

UN EXEMPLE DE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DANS LA RÉGION DE NIAMEY : LE BASSIN DE SAMA DEY

M. ESTEVES¹ ET F. LENOIR²

RÉSUMÉ

Le bassin de Sama Dey est caractérisé par l'endoréisme des écoulements de surface qui convergent vers une cuvette au centre du bassin, s'infiltrent et alimentent la nappe phréatique à plus de 40 mètres de profondeur. Le suivi des eaux souterraines prolonge l'étude et informe sur le trajet des écoulements hydriques à l'échelle régionale. Ce fonctionnement résulte de conditions imposées par l'histoire de la mise en place du paysage.

À partir des données acquises en 1992 et 1993, une première évaluation des composantes du bilan hydrologique de surface est présentée. Elle fournit une estimation des volumes disponibles pour l'alimentation de la nappe à la verticale de la cuvette de Sama Dey.

Le temps de transfert entre la surface et la nappe phréatique est court et limité à quelques heures, impliquant une infiltration par chenaux préférentiels et non pas par un front uniforme. Les observations et interprétations aboutissent à l'hypothèse d'un fonctionnement de type karstique, impliquant un réseau complexe de réservoirs compartimentés, connectés ou non suivant l'état du remplissage.

¹Hydrologue, Orstom, BP 11416 Niamey, Niger.

²Géologue, Orstom, BP 11416 Niamey, Niger.

LE CADRE RÉGIONAL

Le *site central* est d'Hapex-Sahel s'inscrit dans le bassin des Iullemmeden et se localise à l'est de Niamey, entre les parallèles 13°29' et 13°40' nord et les méridiens 2°36' et 2°48' est. Le paysage est dominé par des plateaux indurés, partiellement recouverts de brousse tigrée, bordant des dépressions largement ouvertes et ensablées, aptes aux cultures pluviales. Les habitants groupés en petits villages s'alimentent en eau sur des puits utilisant des aquifères contenus dans des formations argilo-sableuses, quelques dizaines de mètres plus bas. Ces puits permanents sont souvent suffisants pour assurer les besoins domestiques et l'alimentation en eau des troupeaux installés sur le terroir. Le village de Sama Dey peut servir d'exemple pour illustrer les grands traits du fonctionnement hydrologique de la région.

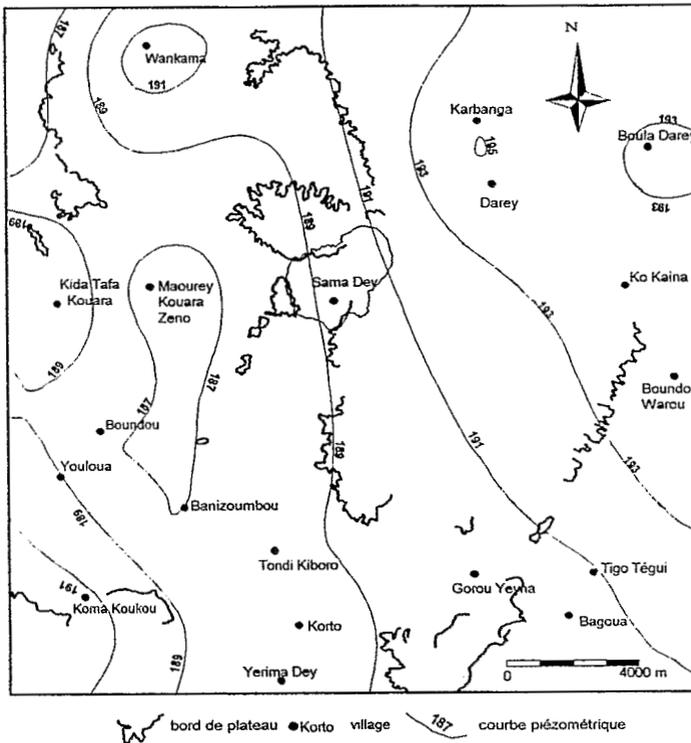
LES DONNÉES ANTÉRIEURES

La lecture de la carte topographique au 1/200 000 (IGN, 1980) nous apprend par les deux seules courbes de niveau utilisées (altitudes 200/240 m) l'existence de nombreuses cuvettes, et par des figurés appropriés la présence de dépressions fermées, de mares temporaires ou d'indices d'écoulements intermittents. L'interprétation cartographique montre que les eaux de surface se limitent aux écoulements temporaires, localisés, discontinus, évanescents en bas de pente, et s'ils se regroupent dans un bas-fond leur présence y est tout à fait éphémère. Les réseaux hydrographiques, inorganisés ou à peine esquissés, laissent planer de larges doutes sur une hiérarchie de l'écoulement de l'amont vers l'aval. Les ruissellements sont entièrement orientés vers des bassins endoréiques et aucun signe d'écoulement de surface permanent n'existe en rive gauche du fleuve Niger.

