

Géosciences de surface / Hydrologie–Hydrogéologie

Dynamiques de vidange d'une mare temporaire au Sahel l'exemple de Banizoumbou (Sud-Ouest du Niger)

Wenceslas Martin-Rosales^{a,b}, Christian Leduc^{b,*}

^a *Departamento de Geodinamica Universidad de Granada Campus de Fuentenueva 18071 Granada Espagne*

^b *IRD UMR HydroSciences Montpellier BP 64501 34394 Montpellier cedex 5 France*

Reçu le 28 juin 2002 accepté le 17 mars 2003

Presenté par Ghislain de Marsily

Résumé

Étude depuis une décennie le site de Banizoumbou typique de l'hydrologie du Sud-Ouest nigérien a permis de caractériser la triple dynamique de vidange des mares temporaires (1) lors d'un événement pluvieux, une première phase de vidange rapide est suivie d'une seconde, beaucoup plus lente, (2) au cours de la saison des pluies, la vidange est de plus en plus difficile, (3) enfin, en 10 ans, la vidange a également ralenti. Cette triple évolution est interprétée comme une modification importante du colmatage limono-argileux tapissant le fond de la mare, induite par l'anthropisation rapide du milieu. *Pour citer cet article* W Martin-Rosales, C Leduc, C R Geoscience 335 (2003)

© 2003 Académie des sciences. Publié par Editions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Dynamics of emptying of a temporary pond in the Sahel: the case study of Banizoumbou (southwestern Niger) A ten-year study of the Banizoumbou site shows it to be typical of the hydrological processes in southwestern Niger. The emptying dynamics of the temporary pond occur on three time scales: (1) after a rainy event, emptying is initially rapid, becoming much slower later; (2) over a complete wet season, emptying becomes more and more difficult; (3) finally emptying has slowed over the years. This indicates an important change in the clayey-silty clogging of the pond bottom, as a consequence of rapid environmental changes resulting from human activity. *To cite this article* W Martin-Rosales, C Leduc, C R Geoscience 335 (2003)

© 2003 Académie des sciences. Publié par Editions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots clés Niger, milieu semi aride, mare temporaire, vidange, colmatage, évolution temporelle

Keywords Niger, semi-arid environment, temporary pond, emptying, clogging, change with time

Abridged English version

1 Introduction

In semi-arid areas, the lowest parts of watersheds are generally occupied by temporary ponds or rivers, which concentrate surface runoff and are of-

* Auteur correspondant

Adresses e-mail: wmartin@ugres (W. Martin Rosales),
leduc@msem.univ-montp2.fr, leduc@mpl.ird.fr (C. Leduc)

ten the only infiltration points to the water table. Such ponds still require much study. In the Niamey area (southwestern Niger), hydrological operation is characterised by the juxtaposition of many small endorheic watersheds, whose areas amount to several square kilometres. Since the studies reported in [2,3], many new measurements have been made. This paper focuses on the emptying processes of the typical pond at Banizoumbou.

The climate is Sahelian, and therefore largely variable in time and space. Long-term average rainfall is 565 mm in Niamey, with 90% from June to September. Potential evapotranspiration, about 2500 mm yr^{-1} , is always higher than the rainfall, except in July and August. The average shower amount is 14 mm [1].

In the wet season, the temporary ponds are quickly filled on successive occasions, in the very few hours during and after the shower, and the emptying lasts longer (between a few days and several months for the last precipitation). The durability of the pond is linked to the clayey clogging of its bottom.

The Banizoumbou pond ($13^{\circ}32'N$, $2^{\circ}40'E$, 60 km east of Niamey) is about 350 m long and 50 m wide. Water depth usually ranges from 0.5 to 2.5 m. The watershed area is estimated at about 0.5 km^2 . The water table is about 20 m beneath the pond bottom. Since 1994, automatic recorders have been providing data on rainfall, and pond and aquifer levels (Fig. 1).

2 Methods and results

For each event, we calculated the intensity of emptying by 2-cm stages in pond level. Sensitivity was tested by 1- and 5-cm stages. The first finding was that most of the pond water infiltrates to the water table and that only a small part evaporates (between 0.5 and 1.0 cm d^{-1} , which represents less than 15% of the annual volume of water stored in the pond).

