

VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DE L'IMPACT DE L'INFILTRATION SUR LA NAPPE PHRÉATIQUE DU CONTINENTAL TERMINAL (HAPEX-SAHEL, NIGER).

C. LEDUC¹, A. KARBO²

RÉSUMÉ

Les observations piézométriques effectuées pendant plusieurs années dans le cadre d'Hapex-Sahel ont permis de mieux comprendre les processus de recharge de la nappe phréatique du Continental Terminal aux environs de Niamey (Niger). La fluctuation du niveau de la nappe, provoquée par l'infiltration des pluies, est extrêmement variable dans le temps et l'espace (jusqu'à 9 mètres d'amplitude annuelle).

Régionalement, plusieurs zones à comportement homogène sont identifiées dans l'aquifère. Localement, la diversité des phénomènes d'infiltration est très forte. La variabilité temporelle est mise en évidence grâce à quelques rares chroniques longues.

¹Cemagref/Orstom, BP 5045, 34032 Montpellier cedex.

²Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement, BP 257, Niamey.

INTRODUCTION

La très forte hétérogénéité du milieu sahélien, maintes fois décrite pour tous les phénomènes naturels de surface, se retrouve également en profondeur alors qu'on aurait pu s'attendre à un certain lissage.

Dans le cadre de l'expérimentation Hapex-Sahel (GOUTORBE *et al.*, 1994), la composante hydrogéologique a eu pour objectif principal d'évaluer la part des précipitations qui s'infiltré durablement au travers du sol vers la nappe phréatique. Ce travail est basé sur l'acquisition et le traitement de nombreuses données hydrodynamiques et hydrochimiques.

Ponctuellement, la recharge peut être quantifiée de manière directe par des bilans hydrologiques des mares temporaires ou à partir des profils d'humidité du sol. Cependant, à l'échelle du degré carré Hapex, cette recharge ne peut être évaluée qu'indirectement en appréciant l'impact de la saison des pluies sur le niveau de la nappe. Ceci nécessite à la fois une connaissance détaillée des mouvements piézométriques au cours de l'année et des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère. Il ne sera question dans cet article que des seules fluctuations piézométriques.

En un point donné, l'impact piézométrique de la recharge est caractérisable par son amplitude, sa date de maximum et la forme de la courbe de variation. Les premières exploitations montrent que pour ces trois critères on rencontre une très grande diversité de cas. De même à l'échelle régionale, plusieurs zones bien différenciées apparaissent dans le degré carré de Niamey.

CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

La zone d'investigation Hapex-Sahel est située dans l'ouest du Niger, près de Niamey, et couvre un degré carré (entre 2° et 3° est, 13° et 14° nord). Le fleuve Niger coupe ce carré en deux secteurs inégaux, hydrauliquement indépendants ; l'expérimentation hydrogéologique au sud du fleuve, réalisée par l'Institute of Hydrology de Wallingford (BROMLEY *et al.*, 1995), n'est pas abordée ici.

La région étudiée s'étend sur plus de 8 000 km². Elle est constituée en surface par des dépôts du Continental terminal (CT), datés de la fin du tertiaire, reposant sur un substratum cristallin et métamorphique qui affleure dans le lit du fleuve et se rencontre à faible profondeur le long de la bordure occidentale du degré carré (zone dite du biseau sec). Les sédiments du CT sont essentiellement des sables, silts et argiles, avec quelques niveaux latéritiques constituant de vastes plateaux tabulaires.

Plus à l'est, au centre du bassin du CT, trois horizons aquifères ont été reconnus : CT1, CT2 et CT3 de bas en haut (GREIGERT et BERNERT, 1979). Il n'est pas certain que dans notre secteur les deux niveaux profonds soient distincts (SCHROETER, 1993) ; on divisera donc le système aquifère du CT en deux sous-ensembles bien différenciés :

- la nappe phréatique du CT3, à minéralisation généralement faible (médiane de 100 $\mu\text{S/cm}$ environ) et fort taux de renouvellement,
- la (les) nappe(s) captive(s) du CT2/CT1, dont les eaux fortement minéralisées (plus de 1000 $\mu\text{S/cm}$) sont très anciennes ; la charge hydraulique peut dépasser celle du CT3 d'une dizaine de mètres.