La pluviosité moyenne annuelle est évaluée à 562 millimètres sur la période 1950-1989 (LEBEL *et al.*, 1991), concentrée sur quatre mois, avec un maximum centré sur juillet-août. Ces conditions devraient faciliter les ruissellements, permettant à ceux-ci de se rassembler dans des chenaux qui devraient être fonctionnels en période pluvieuse, avec des débits croissants d'amont en aval dans le bassin concerné par l'événement pluvieux. Ce n'est pas le cas, les débits spécifiques diminuent dès qu'ils s'éloignent des bordures de plateaux et des versants, puis disparaissent dans un lit ensablé, au parcours imprécis, en bas de pente ou en fond de cuvette.

L'existence d'aquifères superposés a été présentée comme un système multicouches de nappes libres et captives (PNUD, 1990). Dans le cadre de cette étude, seule la nappe phréatique a été considérée. La carte piézométrique établie pour le *site central* est (figure 1) à partir d'observations réalisées en fin de saison des pluies, met en évidence un drainage de la nappe vers l'ouest, sur un point bas

proche de l'axe de la *vallée de Dantiandou*. Le niveau piézométrique à l'aplomb de Sama Dey est à environ 190 mètres NGN, ce qui représente une profondeur de l'ordre de 45 mètres par rapport au niveau du sol au puits d'observation de ce village.



certainement voisine de l'accident majeur à l'échelle continentale qui met en contact ces deux blocs. Ce chevauchement se voit au Ghana, Togo, Bénin, Niger, Mali puis contourne la Mauritanie. Sur le tracé nigérien, cet accident passe par le W du fleuve Niger (12°30' N) et rejoint le *fossé de Gao* (RADIER R., 1953) avec des conséquences importantes sur les fonctionnements hydrologique et hydrogéologique (ARCHAMBAULT., 1967). Sur ces deux chaînes, la tectonique a laissé des accidents structuraux différents par leurs directions et leurs effets. La géologie structurale a organisé le drainage du socle, provoquant son altération, puis favorisé le drainage des sédiments, autant au cours des épisodes de dépôt que pendant les phases tardives de l'évolution pédologique.

La tranche sédimentaire concernée se réduit aux derniers dépôts du continental terminal, dont l'épaisseur diminue vers l'ouest pour se terminer en biseau sur le socle (MACHENS E., 1960). Partant de l'est, la base de cette formation Ct¹ (GREIGERT J., POUGNET R., 1967), comprend des sables et argiles kaoliniques ferruginisées, puis des dépôts argilo-sableux à lignites Ct² et les grès argileux du moyen-Niger Ct³ visibles sur le *site central est*. Cette série monotone, composée d'argiles rougeâtres et de sables à dominance de silts en bancs horizontaux bien réglés, suggère l'extension et le fonctionnement des glacis de ce bassin. La circulation des eaux est favorisée par les horizons lenticulaires à bonne porosité et l'existence d'un drainage vertical, mis en place dès la sédimentation, tributaire des accidents drainants du socle. Après l'ère tertiaire, l'érosion a fortement entamé les grandes surfaces planes avant la mise en place d'un erg « ancien » Qd¹. Il pourrait être l'homologue de formations éoliennes antérieures à 40 000 BP connues ailleurs. Ces sédiments éoliens, parfois fluvio-lacustres, comblent les incisions d'un réseau hydrographique, recouvrent et colmatent toutes les irrégularités topographiques. Après une nouvelle phase érosive, la série se poursuit par les dunes d'âge Ogolien. Elle se termine avec les formations éoliennes récentes et les dépôts ou terrasses décrits dans la vallée du Niger (DUBOIS *et al.*, 1984).

Pendant la phase sédimentaire, la surface du bassin proche de l'équilibre ne pouvait subir qu'une érosion superficielle fortement ralentie. Par lessivage, l'évolution minéralogique est à dominante kaolinite et le fer à migré dans le paysage sous une forme soluble. Évacué des zones soumises au drainage, il s'est accumulé ailleurs dans la trame argileuse. Des conditions climatiques très humides ont provoqué la migration *per ascensum* des sels ferriques grâce à la présence « d'une nappe phréatique générale » (GAVAUD M., 1977). Par ce raisonnement, les grandes surfaces cuirassées encore visibles pourraient correspondre aux parties les plus mal drainées des glacis et aux bas de pente des paysages anciens. L'induration s'est faite plus tard et les horizons cuirassés fournissent les témoins d'une surface datée de la fin de l'ère tertiaire. Au quaternaire, la résistance à l'érosion dépend de l'induration et de l'insolubilité, donc de la teneur en fer conditionnée par le drainage. Sur les reliefs, les « cirques d'effondrement »

(GAVAUD M., 1977), n'ont pas tous subi la même évolution. Au stade juvénile, ils ont effectivement la forme de cirque et présentent avec les dolines des analogies par leur morphologie et leur genèse par dissolution. La mise en route du mécanisme se fait sur un site sensible à l'érosion, donc déjà soumis à un drainage pendant la période de fonctionnement du glaciaire, avec une surface du plateau moins riche en fer, déjà partiellement éliminé. Le domaine de drainage endoréique s'agrandit, les volumes d'eau mis en jeu s'amplifient, accélèrent les effets de la dissolution et de l'érosion. L'extension de ces bassins endoréiques formés sur dolines entraîne le recouplement de leurs cônes, forme des ouvalas dans lesquels on situe facilement l'emplacement des ombilics de chaque doline dans leur phase juvénile.

