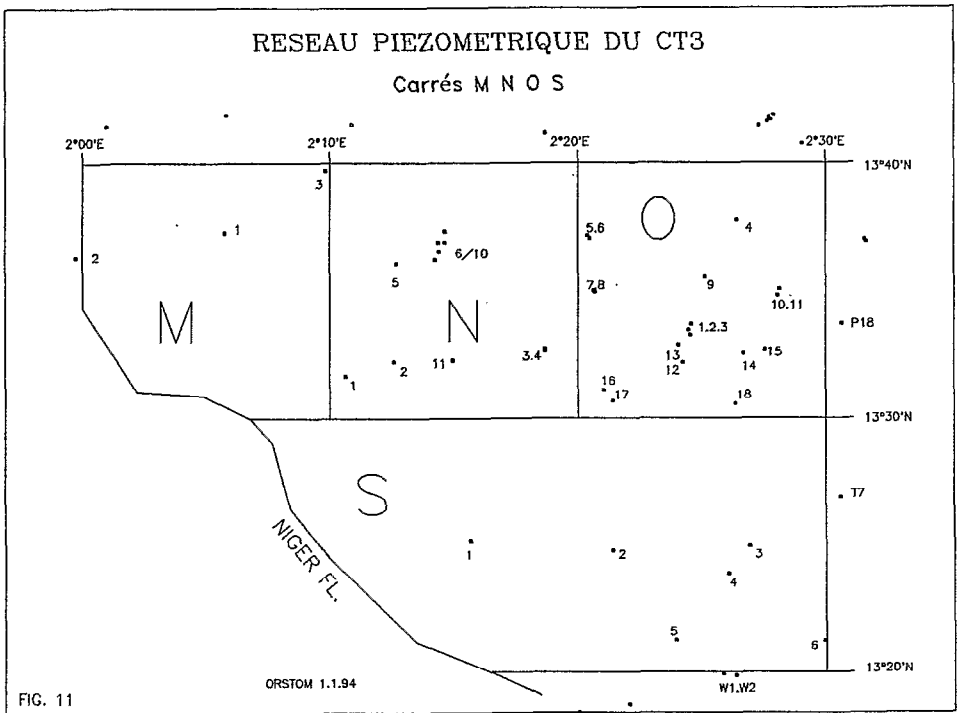


Figure 11. Détail de numérotation des puits des zones MNOS.

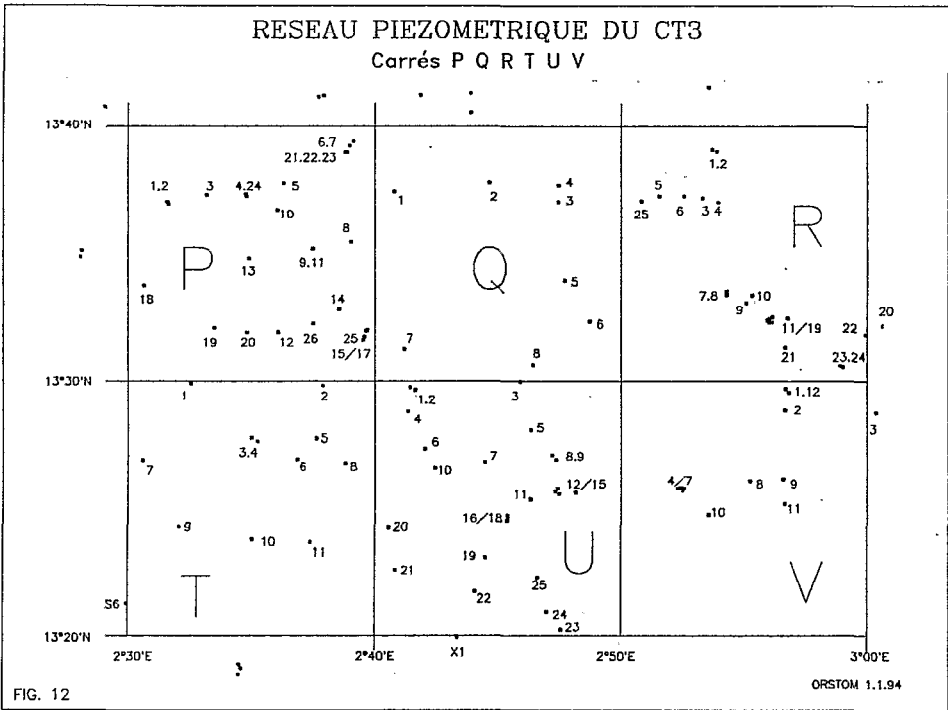


Figure 12. Détail de numérotation des puits des zones PQRTUV.

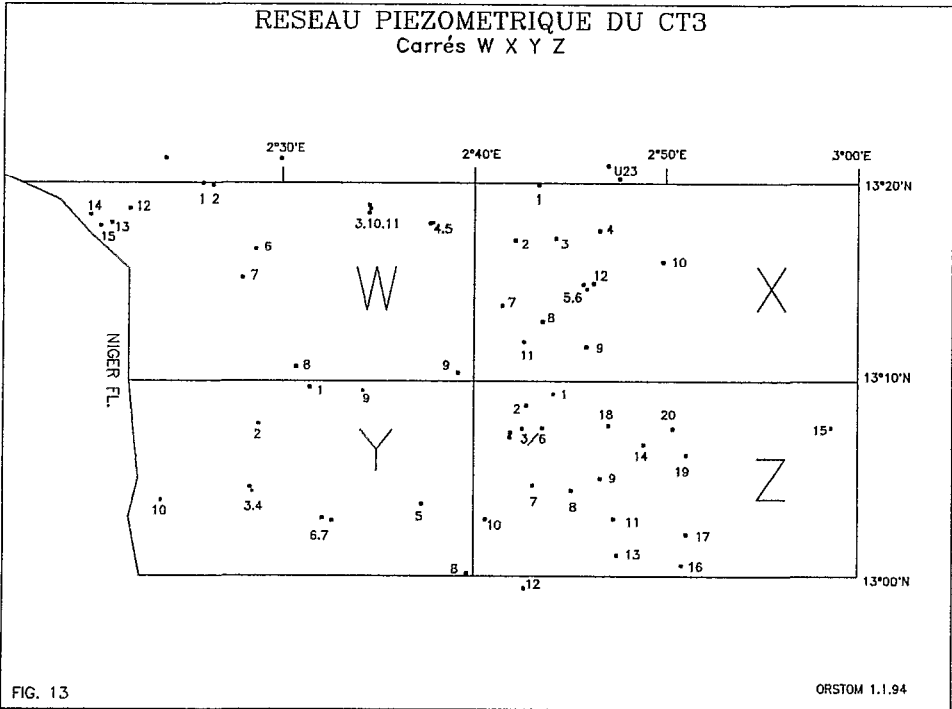


Figure 13. Détail de numérotation des puits des zones WXYZ.

ANNEXE 1 suite

**LISTE DES PUIITS DU DEGRÉ CARRÉ CLASSÉS PAR NUMÉROS CROISSANTS
AVEC INDICATION DES MESURES RÉALISÉES (SITUATION AU 31-12-93)**

Les numéros des puits sont ceux figurant sur les cartes des figures 8 à 12.

Longitude et latitude sont exprimées en degrés et minutes décimales.

Les puits ayant fait l'objet d'un nivellement de précision sont indiqués dans la colonne NIVEL par un X.

Les trois colonnes suivantes indiquent le nombre de mesures de piézométrie, conductivité et pH *in situ*.

La dernière colonne indique le nombre d'analyses chimiques (ions majeurs) du puits.

NUM.	VILLAGE	LONG.	LATIT.	NIVEL	PIEZO NOMBRE DE MESURES	COND	PH	ANALYSES CHIMIQUES
A01	NIABERI KOUARA	2° 00.72	13° 59.48		11	9	3	
A02	BANEY KAINA	2° 01.54	13° 58.60		10	7	2	1
A03	TONDI MEKIREY	2° 01.65	13° 57.94	X	10	7	2	
A04	GOUBEY KIRE VIL	2° 05.76	13° 54.07	X	11	8	2	
A05	GOUBEY KIRE FED	2° 06.55	13° 53.75		11	7	2	
A06	OUAGINI BANGOU	2° 07.10	13° 52.94		11	8	2	
A07	BOUBOUREY FANDOU	2° 08.35	13° 53.44		11	6	2	
A08	SISAN TONDI ENCLOS	2° 09.66	13° 54.77	X	10	6	2	1
A09	SISAN TONDI KOUARA	2° 09.97	13° 55.32		10	7	2	
A10	DIOLE	2° 04.12	13° 52.51		4	1	0	
A11	DIOLE GOUBE KOUARA	2° 04.51	13° 51.82	X	7	6	2	
A12	GOUBE MENASARA	2° 05.15	13° 51.52		12	10	3	
A13	GOROU GOUSSA	2° 02.23	13° 50.18	X	10	9	2	
A14	GATA KOUARA (K TEG)	2° 01.03	13° 56.64		6	6	2	
A15	SABON GARI OFEDES	2° 00.44	13° 55.51		5	5	1	
A16	KANO KOUARA OFEDES	2° 00.56	13° 56.35		5	5	1	
A17	KANO KOUARA CLOS	2° 00.52	13° 56.17		5	5	1	
A18	SABON GARI TR CIM	2° 00.38	13° 55.54		5	5	1	
A19	TERA BOYEV TONDI	1° 58.84	13° 52.17		5	5	1	
A20	BOYEV TONDI	1° 58.63	13° 50.69		5	5	1	
A21	GOUBE KORY	2° 04.66	13° 51.20		4	4	1	
A22	BOLEY	2° 06.54	13° 54.68		1	1	0	
A23	OUADOUKA	2° 09.00	13° 52.49		1	1	0	
A24	KAHLEN GOROU	2° 08.78	13° 50.98		2	2	0	
B01	SAMARI MOSQUÉE	2° 16.16	13° 56.68		10	7	2	1
B02	SAMARI ÉCOLE	2° 16.13	13° 56.61		5	4	1	1
B03	SAMARI KORY	2° 15.95	13° 56.74	X	6	3	1	
B04	KAREY BANGOU LORI	2° 10.88	13° 52.30	X	13	9	2	2
B05	KAREY BANGOU FED	2° 10.64	13° 53.17	X	12	7	2	1
B06	ZIMBA	2° 11.84	13° 52.08		13	8	2	1
B07	BOYEV TONDI POMPE	2° 14.54	13° 53.94		9	6	1	
B08	BOYEV TONDI ENCLOS	2° 14.49	13° 53.90	X	10	7	2	1
B09	LIBO ATOU KOUARA 1	2° 14.96	13° 53.59		7	3	1	
B10	OURA TONDI CHLOE	2° 19.79	13° 54.92	X	12	5	3	2
B11	GARDAMA KOUARA 1	2° 15.80	13° 50.08		7	5	1	
B12	GARDAMA KOUARA 2	2° 15.65	13° 50.13		7	5	1	

142 Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans Hapex-Sahel : dispositif de mesures au sol et premiers résultats

NUM.	VILLAGE	LONG.	LATIT.	NIVEL	PIEZO NOMBRE	COND DE MESURES	PH	ANALYSES CHIMIQUES
B13	TONDI BANDA	2° 18.81	13° 51.75		2	1	0	1
B14	GOGUE KOUARA	2° 12.37	13° 54.63		1	1	0	
B15	KOKORBARA	2° 14.51	13° 53.42		1	1	0	
B16	MORA KOUARA	2° 13.11	13° 54.63		4	4	1	
B17	LIBO ATOU BABA 2	2° 15.02	13° 53.69		2	2	0	1
B18	KAREY BANGOU TREUI	2° 10.69	13° 52.31		6	4	1	
B19	KOUARA ZENO	2° 19.45	13° 50.59		3	3	0	
C01	TILOA KAINA	2° 26.95	13° 57.80	X	9	6	1	1
C02	KOKORBE BANGOU	2° 28.99	13° 59.08		9	6	1	2
C03	MAOURIZE BANGOU	2° 22.00	13° 51.72		5	3	1	
C04	MAOURIZE BANGOU	2° 21.71	13° 51.74		4	3	1	
C05	TONGOM	2° 23.20	13° 54.92	X	9	4	1	
C06	TONGOM ENCLOS	2° 23.20	13° 54.95		9	3	1	
D01	TEKO BABA KOUARA	2° 31.74	13° 57.20	X	9	6	1	2
D02	DEY TEGUI PASTO	2° 34.48	13° 56.08		10	6	2	2
D03	DEY TEGUI KORY	2° 34.46	13° 55.96	X	10	7	2	2
D04	TONDI BANDA	2° 32.22	13° 54.85		8	4	1	
D05	MARAFI KOUARA	2° 32.74	13° 53.92		8	6	1	1
D06	NAZEY	2° 30.68	13° 52.41	X	9	6	1	
D07	KOKORBE FANDOU	2° 36.25	13° 51.70	X	11	5	2	
D08	DAR ES SALAM PASTO	2° 38.33	13° 50.66		9	8	1	3
D09	GABO BABA KOUARA	2° 32.95	13° 50.02		8	6	2	
E01	HAYNI SIMOROU VILL	2° 48.35	13° 58.90		10	7	2	1
E02	HAYNI SIMOROU GOUB	2° 48.58	13° 59.30		10	6	2	
E03	MARI DOUMBO	2° 48.56	13° 55.49		10	8	2	
E04	KIRIB BERI	2° 40.87	13° 53.10		11	6	2	1
E05	KIRIB KAINA	2° 42.92	13° 53.29	X	11	7	2	
E06	TONDI KANGUIE ZOUR	2° 48.31	13° 53.34		10	1	0	
E07	KIRIB	2° 44.65	13° 53.31		6	6	2	1
F01	DIBAMOKO BANIZOUMB	2° 50.09	13° 58.36		7	6	2	
F02	BANIZOUMBOU	2° 50.95	13° 58.13		9	7	2	
F03	GOUBI BANDA	2° 51.68	13° 58.07	X	10	7	2	
F04	MAOUREY	2° 53.62	13° 56.99		10	7	2	1
F05	DAREY BERI	2° 53.72	13° 55.58	X	10	6	2	
F06	SOURGO KOUARA	3° 00.33	13° 52.96		1	1	0	
G01	DANGUEY GOROU	2° 00.53	13° 47.66		10	9	2	
G02	ZARMAKOY KOUARA	2° 02.44	13° 49.49		10	7	1	
G03	GOUNOU BANGOU	2° 08.57	13° 48.93	X	9	5	2	
G04	MOUSSA DIOLO ROUTE	2° 05.98	13° 47.32		11	7	2	
G05	TCHANGAREY NORD	2° 07.87	13° 45.41	X	9	7	2	
G06	TCHANGAREY CENT	2° 07.62	13° 45.29		3	0	0	
G07	TCHANGAREY SUD	2° 07.51	13° 44.81		10	6	2	
G08	ZEIBANE FITI TR CI	2° 00.80	13° 45.57		8	7	1	
G09	ZEIBANE FITI KORY	2° 00.94	13° 45.52	X	11	8	1	
G10	KONE BERI	2° 05.92	13° 44.87	X	13	8	2	
G11	DINKI	2° 01.00	13° 41.48		11	7	1	
G12	KOUARE KAINA MENTO	2° 05.29	13° 41.87		9	8	2	
G13	KONE KAINA ÉCOLE	2° 05.93	13° 41.90	X	12	9	3	2

NUM.	VILLAGE	LONG.	LATIT.	NIVEL	PIEZO NOMBRE DE MESURES	COND PH	ANALYSES CHIMIQUES
G14	KONE KAINA KORY	2° 05.83	13° 41.94		3	1	0
G15	KONE KAINA EST ROU	2° 06.84	13° 42.31	X	5	3	1
G16	TONDI KOUKOU	2° 04.92	13° 49.69		2	2	0
H01	BABAKAINA KOUA TRA	2° 19.20	13° 48.76	X	9	4	0
H02	BABAKAINA KOUARA T	2° 19.25	13° 48.94		4	0	0
H03	MAYAKI KOUARA	2° 12.74	13° 43.91		9	6	2
H04	TOKOBINKANI ZARMA	2° 12.94	13° 44.85		10	3	2
H05	YETE KOUARA	2° 14.61	13° 46.16		8	0	0
H06	TONDI GAMEY	2° 16.19	13° 46.07	X	12	4	0
H07	GADABO	2° 17.90	13° 46.34		9	6	0
H08	GADABO FETOKADIE	2° 19.58	13° 46.34		9	7	0
H09	KOKIRE	2° 12.50	13° 42.19	X	11	9	2
H10	DEY TEGUI	2° 18.68	13° 41.17	X	9	7	0
H11	KOUDIZADE	2° 12.28	13° 45.33		2	1	1
H12	FADA KOUROU BANGOU	2° 11.20	13° 46.18		1	0	0
H13	ZORI BANGOU	2° 10.76	13° 45.15		2	2	0
H14	LABOU TITILOUA	2° 15.60	13° 47.09		2	0	0
H15	LAWEY	2° 11.69	13° 42.72		6	5	2
H16	BARKIAWEL	2° 10.88	13° 41.53		5	4	1
I01	OURA TONDI	2° 27.29	13° 47.89	X	13	8	1
I02	BANGOU BOBO	2° 20.98	13° 43.13		12	9	0
I03	KIRAN FANDOU BERI	2° 29.67	13° 45.50		16	11	2
I04	BIRNI SOFO	2° 27.31	13° 41.48		12	8	2
I05	BIRNIKOLONIA CHLO	2° 27.65	13° 41.66	X	15	1	0
I06	BIRNIKOLONIA 2BEL	2° 27.73	13° 41.81		13	9	3
I07	BIRNIKOLONIA TR.C	2° 27.80	13° 41.72	X	18	8	3
I08	BIRNIKOLONIA PROJ	2° 27.89	13° 41.91		13	8	2
I09	BIRNI FANTORA P	2° 28.34	13° 42.65		15	12	2
I10	BIRNI KOBERI	2° 29.06	13° 40.76		10	8	2
I11	MAOURIZE BANGOU	2° 22.00	13° 48.76		1	0	0
J01	ZOURAGANE	2° 32.28	13° 46.22	X	8	6	2
J02	LOGA KOLO TASSI	2° 34.56	13° 46.31		9	6	2
J03	LOGA	2° 34.78	13° 46.57		9	5	2
J04	KOLO BOSSEY	2° 35.42	13° 44.14	X	11	7	2
J05	KOLO DIOGONO	2° 36.10	13° 43.22		11	8	2
J06	GARBET TOMBO PTC	2° 37.92	13° 41.21	X	9	8	2
J07	KIRAN MILI	2° 30.04	13° 48.69		5	5	1
J08	SAKARA TRAD	2° 35.64	13° 48.64		1	1	0
J09	GARBET TOMBO PASTO	2° 37.70	13° 41.16		5	5	2
J10	KOLO GAWANI TRAD 2	2° 34.23	13° 49.03		0	1	0
J11	KOLO GAWANI TRAD 1	2° 34.19	13° 48.92		1	1	0
K01	BALEYARA TABLA	2° 42.23	13° 49.77		9	4	2
K02	DJOURS	2° 44.12	13° 47.23	X	8	5	3
K03	BANI KOSSEY	2° 41.83	13° 41.23	X	10	6	2
K04	NINE FOUNO BELLA	2° 43.88	13° 41.30	X	12	9	3
K05	KAFINA	2° 43.98	13° 42.86		10	7	2
K06	KAFINA TRC	2° 43.67	13° 42.76		1	1	0
K07	KAFINA PASTORAL	2° 43.70	13° 43.26		1	1	0

144 Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans Hapex-Sahel : dispositif de mesures au sol et premiers résultats

NUM.	VILLAGE	LONG.	LATIT.	NIVEL	PIEZO NOMBRE DE MESURES	COND PH	ANALYSES CHIMIQUES	
K08	HAYNI SIMOROU TRC 2	2° 42.41	13° 49.29		1	1	0	
K09	HAYNI SIMOROU TRC1	2° 41.66	13° 49.07	X	1	1	0	
K10	BANI KOSSEY	2° 41.80	13° 42.19		5	5	1	
K11	HABAKA PLATEAU	2° 40.57	13° 42.80		5	2	0	
K12	NINE FOUNO TRC	2° 43.89	13° 40.54		1	1	0	
K13	HAYNI FADA TRAD	2° 43.84	13° 44.97		1	1	0	
L01	AGCHAROUS	2° 50.01	13° 43.71		12	8	3	2
L02	IBAMADE	2° 52.47	13° 44.77		10	5	2	1
L03	OUIINDITAN	2° 53.39	13° 45.47		11	6	2	1
L04	IBAMA IRH 71003	2° 52.74	13° 43.62		7	6	2	
L05	KOGORI TONDI KIRE	2° 53.56	13° 41.53	X	11	7	3	2
L06	KOGORI 70992	2° 52.94	13° 42.13		10	7	2	1
L07	IBAMADE	2° 52.68	13° 42.65		1	1	0	
L08	IBAMADE ROUTE	2° 52.08	13° 44.50		5	5	2	
M01	BARKIRE ALIDOU	2° 05.76	13° 37.31	X	8	7	2	1
M02	BANGOULA MOSQUÉE	1° 59.75	13° 36.37	X	7	7	2	1
M03	TEBONSE	2° 09.81	13° 39.74	X	6	5	1	
N01	POSTE POLICE NIAMEY	2° 10.63	13° 31.69		11	7	3	2
N02	SAGA GOROU	2° 12.58	13° 32.23		12	7	3	
N03	BARKIAWAL VILLAGE	2° 18.67	13° 32.73	X	17	12	4	1
N04	BARKIAWAL ROUTE	2° 18.69	13° 32.67		12	8	3	1
N05	KONGOU FANDIZEY	2° 12.69	13° 36.09		12	9	1	
N06	WARI ÉCOLE KONGOU	2° 14.38	13° 36.92		12	9	0	1
N07	WARI PASTORAL	2° 14.64	13° 37.35	X	13	8	0	1
N08	WARI KOUARA BERI	2° 14.64	13° 36.93		1	1	0	
N09	WARI	2° 14.40	13° 36.57		1	1	0	
N10	WARI LABA	2° 14.25	13° 36.25		1	1	0	
N11	KOGOROU	2° 14.96	13° 32.30		5	4	2	
O01	HAMDALLAY MOSQUÉE	2° 24.47	13° 33.47	X	19	13	3	2
O02	HAMDALLAY NORD	2° 24.57	13° 33.69		3	2	1	
O03	HAMDALLAYE SUD	2° 24.54	13° 33.28		3	0	0	1
O04	BOUNDUBARE	2° 26.42	13° 37.79	X	10	6	2	
O05	TOKOBINKANI PEUL	2° 20.48	13° 37.09	X	12	9	1	
O06	TOKOBINKANI DEUX	2° 20.40	13° 37.20		1	0	0	
O07	LOUGGA OFEDES	2° 20.62	13° 35.03		14	11	1	
O08	LOUGGA CIM SANS EA	2° 20.68	13° 34.99		2	1	0	
O09	KEYAN ZARMA	2° 25.13	13° 35.58		10	7	3	
O10	KOBERI KOUARA VILL	2° 28.05	13° 34.83	X	12	7	2	
O11	KOBERI KOUARA PAST	2° 28.13	13° 35.09		12	9	3	1
O12	HAMDALLAY PROJET	2° 24.25	13° 32.20		13	7	1	
O13	ATOU BABA KOUARA	2° 24.05	13° 32.87		12	10	2	
O14	FALINKE KAINA	2° 26.69	13° 32.54		10	5	2	
O15	FALINKE BERI	2° 27.56	13° 32.69		11	6	2	
O16	FETOBOKKI PEUL	2° 2.05	13° 31.12		10	7	3	
O17	FETOBOKKI ZARMA	2° 21.41	13° 30.68	X	9	6	2	
O18	GAGARE	2° 26.35	13° 30.58	X	13	10	1	
P01	GOGUIEZE KOUARA PA	2° 31.64	13° 36.95	X	13	9	3	1
P02	GOGUIEZE KOUARA DC	2° 31.57	13° 37.03		12	10	3	

NUM.	VILLAGE	LONG.	LATIT.	NIVEL	PIEZO	COND	PH	ANALYSES CHIMIQUES
					NOMBRE DE MESURES			
P03	KOUNTCHE BERI TREU	2° 33.19	13° 37.31		2	2	0	
P04	KIDABAZAGAIZE GOUD	2° 34.77	13° 37.34		14	9	2	
P05	KIDA Tafa KOUARA	2° 36.29	13° 37.77		11	8	2	
P06	WANKAMA NORD	2° 39.13	13° 39.41		19	15	3	1
P07	WANKAMA SUD	2° 38.99	13° 39.23	X	17	11	3	
P08	MAOUREY KOUARA ZEN	2° 39.04	13° 35.44	X	16	8	3	
P09	BANIKANE PASTOR	2° 37.51	13° 35.17		8	4	1	
P10	DANTIANDOU TEGUI	2° 36.04	13° 36.70		8	5	1	
P11	BANIKANE DOMEST	2° 37.49	13° 35.17		10	5	1	
P12	BANKA DEY	2° 36.07	13° 31.90		12	7	2	
P13	SABOU DEY	2° 34.91	13° 34.79		9	7	2	
P14	BOUNDOU	2° 38.54	13° 32.78		8	5	1	
P15	BANIZOUMBOU ÉCOLE	2° 39.53	13° 31.60	X	16	9	4	1
P16	BANIZOUMBOU MOSQU	2° 39.58	13° 31.72		14	10	4	1
P17	BANIZOUMBOU DRE FO	2° 39.64	13° 31.96		12	0	0	
P18	KODJIRI BANI KOUARA	2° 30.65	13° 33.72	X	9	6	2	
P19	FANDOUBERI	2° 33.50	13° 32.06		18	10	3	
P20	KALASSI	2° 34.82	13° 31.89	X	14	7	3	
P21	WANKAMA PIEZO 1	2° 38.88	13° 38.99	X	8	0	0	
P22	WANKAMA PIEZO 2	2° 38.85	13° 38.97	X	8	0	0	
P23	WANKAMA PIEZO 3	2° 38.80	13° 38.97	X	8	0	0	
P24	KIDABAZAGAIZE LATE	2° 34.81	13° 37.25		8	5	3	1
P25	BANIZOUMBOU PZ ORS	2° 39.68	13° 31.98		4	0	0	
P26	YOULOUA	2° 37.5	13° 32.2		1	0	0	
Q01	MAOUREY TOKOBINKAN	2° 40.79	13° 37.43	X	10	4	2	
Q02	KARABANGA	2° 44.66	13° 37.79	X	10	6	2	1
Q03	BOULA DAREY 2	2° 47.44	13° 37.03		1	1	0	
Q04	BOULA DAREY	2° 47.45	13° 37.68	X	9	6	2	1
Q05	BOUNDOU WAROU	2° 47.71	13° 33.92		10	8	2	1
Q06	KATANGA PASTORAL	2° 48.73	13° 32.30	X	9	7	2	1
Q07	TONDI KIBORO	2° 41.20	13° 31.23		11	8	2	1
Q08	TIGO TEGUI	2° 46.41	13° 30.62	X	9	8	2	1
R01	SANDIRE ROUTE	2° 53.72	13° 39.07		10	6	1	1
R02	SANDIRE EST	2° 53.90	13° 39.01		9	6	2	1
R03	IDRISSA MAMANE	2° 53.32	13° 37.19		5	5	0	
R04	TONDI KIRE	2° 53.95	13° 37.02		10	6	0	
R05	BOUNDOU SIMTI	2° 51.57	13° 37.27	X	10	7	2	2
R06	FANDOU	2° 52.59	13° 37.26		5	5	1	
R07	NAMARI	2° 54.29	13° 33.37		1	1	0	
R08	NAMARI	2° 54.29	13° 33.49		10	7	1	1
R09	DOLEWA	2° 55.10	13° 33.05		5	5	0	
R10	DOLEWA	2° 55.32	13° 33.34		5	5	0	
R11	YEDA BOSSO	2° 55.96	13° 32.35		10	8	0	
R12	YEDA CECI 1	2° 56.06	13° 32.27		1	1	0	
R13	YEDA CECI 2	2° 56.09	13° 32.28		1	1	0	
R14	YEDA CECI 3	2° 56.13	13° 32.27		1	1	0	
R15	YEDA JARD ÉCOLE 1	2° 56.02	13° 32.29		1	1	0	
R16	YEDA JARD ÉCOLE 2	2° 56.02	13° 32.27		1	1	0	

146 Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans Hapex-Sahel : dispositif de mesures au sol et premiers résultats