The analysis of each single event shows rapid emptying (from 10 to over 100 cm d^{-1}), followed by a much slower phase (between 0.5 and 2.0 cm d^{-1}) as can be seen in Fig. 2. A significant pattern also appears on the scale of a whole rainy season (Fig. 3) for the same pond level, emptying becomes slower and slower as the season progresses. Over the decade, the emptying of each year's last event becomes increasingly more difficult with time (Fig. 4), three groups can be distinguished (1993, 1994–1997, 1998–2000).

3 Discussion

On the scale of each single event, the two-phase process is due to a large difference in the bank material, as already noticed by [2]. In the first phase, water infiltrates easily through the sandy banks, whereas, in the second phase, the clogging of the pond bottom strongly limits infiltration.

On the scale of one year, the decrease in emptying intensity with time reveals a progressive increase in clogging, due to clay supplied by surface runoff from the watershed slopes. During the following dry season, much of this clogging is blown away, since areas without any vegetation cover are particularly exposed to wind erosion [7], although overall the Sahel is a deposition region for wind-blown dust [8]. Villagers making bricks increase the export of clay. The first events of a given year are therefore much more infiltrating than the last ones of the previous year.

On an interannual scale, the increase in clogging is confirmed on the ground: about 10 cm of clay is added each year at the lowest point of the pond. But this filling is not regular, as the higher than usual average rainfall in 1994 (689 mm) and 1998 (699 mm) brought much more clay to the pond. This explains the gaps between 1993 and 1994, 1997 and 1998.

A simple model was calibrated. Leakage coefficients for the clogged and unclogged zones, and the vertical boundary between these zones were adjusted for each emptying event (Figs. 5 and 6). Results confirm our interpretation. The calculated leakage coefficients of the unclogged zone (between 1 and 2 d^{-1}) are in good agreement with values from infiltrometer experiments in a nearby site (between 5 and 30 d^{-1} in most cases).

These observations indicate a rapid change in the environment. For the last 40 years, intense land clearing [6] has modified the hydraulic properties of the soil surface, with consequent higher runoff, and higher groundwater recharge, probably increasing tenfold [4,5]. This also induces an increase in erosion and clogging of the ponds. Their lateral and vertical extents are therefore very unstable.

4 Conclusion

The triple dynamics of the temporary pond at Banizoumbou illustrates the clogging of the pond bottom.

and its change with time. The seasonal and interannual increase in clogging is particularly noticeable in Banizoumbou, but it is characteristic of the whole area. The present state is obviously unsteady, because of the rapid change of hydrological processes following a heavy man-induced modification of the environment. This phenomenon exists in many other semi-arid areas, but often at a much lower rate, which makes it barely measurable.

1 Introduction

En zone semi-aride, les rivières temporaires et les bas-fonds représentent un point essentiel du cycle hydrologique. Concentrant les eaux de surface, ils sont souvent les seuls lieux où puisse se produire une infiltration jusqu'à la nappe, du fait d'une évapotranspiration potentielle (ETP) largement supérieure à la précipitation. Il est donc judicieux de comprendre le fonctionnement de ces sites privilégiés, mais il n'existe que très peu d'études publiées sur ce sujet. Le plus souvent, les références disponibles concernent des sites de recharge artificielle, dont la dynamique ou la qualité des eaux n'a pas grand chose à voir avec un fonctionnement naturel.

Dans un tel contexte, le suivi hydrologique réalise depuis une décennie dans la région de Niamey, dans le Sud-Ouest du Niger, s'avère particulièrement intéressant. Depuis les analyses des références [2,3], de nombreuses observations supplémentaires ont été accumulées. Dans une mare temporaire, la saison des pluies se traduit par une succession de courtes phases de remplissage (les quelques heures pendant et après les averses) et de longues phases de vidange (plusieurs jours le plus souvent, jusqu'à plusieurs mois pour la dernière décrue). Nous analysons ici les phases de décrue de la mare selon une triple échelle temporelle pour apprécier la variation de dynamique de vidange au cours d'un épisode, au cours de la saison des pluies, au cours de la décennie. Dans cet article, nous concentrons notre examen sur la seule mare de Banizoumbou, particulièrement bien étudiée et dont le fonctionnement est tout à fait typique des autres mares temporaires de la région.

