

# 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>

Jean Christophe DESCONNETS, Thierry LEBEL, Jean Denis TAUPIN

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

## RÉSUMÉ

Le fonctionnement hydrologique de la zone sahélienne est marqué par la dégradation du système de drainage. Le calcul de bilans hydrologiques par agrégation de bassins emboîtés est de ce fait impossible. Pour fournir les éléments d'une modélisation du bilan hydrologique régional, un suivi des systèmes endoréiques qui constituent des unités hydrologiques de base a en conséquence été entrepris sur une zone test de 600 km<sup>2</sup>. Ce sont les éléments caractéristiques de ce suivi qui sont présentés ici. Après un rappel sur les objectifs et le dispositif expérimental proprement dit, on examine les incertitudes liées aux mesures effectuées. Puis on présente le fonctionnement hydrologique et une quantification du bilan pour 1991 et 1992 de deux mares situées l'une sur plateau latéritique, l'autre sur bas-fonds sableux colmaté, ces deux milieux représentant l'essentiel du paysage de la zone d'étude. Un aperçu des résultats obtenus sur d'autres mares est également fourni. Le suivi a été poursuivi en 1993 avec une instrumentation très voisine de celle de 1992.

## ABSTRACT

In the Sahel, the degradation of the hydrological network produces a particular mode of surface runoff redistribution. This creates many temporary stockage zones during the wet season and a short period of the interseason and makes it impossible to calculate the water budget by aggregation of connected watersheds. The concentration and storage of surface runoff is governed by the structural endoreic zones of the lateritic plateaux and the catchment areas of dry valleys in the form of basins blocked by sand deposits. A monitoring of several endoreic systems over a 600 km<sup>2</sup> test zone was thus undertaken to provide the basis for the calculation of the water balance at a sub-regional scale. The main features of this monitoring are presented here. The objectives of the study and the experimental setup are first described, as well as the uncertainties of the measurements. Then the hydrologic behaviour of two pools, one located on a plateau and the other in a valley bottom, are analysed. The water budget is computed for 1991 and 1992. First results are also given for other pools of the test zone. The pool monitoring was continued in 1993 with a setup very similar to that of 1992.

## 1. OBJECTIFS GÉNÉRAUX

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

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

Quatre étapes ont été identifiées :

- \* la connaissance et la typologie des zones de stockage et de leur système endoréique ;
- \* la compréhension et la modélisation des mécanismes de stockage et déstockage au sein de la mare ;
- \* le bilan hydrologique de la mare ou la quantification de la reprise évaporatoire et la redistribution de l'eau dans la zone non saturée et les nappes profondes et accessoirement les ponctions par le bétail et les végétaux ;
- \* la régionalisation du bilan hydrologique à partir des observations sur les sites « échantillons » par photos aériennes sur un secteur de 600 km<sup>2</sup>.

## 2. DÉLIMITATION GÉOGRAPHIQUE ET TEMPORELLE

### 2.1. Délimitation géographique

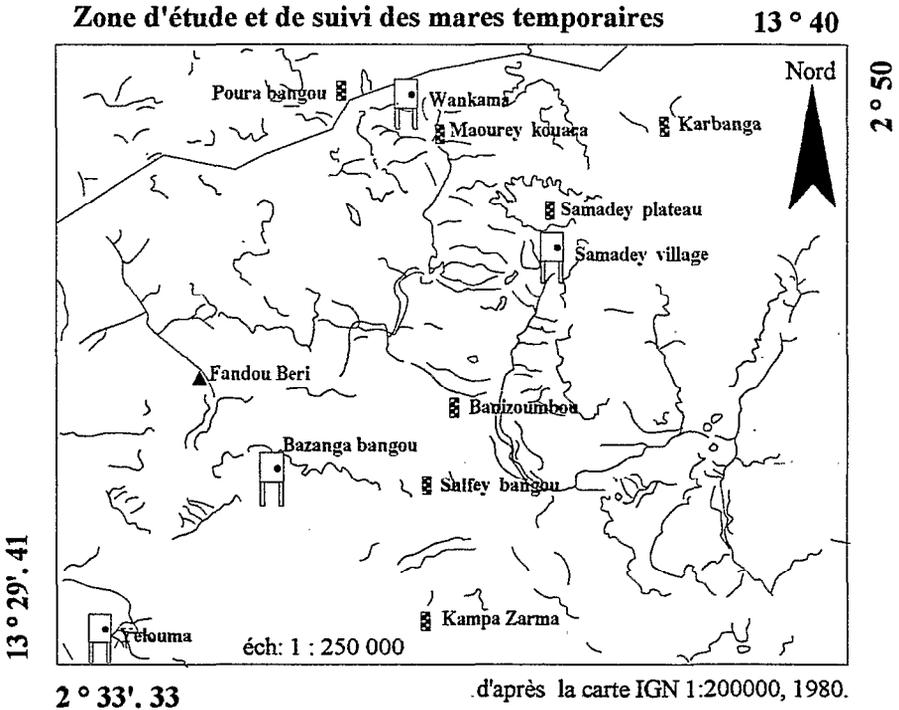
La connaissance des milieux de stockage temporaire dans cette région et, plus généralement dans l'ensemble du Sahel n'a suscité jusqu'à ce jour qu'un faible intérêt, et à notre connaissance, peu de travaux de recherche existent. Cette étude, démarrée en 1991, revêt de ce fait un caractère exploratoire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

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

Des vols de reconnaissance ont permis de repérer et d'identifier la grande majorité des systèmes endoréiques et leur zone de stockage. *A posteriori*, il s'est avéré qu'un grand nombre de zones de stockage temporaire n'ont pu être inventoriées par ces vols de reconnaissance, leur vidange presque totale s'effectuant en quelques jours. Des observations répétées sur le terrain ont permis de repérer ces sites. Au total c'est une soixantaine de mares qui a été inventoriée à l'intérieur du secteur d'étude. Cet inventaire est présenté en annexe 1, tableau A1-1.

### 2.2. Délimitation temporelle

Par leur caractère sporadique et concentré sur une courte période de l'année, les écoulements de surface dans cette région nécessitent des observations intensives. D'autre part, la forte variabilité annuelle des précipitations pourrait donner un sens aléatoire à des observations faites sur une seule saison des pluies. Aussi, la réalisation de plusieurs campagnes d'observations pour évaluer de manière satisfaisante les phénomènes de surface et leur variabilité paraît nécessaire.



**Légende**

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

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

Le programme s'est déroulé sur trois années (1991-1993); seuls les travaux des années 1991 et 1992 sont présentés ici. Ces observations se concentrent du mois de juin au mois d'octobre. La première année de mesures a été ciblée sur les mesures de variations de niveaux par limnigraphie dans quatre mares « échantillons » et sur le suivi géochimique de trois d'entre elles à partir du mois d'août jusqu'à l'assèchement des mares. Des observations du milieu telles que l'étude des sols du bassin versant, de la végétation, ont été menées en parallèle aux mesures. Ces observations visaient essentiellement à mettre en rapport les caractéristiques écologiques de chaque site choisi avec leur comportement hydrologique.

