

Université de Paris-sud (Orsay)
Laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique

ORSTOM - Montpellier
Laboratoire d'hydrologie

DEA HYDROLOGIE ET HYDROGEOLOGIE :
géostatistique et géochimie

**MODÉLISATION LOCALE DE LA RECHARGE DE
LA NAPPE PHRÉATIQUE SUR LE SITE DE WANKAMA
(SUD-OUEST DU NIGER)**

Mémoire de DEA
Juillet 1996
Guillaume FAVREAU

sous la direction de C. Leduc (ORSTOM)

(...) ce jour-là, Koumbo dit qu'elle allait tresser ses cheveux et qu'elle souhaitait qu'on creuse un puits pour elle. On creusa un puits. Trois joueurs de guitare, trois joueurs de luth, trois joueurs de tambour d'aisselle étaient au bord du puits.

Pendant ce temps Koumbo tressait ses cheveux. On atteignit l'eau du puits et on vint prévenir Koumbo. Koumbo déclara :

"Celui qui sera capable de pénétrer sans crainte dans ce puits, d'aller jusqu'au fond, d'en ramener du sable et de l'eau, celui-là sera mon prétendant".

Extrait de Koumbo et ses prétendants, conte Zarma du Niger.



**Photographie aérienne de la mare ouest de Wankama
après la crue du 22 juillet 1992
(échelle approximative : 1/5000e ; photo J.C. Desconnets)**

SOMMAIRE

	PAGE
- Avant-propos	1
- Introduction	2
- 1ère partie : <u>CADRE GÉNÉRAL ET PRÉSENTATION DES DONNÉES</u>	
. Contexte géographique : le Niger occidental	4
. Cadre climatique	6
. Cadre géomorphologique - pédologie et végétation	9
. Hydrologie de surface	11
. Cadre géologique	12
. Cadre hydrogéologique	16
. Présentation du site de Wankama	23
- 2ème partie : <u>MODÉLISATION</u>	
. Modélisation en 1 dimension (approche préliminaire)	34
. Présentation du programme de modélisation en 2 dimensions WATASI 5	41
. Application de la modélisation en 2 dimensions au site de Wankama	43
. Calage des paramètres	47
. Sensibilité du modèle	60
- Conclusion et perspectives	66
- Liste des figures	69
- Références bibliographiques	71
- Annexes	

AVANT-PROPOS

A l'issue de ce mémoire, je remercie tout d'abord M. Marc Morell d'avoir accepté ma présence au laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM, et M. Pierre Chevallier pour son accueil au sein de l'Unité de Recherche 21.

Je remercie également M. Pierre Ribstein pour l'intérêt particulier qu'il a témoigné à plusieurs reprises au bon déroulement de mon stage.

Je tiens enfin tout particulièrement à associer à ce mémoire ceux qui ont suivi et conseillé mes travaux :

Christian Leduc, mon maître de stage, pour le temps qu'il a consacré à m'enseigner la rigueur nécessaire à tout travail de recherche, et au-delà pour les nombreuses discussions enrichissantes sur l'Afrique et le Niger.

Christelle Marlin, co-responsable avec M. Laurent Dever du DEA "Hydrologie et Hydrogéologie" à Paris-sud, pour ses remarques sur l'aspect géochimique de la recharge, et plus généralement pour les conseils judicieux qu'elle m'a prodigués au cours de l'avancement du mémoire.

Grâce à eux, j'ai la chance de poursuivre ce travail par 16 mois de service en coopération avec l'ORSTOM sur l'hydrogéologie du sud-ouest du Niger. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

INTRODUCTION

Ce mémoire rend compte d'un stage de 5 mois effectué au laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM de Montpellier (février-juin 1996) sous la direction de C. Leduc, CR1 de l'UR21 du Département des Eaux Continentales de l'ORSTOM, dans le cadre du D.E.A. "Hydrologie et hydrogéologie : géostatistique et géochimie" de l'université de Paris-sud/Orsay.

Au cours de l'expérimentation Hapex-Sahel (Hydrological Atmospheric Pilot EXperiment, initiée en 1990 sur le degré-carré de Niamey, au Niger) les différentes observations hydrologiques et hydrogéologiques ont montré le rôle fondamental des mares temporaires dans la recharge de la nappe phréatique. Le fonctionnement habituel est le suivant : le ruissellement consécutif à la pluie se concentre dans une mare dont la partie centrale est généralement colmatée, alors que les bordures épisodiquement noyées sont beaucoup plus perméables et permettent l'essentiel de l'infiltration. Les mares étant toujours à une altitude supérieure à la nappe phréatique, la communication entre les deux ne peut donc s'effectuer que de la surface vers le souterrain. La réalimentation de la nappe est donc un phénomène saisonnier (les quelques mois de la saison des pluies) et discontinu dans l'espace.

Dans le but de caractériser et de préciser le transfert d'eau mare-nappe observé, une modélisation locale de la recharge de la nappe phréatique a pu être envisagée sur le site particulièrement favorable de Wankama. Les données disponibles y sont les suivantes :

- Enregistrements limnimétriques en continu des hauteurs d'eau de la mare principale (dite mare ouest) sur les années 1993, 1994, 1995.
- Relations hauteur/volume connues d'après un levé topographique au 1/500e de la mare ouest.
- Enregistrements en continu sur les trois années considérées des niveaux piézométriques de la nappe phréatique à partir de 3 piézomètres nivelés à respectivement 50, 100 et 200 mètres du bord de la mare.
- Existence d'une coupe de forage décrivant notamment l'aquifère de la nappe phréatique au nord de la mare.
- Mesures de teneurs en eau des premiers mètres de la zone non saturée à partir de suivis neutroniques à proximité immédiate de la mare.
- Données chimiques et isotopiques résultant de plusieurs campagnes de mesures sur l'ensemble du site de Wankama.

Ce mémoire comprend deux parties principales :

- Une première partie décrivant succinctement le cadre géographique (au sens large) et hydrogéologique à l'échelle du degré-carré de Niamey, et détaillant les données disponibles sur le site de Wankama.
- Une deuxième partie axée sur la modélisation : description des principes des logiciels de modélisation hydrogéologique utilisés, présentation des résultats et de la sensibilité du modèle aux différents paramètres de la modélisation.

La conclusion reprendra l'ensemble des résultats obtenus et discutera de l'orientation à prendre en vue d'une modélisation pertinente de la recharge de la nappe phréatique au sud-ouest du Niger.

1ère PARTIE

CADRE GÉNÉRAL ET PRÉSENTATION DES DONNÉES

CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE : LE NIGER OCCIDENTAL

. Le Niger occidental se situe dans la bande sahélienne du continent africain, approximativement entre les latitudes 12 et 15°N et les méridiens 0 et 4°E, à plus de 800 km du golfe du Bénin (fig.1).

. Le relief, lié à l'érosion de l'ancienne pénéplaine, est peu accentué, l'altitude étant le plus souvent comprise entre 200 et 300 m.

.La population est en majorité rurale, sédentaire (Djermas) ou nomade (Peuls, Touaregs). Niamey -600 000 habitants en 1996- connaît une extension rapide, proche de + 5 % par an.

.En raison du contexte climatique semi-désertique les nappes d'eau souterraine constituent l'essentiel des réserves disponibles en eau douce.

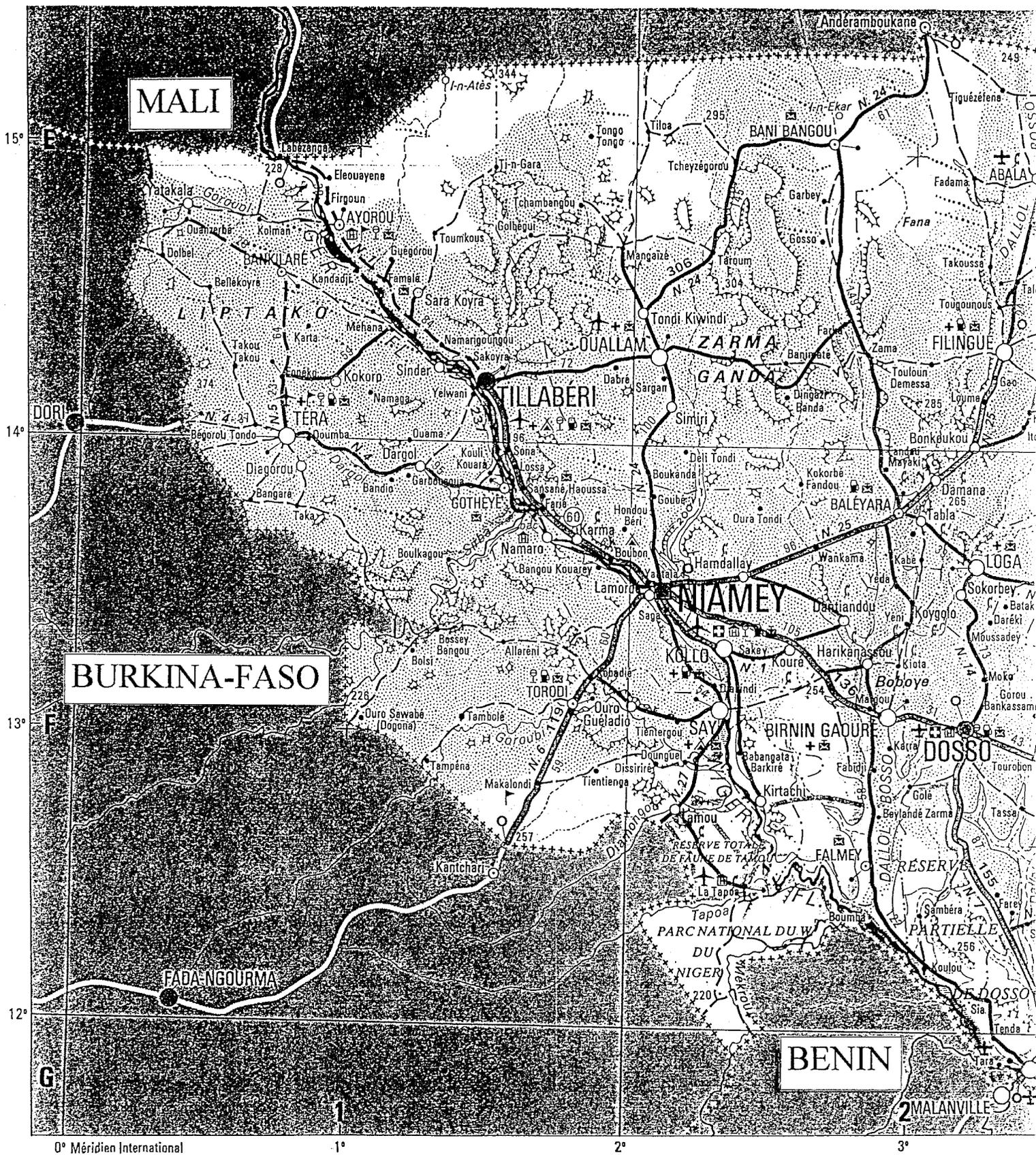


figure 1 : Carte générale de localisation du Niger occidental.

(D'après la carte générale du Niger au 1:2000000, I.G.N. Paris/I.G.N.N. Niamey 1993).

CADRE CLIMATIQUE

Le climat du Niger occidental est fortement influencé par le déplacement annuel nord-sud du front intertropical (F.I.T.), plan incliné de l'équateur météorologique séparant les masses d'air humides originaires du golfe de Guinée et les masses d'air sèches du Sahara. Les caractéristiques majeures des principaux paramètres climatiques sont résumées ci-dessous :

Précipitations

Au Niger occidental les isohyètes varient de 300 mm au nord à 800 mm au sud sur la période 1951-1989 (L'Hôte et Mahé, 1996) et définissent au sens hydrologique un climat sahélien. 90% des pluies environ tombent entre début juin et fin septembre (fig.2).

Les lignes de grain sont à l'origine de la majorité des précipitations. Ces structures convectives se déplacent généralement est sud-est/ouest nord-ouest et provoquent des pluies intenses très localisées pouvant atteindre 200 mm h^{-1} sur une dizaine de minutes. Au Sahel, du sud au nord, le gradient pluviométrique est proche de 1 mm km^{-1} .

Température

La température moyenne annuelle à Niamey est de 29°C ; elle varie très peu d'une année à l'autre. L'écart des moyennes mensuelles ne dépasse pas 4°C . L'amplitude thermique journalière est par contre forte et varie de 9°C à 18°C selon la saison (Taupin, 1990).

Humidité relative

L'humidité relative de l'air au cours de l'année est liée au déplacement du F.I.T. et passe à Niamey de 17% en février à 74% en août (Charre 1974, in Taupin 1990).

Évaporation

L'évaporation estimée par Bac de classe A sur la période 1991-1993 atteint 4000 mm par an à Niamey-aéroport. Les valeurs mensuelles sont comprises entre 5 mm j^{-1} en août et 16 mm j^{-1} en mars-avril (Desconnets, 1994).

Vent

D'octobre à avril l'harmattan est le vent dominant. En provenance du Sahara ce vent sec et chaud de secteur nord-est se caractérise par un important transport solide. Les vents humides et tièdes associés à la mousson guinéenne soufflent du sud-ouest de mai à septembre.

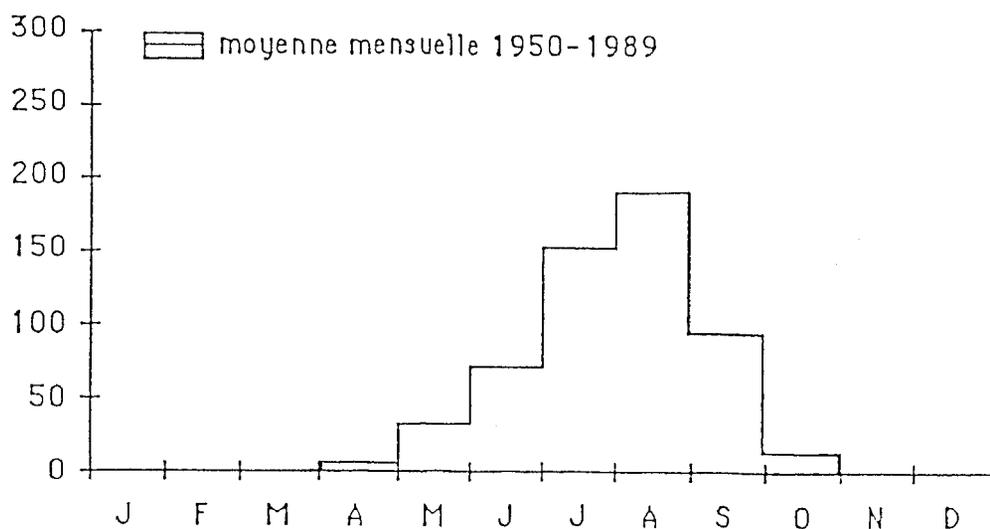


figure 2 : Répartition mensuelle des pluies à Niamey-ville pour la période 1950-1989
(d'après Taupin et al., 1992, in Desconnets, 1994)

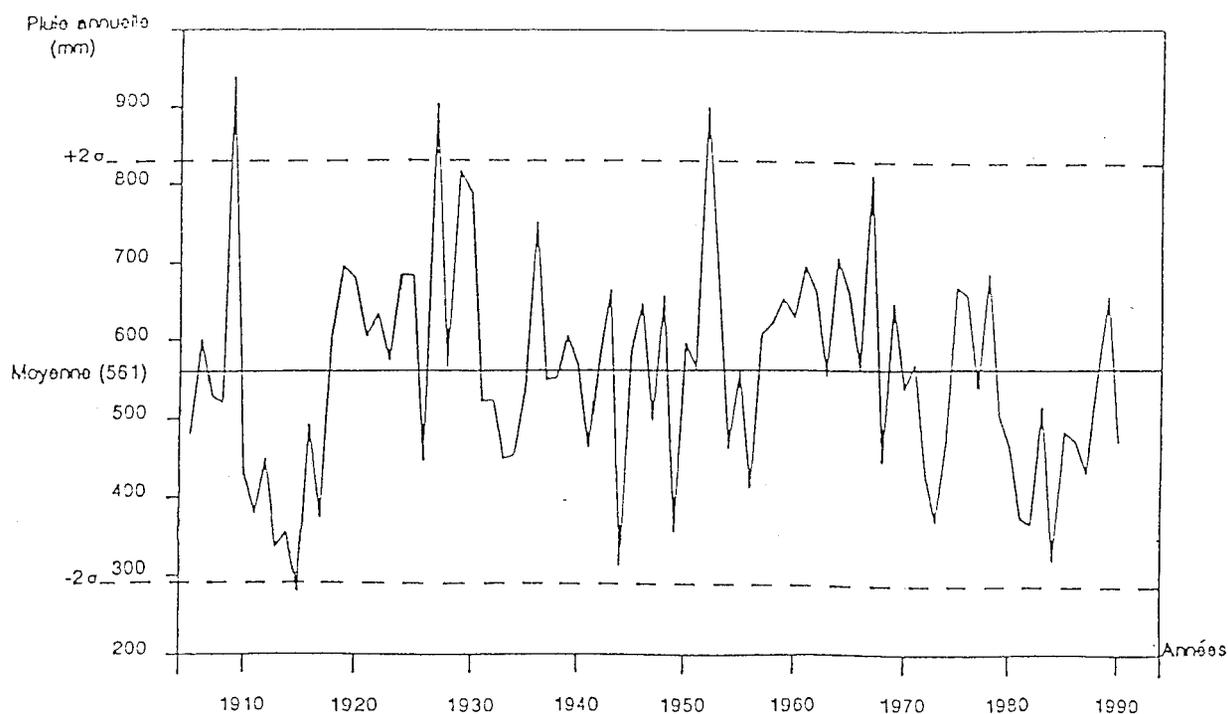


figure 3 : Totaux pluviométriques annuels à Niamey-ville de 1905 à 1990
avec deux années reconstituées : 1911 et 1920
(source D.M.N. Niamey, in Desconnets, 1994)

Une caractéristique fondamentale du Sahel est l'extrême variabilité spatio-temporelle du climat, et notamment des précipitations.