2 L'environnement régional

La zone étudiée couvre plusieurs milliers de kilomètres carrés à l'est de Niamey. Les grands traits géomorphologiques sont simples. Au Tertiaire, les sédiments argilo-sableux du Continental terminal se sont déposés en couches épaisses et horizontales, puis grésifiés. Au Quaternaire, la succession des épisodes humides et désertiques a provoqué alternativement le creusement d'un réseau hydrographique et l'apparition de grands ergs dunaires, orientés est-ouest. Il en résulte un paysage morcelé en une multitude de petits bassins endoreïques de quelques kilomètres carrés, qui ne communiquent que lors de pluies très exceptionnelles.

Le climat est typiquement sahélien. Comme dans toute zone aride, les précipitations sont très variables dans le temps et dans l'espace. La pluviosité moyenne annuelle mesurée à Niamey depuis 1905 est de 565 mm, avec des valeurs de moitié ou double pour les années extrêmes. L'essentiel (90%) de la pluie tombe entre juin et septembre, les averses ne durent souvent que deux ou trois heures et elles sont séparées par plusieurs jours sans précipitation. Du fait de la forte ETP (environ 2500 mm an⁻¹), le bilan mensuel pluie-ETP ne peut être positif qu'en juillet et août. La moyenne des averses est de 14 mm [1].

Les points bas des bassins versants sont souvent occupés par une mare temporaire. Presque toutes les mares comportent une partie basse au fond argileux épais de plusieurs décimètres, qui va conserver l'eau de manière continue pendant la saison des pluies et les premières semaines – ou mois – de la saison sèche, et une partie haute, qui n'est submergée que pendant quelques heures ou jours après les averses. L'argile déposée par les crues sur la partie haute se déstructure rapidement en fins copeaux repris par le vent. La plus ou moins grande pérennité de la mare durant et après la saison des pluies dépend de la puissance du colmatage argileux qui tapisse son fond. Tous les épisodes pluvieux ne participent pas également au remplissage : les plus petits ne sont pas capables de générer un ruissellement qui aille jusqu'à la mare.

3 Les mesures à Banizoumbou

Banizoumbou (13°32'N, 2°40'E) se trouve à une soixantaine de kilomètres à l'est de Niamey, dans

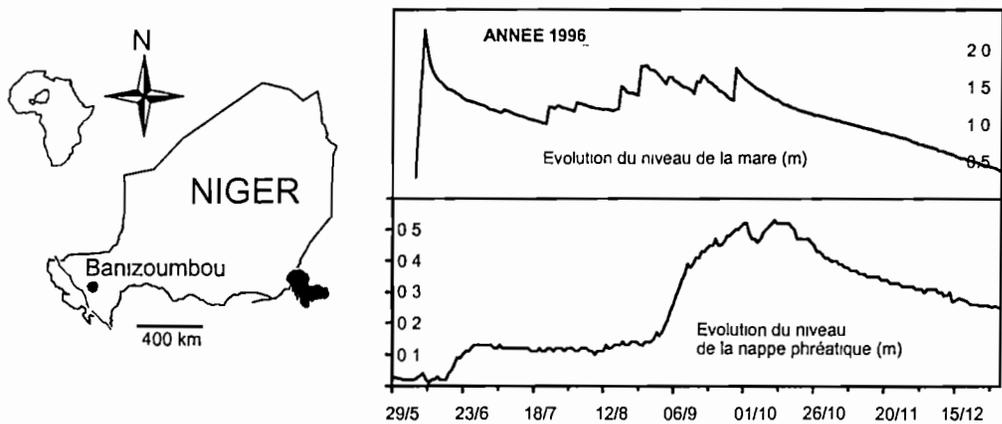


Fig 1 Localisation du site de Banizoumbou et dynamiques de la mare et de la nappe en 1996

Fig 1 Regional map and levels of the pond and the water table in Banizoumbou (1996)

l'axe d'une vallée fossile longue d'environ 100 km, désormais tronçonnée en de multiples segments par des verrous limono-sableux. Ces verrous isolent des mares d'ampleur très variable, dans le temps et dans l'espace, susceptibles de communiquer lorsque leurs niveaux dépassent la cote des verrous. La mare étudiée est la plus importante localement. Elle mesure environ 350 m de long et 50 m de large, la lame d'eau y varie le plus souvent entre 0,5 et 2,5 m. Son bassin versant réel est d'environ 0,5 km². La nappe phréatique se trouve à une vingtaine de mètres sous la mare et ne peut donc pas influencer sur le régime de la mare. L'infiltration sous la mare (estimée par bilan, dont la valeur est de l'ordre de 40 000 à 60 000 m³ an⁻¹) crée dans la nappe phréatique un dôme piezométrique temporaire relativement plat, dont l'amplitude varie selon les années entre 0,5 et 2,0 m à environ 60 m de l'axe de la mare (Fig 1).

