

**CONVENTION PARTICULIÈRE  
0066 92 01121 00 230 75 01/49  
(HAPEX-SAHEL)**

**RAPPORT TECHNIQUE FINAL**

**J.C. Desconnets, S. Galle, T. Lebel, C. Leduc, B. Monteny, M. Sicot**

1996

## Avant propos

La convention signée en 1991 entre le Ministère de la Coopération et l'ORSTOM s'inscrit dans le cadre de la lettre de la Mission de Coopération et d'Action Culturelle de l'Ambassade de France au Niger, n°2109/PT 451/AEN du 24/8/89, relative au Projet HAPEX - SAHEL (Hydrological and Atmospheric Pilot Experiment, expérience au Sahel). Elle visait à permettre l'insertion des partenaires nigériens dans toutes les phases de ce programme scientifique international de grande ampleur et à offrir l'occasion aux équipes scientifiques nationales de s'impliquer dans des recherches de niveau international. A cette occasion, ces équipes nigériennes ont pu s'équiper en matériel de mesure et de traitement de données (confère le rapport établi par ailleurs sur ce sujet en accompagnement des certificats de conformité délivré par la MCAC de Niamey) et collaborer concrètement avec les équipes ORSTOM partenaires.

Le financement fourni comportait trois rubriques :

- 1 - Un appui concernant les projets de recherches des équipes Nigériennes impliquées dans les différents groupes thématiques de HAPEX-Sahel;
- 2 - Un appui aux activités du Comité Exécutif de HAPEX-Sahel-92 qui a supervisé la réalisation de l'expérience.
- 3 - Une participation à l'acquisition de moyens communs.

Le présent rapport concerne le premier point, les activités développées sur les deuxième et troisième points étant essentiellement d'ordre logistique et organisationnel. Le rapport est organisé comme suit. On rappelle d'abord les objectifs d'ensemble et ceux particuliers à chacun des sept avenants signés avec les instituts nigériens. Un bilan des activités pour chaque grand thème d'étude (Hydrologie de surface et souterraine, Humidité des sols, Météorologie) est ensuite dressé. Les principaux acquis, tant au plan scientifique qu'à celui de la participation des équipes nigériennes sont récapitulés en conclusion.

Une édition définitive du plan d'expérience accompagne ce rapport. Trois autres ouvrages<sup>1</sup> sont en cours de réalisation, auxquels pourra se reporter le lecteur désireux d'obtenir des informations scientifiques plus détaillées.

---

1

*Hydrologie et Météorologie de Mésos-échelle dans HAPEX-Sahel : dispositif de mesures au sol et premiers résultats.* 1995. Éditions ORSTOM (hors collection).

*Actes des 10<sup>ème</sup> Journées Hydrologiques ORSTOM: Interactions surface continental- atmosphère, l'expérience HAPEX-Sahel.* Éditions ORSTOM (colloques et séminaires).

*Numéro spécial de Journal of Hydrology, en cours de préparation et à paraître en 1996.*

## **SOMMAIRE**

	<b>Page</b>
<b>1. RAPPEL SUR LES OBJECTIFS</b>	<b>1</b>
<b>2. LE PROGRAMME HYDROLOGIQUE</b>	<b>3</b>
<b>3. LE PROGRAMME DE SUIVI DE L'HUMIDITÉ DES SOLS</b>	<b>23</b>
<b>4. LE PROGRAMME MÉTÉOROLOGIQUE</b>	<b>33</b>
<b>5. BILAN D'ENSEMBLE</b>	<b>41</b>

## 1. RAPPEL SUR LES OBJECTIFS

Les objectifs de l'expérience HAPEX-Sahel étaient d'étudier les échanges continent-atmosphère en région tropicale sèche en vue d'améliorer la paramétrisation des modèles de climat (MCG) et de valider les méthodes d'extension spatiale à partir de données satellitaires (ou d'en développer de nouvelles). Ces objectifs, même s'ils sont importants pour le futur des écosystèmes sahéliens, ne constituent pas une préoccupation immédiate des pays concernés. Pour eux, les priorités ont plutôt trait à une meilleure évaluation et gestion des ressources en eau et à la mise au point de techniques d'optimisation des pratiques culturales dans un environnement où l'eau est le facteur limitant principal.

Il importait donc de faire en sorte que le projet HAPEX-Sahel ait également des retombées dans ces domaines, que ce soit en fournissant des équipements utiles à la surveillance de l'environnement ou en définissant avec les responsables nigériens certaines recherches finalisées à mener conjointement par des équipes des pays du nord et des équipes locales.

Le ministère de la coopération et l'ORSTOM ont monté l'opération la plus significative en ce sens, 3 millions de francs étant débloqués par la coopération française pour mettre sur pied des actions associant les institutions nigériennes intéressées et des équipes de l'ORSTOM. Trois grands domaines ont été identifiés: l'hydrologie, l'eau dans les sols et l'agronomie, et enfin la météorologie.

En hydrologie, deux partenaires nigériens ont été impliqués : la Direction des Ressources en Eau (DRE) et le Département de Géologie de l'Université de Niamey. Du côté de l'ORSTOM<sup>2</sup>, plusieurs chercheurs ont été mobilisés afin de couvrir les trois grandes composantes du cycle de l'eau, précipitations, eaux de surface et eaux souterraines. Compte tenu des particularités de l'hydrologie sahélienne, l'objectif central de ce programme était de comprendre comment fonctionnent les systèmes endoréiques qui collectent le ruissellement de surface et comment s'effectue la recharge de l'aquifère supérieure, dite du CT3, qui constitue la ressource en eau principale de la région. Trois avenants à la convention ont été signés pour définir les actions à mener sur ce volet hydrologique. Les travaux effectués et les résultats obtenus sont décrits dans la section 2 de ce rapport.

Dans le domaine des relations eau-sol-plante, les aspects agronomiques, pour lesquels trois programmes de recherche avaient été initialement prévus, ont finalement été très peu traités, du fait de la défection des équipes nigériennes concernées à la Faculté d'Agronomie et à l'INRAN (Institut National de Recherche Agronomique Nigérien). Les activités se sont donc concentrées sur la question de la dynamique de l'eau dans les sols, son utilisation par les plantes n'étant qu'un des facteurs pris en compte. Il faut cependant noter que ce programme a donné naissance à une recherche associant actuellement l'INRAN et l'ORSTOM, concernant les dynamiques conjointes de l'eau et de la végétation sur les plateaux

---

<sup>2</sup>La Direction de la Météorologie du Niger (DMN) a également participé au volet hydrologique d'HAPEX-Sahel à travers l'expérience EPSAT-Niger et sur des financements extérieurs à la présente convention.

de brousse tigrée. L'autre partenaire nigérien concerné sur ce volet a été l'Institut de Radio-Isotopes (IRI). Deux avenants à la convention ont été signés pour définir les actions à mener pour caractériser la dynamique de l'eau dans les sols sahéliens et étudier la variabilité spatio-temporelle des teneurs en eau de la zone non saturée. Les travaux effectués et les résultats obtenus sont décrits dans la section 3 de ce rapport.

Les phénomènes météorologiques influent à plusieurs échelles sur l'hydrologie et l'utilisation de l'eau par les plantes. Tout d'abord à l'échelle synoptique, où se créent les facteurs favorables, ou non, au développement de la convection et donc à l'apparition des précipitations. Ensuite, aux échelles intermédiaires, dites "moyennes", où s'organise la convection, ce qui conditionne à la fois l'abondance et la répartition spatio-temporelle des pluies. Enfin, à l'échelle locale, l'utilisation par les plantes de l'eau disponible dans les sols est régie par le bilan radiatif, lui-même fonction du couvert végétal. Ces trois échelles ont été couvertes dans le cadre de cette convention. L'échelle moyenne a surtout fait l'objet de travaux initiés par l'expérience EPSAT-Niger soutenue également par le ministère de la coopération, mais sur un autre financement. Quelques résultats sont mentionnés à propos du volet hydrologique d'HAPEX-Sahel, car c'est à ce niveau que se perçoivent le mieux les conséquences de la distribution des pluies au sein des systèmes convectifs. L'échelle synoptique et l'échelle locale ont fait chacune l'objet d'une action de recherche, menée l'une dans le cadre d'un avenant DMN- Météo-France, l'autre dans le cadre d'un avenant INRAN-ORSTOM. Les travaux effectués et les résultats obtenus sont décrits dans la section 4 de ce rapport. On trouvera enfin en section 5 un récapitulatif des principaux acquis des actions menées lors de l'exécution de cette convention.

#### REFERENCES

- Goutorbe, J.P., T. Lebel, A. Tinga, P. Bessemoulin, J. Brouwer, H. Dolman, E.T. Engman, J.H.C. Gash, M. Hoepffner, 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' *Annales Geophysicae*, Vol. 12, p. 53-64.
- Prince, S., Y.H. Kerr, J.P. Goutorbe, T. Lebel, A. Tinga, P. Bessemoulin, J. Brouwer, H. Dolman, E.T. Engman, J.H.C. Gash, M. Hoepffner, P. Kabat, B. Monteny, F. Saïd, P. Sellers and J. Wallace (1995) 'Geographical, biological and remote sensing aspects of the Hydrologic Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel (HAPEX-SAHEL)'. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 51, p. 215-234.

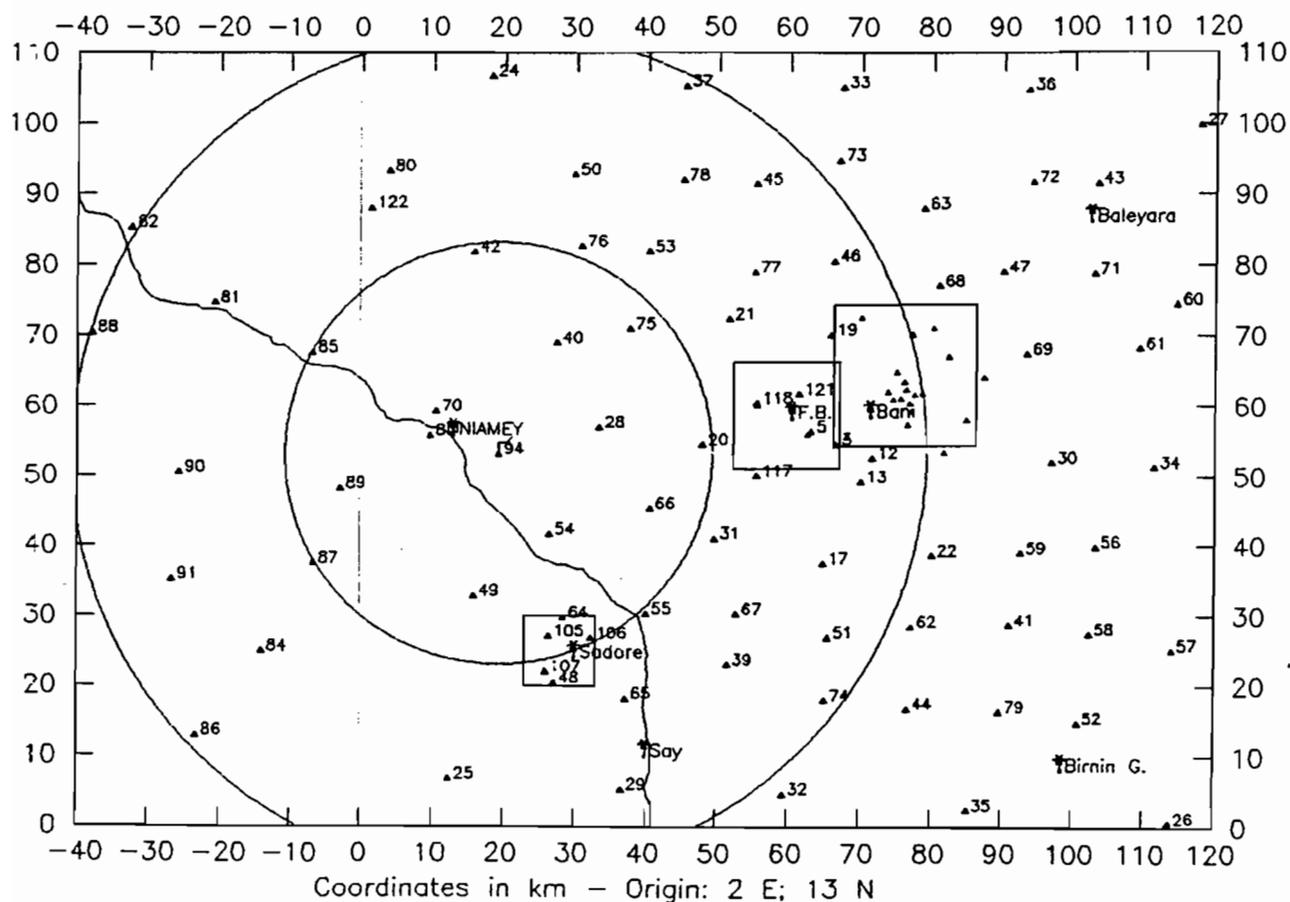


Figure 2.1. Le réseau de 107 pluviographes installé en 1992. Ce réseau se composait: 1) d'un réseau de base de 72 stations réparties régulièrement sur le degré carré proprement dit ( $12,000 \text{ km}^2$ ), c'est à dire espacées de  $12,5 \text{ km}$  en moyenne; 2) d'une cible sur le grand site central ( $875 \text{ km}^2$ ) regroupant 6 stations du réseau de base et 23 stations supplémentaires, soit une densité moyenne de 1 appareil pour  $30 \text{ km}^2$ ; 3) d'une cible sur le site Sud ( $100 \text{ km}^2$ ), regroupant 3 stations du réseau de base et 2 stations supplémentaires, soit une densité moyenne de 1 appareil pour  $20 \text{ km}^2$ ; 4) d'une extension du réseau de base sur la partie ouest du degré carré (environ  $6000 \text{ km}^2$ ), regroupant 10 stations. Les coordonnées sont en km, l'origine étant prise à  $13^\circ\text{N}; 2^\circ\text{E}$ .

## 2. LE PROGRAMME HYDROLOGIQUE

### 2.1 Motivations et objectifs

Les ressources en eau superficielles de la région sahélienne sont peu abondantes et difficiles à gérer du fait de la forte variabilité temporelle et spatiale des précipitations. La dégradation des réseaux hydrologiques est en outre à l'origine d'un mode particulier de redistribution des eaux d'écoulement: le drainage se fait avant tout vers des cuvettes endoréiques d'où l'eau stockée est recyclée par évaporation ou par infiltration profonde vers les nappes. Cette eau est utilisée intensivement en saison des pluies par les hommes et par le bétail, mais, du fait du caractère épisodique de ce stockage, les eaux souterraines demeurent la ressource la plus fiable et globalement la plus abondante. Peu de choses étaient connues,

lors du démarrage d'HAPEX-Sahel sur le bilan hydrologique des systèmes endoréiques de la région de Niamey et sur le rôle qu'ils jouaient dans la recharge de l'aquifère. Pour fournir les données permettant de répondre, au moins partiellement, à ces interrogations, un double programme de mesure a été conçu. D'une part une instrumentation spécifique a été mise en place: 107 pluviographes sur le degré carré étendu (16 000 km<sup>2</sup>, Fig. 2.1) et un suivi continu du niveau de quelques "mares échantillons" et de quelques puits, grâce à des enregistreurs numérisés (Fig. 2.2 et 2.3) . D'autre part un nombre beaucoup plus grand de mares et de puits ont été suivis sur la base de tournées périodiques. Ces différentes mesures étaient destinées à permettre le calcul du bilan hydrique sur une zone de référence de 600 km<sup>2</sup>, et à fournir les éléments pour une modélisation spatialisée de ce bilan à l'échelle du degré carré. On décrit ci-dessous les mesures réalisées sur les mares et sur la nappe du CT3, ainsi que certains résultats préliminaires du calcul des bilans. La partie pluviométrique a fait l'objet des rapports détaillés des campagnes EPSAT-Niger 1990 à 1993 et d'articles dont la liste est donnée en section 2.5.