- La variabilité spatiale apparaît sur un secteur donné par un tracé des isohyètes qui varie fortement d'une année à l'autre ; la mise en évidence du gradient de pluviosité caractéristique nord-sud nécessite le calcul de moyennes interannuelles sur plusieurs saisons. A l'échelle annuelle sur la période 1989-1991, des différences de 100 % de la pluviométrie ont été constatées sur moins de 30 km (Taupin et al., 1993).

- La variabilité interannuelle du total pluviométrique se caractérise à Niamey par un fort écart-type de 128 mm -pour une moyenne de 561 mm- sur la période 1900-1990 (fig.3). A l'échelle de l'ensemble du quaternaire plusieurs études isotopiques (Durand et al., 1980 ; Tehet et al., 1990 ; Fontes et al., 1993) ont mis en évidence l'existence de périodes plus humides et/ou plus froides qu'actuellement dont le paysage a conservé les traces géomorphologiques.

CADRE GÉOMORPHOLOGIQUE PÉDOLOGIE ET VÉGÉTATION

Au-delà de la platitude apparente du sud-ouest du Niger on distingue, schématiquement, trois grands ensembles géomorphologiques : le plateau à cuirasse latéritique, le glacis sableux et les bas-fonds (fig.4).

Le plateau à cuirasse latéritique

Daté du pliocène, les périodes pluvieuses du quaternaire l'ont entaillé et rendu discontinu. La couverture pédologique de type lithosol, souvent d'épaisseur inférieure à 1 mètre, est parfois surmontée d'un manteau sableux. Le couvert végétal des plateaux apparaît sous la forme typique de brousse tigrée, alternance de larges bandes de sol nu et d'étroites bandes arbustives - *Combretum*, *Boscia*.

Le glacis sableux

La formation superficielle du glacis sableux, attribuée aux dépôts éoliens du pléistocène supérieur, s'étend en moyenne sur 800 m autour des plateaux (Courault et al., 1990). Les champs de mil et les jachères - *Guiera senegalensis* - alternent avec une végétation naturelle de ligneux bas - *Commiphora africana*.

Les bas-fonds

Les sols des vallées et bas-fonds sont fréquemment de texture sableuse fine, localement argileuse ou grossière dans l'axe des cours d'eau fossiles (ou koris). Près des mares temporaires la végétation peut devenir dense et variée avec une strate arborée développée - *Acacia albida*, *Balanites aegyptica*. Le dallol Bosso, orienté nord-sud et large d'une dizaine de km constitue à 100 km à l'est de Niamey la plaine alluviale d'un ancien fleuve, probablement en liaison avec un accident tectonique majeur.

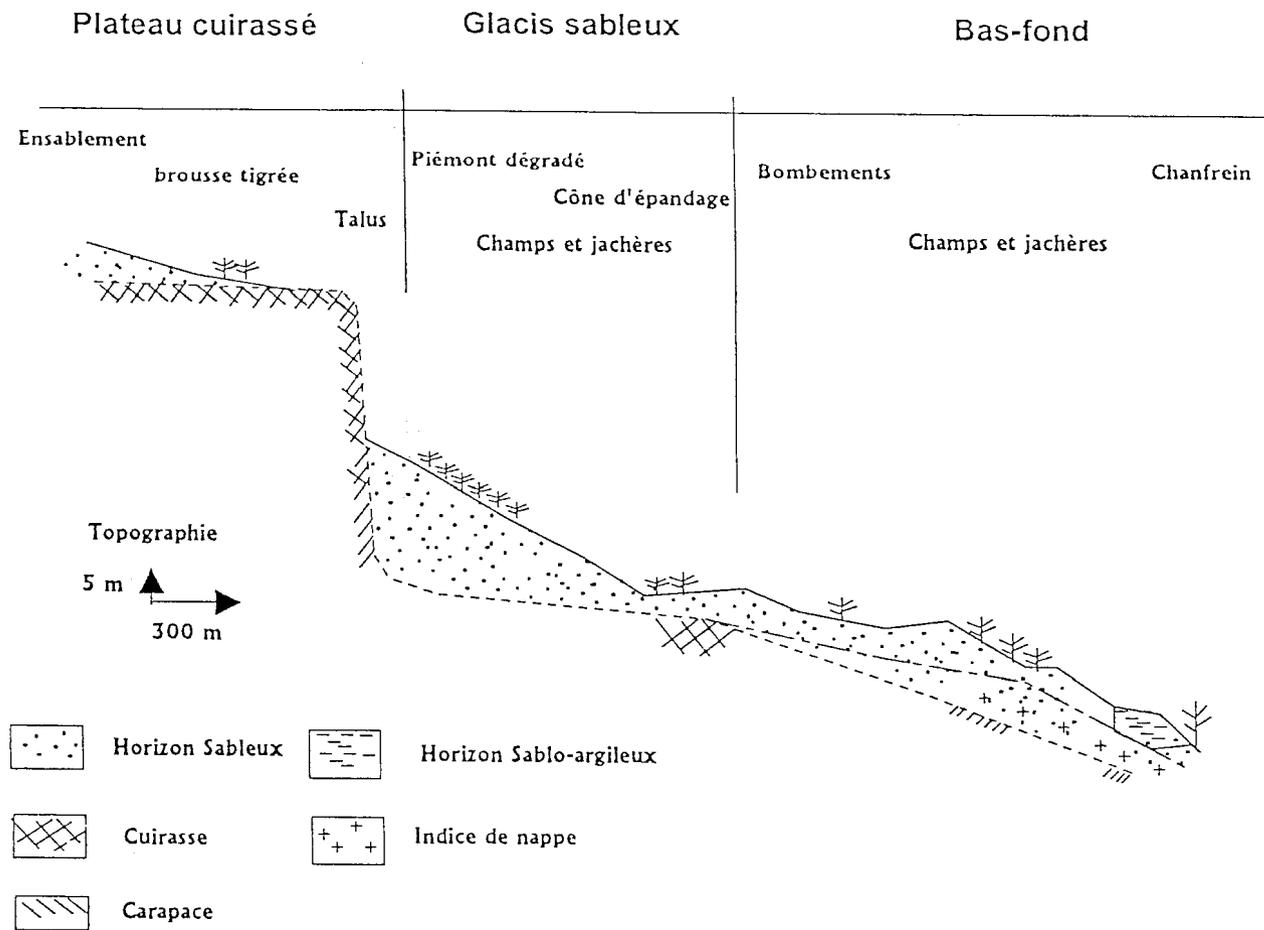


figure 4 : Représentation schématique d'une toposéquence caractéristique du paysage du degré-carré de Niamey

(d'après Courault et al., 1990, in Desconnets et al., 1996)

HYDROLOGIE DE SURFACE

. L'hydrologie de surface du secteur d'étude se caractérise par l'intermittence et l'endoréisme des écoulements.

. Le fleuve Niger, d'origine hydro-climatique tropicale humide, est le seul cours d'eau permanent de la région. Son débit moyen pour la période 1981-1990 est de $550 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ à Niamey (PNUD/DCTD, 1991). En rive droite du Niger certains koris (cours d'eau fossiles hérités des périodes humides du quaternaire) situés sur le socle peu perméable sont exoréiques une partie de l'année (Tapoa, Goroubi).

. En saison des pluies l'écoulement cesse généralement quelques heures après la fin de l'averse et les eaux ruisselées se concentrent dans des mares temporaires de quelques hectares. Ces dernières sont de deux types (Desconnets, 1994) :

- Les mares de plateau

Peu encaissées, subcirculaires, elles se vident surtout par évaporation.

- Les mares de kori

Encaissées et allongées, elles s'épuisent principalement par infiltration. Des seuils sablo-argileux formés à l'exutoire des tributaires séparent les mares de chaque kori.

La surface des bassins versants des différents types de mare est de l'ordre de quelques km^2 .

CADRE GÉOLOGIQUE

Le bassin des Iullemeden.

- Au sud-ouest du Niger le bassin des Iullemeden, intra-cratonique, couvre sur plus de 400 000 km² un socle précambrien qui, à l'affleurement, est de nature ignée ou métamorphique : Aïr, Hoggar, Adrar des Iforas au nord, socle du Liptako-Gourma à l'ouest et du Nigéria au sud.
- L'épaisseur maximale des dépôts reconnue par forage atteint 1300 m à quelques km au nord-ouest de Filingué (PNUD/DCTD, 1990-1).
- Une continuité sédimentaire existe avec le bassin de Taoudenni à l'ouest par le détroit de Gao et avec le bassin du lac Tchad à l'est par le seuil du Damergou.
- La tectonique régionale, les mouvements épirogéniques et eustatiques ont progressivement entraîné une migration des dépôts du nord-est vers le sud-ouest (fig.5).
- L'histoire sédimentaire du bassin des Iullemeden s'étend du cambrien au quaternaire. Au début du paléozoïque les dépôts sont peu épais et localisés au sud du Hoggar et de l'Aïr. Du permien au crétacé inférieur une sédimentation continentale, détritique silicatée, d'une puissance de plusieurs centaines de mètres est à l'origine du continental intercalaire (fig.6). A partir du cénomaniens et jusqu'au paléocène supérieur plusieurs transgressions marines en provenance du nord puis de l'ouest vont se succéder (Greigert, 1966, repris par Abdoukarimou, 1988) ; ces incursions marines sont à l'origine d'une alternance de dépôts marno-calcaires franchement marins et grésos-argileux margino-littoraux (Boudouresque et al., 1982). Au nord-ouest et au sud le continental hamadien est stratigraphiquement l'équivalent en milieu fluviatile de ces formations marines. A l'oligocène une lacune de sédimentation semble précéder les dépôts du continental terminal.

Le continental terminal.

- Le terme "continental terminal" désigne des sédiments d'origine continentale, post-éocènes et anté-quaternaires (PICG-UNESCO, 1978, in PNUD/DCTD, 1990-1). Ainsi défini, le continental terminal couvre plus de 90 000 km² sur une épaisseur maximale de 450 m au forage de Dogondoutchi (Greigert et Bernert, 1979).
- Le mur du continental terminal est constitué à l'ouest par les altérites du socle du Liptako, au sud par les sables argileux du continental hamadien et à l'est par la série sidérolithique de l'éocène supérieur.

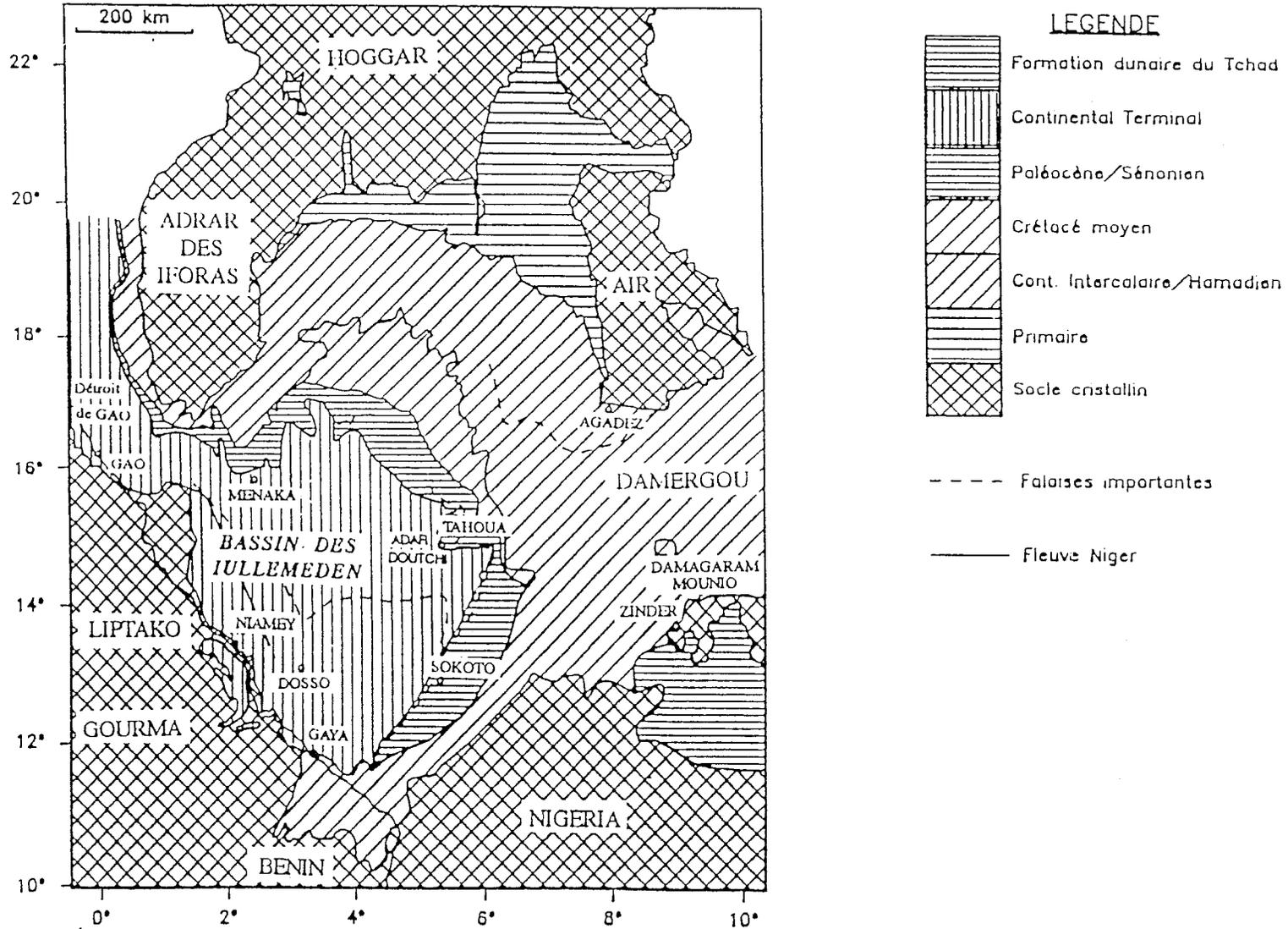


figure 5 : Carte géologique du bassin des Iullemeden
(d'après PNUD/DCTD, 1990-1)