Un nivellement de la mare a été réalisé en 1991, un second couvrant un domaine plus vaste en 1999. Des mesures ponctuelles du niveau de la mare sont réalisées depuis 1992, avec une fréquence au moins bimensuelle. Un enregistreur automatique, installé en 1994, fournit une mesure toutes les 3 min. Des pannes nous privent d'une grande partie de 1994 et d'une partie de 1995. Seront donc exploitées essentiellement les années 1995 à 2000. D'éventuelles dérives de la sonde de pression sont facilement rectifiées grâce aux mesures ponctuelles. D'autres enregistreurs automatiques nous fournissent les valeurs de pluie et les niveaux de la nappe phréatique en deux points proches de la mare.

Sur la période 1992–2000, le cumul annuel de pluie a varié entre 407 mm (2000) et 699 mm (1998), la moyenne étant de 516 mm. Le nombre et l'importance des événements pluvieux provoquant une hausse de la mare sont très variables selon les années : sept en 2000, 22 en 1998. Le cumul annuel et le nombre d'événements ne suffisent pas à décrire les fluctuations de la mare, l'intensité et la durée de chaque pluie, les états de surface du bassin sont des variables beaucoup plus explicatives.

4 Méthodes et résultats

Pour chaque épisode de décrue, les observations permettent de calculer une série d'intensités de la vidange, chacune correspondant à une baisse supplémentaire de la mare de 2 cm. Toutes ces intensités successives d'une décrue sont ensuite reportées sur des graphiques intensité–hauteur d'eau dans la mare. Le nombre de points décrivant chaque événement est très variable, puisque dépendant de la hauteur de la mare et de la durée de la période jusqu'à l'averse suivante. Des tests avec une discrétisation de la baisse de 1 ou 5 cm au lieu de 2 ont été réalisés, dans la plupart des cas le seuil de 2 cm suffit à bien décrire la dynamique de vidange.

La première remarque concerne l'importance respective de l'évaporation et de l'infiltration vers la nappe dans la vidange. Desconnets [2] a détaillé l'extrême difficulté de connaître exactement l'évaporation à partir d'un plan d'eau de quelques milliers ou di-

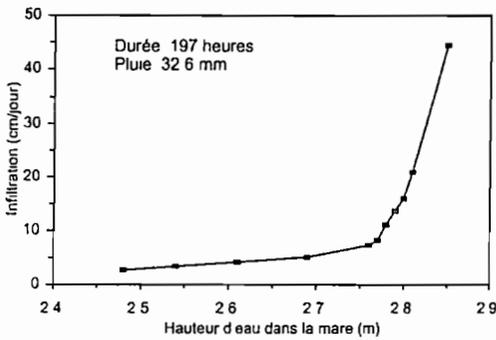


Fig 2 Evolution de l'intensité de l'infiltration au cours de l'épisode du 7 au 15 septembre 1997 en fonction de la cote du plan d'eau

Fig 2 Change in the infiltration intensity for one single event (7–15 September 1997) depending on the water depth of the pond

zaines de milliers de mètres carrés. La station ICRI-SAT de Sadoré, à 50 km de Banizoumbou, nous fournit des valeurs journalières d'évaporation mesurées sur bac A, minimales en juillet et août et atteignant un maximum en mars. L'évaporation journalière pour les mois de juin à septembre y varie de 0,5 à 13,6 mm, la moyenne étant de 5,6 mm. Un abattement est souvent réalisé sur les mesures en bac A pour représenter l'évaporation d'un plan d'eau libre, mais, comme les mesures effectuées à l'aéroport de Niamey, également à environ 50 km de Banizoumbou, sont de 40% plus fortes que celles réalisées à Sadoré, nous avons retenu les valeurs décennales moyennes interannuelles de Sadoré, sans modification, pour représenter l'évaporation de la mare de Banizoumbou. Les intensités de vidange sont toujours supérieures à ces valeurs, souvent très fortement. Elles ne deviennent proches que lorsque les épisodes de décrue durent longtemps et que le niveau de la mare est suffisamment bas, c'est le cas, en particulier, du dernier épisode de décrue de chaque année, qui va durer plusieurs mois. Quelle que soit l'année, au moins 85% de l'eau arrivée à la mare s'infiltré.