## 2.2 Le programme de suivi des mares

### 2.2.1 Objectifs et démarche

Le principal objet du programme de suivi des mares a été 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 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 Km<sup>2</sup>

Le secteur d'observation couvre une surface de 20 X 30 km<sup>2</sup> (13° 29,21' - 13° 40,0' N en latitude et 2° 33,33' - 2° 50,0' E en longitude), incluant le Supersite central Est<sup>3</sup> et une partie du Supersite central Ouest ( Fig. 2.2). 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

<sup>3</sup>On se reportera au plan d'expérience fourni en annexe de ce rapport pour une description de l'ensemble du dispositif expérimental de HAPEX-Sahel

répétées sur le terrain ont permis de repérer ces sites. Au total c'est une soixantaine de mares qui ont été inventoriées à l'intérieur du secteur d'étude. On en trouvera la liste complète dans Desconnets et al. (1995a). Ce travail a été mené conjointement par une équipe ORSTOM et une équipe de la DRE, dans le cadre de l'avenant N°1 de la présente convention.

### 2.2.2 Dispositif expérimental

En 1991, seules quatre mares avaient été instrumentées et analysées. Elles constituaient a 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).

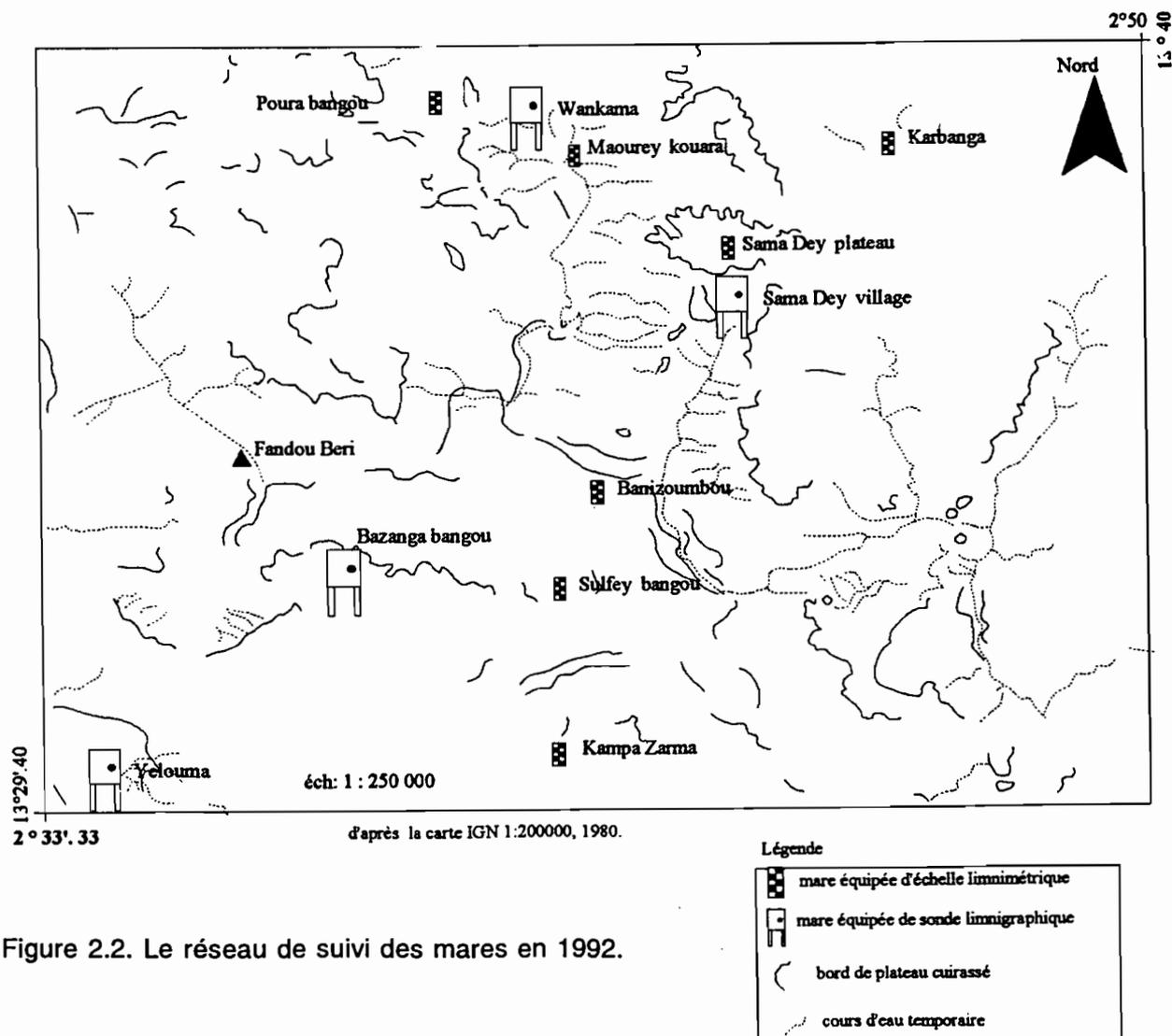


Figure 2.2. Le réseau de suivi des mares en 1992.

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 20x30 km<sup>2</sup> 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 km<sup>2</sup>.

Des études annexes ont été entreprises concernant 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.

#### ○ Mesures hydrométriques en continu

Les mares jugées les plus intéressantes ont été 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 pour 1991 et 1992 sont consignées dans le tableau 2-2. On remarquera que deux mares ont eu des interruptions de mesures, 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).

Tableau 2-1. Nom, position et instrumentation des sites étudiés.

nom	latitude Nord	longitude Est	situation	instrumentation	période de suivi 1992
Yelouma	13° 26 97	2° 30 80	cuvette	station CHLOE	voir Tab 2-2
Bazanga bangou	13°30 35	2° 35 11	plateau	station CHLOE	voir Tab 2-2
Poura bangou	13°38 71	2° 37 09	plateau	échelle limnimétrique	08.6 au 09.10
Kampa zarma	13°26 09	2° 38 33	plateau ensablé	échelle limnimétrique	02.6 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 Tab 2-2
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	08.6 au 09.10
Sulfey bangou	13° 30 03	2° 39 12	plateau	échelle limnimétrique	08.6 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 Tab 2-2
Massi koubou	13° 50 31	2°24 56	cuvette	station CHLOE	voir Tab 2-2
Sorey	13° 26 40	2° 14 11	ancien cours d'eau	station CHLOE	voir Tab 2-2

Tableau 2-2 : Périodes de fonctionnement des stations limnigraphiques 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
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	mare pérenne
Wankama	juillet à décembre	mai à août	arrêt en août 1992-suivi par lecture d'échelle
Yélouma	juin à novembre	juin à novembre	

### ○ Mesures hydrométriques 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 de 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 dans Desconnets et al., 1995a).

#### ○ 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 côte 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  $\mu$  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.

Des relevés ont été effectués 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 ce qui a permis de récolter 24 échantillons pour la mare de Bazanga, 26 pour la mare de Wankama et 18 pour la mare de Yélouma (tableaux A3-1, A3-2, A4-2 dans Desconnets et al., 1995a).

#### ○ 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

éaporée 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, A3-2, A3-3 et A3-4 de Desconnets et al. (1995a).

#### ○ 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. Ces bacs étaient remplis avec l'eau de chaque mare. Les volumes d'eau manquant étaient mesurés à chaque visite et le volume nécessaire était rajouté pour revenir au niveau initial. La lecture de la côte 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, on a obtenu 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 devaient 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 de Desconnets et al., 1995a donnent les détails de ce suivi pour 1992).

#### ○ Pluviométrie

L'existence du réseau pluviométrique EPSAT-Niger a été mis à profit pour estimer la pluviométrie sur les bassins versant 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., 1995a). On dispose généralement d'au moins un poste pluviométrique sur chaque bassin versant des sites étudiés.

#### ○ Photographie aérienne

Le bilan hydrologique à une échelle sub-régionale a été l'un des objectifs de cette étude. Compte tenu de la taille des mares (beaucoup ont un miroir de moins de 1000 m<sup>2</sup>), 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 spatialisation, 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;
- ⇒ des missions aériennes de suivi de 40 mares sur le secteur d'étude.

On trouvera un inventaire exhaustif de ces missions dans Desconnets et al. (1995a). 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 ( 6cm 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.

#### ○ 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 .

## ○ 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, en cours de dépouillement, 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.

### 2.3 Le programme de suivi des aquifères

#### 2.3.1 Objectifs

L'aquifère du CT3, dont l'éponte supérieure se situe à une profondeur variant de quelques mètres à 70 mètres constitue la principale ressource en eau de la région de Niamey, si on exclut bien entendu le fleuve Niger lui-même, dont l'eau n'est exploitable que dans ses environs immédiats. Le niveau de cet aquifère a beaucoup baissé dans les années soixante dix, en réponse à la longue période de sécheresse qui a démarré en 1968. Pour autant, la relation entre pluviométrie et recharge des aquifères en zone sahélienne est encore très mal connue, alors que sa compréhension est indispensable à une meilleure gestion des eaux souterraines.

Le réseau de pluviographes installé pour les expériences EPSAT-Niger et HAPEX-Sahel fournit une vision très détaillée de la pluie sur le degré carré de Niamey. Il représentait donc une opportunité unique d'étudier de manière approfondie la relation entre la distribution spatio-temporelle de la pluie et les fluctuations du niveau de l'aquifère du CT3, d'où le programme de suivi détaillé des aquifères mené dans le cadre d'HAPEX-Sahel et constitué de deux volets :

- 1) le repérage des puits de la rive gauche du fleuve (soit une zone de 7000 km<sup>2</sup> environ) et le nivellement d'un nombre suffisamment grand d'entre eux pour pouvoir tracer des courbes de niveau piézométriques fiables;
- 2) le suivi proprement dit, établi sur la période 1991-1993, avec un prolongement en 1994 et 1995 en dehors du cadre de la convention proprement dite, mais en utilisant les équipements acquis à cette occasion.

#### 2.3.2 Le repérage altimétrique des sites piézométriques

Pour pouvoir tracer des cartes piézométriques fiables, il importe de disposer d'un certain nombre de points de référence dont les altitudes soient connues avec précision. Jusqu'à présent, les seules données existantes étaient des nivellements barométriques dont les erreurs peuvent atteindre 5 à 10 m. Une telle incertitude réduit considérablement l'intérêt des documents élaborés ; ainsi, 80 % de la surface du degré carré au nord du fleuve a une piézométrie comprise entre 190 et 200 m.

Ce travail de nivellement était d'autant plus important que plusieurs singularités hydrogéologiques (creux et dépressions piézométriques) avaient été suggérées par les études des années soixante et reprises sans contrôle par les auteurs ultérieurs. Les nivellements ont été effectués par l'Institut Géographique National du Niger (IGN.N) pour le compte de l'ORSTOM et de la Direction des Ressources en Eau du Ministère de l'Hydraulique (avenant N°3 de la présente convention).

Parmi tous les puits cimentés du degré carré régulièrement visités lors des campagnes piézométriques, une sélection a été faite afin d'établir un maillage relativement régulier de la zone d'étude. L'essentiel des nivellements a été réalisé au cours de l'été 1992 parfois par nivellement classique, le plus souvent par système GPS. On aboutit ainsi à un total d'environ 80 points utiles. L'incertitude, variable selon l'éloignement des points de référence, est de 10 à 20 cm, ce qui est suffisant compte tenu des autres possibilités d'erreur. Afin de compléter et contrôler ces mesures, une deuxième campagne d'envergure beaucoup plus réduite a été menée en novembre 93. Elle a fourni 10 nouvelles altitudes.

On trouvera dans Leduc et Lenoir (1995) la liste des puits nivelés avec les indications des noms des villages, les coordonnées en degrés, minutes et centièmes de minute et les altitudes des margelles. Cette liste est classée par latitude croissante. Ces points connus pourront servir de base pour estimer l'altitude d'autres ouvrages intéressant d'autres études régionales (par exemple les forages des nappes plus profondes du CT2 ou du CT1) ou préciser la piézométrie à une échelle plus fine.

### 2.3.3 Le suivi piézométrique et géochimique de la nappe phréatique

Afin de connaître l'impact des précipitations sur la nappe phréatique et, ultérieurement, d'évaluer le taux de renouvellement des ressources en eaux souterraines, des mesures piézométriques et géochimiques ont été exécutées sur le degré carré au nord du fleuve de 1991 à 1994. Ce travail a été effectué en collaboration par la Direction des Ressources en Eau (DRE) du Ministère de l'Hydraulique et l'ORSTOM (avenant N°2 de la présente convention). Il s'est poursuivi en 1995, en dehors du cadre de la convention qui fait l'objet de ce rapport.

Le suivi piézométrique doit permettre de mieux appréhender les circulations souterraines, cerner les principales zones de recharge et évaluer la variabilité spatiale et temporelle des fluctuations de niveau de la nappe du Continental Terminal 3. L'hydrochimie est utilisée pour vérifier les hypothèses basées sur les observations hydrodynamiques et préciser certains processus.

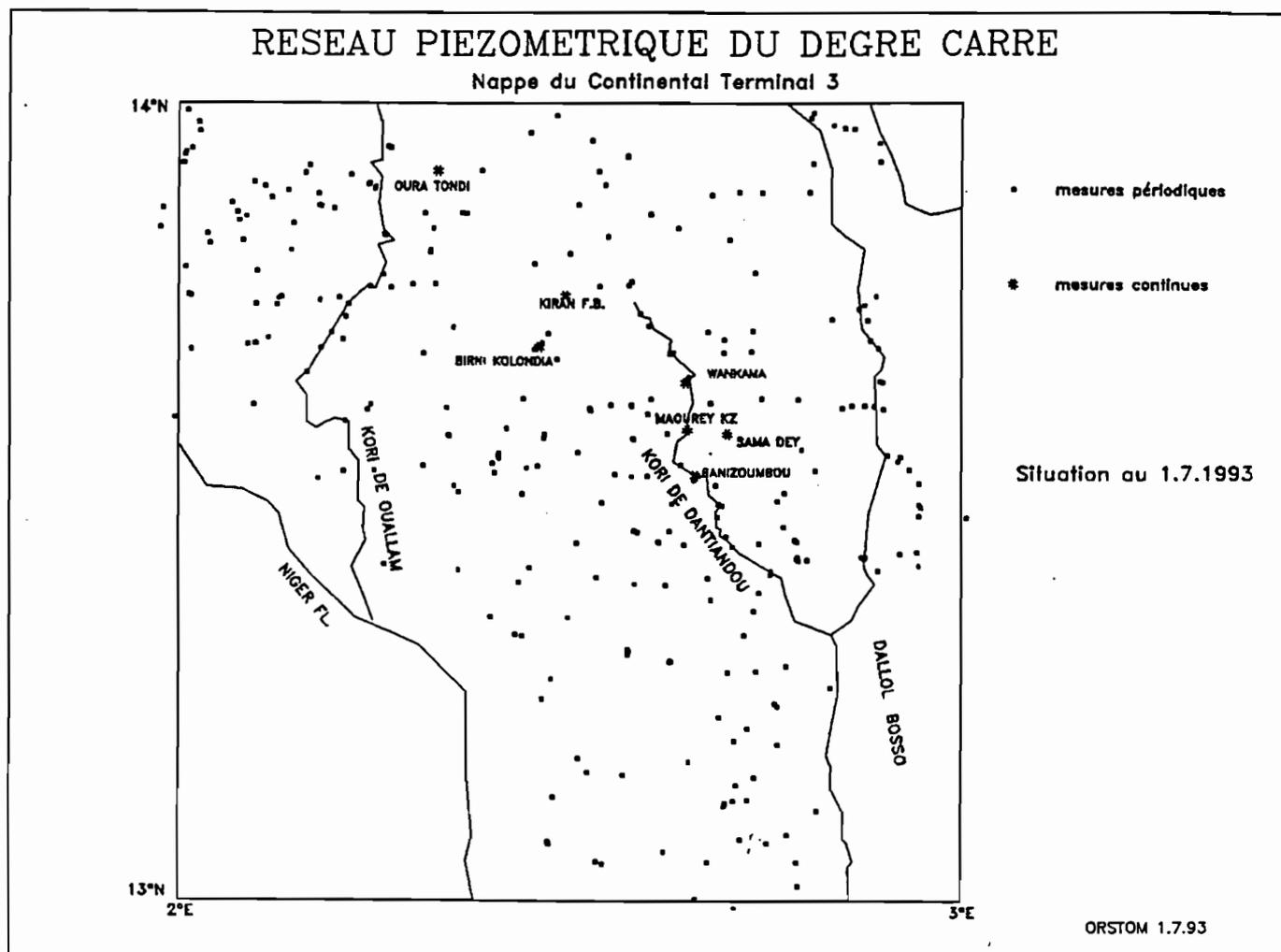


Figure 2.3. Le réseau de suivi de l'aquifère du CT3 en 1992.

