

INFLUENCE DU CLIMAT SUR LES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE EN ZONE SOUDANO SAHELIENNE

1. Raymond MALOU, Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques (UCAD), BP 5005, Dakar Fann Dakar email : malouraymond@yahoo.fr
2. Fatou, Ngom DIOP, Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques (UCAD), BP 5005, Dakar Fann Dakar
3. Honoré Dacosta Département de Géographie, Faculté des lettres et Sciences Humaines (UCAD), BP 5005, Dakar Fann Dakar
4. Jean-Luc SAOS, UR « DIVHA » (Dynamiques, Impacts et Valorisation des Hydro-Aménagements) HydroScience Montpellier, France
5. Léonard Elie Akpo, Département de Biologie Animal, Faculté des Sciences et Techniques (UCAD), BP 5005, Dakar Fann Dakar

Résumé

Cette étude a porté sur l'analyse de la variabilité pluviométrique et des de l'évolution des ressources en eau dans le bassin sénégal-mauritanien au cours du 20^{ème} siècle

Les observations effectuées sur l'ensemble du domaine de l'étude ont montré une bonne signature phréatique du climat. Cette signature est marquée par l'évolution saisonnière des niveaux phréatiques qui traduisent les processus de recharge au cours de la saison pluvieuse puis de décharge au cours de la saison sèche.

Les amplitudes de ces fluctuations, fonction de la profondeur de la nappe, sont très importantes dans les zones basses où elles peuvent atteindre 5 m mais demeure très limité dans les zones hautes. En revanche le stockage est plus efficace en zone de hauteur témoignant du rôle tampon que joue la zone non saturée.

La baisse des amplitudes des fluctuations vers le nord où les précipitations sont de moins en moins efficaces et la tendance des nappes à l'épuisement est une bonne illustration du caractère indicateur, de l'évolution du climat, des fluctuations de nappes.

I. Introduction, problématique

Au Sénégal la sécheresse persistante, qui s'est installée depuis la fin de la décennie 1960-1970, a entraîné une chute drastique des écoulements et une forte dégradation des écosystèmes humides. L'évolution des ressources en eau est marquée, dans ce contexte de péjoration climatique, par une baisse continue des nappes phréatiques, un assèchement quasi permanent des vallées continentales et une invasion saline des biefs maritimes sur la quasi-totalité de réseau hydrographique. La poursuite, à long terme de ce processus, est de nature à conduire à une modification profonde des paramètres climatiques et environnementaux, donc à un changement climatique tel que défini par le GIEC (Groupe Intergouvernemental pour l'Etude du Climat (GIEC, 1992).

Cette baisse du potentiel en eau nous a amené à rechercher les relations de cause à effet entre l'évolution du niveau des nappes phréatiques et celui des principaux paramètres climatiques afin de déterminer les tendances du climat et de proposer des solutions alternatives.

II. Matériels et méthodes

Ce travail s'inscrit dans un cadre méthodologique pluridisciplinaire avec comme matériel de travail les cadres climatique, géologique et hydrogéologique du bassin sénégalo-mauritanien qui constituent la zone d'étude.

II.1 Matériel

II.1.1 Le cadre climatique

Le Sénégal (fig. 1) est situé dans la partie la plus occidentale de l'Afrique, entre les latitudes 12°18' et 16°41' nord et les longitudes 11°21' et 17°32' ouest. Selon la nomenclature de Leroux (1983) le pays est recouvert de deux bandes climatiques tropicales disposées de part et d'autre de la latitude de Dakar avec, au nord un domaine sahélien et au sud un domaine soudanien. Ces bandes climatiques à disposition latitudinale sont altérées, sur le littoral, par des variantes azonales dues à l'influence de l'alizé maritime en provenance de l'anticyclone des Açores. Cette influence maritime définit le long de la côte les domaines climatiques de la grande côte (entre Saint-Louis et Dakar), de la Petite côte (entre Dakar et Kaolack) et de la Basse Casamance (entre la frontière au-delà de la frontière gambienne).

Hors du littoral, le pays est sous l'influence de deux masses d'air. D'une part l'alizé continental (harmattan), en provenance de l'anticyclone maghrébin, qui souffle sur le pays pendant la saison sèche, et de l'autre la mousson issue de l'anticyclone de Saint Hélène (dans l'Atlantique Sud) et qui apporte la pluie entre les mois de mai et d'octobre.

A ce titre il connaît deux saisons bien marquées (une saison sèche et une saison pluvieuse) dont l'alternance est déterminée par la dynamique de la mousson pluvieuse qui couvre le pays entre les mois de mai et d'octobre.