La deuxième remarque porte sur chaque épisode de décrue, pris séparément (Fig 2). Il existe un contraste important entre une première phase de vidange rapide et une deuxième phase de vidange beaucoup plus lente. Dans la première phase, les intensités sont comprises entre 10 et plus de 100 cm j^{-1} , dans la deuxième phase, elles sont comprises entre 0,5 et 2 cm j^{-1} .

La troisième remarque concerne l'évolution de la vidange au cours de la saison des pluies. Reportés sur

un graphe unique, tous les épisodes d'une même année s'organisent de façon remarquable. Pour atteindre une intensité donnée, il faut une charge de plus en plus élevée dans la mare au fur et à mesure que la saison s'avance. La Fig 3 montre qu'en 1997 une même intensité de 5 cm j^{-1} correspond à une hauteur de 1,20 m pendant le premier épisode, 2,15 m pendant le cinquième et 2,70 m pendant le neuvième. Le colmatage de la mare augmente donc au cours de la saison.

La quatrième observation touche à la dynamique pluriannuelle de vidange (Fig 4). Pour l'illustrer, nous avons retenu le dernier épisode de chaque année, puisqu'il est le plus long et qu'il n'est plus perturbé par de nouvelles précipitations. Il semble exister une évolution très similaire à la dynamique intra-saisonnière. Le colmatage aurait augmenté avec les années. Plus précisément, les épisodes de vidange s'organisent en trois groupes : 1993 d'un part, 1994–1997 ensuite, 1998–2000 enfin.

5 Discussion

Pour un événement, l'opposition entre vidanges rapide et lente, déjà identifiée par [2], s'explique par la présence d'une zone colmatée dans la partie la plus basse de la mare. Tant que le niveau de la mare est significativement plus haut que la zone colmatée, l'essentiel de l'infiltration se fait au travers des berges non colmatées. La baisse du plan d'eau induit, d'une part, une moindre charge hydraulique dans la mare et, d'autre part, une plus forte proportion de la surface colmatée par rapport à la surface totale susceptible de permettre l'infiltration. Ces deux phénomènes conjugués causent une baisse importante de l'intensité de vidange.

L'augmentation du colmatage au cours d'une saison des pluies s'explique par l'érosion hydrique des versants, accumulant des particules argileuses et limoneuses dans la mare. Cependant, les premières crues de l'année suivante présentent des intensités de vidange beaucoup plus fortes que les dernières de l'année précédente. Une partie significative du colmatage a donc disparu pendant la saison sèche. La principale explication en est l'érosion éolienne. Même si la région est globalement une zone de dépôts de sédiments fins emportés par l'harmattan en saison sèche [8], les secteurs sans végétation, comme une mare asséchée,

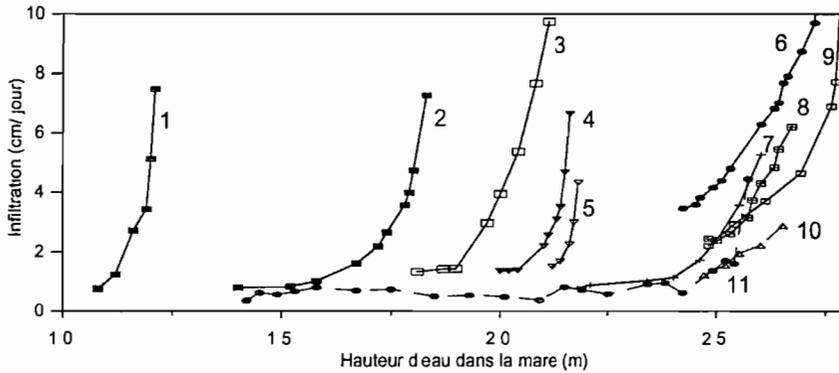


Fig 3 Evolution de l'intensité de l'infiltration au cours de l'année 1997 (les décrues sont numérotées chronologiquement)
 Fig 3 Seasonal change in the infiltration intensity in 1997 (emptying events are chronologically numbered)