#### ○ Mesures piézométriques

Les mesures ont été obtenues lors de :

- campagnes majeures sur l'ensemble de la zone d'étude, au nombre de 3 en 1992 et 4 en 1993 et durant environ 15 jours ;
- visites plus denses dans le temps (jusqu'à une fois par semaine) mais limitées dans l'espace à des zones sensibles, notamment pendant la saison des pluies ;
- sorties pour des besoins spécifiques (prélèvements hydrochimiques, etc.).

Outre ces mesures manuelles, des enregistreurs automatiques Elsyde et CR2M ont permis de connaître en continu l'évolution de la piézométrie dans 7 sites. En 1993, de nouvelles mesures ont été réalisées en novembre et décembre. On dispose ainsi d'environ 300 valeurs de piézométrie pour 1991, 1000 pour 1992 et 1500 pour 1993 (Leduc et Lenoir, 1995).

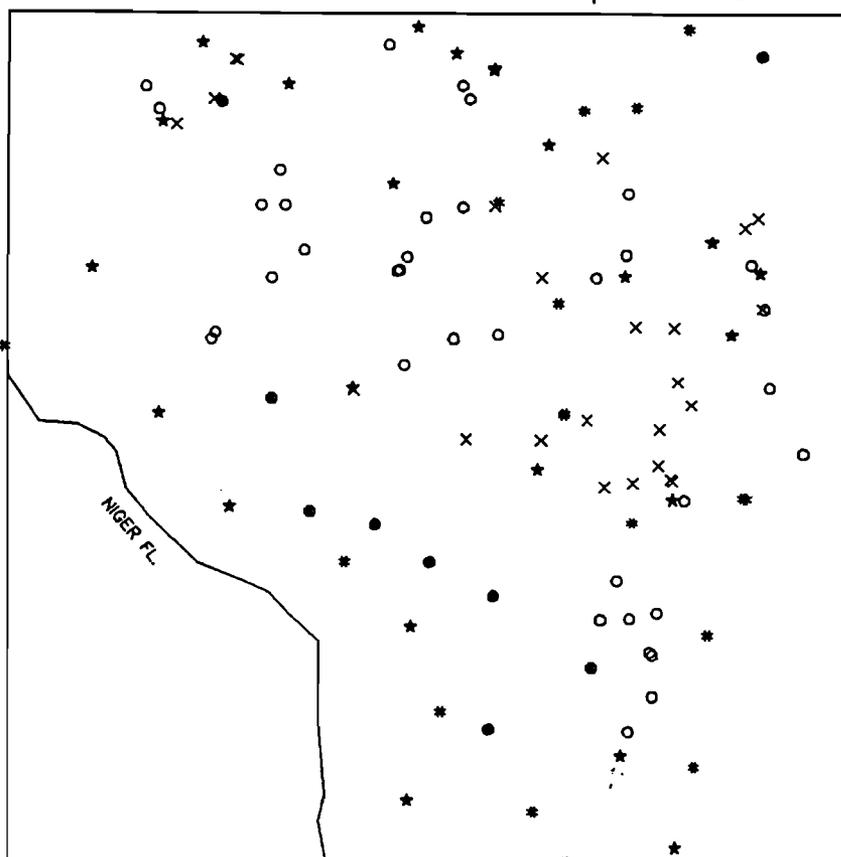
#### ○ Mesures hydrochimiques

L'étude hydrochimique est basée sur :

- des mesures de terrain, essentiellement conductivité et parfois PH, représentant plus de 550 mesures en 1992 et 1000 pour les dix premiers mois de 1993;

## IONS MAJEURS DE LA NAPPE PHREATIQUE

Points et dates de prélèvement



- x Décembre 91 seul
- o Avril 92 seul
- Jan/Fev. 93 seul
- \* Sept. 93 seul
- ★ Plusieurs dates

ORSTOM 1.1.94

Figure 2.4. Le réseau de suivi hydrochimique de l'aquifère du CT3 en 1992.

- des analyses de laboratoire, portant soit sur les ions majeurs et éventuellement quelques ions mineurs significatifs (plus de 160 échantillons), soit sur les isotopes stables ou radioactifs des eaux (110  $^{18}\text{O}$  ou  $^2\text{H}$ , une dizaine de tritium).

Les conductivimètres et pH-mètres de terrain ont eu quelques défaillances ou avaries, sans trop de gravité pour l'expérimentation.

Les analyses chimiques d'ions majeurs ont été confiées à l'ORSTOM Bondy et à l'Université de Niamey ; les analyses isotopiques ont été réalisées par le laboratoire de Géochimie isotopique d'Orsay.

### ○ Travaux complémentaires

Afin de préciser les mécanismes de recharge de la nappe phréatiques, des travaux de forage ont été entrepris. Trois forages ont été réalisés à Wankama le long d'un transect perpendiculaire à une des mares installées dans le fond du kori (Fig. 2.5). Les piézomètres ont été équipés de sondes pression et reliés à un enregistreur en continu.

Plusieurs essais ont été tentés à Samadey mais sans résultat opérationnel. Par contre, à Banizoumbou, un forage a été réalisé et équipé à mi-distance entre la mare et un des piézomètres de la DRE.

**Réseau de drains du bassin versant de Wankama  
et dispositif de mesures**

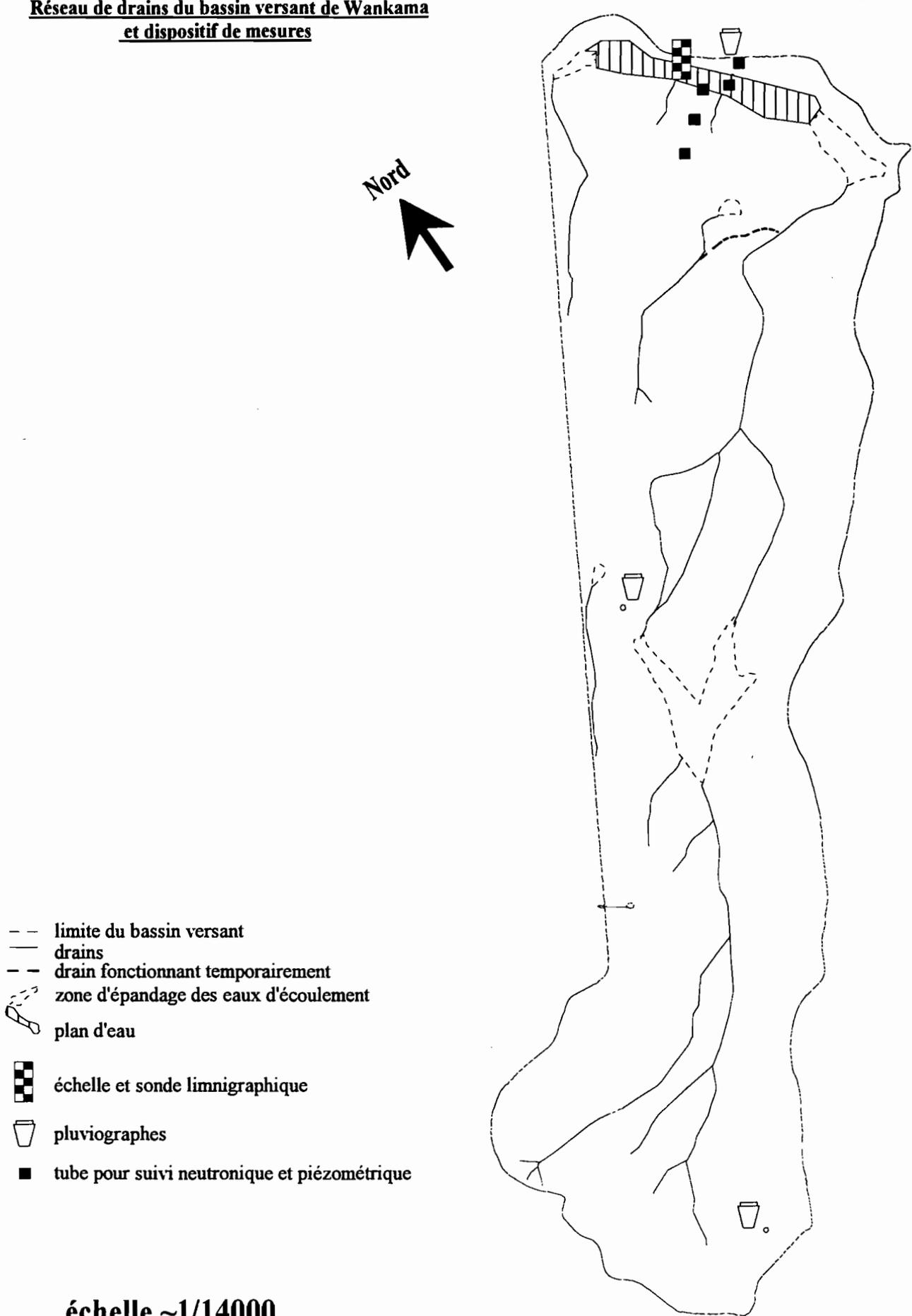


Figure 2.5. Le dispositif d'étude de la recharge locale sur la mare de Wankama.

Tableau 2-3. Bilan (en m<sup>3</sup>) de la mare de Wankama pour 1992.

	Saison des pluies (11.04 - 23.09)	Saison sèche (24.09 - 30.11)	Global (11.04 - 30.11)
Pertes totales	138 780	5650	144 430
Evaporation	5405 (4%)	1695 (30%)	7100 (5%)
Infiltration	133 375 (96%)	3955 (70%)	137 330 (95%)

Tableau 2-4. Bilan (en m<sup>3</sup>) de la mare de Wankama pour 1993.

	Saison des pluies ()	Saison sèche ()	Global ()
Pertes totales	62 770	32 760	95 545
Evaporation	3800 (4%)	4730 (15%)	8545 (9%)
Infiltration	58 970 (96%)	28 030 (85%)	87 000 (91%)

Tableau 2-5. Bilan (en m<sup>3</sup>) de la mare de Bazanga pour 1992.

	Saison des pluies (11.04 - 22.09)	Saison sèche (23.09 - 23.11)	Global (11.04 - 23.11)
Pertes totales	32 140	2360	34 500
Evaporation	4740 (15%)	1650 (70%)	6390 (19%)
Infiltration	27400 (85%)	710 (30%)	28 110 (81%)

Tableau 2-6. Bilan (en m<sup>3</sup>) de la mare de Bazanga pour 1993.

	Saison des pluies (07.07 - 18.09)	Saison sèche (19.09 - 04.12)	Global (07.07 - 04.12)
Pertes totales	26 418	2682	29 100
Evaporation	4172 (16 %)	1633 (61 %)	5805 (20%)
Infiltration	22 246 (84 %)	1049 (39 %)	23 295 (80 %)

## 2.4 Le bilan hydrique des unités hydrologiques dans la région de Niamey

### 2.4.1 Le fonctionnement des mares

Grâce aux mesures géochimiques, il a été possible de déterminer la part des eaux collectées dans les mares qui s'infiltré et celle qui s'évapore. Cette détermination est importante car l'eau drainée sous les mares de bas-fonds s'infiltré pour l'essentiel vers l'aquifère sous-jacente. Les tableaux 2-3 à 2-6 font bien ressortir que l'infiltration est bien plus importante qu'on ne le pensait jusqu'à présent. Sur la mare de bas-fonds de Wankama, c'est en effet de 90 à 95% du volume d'eau collecté par ruissellement dans la mare qui s'infiltré, la faible fraction restante s'évaporant directement à partir du miroir d'eau libre. Sur la mare de plateau la fraction infiltrée est plus faible, comme on pouvait s'y attendre compte tenu de la nature plus imperméable des sols. Néanmoins, ces mares étant souvent installées au contact de placages sableux, une forte infiltration latérale se produit

lorsque la mare déborde de son lit mineur à la suite d'un épisode de fort remplissage et au total 20% seulement du volume d'eau collecté par ruissellement dans la mare s'évapore directement. Le restant est stocké dans le sol et sert à assurer la pérennité en saison sèche de la végétation abondante qui se trouve autour de ces mares de plateau.