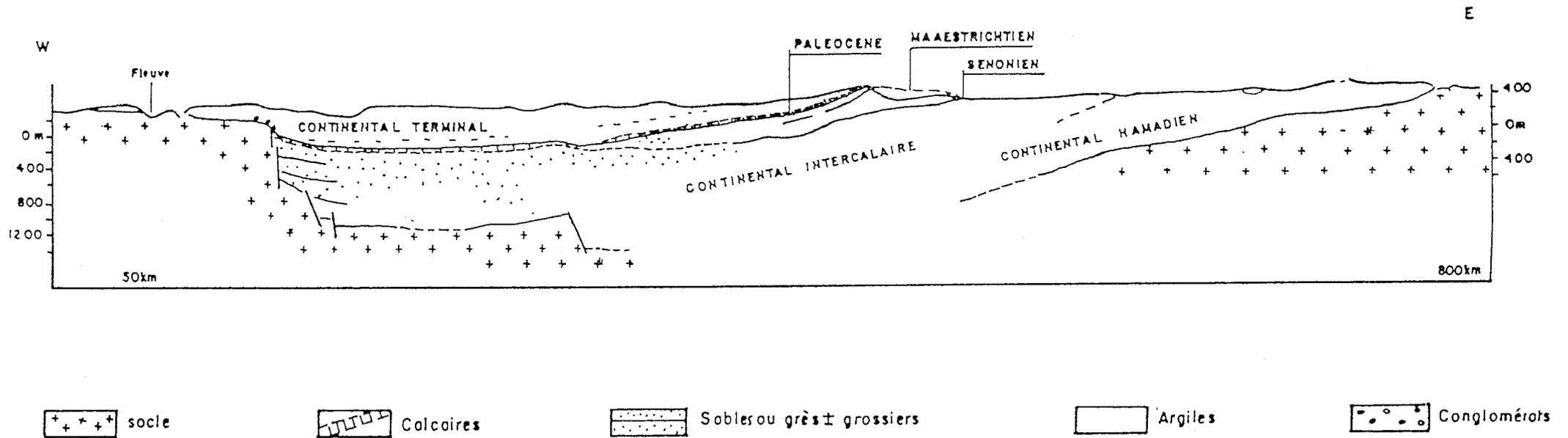


figure 6 : Coupe géologique schématique à travers le bassin des Iullemeden ;
la coupe passe par Zinder et Niamey (d'après Greigert, 1966)

- Les formations, inclinées de 1 à 4 ‰, forment un synclinal dont l'axe nord-ouest/sud-est passe par Filingué. Une faille importante de direction nord nord-ouest/sud sud-ouest existerait à l'ouest du dallol Bosso (Boeckh, 1965). Cette faille reste hypothétique en l'absence de référence à sa mise en évidence initiale.

- On distingue classiquement (Greigert, 1966) 5 formations constitutives du continental terminal ; de bas en haut :

. la série sableuse inférieure, formée de sables et de grès.

. la série des argiles et des sables verdâtres, à niveaux de lignite.

. la formation à oolithes ferrugineuses, à matrice silto-argileuse.

. la formation argileuse et silteuse grise, qui passe par enrichissement progressif en sable à la formation supérieure.

. la formation sableuse et silteuse, localement recouverte de dépôts quaternaires alluviaux ou éoliens anté-holocènes.

- Stricto sensu, la série sableuse inférieure relève de l'éocène et ne fait donc pas partie du continental terminal (Boudouresque et al., 1982). Usuellement décrite à la base du continental terminal (Greigert et Bernert, 1979) cette formation aquifère en procède hydrogéologiquement.

CADRE HYDROGÉOLOGIQUE

Critique des données disponibles

.D'une manière générale les données hydrogéologiques disponibles sur le sud-ouest du Niger sont rares et souvent imprécises. Cet état de fait résulte d'une part des difficultés d'accès et d'investigation inhérentes au milieu sahélien, d'autre part de la complexité propre au milieu étudié –sédiments continentaux à brusques transitions latérales de faciès, événements hydrologiques à forte variabilité spatiale et temporelle–, mais aussi d'un manque de rigueur dans l'exploitation des données et la présentation de certains documents anciens.

.D'un point de vue topographique l'imprécision fréquente sur les altitudes, liée à la faible densité de points nivelés sur le sud-ouest du Niger, engendre de fortes incertitudes sur la morphologie et l'extension spatiale des aquifères. La précision des cartes hydrogéologiques basées sur des données anciennes reste illusoire, ces dernières n'ayant le plus souvent qu'une valeur indicative (PNUD/DCTD, par exemple). Pour les mêmes raisons les exutoires naturels des nappes –quand ils existent– sont difficiles à déterminer, les gradients hydrauliques des nappes du bassin des Iullemeden étant généralement très faibles.

.Des données aussi importantes que les paramètres hydrodynamiques des différentes nappes restent largement inconnues, très peu d'essais de pompage de longue durée ayant été effectués sur le sud-ouest du Niger.

.Enfin il faut signaler que la disparition ou la dispersion de certains documents originaux entraînent d'importantes lacunes d'information : le rapport de Boeckh (1965) sur la "contribution à l'étude hydrogéologique de la zone sédentaire de la république du Niger" est incomplet, le rapport de Greigert (1966) sur la "description des formations crétacées et tertiaires du bassin des Iullemeden (Afrique occidentale)" n'est plus disponible à Niamey.

Présentation hydrogéologique générale

.Le bassin des Iullemeden se définit hydrogéologiquement comme un système aquifère multicouche, avec plusieurs nappes captives en profondeur et une nappe libre en surface, séparées sur la majeure partie du bassin par plusieurs niveaux sédimentaires

imperméables. Sur les bordures du bassin les nappes peuvent être libres et en continuité hydraulique.

A - Les nappes captives du bassin des Iullemeden

Les nappes captives du bassin des Iullemeden, susceptibles d'alimenter par drainance ascendante la nappe libre du continental terminal 3 (CT3) sont ici présentées succinctement.

1 - La nappe du continental intercalaire/continental hamadien

Peu de données existent sur cette nappe, la plus profonde du bassin des Iullemeden. La nappe est captive sur la majeure partie du bassin, libre au nord-est et à l'extrême sud (cf fig.6). Des sédiments continentaux -grès argileux, sables moyens- constituent l'aquifère, épais de plusieurs centaines de mètres. Le mur est formé par le socle, le toit de la partie captive par les formations marneuses du paléocène. Plusieurs analyses isotopiques (citées dans PNUD/DCTD, 1991, mais non détaillées dans ce document) suggèrent le caractère fossile de la nappe. La nappe du continental intercalaire/continental hamadien ne serait présente qu'au nord-est du degré-carré de Niamey (PNUD/DCTD, 1991).

2 - La nappe des sables inférieurs (dite du CT1)

La nappe des sables inférieurs est captive sur la majeure partie du bassin, artésienne dans les dallols et certains koris (kori de Dantiandou, par exemple). La nappe devient libre vers le sud et sur les bordures orientales et occidentales du continental terminal. L'aquifère est constitué de sédiments sableux localement argileux, d'épaisseur variable, entre 10 et 70 mètres selon les lieux. Sur le degré-carré de Niamey des analyses minéralogiques ont mis en évidence des traces de carbonates dans la matrice sableuse de la nappe (Le Gal La Salle, 1994).

Les schistes papyracés du paléocène supérieur forment sur la majeure partie du bassin le mur de l'aquifère. En bordure sud-ouest le mur des sables inférieurs passe au socle du Liptako. La formation des "argiles à lignite et silts verdâtres" constitue le toit de l'aquifère.

A l'ouest du dallol Bosso les eaux de la nappe présentent des caractéristiques chimiques et isotopiques homogènes ; les valeurs obtenues sur le site de Wankama (cf fig.13) sont à ce titre représentatives des teneurs moyennes observées.

Les analyses chimiques et isotopiques effectuées (notamment ^{18}O , 2H , gaz nobles)

témoignent de conditions de recharge plus humides et/ou plus froides qu'actuellement. Les datations et interprétations relatives aux isotopes du carbone (^{13}C , ^{14}C) indiquant des temps de résidence élevés ($24\ 000 \pm 2\ 000$ ans pour les échantillons qui présentent les activités les plus fortes en ^{14}C) doivent cependant être relativisées par un possible "échange" avec les traces de carbonates présentes dans l'aquifère. (Des données et interprétations plus complètes sur la chimie des eaux du CT1 à l'ouest du dallol Bosso sont présentées dans la thèse de C. Le Gal La Salle, 1994).

Nota : L'alimentation par drainance ascendante des sables inférieurs par la nappe du continental intercalaire/continental hamadien via certaines failles majeures du bassin, parfois évoquée (PNUD/DCTD, 1990-1) semble difficile à prouver en l'absence de nivellement topographique précis.

3 - La nappe des sables moyens (dite du CT2)

La nappe des sables moyens, le plus souvent captive, est libre sur ses bordures nord et est. L'aquifère est formé de sables fins à moyens, très peu argileux. Un peu à l'ouest du dallol Bosso l'aquifère passe à une formation gréso-oolithique. L'épaisseur de l'aquifère est variable, généralement de quelques dizaines de mètres. La formation argileuse à lignite et silts verdâtres forme le mur de l'aquifère ; le toit est constitué par la base argileuse du CT3.

Les rares données chimiques disponibles indiquent un faciès et une minéralisation très proches de ceux des eaux de la nappe des sables inférieurs.

B - La nappe phréatique du continental terminal 3 (CT3)

Caractéristiques de l'aquifère

La nappe phréatique du CT3 est libre sur toute l'étendue du continental terminal ; la présence de lentilles argileuses peut cependant localement la mettre légèrement en charge. L'aquifère est généralement constitué de sables argileux, parfois silteux, passant progressivement en profondeur à des argiles silteuses. Les variations latérales de faciès sont fréquentes (Monfort, 1996). En rive droite du Niger la nappe phréatique est comprise dans une formation oolithique épaisse de quelques mètres surmontant les altérites du socle (Greigert et Bernert, 1979). Au nord-ouest du degré-carré de Niamey le socle constitue également le mur de l'aquifère.

L'épaisseur de la nappe phréatique est donc difficile à définir de manière absolue. La puissance des horizons sableux varie le plus souvent entre 20 et 50 mètres ; sur les bordures du bassin elle diminue à une dizaine de mètres. Quelques données relativement

fiables sur les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère sont disponibles suite à plusieurs essais de pompage :

- en rive droite du Niger, des valeurs moyennes de 1% pour la porosité et de $3.10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour la transmissivité ont été calculées dans la formation oolithique surmontant le socle (Bromley et al., 1995).
- sur le site de Banizoumbou (à quelques kilomètres au sud de Wankama) un essai de pompage d'environ 48 heures a permis d'évaluer une porosité de 20 % et une transmissivité de $2.10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Niveaux piézométriques de la nappe phréatique

Les niveaux piézométriques de la nappe phréatique du CT3 sont présentés sur le degré-carré de Niamey, où les données les plus fiables et les plus nombreuses sont réunies.

La carte piézométrique de la nappe phréatique sur le degré-carré de Niamey (septembre 1993) est présentée figure 7 ; cette carte subit peu de modifications saisonnières. La nappe phréatique est hydrauliquement déconnectée de part et d'autre du fleuve, ce dernier coulant directement sur le socle.

Sur la majeure partie du degré-carré aucune direction régionale d'écoulement ne peut être mise en évidence, les gradients hydrauliques étant très faibles ($0,4^\circ/\infty$ en moyenne) et les flux sans exutoires privilégiés (fig.8).

Au nord-ouest, en limite occidentale de l'aquifère (zone dite du "biseau sec") un gradient hydraulique ouest-est apparaît nettement ; dans ce secteur sont présents les niveaux piézométriques parmi les plus élevés du degré-carré (210 m).

Une dépression piézométrique apparemment fermée d'allongement nord-sud approximativement située sous le kori de Dantiandou existe au centre-nord du degré-carré (cf fig.7). Ce type de structure hydrogéologique se retrouve ailleurs au Sahel - Mali, Sénégal, Tchad...- et semble pouvoir être expliqué par un déficit infiltration/évaporation (Aranyossy et al., 1989 ; Ndiaye et al., 1993). En rive droite du Niger la nappe phréatique alimente visiblement le fleuve. Depuis 1987 une hausse piézométrique interannuelle est observée sur la majorité des puits du degré-carré de Niamey ; cette hausse généralement de quelques mètres entre 1987 et 1995 semble due d'une part à une succession d'années de pluviométrie normale survenant après plusieurs sécheresses prononcées, et d'autre part à des modifications importantes dans les pratiques culturales (défrichements, par exemple).

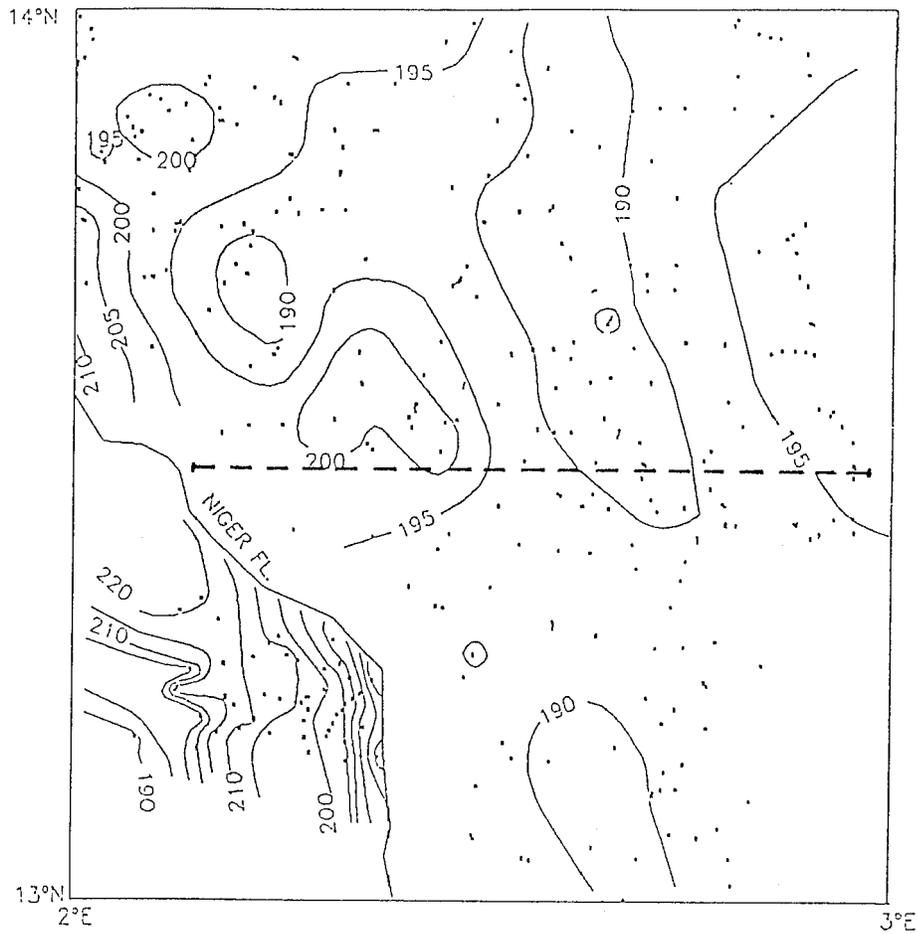


figure 7 : Carte piézométrique de la nappe phréatique du degré-carré de Niamey.
 Niveaux piézométriques de septembre 1993 (Leduc et al.,1996)
 le trait discontinu ouest-est situe la coupe ci-dessous

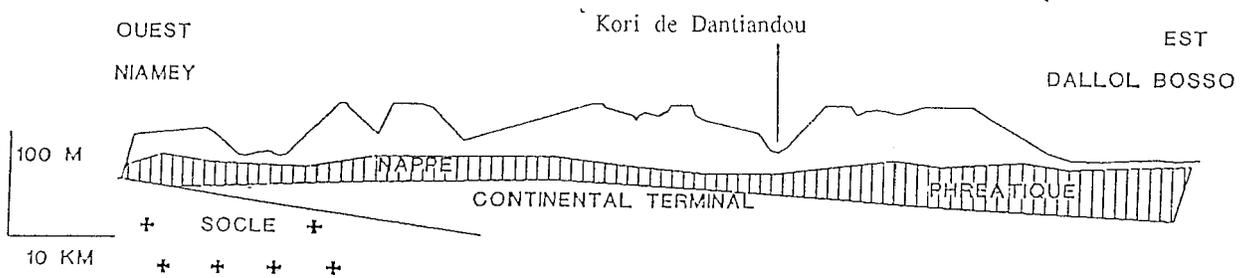


figure 8 : Coupe schématique ouest-est de la nappe phréatique du continental terminal à la hauteur de Niamey
 (d'après Leduc et Taupin, en préparation)

Caractéristiques chimiques et isotopiques de la nappe

Comme précédemment et pour les mêmes raisons les caractères chimiques et isotopiques ainsi que la recharge de la nappe phréatique du CT3 sont présentés sur le degré-carré de Niamey.