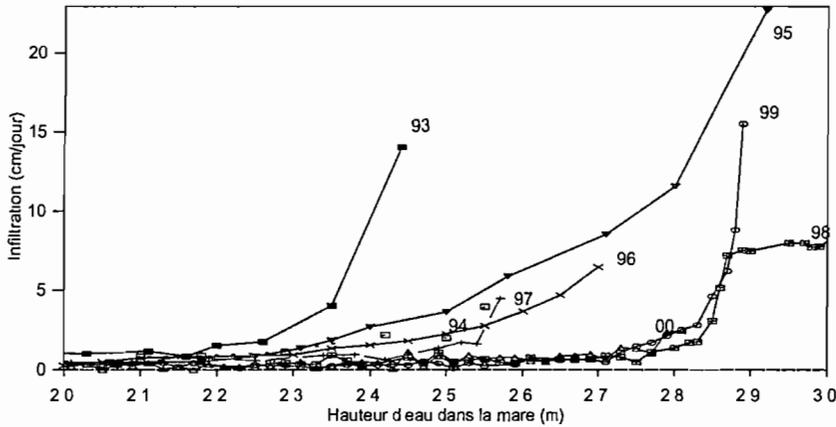


Fig 4 Evolution de l'intensité de l'infiltration du dernier épisode de chaque année de 1993 à 2000
 Fig 4 Long-term change in the infiltration intensity between 1993 and 2000 based on the last emptying event of each year

sont particulièrement sensibles à la déflation éolienne, ainsi qu'observé par Rajot [7] sur le même site. L'érosion éolienne est encore accentuée par le passage des bovins, qui destructurent la couche de surface, la rendant encore plus sensible à l'action du vent. Les sédiments colmatants déposés sur la partie la plus haute de la mare sont particulièrement sensibles à cette érosion. Du fait de leur faible épaisseur (de l'ordre du millimètre), ils se dessèchent rapidement en copeaux discontinus, facilement transportés. Au contraire, les sédiments accumulés dans la partie basse de la mare sont plus épais (de l'ordre du centimètre ou du décimètre) et exposés plus tardivement aux vents, donc moins facilement remaniés. Il faut cependant signaler que, en saison sèche, les villageois prélevent une partie de l'argile du fond de la mare à des fins de construc-

tion. À titre d'exemple, un prélèvement de 200 m³ a été observé au début d'avril 1999.

Malgré la reprise éolienne et la fabrication de briques, la tendance à long terme est un remplissage de la mare par les matériaux fins, ainsi que le montre l'évolution des derniers épisodes de décrue de chaque année depuis une décennie (Fig 4). Cette interprétation est confirmée par l'observation de terrain, qui montre une accumulation d'environ 10 cm an⁻¹ dans le point le plus bas de la mare. Mais le comblement n'est pas un phénomène régulier. Les sauts de colmatage observés entre 1993 et 1994, d'une part, 1997 et 1998, d'autre part, ont été provoqués par les très fortes pluies de 1994 et 1998 (689 et 699 mm respectivement), dont le pouvoir érosif fut nettement supérieur à la moyenne des autres années.

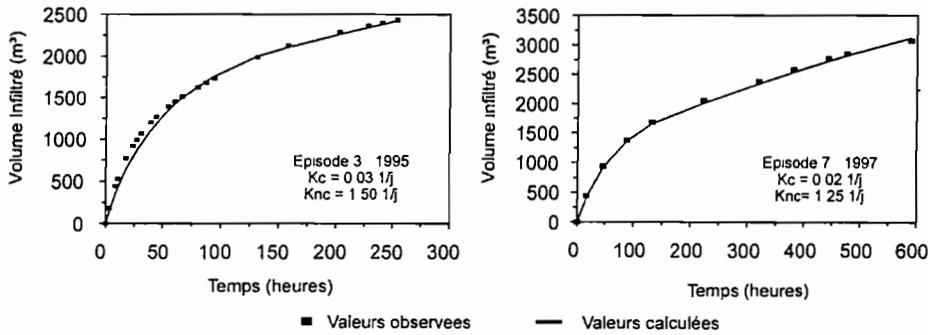


Fig 5 Comparaison des observations et de la modelisation pour deux episodes typiques de vidange