Afin de connaître les fluctuations piézométriques du CT3, un suivi du niveau des puits a débuté en 1991 (118 ouvrages visités en août) ; il a atteint son maximum en 1993 (274 mesures en décembre) et se prolongera en 1995 à une échelle plus modeste. Au total, près de 1 300 observations ont été réalisées en 1991 et 1992 dans plus de 300 puits, environ 1 400 en 1993 (LEDUC et LENOIR, 1995) et plus de 900 en 1994. Ces données ponctuelles (3 à 4 campagnes par an) sont complétées par de très nombreux relevés intermédiaires (parfois hebdomadaires ou bimestriels, souvent mensuels). De plus, sept sites ont été équipés d'enregistreurs en continu, parfois multiples, pour connaître l'évolution de la nappe avec un pas de temps de scrutation de 15 minutes.

La carte piézométrique de novembre 1992 (figure 1) montre la divergence des écoulements souterrains dans le degré carré.

L'analyse des écoulements de surface et des fluctuations de la nappe a montré que la recharge de l'aquifère est principalement due à l'infiltration sous les mares endoréiques temporaires (LEDUC et DESCONNETS, 1994 b). Ces mares comportent généralement une zone centrale colmatée peu perméable et une zone externe propice à l'infiltration rapide vers la nappe (DESCONNETS, 1994).

La fluctuation du niveau piézométrique dépendra donc généralement de la durée et du débit d'infiltration, des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère et de la distance à la zone infiltrante.

Des analyses hydrochimiques (ions majeurs et isotopes) ont précisé l'image de la nappe phréatique. Elles seront présentées dans un article à venir.

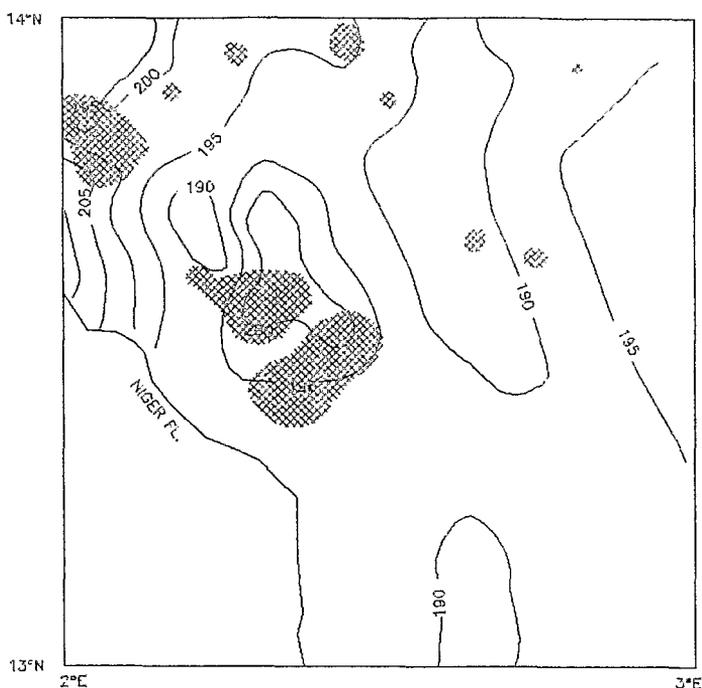


Figure 1 :

Piezométrie en novembre 1992 (isopièzes tous les 5 mètres ; zones hachurées : fluctuation annuelle supérieure à 2 mètres).

REPRÉSENTATIVITÉ DES MESURES PIÉZOMÉTRIQUES

La quasi-totalité des observations piézométriques ont été réalisées dans des puits villageois ou pastoraux, ce qui peut amener quelques problèmes de validité de ces mesures ponctuelles.

ERREURS DE RELEVÉS

Parmi les causes d'erreur faibles ou rares, il faut citer les erreurs de lecture, les distorsions selon le matériel utilisé et les confusions entre plusieurs ouvrages proches.

La principale incertitude est cependant le rabattement provoqué par l'exploitation des puits. Cette baisse de la nappe dépend des caractéristiques hydrodynamiques locales et de l'intensité et de la durée de l'exhaure. Elle est extrêmement variable dans le temps et l'espace et peut dépasser 1 mètre, c'est-à-dire bien plus que l'amplitude annuelle moyenne. Une analyse fine des relevés permet généralement d'apprécier et compenser cette source d'erreur.