NUM.	VILLAGE	LONG.	LATIT.	NIVEL	PIEZO NOMBRE DE MESURES	COND PH	ANALYSES CHIMIQUES	
R17	YEDA MÄRCHÉ	2° 56.04	13° 32.40		1	1	0	
R18	YEDA IRH 313074	2° 56.16	13° 32.47		1	1	0	
R19	WINDE BERI TRAD	2° 56.78	13° 32.44		1	1	0	
R20	KOBE	3° 00.65	13° 32.16		1	1	0	
R21	KOLA BOSSEY 313076	2° 56.68	13° 31.31	X	10	6	1	
R22	YAGARMEYE	2° 59.96	13° 31.79		1	1	0	
R23	BANGOUKIREY 313091	2° 58.93	13° 30.60		1	1	0	
R24	BIDON RAS DU SOL	2° 59.03	13° 30.55		0	1	0	
R25	BOUNDOU SIMTI	2° 50.84	13° 37.05	X	4	4	1	
S01	DAREY BANGOU	2° 15.68	13° 25.14		7	7	3	2
S02	GUESSEL BODI	2° 21.39	13° 24.77		13	9	2	1
S03	KOKOUAREY ZARMA	2° 26.92	13° 24.95	X	10	8	1	
S04	KOKOUAREY PEUL	2° 26.07	13° 23.86		13	9	1	1
S05	BOGOL	2° 23.92	13° 21.26	X	10	8	2	1
S06	TIOU DAWA	2° 29.93	13° 21.23	X	14	10	4	1
T01	GASSAN KOURNIE	2° 32.53	13° 29.91		11	6	2	1
T02	KOMAKOUKOU	2° 37.89	13° 29.81		17	10	4	1
T03	BALAL SAGUI 1	2° 35.00	13° 27.74		7	3	0	
T04	BALAL SAGUI 2	2° 35.23	13° 27.61		2	1	1	
T05	FETOKADIE	2° 37.64	13° 27.73	X	12	7	2	2
T06	DOLOHI	2° 36.86	13° 26.89		11	6	2	
T07	YELOUMA	2° 30.59	13° 26.87	X	10	6	1	
T08	KAMPA ZARMA	2° 38.80	13° 26.74		9	5	1	
T09	DIRI BANGOU	2° 32.08	13° 24.24		9	6	1	
T10	BARI TOURI	2° 35.02	13° 23.76		9	5	1	
T11	BABOUSSAY	2° 37.39	13° 23.65	X	9	5	1	
U01	KORTO DOMESTIQUE	2° 41.42	13° 29.75		12	9	2	
U02	KORTO KORY	2° 41.64	13° 29.66		9	6	1	
U03	BAGOUA	2° 45.91	13° 29.99		8	5	1	
U04	YERIMA DEY	2° 41.35	13° 28.79		10	5	2	
U05	TIGO ZENO	2° 46.34	13° 28.04		10	4	1	1
U06	GAOBERI (GAOBANGOU)	2° 42.02	13° 27.33		5	5	1	
U07	TOULOUA KOUAREY	2° 44.48	13° 26.80		9	6	2	1
U08	DEY TEGUI PASTO	2° 47.20	13° 27.07		9	6	1	1
U09	DEY TEGUI DOMES	2° 47.35	13° 26.90		9	6	2	1
U10	GUILEYNI	2° 42.45	13° 26.56	X	11	9	2	1
U11	INCONNU DANT-BOKOS	2° 46.31	13° 25.30		1	0	0	
U12	BOKOSSAY DOMEST	2° 47.32	13° 25.61	X	9	6	2	2
U13	BOKOSSAY PASTORAL	2° 47.42	13° 25.74		7	4	1	
U14	BOKOSSAY	2° 47.48	13° 25.51		7	5	1	
U15	FALANGA	2° 48.16	13° 25.56		10	6	2	1
U16	DANTIANDOU SUD	2° 45.36	13° 24.47		8	2	0	
U17	DANTIANDOU ÉCOLE	2° 45.38	13° 24.68		11	4	1	
U18	DANTIANDOU CARREFO	2° 45.39	13° 24.59		10	4	1	
U19	TOULIEL	2° 44.49	13° 23.05	X	11	7	2	1
U20	DAREY	2° 40.57	13° 24.21		7	6	1	
U21	SOURGOUROU ÉCOLE	2° 40.83	13° 22.56	X	11	9	1	
U22	KOKORBE	2° 44.09	13° 21.71		10	7	2	

NUM.	VILLAGE	LONG.	LATIT.	NIVEL	PIEZO NOMBRE DE MESURES	COND PH	ANALYSES CHIMIQUES
U23	BOULA KOUARA TEGUI	2° 47.57	13° 20.22		1	0	0
U24	TOMBO ZARMA	2° 46.98	13° 20.89		1	1	0
U25	BADOUËL	2° 46.63	13° 22.27		1	1	0
V01	GARDI BERI 313092	2° 56.72	13° 29.70		6	6	1
V02	GARDI BERI	2° 56.68	13° 28.84		4	2	1
V03	KOYGOLO ÉCOLE	3° 00.38	13° 28.73		8	5	1
V04	ZOUZOU SANEY ZARMA	2° 52.32	13° 25.72		9	5	1
V05	ZOUZOU SANEY ZARMA	2° 52.45	13° 25.76		8	6	1
V06	ZOUZOU SANEY ZARMA	2° 52.51	13° 25.64	X	6	6	1
V07	ZOUZOU SANEY BANIZO	2° 52.55	13° 25.72		2	2	0
V08	ZINDAROU	2° 55.25	13° 26.02		5	5	1
V09	KIOULANDE	2° 56.60	13° 26.12		8	4	1
V10	ZOUZOU SANEY PEUL	2° 53.56	13° 24.69		5	5	1
V11	SAFAPATIA ZARMA EC	2° 56.67	13° 25.12		6	5	1
Y12	GARDI BERI 313081	2° 56.85	13° 29.54		2	2	0
W01	WINDE BERI DOME	2° 25.84	13° 19.95		8	6	2
W02	WINDE BERI PASTORA	2° 26.36	13° 19.86		10	7	2
W03	KOURE GROS DIAMETR	2° 34.52	13° 18.87		7	7	2
W04	TIOUBI ROUTE	2° 37.70	13° 17.96	X	10	6	1
W05	TIOUBI PASTORAL	2° 37.82	13° 18.01		9	4	1
W06	SAKEY KOUARA ZENO	2° 28.60	13° 16.67	X	11	5	2
W07	DIKORE	2° 27.92	13° 15.17	X	10	7	1
W08	GOBIRKOY BERI	2° 30.73	13° 10.73		8	6	2
W09	TOUDOU	2° 39.16	13° 10.44	X	10	7	2
W10	KOURE VILL 4 ABREU	2° 34.59	13° 18.73		4	4	2
W11	KOURE CHAMP HTE TE	2° 34.50	13° 18.48		4	4	2
W12	GANGAWA	2° 22.05	13° 18.73		1	1	0
W13	ALLAHOKY	2° 21.09	13° 18.00		1	1	0
W14	KOLLO ZARMA	2° 19.98	13° 18.41		1	1	0
W15	SEBERI	2° 20.52	13° 17.85		1	1	0
X01	TOLLO	2° 43.36	13° 19.91	X	12	7	2
X02	BOKTILI	2° 42.13	13° 17.13	X	11	8	1
X03	GAM DEY	2° 44.25	13° 17.20		10	8	1
X04	AHAMANDEY BERI	2° 46.53	13° 17.60		9	6	2
X05	KANARE PASTORAL	2° 45.71	13° 14.84	X	9	7	1
X06	KANARE ÉCOLE	2° 45.88	13° 14.62		9	6	1
X07	KODO	2° 41.48	13° 13.78	X	13	10	2
X08	TOMBO DJIBO	2° 43.58	13° 13.02		6	5	2
X09	YEDA	2° 45.86	13° 11.75		9	6	2
X10	HARIKANASSOU PASTO	2° 49.86	13° 15.99	X	4	4	2
X11	DARESSALAM	2° 42.63	13° 12.01		3	3	1
X12	DANGARMEY 312158	2° 46.25	13° 14.91		1	1	0
Y01	KOBODEY	2° 31.42	13° 09.68	X	9	8	2
Y02	GOMBEWA	2° 28.77	13° 07.80	X	9	7	2
Y03	TONDI FOU PASTORAL	2° 28.35	13° 04.51	X	9	3	1
Y04	TONDI FOU KOUARA T	2° 28.46	13° 04.30		7	4	1
Y05	GUIDEL	2° 37.29	13° 03.68		9	5	2
Y06	TANA BERI KOUARA	2° 32.10	13° 02.96		6	2	0.

148 Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans Hapex-Sahel : dispositif de mesures au sol et premiers résultats

NUM.	VILLAGE	LONG.	LATIT.	NIVEL	COND PH			ANALYSES CHIMIQUES
					PIEZO	NOMBRE DE MESURES		
Y07	TANA BERI PASTORAL	2° 32.61	13° 02.81	X	9	6	1	
Y08	KARGUI BANGOU	2° 39.65	13° 00.13		8	4	2	1
Y09	BAGANI	2° 34.19	13° 09.48	X	4	4	2	1
Y10	MANGA KOUARA	2° 23.70	13° 03.85		1	1	0	
Z01	KOFO	2° 44.14	13° 09.30		10	6	1	1
Z02	MAROUBERI ZENO	2° 42.75	13° 08.73		8	7	2	
Z03	MAROUBERI TEGUI OF	2° 41.89	13° 07.14	X	8	5	2	
Z04	MAROUBERI TEGUI AD	2° 41.91	13° 07.37		7	6	2	
Z05	MAROUBERI TEGUI PA	2° 42.53	13° 07.55		7	3	1	
Z06	DIAWANDO	2° 43.60	13° 07.60		9	6	1	2
Z07	GUIAODARE TRAD	2° 43.09	13° 04.61		8	5	2	
Z08	BOSSADJI	2° 45.09	13° 04.34		9	5	2	
Z09	POULLO BOSSADJI	2° 46.59	13° 04.97	X	8	5	2	
Z10	MINGUI	2° 40.62	13° 02.89	X	8	5	1	
Z11	DOUDOL	2° 47.32	13° 02.91		5	4	2	
Z12	TANDO	2° 42.64	12° 59.38		7	6	1	
Z13	YLADDE	2° 47.49	13° 01.07		8	5	2	1
Z14	TOMBO BELLA	2° 48.87	13° 06.78		2	1	1	1
Z15	SETI	2° 58.62	13° 07.61		1	1	0	
Z16	DOUALAGA	2° 50.86	13° 00.55		1	1	0	
Z17	KORAN KASSA ZARMA	2° 51.11	13° 02.14		1	1	0	
Z18	GONOUBI	2° 47.04	13° 07.73		1	1	0	
Z19	MARGOU MARCHE	2° 51.08	13° 06.20		1	1	0	
Z20	GUILARE	2° 50.38	13° 07.55		1	1	0	

ANNEXE 2

LISTE DES PUIITS MESURÉS DU DEGRÉ CARRÉ CLASSÉS SUIVANT LE NOM DU VILLAGE

Les numéros des puits sont ceux figurant sur les cartes des figures 8 à 12.

Longitude et latitude sont exprimées en degrés et minutes décimales.

VILLAGE	NUM	LONG.	LATIT.	VILLAGE	NUM	LONG.	LATIT.
AGHAROUS	L01	2° 50.01	13° 43.71	BOKTILI	X02	2° 42.13	13° 17.13
AHAMANDEY BERI	X04	2° 46.53	13° 17.60	BOLEY	A22	2° 06.54	13° 54.68
ALLAHOKY	W13	2° 21.09	13° 18.00	BOSSADJI	Z08	2° 45.09	13° 04.34
ATOU BABA KOUARA	O13	2° 24.05	13° 32.87	BOUBOUREY FANDOU	A07	2° 08.35	13° 53.44
BABAKAINA KOUA TRA	H01	2° 19.20	13° 48.76	BOULA DAREY	Q04	2° 47.45	13° 37.68
BABAKAINA KOUARA T	H02	2° 19.25	13° 48.94	BOULA DAREY 2	Q03	2° 47.44	13° 37.03
BABOUSSAY	T11	2° 37.39	13° 23.65	BOULA KOUARA TEGUI	U23	2° 47.57	13° 20.22
BADOUEL	U25	2° 46.63	13° 22.27	BOUNDOU	P14	2° 38.54	13° 32.78
BAGANI	Y09	2° 34.19	13° 09.48	BOUNDOU SIMTI	R05	2° 51.57	13° 37.27
BAGOUA	U03	2° 45.91	13° 29.99	BOUNDOU SIMTI	R25	2° 50.84	13° 37.05
BALAL SAGUI 1	T03	2° 35.00	13° 27.74	BOUNDOU WAROU	Q05	2° 47.71	13° 33.92
BALAL SAGUI 2	T04	2° 35.23	13° 27.61	BOUNDUBARE	O04	2° 26.42	13° 37.79
BALEYARA TABLA	K01	2° 42.23	13° 49.77	BOYEV TONDI	A20	1° 58.63	13° 50.69
BANEY KAINA	A02	2° 01.54	13° 58.60	BOYEV TONDI ENCLOS	B08	2° 14.49	13° 53.90
BANGOU BOBO	I02	2° 20.98	13° 43.13	BOYEV TONDI POMPE	B07	2° 14.54	13° 53.94
BANGOUKIREY 313091	R23	2° 58.93	13° 30.60	DANGARMEY 3121 58	X12	2° 46.25	13° 14.91
BANGOULA MOSQUÉE	M02	1° 59.75	13° 36.37	DANGUEY GOROU	G01	2° 00.53	13° 47.66
BANI KOSSEY	K03	2° 41.83	13° 41.23	DANTIANDOU CARREF	U18	2° 45.39	13° 24.59
BANI KOSSEY	K10	2° 41.80	13° 42.19	DANTIANDOU ÉCOLE	U17	2° 45.38	13° 24.68
BANIKANE DOMEST	P11	2° 37.49	13° 35.17	DANTIANDOU SUD	U16	2° 45.36	13° 24.47
BANIKANE PASTOR	P09	2° 37.51	13° 35.17	DANTIANDOU TEGUI	P10	2° 36.04	13° 36.70
BANIZOUMBOU	F02	2° 50.95	13° 58.13	DAR ES SALAM PASTO	D08	2° 38.33	13° 50.66
BANIZOUMBOU DRE F	P17	2° 39.64	13° 31.96	DAR ES SALAM	X11	2° 42.63	13° 12.01
BANIZOUMBOU ÉCOLE	P15	2° 39.53	13° 31.60	DAREY	U20	2° 40.57	13° 24.21
BANIZOUMBOU MOSQ	P16	2° 39.58	13° 31.72	DAREY BANGOU	S01	2° 15.68	13° 25.14
BANIZOUMBOU PZ OR	P25	2° 39.68	13° 31.98	DAREY BERI	F05	2° 53.72	13° 55.58
BANKA DEY	P12	2° 36.07	13° 31.90	DEY TEGUI	H10	2° 18.68	13° 41.17
BARI TOURI	T10	2° 35.02	13° 23.76	DEY TEGUI DOMES	U09	2° 47.35	13° 26.90
BARKIAWAL ROUTE	N04	2° 18.69	13° 32.67	DEY TEGUI KORY	D03	2° 34.46	13° 55.96
BARKIAWAL VILLAGE	N03	2° 18.67	13° 32.73	DEY TEGUI PASTO	D02	2° 34.48	13° 56.08
BARKIAWEL	H16	2° 10.88	13° 41.53	DEY TEGUI PASTO	U08	2° 47.20	13° 27.07
BARKIRE ALIDOU	M01	2° 05.76	13° 37.31	DIAWANDO	Z06	2° 43.60	13° 07.60
BIDON RAS DU SOL	R24	2° 59.03	13° 30.55	DIBAMOKO BANIZOUM	F01	2° 50.09	13° 58.36
BIRNI FANTORA P	I09	2° 28.34	13° 42.65	DIKORE	W07	2° 27.92	13° 15.17
BIRNI KOBERI	I10	2° 29.06	13° 40.76	DINKI	G11	2° 01.00	13° 41.48
BIRNI SOFO	I04	2° 27.31	13° 41.48	DIOLE	A10	2° 04.12	13° 52.51
BIRNI KOLONDIS 2BEL	I06	2° 27.73	13° 41.81	DIOLE GOUBE KOUARA	A11	2° 04.51	13° 51.82
BIRNI KOLONDIS CHLO	I05	2° 27.65	13° 41.66	DIRI BANGOU	T09	2° 32.08	13° 24.24
BIRNI KOLONDIS PROJ	I08	2° 27.89	13° 41.91	DJOURS	K02	2° 44.12	13° 47.23
BIRNI KOLONDIS TR.C	I07	2° 27.80	13° 41.72	DOLEWA	R09	2° 55.10	13° 33.05
BOGOL	S05	2° 23.92	13° 21.26	DOLEWA	R10	2° 55.32	13° 33.34
BOKOSSAY	U14	2° 47.48	13° 25.51	DOLOHI	T06	2° 36.86	13° 26.89
BOKOSSAY DOMEST	U12	2° 47.32	13° 25.61	DOUALAGA	Z16	2° 50.86	13° 00.55
BOKOSSAY PASTORAL	U13	2° 47.42	13° 25.74	DOUDOL	Z11	2° 47.32	13° 02.91

150 Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans Hapex-Sahel : dispositif de mesures au sol et premiers résultats

VILLAGE	NUM	LONG.	LATIT.	VILLAGE	NUM	LONG.	LATIT.
FADA KOUROU BANGO	H12	2° 11.20	13° 46.18	HAYNI SIMOROU TRC1	K09	2° 41.66	13° 49.07
FALANGA	U15	2° 48.16	13° 25.56	HAYNI SIMOROU TRC2	K08	2° 42.41	13° 49.29
FALINKE BERI	O15	2° 27.56	13° 32.69	HAYNI SIMOROU VILL	E01	2° 48.35	13° 58.90
FALINKE KAINA	O14	2° 26.69	13° 32.54	IBAMA IRH 71003	L04	2° 52.74	13° 43.62
FANDOU	R06	2° 52.59	13° 37.26	IBAMADE	L02	2° 52.47	13° 44.77
FANDOU BERI	P19	2° 33.50	13° 32.06	IBAMADE	L07	2° 52.68	13° 42.65
FETOBOKKI PEUL	O16	2° 21.05	13° 31.12	IBAMADE ROUTE	L08	2° 52.08	13° 44.50
FETOBOKKI ZARMA	O17	2° 21.41	13° 30.68	IDRISSA MAMANE	R03	2° 53.32	13° 37.19
FETOKADIE	T05	2° 37.64	13° 27.73	INCONNU DANT-BOKO	U11	2° 46.31	13° 25.30
GABO BABA KOUARA	D09	2° 32.95	13° 50.02	KAFINA	K05	2° 43.98	13° 42.85
GADABO	H07	2° 17.90	13° 46.34	KAFINA PASTORAL	K07	2° 43.70	13° 43.26
GADABO FETOKADIE	H08	2° 19.58	13° 46.34	KAFINA TRC	K06	2° 43.67	13° 42.76
GAGARE	O18	2° 26.35	13° 30.58	KAHLEN GOROU	A24	2° 08.78	13° 50.98
GAM DEY	X03	2° 44.25	13° 17.20	KALASSI	P20	2° 34.82	13° 31.89
GANGAWA	W12	2° 22.05	13° 18.73	KAMPA ZARMA	T08	2° 38.80	13° 26.74
GAOBERI (GAOBANGO)	U06	2° 42.02	13° 27.33	KANARE ÉCOLE	X06	2° 45.88	13° 14.62
GARBAY TOMBO PAST	J09	2° 37.70	13° 41.16	KANARE PASTORAL	X05	2° 45.71	13° 14.84
GARBAY TOMBO PTC	J06	2° 37.92	13° 41.21	KANO KOUARA CLOS	A17	2° 00.52	13° 56.17
GARDAMA KOUARA 1	B11	2° 15.80	13° 50.08	KANO KOUARA OFEDE	A16	2° 00.56	13° 56.35
GARDAMA KOUARA 2	B12	2° 15.65	13° 50.13	KARABANGA	Q02	2° 44.66	13° 37.79
GARDI BERI	V02	2° 56.68	13° 28.84	KAREY BANGOU FED	B05	2° 10.64	13° 53.17
GARDI BERI 313081	V12	2° 56.85	13° 29.54	KAREY BANGOU LORI	B04	2° 10.88	13° 52.30
GARDI BERI 313092	V01	2° 56.72	13° 29.70	KAREY BANGOU TREUI	B18	2° 10.69	13° 52.31
GASSAN KOURNIE	T01	2° 32.53	13° 29.91	KARGUI BANGOU	Y08	2° 39.65	13° 00.13
GATA KOUARA (K TEC)	A14	2° 01.03	13° 56.64	KATANGA PASTORAL	Q06	2° 48.73	13° 32.30
GOBIRKOY BERI	W08	2° 30.73	13° 10.73	KEYAN ZARMA	O09	2° 25.13	13° 35.58
GOGUE KOUARA	B14	2° 12.37	13° 54.63	KIDA TAFI KOUARA	P05	2° 36.29	13° 37.77
GOGUIEZE KOUARA D	P02	2° 31.57	13° 37.03	KIDABAZAGAIZE GOUD	P04	2° 34.77	13° 37.34
GOGUIEZE KOUARA PA	P01	2° 31.64	13° 36.95	KIDABAZAGAIZE LATE	P24	2° 34.81	13° 37.25
GOMBOWA	Y02	2° 28.77	13° 07.80	KIOULANDE	V09	2° 56.60	13° 26.12
GONNOUBI	Z18	2° 47.04	13° 07.73	KIRAN FANDOU BERI	I03	2° 29.67	13° 45.50
GOROU GOUSSA	A13	2° 02.23	13° 50.18	KIRAN MILI	J07	2° 30.04	13° 48.69
GOUBE KORY	A21	2° 04.66	13° 51.20	KIRIB	E07	2° 44.65	13° 53.31
GOUBE MENASARA	A12	2° 05.15	13° 51.52	KIRIB BERI	E04	2° 40.87	13° 53.10
GOUBEY KIRE FED	A05	2° 06.55	13° 53.75	KIRIB KAINA	E05	2° 42.92	13° 53.29
GOUBEY KIRE VIL	A04	2° 05.76	13° 54.07	KOBE	R20	3° 00.65	13° 32.16
GOUBI BANDA	F03	2° 51.68	13° 58.07	KOBERI KOUARA PAST	O11	2° 28.13	13° 35.09
GOUNOU BANGOU	G03	2° 08.57	13° 48.93	KOBERI KOUARA VILL	O10	2° 28.05	13° 34.83
GUESSEL BODI	S02	2° 21.39	13° 24.77	KOBODEY	Y01	2° 31.42	13° 09.68
GUIAOU DARE TRAD	Z07	2° 43.09	13° 04.61	KODJIRI BANI KOUAR	P18	2° 30.65	13° 33.72
GUIDE	Y05	2° 37.29	13° 03.68	KODO	X07	2° 41.48	13° 13.78
GUILARE	Z20	2° 50.38	13° 07.55	KOFO	Z01	2° 44.14	13° 09.30
GUILLENY	U10	2° 42.45	13° 26.56	KOGORI 70992	L06	2° 52.94	13° 42.13
HABAKA PLATEAU	K11	2° 40.57	13° 42.80	KOGORI TONDI KIRE	L05	2° 53.56	13° 41.53
HAMDALLAY MOSQUÉE	O01	2° 24.47	13° 33.47	KOGOROU	N11	2° 14.96	13° 32.30
HAMDALLAY PROJET	O12	2° 24.25	13° 32.20	KOKIRE	H09	2° 12.50	13° 42.19
HAMDALLAYE NORD	O02	2° 24.57	13° 33.69	KOKORBARA	B15	2° 14.51	13° 53.42
HAMDALLAYE SUD	O03	2° 24.54	13° 33.28	KOKORBE	U22	2° 44.09	13° 21.71
HARIKANASSOU PAST	X10	2° 49.86	13° 15.99	KOKORBE BANGOU	C02	2° 28.99	13° 59.08
HAYNI FADA TRAD	K13	2° 43.84	13° 44.97	KOKORBE FANDOU	D07	2° 36.25	13° 51.70
HAYNI SIMOROU GOUB	E02	2° 48.58	13° 59.30	KOKOUAREY PEUL	S04	2° 26.07	13° 23.86

VILLAGE	NUM	LONG.	LATIT.	VILLAGE	NUM	LONG.	LATIT.
KOKOUAREY ZARMA	S03	2° 26.92	13° 24.95	NAZEY	D06	2° 30.68	13° 52.41
KOLA BOSSEY 313076	R21	2° 56.68	13° 31.31	NIABERI KOUARA	A01	2° 00.72	13° 59.48
KOLLO ZARMA	W14	2° 19.98	13° 18.41	NINE FOUNO BELLA	K04	2° 43.88	13° 41.30
KOLO BOSSEY	J04	2° 35.42	13° 44.14	NINE FOUNO TRC	K12	2° 43.89	13° 40.54
KOLO DIOGONO	J05	2° 36.10	13° 43.22	OUADOUKA	A23	2° 09.00	13° 52.49
KOLO GAWANI TRAD 1	J11	2° 34.19	13° 48.92	OUAGINI BANGOU	A06	2° 07.10	13° 52.94
KOLO GAWANI TRAD 2	J10	2° 34.23	13° 49.03	OUIINDITAN	L03	2° 53.39	13° 45.47
KOMAKOUKOU	T02	2° 37.89	13° 29.81	OURA TONDI	I01	2° 27.29	13° 47.89
KONE BERI	G10	2° 05.92	13° 44.87	OURA TONDI CHLOE	B10	2° 19.79	13° 54.92
KONE KAINA ÉCOLE	G13	2° 05.93	13° 41.90	POSTE POLICE NIAMEY	N01	2° 10.63	13° 31.69
KONE KAINA EST ROU	G15	2° 06.84	13° 42.31	POULLO BOSSADJI	Z09	2° 46.59	13° 04.97
KONE KAINA KORY	G14	2° 05.83	13° 41.94	SABON GARI OFEDES	A15	2° 00.44	13° 55.51
KONGOU FANDIZEY	N05	2° 12.69	13° 36.09	SABON GARI TR CIM	A18	2° 00.38	13° 55.54
KORAN KASSA ZARMA	Z17	2° 51.11	13° 02.14	SABOU DEY	P13	2° 34.91	13° 34.79
KORTO DOMESTIQUE	U01	2° 41.42	13° 29.75	SAFAPATIA ZARMA EC	V11	2° 56.67	13° 25.12
KORTO KORY	U02	2° 41.64	13° 29.66	SAGA GOROU	N02	2° 12.58	13° 32.23
KOUARA ZENO	B19	2° 19.45	13° 50.59	SAKARA TRAD	J08	2° 35.64	13° 48.64
KOUARE KAINA MENTO	G12	2° 05.29	13° 41.87	SAKEY KOUARA ZENO	W06	2° 28.60	13° 16.67
KOUNTCHE BERI TREU	P03	2° 33.19	13° 37.31	SAMARI ÉCOLE	B02	2° 16.13	13° 56.61
KOURE GROS DIAMET	W03	2° 34.52	13° 18.87	SAMARI KORY	B03	2° 15.95	13° 56.74
KOURE CHAMP HTE TE	W11	2° 34.50	13° 18.48	SAMARI MOSQUÉE	B01	2° 16.16	13° 56.68
KOURE VILL 4 ABREU	W10	2° 34.59	13° 18.73	SANDIRE EST	R02	2° 53.90	13° 39.01
KOYGOLO ÉCOLE	V03	3° 00.38	13° 28.73	SANDIRE ROUTE	R01	2° 53.72	13° 39.07
LABOU TITILOUA	H14	2° 15.60	13° 47.09	SEBERI	W15	2° 20.52	13° 17.85
LAWEY	H15	2° 11.69	13° 42.72	SETI	Z21	2° 58.62	13° 07.61
LIBO ATOU BABA 2	B17	2° 15.02	13° 53.69	SISAN TONDI ENCLOS	A08	2° 09.66	13° 54.77
LIBO ATOU KOUARA 1	B09	2° 14.96	13° 53.59	SISAN TONDI KOUARA	A09	2° 09.97	13° 55.32
LOGA	J03	2° 34.78	13° 46.57	SOURGO KOUARA	F06	3° 00.33	13° 52.96
LOGA KOLO TASSI	J02	2° 34.56	13° 46.31	SOURGOUROU ÉCOLE	U21	2° 40.83	13° 22.56
LOUGGA CIM SANS EA	O08	2° 20.68	13° 34.99	TANA BERI KOUARA	Y06	2° 32.10	13° 02.96
LOUGGA OFEDES	O07	2° 20.62	13° 35.03	TANA BERI PASTORAL	Y07	2° 32.61	13° 02.81
MANGA KOUARA	Y10	2° 23.70	13° 03.85	TANDO	Z12	2° 42.64	12° 59.38
MAOUREY	F04	2° 53.62	13° 56.99	TCHANGAREY CENT	G06	2° 07.62	13° 45.29
MAOUREY KOUARA ZE	P08	2° 39.04	13° 35.44	TCHANGAREY NORD	G05	2° 07.87	13° 45.41
MAOUREY TOKOBINKA	Q01	2° 40.79	13° 37.43	TCHANGAREY SUD	G07	2° 07.51	13° 44.81
MAOURIZE BANGOU	C03	2° 22.00	13° 51.72	TEBONSE	M03	2° 09.81	13° 39.74
MAOURIZE BANGOU	I11	2° 22.00	13° 48.76	TEKO BABA KOUARA	D01	2° 31.74	13° 57.20
MAOURIZE BANGOU	C04	2° 21.71	13° 51.74	TERA BOYEY TONDI	A19	1° 58.84	13° 52.17
MARAFKA KOUARA	DO5	2° 32.74	13° 53.92	TIGO TEGUI	Q08	2° 46.41	13° 30.62
MARGOU MARCHE	Z19	2° 51.08	13° 06.20	TIGO ZENO	U05	2° 46.34	13° 28.04
MARI DOUMBO	E03	2° 48.56	13° 55.49	TILOA KAINA	C01	2° 26.95	13° 57.80
MAROUBERI TEGUI AD	Z04	2° 41.91	13° 07.37	TIOU DAWA	S06	2° 29.93	13° 21.23
MAROUBERI TEGUI OF	Z03	2° 41.89	13° 07.14	TIOUBI PASTORAL	W05	2° 37.82	13° 18.01
MAROUBERI TEGUI PA	Z05	2° 42.53	13° 07.55	TIOUBI ROUTE	W04	2° 37.70	13° 17.96
MAROUBERI ZENO	Z02	2° 42.75	13° 08.73	TOKOBINKANI DEUX	O06	2° 20.40	13° 37.20
MAYAKI KOUARA	H03	2° 12.74	13° 43.91	TOKOBINKANI PEUL	O05	2° 20.48	13° 37.09
MINGUI	Z10	2° 40.62	13° 02.89	TOKOBINKANI ZARMA	H04	2° 12.94	13° 44.85
MORA KOUARA	B16	2° 13.11	13° 54.63	TOLLO	X01	2° 43.36	13° 19.91
MOUSSA DIOLO ROUT	G04	2° 05.98	13° 47.32	TOMBO BELLA	Z14	2° 48.87	13° 06.78
NAMARI	R08	2° 54.29	13° 33.49	TOMBO DJIBO	X08	2° 43.58	13° 13.02
NAMARI	R07	2° 54.29	13° 33.37	TOMBO ZARMA	U24	2° 46.98	13° 20.89