Fig 5 Comparison of field data and model results for two typical emptying events

Une autre explication à la variation du colmatage en cours de saison des pluies pourrait être le développement d'algues. Une telle activité biologique, qui n'est pas particulièrement visible, devrait être sensible à la durée de submersion de la zone colmatée, ce qui n'est pas le cas. De plus, la liaison entre les années exceptionnelles de 1994 et 1998 (en ruissellement et donc en érosion des versants) et les sauts de colmatage (Fig 4) incite à penser que l'apport et l'accumulation de particules fines représentent le facteur fondamental du colmatage.

Un modèle simple de vidange a été mis au point. La mare est découpée en une trentaine d'auroles concentriques, correspondant à des tranches horizontales de 10 cm d'épaisseur. Le volume dV (m^3) infiltré sous toute la mare pendant un intervalle de temps dt (s), fraction de l'épisode de décrue, est la somme des calculs élémentaires réalisés sur chacune des auroles $dV = dt \sum K_i S_i h_i$, avec K_i la drainance (s^{-1}), S_i la surface (m^2) et h_i la charge moyenne (m) correspondant à chacune des auroles i au cours de l'intervalle dt . Les charges moyennes de chacune des auroles et les surfaces infiltrantes sont données à chaque pas de temps par la chronique des mesures de terrain. Au cours d'une même décrue, K_i ne peut prendre que deux valeurs, une unique pour l'ensemble des auroles de la zone colmatée ou une unique pour l'ensemble des auroles de la zone non colmatée. Pour chaque épisode de vidange, on ajuste les deux drainances et la cote de la limite entre la zone colmatée et la zone non colmatée pour obtenir la meilleure reproduction de la courbe observée (Fig 5), ces trois valeurs sont constantes au cours d'une même décrue, mais variables d'une décrue à l'autre (Fig 6). Lorsque les crues sont faibles

(épisodes 4 et 5 de 1995 ou 11 de 1997, par exemple), le niveau de la mare ne monte pas au-dessus de la limite des deux zones et la drainance de la zone non colmatée ne peut être calculée. Les résultats de ce modèle confortent notre schéma explicatif : la drainance de la zone non colmatée varie relativement peu, celle de la zone colmatée diminue en cours de saison et la limite entre les deux zones augmente. Les drainances ainsi calculées pour la zone non colmatée, entre 1 et $2 j^{-1}$, sont proches des résultats des tests d'infiltration au double anneau sur le site comparable de Wankama, 15 km plus au nord dans la même vallée fossile (de 5 à $30 j^{-1}$ dans la plupart des cas).

L'ensemble du paysage est en pleine évolution. Les intensifs défrichements et mises en culture opérés en quelques décennies ont fait disparaître une grande partie de la végétation naturelle au profit des champs de mil et des jachères [6]. Ceci amène une très forte augmentation du ruissellement, et donc de la recharge de la nappe, qui a probablement été multipliée par 10 depuis 1960 [4,5]. Les seuils séparant les mares sont particulièrement sensibles à cette modification du régime hydrologique : ils peuvent croître ou régresser selon les épisodes pluvieux, dans certains cas extrêmes, ils peuvent même disparaître complètement. L'extension horizontale et verticale des mares temporaires est donc instable.

6 Conclusion

L'interprétation des mesures faites à Banizoumbou depuis 1992 montre que les épisodes de vidange de cette mare temporaire s'organisent selon trois dynamiques qui se renouvellent chaque année : (1) une