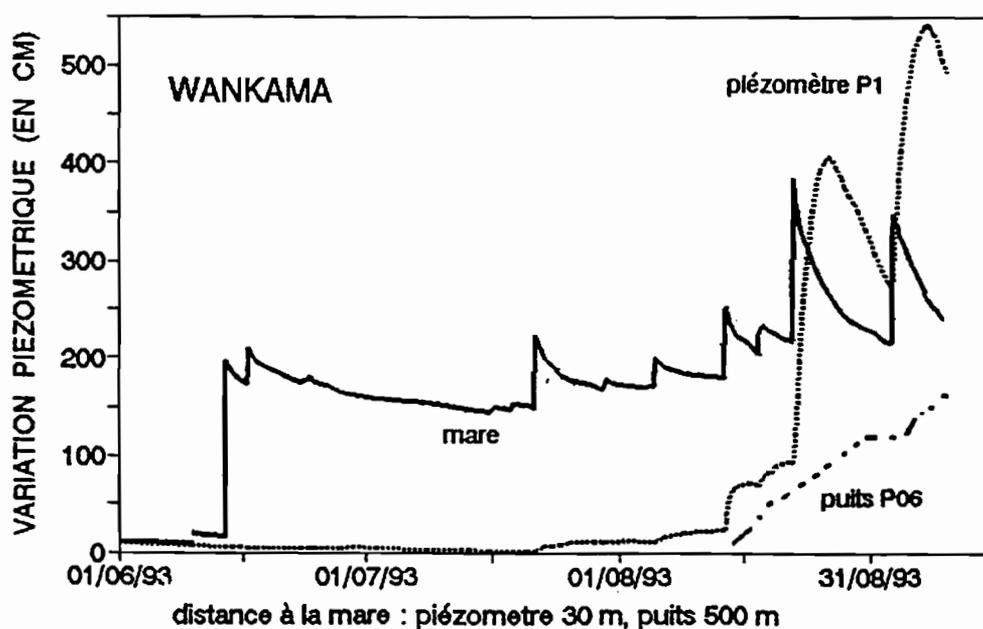
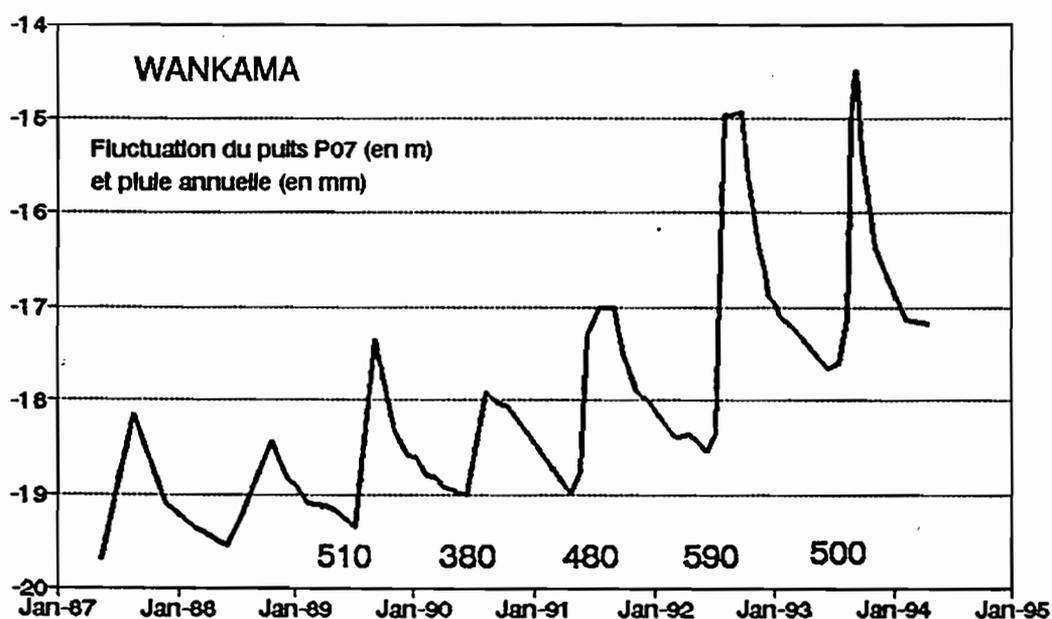


Figure 2.6 Variations piézométriques sur le site de Wankama

#### 2.4.2 Le bilan hydrologique sur les bassins versants des mares

Les tableaux 2-7 à 2-9 montrent qu'à l'échelle du bassin versant de la mare, le ruissellement de surface peut être très important, atteignant une moyenne annuelle supérieure à 20% sur les plateaux de brousse tigrée et variant entre 3% et 23% sur les mares de bas-fonds (Wankama et Sama Dey) durant la période d'observation. Sur les plateaux de brousse tigrée le coefficient de ruissellement est pratiquement constant (entre 20 et 23%), ce qui confirme une assez faible sensibilité au rythme des pluies et aux variations du stock dans le sol. Par contre, sur les mares de bas-fonds, pour trois années correspondant à un total de précipitation annuel voisin (460 mm environ), on obtient des coefficients de ruissellement très différents (3% en 1991, 14% en 1992 et 10% en 1993 pour Wankama, sachant que si le calcul de 1991 n'a pu se faire que sur une partie de la saison, il s'agissait de celle où le ruissellement est habituellement le plus fort). L'année 1992 a été marquée par une succession d'épisodes pluvieux intenses et rapprochés durant la Période d'Observation Intensive (POI) d'HAPEX-Sahel. C'est cette séquence, relativement exceptionnelle, qui explique que le coefficient de ruissellement moyen en 1992 ait été aussi élevé. Le volume d'eau total ayant transité par la mare à l'occasion des cycles successifs de remplissage-vidange s'est élevé à 144.000 m<sup>3</sup> en 1992 contre 36.000 m<sup>3</sup> en 1991. Comme on le montrent les tableaux 2-3 à 2-6 examinés plus haut, une partie de cette eau repart par évaporation à partir du miroir d'eau libre mais l'essentiel s'infiltré. Dans un premier temps cette eau infiltrée sert à saturer le sol sous-jacent et adjacent. Une fois cette saturation réalisée, ce qui prend 2 à 3 mois à partir du premier remplissage de la mare en début de saison des pluies, une infiltration profonde par effet piston se met en place. La figure 2.6 illustre ce phénomène. Le niveau de la nappe commence à monter à la mi-août. A partir de la dernière semaine d'août elle réagit presque instantanément à toute augmentation significative du niveau de la mare et il en est ainsi jusqu'à la fin de la saison des pluies. Sur cette même figure on peut constater que l'augmentation maximale du niveau de la nappe au voisinage de la mare (piézomètre P1) est bien supérieur en 1992 par rapport à ce qu'elle a été en 1991, ce qui est un résultat cohérent avec les chiffres du tableau 2-8.

#### 2.4.3 Le rôle des mares dans la recharge de l'aquifère

Il apparaît donc que les mares endoréiques temporaires constituent des points d'infiltration privilégiés et contribuent d'une manière fondamentale à la recharge de la nappe phréatique. Même dans des contextes géomorphologiques comparables, les processus de recharge sont très différenciés. Les variations piézométriques dues à l'infiltration varient de quelques centimètres à 9 m selon les sites. Les points les plus variés sont toujours situés à proximité immédiate des mares. L'amplitude annuelle semble plus faible en 1993 qu'en 1992 ; ceci s'explique par une répartition différente des pluies et donc des écoulements de surface plus réduits en 1993.

Tableau 2-7. Bilan hydrologique (en mm) du bassin versant de la mare de Bazanga pour la période 1991-1993. Les chiffres entre parenthèses concernent une partie de la saison des pluies seulement.

	1991	1992	1993
Précipitations	(150.5)	504.2	(387.5)
Ruissellement dans la mare	34.8 (23%)	98.7 (19.6%)	83.1 (21.5 %)
Evaporation depuis la mare	11.6 (6 %)	18.3 ( 3.6%)	16.6 (4.3%)
Infiltration depuis la mare	25.6 (17 %)	80.4 (16.0%)	66.6 (17.2)

Tableau 2-8. Identique au tableau 2-7, mais pour Wankama.

	1991	1992	1993
Précipitations	(351.5)	463.8	463.0
Ruissellement dans la mare	10.4 (3.0%)	67.0 (14.4%)	44.7 (9.7%)
Evaporation depuis la mare	1.1 (0.3%)	3.4 ( 0.7%)	4.0 (0.5%)
Infiltration depuis la mare	9.1 (2.6%)	63.6 (13.7%)	40.5 (8.1%)

Tableau 2-9. Identique au tableau 2-8, mais pour Sama Dey.

	1991	1992	1993
Précipitations	/	(314.7)	404.5
Ruissellement dans la mare	/	71.5 (22.7%)	28.8 (7.1%)
Evaporation depuis la mare	/	0.8 ( 0.3%)	0.4 (0.1%)
Infiltration depuis la mare	/	70.7 (22.4%)	28.4 (7.0%)

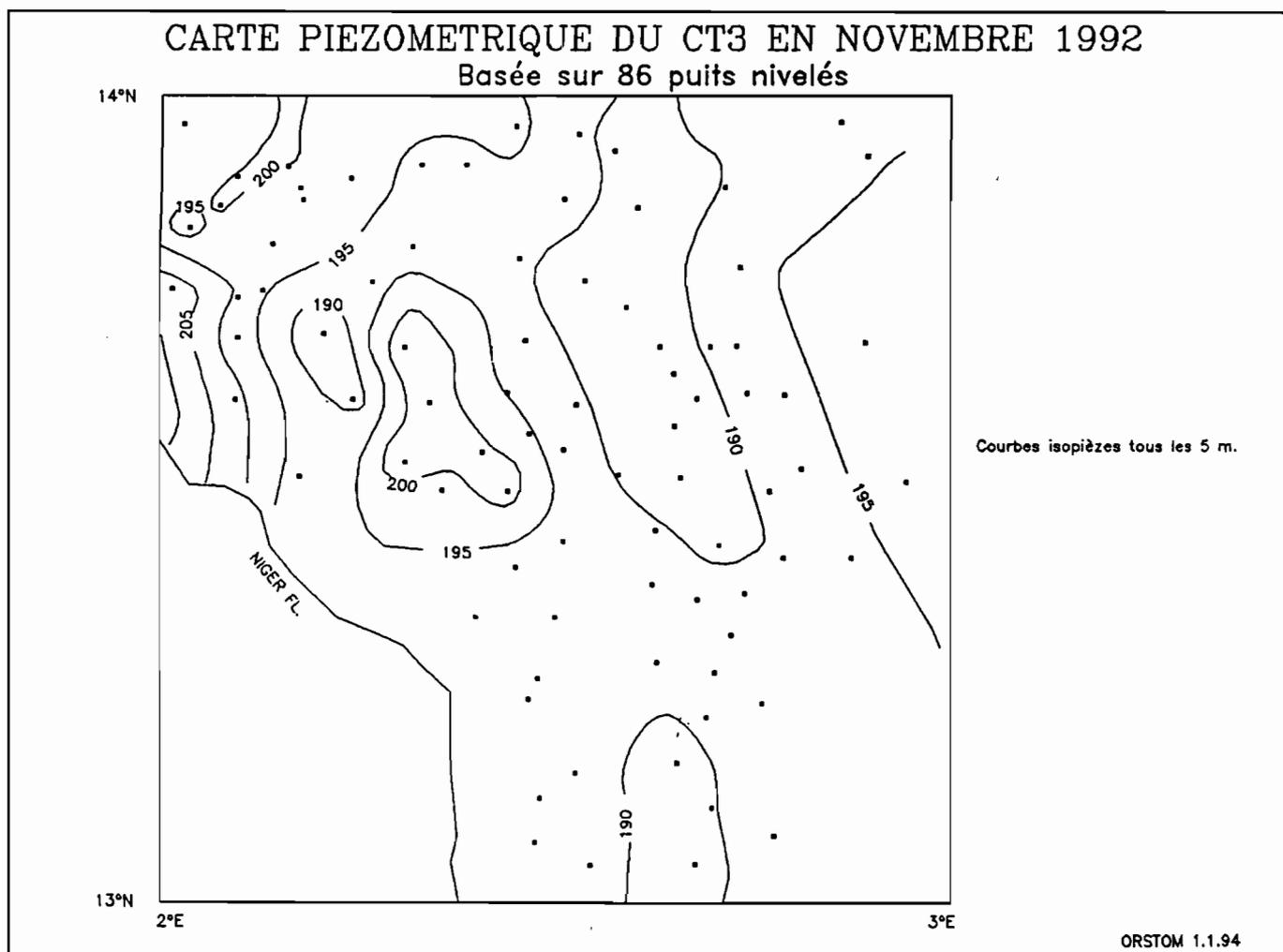


Figure 2.7. Carte piézométrique du CT3 en novembre 1992

La vitesse de réaction de la nappe à l'infiltration est également très variable. La nappe peut ne mettre que quelques heures pour réagir après une crue de la mare adjacente ; dans certains cas, des cheminements préférentiels sont la seule explication possible d'une telle rapidité. Parfois il faudra plusieurs semaines ou mois après la fin de la saison des pluies pour que la nappe atteigne son maximum.

#### 2.4.4 Le bilan hydrologique régional

Grâce au nivellement précis des 90 puits réalisés à l'occasion d'HAPEX-Sahel, des cartes piézométriques suffisamment précises pour analyser les gradients ont pu être tracées. Celle de la fig. 2.7 (niveau piézométrique en novembre 1992) confirme la présence d'un thalweg piézométrique dans la partie central-est du degré carré et d'un dôme dans la zone située immédiatement à l'est de Niamey.

Ce thalweg ne s'explique par aucune anomalie pluviométrique systématique sur cette zone. Si le travail réalisé sur les données pluviographiques souligne la très forte variabilité spatiale des pluies sahéliennes, à toutes les échelles de temps (Taupin et al., 1993, Lebel et al., 1995a et fig. 2.8), les observations réalisées sur la période 1989-1993 ne permettent de détecter aucune tendance particulière sur le centre du degré carré.

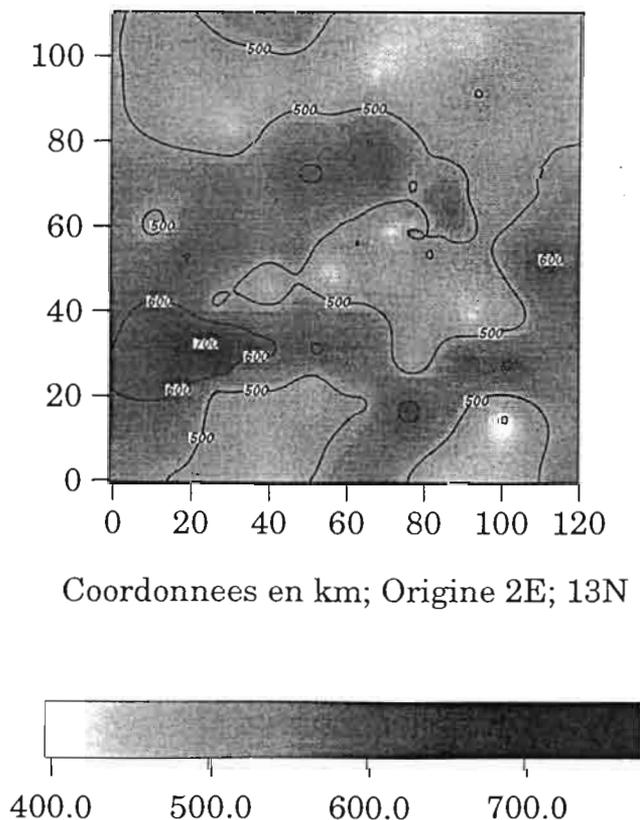


Figure 2.8. Isohyètes de la saison des pluies 1992.

Là où des séries longues d'observation antérieures à 1991 existent, on constate que la nappe du CT3 remonte assez régulièrement depuis 1988. Ce phénomène est illustré sur le graphique du haut de la fig. 2.6 en ce qui concerne le site expérimental de Wankama. Cette hausse a été particulièrement marquée à la suite des saisons des pluies 1992 et 1993, bien que cette dernière n'ait pas été exceptionnellement abondante. Il est trop tôt pour expliquer de manière certaine ce phénomène, qui contraste avec la poursuite d'une pluviométrie globalement déficitaire par rapport à celle des années 50 et 60 (Lebel et al., 1995b). On peut penser que la sécheresse ayant provoqué une raréfaction de la végétation, celle-ci puise moins dans la réserve de la nappe, mais il s'agit là d'un scénario encore exploratoire.

Les premières estimations basées sur les chiffres de 1992 semblent indiquer qu'environ 10 % de la pluie annuelle s'infiltre, soit environ 50 à 60 mm par an. Ces résultats devront être précisés et comparés à ceux obtenus les années suivantes grâce au maintien d'un dispositif de suivi à long terme. De plus, du fait l'absence de puits sur les plateaux latéritiques, on ne dispose pas d'informations piézométriques suffisamment fines sur ces zones (qui représentent environ 20 % de la superficie totale de la zone étudiée) pour pouvoir y quantifier la recharge.