152 Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans Hapex-Sahel : dispositif de mesures au sol et premiers résultats

VILLAGE	NUM	LONG.	LATIT.	VILLAGE	NUM	LONG.	LATIT.
TONDI BANDA	D04	2° 32.22	13° 54.85	YAGARMEYE	R22	2° 59.96	13° 31.79
TONDI BANDA	B13	2° 18.81	13° 51.75	YEDA	X09	2° 45.86	13° 11.75
TONDI FOU KOUARA T	Y04	2° 28.46	13° 04.30	YEDA BOSSO	R11	2° 55.96	13° 32.35
TONDI FOU PASTORAL	Y03	2° 28.35	13° 04.51	YEDA CECI 1	R12	2° 56.06	13° 32.27
TONDI GAMEY	H06	2° 16.19	13° 46.07	YEDA CECI 2	R13	2° 56.09	13° 32.28
TONDI KANGUIE ZOUR	E06	2° 48.31	13° 53.34	YEDA CECI 3	R14	2° 56.13	13° 32.27
TONDI KIBORO	Q07	2° 41.20	13° 31.23	YEDA IRH 313074	R18	2° 56.16	13° 32.47
TONDI KIRE	R04	2° 53.95	13° 37.02	YEDA JARD ÉCOLE 1	R15	2° 56.02	13° 32.29
TONDI KOUKOU	G16	2° 04.92	13° 49.69	YEDA JARD ÉCOLE 2	R16	2° 56.02	13° 32.27
TONDI MEKIREY	A03	2° 01.65	13° 57.94	YEDA MARCHÉ	R17	2° 56.04	13° 32.40
TONGOM	C05	2° 23.20	13° 54.92	YELOUMA	T07	2° 30.59	13° 26.87
TONGOM ENCLOS	C06	2° 23.20	13° 54.95	YERIMA DEY	U04	2° 41.35	13° 28.79
TOUDOU	W09	2° 39.16	13° 10.44	KOUDIZADE	H11	2° 12.28	13° 45.33
TOULIEL	U19	2° 44.49	13° 23.05	YETE KOUARA	H05	2° 14.61	13° 46.16
TOULOUA KOUAREY	U07	2° 44.48	13° 26.80	YLADDE	Z13	2° 47.49	13° 01.07
WANKAMA NORD	P06	2° 39.13	13° 39.41	YOULOUA	P26	2° 37.5	13° 32.2
WANKAMA PIEZO 1	P21	2° 38.88	13° 38.99	ZARMAKOY KOUARA	G02	2° 02.44	13° 49.49
WANKAMA PIEZO 2	P22	2° 38.85	13° 38.97	ZEIBANE FITI KORY	G09	2° 00.94	13° 45.52
WANKAMA PIEZO 3	P23	2° 38.80	13° 38.97	ZEIBANE FITI TR CI	G08	2° 00.80	13° 45.57
WANKAMA SUD	P07	2° 38.99	13° 39.23	ZIMBA	B06	2° 11.84	13° 52.08
WARI	N09	2° 14.40	13° 36.57	ZINDAROU	V08	2° 55.25	13° 26.02
WARI PASTORAL	N07	2° 14.64	13° 37.35	ZORI BANGOU	H13	2° 10.76	13° 45.15
WARI ÉCOLE KONGOU	N06	2° 14.38	13° 36.92	ZOURAGANE	J01	2° 32.28	13° 46.22
WARI KOUARA BERI	N08	2° 14.64	13° 36.93	ZOUZOU SANEY PEUL	V10	2° 53.56	13° 24.69
WARI LABA	N10	2° 14.25	13° 36.25	ZOUZOU SANEY ZARM	V05	2° 52.45	13° 25.76
WINDE BERI DOME	W01	2° 25.84	13° 19.95	ZOUZOU SANEY ZARM	V04	2° 52.32	13° 25.72
WINDE BERI PASTORA	W02	2° 26.36	13° 19.86	ZOUZOU SANEY ZARM	V06	2° 52.51	13° 25.64
WINDE BERI TRAD	R19	2° 56.78	13° 32.44	ZOUZOU SANEY BANIZ	V07	2° 52.55	13° 25.72

ANNEXE 3

**LISTE DES MESURES EFFECTUÉES DE 1991 À 1993
CLASSÉES SUIVANT LE NUMÉRO DU PUIT**

Les numéros des puits sont ceux figurant sur les cartes des figures 8 à 12 et référencés dans les annexes 1 et 2.

Les différentes campagnes de mesure sont les suivantes :

- 0891 :	du 16-7 au	13-08-91	Piézométrie		
- 1291 :	02-12	24-12-91	Piézométrie		
- 0292 :	10-02	26-02-92	Piézométrie		
- 0492 :	06-04	22-04-92	Piézométrie	Conductivité	pH
- PR92 :	10-06	25-07-92	Piézométrie	Conductivité	
- 0892 :	28-07	19-08-92	Piézométrie	Conductivité	
- 0992 :	20-08	25-09-92	Piézométrie	Conductivité	
- 1092 :	01-10	29-10-92	Piézométrie	Conductivité	
- 1192 :	29-10	12-11-92	Piézométrie	Conductivité	
- 1292 :	04-12	22-12-92	Piézométrie	Conductivité	
- 0193 :	06-01	27-01-93	Piézométrie	Conductivité	
- 0293 :	23-01	02-03-93	Piézométrie	Conductivité	
- PR93 :	02-03	14-04-93	Piézométrie	Conductivité	
- 0693 :	12-05	08-07-93	Piézométrie	Conductivité	
- 0793 :	14-07	09-08-93	Piézométrie	Conductivité	
- 0893 :	09-08	31-08-93	Piézométrie	Conductivité	
- 0993 :	01-09	24-09-93	Piézométrie	Conductivité	pH
- 1093 :	07-10	12-10-93	Piézométrie	Conductivité	
- 1193 :	04-11	26-11-93	Piézométrie	Conductivité	pH
- 1293 :	07-12	18-12-93	Piézométrie	Conductivité	pH

Dans les tableaux des pages suivantes, les mesures réalisées à la date et au puits donnés sont indiquées par :

- P pour une mesure piézométrique;
- C pour une mesure de conductivité;
- H pour une mesure de pH.

154 Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans Hapex-Sahel : dispositif de mesures au sol et premiers résultats

NUM	VILLAGE	PROFOND.		1991		1992						1993										
		MIN.	MAX.	8	12	2	4	PR	8	9	10	11	12	1	2	PR	6	7	8	9	10	11
A01	NIABERI KOUAR	17.15	18.51	P	P	PCH		PC		PC	PC		PC	PC		PC	PC		PC		PCH	PCH
A02	BANEY KAINA	15.75	16.41		P	P		P		PC	PC		PC	PC		PC	PC		PC		PCH	PCH
A03	TONDI MEKIREY	20.18	21.26	P	P	PCH		P		PC	PC		PC	PC		PC	PC		PC			PCH
A04	GOUBEY KIRE V	35.35	36.42	P	P	PCH		P		PC	PC		PC	PC		PC	PC		PC		PC	PCH
A05	GOUBEY KIRE F	32.85	34.87	P	P	PCH		P		P	PC		PC	PC		PC	PC		PC		PC	PCH
A06	OUAGINI BANG	28.02	29.39		P	PCH		P		PC	PC		P	PC		PC	PC		PC		PC	PCH
A07	BOUBOUREY F	16.55	31.60	P	P	PCH		P	P	P	PC			PC		PC	PC		PC			PCH
A08	SISAN TONDI E	40.29	43.31	P	P	PCH		P		P				PC		PC	PC		PC		PC	PCH
A09	SISAN TONDI K	53.30	54.60	P	P	PCH		P		P				PC		PC	PC		PC		PC	PCH
A10	DIOLE	33.31	34.00	P	P	P		P		P	PC											
A11	DIOLE GOUBE K	27.70	28.43							P	PC			PC		PC			PC		PCH	PCH
A12	GOUBE MENAS	21.77	23.40		P	PCH		PC		PC	PC			PC		PC	PC		PC	P	PC	PCH
A13	GOROU GOUSS	46.13	50.80		P	PCH		PC	PC		PC	PC			PC	PC			PC			PCH
A14	GATA KOUARA	8.17	10.26								PC			PC		PC	PC				PCH	PCH
A15	SABON GARI OF	35.72	37.92								PC			PC		PC	PC					PCH
A16	KANO KOUARA	26.59	29.84								PC			PC		PC	PC					PCH
A17	KANO KOUARA	5.75	12.07								PC			PC		PC	PC					PCH
A18	SABON GARI TR	33.50	34.64								PC			PC		PC	PC					PCH
A19	TERA BOYEY T	37.94	39.28								PC			PC		PC	PC					PCH
A20	BOYEY TONDI	21.35	22.52								PC			PC		PC	PC					PCH
A21	GOUBE KORY	13.87	16.62								PC			PC		PC						PCH
A22	BOLEY	35.95	35.95								PC											
A23	OUADOUKA	40.26	40.26								PC											
A24	KAHLEN GORO	40.97	42.25								PC											
B01	SAMARI MOSQ	17.81	20.60	P	P		PC	P	PC		PC			PC		PC	PC		PC			PCH
B02	SAMARI ÉCOLE	17.19	18.84						P		PC					PC	PC		PC			PCH
B03	SAMARI KORY	16.08	19.47	P	P		P							PC		PC						PCH
B04	KAREY BANGO	38.30	39.46	P	P		PC	P	P	PC		PC	PC		PC	PC		PC		PC		PCH
B05	KAREY BANGO	37.86	42.00	P	P		PCH	P	P	P	PC			PC		PC	PC		PC		PC	PCH
B06	ZIMBA	36.32	37.10		P		PC	P	P	P	PC	PC		PC	P	PC	PC		PC		PC	PCH
B07	BOYEY TONDI P	13.82	14.33	P					P	P	PC	PC		PC		PC	PC		PC			PCH
B08	BOYEY TONDI E	14.42	15.36		P		PC	P	P		PC	PC		PC		PC	PC		PC			PCH
B09	LIBO ATOU KOU	21.08	21.52		P		P		P		P	PC				PC						PCH
B10	OURA TONDI C	45.65	47.32	P	P	P	PC	P	P		P			PC		P			PC		PCH	PCH
B11	GARDAMA KOU	16.49	24.03						P		PC			PC		P	PC		PC			PCH
B12	GARDAMA KOU	21.47	22.68						P		PC			PC		P	PC		PC			PCH
B13	TONDI BANDA	34.97	35.22								P					PC						
B14	GOGUE KOUAR	53.23	53.23									PC										
B15	KOKORBARA	17.99	17.99								PC											
B16	MORA KOUARA	51.95	52.17											PC		PC						PCH
B17	LIBO ATOU BAB	20.37	20.50									PC				PC						
B18	KAREY BANGO	37.78	43.06									PC				P	PC		P		PC	PCH
B19	KOUARA ZENO	24.15	24.38											PC		PC	PC					
C01	TILOA KAINA	50.81	54.75	P	P		PC		P		PC			PC		PC	PC		PC			PCH
C02	KOKORBE BAN	45.77	46.64	P	P		PC		PC		P			PC		PC	PC		PC			PCH
C03	MAOURIZE BAN	49.36	49.49						P		P					PC	PC		PC			PCH
C04	MAOURIZE BAN	49.31	49.43						P							PC	PC		PC			PCH
C05	TONGOM	63.11	63.46	P	P		P		P		P			PC		PC	PC		PC			PCH
C06	TONGOM ENCL	63.25	63.67	P	P		P		P		P			PC		P	PC		PC			PCH
D01	TEKO BABA KO	52.26	52.60	P	P		PC		P		PC				PC	PC	PC		PC			PCH
D02	DEY TEGUI PAS	29.72	30.67	P	P		PC	P	P		PC				PC	PC	PC		PC			PCH
D03	DEY TEGUI KOR	28.16	29.35	P	P		PC	PC	P		PC				PC	PC	PC		PC			PCH
D04	TONDI BANDA	52.65	53.40	P	P		PC		P		P					PC	PC					PCH
D05	MARAFI KOUA	40.19	41.75	P	P		PC		PC						PC	PC						PCH
D06	NAZEY	50.28	52.73	P	P		PC		P		PC				PC	PC	PC		PC			PCH
D07	KOKORBE FAN	26.71	28.34	P	P		P	P	P		P				PC	PC	PC		PC		PC	PCH
D08	DAR ES SALAM	46.47	47.06		P		PC		PC		PC				PC	PC			PC		PC	PCH
D09	GABO BABA KO	51.29	52.47		P		PCH		P		PC				PC	PC	PC		PC			PCH
E01	HAYNI SIMORO	37.96	39.35	P	P		PC	P	PC		PC				PC	PC	PC		PC			PCH
E02	HAYNI SIMORO	33.95	35.69	P	P		PC	PC	P		P				PC	PC			PC			PCH
E03	MARI DOUMBO	45.97	49.48		P		PC	PC	PC		PC				PC	PC			PC			PCH
E04	KIRIB BERI	49.88	50.73	P	P		P	P	P		P				PC	PC	PC		PC		PC	PCH
E05	KIRIB KAINA	53.50	55.64	P	P		PC	P	P		PC				PC	PC			PC		PC	PCH
E06	TONDI KANGUIE	68.11	68.65	P	P		P	P	P		P				PC	P			P			P

NUM	VILLAGE	PROFOND.		1991		1992						1993											
		MIN.	MAX.	8	12	2	4	PR	8	9	10	11	12	1	2	PR	6	7	8	9	10	11	12
E07	KIRIB	40.78	42.49					PC								PC	PC			PCH	PC	PCH	
F01	DIBAMOKO BAN	30.38	31.51				P	PC		PC						PC	PC			PCH		PCH	
F02	BANIZOUMBOU	21.07	21.77	P	P			PC	PC		PC					PC	PC			PCH		PCH	
F03	GOUBI BANDA	18.58	19.29	P	P			PC	P	PC		PC				PC	PC			PCH		PCH	
F04	MAOUREY	15.19	16.24	P	P			PC	P	PC		PC				PC	PC			PCH		PCH	
F05	DAREY BERI	15.28	15.75	P	P				P	P	PC		PC			PC	PC			PCH		PCH	
F06	SOURGO KOUA	30.39	30.39														PC						
G01	DANGUEY GOR	34.57	35.44		P			PCH	PC	PC		PC	PC			PC	PC			PC		PCH	
G02	ZARMAKOY KO	36.54	42.66		P			P	P	PC		PC	PC			PC	PC			PC		PCH	
G03	GOUNOU BANG	34.71	36.24	P	P			PCH	P		P					PC	PC			PC		PCH	
G04	MOUSSA DIOLO	12.23	15.12						P	P						PC	P	PC		PC	PC	PCH	PCH
G05	TCHANGAREY	44.88	46.45		P			PCH	P		P					PC	PC		PC		PC	PCH	
G06	TCHANGAREY	43.17	43.82		P				P		P					P							
G07	TCHANGAREY S	41.42	43.16	P	P			PCH	P		P					PC	PC		PC		PC	PCH	
G08	ZEIBANE FITI TR	45.35	46.40						PC	PC		P	PC			PC	PC			PC		PCH	
G09	ZEIBANE FITI K	39.45	42.57	P	P				P		PC		PC	PC		PC	PC			PC		PC	
G10	KONE BERI	7.92	10.23	P	P			PCH		P		P	PC			PC	P	PC		PC		PC	
G11	DINKI	54.30	55.50	P	P				P	P		PC	PC			PC	PC			PC		PCH	
G12	KOUARE KAINA	28.93	30.08		P			PCH	PC			PC				PC	PC			PC		PCH	
G13	KONE KAINA EC	13.46	14.91	P	P			PCH	PC			PC				P	PC	PC		PC		PCH	
G14	KONE KAINA KO	0.00	14.76		P				P								PC						
G15	KONE KAINA ES	33.14	33.46													P			PC		P	PC	PCH
G16	TONDI KOUKOU	22.58	22.75										PC				PC						
H01	BABAKAINA KO	46.10	46.57	P	P			P	PC	P		PC	PC										
H02	BABAKAINAKO	50.80	51.30		P	P			P		P					P							
H03	MAYAKI KOUAR	10.66	12.22							PC	PC		PC			P	P	P			PC	PCH	PCH
H04	TOKOBINKANI Z	5.39	7.19						P	P	P					P	P	P				PCH	PCH
H05	YETE KOUARA	12.86	13.17						P	P		P				P	P	P			P		P
H06	TONDI GAMEY	14.11	15.11	P	P			P	P		P	P				P	PC	PC			PC		PC
H07	GADABO	22.03	22.81	P	P				PC		PC	PC				PC					PC		PC
H08	GADABO FETO	27.40	28.21	P	P				PC		PC	PC				PC					PC		PC
H09	KOKIRE	24.00	25.05	P	P				PC		PC	PC				PC		PC			PC		PCH
H10	DEY TEGUI	23.76	29.31		P				P	PC			PC			PC	PC		PC			PC	PC
H11	KOUDIZADE	23.16	23.50							P												PCH	
H12	FADA KOUROU	44.92	44.92						P														
H13	ZORI BANGOU	55.30	55.71														PC				PC		
H14	LABOU TITILOU	15.88	16.44													P	P						
H15	LAWEY	8.53	9.85													PC	P	PC			PC		PCH
H16	BARKIAWEL	8.52	9.49													PC	P	PC			PC		PCH
I01	OURA TONDI	50.44	50.83	P	P			P	PC		P	PC		PC		PC	PC		P	PC		PC	PCH
I02	BANGOU BOBO	44.07	44.99		P			P	PC		P	PC		PC		PC	PC		P	PC		PC	PC
I03	KIRAN FANDOU	37.70	38.96		P				PC	PC	P	PC	PC		PC	P	PC	PC		P	P	PC	PCH
I04	BIRNI SOFO	54.58	56.95		P				P	PCH		P				PC	PC		P	PC		PC	PCH
I05	BIRNIKOLONDIS	45.22	46.30						P		P	P	P	P		P	PC				P		P
I06	BIRNIKOLONDIS	45.89	47.66		P				PCH		P		PC	PC		PC	P	PC		PC		PCH	PCH
I07	BIRNIKOLONDIS	43.69	45.25		P				P	PC	P	P	P	P		PC	P	PC		PC		PCH	PCH
I08	BIRNIKOLONDIS	40.44	43.02							P		P	PC	PC		PC	P	PC		PC		PCH	PCH
I09	BIRNI FANTORA	45.02	45.68		P				PCH		PC	PC	PC		PC	P	PC	PC		PC		PCH	PCH
I10	BIRNI KOBERI	52.32	53.73		P				PCH		P		PC	PC		PC		PC		PC		PCH	PCH
I11	MAOURIZE BAN	46.20	46.20							P													
J01	ZOURAGANE	28.30	29.66		P				PCH		P		PC				PC	PC			PC		PCH
J02	LOGA KOLO TA	28.56	30.12		P				P	PC		P	PC			PC	PC			PCH		PCH	
J03	LOGA	28.30	30.24							P	P		P	PC		PC	PC				PCH		PCH
J04	KOLO BOSSEY	28.99	29.50		P				P	PC	P		P	PC		PC	PC			PCH		PC	PCH
J05	KOLO DIOGONO	27.92	29.32		P				P	PC	P		PC	PC		PC	PC			PCH		PC	PCH
J06	GARBHEY TOMB	19.62	20.59		P				PC		PC		PC	PC		PC	PC			PCH		PCH	PCH
J07	KIRAN MILI	51.18	53.16										PC				PC	PC			PC		PCH
J08	SAKARA TRAD	28.50	28.50											PC									
J09	GARBHEY TOMB	23.82	24.18											PC			PC	PC			PCH		PCH
J10	KOLO GAWANI	0.00	0.00																				
J11	KOLO GAWANI	41.10	41.10										PC										
K01	BALEYARA TAB	66.08	67.28	P	P				P		P					PC	PC			PCH		PCH	PCH
K02	DJOURS	46.00	47.69	P	P				PCH				P			PC	PC			PCH		PCH	PCH
K03	BANI KOSSEY	25.23	26.48	P	P				PCH		P		P	PC		PC	PC			PC		PCH	PCH

156 Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans Hapex-Sahel : dispositif de mesures au sol et premiers résultats

NUM	VILLAGE	PROFOND.		1991								1992								1993							
		MIN.	MAX.	8	12	2	4	PR	8	9	10	11	12	1	2	PR	6	7	0	9	10	11	12				
K04	NINE FOUNO BE	33.42	34.51	P	P		PCH	P		PC	PC		PC	PC		PC	PC		PC		PCH	PCH					
K05	KAFINA	50.56	53.00	P	P		PCH	P		PC			PC	PC		PC			PC			PCH					
K06	KAFINA TRC	39.55	39.55								PC																
K07	KAFINA PASTO	44.10	44.10								PC																
K08	HAYNI SIMORO	53.68	53.68								PC																
K09	HAYNI SIMORO	49.15	49.15								PC																
K10	BANI KOSSEY	41.60	41.91								PC			PC		PC			PC			PCH					
K11	HABAKA PLATE	75.40	75.62								PC			PC		P			P			P					
K12	NINE FOUNO TR	46.85	46.85								PC			PC													
K13	HAYNI FADA TR	30.90	30.90								PC																
L01	AGHAROUS	35.22	36.06	P	P	P	PCH	P			PC	PC				PC	PC			PC		PCH	PCH				
L02	IBAMADE	4.43	5.35	P	P	P	P	P			P	PC				PC	PC					PCH	PCH				
L03	OUIINDITAN	5.21	5.45	P	P	P	P	P			P	PC				PC	PC			PC		PCH	PCH				
L04	IBAMA IRH 7100	6.46	6.89								P	PC				PC	PC			PC		PCH	PCH				
L05	KOGORI TONDI	5.25	5.76		P	P	PCH	P			P	PC				PC	PC			PC		PCH	PCH				
L06	KOGORI 70992	3.26	3.80	P	P		PCH	PC			P	PC				PC	PC			PC		PCH	PCH				
L07	IBAMADE	3.19	3.19									PC															
L08	IBAMADE ROUT	23.55	24.03													PC	PC			PC		PCH	PCH				
M01	BARKIRE ALIDO	7.24	8.19								P	PC				PC	PC		PC	PC		PCH	PCH				
M02	BANGOUULA MO	12.09	13.87								PC	PC				PC	PC			PCH		PC	PCH				
M03	TEBOINSE	8.96	10.05													PC	P	PC		PC		PC	PCH				
N01	POSTE POLICE	32.06	32.13								P	PC				PC	P	P	PC		PC	PC	PCH				
N02	SAGA GOROU	21.78	22.45								P	P	PC			PC	P	P	P	PC		PC	PC	PCH			
N03	BARKIAWAL VIL	13.64	21.13		P	P	PC	P			PC	PC	PC			PC	P	P	PC	PC	PC	PC	PCH	PCH			
N04	BARKIAWAL RO	15.37	19.40								P					PC	PC	P	P	PC	PC	PC	PC	PCH	PCH		
N05	KONGOU FANDI	1.41	5.10	P		P	PCH	PC	PC		P					PC	PC			PC		PC	PC	PC			
N06	WARI ECOLE K	21.70	22.71		P	P	PC	P	PC		PC					PC	PC			PC		PC	PC	PC			
N07	WARI PASTORA	24.77	25.79	P	P	P	PC	P	PC		PC					P	PC	PC		PC		PC	PC	PC			
N08	WARI KOUARA	22.72	22.72													PC											
N09	WARI	19.44	19.44													PC											
N10	WARI LABA	19.38	19.38													PC											
N11	KOGOROU	16.97	18.54																PC	P		PCH		PCH			
O01	HAMDALLAY M	23.79	24.48		P	P	PC	P	PC	PC	P		PC			PC	PC	P		PC	PC	PC	PC	PCH	PCH		
O02	HAMDALLAY N	24.05	24.14								P									PC					PCH		
O03	HAMDALLAY S	13.73	14.71								P							P									
O04	BOUNDIOUBARE	44.83	46.80		P	P	P		P			PC				PC			PC	PC		PCH		PCH			
O05	TOKOBINKANI P	36.31	39.02		P	P	P	PC			PC					PC			PC	PC	PC		PC		PCH		
O06	TOKOBINKANI D	34.05	34.05					P																			
O07	LOUGGA OFED	27.11	33.65		P	P	P	PC	PC			PC				PC			PC	PC	PC	PC	PC	PC	PCH		
O08	LOUGGA CIM S	29.07	33.00								P					PC											
O09	KEYAN ZARMA	30.94	32.16		P	P	PCH	P				PC				PC			PC	PC		PCH		PCH			
O10	KOBERI KOUAR	50.77	54.15		P	P	P	P				PC				PC	PC			PC	PC		PCH		PCH		
O11	KOBERI KOUAR	61.04	62.65		P	P	PCH	P	P	PC						PC	PC			PC	PC		PCH		PCH		
O12	HAMDALLEY PR	39.56	40.12		P	P	P	P				PC				PC			PC	P	PC	PC	PC	PC	PCH		
O13	ATOU BABA KO	12.17	14.47		P		PCH	PC			P					PC			PC	PC	PC	PC	PC	PC	PCH		
O14	FALINKE KAINA	30.57	30.87		P	P	P	P								PC			PC	PC	PC		PCH		PCH		
O15	FALINKE BERI	35.85	36.28		P	P	P	PC								PC			PC	PC	PC		PCH		PCH		
O16	FETOBOKKI PE	9.99	12.10		P		PCH	P			P	PC				PC			PC	PC	PC		PCH		PCH		
O17	FETOBOKKI ZA	21.14	22.46		P	P		P				PC				PC			PC	PC	PC		PCH		PCH		
O18	GAGARE	22.78	32.27		P	P		P	PC			PC				PC			PC	PC	PC	PC	PC	PC	PCH		
P01	GOGUIEZE KOU	46.25	48.10		P	P	PCH	PC		P	P					PC	PC			PC	PC		PC		PCH		
P02	GOGUIEZE KOU	45.80	48.00		P	P	PCH	PC				PC				PC	PC			PC	PC		PC		PCH		
P03	KOUNTCHE BE	67.74	67.75													PC											
P04	KIDABAZAGAIZE	46.96	47.51						P	PC	P	P	PC			PC	PC	P	P	PC	PC		PC		PCH		
P05	KIDA TATA KOU	52.57	53.52		P	P	PCH	P				PC	PC			PC	PC			PC					PCH		
P06	WANKAMA NOR	19.41	22.12		P	P	P	PC	PC	PC	PC	PC	PC			PC	PC	P	P	PC	PC	PC	PC	PC	PCH		
P07	WANKAMA SUD	14.49	18.36		P	P		P	P	P	PC	PC				PC	PC	P		PC	PC	PC	PC	PC	PCH		
P08	MAOUREY KOU	19.28	20.83	P			PC	P	P	P						P	PC	P		PC	PC	PC	PCH		PC		
P09	BANIKANE PAS	25.74	26.55		P	P		P			P					PC			PC	PC		PC			PCH		
P10	DANTIANDOU T	39.32	39.97		P	P		P				PC				PC			PC	PC		PC			PCH		
P11	BANIKANE DOM	27.46	28.38		P	P		P	PC	P						PC			PC	PC		PC			PCH		
P12	BANKA DEY	29.23	29.55		P	P	P	PC	PC	PC						PC	PC	P				PCH			PCH		
P13	SABOU DEY	51.20	51.82		P		PCH	P	PC		PC					PC			PC	PC		PC			PCH		
P14	BOUNDIOU	19.67	20.28		P		P		P			PC				PC			PC	PC		PC			PCH		