Les plateaux résiduels, extérieurs à tous les grands réseaux de circulation karstique ont résisté et leur organisation en « tables alvéolaires » (GAVAUD M., 1977) est vraisemblablement héritée de la configuration polygonale des drains, établis sur le réseau des fentes de décompression à la surface du socle. Sur ces surfaces tabulaires, la présence des réseaux hydrographiques au tracé mal défini et à très faible incision peuvent s'observer, mais ils sont actuellement perchés et sans continuité avec les réseaux mieux marqués actuels. Les escarpements cuirassés résiduels qui les bordent présentent parfois des amorces de réseaux karstiques, ouverts sur des cavités ou grottes, tout à fait comparables à ceux rencontrés dans les roches carbonatées. Des figures du même type ont été décrites (SPONHOLZ B., 1989 ; BUSCHE D. et SPONHOLZ B., 1992) dans la partie orientale du Niger, sur une fraction du bassin centré sur le lac Tchad. Dans le bassin des Iullemmeden et le Liptako cristallin, les effets des phénomènes karstiques ont également été signalés et l'importance de la fracturation soulignée (WILLEMS *et al.*, 1993).

Le site de Sama Dey représente une synthèse régionale assez complète, avec son cirque ouvert dans plusieurs directions sur des structures analogues, bordé de plateaux résiduels profondément entaillés par l'érosion quaternaire, comblé par l'erg « ancien », recreusé et partiellement rempli en plusieurs étapes par des sédiments récents, déposés par le fonctionnement hydrique de sa cuvette, sur un réseau endoréique drainé en profondeur.

DESCRIPTION DU BASSIN VERSANT DE SAMA DEY

Le bassin versant de Sama Dey est centré sur une dépression fermée limitée essentiellement par des plateaux avec un dénivelé total de l'ordre de 29 mètres. Les altitudes sont comprises entre 263 mètres sur les plateaux et 234 mètres au fond de la cuvette, avec une répartition uniforme. Sur les plateaux, la délimitation du bassin versant est rendue difficile par la faiblesse des pentes. Les limites que nous présentons (figure 2) ont été obtenues à partir de relevés GPS réalisés en saison des pluies. Le bassin versant topographique a une superficie totale

d'environ 6,1 kilomètres carrés. L'exutoire du bassin versant est une cuvette de forme triangulaire, d'une superficie de 12,9 ha. Les plateaux et les talus bordiers représentent 17 % de la superficie auxquels s'ajoutent les versants (81 %). La longueur des versants est comprise entre de 650 et 800 mètres, les plus courts étant situés autour de la cuvette. Les pentes s'organisent en bandes grossièrement concentriques de la cuvette vers les plateaux. Les pentes les plus faibles (< 1 %) se situent dans le fond de la cuvette, sur les plateaux, et également dans la partie nord-est du bassin. Les parties hautes se distinguent par des pentes fortes de l'ordre de 4 à 8 % ; les parties intermédiaires ont des pentes comprises entre 2 et 4 %. Naturellement, les pentes les plus marquées sont celles du talus bordier des plateaux.

Le réseau hydrographique ne présente ni la hiérarchie, ni l'organisation bien marquée, ni les aspects dendritique et ramifié caractéristiques. Les seuls traits marquants se résument à la convergence des ravines vers le centre de la dépression et à leur disparition vers l'aval. Ces ravines sont limitées à l'amont par le talus à la limite du plateau. Leur tracé est sub-rectiligne et suit la ligne de plus grande pente. La largeur des chenaux est toujours inférieure à 2,50 mètres et leur profondeur peut dépasser 2 mètres pour les plus entaillés. Ils se terminent par des zones d'épandage des eaux au niveau du raccordement entre les versants et la cuvette. Ces surfaces se matérialisent par d'importantes accumulations de sable.

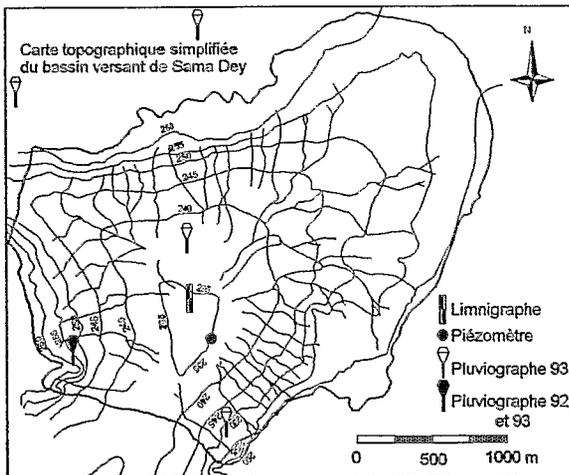


Figure 2 :
Carte du bassin versant de Sama Dey.