La température, peu discriminante de l'origine des eaux est rarement mesurée. Quelques valeurs indicatives sur le site de Wankama sont présentées figure 13.

La conductivité électrique, généralement faible, présente une valeur médiane de $130 \mu\text{s. cm}^{-1}$ qui indique par conséquent une faible minéralisation. Certaines zones présentent cependant des conductivités plus élevées :

-Le biseau sec au nord-ouest où le rapprochement et donc le mélange des nappes différemment minéralisées du continental terminal sont favorisés.

-Le dallol Bosso où l'influence de l'évaporation est plus forte qu'ailleurs compte-tenu de la faible profondeur de la nappe (moins de 10 mètres dans le Boboye).

Le pH, l'alcalinité et le faciès chimique des eaux sont assez homogènes ; les valeurs présentées sur le site de Wankama sont à cet égard assez représentatives (cf fig.13).

La signature isotopique des eaux de la nappe phréatique confirme le renouvellement actuel de la nappe ; les teneurs en ^{18}O et 2H (de -2 à $-5,4\text{‰}$ pour ^{18}O) sont conformes aux valeurs correspondantes des pluies supposées recharger l'aquifère (moyennes pondérées en ^{18}O de -4‰ à -6‰ pour juillet-août) ayant subi une légère évaporation (Leduc et Taupin., en préparation). Dans le dallol Bosso des teneurs plus enrichies en ^{18}O et 2H confirment le caractère évaporé des eaux de la nappe. Les teneurs en 3H , très variables selon les lieux (de 0,8 à 20 UT) témoignent cependant d'un renouvellement récent (Leduc et al., sous presse).

Estimation de la recharge

La recharge de la nappe phréatique du continental terminal sur le degré-carré de Niamey s'effectue principalement à travers les bordures perméables des mares endoréiques temporaires, qui concentrent l'eau de pluie ruisselée (Desconnets, 1994) ; l'intensité des pluies et donc du ruissellement constituent donc des indices plus fiables de l'importance de la recharge que la simple lame d'eau précipitée annuelle. La recharge directe de la nappe à travers les versants ruisselants semble très faible (Galle, communication personnelle). Bromley et al. (1995) ont cependant calculé une recharge de 17 mm.an^{-1} sous les plateaux latéritiques de la rive droite du Niger par interprétation d'un profil de chlorures, dans une région il est vrai légèrement plus humide que la zone des mares étudiées.

Un modèle simple utilisant une chronique reconstituée des teneurs de la pluie à Niamey depuis 40 ans a permis d'estimer à partir des teneurs en 3H mesurées dans la nappe un taux de renouvellement de 22 mm.an^{-1} (Leduc et al., sous presse). Précédemment

une approche hydrodynamique basée sur le bilan des mares avait fourni un chiffre plus élevé de 50 mm.an^{-1} (Desconnets, 1994). Ces résultats, bien que concordants et du même ordre de grandeur sont cependant largement imprécis (estimations variant du simple au double); une étude utilisant plusieurs approches conceptuelles de la recharge sur l'ensemble du degré-carré de Niamey permettrait probablement de préciser utilement ces valeurs et d'affiner encore notre connaissance des processus du renouvellement de la nappe phréatique.

PRÉSENTATION DU SITE DE WANKAMA

Critique des données disponibles

Le même type de remarques que précédemment (cf cadre hydrogéologique) peut être effectué à propos de la qualité des données disponibles sur le site de Wankama.

Ainsi il a été nécessaire de reconstituer la carte topographique de la mare ouest de Wankama par le croisement de deux levés topographiques, les cartes disponibles étant à la fois contradictoires dans l'orientation, l'altitude et le tracé des courbes de niveau (fig.11).

La description des coupes de forage à travers le continental terminal, du fait de la multiplicité des descripteurs est parfois sujette à caution ; une même formation peut parfois être définie de deux manières assez différentes, ou manifestement erronée (Monfort, 1996). En conséquence la description de la coupe de forage de Wankama doit davantage être considérée comme une indication que comme une base solide, et ce d'autant plus que l'origine exacte de cette coupe (in Le Gal La Salle, 1994) reste inconnue (fig.12).

Si l'enregistrement en continu des hauteurs d'eau dans la mare ouest semble fiable sur les trois années considérées (1993, 1994, 1995) ce n'est pas toujours le cas des enregistrements piézométriques : en 1993, première année de mesure, la méconnaissance de l'amplitude réelle de fluctuation du niveau piézométrique de la nappe phréatique a entraîné plusieurs interruptions de l'enregistrement. En 1994 suite à un violent orage début juillet, les enregistreurs en continu n'ont pas fonctionné. En 1995 l'enregistrement en continu sur le piézomètre le plus éloigné de la mare (P3) semble marquer pour les niveaux maxima de très brusques oscillations, difficiles à expliquer (annexe 2C). L'existence de dérives propres aux enregistreurs a, de plus, nécessité pour les trois années des corrections avant toute exploitation des données.

Situation géographique

Le village de Wankama se situe en bordure du kori de Dantiandou, affluent fossile de rive droite du dallol Bosso (cf fig.1 et 9). Le village se situe également à proximité de la route nationale 25 Niamey-Filingué (fig.10). L'altitude est légèrement supérieure à 200 m et le relief, comme sur l'ensemble du degré-carré, peu accentué (fig.11).

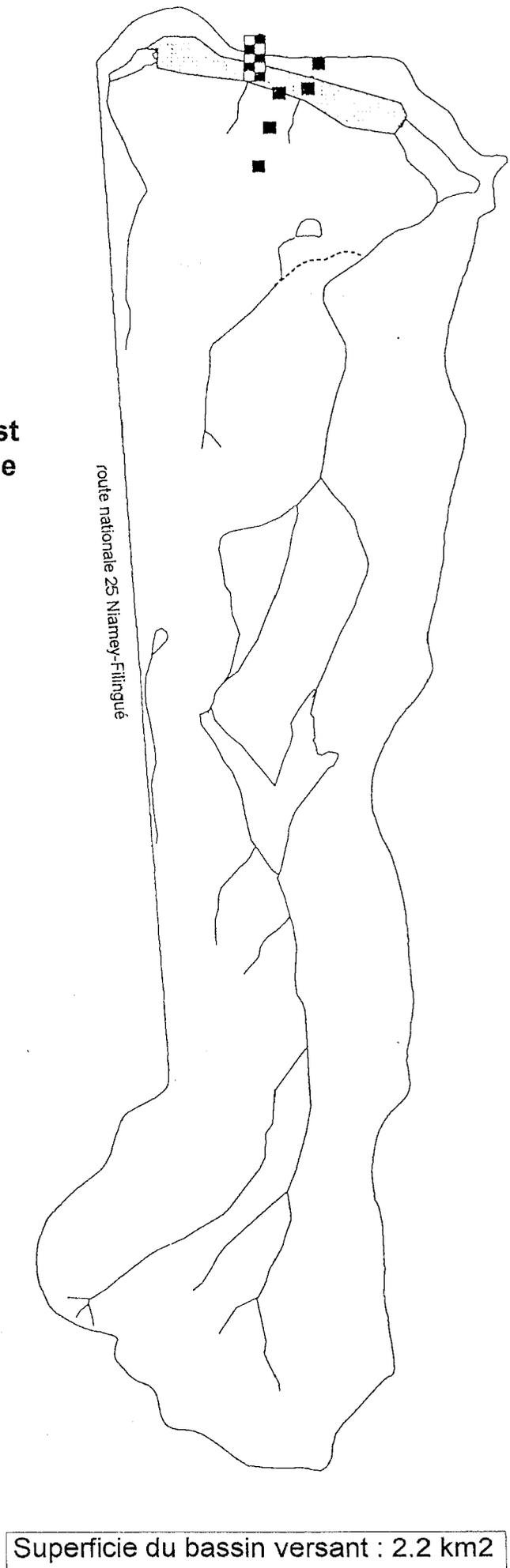


Figure 9: Photographie aérienne numérisée du site de Wankama (from Nasa, 1992)

figure 10 : Le bassin versant de la mare ouest de Wankama ; dispositif de mesure autour de la mare (D'après Desconnets, 1994).

- limite du bassin versant
- drains
- - - drain fonctionnant temporairement
- ☞ zone d'épandage des eaux d'écoulement
- ☞ plan d'eau
- échelle et sonde limnigraphique
- tube pour suivi neutronique et piézométrique

échelle ~1/14000



Superficie du bassin versant : 2.2 km²

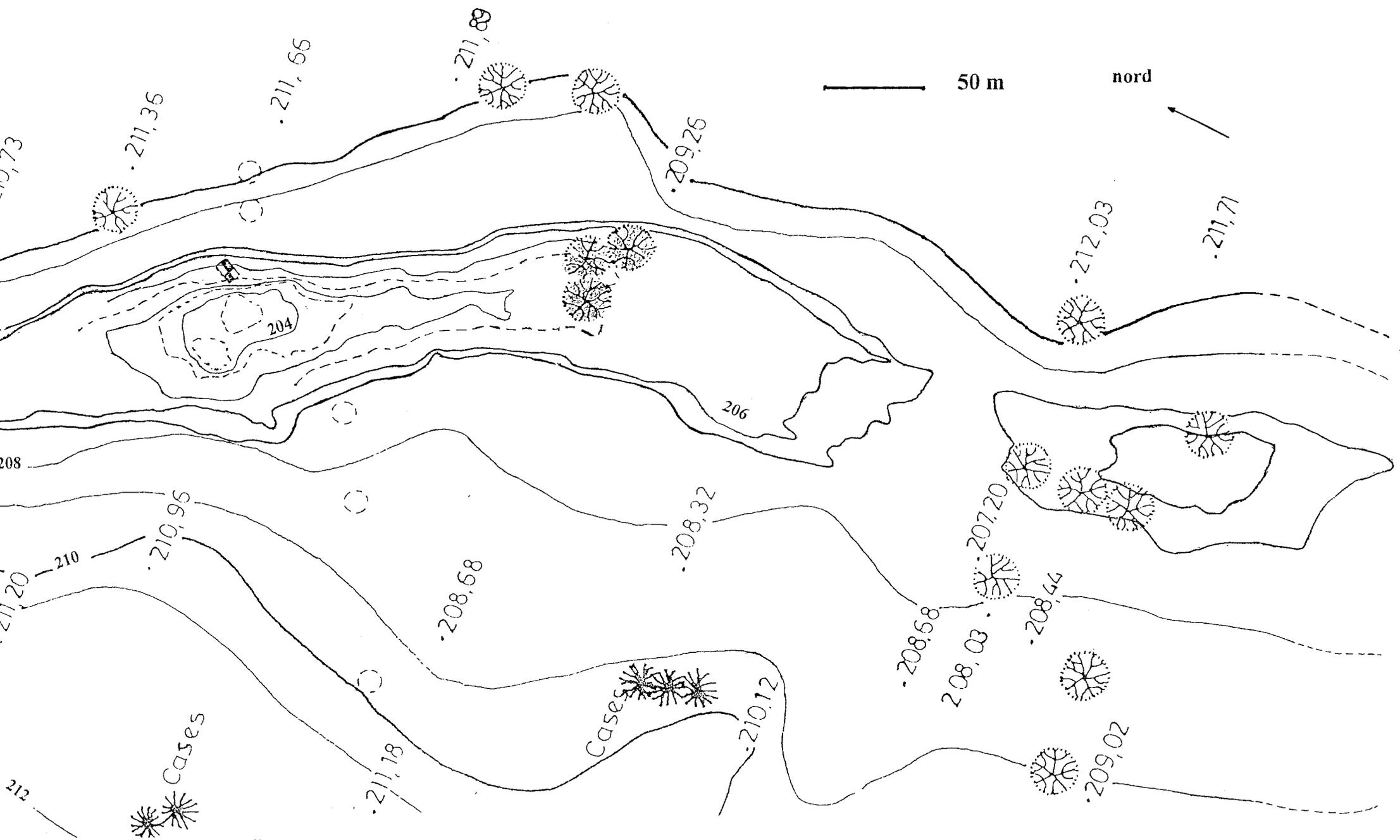


figure 11: carte topographique reconstituée de la mare ouest de Wankama.

D'après les levés topographiques au 1/500 (janvier 92) et au 1/5000 (juin 93) de la mare et du bassin versant de la mare de Wankama effectués par la direction de la topographie nigérienne.

Contexte hydrologique de surface

Deux mares de bas-fond se succèdent dans l'axe du kori de Dantiandou sur le site de Wankama.

.La mare étudiée, dite mare ouest, est une mare temporaire endoréique alimentée par les précipitations et le ruissellement. La superficie de son bassin versant, difficile à estimer du fait de l'importance du micro-relief, serait proche de 2,2 km². Son fonctionnement hydrodynamique est conforme à celui de la majorité des mares temporaires du degré-carré, à savoir une infiltration préférentielle à travers les berges non colmatées suite à chaque hausse du niveau d'eau et un épuisement progressif au cours de la saison sèche par augmentation de l'évaporation et circonscription de l'eau à la partie centrale colmatée de la mare. Les volumes infiltrés annuellement à partir de la mare ouest sont proches de 100 000 m³ pour les trois années considérées.

. La mare nord de Wankama se situe immédiatement à l'amont de la mare ouest dans l'ancien lit du kori de Dantiandou (fig.9). Cette mare artificiellement pérenne est alimentée majoritairement par l'eau de la nappe artésienne du CT1 captée par forage sur son versant ouest. Les volumes (estimés) déversés du forage vers la mare nord sont de l'ordre de 100 000 m³ an⁻¹.

. L'observation comparée de la topographie et des niveaux limnimétriques maximum atteints laisse supposer un débordement de la mare nord vers la mare ouest lors des crues les plus fortes.

Contexte hydrogéologique

Plusieurs nappes sont susceptibles d'être captées à Wankama.

- La nappe phréatique se situe dans l'aquifère des sables fins argileux du CT3, qui passe progressivement en profondeur à des argiles sableuses. Le mur de l'aquifère est donc lithologiquement difficile à définir ; l'épaisseur de la nappe en fin de saison sèche sur le site de Wankama a été estimée, d'après la coupe, à 20 m en 1993. La hausse piézométrique interannuelle observée depuis 1987 sur la nappe phréatique atteint 2,60 m au puits sud de Wankama en juin 1995.

- A Wankama la nappe captive du CT2 est probablement portée par la formation des oolithes, très fréquemment aquifères sur le degré-carré de Niamey (fig.12).

- La nappe du CT1 est artésienne à Wankama. L'aquifère, d'une puissance de 18 mètres, est constitué d'un gravier blanc de quelques millimètres de diamètre.