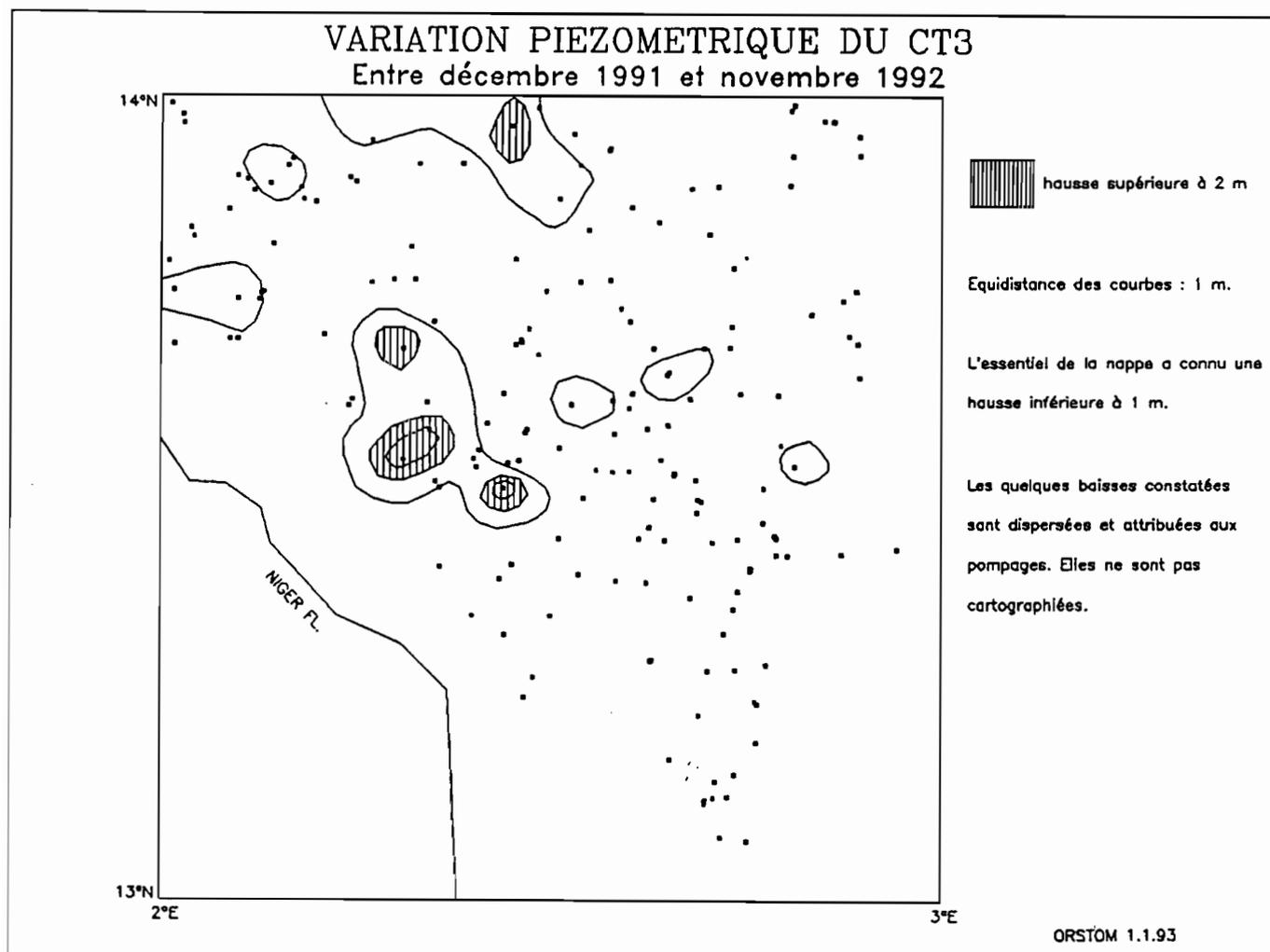


Figure 2.9. Evolution piézométrique du CT3 entre décembre 1991 et novembre 1992

## 2.5 Références bibliographiques

- Desconnets J.C., T. Lebel et J.D. Taupin, 1995a. 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 KM<sup>2</sup>. A paraître dans "*Hydrologie et Météorologie de Méso-échelle dans HAPEX-SAHEL : dispositif de mesures au sol et premiers résultats.*" (ORSTOM Ed.).
- Desconnets J.C., Taupin, J.D., Lebel T., and Leduc C., 1995b. Hydrology of the HAPEX-Sahel central Super-Site: surface water drainage and aquifer recharge through the pool systems. *Journal of Hydrology*.
- Desconnets J.C., Galle S., Leduc C. et Peugeot C., 1995c. L'hydrologie dans l'expérience Hapex-Sahel : une étude régionale des processus de redistribution des eaux de surface en région tropicale sèche. 11<sup>èmes</sup> journées hydrologiques: "L'hydrologie tropicale, géoscience et outil pour le développement", à paraître aux éditions Orstom.
- Lebel T., A. Amani, J.D. Taupin, 1995a. La pluie au Sahel : une variable rebelle à la régionalisation. A paraître aux éditions ORSTOM In Hoepffner, M., T. Lebel, B. Monteny (Editeurs), Interactions Surface Continentale/ Atmosphère : l'expérience HAPEX-Sahel. (Actes des 10<sup>ème</sup> journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, septembre 1994).
- Lebel T., J.D. Taupin, M. Gréard, 1995b. Rainfall monitoring : The EPSAT-Niger setup and its use for HAPEX-Sahel. A paraître dans "*Hydrologie et Météorologie de Méso-échelle dans HAPEX-SAHEL : dispositif de mesures au sol et premiers résultats.*" (ORSTOM Ed.).
- Leduc C. et Desconnets J.C., 1994. Pools and recharge of the Continental Terminal phreatic aquifer near Niamey, Niger. International workshop "Groundwater monitoring and recharge in semi-arid areas", Hyderabad. UNESCO-IAH, pp SV13-SV22.
- Leduc C. et Lenoir F., 1995. Etude de la recharge de la nappe du Continental Terminal 3 en rive gauche du Niger. In "Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans Hapex-Sahel : dispositif de mesures au sol et premiers résultats". A paraître dans "*Hydrologie et Météorologie de Méso-échelle dans HAPEX-SAHEL : dispositif de mesures au sol et premiers résultats.*" (ORSTOM Ed.).
- Leduc C. et Karbo A., 1995. Variabilité spatio-temporelle de l'impact de l'infiltration sur la nappe phréatique du Continental Terminal (Hapex-Sahel, Niger). A paraître aux éditions ORSTOM In Hoepffner, M., T. Lebel, B. Monteny (Editeurs), Interactions Surface Continentale/ Atmosphère : l'expérience HAPEX-Sahel. (Actes des 10<sup>ème</sup> journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, septembre 1994).
- Leduc C., Bromley J. et Schroeter P., 1995. Water table fluctuation and recharge in semi-arid climate: some results of the Hapex-Sahel hydrodynamic survey (Niger). *Journal of Hydrology*.
- Prince S., Y.H. Kerr, J.P. Goutorbe, T. Lebel, A. Tinga, P. Bessemoulin, J. Brouwer, H. Dolman, E.T. Engman, J.H.C. Gash, M. Hoepffner, P. Kabat, B. Monteny, F. Saïd, P. Sellers, and J. Wallace, 1995. Geographical, biological and remote sensing aspects of the Hydrologic Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel (HAPEX-SAHEL). *Remote Sensing of Environment*, 51, 215-234 .
- Taupin, J.D., Lebel, T., Cazenave, F., Gréard, M., Kong, J., Lecocq, J., Adamson, M., D'Amato, N. and Ben Mohamed, A., 1993b. EPSAT-NIGER, campagne 1992. Rapport ORSTOM-DMN, 98 p.

### 3. LE PROGRAMME DE SUIVI DE L'HUMIDITÉ DES SOLS

#### 3.1 Motivations et objectifs

Le suivi et la modélisation du bilan hydrique à l'échelle du degré carré d'HAPEX-Sahel sont des objectifs finaux qui nécessitent deux étapes. La première est l'étude de l'hydrodynamique et de la redistribution de l'eau dans les sols sahéliens à l'échelle du supersite (quelques centaines de km<sup>2</sup>), la deuxième est l'extension spatiale de ces connaissances. L'objectif fixé dans le cadre de la présente convention a été d'étudier le supersite Central Est, situé au centre du degré carré. La réponse hydrodynamique d'un sol sahélien est due principalement à sa position dans le paysage, à sa couverture végétale et à son état de surface. Ce programme s'articule donc en deux volets. Le premier s'attache à l'étude de la redistribution de l'eau le long d'une toposéquence. Le second à l'étude du cycle de l'eau et du bilan hydrique sur deux parcelles, l'une en culture de mil et l'autre en jachère.

#### 3.2 Redistribution de l'eau sur une toposéquence

##### 3.2.1 Objectifs et démarche

Il s'agit d'étudier le rôle de la topographie et de la géomorphologie dans le bilan hydrique, c'est à dire la redistribution de l'eau sur le versant par transferts latéraux et verticaux entre les différentes unités du paysage. Pour ce faire on a étudié la toposéquence de Banizoumbou, qui correspond à une toposéquence de vallée sèche, décrite par Gavaud (1966). Cette toposéquence est représentative du supersite Central Est et d'environ 50% du paysage du centre du degré carré d'HAPEX-Sahel. L'utilisation des versants pour des fins agricoles est courante au Niger. La redistribution de l'eau sur la toposéquence peut limiter ou favoriser la production agricole selon la position sur la toposéquence.

Les objectifs visés sont les suivants :

- ☛ étudier les différences de stock hydrique entre les différentes unités de la toposéquence et leur stabilité temporelle
- ☛ déterminer les lieux possibles d'infiltration profonde vers la nappe
- ☛ à l'intérieur d'une unité cultivée en mil, analyser les transferts hydriques et leur influence sur les rendements
- ☛ voir les possibilités de gestion de la réserve hydrique des sols

Ce volet a été réalisé conjointement par le Département de Ressources Ecologiques de l'Institut National de Recherches Agronomiques du Niger (INRAN; responsable M. Gandah) et l'ORSTOM (responsable S. Galle), dans le cadre de l'avenant N°4 de la présente convention.

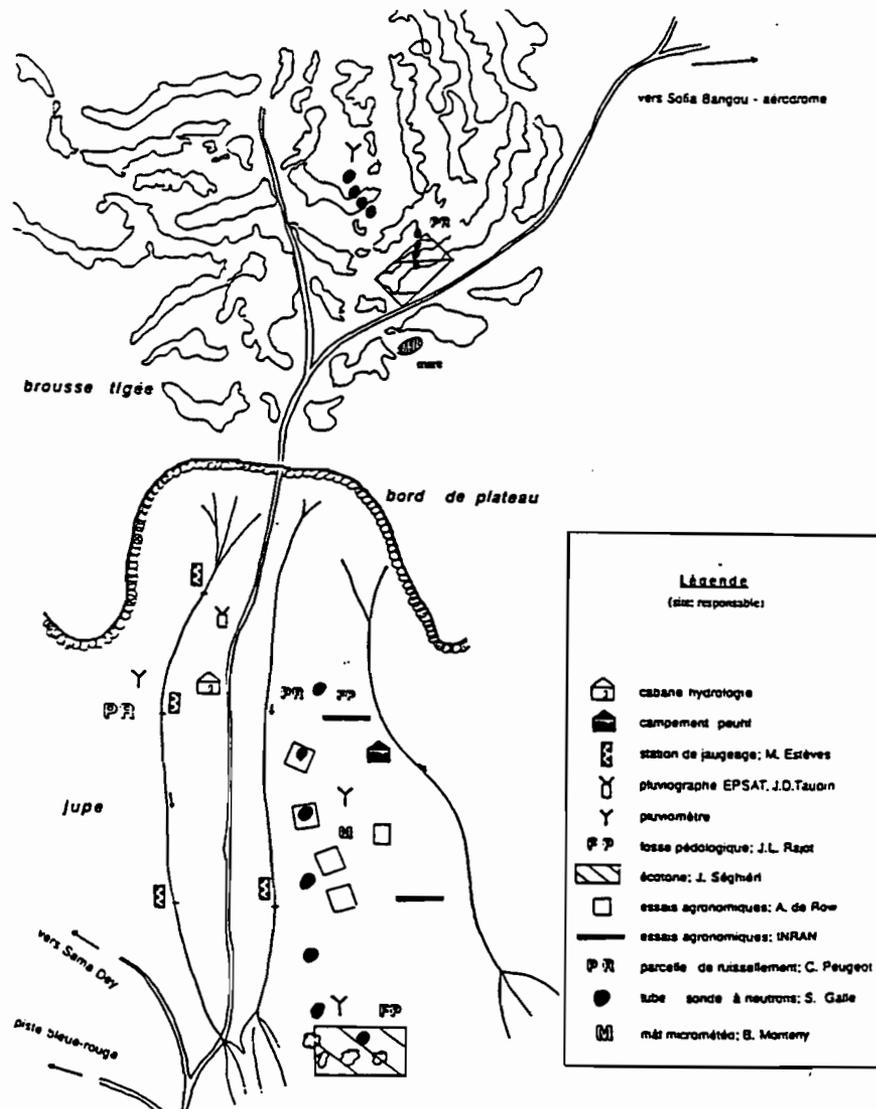


Figure 3.1 : Position géographique des tubes d'accès neutronique implantés sur la toposéquence de Banizoumbou

### 3.2.2 Dispositif expérimental

La toposéquence étudiée est située sur la commune de Banizoumbou. La teneur en eau du sol a été suivie sur chacune des unités géomorphologiques qui composent cette toposéquence de vallée sèche:

- ▶ un plateau à cuirasse ferrugineuse recouvert de végétation naturelle dite brousse tigrée ;
- ▶ un glacis sableux qui présente généralement un piémont dégradé et une partie à plus faible pente sur laquelle on rencontre des cultures de mil et des jachères ;
- ▶ une zone d'épandage correspondant à l'arrêt des écoulements concentrés provenant des plateaux et du glacis ;
- ▶ un bas-fond à relief plat avec un important micro-relief qui généralement fait barrage aux écoulements amont ;
- ▶ un talweg.

La méthodologie utilisée est celle du bilan hydrique. Le suivi des profils hydriques du sol a été effectué par la méthode neutronique, jusqu'à une profondeur standard de 3.40 m qui a été augmentée à 5.50 m dans les zones de forte infiltration. La calibration des mesures a été faite *in situ*, elle est détaillée dans Cuenca *et al.* (soumis). Le suivi s'est effectué avec un pas de temps dépendant de la pluie, afin de mesurer systématiquement le contenu en eau du sol le lendemain de la pluie, 3 jours après, puis à une fréquence plus lâche, pour devenir mensuelle durant la saison sèche. Ce suivi a été effectué durant quatre années (1991-1994) qui encadrent la Période d'Observation Intensive d'HAPEx-Sahel. Les profils hydriques ont été mesurés sur les unités suivantes : le plateau à cuirasse ferrugineuse (13 tubes), le glacis sableux cultivé en mil (15 tubes), en association mil-niébé (6 tubes), ou en jachère (2 tubes), la zone d'épandage (4 tubes), la zone de bas-fond (2 tubes), le talweg (2 tubes), et une mare temporaire (2 tubes).

A total c'est donc 44 tubes qui ont été suivis, répartis sur une distance de 2,5 km, auxquels se sont ajoutés les 2 tubes de la mare de Wankama, située une dizaine de kilomètres au nord (voir section 2 de ce rapport la description complète du dispositif expérimental sur cette mare). Des profils tensiométriques ont également été suivis en saison des pluies à différents niveaux du glacis sableux.

### 3.2.3 Résultats

La période de terrain est actuellement terminée, l'ensemble des données récoltées au cours de ce programme est disponible dans des banques de données. Leur analyse est en cours. Les principaux résultats sont rappelés ci-dessous. L'alimentation en eau des différentes unités géomorphologiques est contrastée. La redistribution des eaux de pluie par le ruissellement organisé en ravines induit une accumulation de l'eau dans les zones d'épandage. Les autres unités ne reçoivent que l'eau de pluie et du ruissellement local. Les écarts de stock hydrique le long de la toposéquence croissent, et atteignent leur maximum en fin de saison des pluies. Les processus de redistribution des eaux sur la toposéquence décrits dans Galle (1993) et Desconnets *et al.* (1995), sont schématiquement les suivants (fig 3.2) :

- ▶ Sur les plateaux, l'alternance bande nue/végétation induit une répartition périodique de l'eau sur une cinquantaine de mètres. Les fourrés de brousse tigrée sont alimentés par la zone nue amont (60% de ruissellement), le stock hydrique disponible y atteint plus de deux fois la pluie annuelle. Ce fonctionnement implique une organisation et une dynamique liée, entre l'eau, la zone nue et les espèces qui peuplent le fourré (Seghieri, Galle et Rajot, 1994). La compréhension des mécanismes de fonctionnement de ce type de forêt se prolonge naturellement par l'amélioration de sa gestion. Les applications seront abordées dans l'atelier " Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens ", organisé au Niger, à l'initiative de l'ORSTOM, en novembre 1995.