LOCALISATION DES OUVRAGES

Les puits sont situés à côté des villages ; leur distribution géographique n'est pas donc pas du tout aléatoire puisque les hommes se sont installés dans des zones favorables à la culture et à l'accès à l'eau. Ainsi, il n'existe que très peu de puits sur ou à proximité immédiate des plateaux latéritiques qui constituent pourtant plus de 20% de la surface totale ; ceci conduit à une très nette sous-représentation des plateaux dans notre échantillonnage hydrogéologique.

D'autre part, beaucoup de puits récents ont été forés au plus bas des dépressions topographiques. Certains d'entre eux sont submergés lors des fortes crues, ce qui limite leur intérêt et accroît la recharge de la nappe...

INCERTITUDES DE NIVELLEMENT

Les cartes piézométriques publiées antérieurement (PNUD, 1990 recopiant GREIGERT et BERNERT, 1979 recopiant BOECKH, 1965) étaient basées sur des nivellements barométriques dont les erreurs peuvent atteindre la dizaine de mètres. Pour éviter une telle incertitude et pouvoir enfin tracer des documents fiables, près d'une centaine de puits ont été nivelés. Au vu des multiples corrections qui ont été nécessaires à partir des premiers résultats fournis par le prestataire de service, il est possible que des erreurs subsistent.

Malgré ces incertitudes, nos cartes piézométriques sont globalement fiables. Elles confirment certaines interprétations anciennes (existence d'une dépression piézométrique de grande taille le long du kori de Dantiandou) mais en rejettent d'autres (zones hautes sensiblement décalées).

VARIABILITÉ PIÉZOMÉTRIQUE RÉGIONALE

La médiane des amplitudes piézométriques, variable selon les années, est d'environ 50 centimètres. La valeur la plus forte dépasse 9 mètres. Parmi plus de 250 puits, on n'en compte que 5 dont la fluctuation en 1992 était comprise entre 5 et 9 mètres et 17 entre 2 et 5 mètres.

La comparaison des cartes piézométriques de fin de saison sèche et de saison des pluies ne montre cependant pas de modification significative des circulations souterraines.

En examinant, à l'échelle du degré carré, les fluctuations piézométriques de la nappe du CT3 dues à l'infiltration des pluies, on constate l'existence de plusieurs zones très différenciées, détaillées ci-après. On retrouve cette répartition chaque année. Il n'y a pas de relation évidente avec la distribution annuelle des pluies qui, elle, est extrêmement variable d'une saison à l'autre (TAUPIN *et al.*, 1993).

ZONES DE FORTE AMPLITUDE ANNUELLE

La première zone à forte amplitude annuelle est le coin nord-ouest du degré carré. Il s'agit d'un secteur complexe et hétérogène. De multiples indices, piézométriques et hydrochimiques, amènent à penser que la nappe du CT3 peut parfois être en contact avec celles du socle ou du CT1/CT2 du fait du biseautage des sédiments du CT le long de cette bordure du bassin. L'aquifère est parfois très peu épais, ce qui explique des assèchements de puits, inconnus ailleurs. La forte variabilité de l'amplitude annuelle est probablement liée aux rapides variations lithologiques et aux caractéristiques hydrodynamiques souvent médiocres de cette zone dite du biseau sec.

La deuxième zone à forte amplitude annuelle se situe à l'est de Niamey, aux environs du village de Hamdallaye. Ce secteur est caractérisé par une piézométrie élevée et une grande proportion de puits très variants. Il n'y a pas d'explication immédiate de cette variabilité, en particulier dans la distribution des écoulements de surface ; il est donc possible que le phénomène soit dû à des caractéristiques hydrodynamiques assez médiocres (épaisseur réduite de l'aquifère, intercalations argileuses, etc.).

ZONES DE FAIBLE AMPLITUDE ANNUELLE

Les principales zones où la nappe fluctue peu sont le dallol Bosso, la dépression piézométrique du kori de Dantiandou et le sud du degré carré.