PRODUCTION ET TRANSFERT DES ÉCOULEMENTS DE SURFACE

La production des écoulements de surface est le ruissellement par refus à l'infiltration (ou hortonien) et il n'existe pas d'écoulement de base. Dès que la quantité d'eau à la surface du sol dépasse l'infiltrabilité, et après avoir satisfait la rétention superficielle, l'eau en excès se met en mouvement. Au-delà d'un seuil de superficie, les eaux de ruissellement rejoignent les drains élémentaires du réseau de ravines. À ce stade, la transformation de la pluie en écoulement de surface est réalisée. Dans le réseau hydrographique, l'hydrogramme de crue est modifié par la variation du volume d'eau en déplacement (apports et pertes) ou par la modification de la section en travers du chenal (laminage).

La carte des unités hydrologiques du bassin de Sama Dey (ESTEVES M., 1994) nous apprend que les surfaces à fort potentiel de production de ruissellement se localisent dans les zones les plus élevées. Ce sont d'abord les surfaces cuirassées des plateaux et de leur bordure, lorsqu'elles ne sont pas recouvertes par des dépôts sableux, puis les zones fortement encroûtées en haut de versant, au contact du talus. Les surfaces à faible aptitude au ruissellement sont situées dans les parties basses, dans la zone de raccordement avec la cuvette, et sur les dépôts sableux qui recouvrent les plateaux dans les parties nord et nord-est du bassin. La production de ruissellement dans les parties intermédiaires des versants, traditionnellement mises en culture, est commandée par le type d'occupation du sol : champs de mil ou jachères plus ou moins âgées. Si le comportement hydrologique des surfaces décrites plus haut et des jachères reste stable pendant la saison des pluies, celui des zones cultivées varie considérablement en fonction des pratiques culturales (semis, sarclages) et de la répartition des pluies.

Au cours du transfert des écoulements dans le réseau hydrographique, des pertes en eau importantes s'observent ; elles se font par infiltration directe dans le lit des ravines ou à leur débouché dans la cuvette.

PREMIÈRES ANALYSES DES COMPOSANTES DU BILAN DE SURFACE (1992-1993)

Les données pluviographiques sont issues du réseau Epsat-Niger. Les pluies moyennes sur le bassin ont été calculées par la méthode de Thiessen en utilisant les postes pluviométriques situés à proximité du bassin. En 1992, seul un poste se trouvait dans le périmètre du bassin, ce nombre a été porté à trois en 1993. Pendant la période d'observation des écoulements de surface on a enregistré 54 averses.

La grande variabilité spatiale sur de courtes distances est l'une des caractéristiques remarquables des pluies en région sahélienne. Elle s'explique par l'origine convective des précipitations qui donne naissance à des cumulo-nimbus isolés de faible extension ou à des amas nuageux à foyers d'activité multiples et distincts,

qui évoluent en lignes de grains. La pluviosité sur le bassin de Sama Dey n'échappe pas à cette règle. Notre analyse se limite aux totaux pluviométriques des averses enregistrées en 1993 (figure 3). Chaque averse est figurée par la pluie moyenne calculée et par les extrêmes enregistrés sur les cinq postes utilisés, distants au maximum de 3 kilomètres. La variabilité spatiale des pluies est importante sur l'ensemble de la saison avec des écarts relatifs à la moyenne plus importants pour les petits événements. Pour les grosses averses, les écarts sont encore de l'ordre de 40 %. À l'échelle saisonnière, l'écart entre les postes extrêmes est de 38 millimètres, pour un cumul moyen de 405 millimètres.

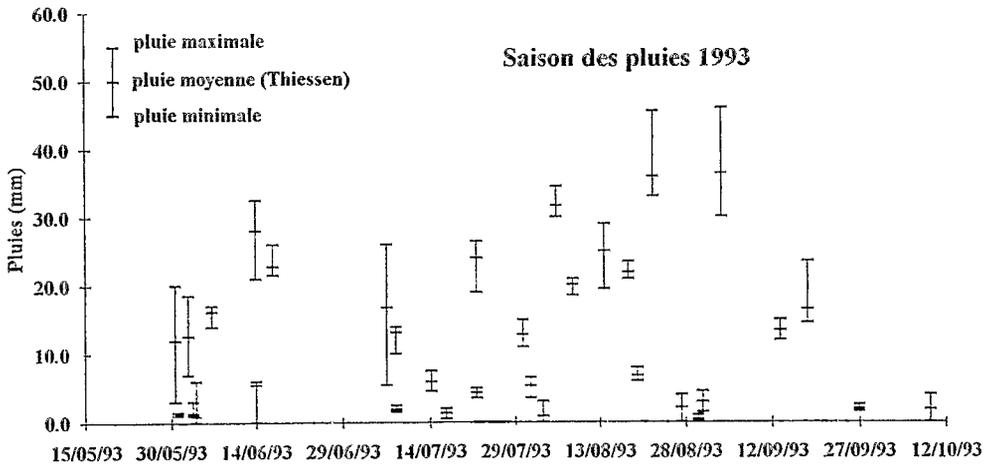


Figure 3 :
Variabilité des pluies sur le bassin versant de Sama Dey (1993).