- La fraction de ruissellement du plateau non intercepté par les fourrés ruisselle, et se concentre en ravines dans le sol meuble des glacis.
- Les glacis sableux ont un sol profond, ils sont souvent cultivés en mil. En zone cultivée, ces sols de faible pente ruissellent peu du fait du sarclage du sol (le ruissellement représente environ 12% à 14% de la lame précipitée). Entre le haut et le bas du champ, on ne note pas de différence significative de l'ETR, mais il existe un accroissement du stock hydrique et du rendement des cultures (mil comme association mil-niébé) qui passe de 530 à 720 kg/ha du haut au bas de pente (Gandah, 1993). Ces sols de faible fertilité ont un rendement limité par l'eau disponible mais aussi par la matière organique. Les champs laissés en jachère sont encroûtés et ruissellent plus (21 à 25% de la lame précipitée). La totalité de l'eau infiltrée dans les sols de glacis est évapotranspirée, il n'y a pas d'infiltration vers la nappe.

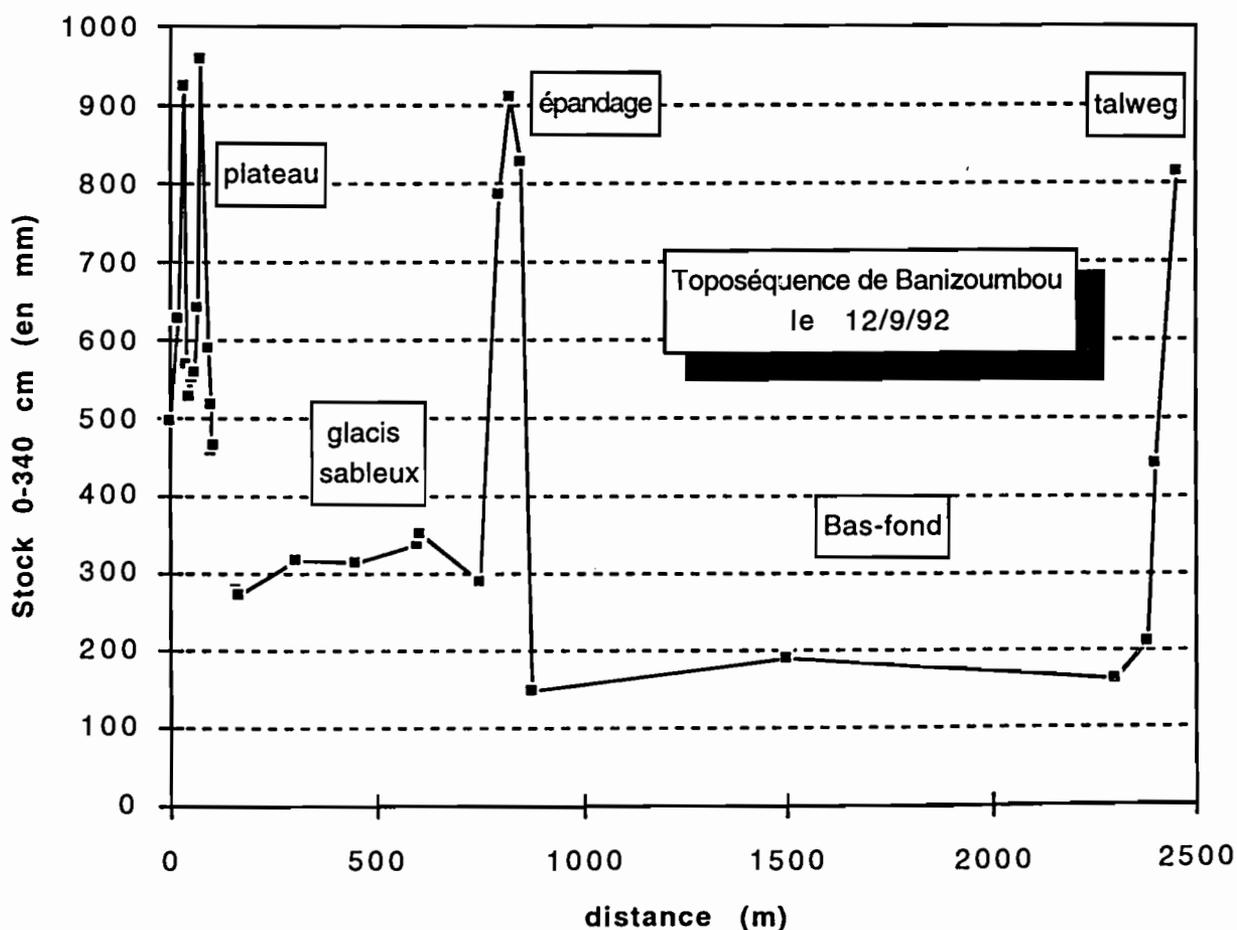


Figure 3.2 : Répartition du stock hydrique le long de la toposéquence en fin de saison des pluies, lorsque le stock hydrique est maximal.

- ▶ En fin de saison des pluies, le stock hydrique (0-340 cm) de la zone d'épandage atteint trois fois celui du glacis sableux cultivé situé en amont et le front d'infiltration dépasse 5.50m. En l'absence de mesures tensiométriques, une estimation des volumes infiltrés sous 5,50 m est nécessaire pour vérifier leur apport à la nappe
- ▶ Le stock hydrique de l'unité bas-fond est faible, elle est généralement laissée en jachère. Le front d'infiltration n'y dépasse pas 1 m.
- ▶ Le talweg principal dans lequel très peu d'écoulements sont observés et ne draine que de petites surfaces. C'est ici que se concentrent la majorité des mares temporaires, sites privilégiés de l'infiltration profonde vers la nappe. Le stock hydrique (0-340 cm) est comparable à celui de la zone d'épandage..

### **3.3 Bilan hydrique de deux parcelles de mil et de jachère**

#### **3.3.1 Motivations et objectifs.**

Milieu réactionnel ou facteur actif, l'eau du sol intervient en de nombreux processus biophysiques à l'interface sol-végétation-atmosphère. Il s'ensuit que le taux d'humidité du sol constitue une donnée essentielle pour un grand nombre de disciplines. Face à cette demande s'étalant du centimètre aux milliers de kilomètres, de l'observation instantanée à plusieurs cycles hydrologiques annuels, la détermination de l'humidité du sol est une donnée relativement ponctuelle qu'il s'agit tout d'abord de définir dans le continuum espace-temps. L'humidité du sol résulte par ailleurs du fonctionnement hydrique de l'écosystème, fonctionnement conditionné par le régime des fournitures pluviométriques et particularisé par l'hydrodynamique du sol.

Les buts poursuivis sont par suite les suivants:

- l'analyse de la dispersion de l'eau du sol afin de collecter des données représentatives de l'humidité du sol,
- la détermination des principales caractéristiques hydrodynamiques du sol et l'analyse du fonctionnement hydrique des deux écosystèmes étudiés,
- l'estimation des différentes composantes du cycle de l'eau et l'élaboration du bilan hydrique,
- la constitution d'une banque de données sous jachère et culture de mil,
- la comparaison méthodologique des données des bilans hydriques et énergétiques dans le contexte de l'étude des bilans d'énergie et de masse à l'interface sol-végétation-atmosphère.

Ce volet a été réalisé par l'Institut des Radio-Isotopes de l'Université de Niamey (IRI) sous la responsabilité de M. Sicot, dans le cadre de l'avenant N°5 de la présente convention.

### 3.3.2 Fondement méthodologique et conduite de l'expérience.

Les investigations ont comme fondement l'équation générale du bilan hydrique:

$$P = \Delta S + D + R + ETR,$$

qui met en relation les diverses composantes du cycle de l'eau, dans laquelle on a:

- P: la pluviométrie, relevée au moyen de pluviomètres journaliers et totalisateurs.
- $\Delta S$ : la variation du stock d'eau du sol découlant des relevés de profils hydriques effectués par neutronométrie en routine ou par gravimétrie lors des étalonnages et contrôles,
- D: le drainage, découlant des données tensio-neutroniques après détermination de la conductivité hydraulique,  $K(\theta)$ ,
- R: le ruissellement, estimé par le refus au remplissage du réservoir hydrique du sol à la capacité au champ (drainage rapide),
- ETR: l'évapotranspiration réelle, terme résiduel du bilan.

Les données ont été collectées dans les "wab" (wind affected blob) de jachère et de mil du site Central-Est de l'expérience HAPEX-Sahel. D'une superficie de 5 à 10 hectares, ces sites sont situés sur le versant occidental de la suite de bassins versants étudiés en hydrologie. Ils ont comme coordonnées géographiques: 13° 33' 619N et 2° 40' 725E pour la jachère d'une part et 13° 32' 561N, 2° 40' 505E pour le mil, d'autre part.

Le dispositif expérimental mis en place après analyse de la dispersion de l'eau dans le sol (Sicot *et al.* 1995a, Galle *et al.*, 1991) est constitué dans chaque site de 11 tubes neutroniques : 5 implantés en des sites ayant présenté des stocks d'eau moyens à l'échantillonnage, 3 en des sites de stocks moyens augmentés de 2 écarts-types et 3 en des sites de stocks moyens diminués d'autant.

A chaque tube sont associés deux tensiomètres à capteur de pression, implantés respectivement à 200 et à 250 cm de profondeur.

Les mesures pluviométriques sont liées au cycle pluviométrique. Les relevés de profils hydriques et tensiométriques ont été exécutés : 1 ou 2 fois par mois, en saison sèche et 2 à 3 fois par semaine, en saison des pluies.

### 3.3.3 Résultats.

Les conditions expérimentales, la conduite des investigations ainsi que les premiers résultats au cours de la période d'observation intensive ont déjà été présentés par l'équipe Sicot *et al.* (1992a, 1992b, 1993, 1994, 1995b) ou conjointement avec les autres groupes : Monteny *et al.*, 1992; Cuenca *et al.*, 1995. Les opérations de terrain terminées, une banque de données d'humidité du sol a été constituée pour les deux sites d'étude. L'interprétation des résultats se poursuit. Quelques faits saillants sont rappelés ci-après.

#### ○ L'état hydrique du sol

L'analyse géostatistique de l'humidité du sol met en évidence :

- 1° l'indépendance des mesures distantes de 50 mètres,
- 2° une grande dispersion de l'eau dans le sol,
- 3° une discrimination en "sites secs" et en "humides et intermédiaires"

La configuration spatiale de la dispersion hydrique n'est pas stable. Elle évolue avec les fluctuations du microrelief sous l'effet de l'érosion éolienne et avec la dynamique de remplissage et de vidange du réservoir hydrique dans les couches supérieures ou inférieures du profil.

Le réseau de mesures permet de relever les données moyennes à 12 % près et de cerner les intervalles de confiance.

#### ○ Le fonctionnement hydrique du sol

A partir de l'hyper dessèchement superficiel (jusqu'à 50 cm) comparativement à la rémanence de l'humidité en profondeur, le sol s'humidifie plus ou moins difficilement par endroit à cause de l'hétérogénéité de l'état de la surface. Malgré la forte infiltrabilité des sols dunaires, l'ensemble des processus du cycle hydrologique : ruissellement, infiltration, drainage, variation du stock hydrique ( $\Delta s$ ) sont couramment déclenchés par les averses. Mais l'importance et les modalités de certaines composantes comme le ruissellement et le drainage particularisent les sites étudiés. Ces disparités stationnelles sont susceptibles d'être amplifiées par d'autres processus locaux surnuméraires au cycle de l'eau: surhumectation superficielle, réflexion des flux de drainage sur la couche indurée du profil, engorgement, création de nappe perchée plus ou moins temporaires... A la fin des précipitations, le profil se dessèche brutalement et totalement en surface, progressivement et incomplètement en profondeur.

### ○ Le bilan hydrique.

Les bilans hydriques relevés ponctuellement diffèrent donc selon les sites considérés.

Dans le site improprement dénommé " bas fond " de la culture de mil, l'eau est encore en transit. A la récolte, 12% des pluies a ruisselé et le drainage qui aurait tendance à favoriser les entrée d'eau dans le profil est négligeable (2 %). Dans la fraction de 88 % d'eau qui s'est infiltrée, 70 % a été utilisé pour la culture dont 50 % pour la transpiration et 20 % pour l'évaporation du sol. Les 18 % restant sont progressivement évaporés en saison sèche.

Dans le site de jachère où l'interprétation des résultats n'est pas terminée les pluies se repartissent vraisemblablement comme suit : ruissellement 25 %, drainage 15 %, évapotranspiration 60 %.

Les données d'humidité du sol collectées sous jachère et culture de mil ont par ailleurs été utilisées par plusieurs équipes pour contrôler ou modéliser les transferts d'énergie à l'échelle micrométéorologique.

### **3.4 Conclusion**

Sur le plan matériel, les crédits de la présente convention ont permis l'achat de matériel neutronique : sonde et tubes d'accès neutronique, permettant le suivi à pas de temps fin de l'ensemble des unités géomorphologiques qui composent le paysage du site central d'HAPEX-Sahel, ainsi que la remise en état d'une voiture tout terrain. Un enseignant de la Faculté des sciences de l'Université de Niamey, Laouali Dungal, a été formé à l'étude de l'eau du sol et du bilan hydrique à cette occasion. Il est prévu de faire une synthèse des résultats obtenus sur les deux volets de ce programme, dans un article intitulé "spatial variability of soil moisture over a sahelian basin : ground measurements on the Banizoumbou basin". La compréhension du fonctionnement de ces différentes unités et de leurs interactions est fondamentale pour la gestion rationnelles des réserves hydriques, dans un système de cultures pluviales sur sol peu fertile.

- Galle S., 1993. Distribution spatiale du stock hydrique sur le bassin versant de Banizoumbou. Premiers résultats de la campagne de 1992. In : Monteny B. (Editors) " Campagne de mesure HAPEX-Sahel, SuperSite Central Est ". Rapport ORSTOM: 1-15.
- Gandah M., 1993. Rapport sur l'état d'avancement des activités de l'Etude et de l'Humidité du sol le long d'une toposéquence de vallée sèche du Dallol. Saison hivernale 1992; 8 p.
- Gavaud, M., 1966. Etude pédologique du Niger Occidental. Ed. ORSTOM, 3 Vol., Paris.
- Monteny B.(ed) 1992. HAPEX-SAHEL 1992. Campagne de mesures du Supersite central-est. Rapport multigraphié.
- 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. A paraître aux éditions ORSTOM In Hoepffner, M., T. Lebel, B. Monteny (Editeurs), Interactions Surface Continentale/ Atmosphère : l'expérience HAPEX-Sahel. (Actes des 10<sup>ème</sup> journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, septembre 1994).
- Sicot M., Marini P., Laouali Dungal, 1992a. Cycle de l'eau et bilan hydrique sous jachère et culture de mil en conditions sahélo-soudaniennes. Présentation du programme ORSTOM-IRI rapport multigr. 7 p.
- Sicot M., Marini P., Laouali Dungal, 1992b. Cycle de l'eau et bilan hydrique sous jachère et culture de mil en conditions sahélo-soudaniennes. Premiers résultats à la fin de la POI. ORSTOM-IRI rapport multigr. 7 p.
- Sicot M. 1993. Caractéristiques hydro-pédologiques et bilans hydriques comparés sous jachère et culture de mil, en conditions sahélo-soudaniennes. In Gestion durable des sols et environnement en Afrique intertropicale. Coll. AOCASS 6-10 dec. 1993 Ouagadougou Burkina Faso. (à paraître).
- Sicot M., Marini P., Laouali Dungal, 1994. La banque de données d'humidité du sol des "wab" de jachère et de mil du supersite central. Univ. Niamey, IRI. Rap multigr. ,89p.
- Sicot M., Marini P., Laouali Dungal, 1995a. Variabilité de l'humidité du sol en milieu sahélo-soudanien et son contrôle à l'échelle micro-météorologique : (300 m x 300 m). A paraître aux éditions ORSTOM In Hoepffner, M., T. Lebel, B. Monteny (Editeurs), Interactions Surface Continentale/ Atmosphère : l'expérience HAPEX-Sahel. (Actes des 10<sup>ème</sup> journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, septembre 1994).