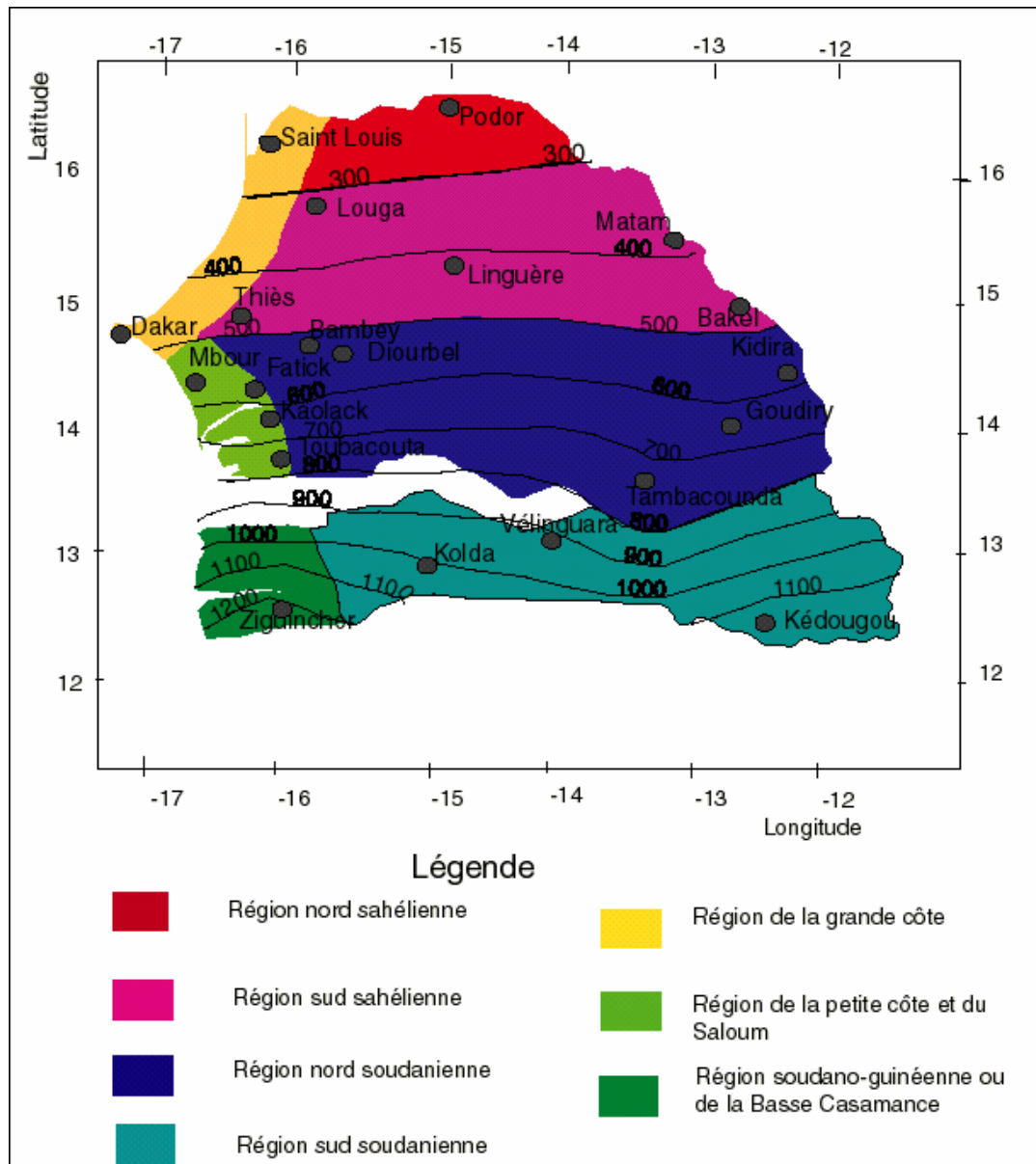


Figure 1 : variantes locales du climat soudano-sahélien du bassin sédimentaire sénégalais

II.1.2 Le cadre géologique

Au plan géologique, le territoire sénégalais est entièrement compris dans le bassin côtier sénégal-mauritanien sauf sa partie orientale située dans la zone où affleurent les formations anciennes du craton ouest africain. Ce bassin est composé de terrains tabulaires méso-cénozoïques discordants sur les formations géologiques plus anciennes. Très minces à l'Est ces formations s'épaississent vers la côte atlantique où elles dépassent 8000 m d'épaisseur (de Spengler et al,1965; Castelin et al,1966). Ces terrains qui ont fait l'objet d'une synthèse stratigraphique (Wisman, 1982) sont recouverts, en grande partie (Tessier et al, 1975) par un faciès d'altération du Cénozoïque, dénommé Continental Terminal. Les affleurements les plus anciens appartiennent au Sénonien et sont localisés dans le horst de Ndiass (Khatib et al., 1994; Sow, 1995).

II.1.3 Le cadre hydrogéologique

Le continental terminal, ainsi très largement représenté, constitue avec le quaternaire l'aquifère principal de notre étude. Les possibilités en eau du Continental terminal sensu stricto sont variables. Intéressantes dans le Sud du pays, elles diminuent notablement dans le Ferlo où son alimentation en eau est faible et où les puits atteignent 40 à 60 m. Dans le Nord du Ferlo et la région de Linguère, l'eau est drainée dans les calcaires éocènes sous-jacents et le Continental terminal n'est pratiquement pas aquifère.

Quant au Quaternaire il dispose de bonnes possibilités en eau dans la région de Dakar dans tout le littoral nord où il est sableux. L'importance de cette nappe des sables quaternaires varie avec la forme, irrégulière, du substratum. Elle est notamment exploitée à Thiaroye pour l'alimentation en eau de Dakar avec des débits d'environ 10 000 m³ par jour.