Les volumes d'eau écoulés sont calculés à partir de la relation hauteur-volume de la cuvette, déduite d'un levé topographique détaillé et de la relation hauteur-débit infiltré, ajustée sur les 30 courbes de vidange enregistrées. Cette dernière nous permet de prendre en compte les infiltrations importantes observées dès le début de l'inondation (figure 4).

Sur les 30 crues enregistrées, 27 étaient supérieures à 600 mètres cubes qui correspondent à 0,1 millimètre de lame écoulée à l'exutoire du bassin. Un peu plus de la moitié des pluies provoque des écoulements suffisants pour que ceux-ci atteignent le centre de la cuvette, mais elle représente 84 % du total pluviométrique. La durée moyenne des crues est de l'ordre de 2 heures et celle de la vidange par infiltration, fonction du volume de chaque crue, dépasse rarement 48 heures pour une crue simple.

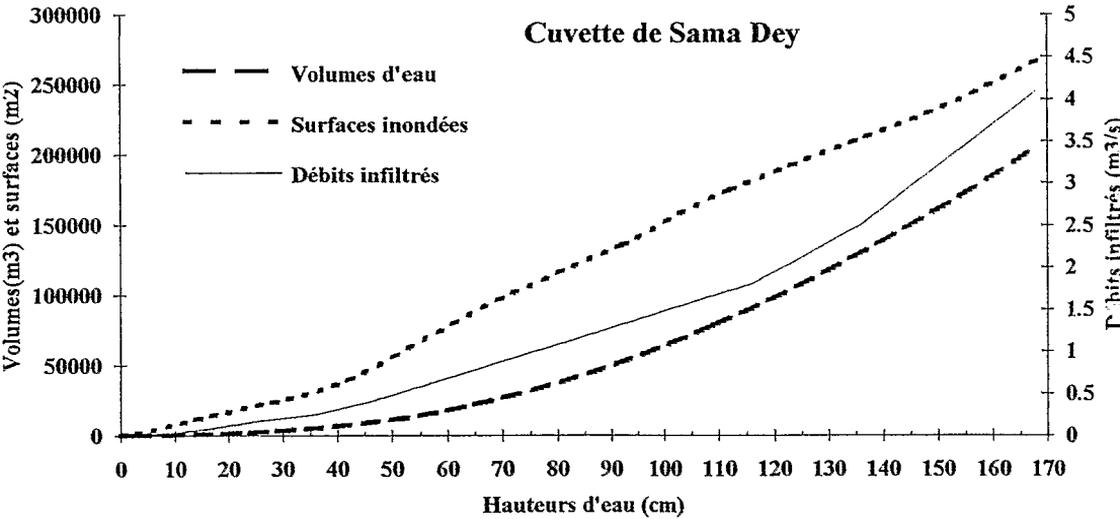


Figure 4 :
Courbes caractéristiques de la cuvette de Sama Dey.

La relation entre les pluies moyennes et les lames écoulées est caractérisée par une grande dispersion des points et par la faiblesse des volumes de crues. La courbe de la pluie-limite d'écoulement (figure 5) représente les triplets lame écoulée, pluie moyenne et indice des précipitations antérieures, et permet de préciser cette relation. Les valeurs extrêmes de cette courbe définissent deux seuils pluviométriques à environ 8 et 20 millimètres. En dessous du premier, il n'y a pas d'écoulement observable dans la cuvette quelles que soient les conditions d'humidité du bassin ; à l'inverse, au delà du second, les écoulements atteignent toujours la cuvette. Entre les deux, les lames d'eau écoulées sont fonction des conditions d'humidité.

Les pluies-limite d'écoulement, établies pour différentes valeurs de l'indice de précipitations antérieures, sont bien supérieures à celles qui ont été établies pour les ravines sur le site voisin de Banizoumbou. Cela confirme l'importance des pertes dès l'entrée dans la cuvette.

La réaction du bassin versant de Sama Dey aux aléas pluviométriques est le résultat de la combinaison des variabilités spatiales, de la pluie, de l'aptitude de sa surface au ruissellement, et des conditions initiales d'humidité. La production des écoulements est contrôlée par le total pluviométrique, sa répartition spatiale et son intensité. La quantité d'eau qui atteint l'exutoire est fixée par l'état de saturation du bassin.