NUM	VILLAGE	PROFOND.		1991		1992						1993											
		MIN.	MAX.	8	12	2	4	PR	8	9	10	11	12	1	2	PR	6	7	8	9	10	11	12
P15	BANIZOUMBOU	23.29	23.83	P	P			PCH	PC	PC	P	PC	PC		PC	P	P	P	P	P	PCH	PCH	PCH
P16	BANIZOUMBOU	21.15	21.49		P			PCH	PC	PC	PC	PC	PC		P	PC	P	P	P	P	PCH	PCH	PCH
P17	BANIZOUMBOU	19.83	20.39					P	P	P	P	P	P			P	P	P	P	P	P	P	P
P18	KODJIRI BANI K	44.31	45.09		P			PC	P	P		PC			PC		PC				PC		PCH
P19	FANDOUBERI	29.21	29.68	P	P			PC	P	P	PC	P	PC	PC	PC	P	P	P	P	PC	PC	PC	PC
P20	KALASSI	26.63	27.13		P			PC	P	P	P	P	PC	PC	PC	P	PC	P			PCH		PCH
P21	WANKAMA PIEZ	14.86	20.16													P	P	P	P	P	P	P	P
P22	WANKAMA PIEZ	16.99	21.19													P	P	P	P	P	P	P	P
P23	WANKAMA PIEZ	19.92	22.71													P	P	P	P	P	P	P	P
P24	KIDABAZAGAIZE	48.70	49.50		P			PCH											P	PC	PC		PCH
P25	BANIZOUMBOU	18.30	18.72																P	P	P		P
P26	YOULOULA	25.74	25.74																	P			
Q01	MAOUREY TOK	26.90	27.73	P	P			P	PC	P	P		P		PC		PC						PCH
Q02	KARABANGA	49.58	53.99	P	P			PCH	P	PC		P			PC		PC				PC		PCH
Q03	BOULA DAREY	37.28	37.28										PC										
Q04	BOULA DAREY	67.27	67.99	P	P			PCH	P						PC		PC				PC		PCH
Q05	BOUNDOU WAR	39.40	40.29	P	P			PCH	PC	PC		PC			PC		PC				PC		PCH
Q06	KATANGA PAST	53.63	55.29	P	P			PCH	PC	PC		PC			PC		PC				PC		PCH
Q07	TONDI KIBORO	30.00	30.31	P	P			PCH	PC	P		PC	PC		PC		PC				PC		PCH
Q08	TIGO TEGUI	37.00	38.33		P			PCH	PC	PC		PC			PC		PC				PC		PCH
R01	SANDIRE ROUT	3.60	4.30		P			P	P	PC		P	PC		PC		PC		PC		PC		PCH
R02	SANDIRE EST	1.67	2.20					P	PCH	P		P	PC		PC		PC		PC		PC		PCH
R03	IDRISSA MAMA	7.56	7.83										PC		PC		PC		PC		PC		PC
R04	TONDI KIRE	3.68	4.23					P	P		P		P	PC	PC		PC		PC		PC		PC
R05	BOUNDOU SIMT	32.17	32.66	P	P			PCH	P				PC		PC		PC				PC		PCH
R06	FANDOU	26.99	27.08										PC		PC		PC				PC		PCH
R07	NAMARI	5.67	5.67										PC										
R08	NAMARI	7.07	7.71					P	PCH	P		P	PC		PC		PC				PC		PC
R09	DOLEWA	2.11	2.49										PC		PC		PC				PC		PC
R10	DOLEWA	3.08	3.60										PC		PC		PC				PC		PC
R11	YEDA BOSSO	2.69	3.27					P	P		PC		PC		PC		PC				PC		PC
R12	YEDA CECI 1	2.58	2.58										PC										
R13	YEDA CECI 2	2.37	2.37										PC										
R14	YEDA CECI 3	1.85	1.85										PC										
R15	YEDA JARD EC	2.46	2.46										PC										
R16	YEDA JARD EC	2.13	2.13										PC										
R17	YEDA MARCHE	4.23	4.23										PC										
R18	YEDA IRH 31 307	1.66	1.66										PC										
R19	WINDE BERI TR	1.80	1.80										PC										
R20	KOBE	5.40	5.40										PC										
R21	KOLA BOSSEY	3.63	4.22					P	P		P		P	PC		PC		PC			PCH		PC
R22	YAGARMEYE	5.68	5.68										PC										
R23	BANGOUKIREY	4.82	4.82										PC										
R24	BIDON RAS DU	0.00	0.00																				
R25	BOUNDOU SIMT	37.00	37.23												PC		PC				PC		PCH
S01	DAREY BANGO	14.76	22.27										PC		PC		PC				PC		PCH
S02	GUESSEL BODI	7.83	13.19	P	P			PC	P	P		PC		PC	PC		PC				PC		PCH
S03	KOKOUAREY ZA	41.70	42.42	P	P			PC	PC	PC		PC		PC	PC		PC				PC		PCH
S04	KOKOUAREY P	27.67	29.08	P	P			PC	P	PC		PC		PC	PC	P	PC				PC		PCH
S05	BOGOL	11.69	13.54	P	P			PC	PC	PC		PC		PC	PC		PC				PCH		PCH
S06	TIOU DAWA	27.02	28.57	P	P			PCH	PC	P		PC		PC	PC	P	PC				PC		PCH
T01	GASSAN KOUR	36.85	37.75	P	P			PC	P	P		PC		PC	PC		PC				PC		PCH
T02	KOMAKOUKOU	54.55	56.07	P	P			PC	P	P	P	PC	PC		PC	P	P	PC	PC		PCH		PCH
T03	BALAL SAGUI 1	69.18	70.19					P	P	P	P				PC		PC				PC		
T04	BALAL SAGUI 2	69.89	70.49									P											PCH
T05	FETOKADIE	42.29	43.30	P	P			PC	P	P	PC	P		PC	PC		PC				PC		PCH
T06	DOLOHI	51.60	52.14	P	P			PC	P	P	P	PC		PC	PC		PC				PC		PCH
T07	YELOUMA	45.37	46.33	P	P			P	P	PC		PC		PC	PC		PC				PC		PCH
T08	KAMPA ZARMA	65.32	65.77	P	P			PC	P		P				PC		PC				PC		PCH
T09	DIRI BANGOU	44.67	45.97	P	P			PC	P		PC				PC		PC				PC		PCH
T10	BARI TOURI	53.60	55.08	P	P			PC	P		P				PC		PC				PC		PCH
T11	ABOUSSAY	54.20	55.86	P	P			PC	P		P				PC		PC				PC		PCH
U01	KORTO DOMES	15.68	16.00	P	P			PCH	PC	PC		PC	PC		PC	P	PC				PC		PCH
U02	KORTO KORY	11.16	11.84		P			P		PC	P	PC			PC		PC				PC		PCH

158 Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans Hapex-Sahel : dispositif de mesures au sol et premiers résultats

NUM	VILLAGE	PROFOND.		1991		1992						1993											
		MIN.	MAX.	8	12	2	4	PR	8	9	10	11	12	1	2	PR	6	7	8	9	10	11	12
U03	BAGOJA	30.96	31.38					P	P	P		PC				PC	PC			PC			PCH
U04	YERIMADEY	10.38	10.75	P	P			PCH	P	P		P			PC	PC			PC				PCH
U05	TIGO ZENO	23.71	23.86	P	P			P	P	P		P			PC	PC			PC				PCH
U06	GAOBERI (GAO)	17.62	17.94									PC			PC	PC			PC				PCH
U07	TOULOJA KOU	40.86	41.22	P	P			PCH	PC			P			PC	PC			PC				PCH
U08	DEY TEGUI PAS	16.55	16.84	P	P			PCH	PC			P			PC	PC			PC				PC
U09	DEY TEGUI DO	22.23	22.63	P	P			PCH	PC			P			PC	PC			PC				PCH
U10	GUILLENYI	8.26	8.58	P	P			PCH	PC	PC		PC	PC		PC	PC			PC				PCH
U11	INCONNU DANT	24.36	24.36							P													
U12	BOKOSSAY DO	18.18	18.55	P				PCH	P	PC		P			PC	PC			PC				PCH
U13	BOKOSSAY PAS	18.00	18.52					P		P		P			PC	PC			PC				PCH
U14	BOKOSSAY	20.78	21.10							PC	P	P			PC	PC			PC				PCH
U15	FALANGA	26.18	26.91	P	P			PCH	P			P	PC		PC	PC			PC			PCH	PC
U16	DANTIANDOU S	5.42	6.90					PC	P			P			PC	P			P				P
U17	DANTIANDOU E	5.71	7.00	P				P	P	P		P			P	PC	P	PC		PC			PCH
U18	DANTIANDOU C	5.51	6.37	P	P			P	P			P			PC	PC			PC				PCH
U19	TOULIEL	20.94	21.38	P	P			PC	PC			PC			P	PC	P	PC		PC			PCH
U20	DAREY	53.52	53.91							PC		PC			PC	PC			PC				PCH
U21	SOURGOUROU	33.33	33.89	P	P			PC	PC	PC		PC			PC	PC			PC			PC	PCH
U22	KOKORBE	38.08	38.42	P	P			PC	PC			PC			PC	P	PC		PC			PCH	PCH
U23	BOULA KOUARA	24.99	24.99							P													
U24	TOMBO ZARMA	12.30	12.30																PC				
U25	BADOUEL	11.62	11.62																PC				
V01	GARDI BERI 313	5.50	5.84										PC		PC	PC					PCH	PC	PC
V02	GARDI BERI	5.40	6.00					P	PCH	P		PC											
V03	KOYGOLO ECO	13.67	14.09					P	P			P	PC		PC	PC					PCH		PC
V04	ZOUZOU SANE	28.22	30.12	P				P	P			P	PC		PC	PC					PCH		PC
V05	ZOUZOU SANE	15.72	16.11							PC		P	PC		PC	PC					PCH		PC
V06	ZOUZOU SANE	7.48	7.99									PC	PC		PC	PC					PCH		PC
V07	ZOUZOUSANEY	6.03	6.10									PC			PC	PC							
V08	ZINDAROU	4.14	4.69									PC			PC	PC					PCH		PC
V09	KIOULANDE	3.46	3.98	P				P		P		P			PC	PC					PCH		PC
V10	ZOUZOU SANE	4.30	4.82									PC			PC	PC					PCH		PC
V11	SAFAPATIA ZAR	3.92	4.43									P	PC		PC	PC					PCH		PC
V12	GARDI BERI 313	2.74	2.80																				PC
W01	WINDE BERI DO	19.55	20.27					PC	P	PC		P			PC	PC					PCH		PCH
W02	WINDE BERI PA	11.81	13.45	P	P			PC	PC	PC		P			PC	PC					PCH		PCH
W03	KOURE GROS D	31.16	32.01												PC	PC	PC				PC	PC	PCH
W04	TIIOUBI ROUTE	43.52	44.31	P	P			P		PC		PC			PC	P	PC				PC		PCH
W05	TIIOUBI PASTOR	44.99	47.03	P				P	P	P		P			PC	PC					PC		PCH
W06	SAKEY KOUARA	53.16	53.48	P	P			PC	P	P		P			P	PC	PC				PCH		PCH
W07	DIKORE	42.42	43.29	P	P			PC	PC	PC		P			PC	PC					PC		PCH
W08	GOBIRKOY BERI	50.55	51.16					PC	P	P		PC			PC	PC					PCH		PCH
W09	TOUDOU	35.51	36.63	P	P			PCH	P	PC		PC			PC	PC					PC		PCH
W10	KOURE VILL 4 A	33.64	33.97																		PC	PC	PCH
W11	KOURE CHAMP	39.55	40.09																		PC	PC	PCH
W12	GANGAWA	9.91	9.91																				
W13	ALLAHOKY	3.65	3.65																		PC		
W14	KOLLO ZARMA	5.50	5.50																		PC		
W15	SEBERI	9.45	9.45																		PC		
X01	TOLLO	60.50	61.70	P	P			PC	P	P		PC			PC	P	PC				PC	PC	PCH
X02	BOKTILI	41.97	42.58	P	P			PC	PC			PC			PC	P	PC				PC	PC	PCH
X03	GAM DEY	38.47	39.55	P	P			PC	PC			PC			PC	PC					PC	PC	PCH
X04	AHAMANDEY B	51.95	52.51	P	P			PC	PC			P			PC	PC					PCH		PCH
X05	KANARE PASTO	28.05	28.71	P	P			PC	PC	PC		P			PC	PC					PC		PCH
X06	KANARE ECOLE	29.24	29.74	P	P			PC	PC			P			PC	PC					PC		PCH
X07	KODO	63.31	64.68	P	P			PCH	PC	PC		PC			PC	PC	P	PC			PC	PC	PCH
X08	TOMBO DIJIBO	58.85	59.41							P		PC			PC	PC					PCH		PCH
X09	YEDA	55.81	56.90	P	P			PC	PC			P			PC	PC					PC		PCH
X10	HARIKANASSOU	8.88	9.28																		PC		PC
X11	DARESSALAM	59.11	59.74																		PC		PC
X12	DANGARMEY 3	41.14	41.14												PC								
Y01	KOBODEY	36.65	37.52	P				PC	PC	PC		PC			PC	PC					PCH		PCH
Y02	GOMBEWA	34.79	35.96	P				PC	P	PC		PC			PC	PC					PCH		PCH

NUM	VILLAGE	PROFOND.		1991								1992								1993							
		MIN.	MAX.	8	12	2	4	PR	8	9	10	11	12	1	2	PR	6	7	8	9	10	11	12				
Y03	TONDI FOU PAS	11.38	14.58	P				P	P	P					PC	PC			P				PCH				
Y04	TONDI FOU KO	22.91	24.50					P	P			PC			PC	PC			P				PCH				
Y05	GUIDEL	58.42	59.17	P				PC	P	P		PC			PC	PC			PH				PCH				
Y06	TANA BERI KOU	41.59	42.29					P	P	P		P			PC	PC											
Y07	TANA BERI PAS	37.15	38.52	P				PC		P	PC	PC			PC	PC			P				PCH				
Y08	KARGUI BANGO	52.86	54.66	P				P		P		PC			PC	PC			PH				PCH				
Y09	BAGANI	44.01	45.10												PC	PC			PC				PCH				
Y10	MANGA KOUAR	27.01	27.01													PC											
Z01	KOFO	53.22	54.26	P	P			PC		PC		P		P	PC	PC			PC				PCH				
Z02	MAROUBERI ZE	28.86	29.77					P	PC	PC		PC			PC	PC			PC				PCH				
Z03	MAROUBERI TE	48.16	49.00	P	P			PCH		P		PC				PC			PC				PCH				
Z04	MAROUBERI TE	45.11	46.22					P	PC	PC		PC				PC			PC				PCH				
Z05	MAROUBERI TE	44.72	45.70	P				P		P		P				PC			PC				PCH				
Z06	DIAWANDO	29.91	30.95	P	P			P	P	PC		PC			PC	PC			PC				PCH				
Z07	GUIAOUDARE T	58.75	59.60					P	P	PC		PC			PC	PC			PH				PCH				
Z08	BOSSADJI	46.92	47.80	P	P			P		PC		PC			PC	PC			PH				PCH				
Z09	POULLO BOSSA	46.98	47.70	P				P		PC		PC			PC	PC			PH				PCH				
Z10	MINGUI	37.68	38.80	P				PC		P		PC			PC	PC			P				PCH				
Z11	DOUDOL	42.41	42.86									PC			PC	PC			PH				PCH				
Z12	TANDO	33.84	34.79					PC		PC		PC			PC	PC			P				PCH				
Z13	YLADDE	44.47	44.94	P				P		PC		PC			PC	PC			PH				PCH				
Z14	TOMBO BELLA	26.02	26.05													PC			PC								
Z15	SETI	23.48	23.48													PC			PH								
Z16	DOUALAGA	27.24	27.24													PC											
Z17	KORAN KASSA	15.68	15.68													PC											
Z18	GONOUB	27.86	27.86													PC											
Z19	MARGOU MARC	5.20	5.20													PC											
Z20	GUILARE	3.38	3.38													PC											

THE SEMY-ARID GROUNDWATER RECHARGE STUDY (SAGRE)

John BROMLEY, Joost BROUWER, Steve GAZE

*Institute of Hydrology, Wallingford
OX10 8BB, G B*

ABSTRACT

A groundwater recharge study has been carried out by the Institute of Hydrology (Wallingford) and the Sahelian Centre of ICRISAT on the right bank of the Niger. The 600 km² study area is located on the Say plateau, which forms an outlier of the Continental Terminal formation. Groundwater levels within a network of 53 monitoring wells and boreholes have been monitored on a monthly basis since March 1991, and will provide data to allow estimation of regional recharge by groundwater modelling. Samples for full chemical analysis, including tracer elements, have also been taken from all wells during both the dry and wet seasons. Experiments to calculate site specific recharge rates through soil water balances have been conducted at three sites on contrasting land use (tiger bush, millet and fallow). Finally historic recharge figures are being obtained from the results of unsaturated solute profiles for a 60 m deep dug well being constructed within the area.

RÉSUMÉ

Une étude de la recharge des nappes dans la zone expérimentale de HAPEX-Sahel, en rive droite du Niger, a été entreprise conjointement par l'Institut d'hydrologie de Wallingford et par le centre sahélien de l'ICRISAT. La zone d'étude couvre 600 km² et est située sur le plateau de Say qui appartient aux formations du Continental Terminal. Les niveaux de l'aquifère ont été relevés mensuellement depuis mars 1991 sur 53 sites. La recharge sera estimée par modélisation de l'aquifère. Des analyses chimiques complètes, incluant les éléments traces, seront effectuées sur des échantillons prélevés en saison sèche et en saison humide. La recharge locale sur les sites de brousse tigrée, mil et jachère du Super-Site Sud de HAPEX-Sahel, sera aussi évaluée par le biais du calcul du bilan hydrique local. Enfin, le creusement d'un puits de 60 mètres de profondeur permettra d'analyser le profil des solutions de la zone non saturée et d'estimer les taux de recharge des dix dernières années.

1. GENERAL OBJECTIVES

In 1990, the Institute of Hydrology (UK) began a five year groundwater recharge study on the right bank of the Niger river, approximately 45 km to the south of the capital Niamey. The project, which is being carried out in collaboration with the International Crop Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT), is known as the Semi-Arid Groundwater REcharge study (SAGRE). The study has three major objectives:

- * to compare and evaluate three different techniques of measuring recharge: **chemical** (solute profiling and groundwater chemistry), **physical** (soil moisture measurements), **groundwater modelling** (groundwater levels);
- * to quantify direct recharge taking place below the major land use types in the area; tiger bush, millet fields and fallow land.

Groundwater recharge corresponds to deep drainage taking place from the soil below the root zone. It, therefore, constitutes an important element of the sub-surface water balance and of the wider land surface - atmosphere energy balance, which is the subject of the HAPEX - SAHEL investigation. By quantifying the deep drainage component and providing information relating to regional groundwater levels and fluctuations, SAGRE links directly to, and complements, the HAPEX study.

2. GEOGRAPHIC AND TEMPORAL COVERAGE

2.1. Study area

The study area forms part of the Say plateau on the right bank of the Niger river and lies approximately 45 km south of the capital, Niamey (Figure 1). Investigations have been concentrated within a 35 km x 17 km rectangle, centred around the ICRISAT experimental farm at Sadore. The northern and southern boundaries lie between latitudes 13° 10' and 13° 17' N, the western boundary is marked by longitude 2° 5' E and the eastern boundary by the Niger river. The boundaries mark the limit of the regional groundwater level study. Within the area three sites, representative of the major land use types, tiger bush, millet and fallow land, were selected for point measurements of recharge using soil moisture techniques (Figure 2).

The Say plateau forms an outlier of the Continental Terminal formation, of Mio-Pliocene age, resting directly on a weathered pre-Cambrian basement of granites, gneiss and schists. The principal aquifer is an oolitic ironstone horizon found at the base of the Continental Terminal formation. The oolite dips gently eastward (Figure 3) varying in thickness from less than 2 m to 9 m, with a marked thickening between Diakindi and Sadore (BURRI, 1987). In the west, geological information is very scarce, but indications from the logs of recently dug wells suggest that the oolite thins to less than 2 m, and in many places is absent.

On the eastern side of the plateau, the water table lies either within, or just above the top of the oolite, but toward the west it dips steeply into the underlying basement (Figure 3). Where present, the oolite is overlain by a poorly permeable, variable sequence of sandstones, silty sandstones, mudstones and laterites up to 50 m thick.

2.2. Previous work and scope of study

Prior to the start of the SAGRE/HAPEX study a limited amount of groundwater level monitoring work had been carried out by the Ministry of Hydraulics (Direction des ressources en eau - DRE) in the vicinity of the ICRISAT experimental farm at Sadore (BURRI, 1987; CALOZ, 1990). The DRE have also compiled a series of atlases showing the distribution of water sources in the arrondissements covering the study area (DRE, 1990, 1992a, 1992b). Most of the geological information is from four sources; BOULANGER (1962), GREIGERT (1966), BRGM (1983) and BURRI (1987). Some groundwater chemical analyses were published for the region in BRGM (1983), while JOSEPH and OUSMANE (1988) and JOSEPH and GIRARD (1990) have reported on problems of localized groundwater pollution. Soil moisture studies have been restricted to a number of small-scale experiments carried out within the ICRISAT experimental farm (PAYNE *et al* 1990; KLAIJ and VACHAUD, 1992). These studies have been restricted to the sandy soils which support millet cultivation.

The current project was set up in 1990, but routine monitoring did not begin until March 1991. Since this time groundwater levels have been measured on a monthly basis. It is anticipated that monitoring will continue until the end of 1994, by which time four complete seasonal cycles will have been recorded.

Groundwater samples have been collected during the course of two campaigns carried out in 1992, one at the end of the dry season, the other during the wet season. No further sampling is planned. Pore water samples for solute profile analysis have been taken during the construction of a 75 m deep well in the western part of the study area.

Finally, measurement of soil moisture content at the three selected land use sites began in May 1991 and will be continued until October 1994. Monitoring has taken place on a monthly basis, but during the HAPEX-SAHEL Intensive Operating Period (IOP), intervals were adjusted to coincide with that of the HAPEX experimental plan. More details of the soil moisture campaign will be published in a separate paper.

3. EXPERIMENTAL SET UP

3.1. Groundwater levels

Groundwater levels have been measured on a monthly basis since March 1991 using a monitoring network of 53 dug wells and boreholes. More frequent, weekly readings, however, have been made from November 1991 along a line of 7 wells, extending across the bed of the Damari stream near Diakindi (Figure 2). During the IOP the monitoring schedule remained unchanged, any increase in frequency being considered unnecessary, given the slow rate of water level response to rainfall events. The network gives a density of approximately one point per 11 km², although in practice the distribution is very uneven, with some areas having a better coverage than others. In general the lower-lying cultivated regions to the east and along the length of the Damari valley have a more dense coverage than the less populated tiger bush areas in the west. The wells used for monitoring are of the traditional hand dug variety. Older types are usually unlined and in a poor state, whereas more recent examples are lined with concrete and are generally in better condition.

With this information groundwater level maps are being prepared for each month. The data is being used as input into a finite difference groundwater model (MODFLOW^{EM}) to establish the rate of regional groundwater recharge. Aquifer characteristics, including permeability and storage coefficients have been taken from data published by BRGM (1983) and GLYNN (1991). Measured groundwater levels will be used to calibrate the model.

Rainfall data has been collected from a network of 7 EPSAT-Niger raingauges located within the study area (Figure 2). The gauges log both rainfall totals and rainfall intensity. Four gauges were installed prior to the start of groundwater level monitoring. The remaining three, those at the tiger bush, millet and fallow sites were installed in mid-1991.

3.2. Chemistry

Samples for groundwater chemical analysis have been taken from the network of 53 wells used for groundwater level measurements. Additional samples have been taken from springs along the escarpment near the eastern boundary and from boreholes fitted with handpumps. This has increased coverage to 61 sites. Analysis has included all major elements including (Ca, Na, K, Mg, HCO₃, SO₄, Cl, NO₃) plus a number of selected trace elements (Si, Fe, Mn, Sr, Ba, B, Li).

The solute profile sampling programme has been carried out at a 77 m deep well constructed just outside the western boundary of the study region. Samples have been taken during construction every 25 cm in the top 10 m and at 50 cm intervals below. Water is removed from the samples for analysis in the laboratory by elutriation or extraction using a centrifuge. Pore water collected from 170 samples has been analyzed by ICP-OES¹ for the following elements: Ca, Na, K, Mg, SO₄²⁻, B, Li, P, Si, Sr, Be, Ba, Y, Mn, Co, Fe, Zn, V, Cd, La, Zr, Cr, Ni, Mo, Al, plus Cl⁻, NO₃⁻, pH and HCO₃.

The solute profile technique uses variations in the chemistry of unsaturated pore water with depth to determine past fluctuations in the recharge rate. The depth profiles of chloride and nitrate are of particular relevance (ALLISON and HUGHES 1978).

To calculate recharge it is necessary to know the chemistry of the input water to the system, the local rainfall. Rainfall samples have thus been collected every three weeks for analysis throughout the 1992 wet season from a series of seven raingauges scattered around the study area (Figure 2). These data have been supplemented by samples taken on a storm by storm basis between March and September 1992, from five other raingauges on the left bank of the river. All sites form part of the EPSAT-Niger network (LEBEL *et al.*, this issue).

A total of 140 rainfall samples have been collected, of which 28 have been subject to full ICP-OES analysis. Of the remainder 112 have been analysed for Cl⁻, 68 for NO₃⁻ and 25 for Iodine. All samples have also been analysed for the stable isotopes deuterium (²H) and oxygen 18 (¹⁸O)

3.3. Physical techniques (soil moisture measurements)

A series of experiments to calculate groundwater recharge through soil moisture measurements have been made at three selected sites in the study area. These are not discussed further here, but are described in a forthcoming paper to be published by CUENCA *et al.*

4. MEASUREMENT ACCURACY

The location of each groundwater level monitoring site has been fixed using a Magellan Geographical Positioning System, accurate to a few tens of meters in the horizontal direction. Well head elevations have been determined by altimeter survey with an accuracy of, at best +/- 1 m. The precision of groundwater level elevations is, therefore, more a function of the accuracy of the datum elevation than the depth to water measurements, which are accurate to a few millimetres.

All the wells have water drawn by hand throughout the day, which superimposes a short-term daily fluctuation of water level on the longer-term seasonal trend. Though the scale of these daily fluctuations are generally restricted to a few centimetres they nevertheless have to be taken into account when interpreting seasonal hydrographs.

5. DATA PROCESSED

5.1. Aquifer properties

In the ferruginous oolite, water movement and storage are largely controlled by the presence of fissures and fractures rather than intergranular hydraulic properties. The fracture system imposes a high but variable permeability. Transmissivities calculated from pumping tests carried out by BRGM in the vicinity of the Say plateau (BRGM, 1983) and by the Institute of Hydrology at the ICRISAT farm (GLYNN, 1991) have an arithmetic mean of 310 m²day⁻¹ and a geometric mean

¹ Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry.

of $157 \text{ m}^2\text{day}^{-1}$ (Table 1). There is, however, considerable variability with values ranging from $22 \text{ m}^2\text{day}^{-1}$ to $1\,296 \text{ m}^2\text{day}^{-1}$. Assuming an average aquifer thickness of 5 m, the arithmetic and geometric values translate to mean permeabilities of 62 m day^{-1} and 31 m day^{-1} respectively. Information relating to the storage capacity of the aquifer is, unfortunately, more scarce. Only three values are available, all from pumping tests at ICRISAT. Two of these figures, .0004 and .0003 are representative of the confined aquifer storage while the .02 value is more typical of the unconfined storage. Clearly, further data is needed to better define this parameter.

The basement complex granites and gneisses underlying the Continental Terminal are on the whole significantly less permeable, though locally, where fissured, can be very productive. Transmissivities obtained from BRGM pumping tests (BRGM, 1983) show considerable variability, ranging from $4.7 \text{ m}^2/\text{day}$ to $657 \text{ m}^2/\text{day}$. The higher values are most likely related to the presence of local fissure and fracture systems of limited extent. The arithmetic mean transmissivity derived from all test is $139 \text{ m}^2/\text{day}$ while the geometric mean is $50 \text{ m}^2/\text{day}$. The few storage coefficients available are all very low but again show considerable variability ranging from 3×10^{-4} to 1.4×10^{-9} .

5.2. Groundwater levels

Water level data covering the period March 1991 to November 1993 has already been processed. Water level maps are available for each month except for the period from September 1991 to February 1992. The water table map for June 1992 is given as an example in Figure 4.

Dry season water table elevations range from 172 m (IH28) in the east to 215 m (IH40) in the west. Most groundwater movement is eastward from an ill-defined groundwater divide in the western part of the study area; smaller flows take place to the west (Figures 3 and 4). Depths to groundwater vary from less than 1 m along the Damari stream bed, to over 60 m in western parts of the region where ground elevations exceed 270 m.

To the east of the divide the water table has two distinct slopes; from the divide itself to the ICRISAT farm the gentle eastward slope is less than 1 in 600, but from ICRISAT to the base of the escarpment this steepens to 1 in 450. West of the divide groundwater levels initially fall steeply at 1 in 100 as the water table enters the basement complex, however, further west gradients decrease as water flows toward the valley flanking this side of the plateau.

A striking feature of the water table is that the groundwater and surface water divides are not coincident. This is confirmed by the cross-section shown in Figure 3. The groundwater divide is displaced about 5 km to the east of the surface watershed, which lies close to the western boundary of the study area. The principal factor governing the position of the groundwater divide appears to be the elevation and horizontal extent of the ferruginous oolite aquifer, which becomes attenuated and reaches its highest point along the line of the divide. Further west, the oolite pinches out in many places and becomes patchy in distribution. The sinuous form of the divide is probably controlled by the irregular nature of the oolite sub-crop at the point where it begins to pinch out.

The shallow gradients to the east of the divide reflect the relatively high permeability of the oolite. Steeper gradients close to the river are controlled by the increased dip of the oolite in this region and by the low elevation of the discharge point at the base of the scarp flanking the plateau (Figure 3). Immediately to the west of the divide steep gradients are present where the water table drops below the base of the Continental Terminal into the much less permeable basement below.

The passage of the water table from oolite to basement is reflected not only by a change of water table gradient, but also by a difference in the scale of annual water level fluctuation. Within the basement this annual fluctuation is typically of the order of several meters, whereas in the oolite the fluctuation is more subdued, being generally less than 0.5 m. This contrast is illustrated in Figure 5, which shows the change of water level measured between May and August 1992, and Figure 6 where the hydrograph of a basement complex well (IH22) is compared with site IH1 from the oolite. The reason for the contrast is simply that the basement has a much lower storage capacity than the oolite (Table 1), which means water level rises in the basement are considerably larger for any given input of water.