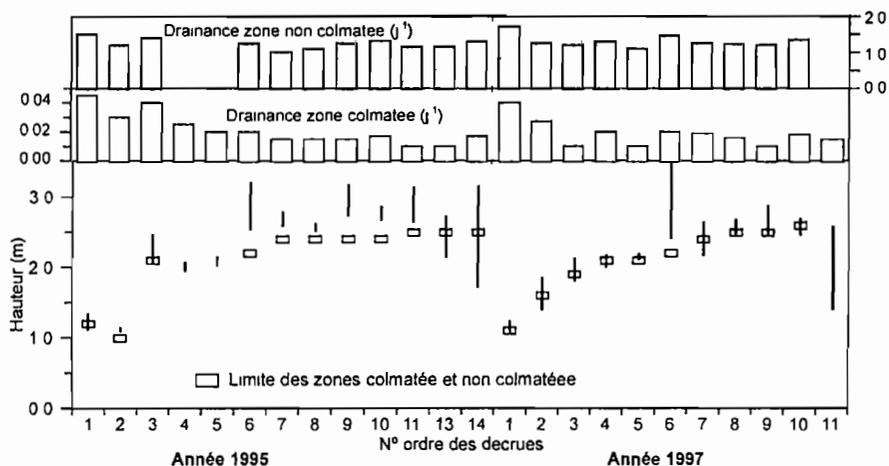


Fig 6 Modelisation des années 1995 et 1997 sur le graphique du bas amplitude de chaque decrue (lignes verticales) et cote de la limite entre zones non colmatée et colmatée sur les graphiques du haut drainances modelisées pour les deux zones

Fig 6 Modelling results for 1995 and 1997 on the lower graph range of each decrease (vertical lines) and limit between clogged and unclogged areas on the upper graphs the respective leakage coefficients (d^{-1})

dynamique à l'échelle de l'événement, opposant vidange rapide et vidange lente, et mettant en évidence la présence d'une zone colmatée dans le fond de la mare, (2) une dynamique à l'échelle de la saison, avec une diminution progressive de la vitesse d'infiltration, due à un apport de particules fines par le ruissellement, (3) une dynamique pluriannuelle, témoignant d'un comblement progressif de la mare. Entre deux saisons des pluies, l'érosion éolienne reprend une partie des sédiments fins responsables de ce colmatage.

Cette mare est tout à fait représentative de la région de Niamey. Des mesures faites sur la même période dans d'autres sites montrent également ces dynamiques selon plusieurs échelles de temps. Elle illustre parfaitement la complexité et le caractère transitoire de la situation hydrologique actuelle, résultat d'une modification radicale du couvert végétal. Plus largement, l'anthropisation accélérée de cette région nous a permis d'observer en une décennie des processus actifs dans bien d'autres régions semi-arides, mais de manière beaucoup plus lente, donc bien plus difficilement mesurables.

Remerciements

Cette étude a été financée par l'IRD (Institut de recherche pour le développement) et soutenue par le PNRH (Programme national de recherche en hydrologie). Pour les mesures de terrain, nous remer-

çons l'équipe hydrologie du centre IRD de Niamey, le centre ICRISAT de Sadoré et la direction de la Météorologie nationale.

Références

- [1] N D Amato T Lebel On the characteristics of the rainfall events in the Sahel with a view to the analysis of climatic variability *Int J Climatol* 18 (1998) 955–974
- [2] J C Desconnets Typologie et caractérisation hydrologique des systèmes endoreiques en milieu sahélien (Niger, degré carré de Niamey) thèse université Montpellier 2 1994 326 p + annexes
- [3] J-C Desconnets J-D Taupin T Lebel C Leduc Hydrology of the Hapex-Sahel central super site surface water drainage and aquifer recharge through the pool systems *J Hydrol* 188–189 (1–4) (1997) 155–178
- [4] G Favreau, C Leduc, C Marlin, A Guero Une dépression piézométrique naturelle en hausse au Sahel (Sud Ouest du Niger) *C R Geoscience* 334 (2002) 395–401
- [5] C Leduc, G Favreau, P Schroeter Long-term rise of a Sahelian water table the Continental Terminal in south west Niger *J Hydrol* 243 (2001) 43–54
- [6] C Leduc, M Loireau Evolution du couvert végétal et de la recharge de la nappe phréatique en zone sahélienne (Niamey Niger) Sustainability of water resources under increasing uncertainty in *Publ AISH n°240* 1997 pp 193–200
- [7] J-L Rajot Wind blown sediment mass budget of a Sahelian village land unit in Niger *Bull Soc géol France* 172 (5) (2001) 523–531
- [8] K Stahr, L Herrmann, R Jahn Long distance dust transport in the Sudano Sahelian zone and the consequences for soil properties in *Wind Erosion in West Africa The Problem and its Control* Vol 6 1994 pp 23–33