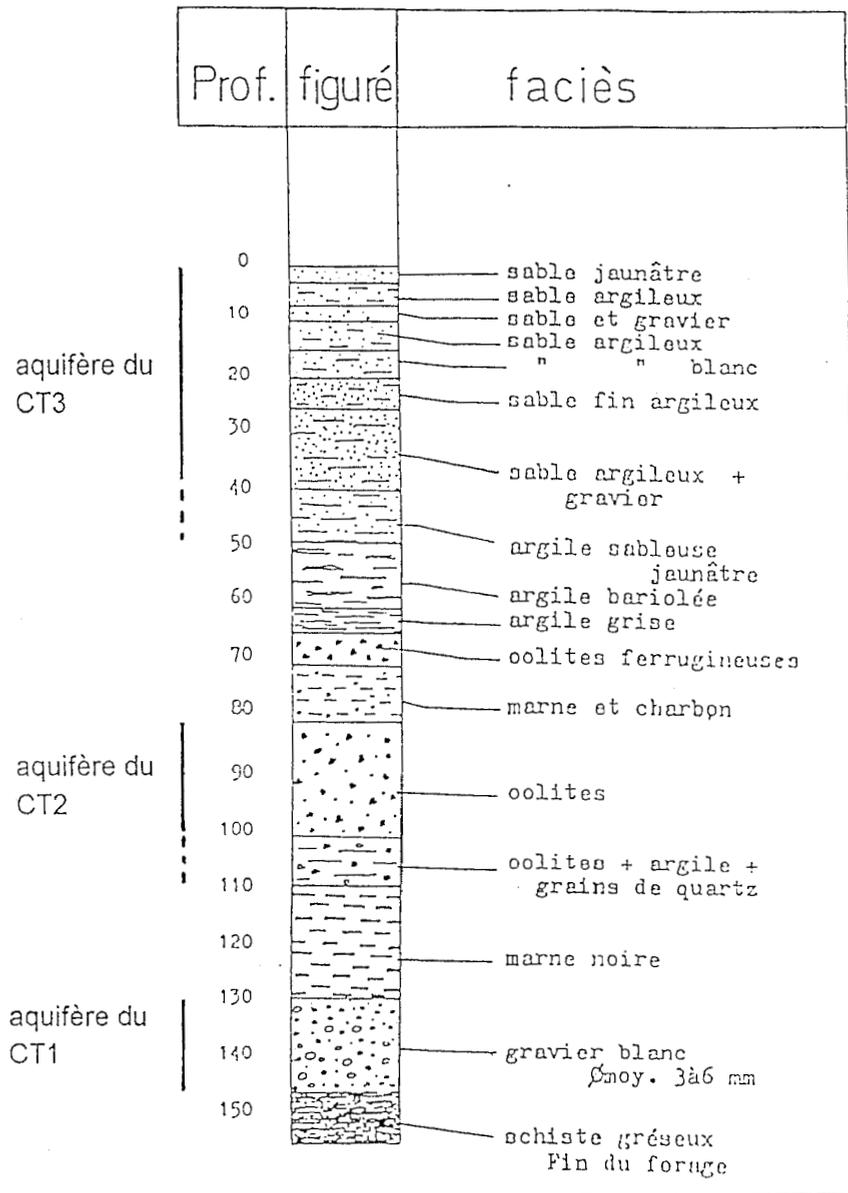


FIGURE 12 : LOG STRATIGRAPHIQUE DU FORAGE DE WANKAMA

(in Le Gal La Salle, 1994)

- Un doute subsiste sur l'existence de la nappe captive du continental intercalaire/hamadien à l'aplomb de Wankama. La description de la coupe de forage indique un "schiste gréseux" à 145 m de profondeur, ce qui laisserait supposer que le socle a été atteint. Cependant le mur du continental terminal sur la moitié nord-est du Niger occidental est parfois désigné sous l'expression "schistes papyracés surmontant les formations carbonatées du paléocène supérieur" (Greigert et Pougnet, 1967, in Le Gal La Salle, 1994). Selon les cartes hydrogéologiques -à la fiabilité toute relative- publiées (PNUD/DCTD 1991) la limite occidentale de l'aquifère du continental intercalaire/Hamadien serait proche de Wankama.

Données chimiques et isotopiques

Plusieurs analyses chimiques et isotopiques ont été effectuées à partir d'échantillons prélevés sur le site de Wankama (fig.13).

La mare ouest

Du début à la fin de la saison sèche le faciès chimique de la mare ouest évolue d'un pôle bicarbonaté alcalin à chloruré alcalin, tandis que le pH reste toujours proche de la neutralité (Desconnets, 1994). L'effet de l'évaporation dans la mare se marque par une augmentation de la conductivité électrique et de la teneur en 18O ; du 12/9/91 au 14/11/91 alors que le volume diminue de 1200 à 100 m³ la conductivité passe de 105 à 438 $\mu\text{s.cm}^{-1}$ et la teneur en 18O de - 4,22 à + 6,76‰. Plus avant dans la saison sèche la conductivité chute légèrement tandis que la teneur en 18O continue d'augmenter (290 $\mu\text{s.cm}^{-1}$, et 15,62‰ en 18O le 16/1/92, par exemple) ce qui peut logiquement s'interpréter comme le témoignage de néoformations dans la mare (Taupin, communication personnelle).

La mare nord

Le cachet chimique et isotopique de la mare nord reflète en grande partie celui de la nappe artésienne du CT1 ; en saison sèche s'y ajoute probablement l'effet de l'évaporation et en saison des pluies celui de l'apport des précipitations et du ruissellement. Les éventuels débordements de la mare nord sont susceptibles de modifier temporairement, mais de manière importante, la chimie des eaux de la mare ouest.

La nappe captive du CT1

Les principaux caractères chimiques et isotopiques des eaux du CT1 au forage de Wankama sont présentés figure 13.

figure 13 : Données chimiques et isotopiques
sur le site de Wankama

	type	prof. en m.	temp. °C	pH U.pH	T.A.C. meq.L-1	cond.él. µs.cm-1	faciès chimique	delta18O ‰	delta 2H ‰	teneur en 3H U.T.	delta13 C ‰	A.14C p.c.m.	err. 14C
mare ouest *	mare temporaire		26.5	7.0	9.8	168	bicarbonaté alcalin à chloruré alcalin	0.7	-5.9				
puits sud **	n. libre du CT3	16.8	27.0	6.0		519		-3.9					
puits nord **	n. libre du CT3	20.4	30.0	5.7		345	chloruré sodique	-5.2			-16.1	100.5	0.66
piézomètre 1 **	n. libre du CT3	19.3		5.8	1.0	145		-4.3		6.8	-18.6	61.2	0.70
piézomètre 2 **	n. libre du CT3	20.3	29.9	5.6		106		-5.2			-15.8	70.0	0.60
piézomètre 3 **	n. libre du CT3	21.9	30.5	5.3	0.9	76		-5.5			-17.5	44.6	0.40
forage artésien***	n. artés. du CT1	134.0	32.5	7.4	5.0	1230	chloruré sodique	-7.4	-57.8		-7.3	2.4	0.20

* : prélèvements juillet 91-janvier 92 (médianes)
d'après Desconnets, 1994

** : prélèvements janvier 95
C. Le Gal La Salle, inédit

*** : prélèvements février et/ou juin 92
d'après C. Le Gal La Salle, 1994

les teneurs isotopiques sont données à 0.2‰ pour 18O, 1‰ pour 2H et 0.15‰ pour 13C (laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique de Paris-sud)

La très faible activité en ^{14}C ($2,4 \% \pm 0,2$) indique, dans l'hypothèse la plus probable d'une simple décroissance radioactive, un temps de résidence dans l'aquifère supérieur à 24000 ans. La conductivité électrique relativement élevée ($1230 \mu\text{s}.\text{cm}^{-1}$) semble confirmer cette hypothèse. Dans cette optique, les teneurs en ^{18}O et 2H mesurées - respectivement $-7,4$ et $-57,8\text{‰}$ - témoigneraient d'une période de recharge plus humide et/ou plus froide qu'actuellement.

La nappe phréatique

Des échantillons ont été prélevés en plusieurs points de la nappe phréatique sur la site de Wankama ; leurs caractères chimiques et isotopiques apparaissent plutôt conformes à ceux de la nappe sur l'ensemble du degré-carré de Niamey. Les conductivités électriques relativement élevées aux puits nord et sud (respectivement 345 et $519 \mu\text{s}.\text{cm}^{-1}$) signalent probablement une contamination des eaux par la mare nord ; cependant les processus de cette contamination y seraient différents : la conductivité électrique du puits nord est stable, tandis que celle du puits sud est très variable dans l'année, conséquence quasi-certaine de communications directes mare nord/puits sud à certaines périodes de la saison des pluies. Des valeurs anormalement basses en ^{14}C pour des eaux encore riches en ^3H aux piézomètres 1, 2, 3 (successivement $61,2 \% \pm 0,7$, $70 \% \pm 0,6$ et $44,6 \% \pm 0,4$, pour $6,8 \text{ UT}$ au P1 en janvier 1995) confirment l'influence au moins chimique et isotopique de la mare nord sur la nappe phréatique, et illustrent toute la complexité de la circulation des eaux sur le site.

Dispositifs de mesures

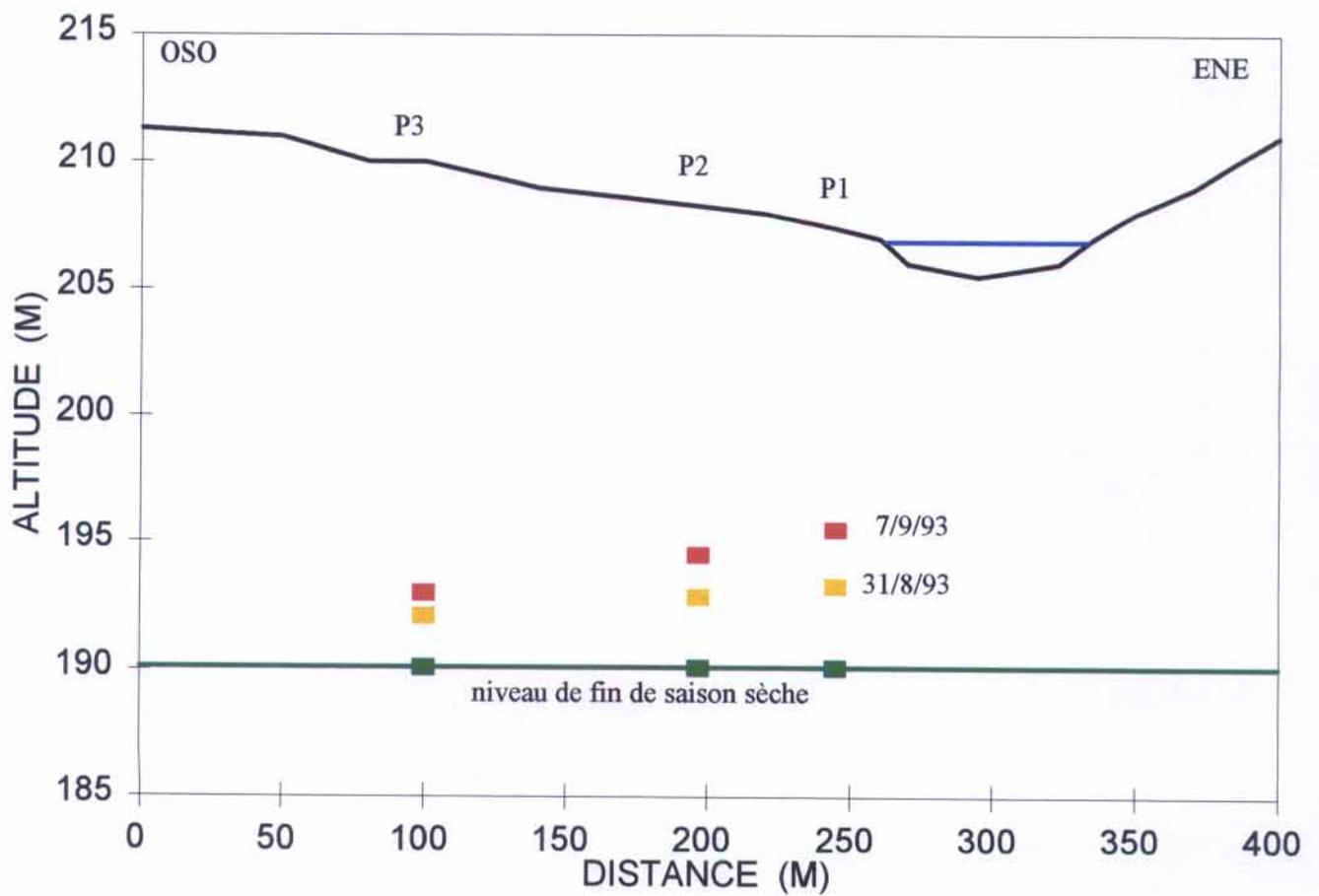
Plusieurs dispositifs de mesures ponctuelles et en continu ont été installés sur le site de Wankama.

Un enregistreur limnimétrique à mémoire statique ELSYDE de type "CHLOË" a été installé dès 1992 sur la mare ouest. La station d'enregistrement est constituée d'une sonde piézo-résistive mesurant la hauteur d'eau par différence entre la pression hydrostatique et la pression atmosphérique, et d'une centrale d'acquisition des données reliée à la sonde par un câble enterré. Les données sont stockées sur un support électronique amovible. En saison des pluies la période d'échantillonnage est de 15 mn, ramenée à 3 mn lorsque la variation est supérieure à 1 cm. En saison sèche le pas d'échantillonnage reste quoi qu'il arrive de 15 mn pour éviter les acquisitions parasites provoquées par l'impact du vent ou par la venue du bétail sur le faible volume d'eau résiduel. Une échelle limnimétrique pour les mesures ponctuelles complète le dispositif.

Les enregistrements des niveaux de la mare ouest sur les trois années considérées (1993, 1994, 1995) sont présentés en annexe 1.

figure 14 : Coupe schématique de la mare ouest de Wankama

variations piézométriques au cours de l'année 1993



Le dispositif de mesures piézométriques de la nappe phréatique est constitué depuis 1993 par 3 piézomètres notés P1, P2, P3 situés le long d'un transect perpendiculaire à l'axe principal de la mare, à respectivement 50, 100 et 200 mètres de son bord (fig.14). Les niveaux piézométriques sur P1 et P2 sont suivis en continu depuis 1993 par des enregistreurs CR2M de type "AGU", identiques dans leur principe à l'enregistreur limnimétrique décrit précédemment. En 1995 un enregistreur piézométrique ELSYDE de type "CHLOË" a été ajouté au P3. Sur les trois années considérées le pas d'échantillonnage choisi est de 15 mn pour un seuil de déclenchement de 1 cm. Le suivi piézométrique de la nappe est complété par des mesures ponctuelles sur les 3 piézomètres et sur les puits nord et sud du village. Les représentations graphiques des enregistrements de 1993 à 1995 sur P1, P2, P3 sont en annexe 2.

Un suivi humidimétrique des premiers mètres de la zone non saturée a également été effectué à proximité immédiate de la mare ouest de 1991 à 1994. Le dispositif comprend 4 tubes d'accès à la sonde à neutrons implantés jusqu'à 6 m de profondeur dans la zone colmatée (1 tube) , la zone perméable (1 tube) et le versant de la mare (2 tubes). Les deux premiers tubes, susceptibles d'être inondés, sont munis d'un dispositif à fermeture étanche. En période de crue le suivi est journalier sur une profondeur de 3,40 m. Les premiers résultats confirment le fonctionnement hydrogéologique décrit précédemment, c'est-à-dire une infiltration préférentielle à travers les bordures non colmatées de la mare et probablement une très faible contribution des versants à la recharge de la nappe. Le type de modélisation hydrogéologique choisi ne permettant pas de prendre en compte la zone non saturée, les résultats quantitatifs issus du suivi neutronique n'ont pu être utilisés.

2ème PARTIE

MODÉLISATION

MODÉLISATION EN 1 DIMENSION

(approche préliminaire)

A - Présentation du modèle

Le modèle utilisé est le modèle NAPRIV mis au point en 1988 par Leduc pour simuler les fluctuations de niveau associées nappe/rivière.