As well as the strong contrast exhibited between basement and oolite areas, the change of water level map (Figure 5) also reveals a distinct trend within the oolite area itself. Groundwater level fluctuations appear to be more pronounced in the vicinity of the Damari stream bed. A zone of increased fluctuation extends for approximately 5 km from the stream bed on the northern side, but for less than 1 km to the south where the flanks of the valley are much steeper. Within this zone annual water level changes range from 0.4 m to 0.2 m. Assuming the storage capacity of the aquifer is reasonably constant, the implication is that the stream bed and/or the areas flanking the stream are providing a focus for recharge by effectively concentrating run-off.

5.3. Groundwater Chemistry

Analyses of water samples collected during the dry and wet season campaigns have not yet been interpreted in detail. However cursory inspection has highlighted a number of significant features related to groundwater composition. These are:

- a) The Total Dissolved Solids (TDS) content of water throughout the area is extremely low. Values range from 9 to 326 mg l⁻¹, the average being 43 mg l⁻¹.
- b) There is a marked contrast in salinity between groundwater located to the east and west of the groundwater divide. To the west, where groundwater is contained within the basement, TDS values average 129 mg l⁻¹; to the east, where water is within the oolite aquifer, values are reduced to 32 mg l⁻¹.
- c) Localized pollution of water sources is a problem at a small number of sites. At five sources the concentration of NO₃ exceeds 100 mg l⁻¹, considerably above the WHO recommended limit of 50 mg l⁻¹.
- d) The dominant water type is Ca-Mg:HCO₃.

The exceptionally low TDS concentrations are surprising given the considerable thickness of unsaturated zone through which infiltrating water has to pass. In places this exceeds 60 m, but is more commonly between 20–40 m. Based on chloride profiles obtained from a well dug during the course of the project, the residence time for infiltrating water in the top 40 m is estimated to be in excess of 150 years. Yet despite being in transit for this length of time very little dissolved solid appears to have been taken into solution during passage to the water table. The implication is that the lithology of the unsaturated zone is dominated by poorly soluble minerals. This is supported by the results of X-ray diffraction analysis of 8 samples taken at depths between 2 m to 40 m at the solute profile site. Results show the major mineral components of the silty sandstone-siltstone-mudstone lithology to be quartz, kaolin, iron oxide and goethite, all of which are poorly soluble and would not be expected to contribute significantly to the dissolved solids content.

Higher TDS concentrations in the basement complex aquifer perhaps reflect the presence of more soluble material within the weathered zone which is developed at the top of the formation. Minerals within the gneiss such as micas, pyroxenes and amphiboles are abundant in calcium, magnesium and sodium. The weathered products of the gneiss provide a rich source from which these elements can be dissolved. Although basement complex waters tend to have a higher TDS concentration the type of water does not appear to be greatly different from that of the oolite aquifer. A Piper plot of the two groups illustrates the point (Figure 7). Both groups plot very closely together, the only difference being that the basement complex water is slightly enriched in Mg, Ca and HCO_3 and depleted in SO_4 and Cl with respect to oolite waters.

In recharge studies the distribution of Cl is frequently used to identify areas in which active recharge is taking place. The conservative nature of the element means that for a given aquifer the concentration can be directly related to the amount of infiltrating rainwater bringing in the chloride. Where little recharge is taking place the Cl concentration tends to be increased; where recharge rates are high concentrations are much lower. The distribution of chloride in waters sampled during the wet season is shown in Figure 8. Lowest concentrations occur to the north of the ephemeral stream; highest levels are in the western regions, and in areas to the south of the stream. The implication is that within the oolite areas to the east of the groundwater divide, most recharge is concentrated in the area to the north of the stream with less taking place on the southern side. In general terms the picture is similar to that provided by the evidence of the water table fluctuation data. Along the stream bed itself a number of wells show anomalously high Cl concentrations which are probably associated with flooding and subsequent pollution rather than low rates of recharge. The high Cl concentrations in the west of the region are possibly due to the water being contained within the basement complex and are not necessarily associated with lower recharge rates. However, more analysis of the chemical data, particularly of the trace elements is needed to confirm the pattern of recharge suggested.

5.4. Solute profile well

The solute profile sampling programme has been carried out at a 75 m deep well, constructed just outside the western boundary of the study region. The technique uses variations in the chemistry of pore water with depth in the unsaturated zone to determine the rate of recharge in the historic past. Depth profiles of chloride and nitrate content in particular are used to identify past fluctuations of recharge rates.

Preliminary interpretation of the upper 45 m, based on the amount of chloride preserved in the profile, suggests the entire record represents a period of up to 165 years. The average recharge rate at the site over this period is estimated to be in the order of 17 mm per year or in other words about 3 % of total rainfall. Further analysis and interpretation is needed, however, before these figures can be confirmed. Analysis of the lower 30 m is yet to be completed.

5.5. Groundwater modelling

Using the groundwater level and aquifer parameter data available a preliminary finite difference groundwater model (MODFLOW^{EM}) has been implemented for the area to establish the rate of regional groundwater recharge. The basement complex, ironstone and Continental Terminal sandstones, siltstones and mudstones are distinguished in terms of their geometry and hydraulic properties. Best present estimates of these properties are used in the model, together with generalized rainfall input values.

Initial results indicate that a regional recharge of 60 mm per year is sufficient to account for observed water level responses. This is somewhat higher than the 17 mm figure derived from solute profile calculations. It should be remembered, however, that the solute profile result represents direct recharge within a tiger bush region, whereas modelled values integrate direct recharge from all land types and indirect recharge including infiltration from stream beds. The figures are thus not directly comparable. However, these preliminary findings do suggest that direct infiltration below tiger bush areas is one of the least important sources of recharge in the area. Indirect recharge and recharge below other land use types (millet and fallow) are probably more important.

5.6. Data storage

Eventually all data will be transferred to the H2SIS data base in the following form:

- Groundwater Levels. All levels will be given as a depth and elevation for each month or week from March 1991 to November 1993.
- Groundwater chemistry: all samples from both sampling campaigns (dry and wet season) will be reported with all major elements and selected trace elements.
- Rainfall chemistry: this will include the chloride and nitrate content of 140 samples of rainfall collected during 1992.
- Solute profile work. Chloride and nitrate composition of soil water samples taken at 0.5 m intervals from 0-45 m depth at the solute profile well site will be reported.
- Soil moisture data. An extensive series of soil moisture, soil potential and hydraulic conductivity measurements will be reported. Details of the data lodged can be found in a forthcoming paper by CUENCA *et al.*

6. SUMMARY

Three techniques, to measure groundwater recharge are being carried out: groundwater modelling, chemical and physical methods.

- Groundwater modelling will provide information on regional values of current rates of recharge, but will contribute little toward the understanding of the processes taking place.
- Solute profiling will identify historical recharge rates at a single point, but again says nothing of the mechanisms.
- Soil moisture measurements give current rates of recharge at a single point and can also be used to identify the dominant processes operating.

It is anticipated that the combined result of this multi technique approach will provide more reliable values for recharge than would be obtained by the application of a single technique in isolation.

REFERENCES

- ALLISON G.B and HUGHES M.W., 1978. The use of environmental chloride and tritium to estimate total recharge to an unconfined aquifer. *Proc. Symp. Isotope Techniques in Groundwater Hydrology*, Vol. 1, 57-72. IAEA Vienna.
- BOULANGER J. 1962. *Les gîtes de fer de la vallée du Moyen Niger. Etude géologique synthétique*. Rapport inédit BRGM NIA 62 A1 pour le ministère des Travaux publics, des Mines et de l'Hydraulique du Niger.
- BRGM, 1983. *Programme 1 000 forages Niger*. Vol. 1 - Implantation des forages. Vol. 2 - Résultats géophysiques (SGN 82 GPH 025). Vol. 3 - C.R. des travaux de forages - Rapport BRGM 83 AGE 030 - (Arch. Dir. Hydraul. du Niger).

- BURRI M., 1987. *La bordure orientale du plateau de Say. Etude géologique préliminaire*. Ministère de l'Hydraulique, Direction des Ressources en Eau. Projet IUED.
- CALOZ P., 1990. *Aquifère du Continental terminal, zone de Say. Interprétation des fluctuations de niveaux piézométriques de 1987 à 1989*. Rapport préliminaire. Ministère de l'Hydraulique, Direction des Ressources en Eau. PHNS SP1.
- DRE, 1990. *Atlas des ressources hydrauliques du département de Tillabéri : arrondissement de Kollo, canton de Lamorde*. Ministère de l'Hydraulique, Direction des Ressources en Eau.
- DRE, 1992a. *Atlas des ressources hydrauliques du département de Tillabéri : arrondissement de Say, canton de Say*. Ministère de l'Hydraulique, Direction des Ressources en Eau.
- DRE, 1992b. *Atlas des ressources hydrauliques du département de Tillabéri : arrondissement de Say, canton de Gueladio*. Ministère de l'Hydraulique, Direction des Ressources en Eau.
- GLYNN M. A., 1991. *Groundwater resources of the Say Plateau*. Msc. Thesis (unpubl.). Department of Civil Engineering, Imperial College of Science and Technology. 105p.
- GREIGERT J., 1966. *Descriptions des formations crétacées et tertiaires du bassin des lullemeden. (Afrique occidentale)*. Editions du Bureau de recherches géologiques et minières.
- JOSEPH A. and OUSMANE B., 1988. *Pollution nitrée de la nappe alluviale du fleuve du Niger à Niamey*. Faculté des sciences, département de géologie, Niamey.
- JOSEPH A. and GIRARD P., 1990. *Etude de la pollution en nitrate des aquifères du socle : exemple de la nappe de Niamey*. Rapport de contrat de recherche (unpubl.)
- KLAJ M.C. and VACHAUD G., 1992. *Seasonal water balance of a sandy soil in Niger cropped with pearl millet, based on profile moisture measurements*. Agricultural Water Management, **21**, 313-330.
- LEBEL T., J.D. TAUPIN and M. GRÉARD, 1994. *Rainfall Monitoring: The EPSAT-Niger Setup And Its Use For HAPEX-Sahel*, in: « Hydrologie et Météorologie de méso-échelle dans HAPEX-Sahel : dispositif de mesures au sol et premiers résultats ». (ORSTOM Ed.).
- PAYNE W.A., WENDT C.W. and LASCANO R.J., 1990. *Root zone water balances of three low input millet fields in Niger, west Africa*. Agron. J. **82**, 813-819.

Table 1. Aquifer properties obtained from pumping tests

Continental Terminal Formation

BH Number	Village	Transmissivity(m ² /day)	Storage Coefficient
17724	Sadore	354	
17725	Sadore	73	
17728	-	26	
17719	Ganka Bassarou	22 33	
17740	-	311	
17731	Finare	320	
17738	Oura Senna	1 296	
17734	Diakindi	346	
17716	Boya	63 73	
BH5	ICRISAT	1 123 173 173 259	0.0003 .02 0.0004
		Arithmetic mean: 310 Geometric mean: 157	

Basement Complex

BH Number	Village	Transmissivity(m ² /day)	Storage Coefficient
28604	Garba-Gounga	4.7	0.0000000014
28642	Lontia Kaina	37	0.0000013
28559	Debere Gati	4.7	0.0003
28560	Loa	6.4	0.000011
19210	-	657	
17728	-	26	
17720	Tokei	216 294	
17718	Tiassa Koara	44 86	
17715	Lontia Kaina	293	
17761	-	34	
17762	-	54	
17732	Boudourio	22 15	
17735	Mossare	432	
		Arithmetic mean: 139 Geometric mean: 50	

FIGURE TITLES

- Figure 1.** Regional setting of the study area.
- Figure 2.** The groundwater level and raingauge monitoring network. The line of section is that shown in Figure 3.
- Figure 3.** An east-west geological section showing the Basement Complex and Continental Terminal Formation, including the major aquifer, the ferruginous ironstone. Line of section shown in Figure 2.
- Figure 4.** Water table elevation for June 1992.
- Figure 5.** Map showing the change of water level between May and August 1992.
- Figure 6.** Hydrographs showing difference in response of aquifer to the east (IH1) and to the west (IH22) of the groundwater divide.
- Figure 7.** Piper diagram to show groundwater composition of the Continental Terminal Sandstone and Basement Complex.
- Figure 8.** Distribution of Chloride during the wet season.

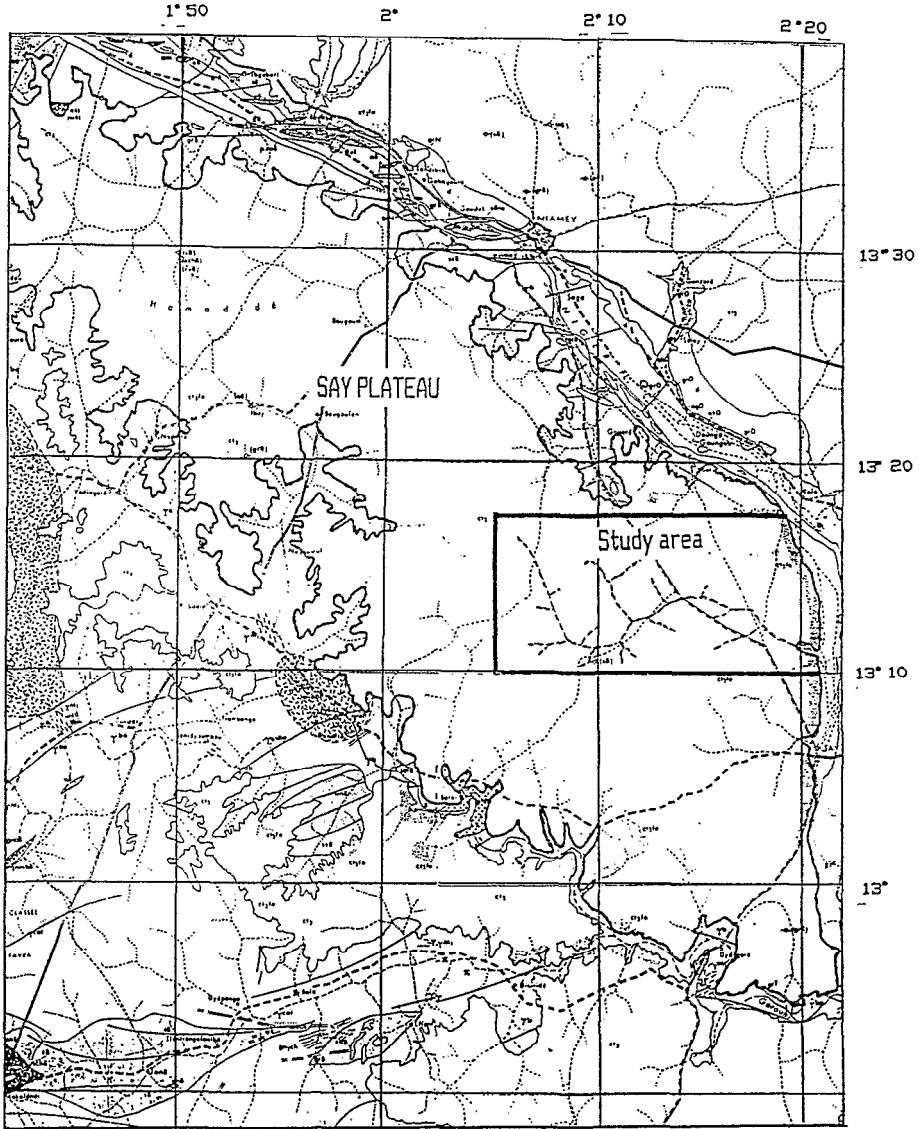


Figure 1. Regional setting of the study area.

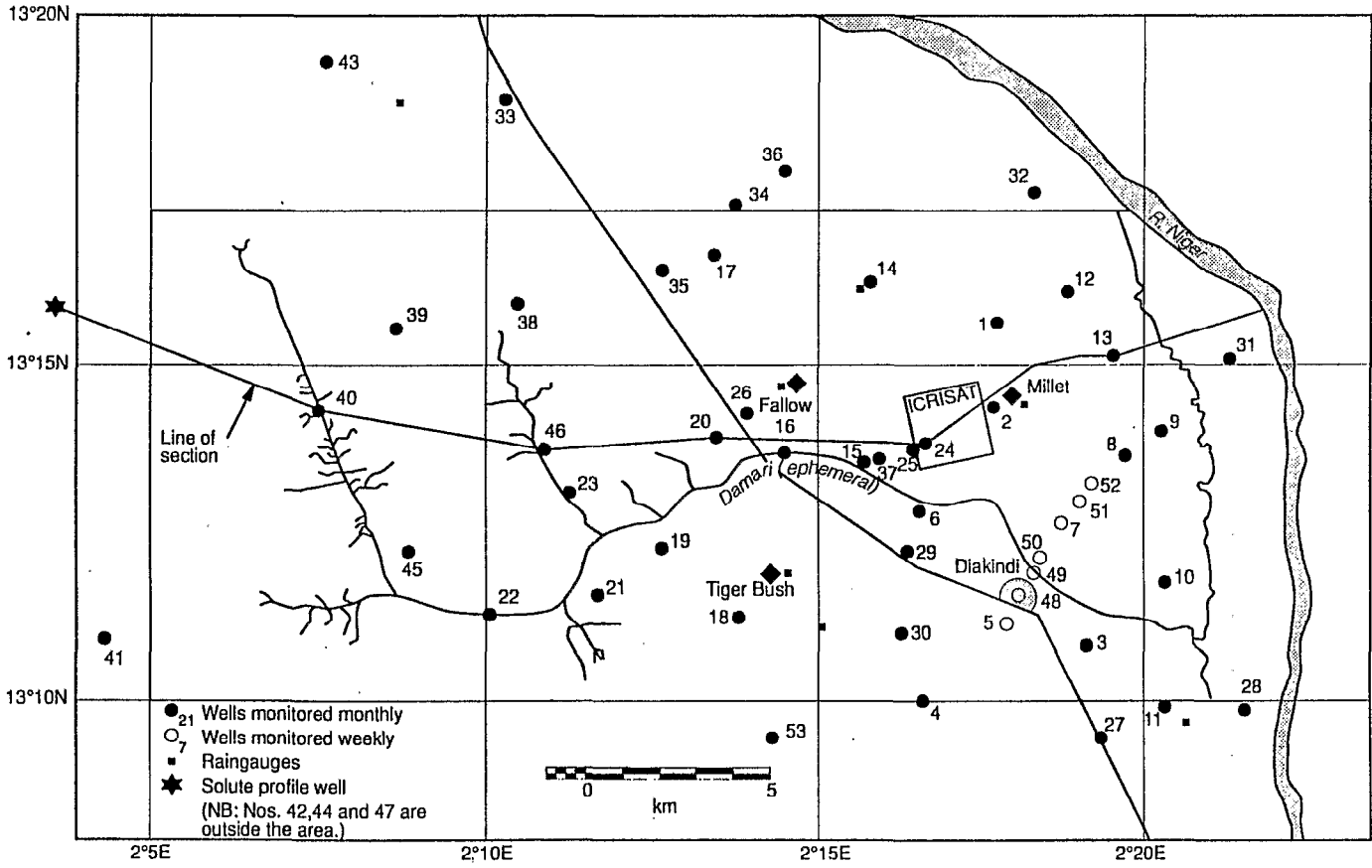


Figure 2. The groundwater level and raingauge monitoring network. The line of section is that shown in Figure 3.

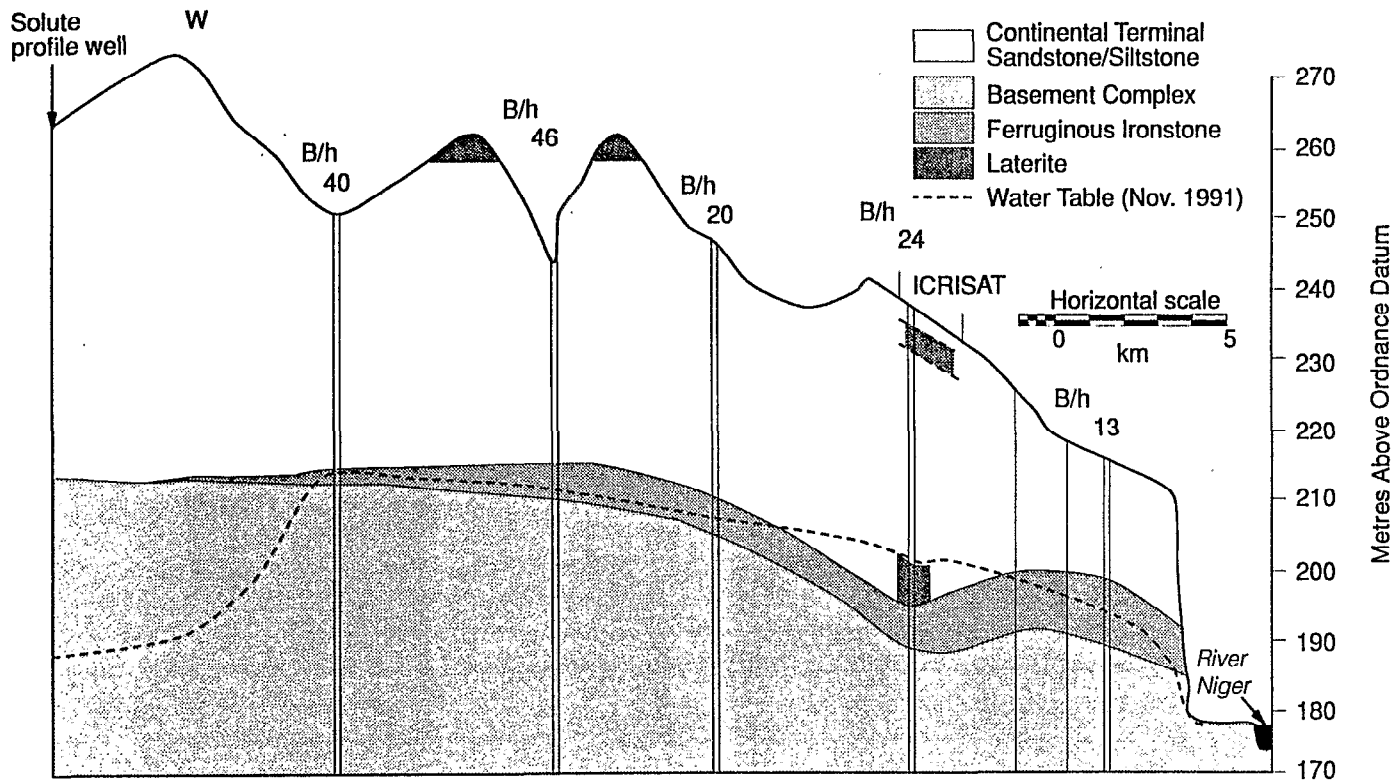


Figure 3. An east-west geological section showing the Basement Complex and Continental Terminal Formation, including the major aquifer, the ferruginous ironstone. Line of section shown in Figure 2.

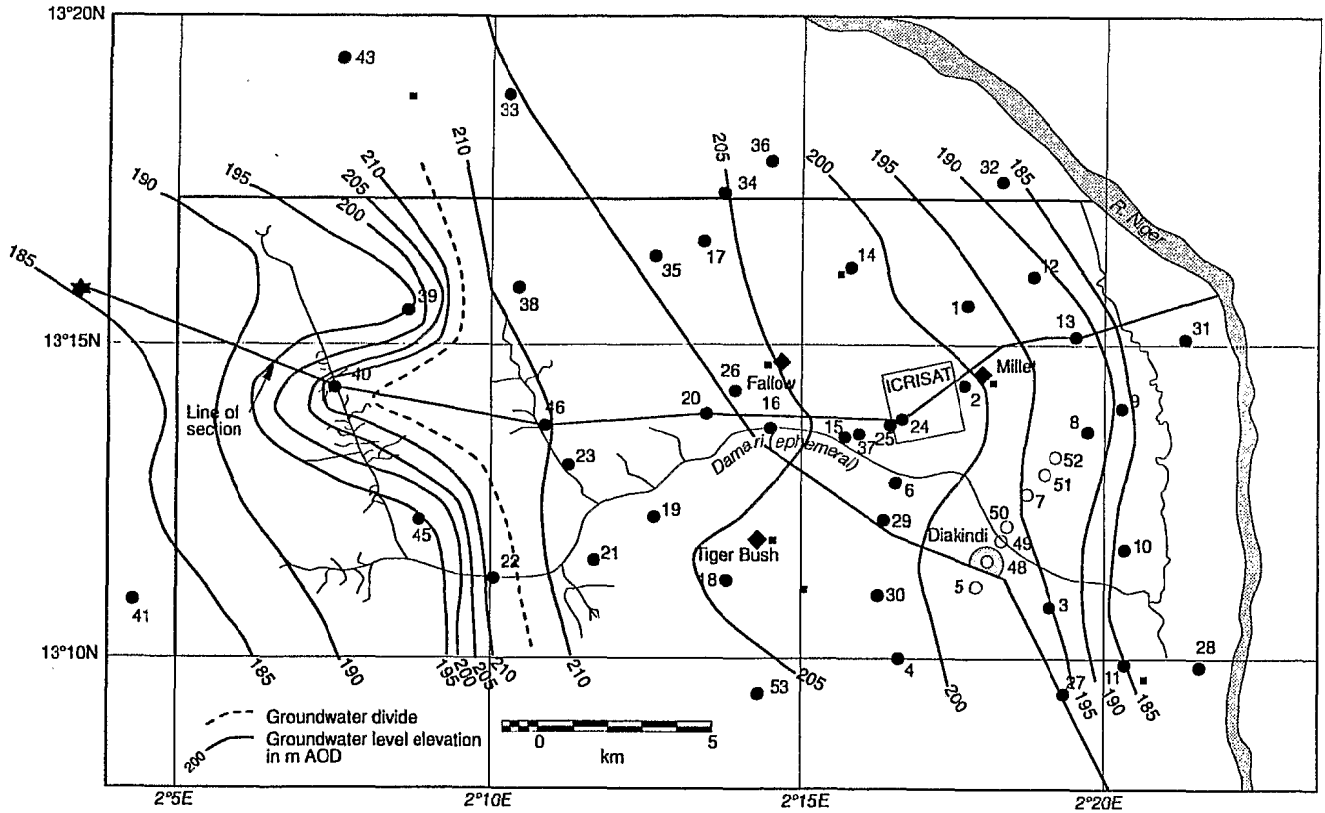


Figure 4. Water table elevation for June 1992.

CHANGE OF WATER LEVEL (m) BETWEEN MAY AND AUGUST 1992

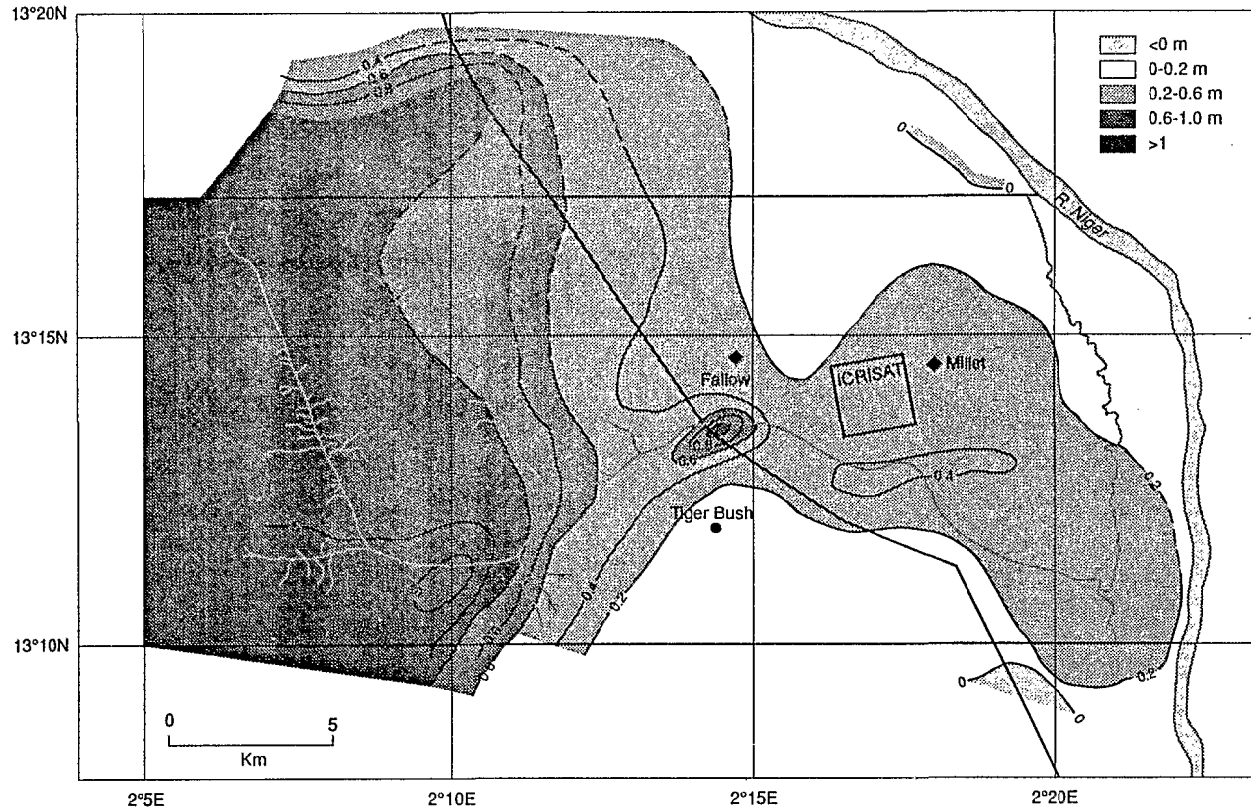


Figure 5. Map showing the change of water level between May and August 1992.