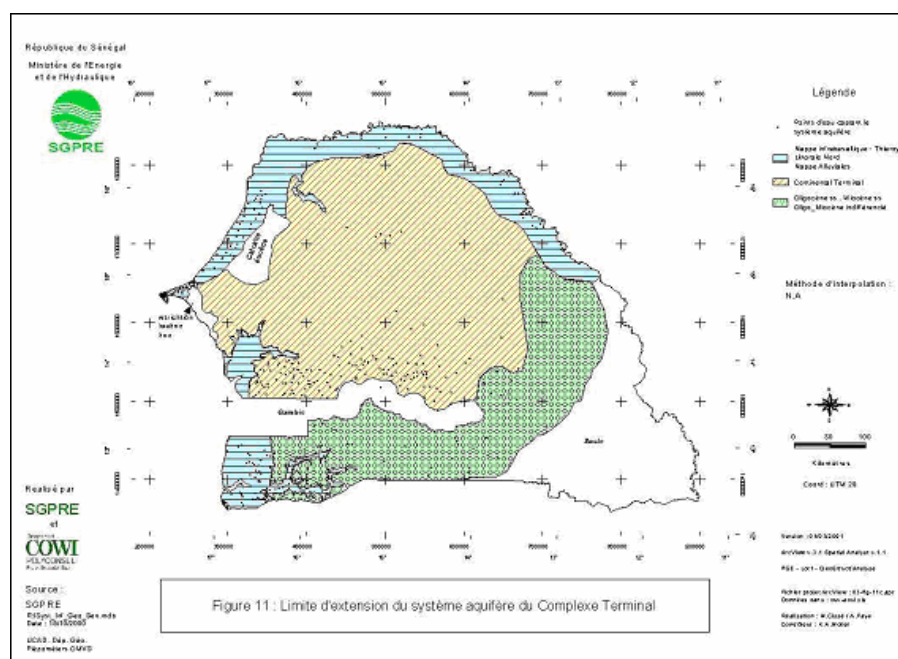


Figure 2 : limite d'extension du système aquifères du Complexe Terminal

II.2 La méthodologie

L'objectif de l'étude est de montrer comment l'évolution spatio-temporelle du niveau des nappes phréatiques peut aider à comprendre les tendances du climats dont le diagnostic directe nécessite des investigations beaucoup plus poussées. La pertinence d'une telle approche tient du fait, avéré, que les pulsations du climat et ses tendances à long terme se marquent bien dans les chroniques des niveaux phréatiques (Malou, 1992 ; Liéno, 1996 ; Ngom, 2000 ; Malou, 2004). Ainsi dans le contexte du climat sénégalais, caractérisée par une bonne évolution latitudinale des précipitations, nous avons choisi d'observer l'évolution des niveaux de nappes en comparaison avec celle du climat. Ainsi des observations piézométriques ont été effectuées le long du gradient pluviométrique nord sud, qui caractérise ce climat. Trois sites ont ainsi été retenus pour ces investigations :

- un site au sud (le bassin de Baïla) en zone sub-guinéenne,
- un site au centre (celui de la Néma) en zone soudanienne
- un site au nord du pays (celui du littoral nord) en zone sahélienne.

Ces sites ont servi d'observatoire des principaux paramètres du bilan de l'eau

III. Principaux résultats obtenus

Les résultats issus des observations des niveaux statiques de la nappe phréatique, effectuées du sud au nord du domaine d'étude, sont ici présentés par zone climatique afin de mettre en évidence les similitudes et les dissemblances le long du gradient pluviométrique. Au sein d'une même zone climatique ces similitudes et dissemblances de fonctionnement, liées à la topographie sont également mises en relief afin de relever le rôle que joue la zone non saturée dans le processus de variation des stocks d'eau souterraine. Cette topographie qui détermine la profondeur de la nappe structure le paysage en trois unités morphologiques que sont

- La zone de terrasse où la profondeur de nappe est comprise entre 0 et 15 m
- La zone de versant où elle est comprise entre 15 et 20 m
- La zone de plateau où elle est supérieure à 20 m.

III.1 En zone sub-guinéenne

En zone sub-guinéenne, le niveau piézométrique, perçu à travers l'évolution des niveaux statiques des puits villageois, montre des variations de grande amplitude, modulées par l'épaisseur de la zone non saturée.

Ainsi en zone de terrasse, l'amplitude des fluctuations est importante, pouvant atteindre 1 à 5 m (lorsque la profondeur moyenne de la nappe est comprise entre 5 et 10 m). En dessous, dans la terrasse inférieure (entre 0 et 5m), ces battements de nappe subissent l'effet limitant du marécage constitué par le bas-fond. Au delà (à partir des 10 m de profondeur), l'amplitude des fluctuations diminue. On note une dissymétrie de l'onde de fluctuation du fait de l'importance relative de la phase de décharge qui dure près de 9 mois. Au cours de la période d'observation, après la forte recharge de 1988, perceptible à toutes les stations d'observation, l'on note une stabilité du niveau moyen de la nappe (fig. 3).