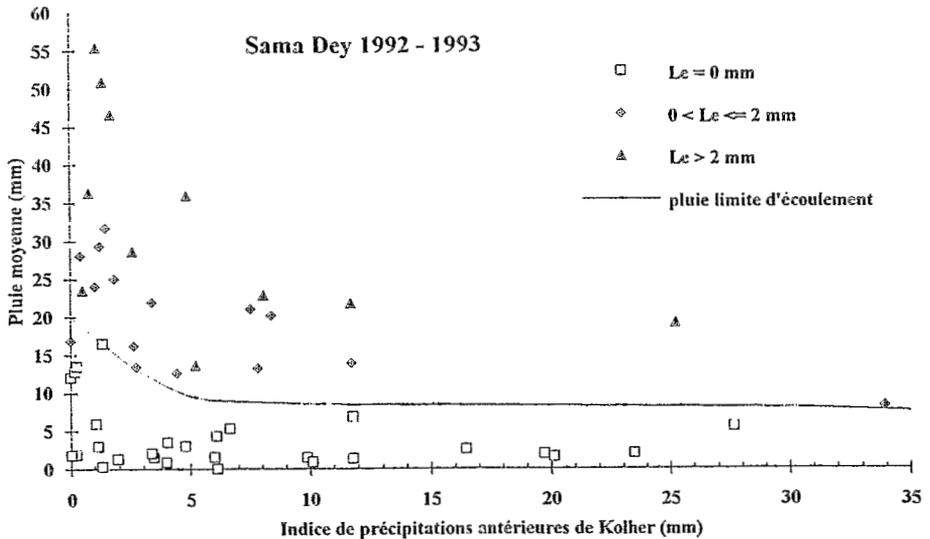


Figure 5 :
Courbe de la pluie-limite d'écoulement.

Les fortes crues ont toutes été provoquées, soit par de grosses pluies (> 40 mm) à forte intensité qui affectent l'ensemble du bassin, même pour des conditions d'humidité faible, soit lorsque le bassin est bien saturé. L'exemple de la crue du 30 août 1992 montre qu'une pluie de 19 millimètres tombée quelques heures après une pluie de 22 millimètres est à l'origine de la seconde plus grosse crue observée (11,6 millimètres de lame écoulée).

L'évaporation de la nappe d'eau libre de la cuvette de Sama Dey est considérée comme négligeable, compte tenu de la faible durée de la submersion et des conditions évaporatoires réduites après chaque pluie. Les volumes d'eau écoulés enregistrés dans la cuvette représentent donc l'eau disponible pour l'alimentation de l'aquifère.

LE FONCTIONNEMENT DE LA NAPPE PHRÉATIQUE

La nappe phréatique étudiée appartient à l'ensemble aquifère des formations du Ct³, dont la surface piézométrique presque horizontale se situe dans la région à une altitude proche de 195 mètres. Localement, cette surface présente des points bas de drainage, à l'origine de dépressions à la verticale du tracé des grands talwegs de surface qui abaissent le niveau d'une dizaine de mètres ou plus. À Sama Dey, la surface piézométrique de la nappe appartient à un flanc de dépression drainé vers l'ouest en direction de Maourey Kouara Zéno. La longue

activité de ces drains est attestée par la faible résistance à l'érosion des formations superficielles qui auraient dû être ferruginisées à la fin du tertiaire, si le fer avait pu s'accumuler sur le tracé suivi par la *vallée de Dantiandou*, à l'aplomb de laquelle se trouvent plusieurs dépressions à orientation générale méridienne.

En régime naturel, non influencé, l'amplitude annuelle de la variation piézométrique est d'environ 2 mètres, avec un maximum fin août ou début septembre associé aux grands événements pluvieux, et un minimum fin juin, avant la reprise des pluies efficaces capables de fournir un volume d'eau suffisant dans la cuvette (figure 6).

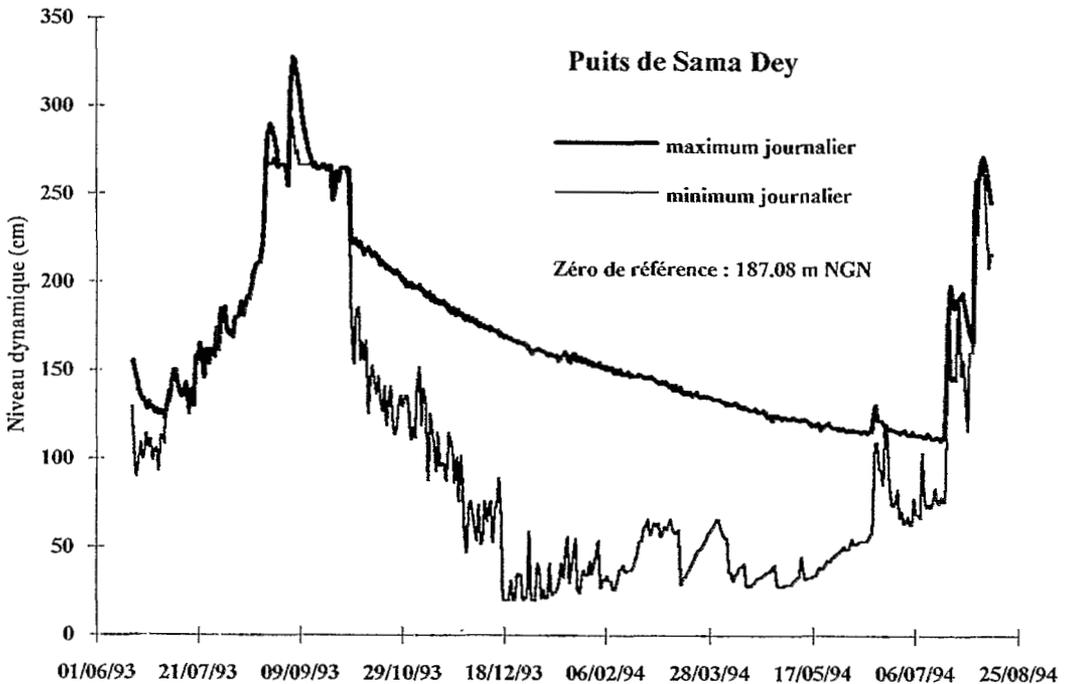


Figure 6 :
Variation du niveau dynamique enregistré dans le puits de Sama Dey.