## 4. LE PROGRAMME MÉTÉOROLOGIQUE

### 4.1 Motivations et objectifs

Les zones arides et semi-arides des régions tropicales sont écologiquement fragiles. Elles sont très sensibles aux modifications des conditions climatiques (désertisation) et, inversement, le climat peut être fortement influencé par des changements des caractéristiques de surface (désertification). Elles ont retenu l'attention de la communauté scientifique, d'une part parce que les connaissances sont limitées sur les interactions surface-atmosphère dans ces régions, d'autre part parce que les modèles d'échange surface-atmosphère, développés pour les régions tempérées, ne sont pas transposables directement dans les régions arides et semi-arides. En outre, les conséquences socio-économiques d'éventuelles modifications climatiques ou, réciproquement, les effets anthropiques sur les processus de surface agissant sur l'équilibre du climat peuvent être importants.

### 4.2 Bilan énergétique et hydrique des surfaces cultivées en mil.

#### 4.2.1 Objectifs

Ils étaient au nombre de deux :

- ☛ Caractériser l'évolution des états de surfaces cultivées en vue de leur modélisation compte tenu des facteurs de forçage qui conditionnent les divers bilans. Ceci conduit à :
  - \* la paramétrisation de la croissance des organes des plants constituant la culture en fonction des paramètres pédo-climatiques (précipitation, rayonnement solaire, stock hydrique du sol...)
  - \* l'analyse des différents termes des bilans en relation avec l'évolution des propriétés de surface sol-végétation ;
  - \* l'étude des processus d'échange entre sol-racines et entre couvert végétal-atmosphère;
- ☛ Concevoir un modèle de simulation du fonctionnement d'un système représentatif des surfaces cultivées.

#### 4.2.2 Méthodologie

L'évaluation de la quantité d'énergie rayonnante disponible pour les divers mécanismes d'échange a été menée en relation avec l'évolution phénologique du système biologique. En effet, cette quantité dépend des caractéristiques des surfaces et de leurs évolutions temporelles (réflexion et émission de rayonnements). Les algorithmes obtenus doivent permettre un élargissement spatial au moyen des données de la télédétection.

D'autre part, la connaissance de la répartition du rayonnement disponible selon les processus d'échange d'énergie (chaleur sensible et vapeur d'eau en particulier) fournit les éléments de la modélisation du comportement du système végétal dans son contexte pédo-

climatique, conduisant à l'estimation des potentiels de production compte tenu des facteurs limitants.

#### ○ Caractérisation du couvert végétal

Les caractéristiques de la surface végétale évoluent en fonction du développement du couvert (culture de mil) et, de ce fait, le système biologique représente une fonction de forçage pour le modèle. Sa paramétrisation est donc essentielle dans le cadre de la simulation du système cultivé. L'ensemble des mesures biologiques comme la croissance racinaire et foliaire, l'indice foliaire (IF) et le degré de recouvrement de la surface du sol par les feuilles (%), ainsi que la vitesse de colonisation des racines du volume du sol ont été suivies tout au long de la période végétative de la culture afin de déterminer les équations de croissance du système végétal en fonction des facteurs de forçage climatique (pluies, rayonnement solaire...). Cette paramétrisation phénologique est corrélée aux caractéristiques radiatifs et énergétiques mesurées simultanément.

#### ○ Bilans radiatif et énergétique

Un dispositif expérimental fort complet, obtenu grâce au financement de la convention, a été mis en place pour réaliser les mesures des bilans radiatif, énergétique et hydrique avec :

- installation, au niveau des surfaces cultivées de mâts (12m) pour les mesures des rayonnements réfléchi, émis et net qui sont des données caractérisant l'évolution les états de surface.
- simultanément, des mesures des profils de température et de vapeur d'eau de l'air au-dessus de la culture ont été réalisées pour le calcul du bilan d'énergie par le rapport de Bowen.

Ce dispositif est complété par l'installation d'un parc climatique enregistrant les données de base : rayonnements global et diffus, rayonnement photosynthétiquement actif, température et humidité de l'air, vitesse et direction de vent, précipitation au sol et température de la surface du sol, sur un pas de temps de 20 minutes. Au cours de la saison des pluies, les mesures ont été réalisées en continu afin de détecter les variations des caractéristiques du système végétal sur les termes des bilans. La paramétrisation du fonctionnement de la culture de mil est l'élément de base dans l'élaboration du modèle de simulation.

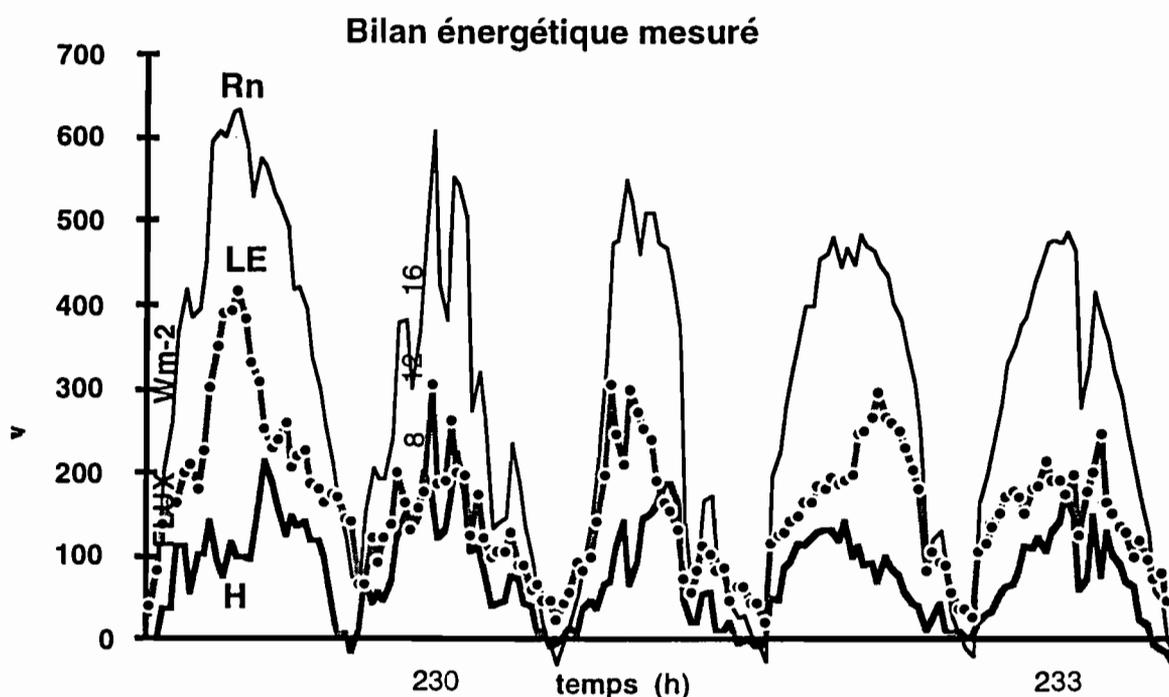
#### 4.2.3 Résultats

La figure ci-dessous montre l'évolution des termes du bilan énergétique de la culture de mil après une pluie P. ( $R_n$  : rayonnement net = énergie disponible pour les divers processus d'échange; H : échange de chaleur sensible; LE : échange de vapeur d'eau). La réduction du flux d'évaporation LE correspond à l'assèchement progressif de la surface du sol. Au cours du cycle végétatif, la participation du sol au transfert de vapeur d'eau est fonction de la distribution temporelle des précipitations. Le calcul du bilan hydrique sur l'ensemble du

cycle du mil a montré que 40 à 45% du cumul pluviométrique n'est pas utilisé par la culture. Cette faible efficacité d'utilisation de l'eau des précipitations par la culture de mil est un des facteurs contribuant à la désertification en région sahélienne (Amadou, 1994).

#### 4.2.4 Modélisation

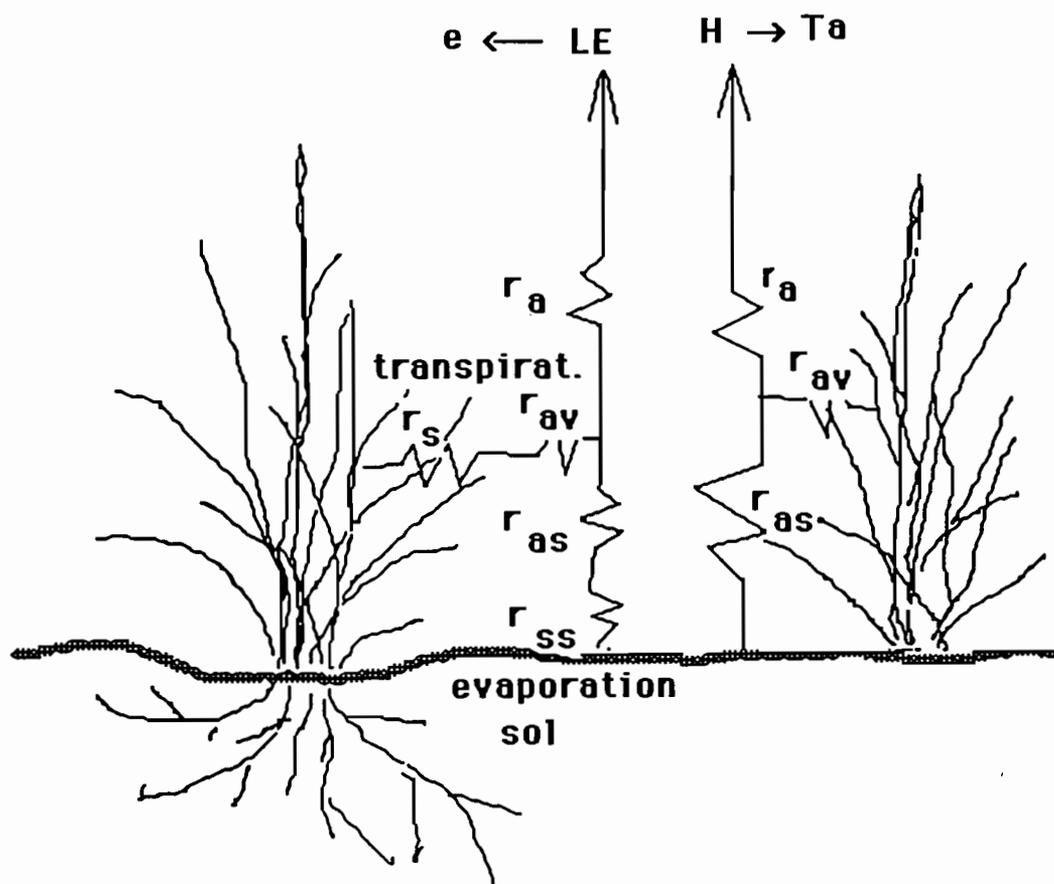
Le schéma suivant donne une base conceptuelle du modèle utilisé. L'intégration des divers paramètres prises en compte conduit à l'évaluation de certains échanges radiatif et énergétique, compte tenu des facteurs de forçage climatique et phénologique.



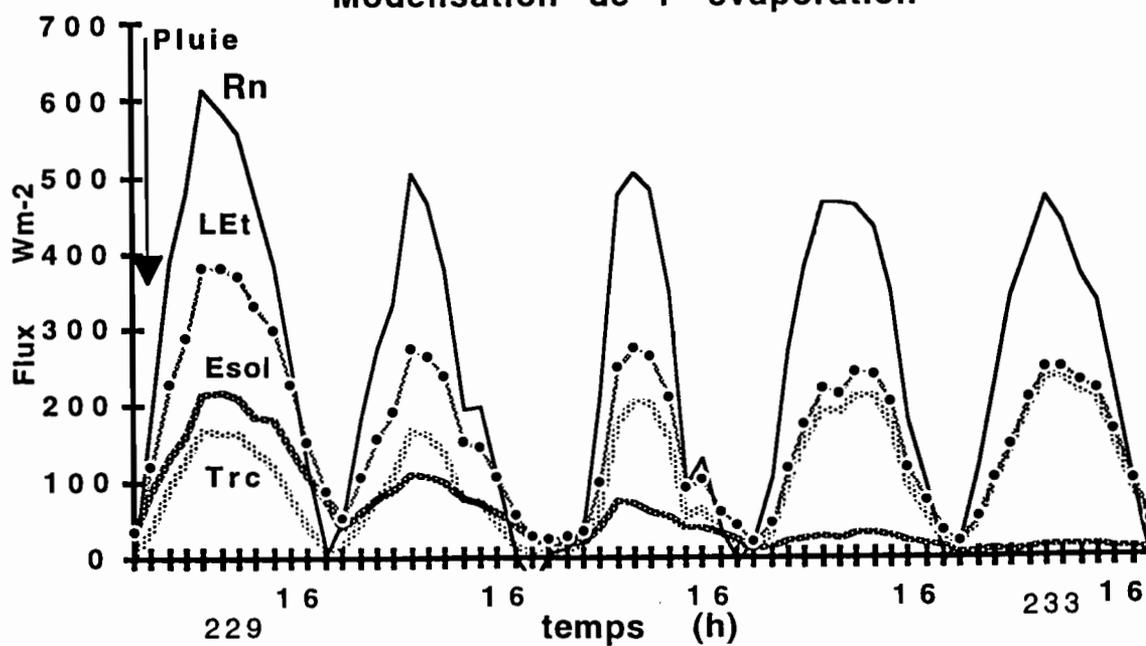
La modélisation de l'évaporation du mil par un modèle bicouche permet d'évaluer la contribution des 2 surfaces aux échanges de vapeur d'eau : la fraction venant du sol est importante après les pluies et décroît rapidement, quant à la transpiration végétale, elle dépend du développement foliaire du mil et de la fraction d'eau infiltrée des pluies. Les entrées du modèle sont les données météorologiques et les caractéristiques biologiques de la culture. La figure ci-dessous montre les résultats de la modélisation. Les résultats de calcul du modèle donne une bonne estimation de l'évaporation totale horaire  $LE_t$ , ainsi qu'une bonne évaluation de la transpiration du couvert végétal  $Tr_C$  et l'évaporation du sol  $E_{SO}$  sur l'ensemble du cycle cultural. Il permet de distinguer correctement la participation respective de chaque surface aux processus d'échange avec l'atmosphère. La figure montre clairement la réduction progressive de la participation de l'évaporation du sol au cours du temps, et que la transpiration s'accroît en fonction du développement des surfaces foliaires

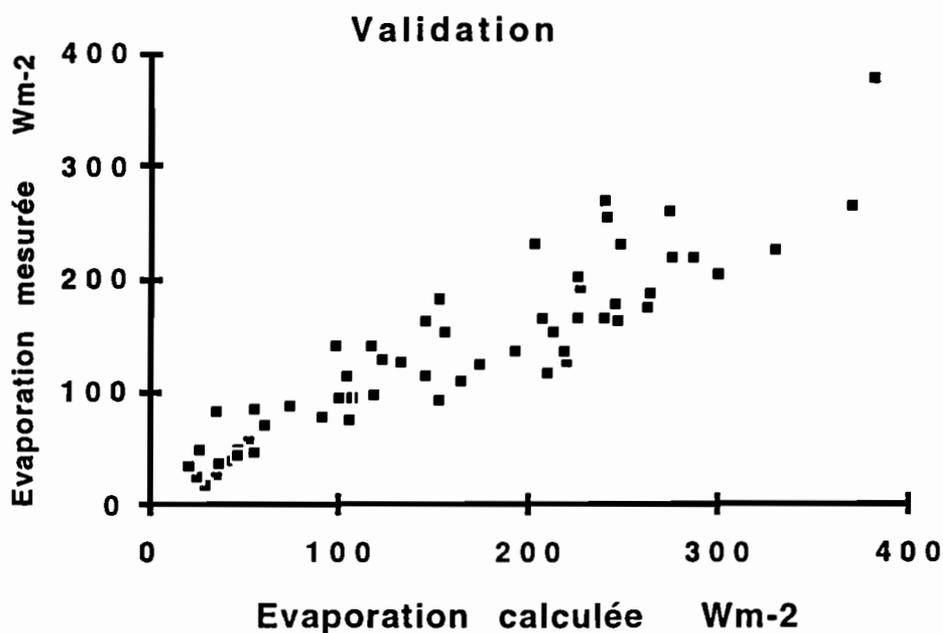
du couvert végétal, alors que le rapport entre l'énergie disponible  $R_n$  et l'évapotranspiration totale  $LEt$  est relativement constante entre le jour 230 et 233.