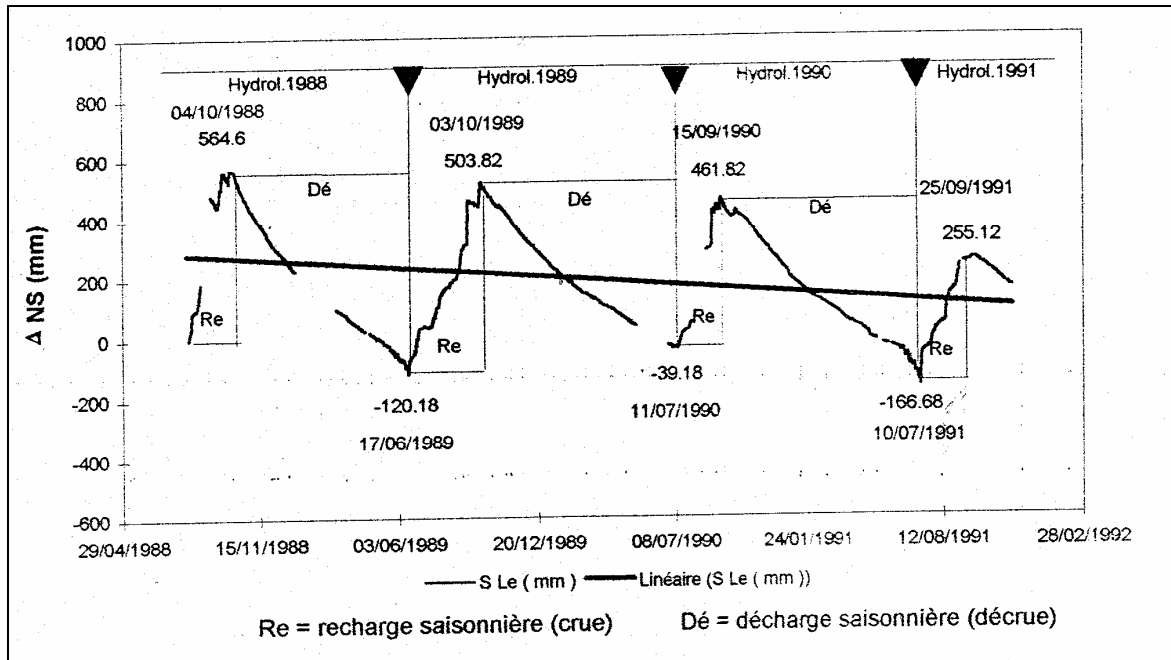


Figure 3 : hydrogramme du puits I de Balandine en zone de terrasse

Sous le versant (entre 15 et 20 m de profondeur de nappe) les battements du niveau piézométrique sont de l'ordre de 2 à 1,5 m. L'onde de fluctuation (fig. 4) présente une symétrie relative du fait d'un équilibre entre les phases de remonté et de descente du niveau qui durent chacune 6 mois environ. Du mois d'août au mois de janvier le niveau monte, le reste du temps (février/juillet) il est en baisse continue. Là, comme dans la zone précédente, le niveau de base de la nappe s'est à peu près stabilisé au cours des cycles 1988/1989, 1989/1990.

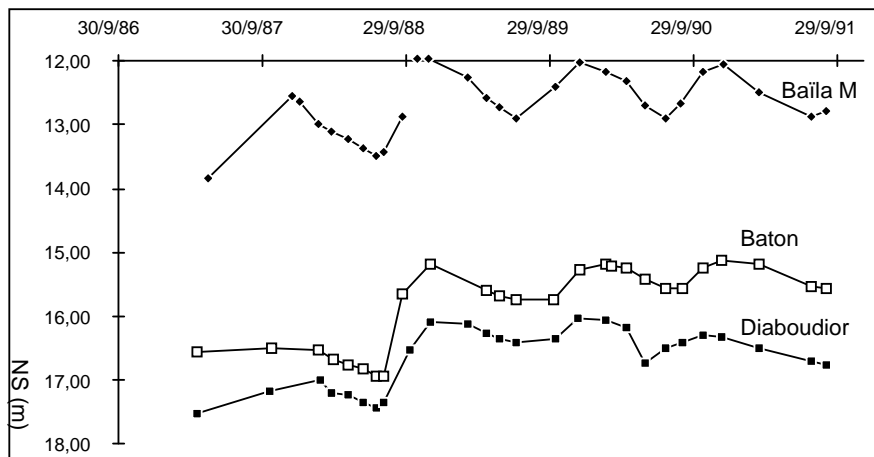


Figure 4: fluctuations du niveau de la nappe dans le bassin de Baïla: zone de versant

Sous le plateau, où la profondeur de la nappe excède 20 m, le caractère cyclique des battements de nappe tend à s'estomper. Leurs amplitudes faiblissent considérablement et deviennent inférieure à 1 m. En revanche, lorsque le niveau est en hausse, il tend à se maintenir, contrairement à ce que l'on observe dans les unités morphologiques inférieures. Au

cours de la période d'observation, le niveau de la nappe est en nette hausse sous le plateau (fig. 5).