Le dallol Bosso est une imposante vallée en limite orientale du degré carré, rectiligne et orientée nord-sud, large d'une dizaine de kilomètres et longue de plus de 200 km. Elle est bordée de falaises souvent abruptes taillées dans les sédiments du CT. Il s'agit très probablement d'une ancienne vallée hydrauliquement active lors d'épisodes plus humides du Quaternaire. Au point de vue hydrogéologique, cette zone est caractérisée par :

- une nappe subaffleuranse (0 à 5 mètres de profondeur en général) ;
- une minéralisation plus forte que dans le reste de l'aquifère, la transition étant progressive ;
- une piézométrie plus élevée que celle de la partie plus à l'ouest.

Dans le dallol Bosso, les niveaux les plus bas ont été atteints en juillet 1994, alors que la tendance régionale est à la hausse interannuelle. Ceci illustre bien la complexité du fonctionnement hydrogéologique régional et sa diversité dans le temps et l'espace.

Le kori de Dantiandou est lui aussi un ancien cours d'eau, mais d'ampleur bien moindre, aujourd'hui inactif, qui est comblé en de multiples endroits par des dépôts sableux éoliens. Parmi les nombreuses mares temporaires qui apparaissent dans ses anciens méandres durant la saison des pluies, celles de Wankama et Banizoumbou ont fait l'objet d'un suivi piézométrique fin (LELUC et DESCONNETS, 1994 a et 1994 b). La nappe phréatique dans cette région constitue une dépression

piézométrique apparemment fermée déjà signalée dans les années soixante (BOECKH, 1965) et confirmée par les récents nivellements. Même si ponctuellement l'amplitude piézométrique peut être forte (Wankama), elle est régionalement très réduite.

La troisième zone de faible amplitude annuelle est le sud du degré carré. Elle n'a aucune autre caractéristique particulière, sauf son très faible gradient hydraulique.

VARIABILITÉ PIÉZOMÉTRIQUE LOCALE

Il n'y a pas de relation entre profondeur de la nappe et variabilité annuelle. Ainsi, les zones où la nappe est très proche de la surface (dallol Bosso) ou très profonde (sous les plateaux latéritiques) sont les secteurs les moins fluctuants. L'épaisseur de la zone non saturée ne joue donc pas un rôle important dans les processus d'infiltration. En fait, les puits les plus variés sont ceux situés à proximité immédiate des mares temporaires, qui sont le facteur essentiel de la réalimentation de la nappe phréatique. Des mesures plus fréquentes ont été réalisées en 1993 et 1994 sur certains puits afin d'apprécier vraiment la cinétique et l'ampleur des zones infiltrantes.

PUITS SANS FLUCTUATION PIÉZOMÉTRIQUE ANNUELLE

PLATEAUX LATÉRIQUES

Les rares puits qui se trouvent sur ou à proximité immédiate des plateaux latéritiques ne montrent pas de fluctuation piézométrique annuelle, les seules variations du niveau relevées étant dues aux pompes. Il n'y a donc pas de réalimentation rapide significative à partir de la surface des plateaux. Il n'est cependant pas possible de savoir si les infiltrations notées par les mesures d'humidité (GALLE, 1995) ou le bilan hydrologique des mares de plateau (DESCONNETS, 1994) atteignent la nappe après un très lent cheminement ou bien sont reprises par l'évapotranspiration dès les premiers mètres.

La seule exception est Gorou Goussa, site de plateau du nord-ouest du degré carré : les chroniques très discontinues semblent montrer une fluctuation annuelle. Mais ce point est dans la zone de biseau sec, pas du tout représentative des mécanismes ordinaires de l'aquifère.

VERSANTS ET BAS-FONDS

Il existe un nombre important de puits hors des zones de plateau latéritique qui ne montrent pas de fluctuation piézométrique annuelle. Cela traduit de même une infiltration locale faible, voire nulle, ou lente.

On peut retenir l'exemple de Birni Kolondia où le limnigraphe (Chloé sur la figure 2) n'enregistre pas d'inflexion significative durant la saison des pluies. Dans ce cas, l'interprétation retenue est que la zone d'infiltration est suffisamment éloignée pour que la recharge n'ait pas d'impact mesurable. Dans ce même site, trois autres puits distants de quelques centaines de mètres sont également suivis. Les niveaux observés traduisent une fluctuation saisonnière (*projet*), parfois perturbée par les pompes villageois (*2 pompes*).