Le modèle considère un aquifère captif semi-infini limité par une zone rectiligne à potentiel imposé, sans possibilité d'échange avec l'extérieur. Une brusque variation de niveau de la limite à potentiel imposé se traduit par une réaction de la nappe amortie dans le temps et l'espace. Cette variation suit la loi suivante :

$$H(x,t) = H_0 \cdot \text{erfc} \left[x \cdot \sqrt{s/(4 \cdot T \cdot t)} \right]$$

avec :

H : variation de la nappe à x et t donnés

H₀ : variation du potentiel imposé

erfc : fonction erreur complémentaire

x : distance entre le point d'observation et la limite à potentiel imposé

s : coefficient d'emmagasinement

T : transmissivité

t : temps écoulé depuis la variation brusque

Sur la base de cette expression la modélisation permet le calcul de la diffusivité de l'aquifère.

Nota : lorsque la variation est non brusque il est possible d'utiliser la formule en décomposant le signal d'entrée en une succession de signaux élémentaires dont on évalue l'impact par convolution.

B - Application au site de Wankama

Sur le site de Wankama les débits infiltrés à partir de la mare ouest ne peuvent être utilisés en tant que "signaux-sources" en raison du transfert de l'eau à travers la zone non-saturée ; il est cependant possible de considérer la variation observée dans un piézomètre comme un signal-source et un piézomètre plus distant comme un point d'observation.

La principale limite à l'application de cette formule au site de Wankama est l'hypothèse de captivité de la nappe qui implique une transmissivité constante, condition peu réaliste si les amplitudes piézométriques observées sont trop fortes par rapport à l'épaisseur mouillée à l'aquifère.

1 - Modélisation des crues majeures de l'année 1993

L'approche de la modélisation en 1 dimension a été tentée à partir des crues piézométriques les plus marquantes de l'année 1993, dans le but d'estimer la diffusivité de l'aquifère sous la mare de Wankama (Leduc, 1993, in Desconnets, 1994). Les fluctuations piézométriques observées suite aux crues du 13 août, du 22 août et du 3 septembre 1993 sont modélisées en considérant P1 comme signal-source et P2 comme point de contrôle. L'absence de mesures enregistrées au P3 en 1993 ne permet pas de prendre en compte ce piézomètre dans la modélisation des crues.

Commentaire des résultats

D'une manière générale les résultats obtenus sont peu satisfaisants. Si le calage obtenu peut sembler acceptable sur chaque épisode considéré séparément, les diffusivités ajustées varient trop pour leur accorder une réelle signification : de $0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour la crue du 3 septembre 1993 à $0,79 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour celle du 13 août 1993 (fig. 18). Sauf à admettre l'existence d'une variation verticale de faciès modifiant radicalement le fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère au cours de la saison (hypothèse plausible, mais peu probable au vu de la coupe de forage disponible, cf fig. 12), ces résultats ne peuvent être interprétés.

Dans le but de s'affranchir des écarts de diffusivité obtenus sur des épisodes de (trop?) courte durée une modélisation sur l'ensemble des années 1993 et 1995 a été effectuée.

2 - Modélisation en 1 dimension sur les années 1993 et 1995

Les courbes modélisées obtenues sur les années 1993 et 1995, avec P1 comme signal-source et P2 comme point d'observation sont présentées aux figures 15 et 16. Les résultats ne sont pas directement comparables avec ceux obtenus précédemment sur une échelle de temps beaucoup plus courte (cf supra).

Commentaire des résultats

Sur les deux années considérées si les valeurs calées de la diffusivité varient du simple au double - de $0,03 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ en 1995 à $0,06 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ en 1993 - elles restent cependant du même ordre de grandeur, ce qui n'était pas le cas des diffusivités obtenues par modélisation des crues de l'année 1993.

En combinant l'ensemble des possibilités des signaux sources (P1 ou P2) et des points d'observation (P2 ou P3) sur les années 1993 et 1995 on obtient des résultats proches des chiffres énoncés ci-dessus (cf fig. 18).

Nota : Il faut signaler que toutes les modélisations obtenues avec P3 comme point d'observation présentent un ajustement courbe modélisée/courbe observée nettement moins bon que celles avec P2 comme piézomètre modélisé (fig. 17) ;

figure 15 : modélisation en 1D, 1993
P2 d'après P1

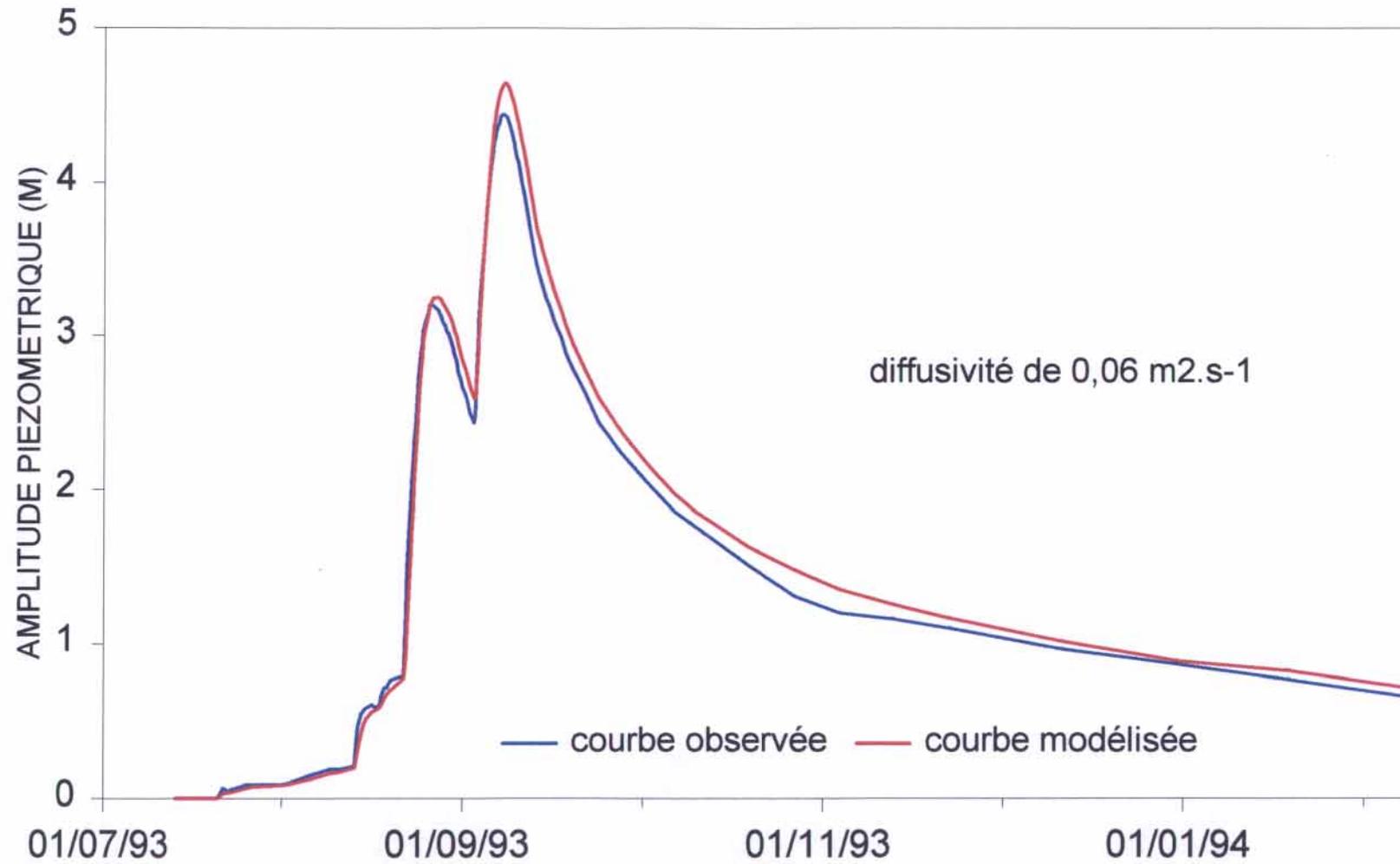


figure 16 : modélisation en 1D, 1995

P2 d'après P1

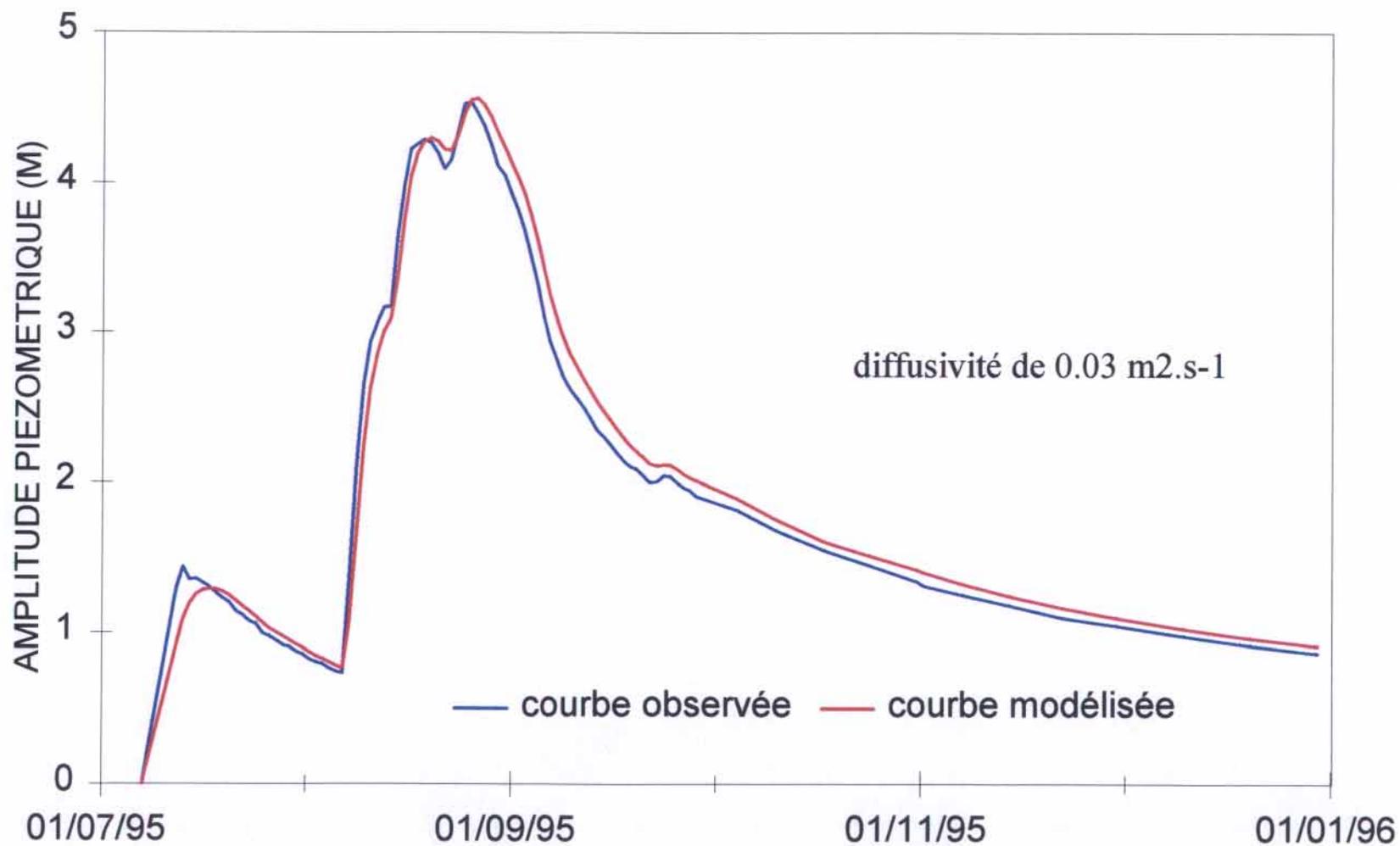


FIGURE 18 : VALEURS DE DIFFUSIVITE OBTENUES PAR MODELISATION 1D.

mare ouest de Wankama, années 1993 et 1995

période ou événement considéré	signal source	point d'observation	diffusivité obtenue (m ² .s ⁻¹)
crue du 13/8/1993	P1	P2	0.79
crue du 22/8/1993	P1	P2	0.09
crue du 03/9/1993	P1	P2	0.05
année 1993	P1	P2	0.06
année 1993	P1	P3	0.06
année 1993	P2	P3	0.05
année 1995	P1	P2	0.03
année 1995	P1	P3	0.05
année 1995	P2	P3	0.09
VALEUR MEDIANE			0.06

si une plus grande distance autorise une plus grande incertitude entre P1 et P3 (150 m) qu'entre P1 et P2 (50 m) cette explication est un peu moins acceptable lorsque les piézomètres 2 et 3 sont respectivement utilisés en tant que signal source et point d'observation (100 m).

L'hypothèse la plus plausible pouvant être avancée pour expliquer le mauvais calage obtenu est celle d'une variation latérale de faciès entre les piézomètres 2 et 3, la modélisation considérant une diffusivité unique entre le point signal source et le point d'observation. La nature continentale des dépôts et/ou la présence d'alluvions liées au kori de Dantiandou rendent vraisemblable cette hypothèse.

Conclusion

L'ensemble des résultats précédents suggère que les processus de diffusion dans l'aquifère de la nappe phréatique sont plus complexes que la schématisation considérée. L'hypothèse de variations latérales et verticales de faciès est évoquée. En première analyse, une valeur médiane de $0,06 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ de la diffusivité peut être proposée.

Il faut néanmoins rappeler que la modélisation adoptée suppose une transmissivité fixe (cf supra) ; si l'épaisseur mouillée de l'aquifère est proche de 20 m en fin de saison sèche comme la coupe stratigraphique du forage de Wankama et les mesures piézométriques le suggèrent, une amplitude de fluctuation du niveau de la nappe de plus de 4 mètres induit une variation de l'épaisseur mouillée de l'aquifère de plus de 20 % loin d'être négligeable. La schématisation adoptée est donc grossière et si la modélisation en 1 dimension des fluctuations de la nappe à Wankama mérite d'être poursuivie sur les années 1994 puis 1996, une modélisation de la recharge en 2 dimensions à partir des débits infiltrés sous la mare s'avère indispensable pour appréhender de manière plus adéquate le fonctionnement et les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère.

PRÉSENTATION DU PROGRAMME DE MODÉLISATION EN 2 DIMENSIONS WATASI 5

Le programme utilisé pour la modélisation de la recharge de la nappe phréatique est le programme WATASI 5 (WATER TABLE SIMULATION, 5e version, augmentée) mis au point par le CEMAGREF à Antony en 1982.

Comme tous les modèles de nappe, WATASI 5 est conceptuel, déterministe et basé sur l'application à l'écoulement de l'eau des lois fondamentales de la mécanique des fluides : loi de Darcy -pertes de charge proportionnelles aux débits- et hypothèse de Dupuit- écoulements quasi-horizontaux.

Le modèle repose donc sur la représentation des écoulements souterrains au moyen de l'équation de la diffusivité :

$$\text{div} (\bar{k} \vec{g} \text{rad } h) = S_s \cdot \delta h / \delta t + q$$

avec les notations suivantes :

- div : divergent, scalaire.
- grad : gradient, vecteur.
- h : charge ou hauteur piézométrique.
- \bar{k} : tenseur de perméabilité (perméabilité au sens de Darcy).
- S_s : coefficient d'emmagasinement spécifique.
- q : débit par unité de volume prélevé (ou apporté s'il est négatif) dans le milieu poreux.

Le modèle numérique utilise la méthode des éléments finis et permet de représenter des écoulements monophasiques dans des aquifères superposés, chacune des nappes étant indifféremment libre ou captive. La connexion avec le réseau hydrographique est possible ; le régime de la nappe peut être permanent ou transitoire.

Le domaine spatial étudié est discrétisé en un certain nombre de mailles carrées (999 au maximum) de tailles variables. Le calcul, itératif avec surrelaxation par points, tient compte des paramètres hydrodynamiques (perméabilité, emmagasinement-porosité), des conditions internes et aux limites (flux ou potentiel imposé).

La fiabilité des calculs dépend de la valeur attribuée à la précision sur le bilan des flux (exprimés en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) : plus cette valeur est grande, plus le calcul est rapide et moins le résultat est précis.