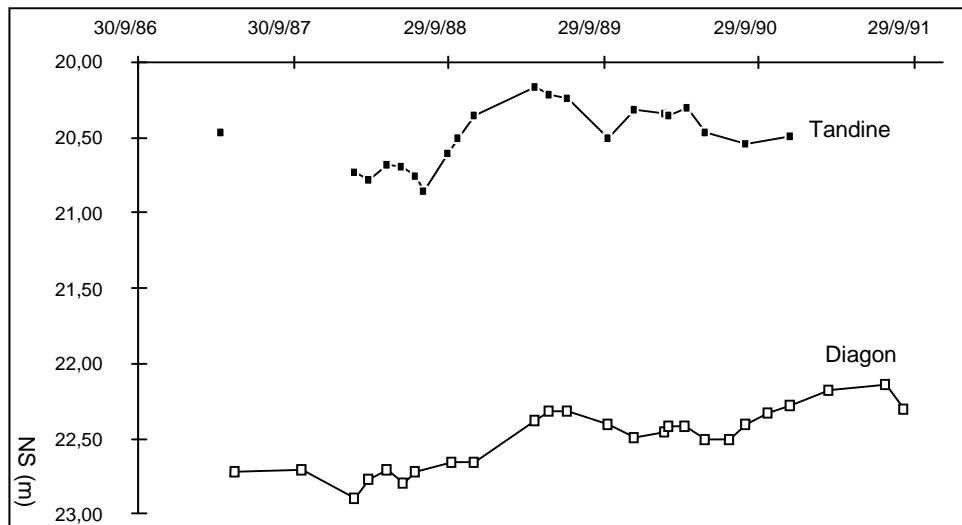


Figure 5 : fluctuations du niveau de la nappe dans le bassin de Baïla: zone de plateau

III.2 En zone soudanienne

En zone soudanienne, tout comme, dans la zone précédente, les fluctuations des niveaux statiques revêtent un caractère cyclique avec cependant une nette tendance à la baisse des niveau de base.

Sous la terrasse (fig. 6) les fluctuations sont fortes et fonction de l'importance de la saison pluvieuse. Elles peuvent atteindre selon les saisons des amplitudes de 1 à 5 m. La remonté des niveaux s'effectue au cours de la saison pluvieuse et la baisse pendant la saison sèche.

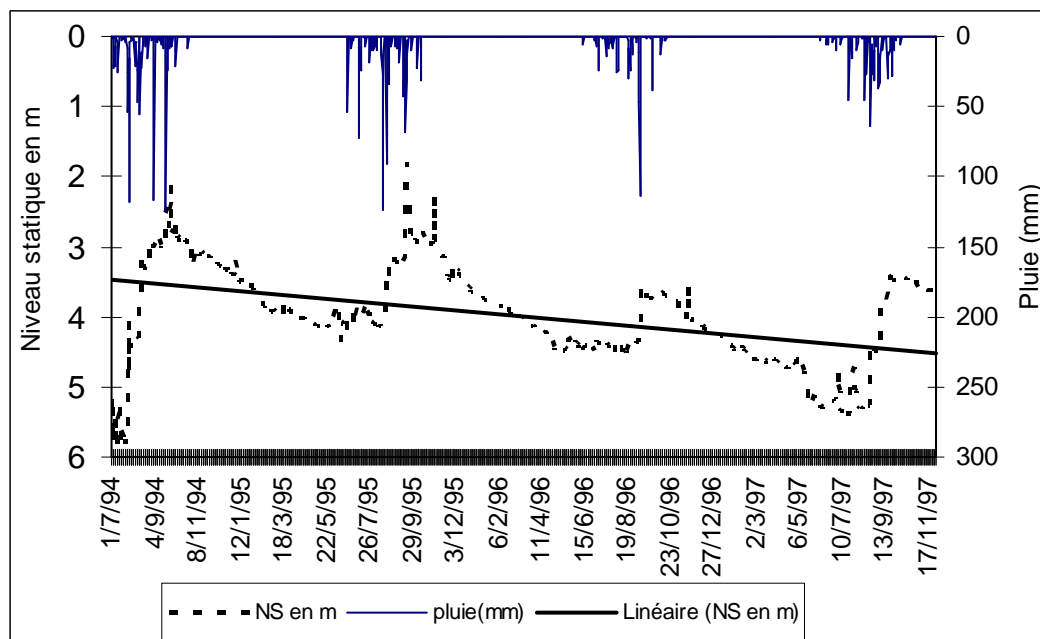


Figure 6 : Variations du niveau statique de la nappe dans les puits de faible profondeur (zone de terrasse)

En zone de versant, les amplitudes de fluctuation diminuent (comprise entre 0,5 et 1 m) et l'onde de fluctuation devient très dissymétrique avec une périodicité non saisonnière. La phase de remontée des niveaux s'effectue bien après la saison pluvieuse et se poursuit au cours de la saison sèche.