### 3. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

En 1991, seules quatre mares avaient été instrumentées et analysées. Elles constituaient 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). Le tableau A2-1 en annexe 2 présente le nom et la localisation des sites instrumentés durant toute l'étude.

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

- étude précise du fonctionnement hydrologique (cycle crue - décrue et recharge rapide des nappes) sur les 6 sites équipés de limnigraphes enregistreurs;
- extension spatiale avec résolution temporelle dégradée sur les 10 mares échantillons équipées uniquement d'échelles limnimétriques;
- extension spatiale du bilan des mares échantillons sur la zone d'étude de 20 x 30 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 durant cette année. Il s'agit entre autres de l'étude de la dynamique de la population herbacée autour des mares durant les périodes de fortes variations de niveaux, à travers un inventaire de la végétation aux alentours des mares. Ces études visent à raffiner la typologie résultant de simples considérations géomorphologiques ou hydrologiques, tout en apportant des éléments de connaissance supplémentaires sur l'évolution temporelle du milieu écologique que constitue la mare et sur l'impact qui en découle sur le fonctionnement hydrologique.

#### 3.1. Hydrométrie

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

### 3.1.1. Mesures en continu

Les mares jugées les plus intéressantes sont équipées de stations limnimétriques constituées 1) d'une sonde piézo-résistive mesurant la hauteur d'eau par différence entre la pression hydrostatique du liquide et la pression atmosphérique; 2) d'une centrale d'acquisition reliée à la sonde par un câble enterré, le déclenchement de l'acquisition étant fonction d'un seuil de variation de niveau et d'un intervalle de temps choisis par l'utilisateur. Ces deux paramètres d'acquisition sont programmables jusqu'aux valeurs limites inférieures de 1 cm et d'une minute. Le stockage des acquisitions est réalisé sur un support électronique interchangeable (cartouche à mémoire statique).

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

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

### 3.1.2. Mesures instantanées

Les mesures limnimétriques instantanées concernent un ensemble de 10 mares qui ont été suivies à partir de la saison 1992. Ces 10 mares font partie d'un dispositif qui a pour objet de compléter l'échantillonnage réalisé par les 6 sites équipés de limnigraphes enregistreurs mais surtout elles servent de site de validation pour la modélisation des mécanismes de vidange et la spatialisation du bilan hydrologique par photographies aériennes.

L'équipement est le suivant : une échelle limnimétrique à lecture directe et une échelle à maximum (calée sur le zéro de l'échelle limnimétrique) qui permet grâce à la décoloration d'un papier de mesurer le niveau le plus haut du plan d'eau entre deux visites. Ce protocole présente un défaut. Il ne permet pas de connaître la hauteur de deux crues successives. Pour cela, les visites doivent être le plus rapprochées possible. Ce suivi a commencé en juin avec une fréquence d'une visite par semaine augmentée à deux par semaine en juillet. La fréquence de visite au mois d'août a presque été quotidienne. Elle est redevenue bihebdomadaire jusqu'à la fin du mois de novembre, période à laquelle les mares se sont asséchées. Pour chaque mare suivie, 60 relevés ont été effectués en 25 semaines (tableau A2-3 en annexe 2).

## 3.2. Géochimie

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

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

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

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

### 3.3. Suivi isotopique

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

### 3.4. Mesure de l'évaporation par bac

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

### 3.5. Pluviométrie

Nous avons mis à profit l'existence du réseau pluviométrique EPSAT-NIGER présent dans le degré carré pour estimer la pluviométrie sur les bassins versants qui alimentent les mares. Ces appareils sont des pluviographes à augets basculeurs fonctionnant à un pas d'échantillonnage de 0.5 mm. L'acquisition de la donnée est automatique et le stockage se fait sur des mémoires statiques identiques à celles des limnigraphes enregistreurs (pour plus de précision voir *LEBEL et al.*, ce volume).

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

### 3.6. Photographie aérienne

Le bilan hydrologique à une échelle sub-régionale est l'un des objectifs de cette étude. Compte tenu de la taille des mares (beaucoup ont un miroir de moins de 1 000 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 spatialisatoin, la saison 1992 a vu la réalisation de deux types de missions :

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

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

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

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

### 3.7. Relevés écologiques

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

Le suivi de la dynamique de la population herbacée s'est déroulé durant la saison des pluies, débordant légèrement sur le mois d'octobre soit quatre mois de suivi (juillet - octobre) avec une fréquence de suivi bimensuelle en début de saison puis une fréquence hebdomadaire en fin de saison des pluies. Les méthodes d'étude choisies sont de deux types :

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

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

### 3.8. Inventaire du bétail pour l'estimation de la consommation en eau dans les mares

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

### 3.9. Mesures d'humidité neutroniques

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

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

#### 3.9.1. Fréquence des mesures

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

événement pluvieux :	J
le jour suivant :	J + 1
le deuxième jour suivant :	J + 2
le quatrième jour suivant :	J + 4
le septième jour suivant :	J + 7
le onzième jour suivant :	J + 11
le quinzième jour suivant :	J + 15

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

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

#### 3.9.2. Étalonnage

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

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

Chaque site suivi en limnimétrie automatique ou manuelle a fait l'objet d'un levé planimétrique et altimétrique permettant d'appréhender avec le plus de précision possible la forme de chaque cuvette de mare et faire ainsi correspondre un volume à une cote donnée à l'échelle. Deux campagnes de levés topographiques ont été organisées pour lever tous les sites étudiés. La première campagne réalisée en janvier 1992 et effectuée par les services de la topographie nigérienne (IGNN), a levé selon le même protocole les mares de Bazanga bangou, de Wankama et de Yélouma. Ces levés planimétriques et altimétriques couvrent la cuvette de la mare à la cote maximum atteinte durant les deux années d'étude, par un maillage régulier de 10 mètres par 10 mètres. En décembre 1992 et en janvier 1993, une deuxième campagne topographique a permis de lever les mares de Kampa Zarma, Sulfey bangou, Banizoumbou, Sama Dey village, Sama Dey plateau, Maourey, Karbanga, Poura bangou et Massi Koubou. Le protocole a été adapté à la taille de la mare. Ainsi, les mares de faible superficie ont été quadrillées selon un semis de points de 5 mètres par 5 mètres et les deux plus étendues, Sama Dey village et Massi Koubou, ont été levées avec un quadrillage de 20 mètres par 20 mètres. Les représentations planimétriques sont à une échelle de 1/200 et 1/500.