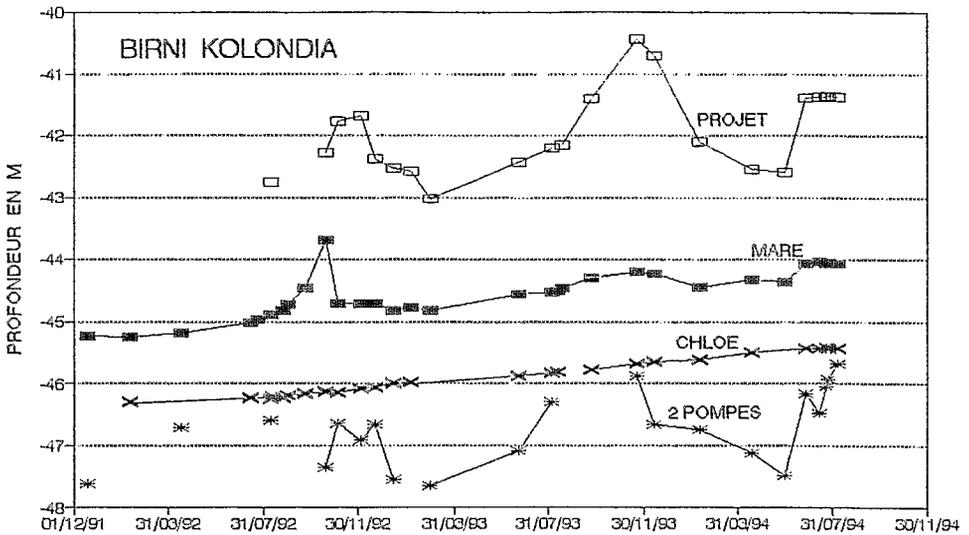


Figure 2 :
Variations piézométriques à Birni Kolondia.

PUITS À FLUCTUATION PIÉZOMÉTRIQUE MARQUÉE

PUITS À VARIATION SIMPLE

Le puits du centre du village d'Hamdallaye est caractérisé par une amplitude annuelle inférieure à 50 centimètres et régulière (figure 3). Le niveau commence à monter au cours du mois d'août et se maintient élevé pendant environ 4 mois avant de baisser lentement. Ce style de mouvement est interprété comme la réponse à une infiltration éloignée, ce qui assure un fort lissage des fluctuations de la nappe phréatique.

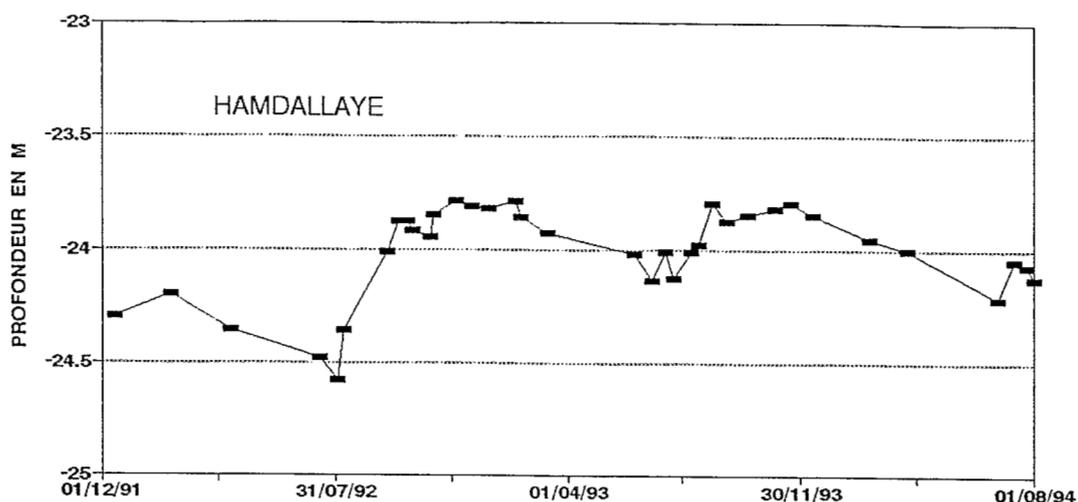


Figure 3 :
Variation piézométrique à Hamdallaye.