IoH/1/2-93/3D

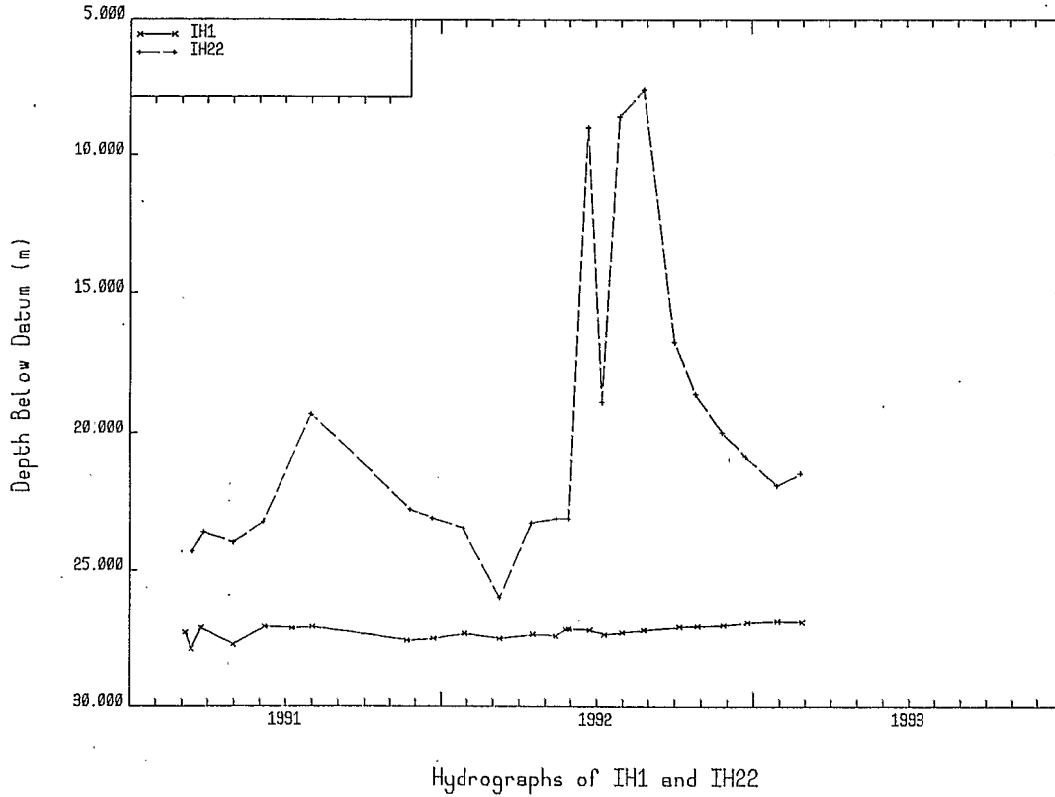


Figure 6. Hydrographs showing difference in response of aquifer to the east (IH1) and to the west (IH22) of the groundwater divide.

Piper diagram of selected samples

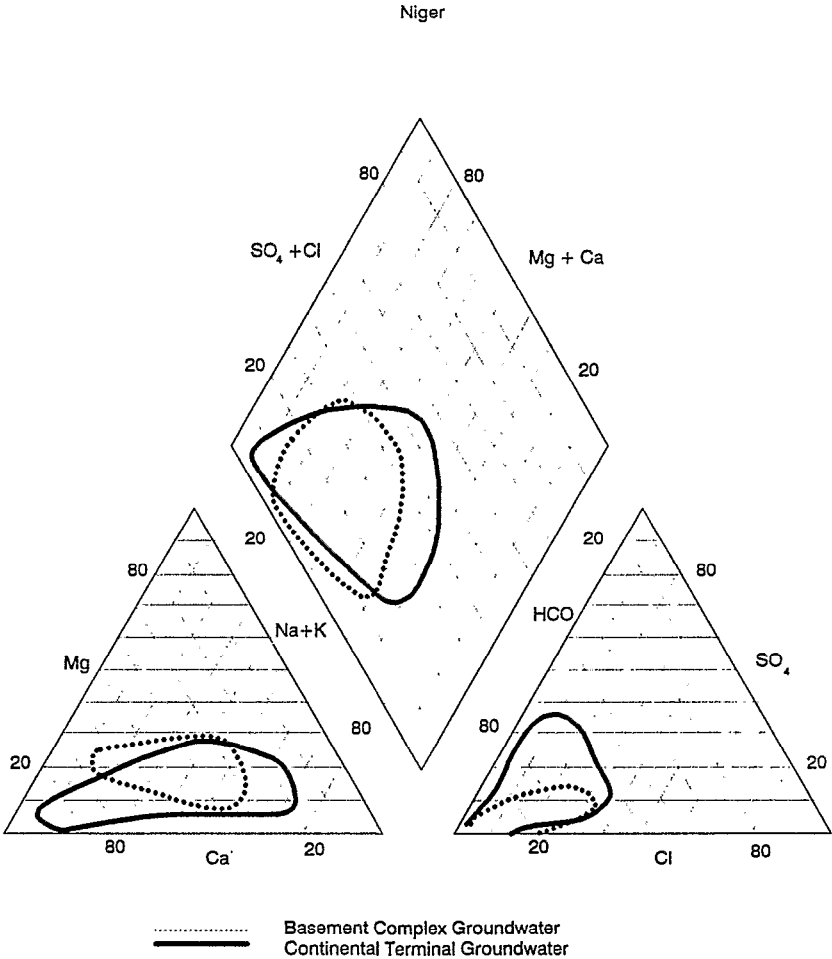


Figure 7. Piper diagram to show groundwater composition of the Continental Terminal Sandstone and Basement Complex.

CHLORIDE CONCENTRATION (mg/l): WET SEASON (AUGUST 1992)

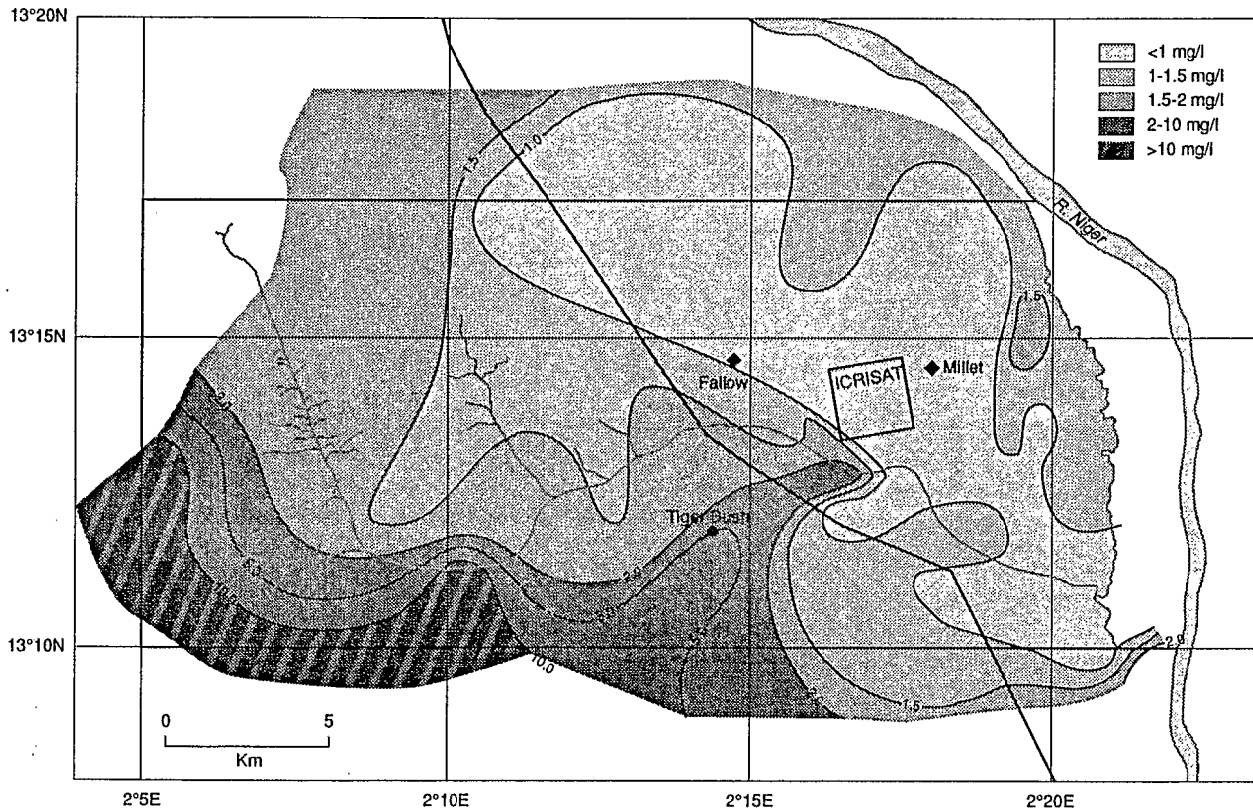


Figure 8. Distribution of Chloride during the wet season.

10/1/2-93/30

**BASES ÉCOLOGIQUES POUR UNE SPATIALISATION DES DONNÉES RECUEILLIES
DANS LE CADRE DE L'EXPERIENCE HAPEX-SAHEL**

Jean-Marc d'HERBES, Eric DELABRE et Maud LOIREAU

ORSTOM, Mission au Niger, BP 11416, Niamey, Niger

RÉSUMÉ

Les objectifs généraux du groupe d'étude « Ecologie et Végétation » consistent d'une part à fournir une typologie des différentes formes de végétation et des phytomasses correspondantes sur l'ensemble du degré carré et aux divers niveaux de perception requis par l'expérimentation générale HAPEX-Sahel, d'autre part à fournir le maximum d'information « sol » pour la validation des données de la télédétection spatiale. Les diverses démarches méthodologiques, correspondant aux différents aspects abordés, sont exposées et leur pertinence par rapport au plan général d'expérimentation discutée. Sont présentés les résultats préliminaires concernant deux thèmes majeurs : (1) la cartographie à deux échelles (1/50 000 et 1/200 000) respectivement du « Super-Site-Central-West » et du « Degré Carré », donnant la répartition des unités paysagères échantillonnées par HAPEX-Sahel (champs, jachères et brousse tigrée) et (2) une typologie stucturale des jachères du Sahel nigérien.

ABSTRACT

The objectives of the " Ecology and Vegetation " studies are - 1) to produce a typology of the different vegetation units and phytomasses at the whole square degree scale and at the different perception levels required by the general experimental plan, and - 2) to produce a " ground information " for the validation of remote sensing data. The various methodologies corresponding to the different ecological studies are discussed according to the global aim of HAPEX-Sahel experiment. Preliminar results referring to the two major thematic studies are presented: 1) the cartography at two different scales (1/50 000 and 1/200 000) respectively of the " Central-West-Super-Site " and the " Square degree ", giving the spatial distribution of the land units sampled by HAPEX program (millet fields, fallow lands and " tiger bush " vegetation) and 2) a structural typology of the fallow lands of the Nigerian Sahel.

INTRODUCTION : OBJECTIFS GÉNÉRAUX

Les objectifs fixés par le groupe « Ecologie et Végétation » dans le cadre du programme HAPEX-Sahel s'appuient sur les raisons mêmes du choix de la zone sahélienne comme zone expérimentale : grande homogénéité d'ensemble, faible nombre de types d'occupation du sol, conditions qui n'étaient pas réunies dans le cas de l'expérience précédente HAPEX-Mobilhy en Aquitaine.

De ce fait, seulement trois types d'occupation du sol ont été retenus pour l'instrumentation au sol durant la période d'observation intensive (15-08 au 30-09-92) : les « champs », les « jachères » et les « brousses tigrées ». L'environnement sahélien paraissant peu complexe, il suffisait de mesurer les flux énergétiques et hydriques sur trois échantillons pour chaque type d'occupation du sol et d'extrapoler à une maille atmosphérique (le « degré carré » de Niamey) à partir d'instruments aéroportés et de la télédétection satellitaire.

Le schéma d'ensemble répond en gros à cette conception un peu simplifiée de l'écologie sahélienne. Malheureusement, nous verrons que la définition même des objets mesurés n'est pas si simple, et est surtout très variable dans le temps, que ce soit au niveau saisonnier ou interannuel.

Il s'ensuit que la localisation spatiale et la reconnaissance par télédétection, à un moment donné, des unités d'occupation du sol en est rendue complexe. De plus, les modèles d'échanges entre la surface continentale et l'atmosphère, qui sont supposés dépendre de la proportion relative de ces unités au sol, n'ont qu'une validité éphémère : la variabilité dans le temps, due à la variabilité du régime pluviométrique et aux décisions anthropiques de changement d'affectation des parcelles, oblige dès le départ à concevoir une approche globale, par unités paysagères majeures à l'intérieure desquelles on peut alors définir une proportion probable d'unités d'occupation des terres à un instant donné.

Les objectifs des études en écologie ont alors été définis comme suit :

- 1) définition des unités élémentaires d'occupation du sol et de leur variabilité dans le temps et dans l'espace. Caractérisation de leurs composants (recouvrement des différentes strates de végétation, états de surface du sol associés).
- 2) caractérisation des réponses spectrales des différents composants au sol (végétation, états de surface) et essai de reconnaissance de ces unités sur l'imagerie satellitaire.
- 3) définition d'unités paysagères majeures (unités « fonctionnelles ») par agglomération d'unités élémentaires, à partir de critères de terrain et à partir des critères numériques des scènes satellitaires à haute résolution spatiale.
- 4) cartographie par télédétection de la zone d'étude d'après cet ensemble de critères.

En fait, la cartographie à partir de l'imagerie satellitaire a précédé et suivi les autres étapes du programme d'ensemble : une première interprétation des images SPOT a permis de dégrossir le travail puis d'échantillonner sur l'ensemble de la zone pour affiner progressivement la restitution finale.

Nous exposerons ici les différents travaux réalisés pour répondre aux objectifs définis, en les présentant par grands thèmes et par niveaux de perception, de la station écologique (ou unité élémentaire d'occupation du sol ou encore « WAB » - *Wind Affected blob* des micro-météorologistes) à la région écologique (ici le degré carré), en passant par la sous-région, représentée dans notre cas par le « Supersite Central Est » (SSCE : 20 x 20 km).

Il faut noter que l'ensemble des activités rapportées ici dépassent largement le cadre strict du seul programme HAPEX. En fait, les préoccupations des études écologiques s'inscrivent plus spécialement dans le cadre du programme SALT (Savanes à Long Terme, *core project* du PIGB). Nous rendons compte cependant de la totalité des travaux en raison des points communs aux deux programmes, en particulier le souci de la spatialisation des mesures ponctuelles à des ensembles régionaux. Il faut cependant garder à l'esprit que le programme HAPEX recherche une calibration au sol, à un instant donné, des données numériques captées par les satellites, pour la construction de modèles de physique atmosphérique, alors que le programme SALT cherche à spatialiser des processus écologiques et s'inscrit délibérément sur le long terme.

PREMIÈRE PARTIE - APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE GÉNÉRALE

1. LES UNITÉS D'OCCUPATION DES SOLS

1.1. Les champs

Un champ, au Sahel, n'est pas une unité stable dans le temps et est parfois difficile à distinguer d'une jachère. Cette difficulté tient à l'itinéraire technique suivi par les paysans autant qu'à l'imprévisibilité des précipitations.

Un champ, en saison sèche, est d'abord une surface défrichée (coupe ou brûlis des ligneux) pour une mise en culture ultérieure. La surface totale défrichée est en règle générale supérieure à la quantité effectivement semée (LOIREAU, 1993), le régime des précipitations de l'année et la main-d'œuvre disponible pour les travaux agricoles déterminant le devenir des champs. Il peut donc être semé, généralement en mil. Là encore, les précipitations conditionnent son avenir : il peut être semé plusieurs fois (jusqu'à huit fois en 1992 à Banizoumbou, sur le SSCE), suivant l'opiniâtreté du paysan, ou abandonné. Si le semis n'est pas satisfaisant, le champ entier ou les « trous » (zones sans levées de germination) peuvent ou non être comblés avec des semis de niébé. Le succès relatif va également dépendre d'un premier sarclage, généralement en juillet, puis d'un deuxième en août. Si le champ passe par toutes ces étapes avec succès, et résiste aux ravageurs, il peut finalement être récolté vers la mi-septembre. On trouve donc en septembre tous les intermédiaires entre un champ de mil pur, correctement nettoyé de ses mauvaises herbes et un champ qui n'a subi qu'une coupe d'arbuste préalable (en fait une petite jachère), en passant par des champs dont on ne connaît plus très bien la destination finale : fourragère (strate herbacée bien développée) ou autre (récolte par exemple des tiges d'*Andropogon gayanus*, herbacée pérenne en grosses touffes, pour la fabrication de nattes).

Bien évidemment, à ces différentes définitions du champ correspondent des fonctionnements bien distincts au niveau hydrologique : ruissellement et évapotranspiration dépendront de la nature du couvert végétal.

Un suivi saisonnier au sol, assorti d'une imagerie satellitaire multi-date, est nécessaire mais pas forcément suffisant, afin de lever les ambiguïtés dans la définition des unités « champ ».

1.2. Les jachères

La majorité des jachères de la zone de Niamey sont heureusement colonisées par une seule et même espèce ligneuse arbustive : *Guiera senegalensis*. Cette mono-dominance floristique dans la strate ligneuse est cependant accompagnée par une grande diversité de structures de la strate herbacée, annuelle ou pérenne. L'âge de la jachère détermine en partie la composition de cette strate, mais le régime des pluies favorise plus ou moins l'expression des différents groupes d'espèces. On assiste qui plus est, durant la saison, à une succession d'espèces se remplaçant sur la station.

Même au niveau de la strate ligneuse, de nombreuses structures peuvent être observées, en fonction de la densité et de la taille des individus (DELABRE, 1993). Une typologie « structurale » (caractérisation des différentes jachères d'après les recouvrements des différents constituants) associée à une typologie « dynamique » (compréhension des facteurs régissant la succession dans les formations post-culturales) a été jugée indispensable pour rendre compte de cette diversité.

Cependant, l'extrapolation de ces typologies à de vastes surfaces est compliquée par le fait que les capteurs satellitaires distinguent mal, voire pas du tout, la strate ligneuse à faible recouvrement (< 20 %), dont la réponse spectrale est absorbée par la strate herbacée et les sols nus

sous-jacents. On comprend mieux alors les énormes efforts réalisés dans le cadre du programme HAPEX par les équipes de San Diego State University pour tenter de reconnaître ces différentes strates, sur le Supersite Central West.

1.3. Les brousses tigrées

La brousse tigrée est formellement définie comme une alternance de bandes nues et de bandes boisées, donnant l'impression d'une peau de tigre, vue du ciel (CLOS-ARCEDEC, 1956), et correspondant à des processus hydrologiques bien définis (THIÉRY *et al*, 1994). Toutes les brousses sur les plateaux cuirassés ne sont cependant pas tigrées, loin s'en faut : le léger gradient de précipitations nord-sud (400 à 550 mm annuels) et les états de surface déterminant la nature et l'intensité du ruissellement sont à l'origine d'une diversité de structures correspondant là encore à des fonctionnements hydrologiques différents. On trouve donc des brousses diffuses, mouchetées, léopardées, ponctuées et tigrées (AMBOUTA, 1984), répondant à différents critères de pente et d'états de surface (DELBAERE 1994). Le problème de leur reconnaissance sur images satellitaires SPOT multi-spectral (résolution au sol 20 m minimum) est ardu, puisque la largeur des bandes boisées fait environ la même taille que le pixel moyen. Le passage par des images SPOT panchromatique (résolution 10 m) est nécessaire pour reconnaître et localiser ces différentes structures sur la zone d'étude.

1.4. La spatialisation des données stationnelles

Le plan d'expérimentation du programme HAPEX-Sahel est basé sur la sélection de trois « Supersites » à l'intérieur desquels sont échantillonnées trois stations correspondant aux trois unités d'occupation du sol. La représentativité de ces quelques sites de mesure (9 à 10 sur l'ensemble du degré carré) n'est pas à rechercher, compte tenu de ce qui précède. Des mesures aéroportées sont destinées à donner des signaux sur les sites mesurés et à les extrapoler au reste de l'espace. L'extrapolation envisagée par les micro-météorologistes est fondée sur l'utilisation de l'imagerie satellitaire NOAA/AVHRR à haute résolution spectrale mais faible résolution spatiale (< 1 km). Étant donné les difficultés de reconnaissance des unités d'occupation du sol sur les images satellitaires à haute résolution spatiale, on peut se poser la question concernant les critères permettant d'appliquer tel ou tel modèle à ces différentes unités. Quoiqu'il en soit, l'écologie et la télédétection associée aux observations de terrain ont choisi de fournir les bases « naturalistes » d'un « scaling-up », de la station écologique à la région, en essayant de contourner les difficultés mentionnées plus haut.

2. LES THÈMES ET LES ÉCHELLES

2.1. Le niveau stationnel (100 m² à 1 km²)

Le niveau stationnel est pour nous représenté par le « WAB jachère » du SSCE, station écologique retenue par les micro-météorologistes pour la mesure des flux échangés entre la surface et l'atmosphère (MONTENY, 1993). Le champ de mil instrumenté du SSCE a été suivi par MONTENY lui-même ; la brousse tigrée n'a finalement pas fait l'objet de mesures micro-météorologiques sur le SSCE (contrairement aux autres sites, SSCW et SSS) en raison de la complexité de sa structure en deux phases (végétalisée et nue), bien qu'elle ait été suivie du point de vue hydrodynamique et phénologique par les collègues de l'ORSTOM (SEGHERI, GALLE & RAJOT, 1994).

Le WAB retenu est une jachère non cultivée (c'est-à-dire ni défrichée, ni semée, ni sarclée) depuis huit ans en 1992, sélectionnée pour sa relative homogénéité spatiale sur une distance compatible avec les équations utilisées par les micro-météorologues (« fetch » de plusieurs

centaines de mètres). La station elle-même a été localisée dans un rayon de 100 m autour du mât de mesure des flux. Des mesures d'humidité du sol ont été assurées par l'équipe de Sicot (*in* MONTENY *et al*, 1993) selon le dispositif adopté dans toutes les stations HAPEX.

Le traitement d'une photographie aérienne prise à partir d'un ULM et numérisée a permis de rendre compte de la structure générale de la station, en particulier de l'importance et de la distribution des taches de sol nu dues à la présence de termitières.

Un dispositif de mesures de la végétation a été mis en place afin de mesurer, sur un pas de temps mensuel en 1991 et décadaire en 1992, la variabilité stationnelle et l'évolution des paramètres intéressant les micro-météorologues : recouvrement et hauteur des deux strates, herbacée et ligneuse basse, indice foliaire par strate, composition spécifique de la strate herbacée.

Le dispositif de mesures au sol comprend 5 lignes de 20 m de points-quadrats (fine aiguille descendue verticalement dans la végétation enregistrant les contacts avec les organes végétaux pour chacune des espèces), lues sur un pas de 10 cm (soit $5 \times 200 = 1\,000$ unités échantillons), pour ce qui concerne la strate herbacée.

Les paramètres de la strate ligneuse basse (essentiellement *Guiera senegalensis*, accompagné de quelques *Combretum micranthum*), ont été mesurés sur quatre « quarts d'hectare » obtenus en imprimant une rotation à une corde de 28,20 m balayant les arbustes à échantillonner. Les paramètres mesurés pour l'ensemble des arbustes localisés dans ces quatre « quarts d'hectare » sont destinés à modéliser la croissance des arbustes à partir de schémas architecturaux : hauteur maximum, diamètres maximum et perpendiculaire, hauteur à laquelle est mesuré le diamètre maximum, diamètre à la base, nombre et diamètre des tiges. Des quantifications phénologiques sont réalisées à chaque mesure : elles sont basées sur l'attribution à chaque arbuste d'un « coefficient d'occupation spatiale » (densité relative de tiges par rapport à un maximum stationnel) et d'un coefficient de densité, par arbuste, du stade phénologique observé (foliaison, floraison, fructification et sénescence). Quelques arbustes choisis à l'extérieur de la station de mesure sont coupés et pesés en vert : les différents organes (feuilles et différentes tiges, troncs) sont séparés sur un sous-échantillon de chacun des arbustes et pesés en vert, séchés puis pesés. Un échantillon de feuilles est prélevé avant séchage, pesé en vert, la surface foliaire est mesurée au planimètre optique, puis l'échantillon est à son tour séché et pesé.

Les mesures ont été réalisées en 1991 par deux étudiants du DESS « aménagement et gestion des systèmes agro-sylvo-pastoraux des régions chaudes » de Paris XII-Créteil (BÂ, 1991 et TANDIA, 1991), en 1992 par deux étudiants de l'université de Niamey (BOUREIMA, 1993 et RABIOU, 1993).

2.2. Le niveau de la petite région (le supersite central est SSCE : 20 x 20 km)

2.2.1. La cartographie de l'occupation des terres par télédétection

Le premier niveau de spatialisation dans le cadre du programme HAPEX-Sahel est constitué par le Super-Site Central Est, petite région de 20 x 20 km comprenant quelques terroirs dont ceux de Banizoumbou et de Tondi Kiboro sur lesquels sont installés les WABs.

Le premier souci a évidemment été de pouvoir localiser les champs, les jachères et les « végétations naturelles » sur cet espace, puisque telle était la « porte d'entrée » de l'échantillonnage HAPEX, en même temps que de quantifier les recouvrements de végétation dans chacune de ces unités d'occupation du sol.

La cartographie de l'occupation des terres est *a priori* particulièrement bien adaptée à cette description du paysage. Elle consiste en effet à décrire les unités cartographiques en termes de **formations végétales** au sens de GODRON *et al* (1968), c'est-à-dire à partir des recouvrements des différentes strates de végétation, herbacée, ligneuse basse (arbustes < 2 m de hauteur) et ligneuse haute (> 2 m) ; des **espèces dominantes** (2 à 3 maximum, dominance physiologique ou en abondance) ; et du **degré d'artificialisation** de l'unité, qui exprime l'intensité de l'intervention humaine sur le milieu (classiquement notée de 1- formations « climaciques »- à 7- routes et constructions).

Nous rajouterons à ces observations, portant essentiellement sur la végétation, une quantification des recouvrements des **encroûtements superficiels** déterminant la redistribution de l'eau dans l'unité (CASENAVE et VALENTIN, 1989). De même, des notations concernant la **situation géomorphologique** de la station sont incluses dans le descriptif de l'unité.

La réalisation de la carte au 1/50 000 du Super-Site Central Est a donc consisté non seulement à situer les objets du paysage dans une représentation de l'espace, mais aussi à les décrire selon des critères analytiques de recouvrements des différents constituants.

La description du paysage à travers la cartographie des unités d'occupation des terres sur le Super-Site Central Est a ainsi été réalisée dans un double objectif :

- 1) pour servir de première base de spatialisation des données localisées, et tout particulièrement celles obtenues en 1992 sur les WABs du programme HAPEX-Sahel (2 champs de mil, 2 jachères, 1 station de végétation naturelle sur plateau cuirassé) à l'ensemble du Super-Site Central Est (SSCE) puis à l'ensemble du degré carré de Niamey.
- 2) pour servir de support et de système de référence à d'autres recherches éco-géographiques participant à l'étude de la dynamique du paysage (bilan entre prélèvements - pâturage, récolte de bois, défrichements - et production des systèmes écologiques).

La réalisation de la carte a privilégié une approche en plusieurs étapes (LOIREAU et d'HERBÈS, 1994) :

- = une étape de terrain, comportant la réalisation de huit transects de 2 à 4 km de longueur, positionnés sur les unités paysagères majeures du Super-Site Central Est à partir de l'analyse des photos aériennes et des compositions colorées obtenues de l'image SPOT d'octobre 1988. Ces transects ont été réalisés en juillet, en août et en septembre 1992, puis répétés en octobre 1993.
- = une étape de traitement d'images satellitaires SPOT, consistant en une classification supervisée, d'abord de l'image d'octobre 1992, puis en traitement multi-date à partir des images disponibles (octobre 1988, février et octobre 1991 ; juin, août, septembre et octobre 1992 ; novembre 1993).
- = une étape de mise en relation ultérieure des deux approches, terrain et télédétection, avec une vérification de la validité de l'extrapolation, des transects à l'ensemble de la petite région, en utilisant une couverture de photographies aériennes au 1/25 000 acquise en septembre 1992 par l'avion C-130 de la NASA.

Ces travaux ont été confiés à Maud LOIREAU (1993) dans le cadre d'un mémoire de DEA présenté à l'université Paul Valéry de Montpellier ; ils ont fait l'objet d'une présentation au colloque AGU (*American Geophysical Union*) à San Francisco en décembre 1993 (LOIREAU et d'HERBÈS, 1993), puis aux Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier (LOIREAU et d'HERBÈS, 1994). Les comptes numériques et la légende de la carte ont été versés à la banque de données HAPEX « HSIS » installée au LERTS à Toulouse.

2.2.2. Inventaire et typologie des jachères du Super-Site Central Est

Etant donné la variabilité spatiale et temporelle des jachères dans le Sahel nigérien, une étude a été lancée en 1991 et poursuivie en 1992 pour déterminer quels étaient les principaux facteurs régissant cette variabilité.

Une campagne de 30 relevés de végétation a été réalisée en septembre 1991 sur un échantillon de jachères retenu d'après des critères d'âge d'abandon et de situation géomorphologique. Les paramètres mesurés concernaient essentiellement la végétation, herbacée et ligneuse, suivant les mêmes méthodes que celles utilisées pour le WAB.