La rapidité avec laquelle les eaux de la cuvette rejoignent la nappe, tout à fait remarquable, montre que l'infiltration se fait par circulation verticale dans les macroporosités. Les eaux franchissent la tranche de 45 mètres d'épaisseur en 3 heures environ. Le réseau hydrologique souterrain nécessite un minimum de 2 000 mètres cubes pour devenir fonctionnel. La crue nocturne du 19 juillet 1993 illustre ce fonctionnement (figure 7) ; elle a été choisie pour éviter toute

perturbation par puisage dans le site de mesure. Pendant la saison des pluies 1993, un volume total d'eau d'environ 130 000 mètres cubes a rejoint la nappe à l'aplomb de la cuvette. À elle seule, la plus forte crue contribue pour près de 32 % à l'alimentation annuelle, alors que 63 % résultent des trois événements les plus importants. La grande variabilité interannuelle doit être soulignée puisque la seule crue du 31 juillet 1992 a rassemblé 191 000 mètres cubes dont la moitié s'est infiltrée en moins de 12 heures. Au cours de ce même événement, un volume équivalent à celui de la saison 1993 s'est infiltré en 20 heures.

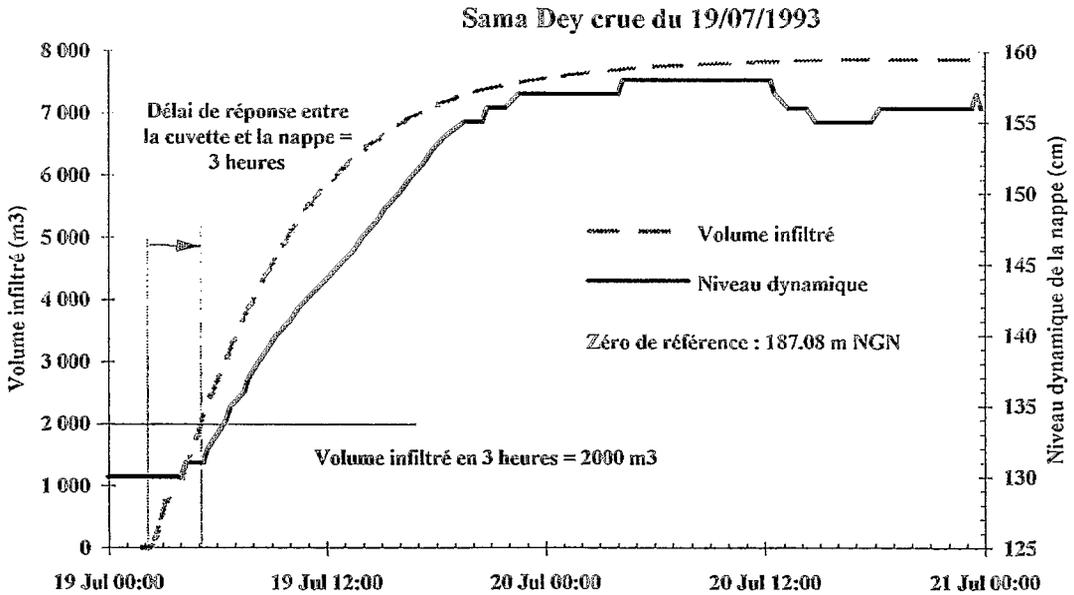


Figure 7 :

Volume infiltré cumulé de la crue du 19 juillet 1993 et réaction de la nappe.

L'utilisation du puits provoque un régime transitoire de la nappe tout à fait caractéristique, avec des rabattements diurnes quotidiens dépassant souvent le mètre. Les volumes puisés, estimés à partir des hydrogrammes complets, évoluent entre 3 et 10 mètres cubes par jour, les fortes valeurs étant prélevées entre janvier et juin pour les besoins du cheptel. Au total, 1 700 mètres cubes ont été puisés à Sama Dey sur le cycle 1993-1994, quantité négligeable comparée au volume d'eau infiltré localement. L'alimentation par écoulement latéral de la nappe entraîne la mise en communication de l'aquifère de Sama Dey avec d'autres aquifères étagés. Ils appartiennent à un système multicouche comportant plusieurs nappes libres ou semi-captives, étagées et intercommunicantes, avec des liaisons par conduits karstiques temporaires sous pression, alternativement

adducteurs ou drainants. Ceci se remarque tout particulièrement pendant la remontée de la nappe en juillet 1993 et par le maintien vers la cote 270 centimètres dans le puits du niveau piézométrique malgré des puisages quotidiens. Ce niveau doit être interprété comme un contrôle de la pression par un autre aquifère. Dès le désamorçage entre les différents niveaux aquifères, la nappe reprend immédiatement ses caractéristiques de nappe libre, donnant la longue décrue d'octobre à juin due au drainage vers la dépression piézométrique située sous la *vallée de Dantiandou*.