PUITS À VARIATION COMPLEXE

Un exemple d'un tel fonctionnement est fourni par le site de Wankama qui comporte un chapelet de mares disposées dans le lit du kori de Dantiandou. La nappe ne réagit pas aux premiers événements pluvieux et remplissages de mares temporaires et continue même à baisser très légèrement. Elle ne monte que plus tard dans la saison, à la fin de juillet. Le dispositif d'observation constitué de 3 piézomètres et 2 puits villageois permet d'avoir une bonne idée de l'extension spatiale du phénomène. La hausse dans le piézomètre le plus proche de la mare dépasse 5 mètres et encore 1,5 mètre dans un puits situé à 500 mètres. Les mesures d'humidité (GALLE, communication personnelle) et le bilan hydrologique (DESCONNETS, 1994) confirment l'analyse du processus : dans un premier temps, l'eau débordant de la mare humidifie progressivement la zone non saturée et ce n'est qu'ensuite, vers fin juillet, que la connexion hydraulique avec la nappe devient efficace et que le niveau phréatique remonte.

Le même processus a été observé en 1993 et en 1994 alors que les conditions pluviométriques étaient très différentes.

PUITS SINGULIERS

On ne connaît dans le degré carré qu'un site où l'on observe des réactions systématiquement très rapides de la nappe aux phénomènes de surface ; il s'agit de Sama Dey. D'autres points du même genre existent peut-être mais le suivi piézométrique à pas de temps large, comme pratiqué majoritairement dans Hapex-Sahel, ne peut les détecter.

Le puits traditionnel de Sama Dey est situé en bordure d'une mare qui se vide totalement très vite (en un jour ou deux le plus souvent) et alimente donc massivement et rapidement la nappe située 45 mètres plus bas. Les enregistrements contiennent de nombreuses *aberrations* pour le moment inexplicables, ce qui requiert une interprétation particulièrement prudente des données.

Le court délai (quelques heures) entre les montées des niveaux de la mare et de la nappe implique des circulations verticales par des cheminements préférentiels qui n'ont pas été repérés le long des parois du puits.

VARIABILITÉ TEMPORELLE

Malgré l'imprécision due à la faible fréquence des mesures (3 à 4 campagnes par an) et la dérive due à la hausse interannuelle (cf. chapitre suivant), il est possible d'évaluer la période à laquelle la nappe atteint son niveau maximum. Cette date est très variable : pour les puits les plus proches des lieux d'infiltration (mares temporaires), le maximum de la nappe coïncide toujours avec la période de fort remplissage. Au contraire, dans les zones plus éloignées, le maximum est atteint à des moments variant entre août et décembre.

Le limnigramme de Barkiawel (figure 4) donne quelques exemples de la forte variabilité des processus de recharge d'une année à l'autre : le début de remontée s'est produit un mois plus tard en 1994 qu'en 1993, alors que le maximum a été atteint un mois plus tôt.