## 4. INCERTITUDES DES MESURES

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

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

### 4.1. Mesure de la hauteur d'eau

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

Le constructeur donne une précision de lecture en hauteur de plus ou moins un centimètre et une vitesse de poursuite des niveaux de 1 cm dans son domaine de profondeur (15 mètres). Il peut apparaître après quelques semaines de fonctionnement un léger décalage entre la hauteur enregistrée par le capteur et la hauteur réelle. Ce décalage est imputable à plusieurs causes :

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

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

#### 4.1.2. Mesures instantanées

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

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

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

#### 4.2. Courbe de tarage d'une mare

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

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

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

### 5. PREMIERS RÉSULTATS

#### 5.1. Les conditions pluviométriques

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

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

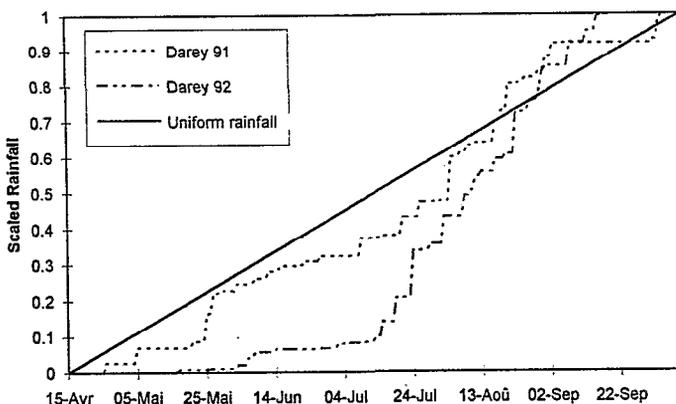
Le tableau 1b donne les valeurs de l'aire comprise entre la droite de distribution temporelle uniforme et la droite des cumuls observés. Contrairement à la représentation graphique des figures 2 et 3, les valeurs ne sont ici pas normées. Cette aire peut être assimilée à un indice d'intermittence temporelle,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

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

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

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

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



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

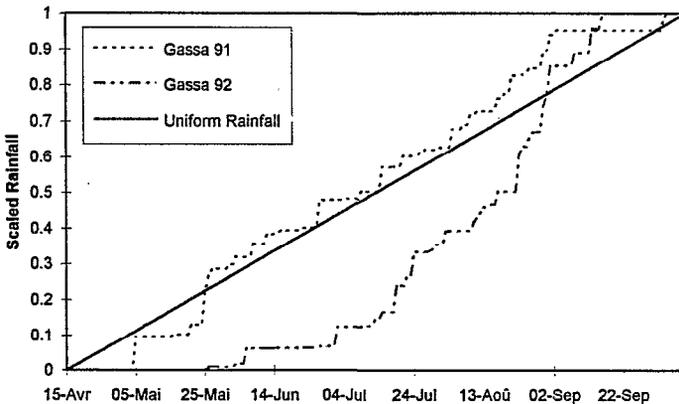


Figure 3. Identique à la figure 2, mais pour la station de Gassanamari (mare de Bazanga).

## 5.2. Étude du fonctionnement de deux mares échantillons

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

### 5.2.1. Présentation des deux systèmes endoréiques

#### 5.2.1.1. Le système endoréique de bas-fond de Wankama

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

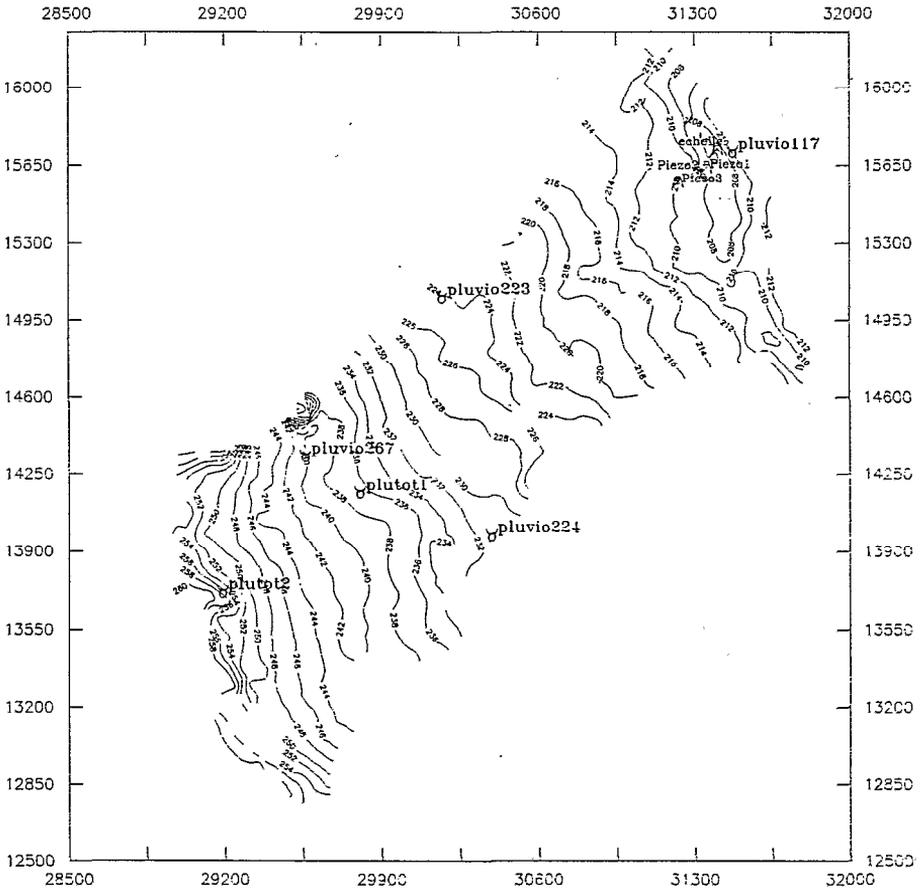
D'un point de vue géomorphologique, le bassin de Wankama présente de l'amont vers l'aval une séquence typique pour la région d'une vallée sableuse (COURAULT *et al*, 1989). Le bassin versant a pour exutoire la mare de Wankama. Sa cuvette est située dans un ancien axe de drainage : le Kori de Dantiandou.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

#### 5.2.1.2. Le système endoréique de plateau de Bazanga Bangou

Morphologiquement et pédologiquement très différent, le bassin topographique de la mare de Bazanga Bangou est de taille inférieure à celui de Wankama : 0.3 km<sup>2</sup>. De pente faible (environ 1 %), il ne présente pas de réseau hydrographique. En surface il est constitué de deux zones bien distinctes : la première qui s'organise sous forme de brousse tigrée, et la seconde présentant un réseau de bourrelets sableux ou dunettes, fixés par la strate herbacée entre lesquelles s'intercalent des surfaces à croûtes argileuses indurées, siège de l'écoulement. Schématiquement, la mare est située au centre de son bassin d'alimentation.