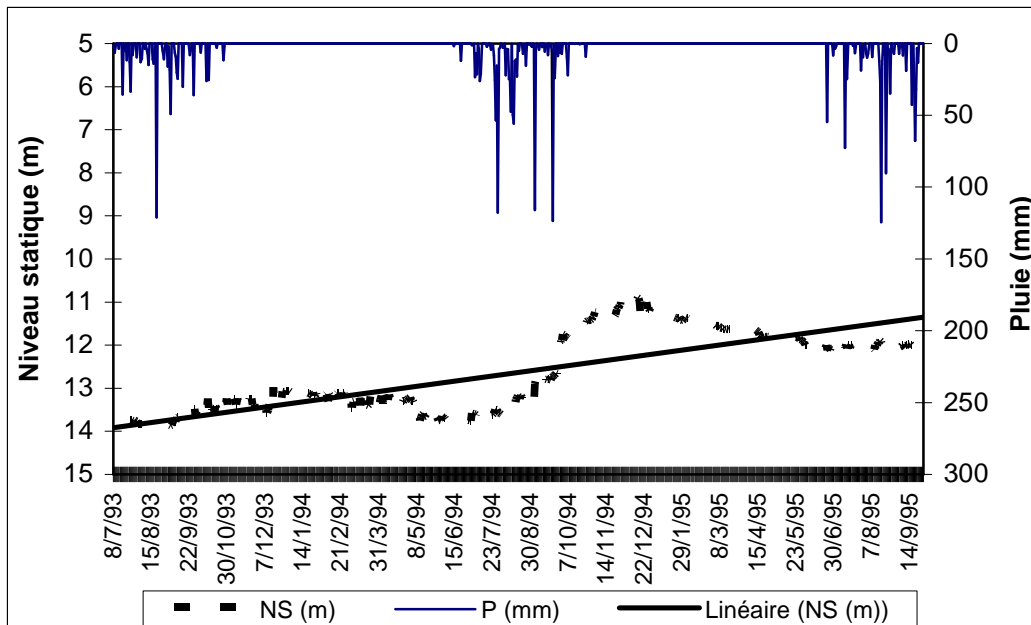


Figure 7 : Variations du niveau statique de la nappe dans les puits moyennement profonds (zone de versant)

Sous les plateaux (au-delà des 20 m), (fig. 8), les variations cycliques ont tendance à s'estomper. L'évolution piézométrique prend l'allure d'une onde d'évolution à grand rayon de courbure. La recharge, lorsqu'elle existe, s'effectue au cours de la saison sèche et chevauche parfois l'hivernage suivant, de sorte qu'il devient difficile d'identifier le cycle de variations saisonnières du niveau piézométrique.

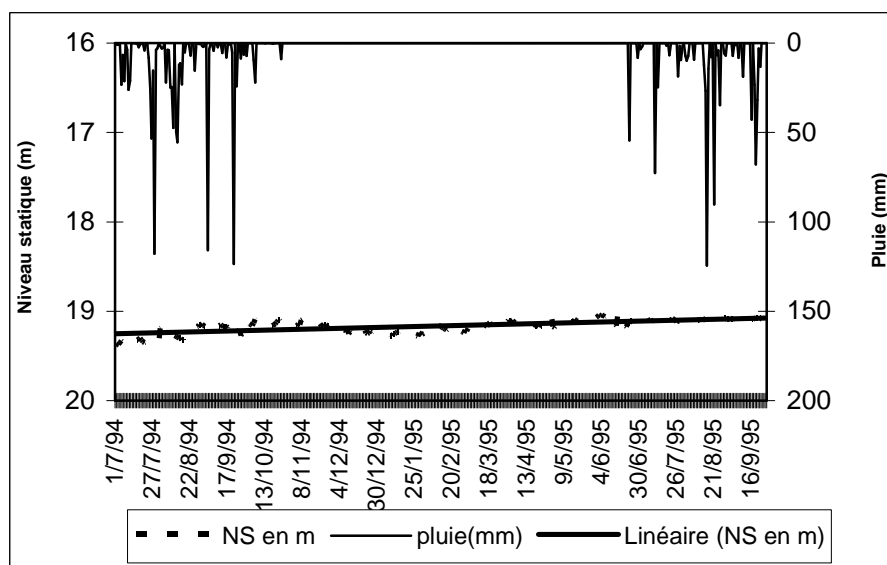


Figure 8 : Variation du niveau statique en zone de plateau dans le bassin de la Néma

III.3 En zone sahélienne

La nappe des sables du littoral nord, se trouve dans un contexte topographique marqué par des cordons dunaires et des dépressions interdunaires dans lesquelles elle s'écoule par endroit. L'évolution de son niveau piézométrique indique, à l'instar des deux domaines précédents, des fluctuations cycliques mais très dissymétrique avec une courte phase de remonté des niveaux et une longue et forte phase de descente. Les phases de remontée des niveaux sont très faibles, n'excédant pas 0,50 m alors que celles des baisses des niveaux sont très fortes, nettement supérieures au mètre. Tout cela étant modulé par la profondeur de la nappe.