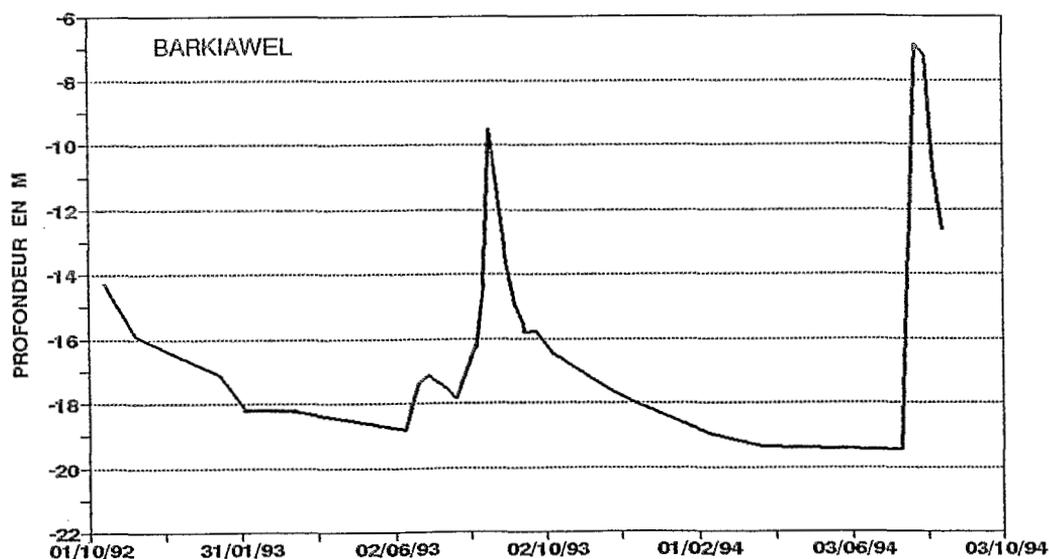


Figure 4 :
Variation piézométrique à Barkiawel (1992-1994).

ÉVOLUTION PIÉZOMÉTRIQUE SUR PLUSIEURS ANNÉES

La confrontation des mesures récentes avec celles des années soixante, période pluvieuse au Niger, est délicate. Les principales incertitudes sont liées à l'identification des ouvrages et à la permanence du point de référence des mesures. La première source intéressante (TIRAT, 1964) contient des relevés datant de 1962 et 1963. Plus de la moitié proviennent de puits traditionnels ; on ne peut donc espérer une comparaison très précise. Sur les 19 puits cimentés apparemment identiques, 4 valeurs se situent entre les extrêmes des valeurs Hapex, 4 montrent des niveaux plus hauts en 1963 et 11 des niveaux plus bas. Les mesures des puits traditionnels confirment l'impression qu'il n'y aurait pas de différence très marquée par rapport à l'actuel, les niveaux étant probablement un peu plus bas qu'aujourd'hui, sauf dans le nord du dallol Bosso.

La deuxième source d'information (БОЕЦКН, 1965) contient des chiffres du printemps 1964, peut-être mélangés à des reprises de la campagne antérieure. Sur 37 puits apparemment intégrés dans le réseau Hapex, 8 ont des mesures comprises entre les extrêmes de 1991-1994, 10 montrent des niveaux plus hauts en 1964 et 18 des niveaux plus bas, c'est-à-dire les mêmes proportions que précédemment. Le dallol Bosso aurait baissé ainsi que certains points du nord-ouest du degré carré ; le reste de la nappe aurait connu une hausse légère. Une telle zonation correspond assez bien aux unités déjà décrites.

Entre 1991 et 1994, la plupart des mesures réalisées tout au long de Hapex-Sahel montrent une hausse du niveau de la nappe phréatique. Ces observations complètent et confirment des mesures effectuées sur une zone plus réduite, correspondant approximativement au centre du degré carré, mais une période plus longue, 1987-1994 (SCHROETER, 1993). Les 22 puits communs aux deux réseaux sont situés dans une zone homogène à faible gradient hydraulique et fluctuation piézométrique annuelle faible. La plupart sont peu exploités ou peu influencés par les pompes. La hausse de la nappe est visible pour tous ces points ; elle est généralement comprise entre 0,5 et 1 mètre en 7 ans.

Le mouvement sur 7 ans est traduit comme une reconstitution des ressources en eau souterraine après la période de sécheresse du milieu des années 80. La hausse sur 30 ans est plus surprenante ; elle pourrait être liée à la déforestation qui aurait augmenté le ruissellement et la concentration des eaux dans les points bas infiltrants, favorisant ainsi la recharge de la nappe. Il faudra encore rechercher les mesures des périodes intermédiaires et continuer le suivi piézométrique pour préciser cette évolution.

Ces fluctuations impliquent un renouvellement annuel important, estimé en première approximation à environ 10 % de la lame d'eau précipitée (LEDUC et DESCONNETS, 1994 b). La recharge importante est confirmée par les analyses isotopiques déjà réalisées (tritium et carbone 14).

CONCLUSION

Les observations effectuées durant 4 ans sur le degré carré ont mis en évidence des variations piézométriques réelles supérieures aux valeurs publiées antérieurement.

L'essentiel de la réalimentation de la nappe phréatique se fait à partir des mares temporaires. En s'éloignant de ces points d'infiltration, les fluctuations piézométriques s'amortissent et se décalent dans le temps.