BILAN PRÉLIMINAIRE SUR LA SAISON DES PLUIES 1993

Nous proposons un premier bilan hydrologique pour la saison 1993, compte tenu des résultats obtenus ici et sur le site de Banizoumbou, et en respectant l'hypothèse suivante : l'évapotranspiration reprend l'ensemble des eaux infiltrées en dehors de la cuvette et la moitié des pertes en eau des zones d'épandages. Nos résultats se résument aux valeurs suivantes :

Pluie moyenne totale	405 mm
Lames écoulées observées	21 mm
Lames écoulées estimées à l'entrée de la cuvette	70 mm
Pertes en amont de la cuvette	49 mm
Alimentation de la nappe	46 mm
Évapotranspiration et évaporation estimées	359 mm

La valeur estimée pour l'évaporation et l'évapotranspiration se rapporte à la durée nécessaire pour retrouver les conditions initiales d'humidité ; elle dépasse donc la durée de la saison des pluies. En 1993 environ 11 % de la pluie totale ont contribué à l'alimentation de la nappe au niveau du bassin de Sama Dey. Cette première estimation sera précisée par des données en cours d'acquisition.

CONCLUSIONS

La compréhension du fonctionnement hydrologique passe nécessairement par l'analyse des conditions de milieu antérieures qui ont imposées le paysage actuel à la suite d'une longue évolution. Comme nous l'avons vu, la région a toujours été sous la dépendance des écoulements souterrains, eux-mêmes contrôlés par les systèmes de fracturations du socle. Les vestiges des réseaux hydrographiques en surface de plateaux ne montrent pas d'organisation à l'échelle régionale. Depuis toujours, le rôle des écoulements de surface se résume à la concentration des eaux de pluie en direction de collecteurs privilégiés, reliés à la profondeur. Les observations hydrologiques présentées permettent d'illustrer les conditions anciennes, et de préciser les conditions actuelles de ce fonctionnement.

BIBLIOGRAPHIE

- ARCHAMBAULT J., 1960. Les eaux souterraines de l'Afrique occidentale. Serv. Hydraul. AOF, Paris, 137 p.
- BUSCHE D., SPONHOLZ B., 1992. Morphological and micromorphological aspects of the sandstone karst of eastern Niger. *Z. Geomorph. N. F.*, Berlin-Stuttgart, Suppl.-Bd. 85, 1-18.
- DUBOIS D., ICOLE M., TRICHET J., 1984. Évolution géomorphologique de la vallée du Niger aux abords de Niamey (République du Niger). *Bull. Soc. Géol. Fr., Paris, série 7, t. XXVI, n° 6*, 1305-1318.
- ESTEVE M., 1994. Cartographie d'unités hydrologiques homogènes et modélisation multi-échelles, exemple de l'expérience Hapex-Sahel. Colloques et Séminaires, Orstom, Paris, (dans cet ouvrage).
- GAVAUD M., 1977. Les grands traits de la pédogenèse au Niger méridional. Orstom, Paris, Trav. et Docum., N° 76, 102 p.
- GREIGERT J., POUUNET R., 1967. Notice explicative sur la carte géologique de la république du Niger (1:2 000 000). B.R.G.M., Paris, 62 p.
- IGN FRANCE., 1980. Carte au 1:200 000 Niamey, IGN France, Paris, 2e édition.
- LEBEL T., SAUVAGEOT H., HOEPPFNER M., DESBOIS M., GUILLOT B., HUBERT P., 1991. Estimation des précipitations au Sahel : l'expérience Epsat-Niger. *Hydrol. Continent.*, vol. 6, n° 2, 133-141.
- MACHENS E., 1967. Notice explicative sur la carte géologique du Niger occidental (1:200 000). B.R.G.M., Paris, 36 p.
- PNUD., 1990. Atlas des ressources en eaux souterraines du Continental Terminal. Min. Hydraul. Environ., Dir. Ressources en Eau, Niamey, Projet PNUD/DCTD-NER86/001, 42 p + cartes.
- RADIER H., 1953. Contribution à l'étude stratigraphique et structurale du détroit soudanais. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 6e série, tome 3.

SPONHOLZ B., 1989. Karsterscheineugen in nichtkarbonatischen Gesteinen der östlichen Republik Niger. Thèse, Univ. Würzburg, 265 p.

WILLEMS L., LENOIR F., LEVECQ J.-M., VICAT J.-P., 1993. Évolution du relief au Niger occidental : rôle de la fracturation du socle précambrien et de la formation de pseudo-karsts au sein de la lithomarge et de la couverture sédimentaire. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 317, Sér. II, 97-102.