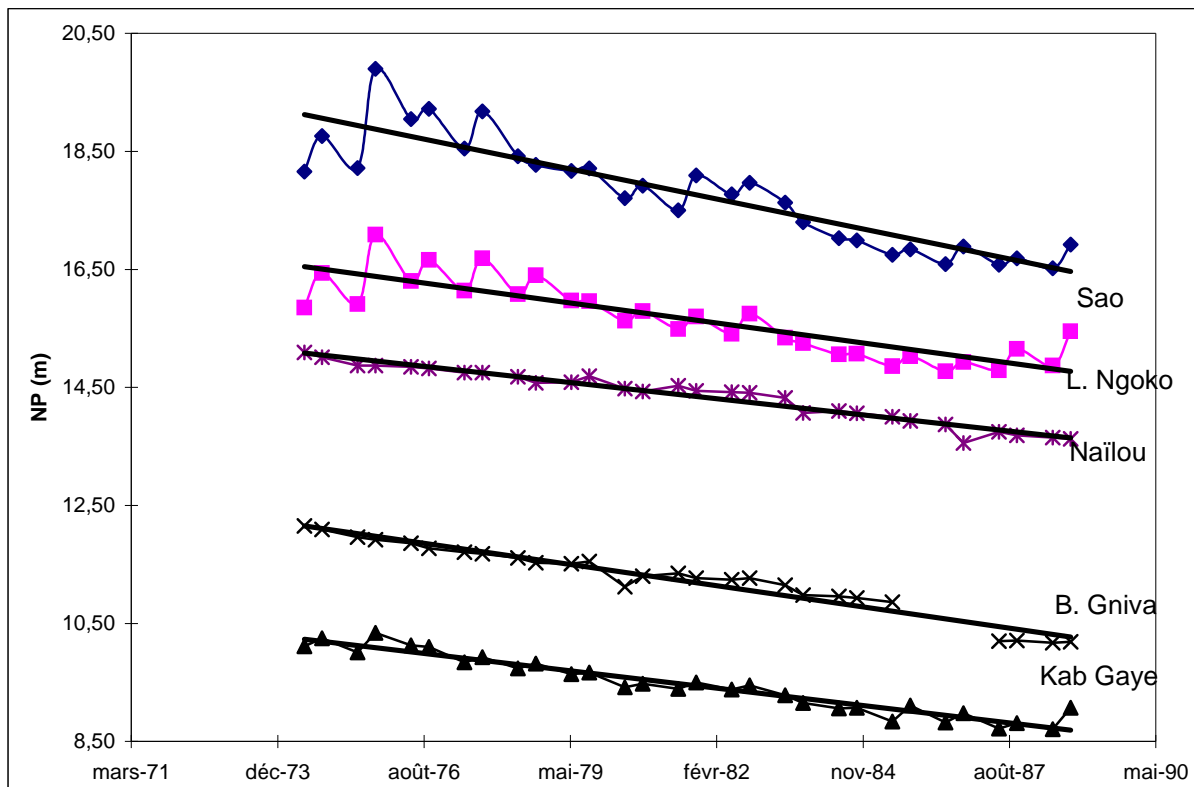


Figure 9 : Mise en évidence de la contrainte climatique des nappes en zone sahélienne (cas de la nappe du littoral nord)

IV. Discussions

Les fluctuations des nappes phréatiques dans la zone soudano-sahélienne du bassin sénégalo-mauritanien revêtent 3 caractéristiques essentielles que sont :

1. La périodicité saisonnière des cycles de fluctuation,
2. La variation des amplitudes de fluctuation en fonction de la profondeur de la nappe et de la pluviométrie,
3. La prépondérance des phases de baisse des niveaux à mesure que le climat devient de plus en sec vers le nord du pays.

La première caractéristique indique sans conteste la marque du cycle saisonnier sur l'évolution des stocks d'eau souterraine. Ces fluctuations saisonnières correspondent à l'alternance des périodes de recharge et de décharge des eaux souterraines indiquant des phases de stockage et de déstockage de l'eau pluviale dans le réservoir souterrain au cours du cycle hydrologique.

Le fait que les amplitudes de ces battements de niveau soient fonction de la profondeur de la nappe indique le lien qui existe entre la surface et les réservoirs souterrains au travers de la zone non saturée c'est-à-dire la prépondérance des transferts de flux verticaux du genre infiltration/exfiltration imposés par les conditions atmosphériques. En zone de terrasse, où la profondeur de la nappe est comprise entre 0 (niveau du bas-fond) et 10 m, le niveau statique passe d'une profondeur maximale (correspondant au niveau d'étiage, en juin/juillet) à une profondeur minimum (niveau de crue atteint vers la fin de l'hivernage, en septembre/octobre), ce qui définit deux phases bien distinctes du fonctionnement de l'aquifère:

- une phase de recharge, pendant l'hivernage (allant de juillet à septembre)
- une phase de décharge, pendant la saison sèche (d'octobre à juin).

La recharge est rapide et très importante aux abords des bas-fonds où, à l'exception des premières précipitations, qui contribuent à satisfaire le déficit hydrique du sol, les crues des nappes se manifestent dans les 24 heures qui suivent les averses. La vitesse moyenne d'infiltration a été estimée à 5 m/j et correspond à la bonne perméabilité ($5 \cdot 10^{-5}$ m/s) des formations (Scet, 1966).

Par contre les stocks d'eau pluviale, ainsi constitués, demeurent très transitoires. Ils sont immédiatement déstockés par un rabattement très important au cours de la saison sèche qui suit. Ragan (1968) et Chevalier (1990) expliquent cette fugacité des stockages pluviaux par un apport supplémentaire de l'eau ayant ruisselé sur les versants et s'infiltrant à l'entrée du bas-fond. Un autre auteur, (Planchon, 1989) a montré, par marquage colorimétrique des crues dans les ravines, la participation de l'eau transitant par la nappe en bas de versant et contribuant au gonflement des crues du cours d'eau. Malou (1992) explique cette fugacité par une forte reprise évapo-transpiratoire.

Au cours de la saison sèche, la nappe présente une décrue régulière d'environ 5 mm/j. Compte tenu de l'emmagasinement de 5 % des formations encaissantes. Ce déstockage correspond à une lame d'eau de 0.25 mm/j. Cet abaissement représente un débit spécifique d'environ 250 m³/km² d'eau que la nappe libère, par jour du fait de l'évaporation et du drainage par les fonds alluviaux.