La division de la nappe phréatique en plusieurs sous-ensembles reste valide quels que soient les critères retenus (variabilité annuelle, fluctuation à long terme, faciès hydrochimique). Les variations saisonnières ne sont fortes que dans deux zones de l'ouest du degré carré, et en quelques rares points isolés.

La diversité des mouvements piézométriques pendant ou après la saison des pluies montre la diversité des processus de réalimentation de l'aquifère. Leur variabilité est forte aussi bien dans l'espace que dans le temps.

Cette première étude fine de la piézométrie de la nappe phréatique dans le degré carré de Niamey au nord du fleuve Niger montre l'intérêt d'un suivi à long terme avec une fréquence de mesures adaptée.

REMERCIEMENT

Nous voulons rappeler, dans ce remerciement posthume bien insuffisant, qu'une partie importante du suivi piézométrique est due à la collaboration dévouée et efficace de Sani Ibrahim, technicien du Ministère nigérien de l'Hydraulique et de l'Environnement.

BIBLIOGRAPHIE

- BOECKH E., 1965. Contribution à l'étude hydrogéologique de la zone sédentaire de la République du Niger. Rapport BRGM DAK65-A20, Dakar.
- BROMLEY J., BROUWER J., GAZE S., 1995. The semi-arid groundwater recharge study (Sagre). In : Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans Hapex-Sahel : dispositif de mesures au sol et premiers résultats. Éd. Orstom, Paris (à paraître).
- DESCONNETS J.C., 1994. Caractérisation hydrologique de quelques systèmes endoréiques en milieu sahélien (degré carré d'Hapex-Sahel, Niger). Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.
- GALLE S., 1995. Distribution spatiale du stock hydrique sur le bassin versant de Banizoumbou : premiers résultats de la campagne 1992. In : Hapex Sahel 92 : campagnes de mesures Supersite Central Est. Éd. Orstom, Paris (à paraître).
- GOUTORBE J.P., LEBEL T., TINGA A., BESSEMOULIN P., BROUWER J., DOLMAN A.J., ENGMAN E.T., GASH J.H.C., HOEPFFNER M., KABAT P., KERR Y.H., MONTENY B., PRINCE S., SAID F., SELLERS P. and WALLACE J.S., 1994. Hapex-Sahel : a large scale study of land-atmosphere interactions in the semi-arid tropics. *Ann. Geophysicae* 12, 53-64.
- GREIGERT J. et BERNERT G., 1979. Atlas des eaux souterraines du Niger ; état des connaissances (mai 1978). Tome 1, fascicule 5 : les nappes du Continental terminal du synclinal de Dogondoutchi. Rapport BRGM 79/AGE/001, Orléans.
- LEDUC C. et DESCONNETS J.C., 1994 a. Pools and recharge of the Continental terminal phreatic aquifer near Niamey, Niger. In : Groundwater monitoring and recharge in semi-arid areas, Proc. International workshop Hyderabad, Unesco-IAH, pp SV13-SV22.

- LEDUC C., DESCONNETS J.C., 1994 b. Variability of groundwater recharge in Sahelian climate: piezometric survey of the Continental terminal aquifer near Niamey (Niger). In : Future Groundwater Resource at Risk (Soveri & Suokko ed.), Proc. Helsinki conference, IAHS publ. n° 222, 505-511.
- LEDUC C., LENOIR F., 1995. Étude de la recharge de la nappe du Continental terminal 3 en rive gauche du Niger. In : Hydrologie et météorologie de mésoéchelle dans Hapex-Sahel : dispositif de mesures au sol et premiers résultats. Éd. Orstom, Paris (à paraître).
- PNUD, 1990. Atlas des ressources en eau du Continental terminal. Rapport du Projet DCTD NER86001, Niamey.
- SCHROETER P., 1993. Les fluctuations des niveaux d'eau dans les nappes du Continental terminal et de la formation du Tchad. Programme Hydraulique Niger-Suisse, Niamey.
- TAUPIN J.D., AMANI A., LEBEL T., 1993. Small scale spatial variability of the annual rainfall in the Sahel. In : Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales (H.J. Bolle, R.A. Feddes & J. Kalma ed.), Proc. Yokohama Symp., IAHS publ. n° 212, 593-602.
- TIRAT M., 1964. Contribution à l'étude hydrogéologique du Continental terminal. Rapport BRGM NIA64A1.