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

Carte topographique du bassin de Wankama



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

### 5.2.2. Les événements hydrologiques mesurés en 1991 et 1992

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

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

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

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

- \* une série de pluies identiques quant à leur valeur moyenne et à leur valeur maximum. La pluie minimum ayant provoqué un écoulement de surface est de 7.5 mm à Bazanga et de 4.5 mm à Wankama;
- \* une lame ruisselée moyenne plus importante à Bazanga (6.7 mm) qu'à Wankama (4.8 mm), mais avec des valeurs extrêmes assez proches (le maximum est plus important sur Wankama que sur Bazanga);
- \* des volumes de crue moyens fortement supérieurs à Wankama (7 238 m<sup>3</sup> pour 2 007 m<sup>3</sup> à Bazanga). L'amplitude en volume des événements extrêmes à Wankama est particulièrement élevée, suggérant un comportement très variable selon les caractéristiques des événements pluvieux (intensités et localisation des zones de pluie forte par rapport aux différents états de surface);
- \* des débits maximums moyens sensiblement différents (1.07 m<sup>3</sup>/s à Bazanga et 2.41 m<sup>3</sup>/s à Wankama) avec des extrêmes quatre fois supérieurs à Wankama (11.60 m<sup>3</sup>/s le 18-7-1992), ceci étant à relier à la taille respective des bassins concernés;
- \* des temps de concentration allant du simple au double selon que l'on s'intéresse à l'un ou l'autre des bassins; on peut l'expliquer par la forme de chaque bassin (compact dans le cas de Bazanga et allongé pour Wankama).

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

On a porté en figure 6 la relation entre la lame précipitée et la lame ruisselée en fonction de l'indice d'humidité IK. Cet indice permet d'évaluer l'évolution de l'état d'humectation de la couche superficielle d'un sol au cours d'une saison des pluies. Il tient compte de la hauteur des pluies et de leur répartition dans le temps, par le biais d'une pondération exponentielle :

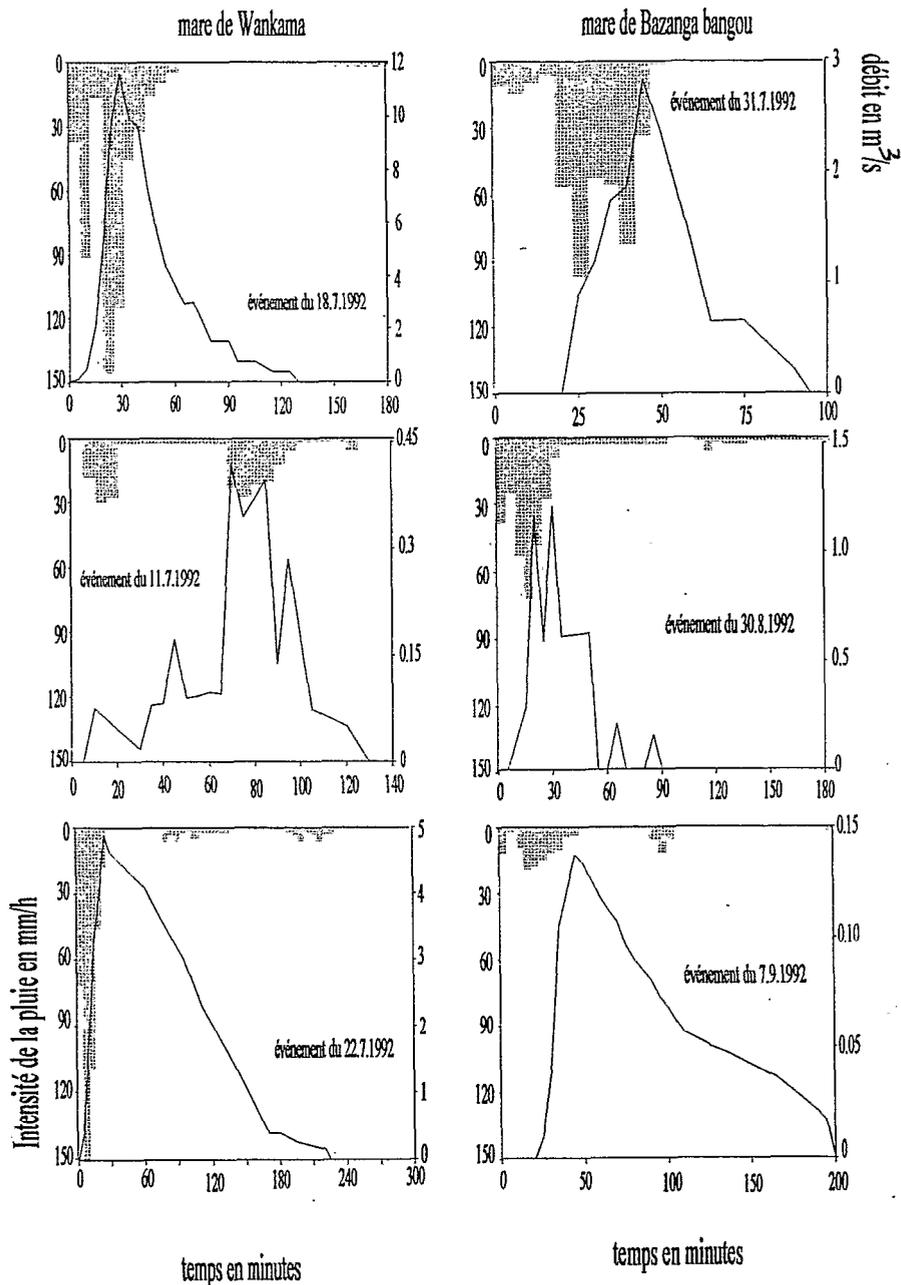


Figure 5. Trois hydrogrammes caractéristiques des bassins de Wankama et de Bazanga.