Dans les zones à profondeur moyenne, c'est à dire au niveau des versants, la recharge est nettement différée par rapport aux pluies qui l'engendrent. Ce déphasage est d'environ 1 à 2 mois de sorte que le niveau piézométrique maximal se situe entre les mois de janvier et de février. Ceci s'explique par le temps de transit, nécessaire aux fronts de percolation (Malou, 1989), générés depuis la surface du sol, pour atteindre la nappe. Ce temps est proportionnel à l'épaisseur de la zone non saturée et aux forces de détention hydrostatique du réservoir non saturé (Dupriez, 1990; Malou, 1992; Malou, 2004; Ngom 2000)

Sous le plateau, la recharge efficace, quoi que faible, contribue plus à la reconstitution des stocks souterrains que dans les unités inférieures. Ceci se justifie par l'allongement de la phase

de recharge, qui en s'étendant sur la quasi-totalité de la saison sèche, réduit sensiblement la décharge post-hivernage due à l'évapotranspiration.

A mesure que l'on s'achemine vers les zones sèches (notamment en zone sahélienne), ce caractère cyclique à périodicité saisonnière s'estompe et l'on note de courtes phases de recharge dominées par de grandes phases de décharge. Le caractère, alors très dissymétrique des fluctuations, prend l'allure d'un trend séculaire d'épuisement des réserves souterraines. Ceci s'explique par la faiblesse des précipitations, la courte durée de la saison pluvieuse et l'allongement de la saison sèche, qui font que la recharge devient très faible et ne dure que peu de temps contrairement à ce que l'on observe en climats plus humides (zone sub-guinéenne et soudanienne).

Conclusion

L'étude des fluctuations de nappes dans le bassin sédimentaire sénégalais a montré que la variabilité climatique s'enregistre bien dans les niveaux phréatiques dont l'évolution plus lente permet de mieux percevoir les tendances à long terme du climat. Dans le sahel sénégalais l'évolution vers la sécheresse du climat soudano-sahélien a été bien mise en évidence par ces fluctuations de nappes.

Le lien étroit qui existe entre, d'une part les précipitations et la reconstitution des réserves d'eau souterraine et d'autre part entre la demande évaporatoire de l'air et les déstockages de ces réserves, est une bonne illustration de l'impact du climat sur les ressources en eau souterraines.

Ainsi les fortes tendances à l'épuisement des nappes phréatiques dans le bassin sénégalomauritanien autorisent à dire que les précipitations enregistrées à partir de la fin de la décennie 1960/1970 continuent à s'inscrire dans une série déficitaire incapable d'assurer le maintien des stocks d'eau souterraine qui sont la source d'alimentation du réseau hydrographique.

La baisse continue des nappes phréatiques et leur épuisement à long terme, mis en évidence par la dissymétrie des ondes de fluctuation en faveur des phases de décharge des réserves d'eau souterraine, conduisent assurément à l'assèchement en cours des zones humides. Cette baisse continue des nappes phréatiques explique l'assèchement actuel des zones humides qui constitue une véritable menace pour les économies de pays soudano-sahéliens basées sur l'exploitation des ressources naturelles et l'agriculture.

Bibliographie

- Castelain J., Jardin S., Monciardini C. (1965). Excursions géologiques dans le Sénégal occidental. Coll. Intern. Micropal. Dakar 1963, Paris, Mem. BRGM.
- Chevalier P. (1990). Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide. Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Abidjan, ORSTOM.
- de Spengler A. ., Castelin J., Cauvin J., Leroy M. (1966). Le bassin secondaire-tertiaire du Sénégal, mouvements de l'eau. "bassins sédimentaires du littoral atlantique africain". Paris: p. 80-94.
- Dupriez H., de Leener P. (1990). Les chemins de l'eau. Ruissellement, irrigation, drainage. Belgique, Manuel tropical. Terre et vie, CTA, l'Armattan et ENDA.
- Khatib R., Ly A., Sow E., Sarr R. (1994). "Rythmes sédimentaires liés aux variations eustatiques globales au Campanien et au Maastrichtien du Sénégal. Révision stratigraphique de la série du Crétacé terminal du Cap de Naze." C.R. Acad. Sci. Paris. **t. 311, série II**: 1089-1095.
- Leroux M. (1983). Le climat de l'Afrique tropicale. Paris.
- Liéno G. (1996). Relations écoulements de surface/écoulements souterrains dans le bassin versant de la Néma (Sine-Saloum, Sénégal). Géologie. Dakar, Université Cheikh Anta Diop (UCAD): 91 p, 35 fig., 32 tab.
- Malou R. (1992). Etude des aquifères superficiels en Basse Casamance : un modèle de bilan hydrique. Géologie. Dakar, Université Cheikh Anta Diop (UCAD).

- MALOU, R. (2004). Impact du climat sur les ressources en eau en zones soudano-sahélienne. Thèse de doctorat d'état. Université Cheikh Anta Diop de Dakar. 152 p.
- Ngom F. D. (2000). Caractérisation des transferts hydriques dans le bassin de la Néma au Sine Saloum. Géologie. Dakar (Sénégal), Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD): 130p.
- Sow E. (1995). "Le Crétacé Terminal du Sénégal occidental: un exemple de sédimentation de plate-forme détritique gouvernée par l'eustatisme." Africa Geoscience Review **2**, N° **2**: 267-378.