Cette campagne a été reconduite en septembre 1992, en l'adaptant aux modifications d'affectation des parcelles survenues entre temps (remises en culture). 40 relevés ont été réalisés. Outre les paramètres concernant la végétation, des descriptions précises concernant les états de surface du sol et des prélèvements de sol pour analyse texturale, chimique et biologique ont été effectués. Les échantillons de sol ont été analysés par le laboratoire d'écologie de l'ENS Paris-Ulm. Enfin, des mesures radiométriques sur les principaux constituants stationnels (herbacées plus ou moins denses, ligneux et sols nus) ont été effectuées au moyen d'un radiomètre CIMEL 3 de simulation des capteurs SPOT.

L'étude sur les jachères (au niveau du SSCE comme à celui du degré carré - voir *infra*) a été conduite principalement par Eric DELABRE (1993) et a donné lieu à la rédaction d'un rapport de DESS réalisé à l'ENGREF de Montpellier.

Deux typologies distinctes ont été réalisées : la première, fondée sur les *caractéristiques structurales*, est destinée à la mise en relation avec les données satellitaires. Elle peut contribuer à constituer les bases de la spatialisation dans le cadre du programme HAPEX. La seconde a pour objectif de mettre en évidence les relations entre la *dynamique* du couvert végétal, les facteurs environnementaux et l'âge des jachères.

Le résultat de ces classifications a par ailleurs été exposé au colloque AGU (*American Geophysical Union*) à San Francisco en décembre 1993 (DELABRE et d'HERBÈS, 1993).

2.2.3. Inventaire et typologie des formations végétales de plateau

Devant la diversité des structures de végétation observées sur les plateaux latéritiques, une étude spécifique des conditions environnementales déterminant ces structures a été initiée en 1992, en complément d'études fonctionnelles portant sur quelques bandes d'une brousse tigrée bien structurée (alternance régulière de bandes de végétation et de sol nu). Elle a vu son plein développement en 1994 avec la réalisation d'un mémoire de stage traitant d'une part des relations entre pente des plateaux, états de surface et structures, d'autre part des possibilités de reconnaissance de formes de végétation par traitement numérique de photos aériennes scannées, d'image SPOT panchromatique (résolution 10 m) et de SPOT multispectral (résolution 20 m). Cette étude a porté sur l'ensemble des plateaux du SSCE (DELBAERE, 1994).

La méthodologie de terrain utilisée fait là encore appel à des transects, centripètes (des bordures aux centres des plateaux), avec détermination pour chaque unité traversée de la pente, mesurée à l'aide d'un niveau, des principaux états de surface conditionnant la nature et l'intensité du ruissellement, et du type de la formation végétale correspondante. Une trentaine de transects, de 500 m à quelques km de longueur, ont ainsi été traités.

Le traitement d'image a permis de tester le logiciel OASIS mis au point par l'équipe de GIRARD à l'INA-PG, et adapté à cette utilisation spécifique par FRANCOUAL (1994), dans le cadre d'un stage effectué à l'unité de traitement d'image de l'ORSTOM-AGRHYMET à Niamey.

L'objectif de l'ensemble de ces travaux sur la végétation des plateaux est triple :

- = classer l'ensemble des plateaux du degré carré en unités fonctionnelles du point de vue hydrologique et échanges avec l'atmosphère, afin de fournir une base raisonnable d'extrapolation des mesures au sol réalisées dans le cadre d'HAPEX-Sahel ;
- = valider sur un gradient pluviométrique les hypothèses ayant conduit à la proposition d'un modèle rendant compte de la genèse de la brousse tigrée, mis au point par THIÉRY, d'HERBÈS et VALENTIN (1994) ;
- = fournir aux forestiers des critères d'aménagement et de gestion adaptés au fonctionnement de ces formations particulières.

2.2.4. Les facteurs anthropiques responsables de la dynamique des paysages : défrichement, pâturage et récolte de bois

L'objectif du programme HAPEX au niveau international est d'évaluer la contribution et l'influence des grands biomes terrestres et océaniques à la circulation atmosphérique générale. L'étude de la modification de cette circulation dans le cadre des « changements globaux » est implicitement ou explicitement inscrite dans le programme. A ce titre, il est évident que les effets rétroactifs entre la modification de la nature du couvert végétal et le climat entrent pleinement dans la problématique générale. Cette évolution des états de surface est, à court et moyen termes, déterminée dans les zones arides et semi-arides, par l'impact des activités anthropiques. Celles-ci sont à leur tour influencées par les niveaux de production des ressources, en parallèle avec un accroissement de la population. Les systèmes d'exploitation des ressources se modifient progressivement pour répondre à cette évolution, initiant un cycle de rétroactivité entre utilisation de l'espace et disponibilité des ressources.

Par ailleurs, l'échantillonnage dans le cadre du programme HAPEX-Sahel privilégiant une approche par type d'occupation du sol (*land use*), il semblait nécessaire de se doter des moyens de prévoir l'évolution de cette occupation du sol, en étudiant les facteurs intervenant dans la modification de la nature et de la proportion des différentes unités paysagères.

Afin de quantifier les effets des activités anthropiques sur les unités paysagères du SSCE, une série d'études a donc été lancée en 1991 et s'est poursuivie avec des intensités variables jusqu'en 1994. Ces études concernent :

a) **La proportion de champs et de jachères**, ainsi que l'historique de la mise en culture des parcelles actuellement soumises à la rotation champ-jachère. D'abord sur photographies aériennes (couvertures des années 1950, 1975 et 1992), pour déterminer l'emprise globale de la zone cultivée sur les terroirs du SSCE, l'étude s'est ensuite attachée à préciser, sur des transects en rayon à partir de quelques villages installés plus ou moins anciennement, l'historique de l'utilisation de chacune des parcelles recoupées.

L'un des objectifs de cette analyse est de déterminer les relations entre les mises en culture et la structure du terroir en termes de proportion d'unités paysagères, en particulier d'après l'importance relative de terres facilement cultivables (sols sableux, légers). Ceci implique la superposition des informations cartographiques issues de la télédétection et des informations provenant des enquêtes sur le terrain, dans le cadre d'un système d'information géographique en cours de réalisation.

Un deuxième objectif est de déterminer l'évolution des temps moyens de jachère depuis 40 ans, et d'en déduire l'évolution prévisible de la couverture végétale moyenne dans l'avenir.

b) **L'impact du pâturage** sur les formations végétales naturelles (brousse sur plateaux) ou anthropisées (cultures et jachères). Les études comportent plusieurs niveaux emboîtés :

- au niveau de l'ensemble du SSCE, des comptages d'animaux sont réalisés aux points d'eau, tous les deux mois, par un observateur revenant deux jours dans le mois au même point. Les points d'eau sont ré-échantillonnés avant chaque période de comptage, afin de tenir compte de l'évolution des disponibilités en points d'abreuvement au cours des saisons (mares éphémères, temporaires, puisards, puits traditionnels, forages). L'information est complétée si nécessaire par des enquêtes auprès des bergers (généralement Peuls) et des chefs de village. L'objectif est d'obtenir une image évolutive au cours des saisons de l'effectif et de la nature du cheptel, ainsi que sa distribution sur l'ensemble du SSCE. Ces comptages ont été réalisés en 1992 et 1993.

- au niveau de trois terroirs, des suivis des circuits de pâturage de différents troupeaux (bovins ou petits ruminants) ont été réalisés, reportés sur la carte d'occupation des terres, afin de préciser par saison les unités paysagères les plus utilisées par les animaux. Le circuit comprend la mesure du temps passé sur chacune des unités traversées.

- au niveau des individus, durant le suivi des circuits de pâturage, quelques animaux font l'objet d'un suivi individuel pour la détermination des espèces ou groupes d'espèces les plus appréciés. La méthode de suivi fait appel à des enregistrements sur magnétophones des activités de l'animal avec mention des espèces touchées (d'HERBÈS, 1988) L'objectif de cette détermination est de quantifier au niveau des unités paysagères l'impact précis des activités animales au niveau spécifique afin de prédire l'évolution tant qualitative que quantitative de la production végétale.

Ces études concernant la densité et la répartition des animaux sur le site central, indépendamment des éclairages qu'elles apportent sur le fonctionnement des unités paysagères, ont eu des incidences appréciables sur des programmes connexes venus bénéficier de cette base de données : citons le programme « mares » (DESCONNETS *et al*, dans ce même volume), qui a pu orienter son échantillonnage en fonction des chiffres de fréquentation des points d'eau, et apprécier l'impact de l'abreuvement sur le bilan hydrologique de certaines mares suivies. Citons également le programme concernant l'azote atmosphérique, qui a pu profiter en partie de ce suivi animal pour spatialiser des données ponctuelles (Sophie GÉNÈRMONT, programme DECAFE). Mentionnons enfin l'arrivée en 1993 de l'ILCA (International Livestock Center for Africa) qui utilise une partie de l'information générée pour l'intégrer dans son programme d'étude des « transferts horizontaux de fertilité ».

c) **La quantification des prélèvements de bois** pour les usages domestiques. Au niveau du village de Banizoumbou en 1991 et 1992, puis de plusieurs autres implantations humaines en 1994, un suivi de la quantité de bois utilisée par les ménages a été réalisé, en confiant des balances et des cahiers à une dizaine d'enfants scolarisés (d'HERBÈS, 1988). Leur mission était de noter non seulement la quantité, mais aussi la nature, la provenance et la destination de tout le bois quotidiennement récolté et consommé dans leurs familles. La quantité de bois prélevée et vendue et exportée à titre commercial pour l'approvisionnement de Niamey est déduite des registres de contrôle tenus à l'entrée de la ville, qui semblent relativement fiables malgré l'inévitable fraude. Elle concerne surtout les formations végétales de plateau, alors que les prélèvements villageois se font en grande partie aux dépens des jachères, dans un rayon de 3 à 6 km autour des villages.

d) **Synthèse des informations** : le bilan paysager

L'ensemble des données, provenant soit de la quantification des ressources existantes, soit de la quantification des prélèvements, est destiné à alimenter un système d'information géographique, pour des superpositions et des croisements ultérieurs. Le SIG, actuellement en cours d'élaboration, intègre l'ensemble des données cartographiques réalisées sur le SSCE : pédologique, géomorphologique et états de surface. L'analyse des données doit conduire à un bilan paysager, permettant d'interpréter les formations végétales et les états de surface actuellement observés en fonction des deux séries de facteurs principaux régissant leur évolution : les précipitations et la redistribution de l'eau dans les unités paysagères, et les activités anthropiques.

2.3. Le niveau régional (degré carré : 10^4 km²)

Les actions de recherche entreprises au niveau du degré carré sont directement orientées vers un objectif de spatialisation des données obtenues à l'échelle des WABs puis des « Supersites ». Il ne s'agit pas seulement d'une extrapolation, à de vastes surfaces, des résultats obtenus sur les stations élémentaires : la nature des processus, de même que la nature des documents disponibles, exige de procéder à des simplifications, des agglomérations d'unités qui gardent cependant un sens à l'échelle envisagée (ici 1/200 000).

Quatre sous-programmes ont été réalisés au niveau régional :

- 1 - la cartographie des états de surface à l'échelle 1/200 000 à l'aide des scènes satellitaires SPOT ;
- 2 - le suivi décadaire durant l'hivernage 1992 d'environ 100 points situés à proximité immédiate des pluviographes du réseau EPSAT, avec enregistrements des observations phénologiques et mesures radiométriques (CIMEL3) sur les principaux constituants stationnels (HASSANE, 1992 ; KOUBOURA, 1992 ; LASSINA, 1993) ;
- 3 - la réalisation de 30 relevés supplémentaires sur des jachères, complétant et enrichissant la typologie réalisée au niveau du SSCE (DELABRE, 1993 ; AHONON, 1993) ;
- 4 - la réalisation de transects sur des formations végétales de plateau différentes de celles mesurées sur le SSCE . L'inventaire de ces formations dépasse même au nord et au sud les limites du degré carré, afin de prendre en compte un gradient pluviométrique plus important.

Les méthodes utilisées pour l'ensemble de ces sous-programmes ne diffèrent pas de celles utilisées au niveau du SSCE.

Les cartographies ont été délivrées en 1992 (à partir des images 1988 ; COURAULT, d'HERBÈS et VALENTIN, 1990 ; COURAULT *et al*, 1991 ; d'HERBÈS *et al*, 1992) et en 1994 (d'HERBÈS, VALENTIN et MOUGENOT, 1994 ; d'HERBÈS et VALENTIN, en prép.) à la base de données HSIS au LERTS à Toulouse.

La « spatio-carte des états de surface du degré carré de Niamey » réalisée en 1992 est le résultat d'une classification supervisée directement effectuée sur l'ensemble des six images SPOT d'octobre 1988 nécessaires pour couvrir la zone d'étude, à partir de deux campagnes d'apprentissage puis de validation de terrain.

Les cartes remises à la base HSIS en 1994 sont le résultat de l'extrapolation de la carte 1/50 000 réalisée sur le site SSCE (LOIREAU et d'HERBÈS, 1993 ; 1994), adaptée au 1/200 000 à l'aide de la totalité des informations recueillies sur l'ensemble du degré carré.

Trois cartes ont été réalisées à partir de ces informations, correspondant à des niveaux de simplification croissants : la première carte comporte une classification en 16 classes, chacune accompagnée de données quantitatives précisant le recouvrement des différents constituants au sol (strates de végétation, états de surface) et livrant le résultat d'une modélisation des coefficients d'infiltration (ou de ruissellement) probable à l'échelle du pixel considéré (20 x 20 m). Ces 16 classes ont été regroupées en 9 classes puis en 6 classes, de manière à fournir une cartographie la plus proche possible des besoins des physiciens de l'atmosphère (d'HERBÈS et VALENTIN, en prép.).

Le reste des données est encore en cours de traitement à l'heure actuelle. Nous renvoyons le lecteur intéressé aux diverses sources d'information et publications mentionnées pour plus d'informations concernant les résultats.

DEUXIÈME PARTIE : QUELQUES RÉSULTATS

I. NIVEAU STATIONNEL

Le suivi décadaire durant l'hivernage 1992 a permis de déterminer un certain nombre de caractéristiques phyto-écologiques de la station « jachères » instrumentée pour les mesures micro-météorologiques et hydrologiques.

1.1. Caractéristiques stationnelles

La jachère choisie ne fait plus l'objet de défrichement depuis 9 ans en 1992.

Située à plusieurs kilomètres du village, elle appartient au « réservoir foncier » du terroir de Banizoumbou, mis en culture sporadiquement au gré des années pluviométriques et des disponibilités en main-d'œuvre. Le site n'est pas considéré comme très productif par les cultivateurs, qui considèrent que le sol reste « trop sec » en surface, limitant ainsi l'installation du mil.

Elle se situe sur une zone de dépôts éoliens anciens remaniés durant la période sèche la plus récente (20 000 - 12 000 ans), et conserve l'héritage d'un modelé dunaire : des dépressions interdunaires allongées, à populations de ligneux denses et hauts, entourent des zones sableuses aplanies au recouvrement ligneux plus faible.

Le recouvrement ligneux moyen sur l'ensemble de la station a été mesuré par la somme de la projection des couronnes des arbustes au sol : il atteint 17 % en 1992.

Les termitières aplanies marquent également la physionomie de la station. Des mesures effectuées sur images scannées, confirmées par des transects au sol, donnent un recouvrement de 20 % de zones de sol nu à croûtes d'érosion décourageant toute installation de la végétation, sous forme de taches aréolaires de 5 à 10 m de diamètre, pouvant s'anastomoser pour former des chemins préférentiels d'écoulement des eaux, sur de courtes distances.

La station est peu pâturée, comme en témoigne l'important matériel herbacé sec sur pied en fin de saison sèche. Elle fait par contre l'objet d'un prélèvement de bois régulier.

1.2. La strate ligneuse

Essentiellement constituée par *Guiera senegalensis* (306 individus/ha, 89 %), elle comprend également trois autres Combrétacées : *Combretum micranthum* (27/ha, 7,8 %), *C. aculeatum* (2/ha) et *C. glutinosum* (1/ha). *Boscia senegalensis* (8/ha) complète l'inventaire, pour une population totale ligneuse de 344 individus/ha (BOUREIMA, 1993).

La répartition des tiges par classe de diamètre montre une nette dominance des tiges de diamètre > 4 cm, pour une surface terrière (somme des surfaces des sections de tiges par ha) de 5,7 m².

Classes de diamètre(cm)	0-1	1-2	2-4	> 4
Surface terrière (m ² /ha)	0,03	0,22	1,34	4,14

La hauteur moyenne des individus se situent autour de 2,50 m (49,4 % entre 2 et 3 m), avec une majorité d'individus de taille inférieure (0,5-1 m : 17,5 % ; 1-2 m : 32 %) et quelques individus de taille supérieure (3-4 m : 14,5 % ; 4 % > 4 m). Cette répartition rend compte de la dynamique du peuplement ligneux impliquant le recrutement de jeunes individus, issus de graines ou de multiplication végétative, très active chez *G. senegalensis*.

Le suivi saisonnier montre également une intense activité au niveau des rejets du *G. senegalensis*, phénomène qui explique en grande partie le succès de cet arbuste dans les jachères de l'ensemble de la zone : d'un total de 1 790 tiges par hectare en début de campagne (juin 1992), on aboutit à 3 856 tiges en fin de saison (octobre). Ces rejets disparaissent pour la plupart durant la saison sèche.

L'ensemble des paramètres mesurés durant la saison 1992 est en cours de traitement, pour être versé à la base HSIS.

1.2. La strate herbacée

Trente et une espèces herbacées ont été recensées sur la station durant l'hivernage 1992 : 10 graminées (Poacées : 9 annuelles et une pérenne), 7 légumineuses (Fabacées) et 14 autres espèces (tableau 1). Les graminées représentent 80 % du recouvrement total herbacé durant toute la saison, mais elles se succèdent néanmoins dans le temps de manière spectaculaire (figure 1) : la dynamique de la production herbacée s'en trouve évidemment affectée.

La saison est marquée par l'apparition de l'espèce dominante *Aristida mutabilis* qui trouve son maximum de développement fin août pour disparaître abruptement. Elle est relayée à ce moment-là par *Ctenium elegans*, haute graminée dépassant 1 m à maturité (épiaison), accompagnée à moindre titre par deux autres graminées, *Eragrostis elegans* et *Diheteropogon hagerupii*.

La biomasse mesurée à chaque décade n'est donc que le bilan net entre l'apparition et la disparition de ces différentes espèces. Cette biomasse atteint un maximum fin septembre (1 250 kg/ha). La quantité effectivement produite par la strate herbacée est largement supérieure, comme on peut l'estimer à travers la somme des accroissements de fréquence pour chaque espèce entre deux points de mesure (figure 2).

2. NIVEAU SECTORIEL (le Super Site Central Est)

2.1. L'utilisation des terres

La zone d'étude subit une évolution marquée depuis plusieurs décennies, passant progressivement d'une utilisation pastorale extensive dominante à une utilisation agro-pastorale, voire nettement agricole, orientée vers l'agriculture vivrière à base de la culture du mil et du niébé. Ceci apparaît clairement sur la figure 3, qui retrace l'évolution des surfaces soumises à l'agriculture (champs et jachères, de forme géométrique), à partir de l'analyse des photos aériennes des années 1950 (vol AOF), 1975 (vol IGN) et des images satellitaires de 1991. L'étude a porté sur les deux terroirs concernés par le programme Hapex sur le SSCE, Banizoumbou et Tondo Kiboro. Banizoumbou est un petit terroir (2 785 ha) comportant peu de plateaux, donc une forte proportion de sols aisément cultivables, alors que Tondi Kiboro a une surface double (5 975 ha) mais un pourcentage important de plateaux, eux-mêmes actuellement en cours de défrichement. L'espace cultivable se sature donc petit à petit, ce qui modifie graduellement les paysages dans le sens d'une aridification croissante (défrichement, encroûtement, baisse de fertilité, diminution de l'activité biologique, etc.). La conséquence en est que les modèles basés sur le type d'occupations des terres observés actuellement n'auront pas forcément de validité dans quelques années, la proportion des différents types d'occupation des terres modifiant la nature des flux horizontaux (hydrologie de surface, flux de matière et de gènes) et verticaux (flux énergétiques et hydriques modifiés par l'augmentation de sols nus).

2.2. La cartographie des états de surface au 1/50 000

Nous ne ferons que reprendre ici les conclusions de l'étude présentée par ailleurs par LOIREAU et d'HERBÈS (1993 ; 1994), c'est-à-dire les principales caractéristiques de la carte du SSCE.

Le tableau 2 présente la légende de la carte d'occupation des terres au 1/50 000 du Supersite Central Est ainsi obtenue.

Les éléments les plus caractéristiques de chacune des classes apparaissent en caractères gras. Les taux de recouvrement sont codifiés selon les classes données dans le tableau 3. Les codes des espèces recensées au cours de la cartographie sont explicités en annexe 1.

Tableau 3. Codification des classes de recouvrement

Classes de recouvrement (%)	[0-5[[5-10[[10-15[[15-25[[25-50[[50-75[[75-90[[90-100[
Codes	1	2	3-1	3-2	4	5	6	7

A titre d'exemple, H6L2 se lit donc de la façon suivante : 75 à 90 % d'herbacées et 5 à 10 % de ligneux (GODRON *et al*, 1968). La codification est la même pour les recouvrements des différents microhorizons affleurants.

L'examen de cette légende montre que, fin septembre 1992, les recouvrements herbacés ne sont jamais inférieurs à [25-50 %[, les recouvrements ligneux jamais supérieurs à [25-50 %[, les microhorizons affleurants sableux jamais inférieurs à [25-50 %[et les microhorizons affleurants argileux jamais supérieurs à [25-50 %[.

En ce qui concerne les unités paysagères décrites, cinq types des champs cultivés et six types de jachères sont distingués, plateaux et nuages exclus.

La distribution spatiale sur une surface totale de 63 088 ha est la suivante :

- Totalité des **jachères** : 53.8 %
 - + avec recouvrement ligneux > 15 % : 30.6 %;
 - + avec recouvrement ligneux compris entre 10 et 15 % : 13.5 %;
 - + avec recouvrement ligneux < 10 % : 9.5 %.
- Totalité des **champs cultivés** : 24.4 %
 - + avec un couvert herbacé dense : 19 %;
 - + avec un couvert herbacé faible : 5.3 %.
- Totalité des **plateaux** (et des nuages) : 19.8 %

2.3. Discussion

La classification proposée ici est instantanée, c'est-à-dire qu'elle ne rend compte que d'un état des lieux de la mosaïque du paysage à un moment donné (fin de saison des pluies 1992).

Cependant, les unités cartographiques, telles qu'elles ont été situées et définies (à l'échelle de la parcelle) sur cette première carte d'occupation des terres en saison des pluies 1992, ont une grande mouvance intersaisonnière et interannuelle (voir première partie, §1.1).

Cette mobilité, ou variabilité temporelle des objets cartographiques, multiplie le nombre d'unités cartographiques différenciables à un moment donné.

Une analyse multidade est donc en cours pour rendre compte quantitativement et qualitativement de cette variabilité dans le temps. Pour ce faire, des images SPOT de 1988, 1990, 1991, 1992 (février, juin, août, septembre et octobre) et 1993 sont disponibles ainsi que des relevés de terrain réalisés en saison sèche 1991, en août 1992 et octobre 1993.

Ces difficultés d'identification des unités cartographiques seront également contournées lorsque seront discriminés non plus des parcelles, mais des ensembles de parcelles (unités paysagères majeures), avec une indication en pourcentage de ses différentes composantes (jachères/champs/végétation naturelle).

La carte, à l'heure actuelle, n'est en fait qu'une spatio-carte, autrement dit, son unité élémentaire reste le pixel. L'étape suivante consiste à réaliser une carte d'occupation des terres réelle, c'est-à-dire avec des ensembles cartographiques identifiés et délimités. Pour ce faire, il faut résoudre un problème méthodologique majeur : celui de la « moyenne » ou du transfert d'échelle. Le problème est lié à la télédétection (passage d'un ensemble de pixels SPOT à un pixel NOAA ?), mais aussi au caractère des éléments cartographiés. C'est l'objet d'un stage en cours (FRANCOUAL, 1994), dont l'objectif est de définir automatiquement des unités paysagères à l'aide du logiciel 'OASIS' créé à l'INA-PG : un ensemble de pixels sont rassemblés dans une classe d'ordre supérieur sur la base de critères de densité relative des pixels de différentes classes d'ordre inférieur.

L'usage immédiat de cette carte comme base de spatialisation des données localisées du programme HAPEX-SAHTEL est à considérer avec précaution suivant les remarques exposées ci-dessus. C'est sous sa forme numérique qu'elle sera nécessairement utilisée par les chercheurs participant au programme HAPEX désireux d'extrapoler et spatialiser leurs données. Les comptes numériques ont été, à cet effet, versés à HSIS début 1994. Une version sur support papier peut être obtenue sur demande au centre ORSTOM Niamey, unité télédétection.

Son utilisation dans la poursuite des travaux du groupe phyto-écologie de Niamey, dans le cadre du programme SALT, est multiple, en particulier pour :

- la quantification et la qualification des ressources sur le SSCE ; des mesures de biomasses effectuées en saison des pluies 1992 seront replacées sur la carte.
- la superposition de cartes thématiques « production » et « prélèvements » à différentes échelles.
- l'analyse spatiale des structures paysagères.

3. NIVEAU RÉGIONAL

3.1. Typologie des jachères du degré carré

72 jachères ont été échantillonnées sur le degré carré dont 40 sur le site central Est. Les mesures effectuées ont été rappelées dans le § 2.2.2. Les données ont fait l'objet d'un traitement statistique (classification ascendante hiérarchique, analyse des composantes principales) sous le logiciel ADDAD.

Les quelques résultats évoqués ici sont extraits du mémoire de DELABRE (1993) et de la présentation de DELABRE et d'HERBÈS (1993) au colloque AGU.

a) Il existe une forte liaison entre la durée de mise en jachère et la position dans la toposéquence. En effet, on peut observer une diminution du temps de repos le long de la toposéquence, entre 8 et 9 ans sur les jupes et moins de 5 ans dans les bas-fonds. Ce constat s'explique par les différences de productivité des milieux, en fait de la capacité de cicatrisation face à une perturbation (défrichage et mise en culture) influencée en grande partie par les conditions hydriques stationnelles.

b) La biomasse augmente le long d'un gradient d'âge (figure 4) ainsi que le long de la toposéquence (figure 5). Cependant, la liaison évoquée entre ces deux facteurs crée un biais dans l'échantillonnage. En effet, les stades les plus âgés se situent sur les positions hautes (jupes), expliquant ainsi en partie la chute de la courbe de la figure 4. L'autre facteur est l'exploitation de ces milieux, laissés plus longtemps en repos, pour l'approvisionnement en bois de feu.

c) Une typologie des jachères, fondée sur des critères de structure, a été proposée (tableau 4). Les descripteurs utilisés sont :

- Géo pour unité géomorphologique (1 : plateau ; 2 : jupe ; 3 : glacis ; 4 : bas-fond et 5 : dune),
- Age pour l'âge de la jachère (ici moyenne par classe, en année),
- Li pour le taux de recouvrement des ligneux (projection au sol des houppiers) exprimé en m²/ha,
- Her pour le taux de recouvrement des herbacées, obtenu par la méthode des points quadrats (exprimé en %),
- Hh pour la hauteur du tapis herbacé (exprimé en cm),
- Gt pour la surface terrière exprimé en m²/ha,
- Ero, ST1, ST2, ST3, ALG et DES pour le recouvrement des différents états de surface du sol définis par CASENAVE et VALENTIN (1989), exprimé en classes (1 : 0-10 %, 2 : 10-20, 3 : 20-30 %, 4 : 30-40 %, 5 : 40-50 %, 6 : 50-60 %, 7 : 60-70 %, 8 : 70-80 %, 9 : 80-90 % et 10 : 90-100 %).

Les résultats ont été simplifiés en six classes synthétiques qui apparaissent dans le tableau 4. On peut leur attribuer les correspondances suivantes en termes de dynamique successionnelle par type de milieu :

- 1 : stade jeune sur milieu peu dégradé,
- 2 : stade intermédiaire sur milieu favorable,
- 3 : stade intermédiaire sur milieu dégradé,
- 4 : stade âgé sur milieu favorable,
- 5 : stade âgé sur milieu dégradé,
- 6 : stade le plus âgé sur milieu fragile et très exploité.

Cette typologie a été utilisée pour affiner les classifications des images satellitaires, chacun des relevés étant soigneusement positionné sur les scènes SPOT acquises en septembre et octobre 1992. La précision des inventaires ainsi que les relevés radiométriques effectués sur chaque constituant stationnel permet d'envisager la construction et la validation d'indices de végétation au niveau de l'ensemble des six images SPOT couvrant le degré carré.

3.2. Cartographie des états de surface du degré carré de Niamey

Seule la dernière classification réalisée sur l'ensemble du degré carré sera présentée ici. Elle succède à une première classification réalisée en 1990 à partir des images SPOT d'octobre 1988 et versée à la base HSIS en 1992 (d'HERBÈS *et al*, 1992).

La carte des états de surface réalisée à partir des scènes satellitaires acquises en septembre 1992 a été réalisée en utilisant plusieurs sources d'information résumées dans les différentes communications présentées durant la période (COURAULT *et al*, 1990 ; 1991 ; d'HERBÈS *et al*, 1992 ; 1994 ; LOIREAU et d'HERBÈS, 1993 ; 1994).