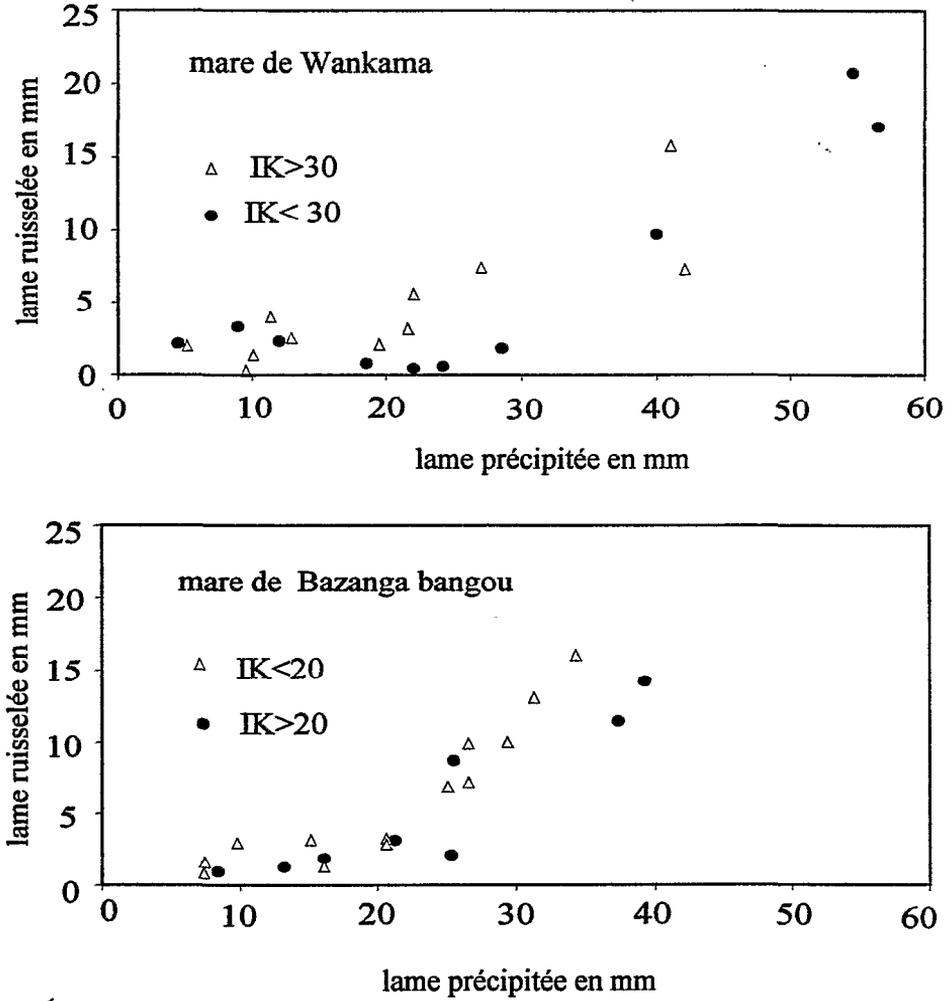


Figure 6. Relation lame précipitée-lame ruisselée en fonction de l'indice d'humidité IK.

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

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

La figure 6 appelle les commentaires suivants :

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

Ces constatations, nous amènent aux réflexions suivantes :

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

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

### 5.2.3. Fonctionnement de la mare et régime saisonnier

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

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

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

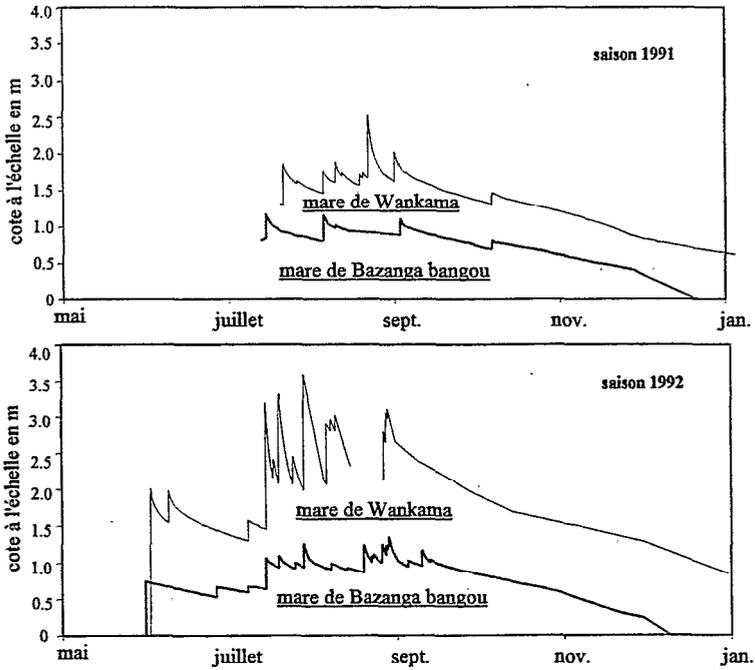


Figure 7. Variations des niveaux des mares de Wankama et Bazanga pour les années 1991 et 1992.

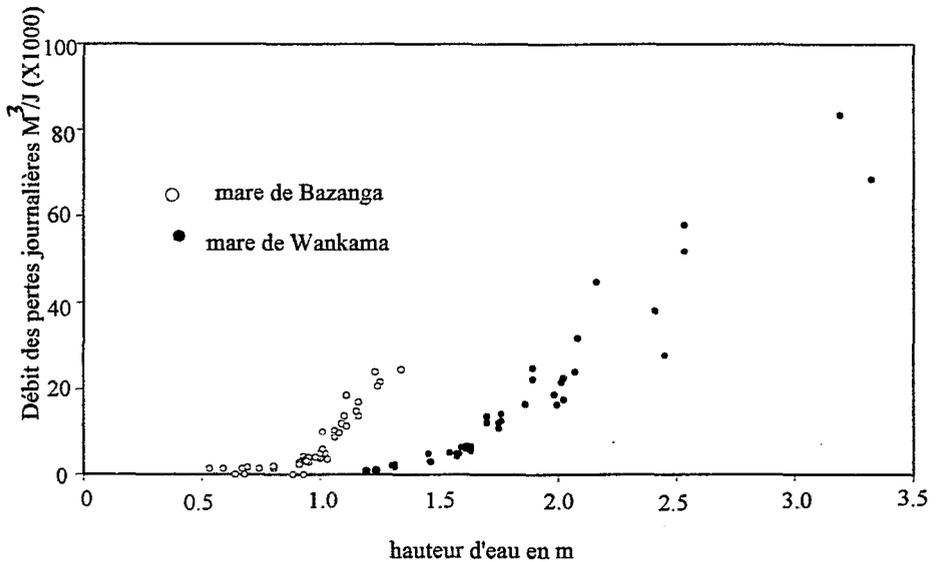


Figure 8. Débit moyen des pertes journalières en fonction de la hauteur d'eau.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

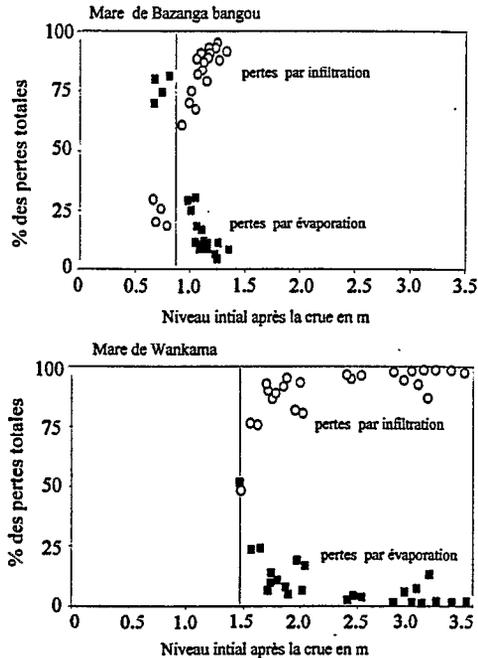


Figure 9. Parts respectives de l'infiltration et de l'évaporation dans le bilan de la mare en fonction de la hauteur du plan d'eau à la fin de l'épisode pluvieux (mares de Wankama et Bazanga).