### CULTURE de MIL Schema du modèle bicouche



### Modélisation de l'évaporation





Les valeurs d'évaporation estimées par le modèle concordent bien avec celles mesurées au dessus de la culture par la méthode du bilan d'énergie/rapport de Bowen comme montré dans la figure ci-dessus.

Sur l'ensemble du cycle de culture, l'évaporation du sol atteint près de 45% de l'évapotranspiration totale. L'évaluation de la consommation en eau et donc des besoins en eau pour l'élaboration d'une production déterminée de matière organique permet de quantifier les potentialités de production régionale.

Les conclusions principales qui peuvent être tirées au stade actuel de cette étude concernent donc essentiellement la mise en culture de vastes zones de savane naturelle à Guiera, mise en culture qui conduit à :

1. la réduction de la fraction d'énergie disponible pour les processus d'échange,
2. la réduction de la quantité d'eau transférée à l'atmosphère.

Le changement des caractéristiques des surfaces introduit des perturbations au niveau des mécanismes de transfert énergétique, entraînant une perturbation dans les échanges, conduisant vers la désertification du milieu.

#### 4.2.5 Perspectives

La valorisation des résultats passe par l'intégration des moyens mis en oeuvre au cours des 3 années. En effet, une programmation logique des travaux consisterait à la

combinaison entre les observations de terrain et les images satellitaires qui doivent conduire à une globalisation des processus sur l'ensemble d'une région.

L'évolution du recouvrement du sol par la végétation peut être analysée par le degré de réflectance du rayonnement solaire tout comme l'activité photosynthétique du système biologique par la fraction réfléchie du rayonnement PAR. Ces deux termes sont mesurés par les moyens satellitaires. Les variations des réponses spectrales du système végétal sont à mettre en relation non seulement avec sa composition floristique, sa structure, sa densité mais aussi avec les apports d'eau des pluies.

Il en va de même en ce qui concerne le bilan d'énergie, où l'évolution de la température de surface est un indicateur des échanges énergétiques (et donc hydriques) du système sol-végétation avec l'atmosphère. L'appauvrissement biologique se traduit par une réduction du recouvrement du sol entraînant une augmentation de la température de surface du sol. Cette température est également évaluable par satellite.

Ainsi, la continuation logique de ce travail consisterait à une analyse pour l'extension des résultats, à l'aide d'algorithmes, pour passer à une échelle d'espace plus large. Il deviendrait dès lors possible de mieux appréhender les phénomènes de grande échelle comme la désertification qui est un processus lent mais de grande ampleur.

#### **4.3 Intensification des mesures météorologiques et du suivi climatologique**

##### **4.3.1 Objectifs**

Les conséquences des années successives de sécheresse qui ont frappé de nombreux pays Africains particulièrement au Sahel ainsi que la dégradation continue de l'environnement et les répercussions des activités humaines sur les ressources naturelles de ces pays ont constitué, depuis sa création, une part importante des préoccupations de recherche de la Direction de la Météorologie Nationale du Niger. C'est ainsi qu'en plus de ses attributions traditionnelles de collecte et de diffusion des données météorologiques, elle a eu à participer à plusieurs campagnes de mesures scientifiques, à coordonner et / ou participer à l'exécution de plusieurs projets de recherche dont notamment WAMEX, TAMSAT, STARS, EPSAT-Niger. La DMN était donc bien placée pour prendre en charge, avec l'appui de Météo-France le renforcement des mesures météorologiques sur la zone d'expérience et à l'Est, c'est à dire sur la zone d'influence du degré carré en terme de circulation atmosphérique. Les objectifs de cette action, objet de l'avenant 7 de la présente convention, étaient donc avant tout d'ordre métrologique.

#### 4.3.2 Dispositif expérimental

Il était composé de trois éléments principaux:

1. La transformation de la station agro-météorologique de Chikal en station agro-synoptique. Cette transformation se résume en la fourniture d'un complément d'appareillage. C'était une opération nécessaire pour le projet compte tenu de la faible densité du réseau synoptique national à l'est du degré carré
2. La création d'une station climatologique spécialisée sur le site central du degré carré. Cet élément avait pour but de disposer d'une série de données fines de référence dans le degré carré. Cette opération s'est accompagnée de la construction de locaux.
3. Le renforcement des équipements, notamment de sondage vent (PILOT) au niveau des stations de Tahoua et Birni N'konni pour la période allant de Juillet 1991 à Juillet 1993.

#### 4.3.3 Résultats

Tout le programme expérimental prévu n'a pu être réalisé. Les sondages PILOT sur Tahoua et Birni N'konni, notamment, n'ont pu être démarrés qu'en fin d'année 1992. Les données de la station climatologique du site central sont par contre en cours d'utilisation par plusieurs équipes de modélisateurs. Les équipements fournis au titre de la convention devraient permettre de maintenir un suivi climatologique renforcé sur la zone du degré carré de Niamey au delà de la période HAPEX-Sahel proprement dite.

#### 4.4 Conclusion

Les retombées du volet météorologique de la convention HAPEX-Sahel se situent à deux niveaux. Tout d'abord au plan des connaissances, il a permis:

- d'atteindre une meilleure connaissance de la répartition énergétique au niveau de la surface sahélienne et d'en apprécier les conséquences sur le cycle de l'eau dans cette région;
- de mettre en évidence l'importance de la modification des états des surfaces végétales, liées aux activités humaines, ce qui a conduit à s'intéresser actuellement à la consommation en eau des surfaces cultivées en mil. L'identification des potentialités climatiques régionales devrait permettre de promouvoir une activité agricole valorisante afin de réduire la dégradation du milieu (désertification);
- de proposer une modélisation du fonctionnement d'un système cultivé, compte tenu des entrants, pour la prévision de la productivité agricole et ce sur une base régionale.

Les retombées sont également importantes sur le plan du renforcement du potentiel des équipes nigériennes partenaires, à savoir respectivement l'INRAN et la DMN. Un laboratoire de Bioclimatologie a été créé à l'INRAN, dont la responsabilité a été confiée à M. Amadou, qui a montré durant les trois années de travail ayant conduit à sa thèse qu'il avait les capacités de conduire un programme et de gérer un laboratoire. Actuellement M. Amadou travaille sur le thème "Amélioration des pratiques culturales" développé à l'INRAN en collaboration avec l'ORSTOM. De son côté la DMN poursuit l'acquisition de données à la station de Chikal et dispose d'installations modernes pour les stations PILOT de Tahoua et Birni N'konni. Ce matériel, jumelé aux stations pluviographiques du réseau EPSAT-Niger qui demeurent en place sur la zone (une trentaine d'appareils), devrait permettre un suivi relativement fin de la convection et de son impact hydrologique sur la région de Niamey.

#### 4.5 Références bibliographiques

- Amadou, M. 1994. - Analyse et modélisation de l'évaporation-transpiration d'une culture de mil en région aride sahélienne. 117pp, THESE de Docteur en Sciences de l'Université PARIS XI - Orsay.
- Amadou, M., Cellier, P., Monteny, B.A. et Lhomme, J.P. 1994. Estimation de l'évapotranspiration d'une culture de mil à l'aide d'un modèle de couvert épars. Xeme Journées Hydrologiques ORSTOM, Montpellier septembre 1994.
- Amadou, M., Cellier, P., Monteny, B.A. et Lhomme, J.P. 1994. Estimation of Hainl Kirey millet evaporation using an energy combination model. XIXe General Assembly, European Geophysical Society Grenoble, may 1994. Ann. Geophysicae Vol 12-C333.
- Gash, J., Kabat, P., Amadou, M., Monteny B.A. et al 1994.- The variability of evaporation during the Hapex-Sahel Intensive Observation Period. (submitted to J. of Hydrology)
- Lhomme, J.P., Monteny, B.A. and Amadou, M. 1994. Estimating sensible heat flux from radiometric temperature over sparse millet. Agric Forest meteorol. 68, 77-91.
- Monteny, B.A., Lhomme, J.P., Chehbouni A., Amadou, M. et Troufleau D. et al. Xeme Journées Hydrologiques, ORSTOM, Montpellier septembre 1994.
- Monteny, B.A., Galle, S., Taupin, D., Lebel, T., Bessemoulin, P., Amadou, M., Troufleau, D., et Sicot, M. 1993 - Hapex-Sahel : East Central Supersite integrated study. American Geophysical Union. Fall meeting San Francisco, California, USA. 6-10 december 1993.
- Monteny, B.A., Lhomme, J.P., Chehbouni A., Troufleau D. et Amadou, M. et al. 1996.- The role of the Sahelian biosphere in the water and the CO2 cycle during the Hapex-Sahel Experiment. (submitted to J. of Hydrology)

## 5. BILAN D'ENSEMBLE

Comme cela a été rappelé en avant-propos, l'objectif majeur de la convention HAPEX-Sahel était de favoriser l'insertion d'équipes scientifiques ou techniques nigériennes dans les différentes composantes de l'expérience.

De ce point de vue le bilan est loin d'être négligeable. Cinq institutions se sont activement impliquées : Direction de la Météorologie Nationale, DMN; Direction des Ressources en Eau, DRE; Institut Géographique National du Niger, IGN.N; Institut National de Recherche Agronomique Nigérien, INRAN; Université de Niamey : Institut de Radio-Isotopes (IRI) et Département de Géologie. Plus d'une quinzaine de chercheurs, ingénieurs et techniciens ont participé aux travaux de terrain et d'exploitation des données. Deux thèses ont déjà été soutenues, respectivement par M. Amadou en novembre 1994 ("Analyse et modélisation de l'évaporation-transpiration d'une culture de mil en région aride sahélienne". Université PARIS XI - Orsay.) et par A. Amani en juillet 1995 ("Estimation des pluies au Sahel: quelques problèmes de modélisation analysés à partir des données de l'expérience EPSAT-Niger", PhD de l'Ecole Polytechnique de Montréal). Plus d'une dizaine d'articles et rapports ont été publiés en co-signature par des chercheurs nigériens et français et plusieurs articles supplémentaires ont été récemment soumis dans des revues telles que Journal of Hydrology. Ces différentes publications, dont les références se trouvent à la fin de chacune des sections de ce rapport, permettent de se faire une bonne idée des avancées de connaissance réalisées à l'occasion d'HAPEX-Sahel et qui concernent plus particulièrement deux domaines pour ce qui est de la contribution nigérienne.

Le premier est celui de la recharge de la nappe du CT3, qui est la principale ressource en eau de la région et dont il a été montré qu'elle se situe aux alentours de 10% de la pluviométrie annuelle, dès lors que cette dernière reste proche de sa moyenne de 500 à 550 mm. Le rôle du ruissellement et des mares qui en recueillent la majeure partie a également été mis en évidence et des études plus approfondies se poursuivent pour mieux caractériser la relation entre la distribution spatio-temporelle des pluies et l'intensité de la recharge.

Le deuxième domaine est celui du bilan hydrique et énergétique des différents couverts végétaux présents sur le degré carré de Niamey. La mise en culture de vastes zones de jachère à Guiera, dont le cycle de rotation s'accélère, se traduit par la réduction de la fraction d'énergie disponible pour les processus d'échange et la réduction de la quantité d'eau transférée à l'atmosphère. Le maintien d'une telle tendance ne pourrait que renforcer le rythme de la désertification dont les effets se font paradoxalement sentir par une remontée de l'aquifère amorcée au cours de la dernière décennie (la raréfaction de la végétation pérenne entraînant une moindre consommation des réserves d'eau stockées dans la nappe). Une étude du bilan en eau de la brousse tigrée (dont le bois constitue la principale source d'énergie domestique de la région) et de la dynamique des espèces végétales qui la composent a

par ailleurs été initiée sur la lancée des actions entreprises dans le cadre de cette convention.

Les retombées en terme de savoir-faire sont loin d'être négligeables pour les équipes nigériennes. Les réussites les plus nettes sur ce plan sont, d'une part, la création d'un laboratoire de bioclimatologie à l'INRAN, et, d'autre part, la formation à l'IGN.N d'une équipe chargée des mesures topographiques basées sur la mise en oeuvre des systèmes GPS à haute précision altimétrique.

La convention HAPEX-Sahel a permis à chacun des instituts identifiés plus haut de s'équiper d'instruments de mesure modernes dans leur domaine de compétence : GPS à haute précision altimétrique pour l'IGN.N; stations hydrométriques à enregistrement numérique pour la DRE, équipements météorologiques de sondage et de mesures de vent pour la DMN sonde à neutrons et capteurs du parc climatique de Banizoumbou pour l'INRAN. Ce matériel est encore en fonctionnement sur le terrain.

Les collaborations entre équipes ORSTOM et nigériennes se poursuivent. La combinaison des données acquises, des matériels installés et des équipes formées a permis à plusieurs projets de voir le jour en aval des actions menées dans le cadre de cette convention.

Un Système d'Information Géographique (SIG), regroupant les données acquises sur le milieu et sur l'hydrologie au cours d'HAPEX-Sahel, est en cours de développement au laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM de Montpellier. Le transfert à Niamey de ce SIG, à la réalisation duquel a contribué un ingénieur de l'IGN.N, M. Assimi, est prévu lorsqu'il sera achevé.

L'action, déjà mentionnée, visant à mieux comprendre les interactions entre la dynamique des espèces végétales de la brousse tigrée et son bilan hydrique, doit conduire à proposer des approches pour une gestion optimisée de ce milieu très spécifique de la région.

Enfin, la mise en place d'un observatoire de la pluviométrie et des fluctuations piézométriques sur le degré carré de Niamey vise à fournir un jeu de données permettant d'analyser les liaisons entre ces deux processus sur le moyen terme.

Au total il apparaît que les retombées de l'expérience HAPEX-Sahel pour le Niger ne sont pas négligeables, grâce au soutien fourni par le ministère de la coopération. Ces retombées pourraient être mieux valorisées et étendues aux autres pays du Sahel si un programme d'appui sur le long terme était fourni aux équipes nigériennes et sahéliennes. Par ailleurs l'effort fourni sur le Sahel mériterait de trouver son pendant sur la zone soudanienne, qui, bien que moins dramatiquement touchée par la sécheresse, est elle aussi très sensible aux fluctuations climatiques.