La légende présentée dans le tableau 5 est le résultat d'une classification en 16 classes, pour lesquelles on s'est efforcé de donner des informations chiffrées concernant les recouvrements des différents constituants au sol, et d'en déduire un fonctionnement hydrologique superficiel (d'HERBÈS et VALENTIN, *submitted*). Cette classification a été simplifiée en 9 puis 6 classes informées de la même manière.

Là encore, les documents proposés sont le résultat de l'exploitation d'une partie seulement des travaux réalisés sur l'écologie des paysages du Sahel nigérien. Ne sont pas encore intégrés, en particulier, les résultats des travaux réalisés sur les formes de végétation contractées sur plateaux, dont l'étude du fonctionnement et la reconnaissance sur images satellitaires ont été initiées par DELBAERE (1994) et FRANCOUAL (1994).

Les cartes n'expriment donc qu'une étape des synthèses des connaissances qu'il est possible de représenter spatialement à l'échelle régionale. L'objectif final de l'ensemble des études mises en œuvre sur la zone d'études est de fournir un mode de représentation spatial qui puissent rendre compte à la fois des dynamiques spatiales et temporelles des unités paysagères.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AHONON D., 1993, *Evolution de la structure ligneuse le long d'un gradient successional dans les jachères du Sahel nigérien*. Mémoire ingénieur agronome, université de Niamey : 30 p.
- AMBOUTA K.J.M., 1984, *Contribution à l'édaphologie de la brousse tigrée de l'Ouest nigérien*. Thèse de docteur-ingénieur, université de Nancy : 116 p.
- BA M., 1991, *Etude des jachères de quelques terroirs du Sahel nigérien à Banizoumbou*. Mémoire de DESS « Gestion des systèmes agro-sylvo-pastoraux en zones tropicales », univ. Paris XII Val-de-Marne : 32 p. + annexes.
- CASENAVE A. & VALENTIN C., 1989, *Les états de surface de la zone sahélienne : influence sur l'infiltration*. Ed. ORSTOM : 229 p.
- CLOS-ARCEDUC M., 1956, *Etude sur photographies aériennes d'une formation végétale sahélienne : la brousse tigrée*. *Bulletin de l'IFAN, série A, (7) 3*, 677-684.
- COURAULT D., D'HERBES J.M. & VALENTIN C., 1990, *Caractérisation spectrale des principales organisations de la surface des sols du Niger*. In J. POUGET ed. *Caractérisation et suivi des milieux terrestres en région aride et tropicale*. Compte rendu des II^e Journées de télédétection, Bondy, 4-6 décembre 1990. ORSTOM éditions, Paris : 39-47.
- COURAULT D., D'HERBES J.M., VALENTIN C. & REMY D., 1991, *Etude de la variabilité spatiale du comportement hydrodynamique des sols au Niger à partir d'images satellitaires*. *Proceedings of the 5th International Colloquium - Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*. Courchevel, France, 14-18 janvier 1991 : 601-604.
- DELABRE E., 1993, *Une typologie structurale des jachères à Guiera senegalensis du Sud-Ouest nigérien*. Mémoire DSPU, ENGREF, Montpellier « Formation forestière supérieure pour les régions chaudes », CIHEAM/IAMM, ORSTOM, Niamey : 56 p.
- DELABRE E. & D'HERBES J.M., 1993, *A typology of fallow lands over the Hapex-Sahel degree square*. Colloque AGU (American Geophysical Union), San Francisco, 6-10 décembre 1993.
- DELBAERE E., 1994, *Identification de la structure des écosystèmes forestiers contractés sahéliens par télédétection aérienne et satellitaire. Facteurs déterminant ces structures*. Mémoire fin d'études ISTOM, Cergy-Pontoise : 75 p.
- DESCONNETS J.C., LEBEL T. & TAUPIN J.D. (this issue), *Bilan hydrologique de surface durant la période de suivi à long terme de Hapex-Sahel à partir du suivi de mares temporaires sur une zone test de 600 km²*.
- DOUBOU K. M., 1992, *Télédétection de la production primaire d'une zone sahélienne : radiométrie au sol des différents états de surface*. Mémoire d'ingénieur, Centre régional de télédétection de Ouagadougou (CRTO) & ORSTOM, Niamey : 25 p. + annexes.

- FORMAN T.T.R. & GODRON M., 1981, Articles patches and structural components for a landscape ecology. *Biological Science*, 31: 733-740.
- FRANCOUAL T., 1994, *Etude des organisations d'un paysage sahélien en relation avec la dynamique temporelle et spatiale des états de surface par télédétection*. Mémoire ingénieur agronome, INA-Paris/grignon, Orstom, Niamey : 43 p.
- GODRON M., (1965), Application de la théorie de l'information à l'étude de l'homogénéité et de la structure de la végétation. *Oecologia Plantarum*, 1 : 187-197.
- GODRON M., DAGET P., EMBERGER L., LE FLOC'H E., POISSONET J., SAUVAGE C. & WACQUANT J.P., 1968, *Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu*. Editions du CNRS, Paris, 169 p.
- GONDARD P., 1988, *Des cartes, discours pour une méthode. Cartographie de l'utilisation actuelle des sols et des paysages végétaux dans les Andes équatoriennes*. Ed. ORSTOM, Collection « Etudes et Thèses » : 156 p.
- HASSANE A., 1992, *Comportement spectral des éléments dans les unités stables du degré carré de Niamey*. Mémoire d'ingénieur, Centre régional de télédétection de Ouagadougou (CRTO) & ORSTOM, Niamey : 35 p.
- D'HERBES J.M., 1988, *Analyse agro-écologique des systèmes de production pour le développement rural intégré des zones arides, Chili, IV^e Région. II - Deuxième partie : Recherche et développement dans les communautés agricoles*. Coopération UNESCO-MAB France-Chili/CEFE-CNRS/université du Chili : 255 p.
- D'HERBES J.M. & VALENTIN C., (en prép), Surface conditions of the Niamey region (Niger): spatial distribution, ecological and hydrological implications. (soumis à *J. of Hydrology*).
- D'HERBES J.M., COURAULT D., VALENTIN C. & TIMOUK F., 1992, *Spatio-carte des états de surface du degré carré de Niamey*. ORSTOM, HAPEX-Sahel Information System, LERTS, Toulouse : 1 carte.
- D'HERBES J.M., VALENTIN C. & MOUGENOT B., 1994, *Spatio-cartes des états de surface du degré carré de Niamey, échelle 1/200 000, scènes du 25 septembre 1992*. ORSTOM, HAPEX-Sahel Information System, LERTS, Toulouse : 3 cartes.
- HUETE A. (1986), Separation of soil plant spectral mixtures by factors analysis. *Rem. Sens. Env.*, 19, 237-251.
- KARIMOU B.H., 1992, *Dynamique saisonnière de la strate ligneuse le long d'un gradient successional dans les jachères du Sahel nigérien*. Mémoire d'ingénieur, fac. d'agronomie, univ. de Niamey & ORSTOM, Niamey : 35 p. + annexes.
- LOIREAU M., 1993, *Dynamique d'un paysage sahélien au Niger. Bilan paysagé entre la production primaire et l'utilisation des ressources par les groupes sociaux. Caractérisation de l'espace et des ressources à l'aide de la télédétection spatiale haute résolution*. Mémoire de DEA « Espaces et Sociétés », univ. Paul Valéry, Dépt. de géographie humaine & ORSTOM, Niamey : 123 p.
- LOIREAU M. & D'HERBES J.M., 1993, *Mapping of land features over the Hapex-Sahel East Central Super Site*. Colloque AGU (American Geophysical Union), San Francisco, 6-10 décembre 1993.
- LOIREAU M. & D'HERBES J.M., 1994, *Cartographie des unités d'occupation des terres du Super Site Central Est (Banizoumbou) du programme Hapex-sahel*. X^e Journées hydrologiques de l'ORSTOM, 13-14-09-1994, Montpellier : 307-319.
- LONG G., 1974, *Diagnostic phyto-écologique et aménagement du territoire. Tome I : principes généraux et méthodes*. Masson : 252 p.

- MONTENY B., GALLE S., TAUPIN J.D., BESSEMOULIN P. & CHANZY A., 1993, *Hapex-Sahel : East Central Super Site integrated study*. Colloque AGU (American Geophysical Union), San Francisco, 6-10 décembre 1993.
- OUATTARA L., 1992, *Etude des relations pluviométrie-phénologie-production dans la zone sud-ouest du Sahel nigérien*. Mémoire d'ingénieur, fac. d'agronomie, univ. de Niamey & ORSTOM, Niamey : 40 + annexes.
- RABIOU M., 1993, *Dynamique saisonnière de la strate herbacée le long d'un gradient successional dans les jachères du Sahel nigérien*. Mémoire d'ingénieur, fac. d'agronomie, univ. de Niamey & ORSTOM, Niamey : 44 + annexes.
- SEGHIERI J., GALLE S. & RAJOT J.L., 1994, *La brousse tigrée dans le sahel nigérien : étude de la cofluctuation du stock hydrique et de la végétation annuelle*. X^e Journées hydrologiques de l'ORSTOM, 13-14-09-1994, Montpellier : 509-541.
- TANDIA T., 1991, *Utilisation de l'espace et des ressources pastorales dans quelques terroirs villageois du Sahel nigérien*. Mémoire de DESS « Gestion des systèmes agro-sylvo-pastoraux en zones tropicales », univ. Paris XII Val-de-Marne : 29 p. + annexes.
- THIERY J., D'HERBES J.M. & VALENTIN C. (IN PRESS), A model simulating the genesis of banding patterns in Niger. *J. of Ecology* (avril 1995).

Tableau 1. Liste des espèces recensées, par décade, sur le WAB Jachère du Super Site Central Est durant l'hivernage 1992 (d'après RABIOU, 1993).

FAMILLE	ESPECES	DECADES									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
POACEAE	<i>Aristida adscensionis</i>	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	<i>Digitaria gayana</i>				*	*	*	*	*	*	*
	<i>Digitaria horizontalis</i>				*	*	*	*	*	*	*
	<i>Sporobolus</i> spp							*	*	*	*
	<i>Eragrostis tremula</i>						*	*	*	*	*
	<i>Ctenium elegans</i>								*	*	*
	<i>Diheterepogon hagerupii</i>									*	*
	<i>Dactyloctenium aegyptium</i>						*	*	*		
	<i>Andropogon gayanus</i>		*	*	*	*	*	*	*	*	*
	<i>Cenchrus biflorus</i>					*	*	*	*	*	*
FABACEAE	<i>Alysicarpus ovalifolius</i>			*	*	*	*	*	*	*	*
	<i>Cassia mimosoides</i>	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	<i>Indigofera</i> spp				*	*	*	*	*	*	*
	<i>Ipomea involucrata</i>						*	*	*	*	*
	<i>Ipomea vagans</i>	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	<i>Tephrosia linearis</i>				*						
	<i>Zornia glochidiata</i>					*	*	*	*	*	*
CONVOLVULAC.	<i>Merremia pinnata</i>	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
COMMELINAC.	<i>Commelina forskalaei</i>	*	*	*	*	*	*	*			
CYPERACEAE	<i>Killinga squamilata</i>							*	*		
	<i>Fimbristylis</i> spp			*	*	*	*	*	*	*	*
	<i>Cyperus rotundus</i>								*	*	*
	<i>Spermacoce stachydae</i>			*		*	*	*	*	*	
RUBIACEAE	<i>Mitracarpus scaber</i>			*	*	*	*	*	*	*	
LILIACEAE	<i>Dipcadi</i> spp		*		*						
PEDALIACEAE	<i>Corchorus tridens</i>				*	*					
	<i>Ceratotheca sesamoïdes</i>							*		*	
EUPHORBIAC.	<i>Phyllanthus pentandrus</i>						*	*	*	*	
	<i>Euphorbia aegyptia</i>								*	*	
STERCULIAC.	<i>Waltheria indica</i>		*	*	*	*	*	*	*	*	
CARYOPHYLL.	<i>Polycarpea</i> spp								*	*	

Nomenclature suivant B. PEYRE de FABRÈGUES, 1979 : « Lexique des plantes du Niger », IEMVT, INRAN.

Tableau 2. Légende de la carte des états de surface au 1/50 000 du Super Site Central Est (d'après LOIREAU et d'HERBÈS,1993)

No Unité	OCCUPATION DU SOL	FORMATION VÉGÉTALE	SOL NU			SURFACE DU SOL			ESPECES DOMINANTES HERBACÉES LIGNEUSES		GEOMORPHOLOGIE	SURFACE (ha)	
1	Champs de mil	herbacée dense	H6	L2	< 25	encroûtée sableuse	C3 S5	LIT2	mil/ ms, ii, ce	Gs, CG/ PR, AA, PA	système alluvial : bas-fonds, terrasses sur 2 et 3 ^e niveaux cuirassés	12 012 764	
2	Champs mil/niébé	herbacée claire	H4	L1	> 50	sableuse	C2 S7		mil, niébé/ fib	Gs/ AA, DM	système alluvial : bas-fonds	764	
3	Champs de cultures associées ou polyculture	herbacée claire	H4	L1	> 50	sableuse	C2 S7		mil, niébé, oseille/ ms, ii, iv, an	Gs, CG/ PR, AA, PA, As	dépôts sableux éoliens : mi-versant, bas de versant et modelés dunaires	1 297	
4	Champs de mil ou mil/niébé dominants	herbacée claire	H4	L1	> 50	sableuse	C2 S7		mil, niébé/ oseille, fib	Gs/ AA, DM	dépôts sableux éoliens : mi-versant, bas de versant et modelés dunaires	1 298	
5	Champs de mil peu ou pas préparés (défriche, sarclage)	herbacée claire	H4	L2	> 50	sableuse	C1 S7		ms, cb/ mil, an, ii, iv	Gs, CG/ AA	dépôts sableux éoliens mi-versant, bas de versant et modelés dunaires	1 266	
6	Jachères récentes pouvant être semées (mil)	herbacée assez dense	H5	L1	25-50	encroûtée	C5 S6		ms, mil, al, ii, cb	Gs/ CG, CM	dépôts sableux éoliens : versants peu pentus et dunes	1 653	
7	Jachères récentes ou peu anciennes	ligneuse claire herbacée	H5	L3-1	< 25	sableuse encroûtée	C3 S6		diversifiée : ms, al, cb, wi, zg, cm, et	Gs, CG/ PR, PA	dépôts sableux éoliens sur terrasses alluviales ou versants	5 252	
8	Jachères récentes ou peu anciennes	ligneuse claire herbacée	H5	L3-1	25-50	sableuse encroûtée	C3 S6		ce/ al, cb, et, wi	Gs, CG/ PR, AA, PA, As	dépôts sableux éoliens sur terrasses alluviales ou versants	3 258	
9	Jachères récentes ou peu anciennes à fort couvert herbacé	herbacée dense	H6	L2	< 25	sableuse encroûtée	C3 S6		diversifiée : wi, cb, ms, et, ii, iv	Gs, CG/ PR, AA, PA	dépôts sableux éoliens sur terrasses alluviales ou versants	4 520	
10	Jachères anciennes	ligneuse assez dense herbacée	H5	L3-2	< 25	sableuse encroûtée	C3 S6 LIT1		diversifiée : al, ce, ms, cb, wi, ao, spe	Gs, CG/ PR, CN, CM, PA	dépôts sableux éoliens : versants peu pentus et dunes	17 988	
11	Jachères anciennes à fort couvert ligneux	ligneuse dense	H4	L4	< 25	encroûtée	C4 S4 LIT2		très diversifiée : al, et, dg, ce, cm, iv, cb, wi, ms	Gs, CG/ CN, CM	dépôts sableux éoliens : versants peu pentus et dunes	1 292	
12	Plateaux non cultivés		NON CLASSÉS									premier niveau cuirassé	11 976
13	Nuages		NON CLASSÉS										502

Tableau 4. Résultats de la typologie des jachères du degré carré de Niamey (d'après DELABRE 1993).

Classe	Géo	Age	Li	Her	Hh	Gt	Ero	ST1	ST2	ST3	Alg	DES
1	3-5	2 ans	1 000	78	20	1,1	2	1	8	2	1	1
2	5-3	3-4 ans	1 300	84	50	1,5	1	2	9	1	1	1
3	2-3	3-4 ans	990	69	25	1,4	4	1	4	3	1	1
4	5-4	5 ans	4 650	58	30	2,9	2	2	8	1	1	1
5	2-3	> 5 ans	1 260	74	20	1,7	2	3	5	1	2	1
6	2	> 10 ans	570	58	15	1,1	2	2	8	1	1	1

Tableau 5. Légende de la spatio-carte des états de surface du degré carré de Niamey (images SPOT de septembre 1992).
Simplification en 16 classes (d'après d'HERBÈS VALENTIN et MOUGENOT, 1994).

Couleur	N° d'unité	Caractéristiques générales dominantes	Encroûtement superficiel dominant	Végétation			Utilisation dominante
				type	recouvrement par strate		
					ligneux (%)	herbacée (%)	
rouge vif	1	Végétation dense sur plateaux	LIT/ST1 alg	fourrés, bois	> 50		sylvo-pastorale
gris	2	Végétation claire sur plateaux	LIT/ST1 alg	fourrés	20-50	< 10	sylvo-pastorale
vert clair	3	Sol nu sur plateaux	G/ERO	nulle	0	0	
bordeaux	4	Niveaux cuirassés secondaires	G/ERO/ST3	steppe arbustive très claire	≤ 10	≤ 15	pâtures
bleu ciel	5	Hauts de versant Chanfreins	ERO	steppe arbustive très claire	≤ 10	< 5	nulle
violet	6	Dépôts sableux éoliens	DES/ST2	savane arbustive dense	25-50	25-50 (≥ 7 ans)	jachère ancienne
marron foncé	7	Versants sableux Dunes	DES/ST2	savane arbustive assez dense	15-25	50-75 (≥ 7 ans)	jachère ancienne
vert foncé	8	Dépôts sableux éoliens	DES/ST2	savane arbustive assez claire	10-15	> 75	jachère ancienne à herbacée dense
bleu-vert	9	Dépôts sableux éoliens	DES/ST2	savane arbustive herb. haut > 25cm	10-15 50-75	50-75	jachère peu anc. (3-7 ans)
vert gazon	10	Dépôts sableux éoliens	DES/ST2	savane arbustive herb. bas < 25cm	5-10	50-75	jachère peu anc. (3-7 ans)
marron	11	Dépôts sableux éoliens	DES/ST2	savane très claire herbacée dense	< 5	50-75	jachère récente (≤ 3 ans) qqfois semé
marron clair	12	Dépôts sableux éoliens	DES/ST2/ST3	mil	< 5	25-50	champs
jaune	13	Dépôts sableux éoliens	DES/ST2	mil/niébé	< 5	15-25	champs
rose/mauve	14	Bas-fonds	DES/ST2	mil/assez dense peu sarclé	< 5	50-75	champs
blanc	15	Bas-fonds	DES/DEC	mil/ sorgho/niébé	< 5	15-25	champs
bleu roi	16	Eau libre					

LÉGENDE DES FIGURES

- Figure 1** Évolution des recouvrements des principales espèces graminéennes sur le WAB Jachère du Super Site Central Est durant l'hivernage 1992. On note en particulier le remplacement de *Aristida adscencionis* (aa) par *Ctenium elegans* (ce) durant le mois d'août, ainsi que l'apparition tardive de *Diheteropogon hagerupii* (dih) et de *Eragrostis tremula* (et). *Digitaria gayana* (dg) reste présente durant presque toute la saison (d'après BOUREIMA, 1993).
- Figure 2** Dynamique saisonnière de la production herbacée. En noir apparaissent les sommes des fréquences contacts des espèces, proportionnelles à la biomasse sur pied, en blanc le cumul des fréquences décadaires, exprimant la production cumulée sur la saison. La biomasse au pic de production correspondant à environ 1 250 kg MS/ha, la production cumulée sur la saison atteint 2,1t MS/ha (d'après RABIOU, 1993).
- Figure 3** Évolution des superficies soumises à l'emprise des cultures (champs et jachères) depuis 1950 à nos jours, dans les terroirs de Banizoumbou et de Tondi Kiboro, SSCE. A droite sont reportées les superficies totales des deux terroirs : Banizoumbou apparaît presque saturé par les mises en culture (> 75 %), Tondi Kiboro beaucoup moins (50 %), en raison d'une plus forte proportion de plateaux cuirassés (d'après BA, 1991).
- Figure 4** Évolution du phytovolume de l'arbuste moyen en fonction de l'âge de la jachère, calculé à partir de l'inventaire de 72 relevés sur l'ensemble du degré carré de Niamey (d'après DELABRE, 1993).
- Figure 5** Phytovolume de l'arbuste moyen en fonction de la position dans la toposéquence. La vitesse moyenne de récupération, traduite par la taille des arbustes, apparaît nettement plus rapide sur les cordons dunaires et dans les bas-fonds (d'après DELABRE, 1993).

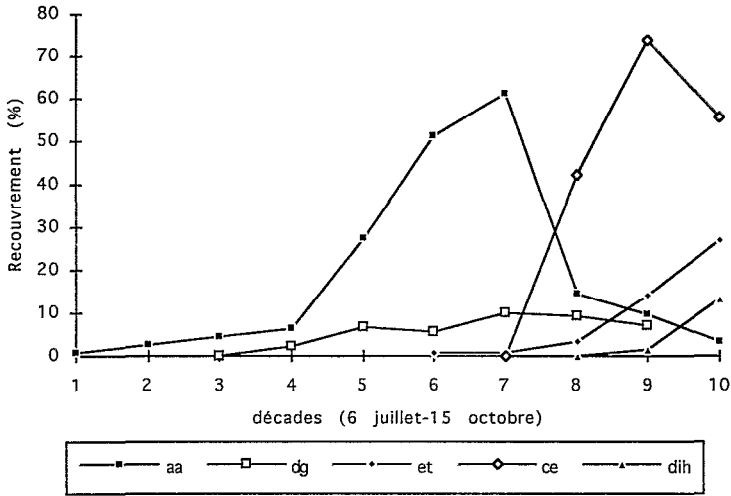


Figure 1. Évolution des recouvrements des principales espèces graminéennes sur le WAB Jachère du Super Site Central Est durant l'hivernage 1992. On note en particulier le remplacement de *Aristida adscensionis* (aa) par *Ctenium elegans* (ce) durant le mois d'août, ainsi que l'apparition tardive de *Diheteropogon hagerupii* (dih) et de *Eragrostis tremula* (et). *Digitaria gayana* (dg) reste présente durant presque toute la saison (d'après BOUREIMA, 1993).

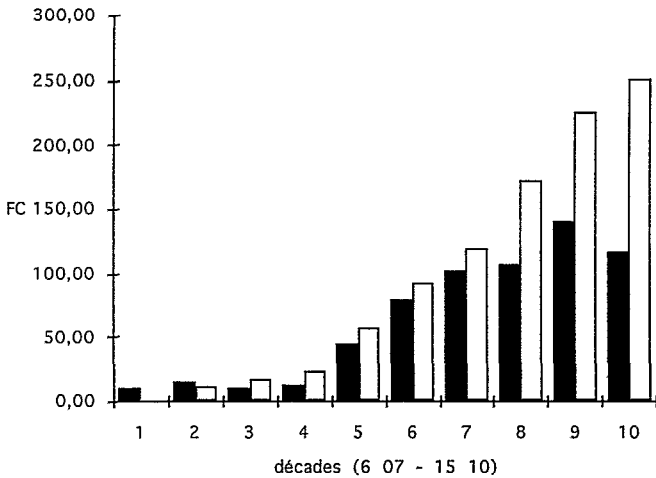


Figure 2. Dynamique saisonnière de la production herbacée. En noir apparaissent les sommes des fréquences contacts des espèces, proportionnelles à la biomasse sur pied, en blanc le cumul des fréquences décadaires, exprimant la production cumulée sur la saison. La biomasse au pic de production correspondant à environ 1 250 kg MS/ha, la production cumulée sur la saison atteint 2,1t MS/ha (d'après ΡΑΒΙΟΥ, 1993).

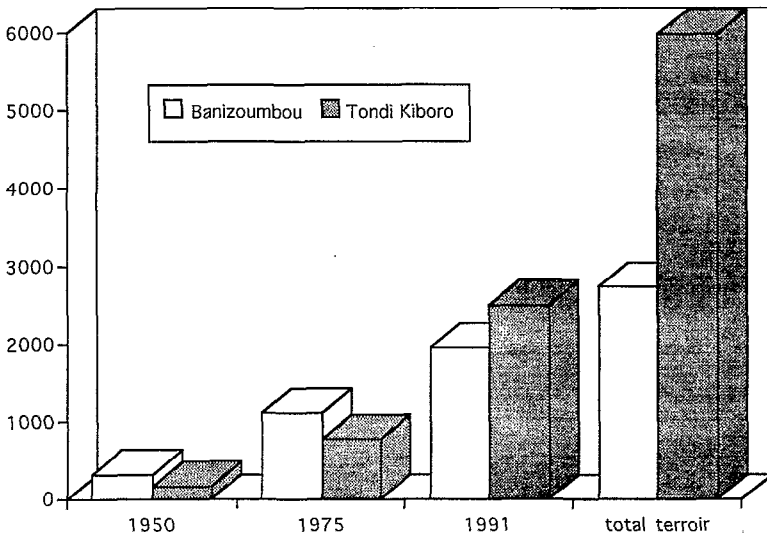


Figure 3. Évolution des superficies soumises à l'emprise des cultures (champs et jachères) depuis 1950 à nos jours, dans les terroirs de Banizoumbou et de Tondi Kiboro, SSCE. A droite sont reportées les superficies totales des deux terroirs : Banizoumbou apparaît presque saturé par les mises en culture (> 75%), Tondi Kiboro beaucoup moins (50 %), en raison d'une plus forte proportion de plateaux cuirassés (d'après BA, 1991).

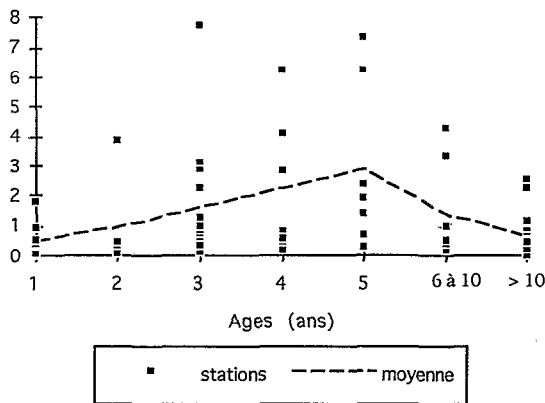


Figure 4. Évolution du phytovolume de l'arbuste moyen en fonction de l'âge de la jachère, calculé à partir de l'inventaire de 72 relevés sur l'ensemble du degré carré de Niamey (d'après DELABRE, 1993).

ANNEXE 1

LISTE DES ESPÈCES DE LA CARTE D'OCCUPATION
DES TERRES DU SSCE AU 1/50 000

Code	Nom latin	Nomenclature (1)
AA	<i>Acacia albida</i>	Del.
AX	<i>Acacia ataxacantha</i>	DC
AN	<i>Acacia nilotica</i>	(L.) Willd.
an	<i>Andropogon gayanus</i>	Kunth.
aa	<i>Aristida adscensionis</i>	L.
al	<i>Aristida longiflora</i>	Sch. et Thon.
am	<i>Aristida mutabilis</i>	Trin.
ag	<i>Aristida pallida</i>	Steud.
Al	<i>Azadirachta indica</i>	A. juss.
br	<i>Borreria radiata</i>	DC.
Ba	<i>Boscia angustifolia</i>	A. Rich.
Bs	<i>Boscia senegalensis</i>	(Pers.) Lam.
cm	<i>Cassia mimosoïdes</i>	L.
CS	<i>Cassia sieberiana</i>	DC
cb	<i>Cenchrus biflorus</i>	Roxb.
ch	<i>Chrozophora broccchiana</i>	Vis.
CG	<i>Combretum glutinosum</i>	Perr.
Cm	<i>Combretum micranthum</i>	G. Don.
CN	<i>Combretum nigricans</i>	Lepr. ex Guill. et Perr.
ce	<i>Ctenium elegans</i>	Kunth.
et	<i>Eragrostis tremula</i>	Hochst.
Ga	<i>Gardenia sokotensis</i>	Hutch.
Gs	<i>Guiera senegalensis</i>	J.F. Gmel.
HT	<i>Hyphaene thebaïca</i>	Mart.
jt	<i>Jacquemontia tamnifolia</i>	Vahl.
ms	<i>Mitracarpus scaber</i>	Zucc.
PR	<i>Piliostigma reticulatum</i>	(DC.) Hochst.
PA	<i>Prosopis africana</i>	(G. et Perr.) Taub.
se	<i>Schizachyrium exile</i>	Stapf.
sg	<i>Schoenefeldia gracilis</i>	Kunth.
SB	<i>Sclerocarya birrea</i>	(A. Rich.) Hochst.
wi	<i>Waltheria indica</i>	L.
zg	<i>Zornia glochidiata</i>	Reichb.

(1) D'après J. BERHAUT, Flore du Sénégal, Editions CLAIRAFRIQUE, Dakar.

ORSTOM Éditions
Dépôt légal : novembre 1995
Micro-édition Impression
Orstom Bondy

Diffusion
32, avenue Henri Varagnat
F-93143 Bondy Cedex
ISBN : 2-7099-1278-3

Photos de couverture :

*À gauche, équipement hydrométrique
sur une mare du degré carré Hapex-Sahel.*

Cliché : Jean-Christophe DESCONNETS

*Au centre, ballon captif utilisé
pour le suivi de la couche limite.*

Cliché : Thierry LEBEL

*À droite, végétation caractéristique
de la région de Niamey : brousse tigrée.*

Cliché : Jean-Christophe DESCONNETS