WATASI 5 est donc un modèle unique, en deux dimensions multicouche, capable de traiter la plupart des situations pouvant exister simultanément dans une nappe. Plus facile d'emploi que des modèles hydrogéologiques plus courts mais plus spécialisés, il ne permet cependant pas de prendre en compte le transit de l'eau à travers la zone non-saturée (transit potentiellement influent sur les modalités de la recharge à Wankama : cf infra).

APPLICATION DE LA MODÉLISATION EN 2 DIMENSIONS AU SITE DE WANKAMA

La modélisation effectuée concerne les fluctuations de la nappe phréatique (régime transitoire).

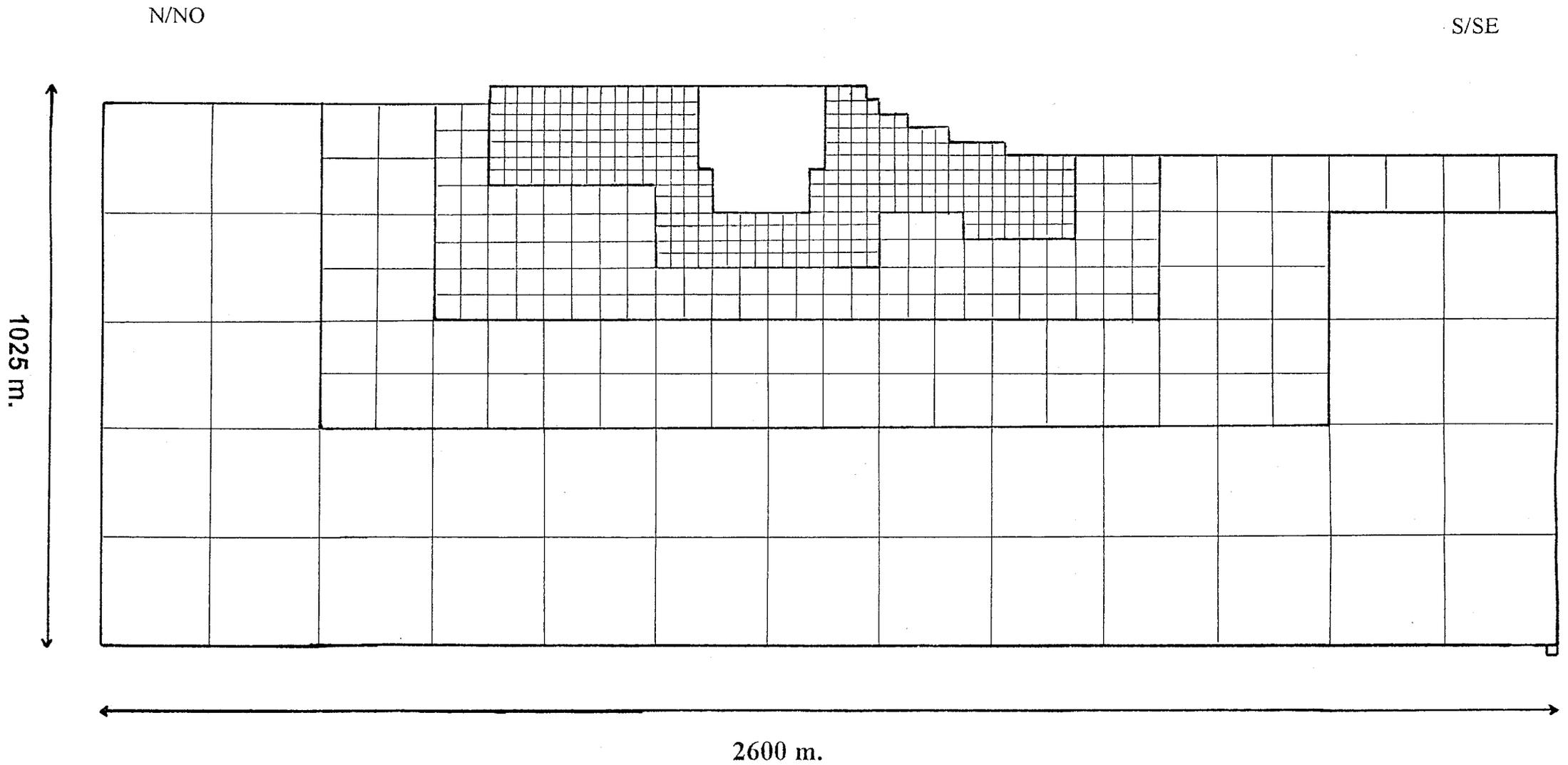
Maillage et paramètres de calcul.

On suppose que l'eau infiltrée se répartit de manière égale de part et d'autre de l'axe de la mare ; en conséquence seule la partie ouest de l'aquifère disposant de points de contrôle piézométrique (P1, P2, P3) a été modélisée. La géométrie de cette moitié d'aquifère correspond à un domaine discrétisé d'environ 1025 x 2600 m constitué de 802 mailles carrées de 12,5 à 200 m de côté (fig 19 et 20). La morphologie et l'aspect du maillage ont été définis de telle sorte que les plus petites mailles (12,5 x 12,5 m) soient situées à proximité immédiate de la mare (fig. 20) et que l'influence de l'infiltration soit la plus faible possible sur la piézométrie des mailles les plus éloignées : à 1 km de la mare ouest l'amplitude des fluctuations piézométriques est probablement très faible (cf fig. 14).

- Le niveau du mur de l'aquifère est arbitrairement pris égal à 0 m (les valeurs utilisées dans le programme de modélisation sont indépendantes des altitudes réelles).
- Par référence à la profondeur moyenne de la nappe à Wankama et à la coupe de forage disponible, un niveau piézométrique initial de + 20 m a été choisi pour la modélisation.
- La précision retenue suite à différents tests sur le calcul du bilan des flux est de $1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour chacune des mailles.
- Le pas de temps minimum choisi pour le calcul itératif est généralement de 0,02 jour (soit environ 30 minutes).
- Les conditions aux limites retenues sont dans un premier temps celles d'un potentiel imposé à 20 m sur les trois bordures de l'aquifère non adjacentes à la zone d'infiltration.

figure 19 : aspect du maillage utilisé pour la modélisation (802 mailles)

le maillage ne concerne que la moitié ouest de la mare



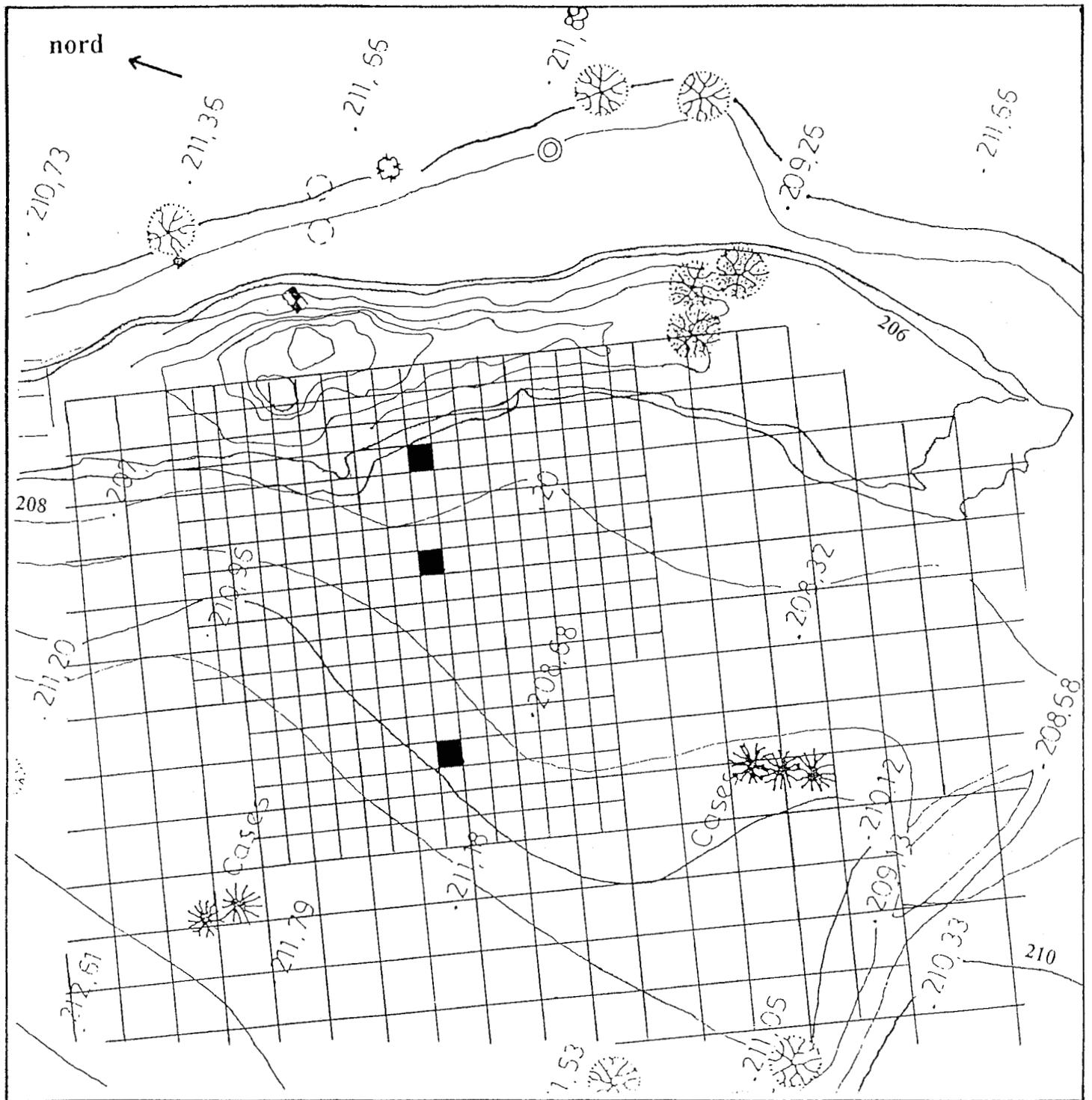


figure 20 : Aspect du maillage à proximité immédiate de la mare

Les mailles noircies correspondent aux piézomètres 1, 2, 3.

Calcul des débits d'infiltration

Les débits d'infiltration ont été calculés à partir des données ponctuelles et enregistrées des niveaux d'eau de la mare. Pour chaque année considérée, environ 150 points représentatifs ont été sélectionnés (annexe 1).

. La relation hauteur/volume établie (Desconnets, 1994) permet de lier chaque variation de hauteur d'eau constatée dans la mare à la variation de volume correspondante (annexe 3).

. La part de l'évaporation responsable de cette variation de volume est estimée par la valeur moyenne de l'évaporation du mois considéré. Finalement au cours d'un épisode de décrue et sur un intervalle de temps dt :

$$V_{INF} = \Delta V - V_{EVD} \quad \text{et} \quad V_{EVD} = V C_1 - V [C_1 - L_{ev}]$$
$$L_{ev} = L_{evm} \times dt$$

avec les notations suivantes :

- V_{INF} = Volume infiltré en m^3 .
- ΔV = Variation de volume en m^3 .
- V_{EVD} = Volume évaporé en m^3 .
- C_1 = Hauteur d'eau initiale de l'épisode considéré, en m.
- L_{ev} = Lamme d'eau évaporée, en m.
- L_{evm} = Lamme d'eau évaporée moyenne du mois considéré, en $m.s^{-1}$.
- dt = Intervalle de temps considéré, en s.

En période de crue -et faute d'autre moyen- on suppose que les volumes infiltrés sont directement déductibles de ceux calculés sur les épisodes de décrue ; l'incidence de cette approximation est en fait limitée, la durée des épisodes de montée des eaux étant généralement très courte (quelques heures au maximum).

. Les valeurs des débits d'infiltration sous la mare ont dû systématiquement être précisées lorsque les calculs étaient effectués sur des intervalles de temps manifestement trop courts (inférieurs à 3 heures) ou pour des variations de hauteur d'eau dans la mare trop faibles (inférieures à 3 cm).

CALAGE DES PARAMÈTRES

Hypothèses et remarques préliminaires

Les paramètres de la modélisation sont calés sur l'année 1993, assez complète du point de vue des enregistrements piézométriques et apparemment la plus fiable au niveau de la qualité des données.

L'ensemble de l'aquifère est considéré dans un premier temps homogène et isotrope.

La recharge directe de la nappe en dehors de la mare est supposée nulle.

Sur les trois années considérées on observe que les premières crues de la mare sont soit inefficaces en terme d'impact immédiatement visible soit n'entraînent pas de réaction instantanée de la nappe (cf annexe 1) ; en conséquence l'infiltration modélisée débute avec la première hausse piézométrique observée (fig.21).

Les hypothèses ci-dessus étant posées la modélisation se résume au calage des paramètres hydrodynamiques porosité (ϕ) et perméabilité (κ) de l'aquifère.

1 - 1ère série de tests (milieu isotrope, infiltration dès la 1ère hausse piézométrique observée).

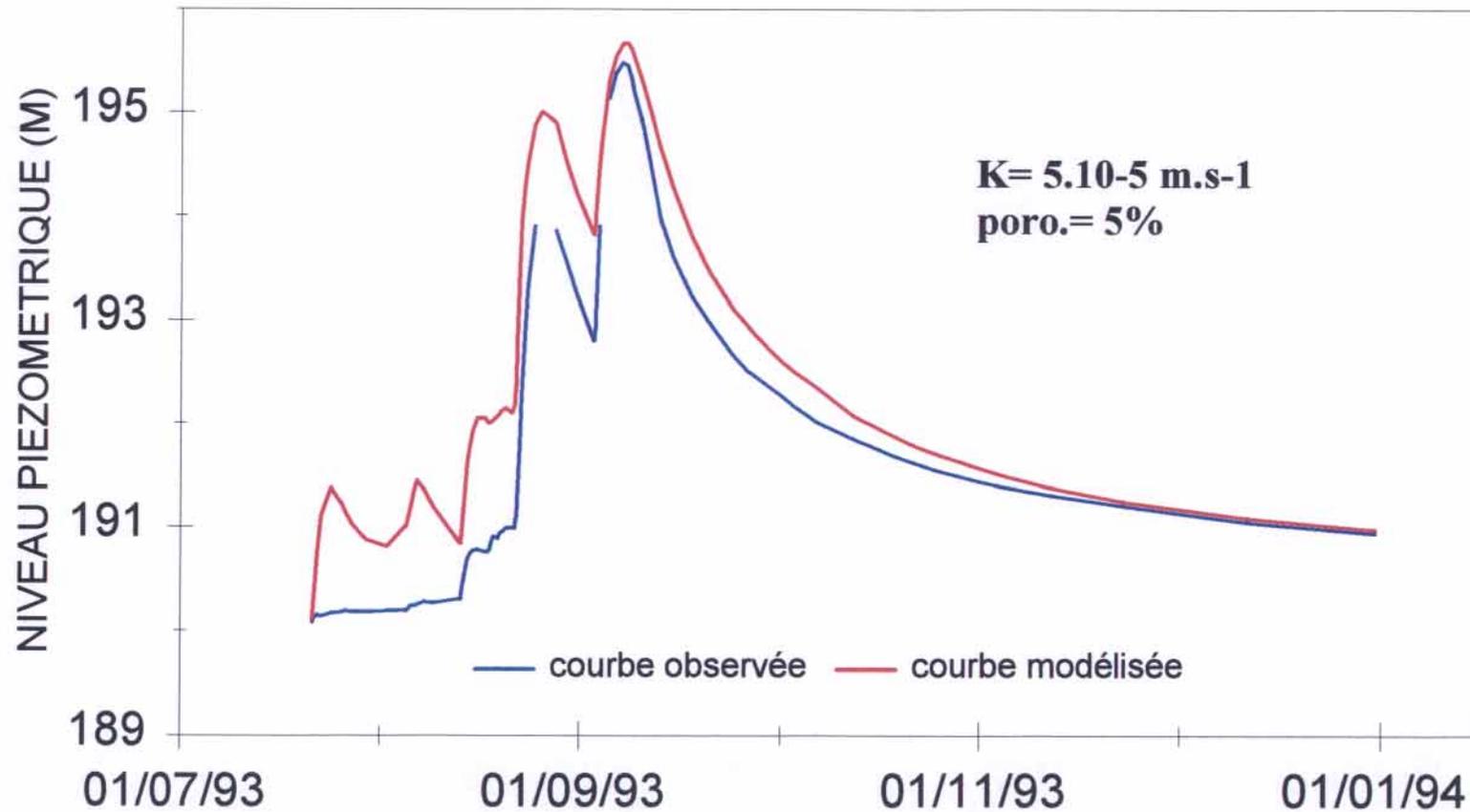
Une cinquantaine de tests ont été effectués dans le but de définir le couple ϕ/κ permettant de reconstituer le plus fidèlement possible l'évolution piézométrique observée à chaque piézomètre.