## 5.2.4. Bilan hydrologique

### 5.2.4.1. L'évaporation

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

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

- un régime d'évaporation en saison sèche contrasté entre mare de plateau (pertes par évaporation comprises entre 75 et 80,7 %) et la mare de bas-fond (entre 35 et 43,6 %).
- une estimation convergente de l'évaporation, l'écart maximal d'estimation étant de 8,8 % sur le bilan saisonnier de la mare de Wankama et de 5,7 % pour la mare de plateau. La surestimation par le bac enterré *in situ* est logique. Elle met en évidence l'amplification de l'effet oasis sur des surfaces élémentaires. Par contre, l'estimation par correction de la mesure bac classe A est, de manière inattendue, proche des mesures *in situ*. En effet, sa comparaison à nos valeurs aurait logiquement dû se solder par une sous-estimation de la lame évaporée, le contexte hydrologique dans lequel cette correction a été établie (grande surface évaporante, peu infiltrante) étant loin de celui de nos mares.

En termes de bilan hydrologique, ces résultats sont satisfaisants, permettant d'obtenir une précision minimum de 10 % sur les lames évaporées. La faible importance de l'évaporation journalière en saison des pluies et un régime de la mare en constante vidange rapide (DESCONNETS *et al*, 1993), minimisent le terme évaporatoire dans le bilan durant cette période et donc les conséquences de l'imprécision de son estimation pour le calcul du bilan de la mare.

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

Le coefficient K est de 0.56 (écart type 0.08) pour la mare de plateau pour laquelle les conditions d'évaporation sont maximales et de 0.37 (écart type 0.18) pour la mare de vallée qui est en situation protégée avec un contexte pédologique plus favorable à l'infiltration. On notera la forte variabilité de K pour la mare de vallée (coefficient de variation 48 %). La dispersion des coefficients K peut être expliquée, d'une part, par les erreurs d'estimation de la modélisation isotopique, d'autre part et surtout, par le changement de régime hydrologique entre les épisodes étudiés. Une étude de l'évaporation étendue sur un plus grand ensemble d'épisodes (incluant un grand éventail de régimes de vidange) aurait sans doute mis à jour une corrélation du coefficient K avec la hauteur initiale de l'épisode.

#### 5.2.4.2. Estimation de l'infiltration

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

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

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

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

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

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

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

On remarque que :

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

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

#### 5.2.4.3. Variabilité du bilan saisonnier

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

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

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

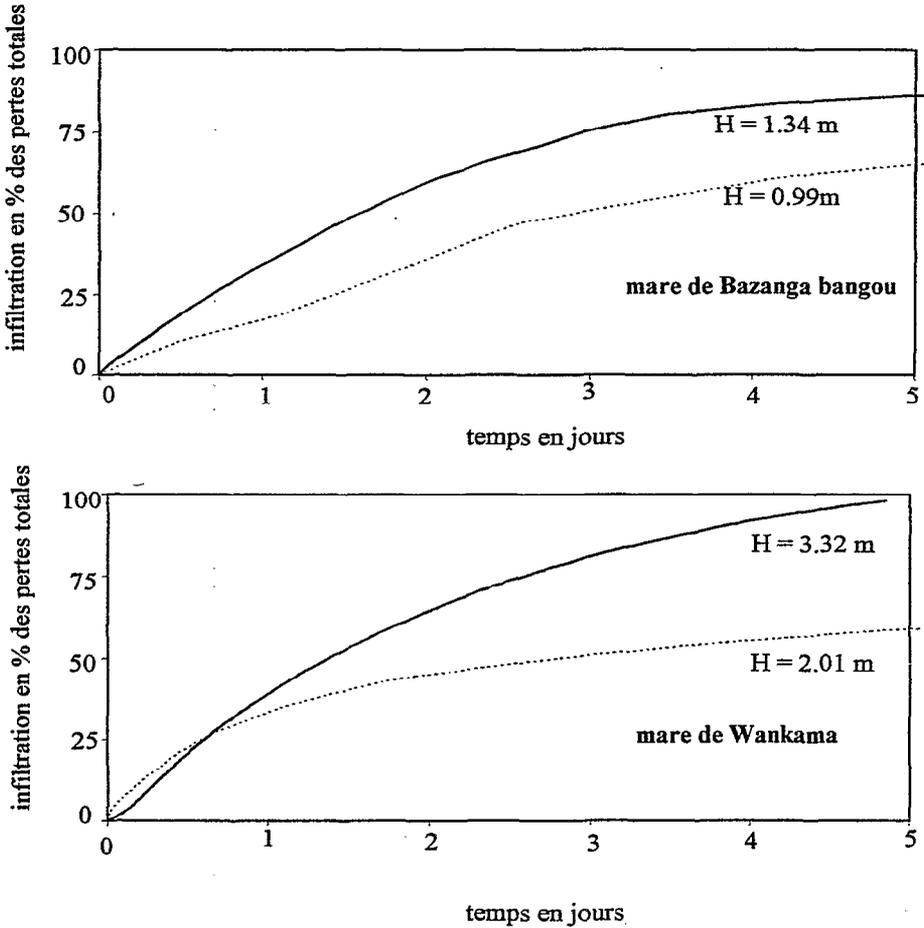


Figure 10. Courbe d'infiltration cumulée en fonction du temps pour deux hauteurs du plan d'eau à la fin de l'épisode pluvieux (mares de Wankama et Bazanga).

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

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

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

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

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

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

### 5.3. Aperçu sur l'extension et comparaison du bilan

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

### 5.4. Perspectives d'études

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

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

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

## 6. CONCLUSION

Les études hydrologiques régionales en zone sahélienne se heurtent à des difficultés propres à ce type de milieu : *intermittence temporelle des écoulements et discontinuité spatiale des réseaux hydrographiques*. Un suivi des bassins endoréiques qui forment l'ossature hydrologique dans ces régions a été mis sur pied sur une zone test de 600 km<sup>2</sup>. Son but était de fournir les éléments en vue d'une modélisation hydrologique, à l'échelle du super-site central est de HAPEX-Sahel dans un premier temps, puis éventuellement à celle du degré carré dans la mesure où les méthodes de spatialisation du milieu s'avéreront pertinentes. Le jeu de données recueillies n'a pas été aussi riche qu'on l'espérait au départ, du fait de difficultés météorologiques. Néanmoins, le suivi durant trois ans (seuls les résultats initiaux sur les deux premières années 1991 et 1992 ont été présentés ici) d'un certain nombre de mares témoins à l'aide d'enregistreurs de niveau a permis de se faire une bonne idée du fonctionnement général des systèmes endoréiques de plateau, d'une part, de bas-fonds, d'autre part. En ce qui concerne le ruissellement, les systèmes de plateau montrent une sensibilité bien moindre au régime pluviométrique (coefficient de ruissellement moyen annuel de l'ordre de 20 %, pratiquement constant) que les systèmes de bas-fonds où ce même coefficient peut varier de quelques % (1991) à plus de 25 % (1992) selon le rythme et l'intensité des pluies. Par ailleurs, l'infiltration depuis les mares de plateau ont été faibles par rapport à l'évaporation, alors que sur les mares de bas-fonds elle peut atteindre 22 % de la lame d'eau précipitée sur le bassin. Cette eau infiltrée depuis la mare est susceptible de rejoindre les nappes,

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

## RÉFÉRENCES

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

## ANNEXE 1

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

Tableau A1-1.

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

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

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

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

## ANNEXE 2

## HYDROMÉTRIE/HYDROMETRY

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

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

\* En dehors de la zone 30 x 20 km<sup>2</sup>; *outside the boundaries of the 30 x 30 km<sup>2</sup> study area.*

Ancien cours d'eau : *dry valley*

Cuvette : *depression*

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

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

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

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

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

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



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

Date	18O ‰	2H ‰	Volume m <sup>3</sup>	Temp. Eau °C	Conduc- tivité µS	pH	Tac mg/l	Cl	Ca	Mg	K	Na	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
11-07-1991	-	-			42.0	6.8	9.2	1.8	1.0	1.4	1.9						
18-07-1991	-	-			44.4	7.0	9.2	1.8	1.4	1.4	2.4						
25-07-1991	-0.15	-5.90	1 377.2	22.4	25.2	7.0	7.3	1.3	0.6	0.7	1.9						
01-08-1991	-	-	976.5	26.6	37.2	7.0	10.4	1.7	1.0	1.4	1.4						
08-08-1991	-	-	3 456.5	25.4	30.0	7.0	10.4	1.3	0.5	1.1	1.0						
15-08-1991	- 3.43	24.40	1 377.2	26.3	44.4	7.1	14.0	1.8	0.6	1.4	1.0						
22-08-1991	10.10	72.40	4 565.8	23.3	18.0	7.1	4.3	0.6	1.0	1.1	1.0						
29-08-1991	-	-	1 647.8	30.2		6.8	14.0	1.3	1.0	2.0	0.9						
05-09-1991	-	-	1 893.0	28.8	35.4	6.6	15.3	1.5	0.6	1.2	0.8						
12-09-1991	- 4.22	40.80	1 204.4	30.0	105.0	6.9	18.3	1.3	0.3	4.9	1.2						
19-09-1991	-	-	941.9	28.9	83.0	6.8	1.2	1.5	0.4	16.5	0.2						
26-09-1991	-	-	644.2	31.3	131.0	7.1		1.5	0.7	19.5	0.4						
03-10-1991	0.72	14.70	482.2	30.5	168.4	7.1		1.8	1.0	25.2	0.8						
10-10-1991	-	-	644.2	31.0	183.2	7.2	6.1	1.8	1.7	25.2	0.8						
17-10-1991	-	-	482.2	28.7	210.0	7.1		2.7	1.9	33.0	0.5						
24-10-1991	2.96	1.40	369.3		200.0	7.2		2.7	2.1	29.1	1.0						
31-10-1991	-	-	250.6		197.2	7.3		2.5	0.2	27.3	1.3						
07-11-1991	-	-	162.5		463.0	7.4		2.1	1.9	7.3	2.8						
14-11-1991	6.76	14.30	99.5		438.0	6.7		2.0	1.8	7.7	4.8						
21-11-1991	-	-	48.0					0.8	2.6	9.9	6.7						
28-11-1991	-	-	23.4	20.7	331.0	6.8		0.6	2.5	8.9	9.2						
05-12-1991	-	-	13.7	20.8	330.0	6.8		0.4	3.7	11.0	9.1						
12-12-1991	-	-	7.2	23.6	285.0	6.7		0.4	2.8	10.3	8.6						
19-12-1991	11.55	31.50	3.2					1.2	3.0	11.0	10.1						
26-12-1991			1.4														
02-01-1992			0.4	16.2	240.0	6.8		0.9	3.7	11.0	12.0						
09-01-1992			0.0														
16-01-1992	15.62	49.60		19.5	290.0	6.2		2.7	6.7	16.3	14.4						

**Tableau A3-3.** Teneurs isotopiques et mesures bac sur la mare de Bazanga Bangou pour la saison 1992.

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

Date	Cote échelle m	Volume m <sup>3</sup>	Lame évaporée du bac enterré mm	Conductivité μS	<sup>18</sup> O ‰	<sup>2</sup> H ‰
23-09-1992	0.93	2 384.8	8	23	- 1.1	- 11.7
24-09-1992	0.92	2 284.9	5	21		
28-09-1992	0.88	1 913.8	22	36	0.8	- 5.1
01-10-1992	0.87	1 827.9	18	52	2.0	
07-10-1992	0.82	1 437.9	33	74	3.9	11.7
08-10-1992	0.79	1 233.7	10	80		
10-10-1992	0.78	1 170.4	13	94	5.2	
14-10-1992	0.75	966.5	32	123	6.7	
17-10-1992	0.72	836.9	19	132	7.1	29.3
21-10-1992	0.69	698.1	34	140		
23-10-1992	0.68	635.2	15	154	9.9	38.5
28-10-1992	0.63	454.4	40	185	12.3	
02-11-1992	0.57	301.9	44	248	15.0	62.9
06-11-1992	0.52	199.5	30	327	16.5	
11-11-1992	0.46	109.0	50	403	18.6	
16-11-1992	0.37	44.5	44	626	21.7	96.7
23-11-1992	0.30	20.1	60	906	27.6	112.3

**Tableau A3-4.** Teneurs isotopiques et mesures bac sur la mare de Wankama pour la saison 1992.*Isotopes analysis and pan measurements for Wankama (1992).*

Date	Cote échelle m	Volume m <sup>3</sup>	Lame évaporée du bac enterré mm	Conductivité μS	<sup>18</sup> O ‰	<sup>2</sup> H ‰
23-09-1992	2.12	6 045.5	0	35	-3.1	-22.5
24-09-1992	2.09	5 731.0	6	-		
25-09-1992	2.06	5 306.2	8	-		
28-09-1992	1.98	4 457.5	16	48		
01-10-1992	1.92	3 839.0	16	53	-1.5	-16.2
06-10-1992	1.83	3 011.5	30	64	-0.8	-11.5
08-10-1992	1.80	2 762.1	10	74	-0.2	
10-10-1992	1.77	2 487.5	11	89	0.1	
14-10-1992	1.69	1 925.2	25	94	0.9	
17-10-1992	1.66	1 767.7	17	103	1.8	-0.6
21-10-1992	1.62	1 533.2	30	95	2.7	4.5
23-10-1992	1.61	1 423.2	12	97		
28-10-1992	1.57	1 225.1	34	86	4.2	
02-11-1992	1.52	1 048.5	33	80		
06-11-1992	1.50	976.5	22	108	5.9	16.1
11-11-1992	1.45	812.7	34	105		
16-11-1992	1.41	683.6	33	124	7.6	25.4
23-11-1992	1.34	525.0	46	125	8.8	
30-11-1992	1.28	404.5	45	145	9.6	34.1
19-01-1993	0.87				16.6	62.4

## ANNEXE 4

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

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

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

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

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

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

Echantillonnage	Ca	Mg	K	Na	Tac	Cl	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Période du 20-6-91 au 27-06-91	1.323	0.243	0.469	0.253	1.220	0.355	1.550	0.480	0.30	0.46	0.00
Période du 27-6-91 au 04-7-91	0.621	0.438	5.318	1.334	2.563	2.128	2.604	3.362	16.65	9.83	2.24
Période du 04-7-91 au 11-7-91	0.681	0.085	0.156	0.414		1.418	1.240	1.921			
Période du 11-7-91 au 18-7-91	0.381	0.061	0.313	0.483		1.418		1.441			
Période du 18-7-91 au 25-7-91	0.060	0.012	0.235	0.253		1.418		0.961			
Période du 25-7-91 au 01-8-91	1.323	0.085	0.156	0.345		1.064	0.620	1.441			
Période du 01-8-91 au 08-8-91	0.401	0.024	0.078	0.230		0.709		0.865			
Période du 08-8-91 au 15-8-91	0.782	0.049	0.196	0.506		2.128	0.620	1.441			
Période du 15-8-91 au 22-8-91	0.100	0.024		0.069		0.355		0.480			
Période du 22-8-91 au 29-8-91	0.621	0.158	0.039	0.184		1.808	0.248	0.672	0.00	0.21	0.00
Période du 29-8-91 au 05-9-91	0.200	0.073				0.426		0.192	0.00	0.13	0.00
Période du 26-9-91 au 03-10-91	0.962	0.255	0.469			0.674	1.488	2.353	0.00	0.32	0.00
Période 03-10-91 au 10-10-94	0.240	0.085				0.426		0.336	0.00	0.15	0.00

## ANNEXE 5

PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES  
AERIAL PHOTOGRAPHSTableau A5-1. Missions photographiques de couverture des bassins versants (1992).  
*Catchment survey (1992).*

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

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

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

Mission	Jour Day	Avion Plane	Type film Type of film	Observations
1	21-9-92	Ulm mustang	125 asa 12 p.	RAS
2	8-10-92	Ulm weedhopper	125 asa 70 p.	RAS
3	16-10-92	Ulm weedhopper	125 asa 70 p.	RAS
4	23-10-92	Ulm weedhopper	125 asa 70 p.	Panne moteur : rte 1 + 3 mares de rte 2
5	4-11-92	Ulm weedhopper	125 asa 70 p.	Vent
6	13-11-92	Ulm weedhopper	125 asa 70 p.	Route 1 puis arrêt cause trop de vent
7	18-11-92	Cessna 185 F	125 asa 70 p.	RAS

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

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

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

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

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

Alt. : altitude en mètres/altitude in metres.

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

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

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

**Tableau A5-5.** Inventaire des photographies aériennes pour les mares de la route n° 2.  
 Focale de 50 mm.  
*Inventory of the aerial photographs for route n° 2. Focal: 50 mm.*  
 N° : « planche », « photo » / *reference of the photo inventory.*  
 Alt. : altitude en mètres / *altitude in metres.*  
 Echelle : échelle théorique négatif / *theoretical scale of the negatives.*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

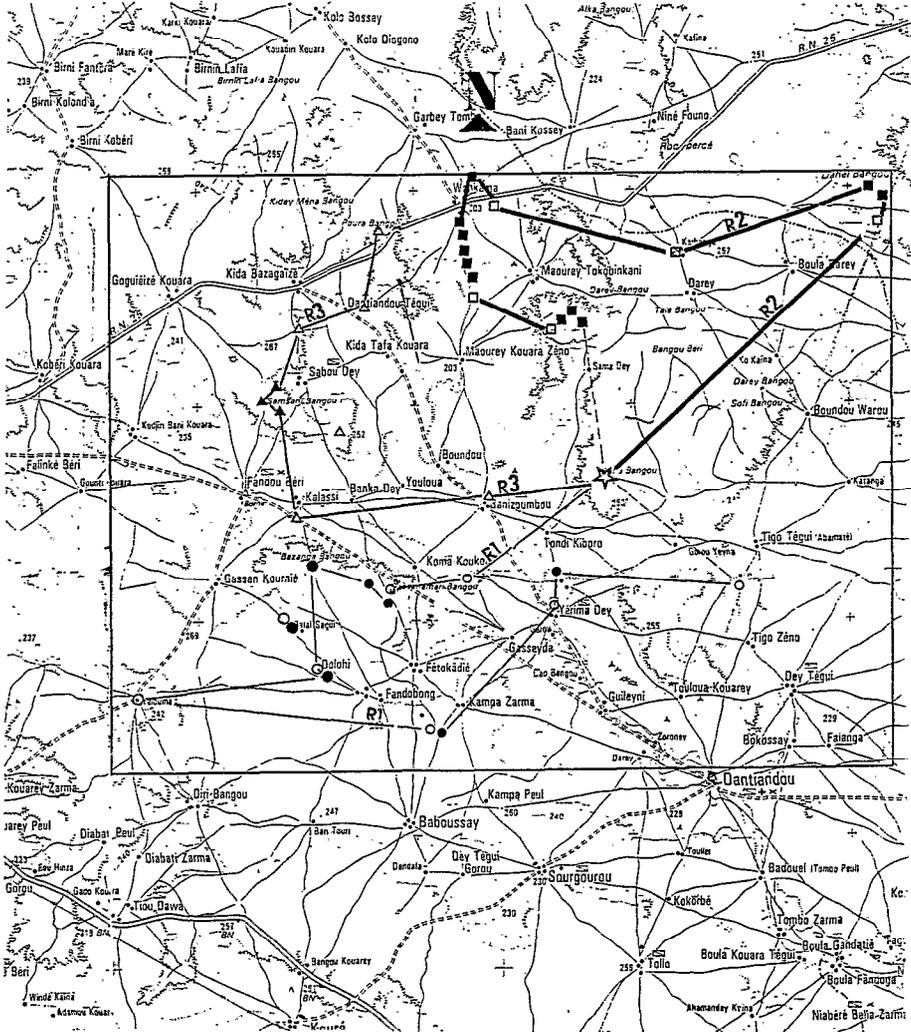


Figure A5.1. Organisation des missions aériennes de suivi des niveaux de mares. Map of the three routes used for the aerial survey of the pools.



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

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