Les valeurs de la porosité ($\phi = 5\%$) et de la perméabilité ($\kappa = 5.10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$) obtenues sont compatibles avec le type de sédiments constituant l'aquifère (sables argileux, cf fig.12) ; la courbe modélisée à chacun des points de contrôle piézométrique est présentée aux figures 21A, 21B, 21C. Le calage est effectué "à vue" en tenant compte notamment de la forme de la décrue finale, de la différence d'amplitude entre les pics piézométriques et du niveau maximum atteint par la nappe.

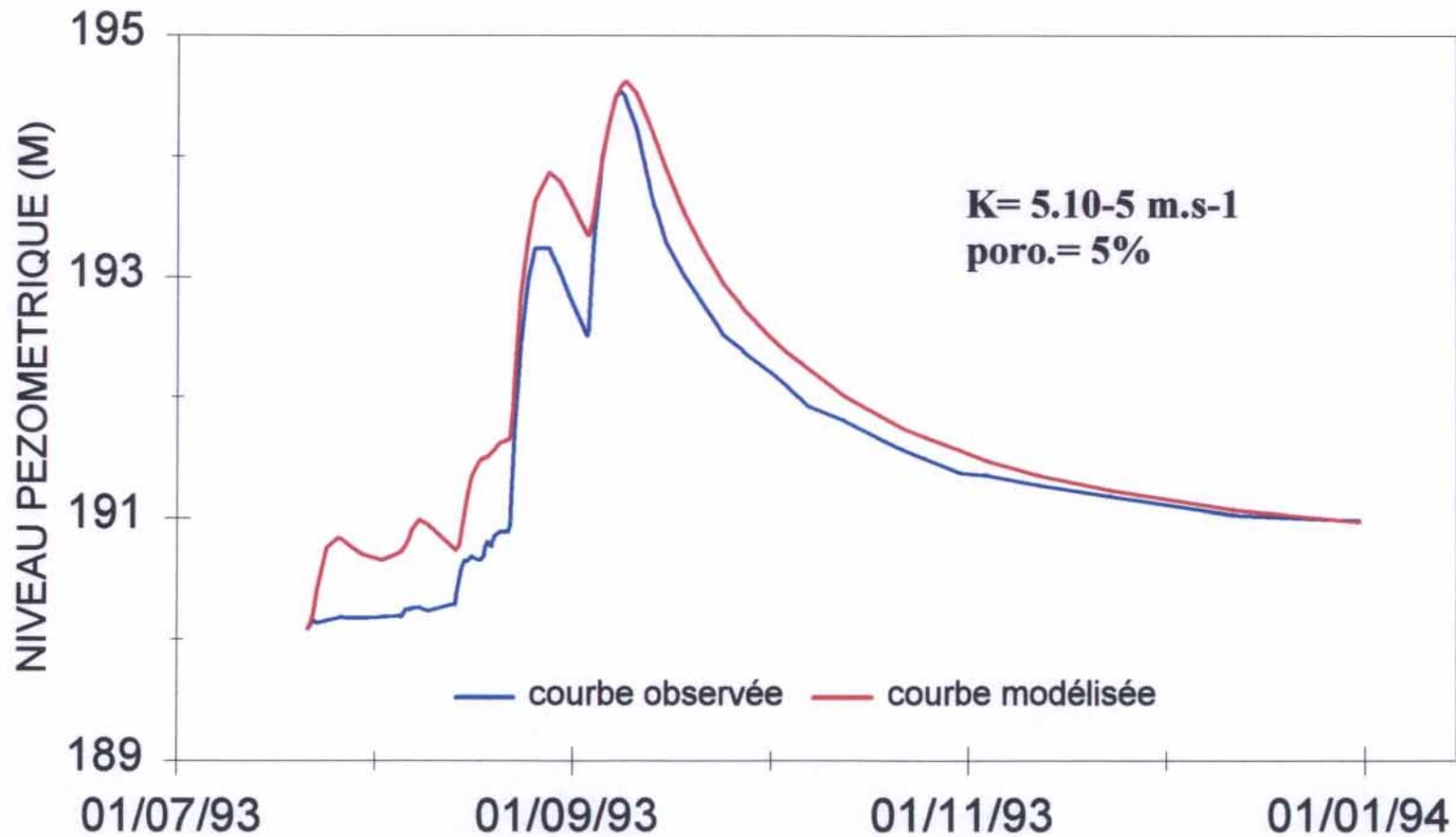
Commentaire des résultats

Compte tenu de l'incertitude sur les données utilisées l'adéquation courbe modélisée/courbe observée apparaît relativement bonne, à l'exception des niveaux de début d'année où l'évolution piézométrique n'est pas respectée. Le constat est valable pour les trois enregistrements piézométriques et se retrouve sur l'ensemble des tests effectués. Cette inadéquation n'est donc pas imputable au couple ϕ/κ testé mais plutôt à un fonctionnement hydrodynamique particulier, en discordance avec les hypothèses de la modélisation : dans cette optique la seule explication envisagée réside dans le stockage dans la zone non-saturée d'une partie de l'eau infiltrée, réservoir non pris en compte dans cette modélisation. Le fait que les toutes premières crues de la mare ne participent pas au mouvement immédiat de la nappe -alors que manifestation de l'eau s'infiltré pendant ces épisodes- tend à corroborer cette hypothèse.

**figure 21A : 1ère série de tests en milieu isotrope -P1 -
infiltration dès la 1ère hausse piézométrique observée**



**figure 21B : 1ère série de tests en milieu isotrope - P2 -
infiltration dès la 1ère hausse piézométrique observée**



Dans cette idée une deuxième série d'une trentaine de tests a été effectuée en différant le début de la modélisation au 13/8/1993, date de la première hausse piézométrique importante. Dans cette deuxième série de tests les épisodes de recharge responsables des premières montées de la nappe sont donc négligés.

2 - 2ème série de tests (infiltration différée).

L'objectif des tests effectués et les procédures de calage sont les mêmes que précédemment.

Le couple perméabilité/porosité ajusté prend pour valeurs $\phi = 4\%$ et $\kappa = 5.10^{-5} \text{m.s}^{-1}$. Les courbes modélisées obtenues aux 3 piézomètres sont présentées aux figures 22A, 22B et 22C.

Commentaire des résultats

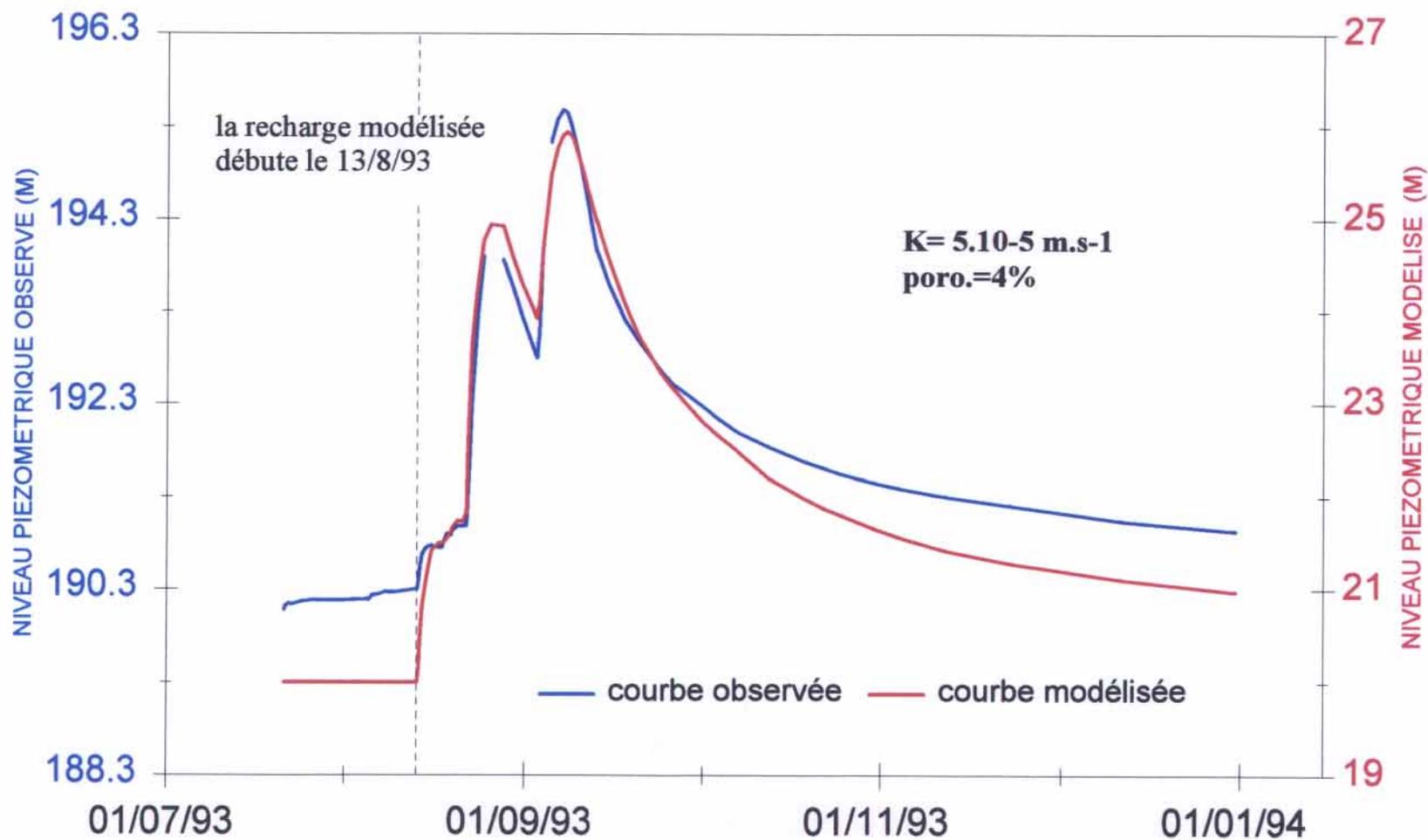
La comparaison courbe modélisée/courbe observée montre que si le calage apparaît nettement meilleur que celui obtenu lors de la 1ère série de tests sur le début de la saison, la décroissance piézométrique finale (début de saison sèche) est en revanche mal représentée, et ce sur les 3 points de contrôle piézométrique P1, P2, P3 comme sur l'ensemble des tests effectués.

Les paramètres hydrodynamiques successivement ajustés à l'issue de la 1ère et de la 2ème série de tests ne sont pas suffisamment différents (cf figures 21 et 22) pour invalider l'un ou l'autre des résultats mais se confirment plutôt mutuellement.

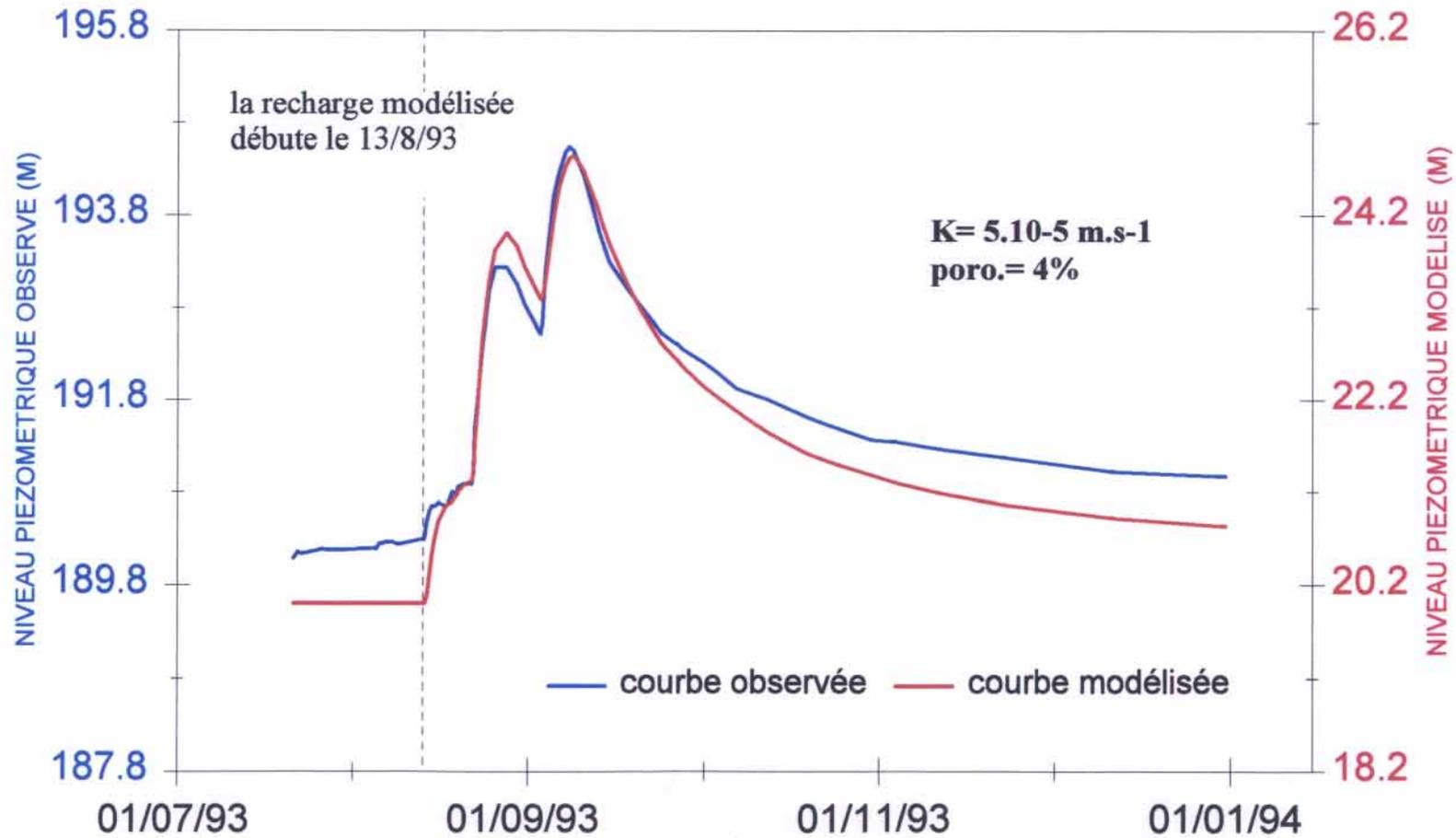
De mi-août à fin septembre, la bonne similitude observée entre l'évolution piézométrique modélisée et celle enregistrée paraît justifier la pertinence de cette 2ème approche à infiltration différée. Elle permet également de confirmer l'hypothèse avancée à l'issue de la 1ère série de tests, à savoir que le processus pris en compte dans la modélisation considérant une recharge directe de la nappe à partir de la mare n'est acceptable qu'après un certain laps de temps, nécessaire à la réalimentation par infiltration de la zone non saturée comprise entre la mare temporaire et la nappe phréatique. Ce prélèvement par la zone non saturée d'une partie de l'eau infiltrée se poursuivrait jusqu'à tard dans la saison, la hausse piézométrique modélisée suite à la crue du 13/8/93 étant encore systématiquement trop forte par rapport à celle observée (cf fig.22).

En début de saison sèche (octobre-décembre) la décroissance modélisée apparaît nettement plus rapide que celle observée, et ce là encore sur les 3 piézomètres P1, P2, P3 comme sur l'ensemble des tests effectués. Deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer cette trop brusque décrue piézométrique modélisée:

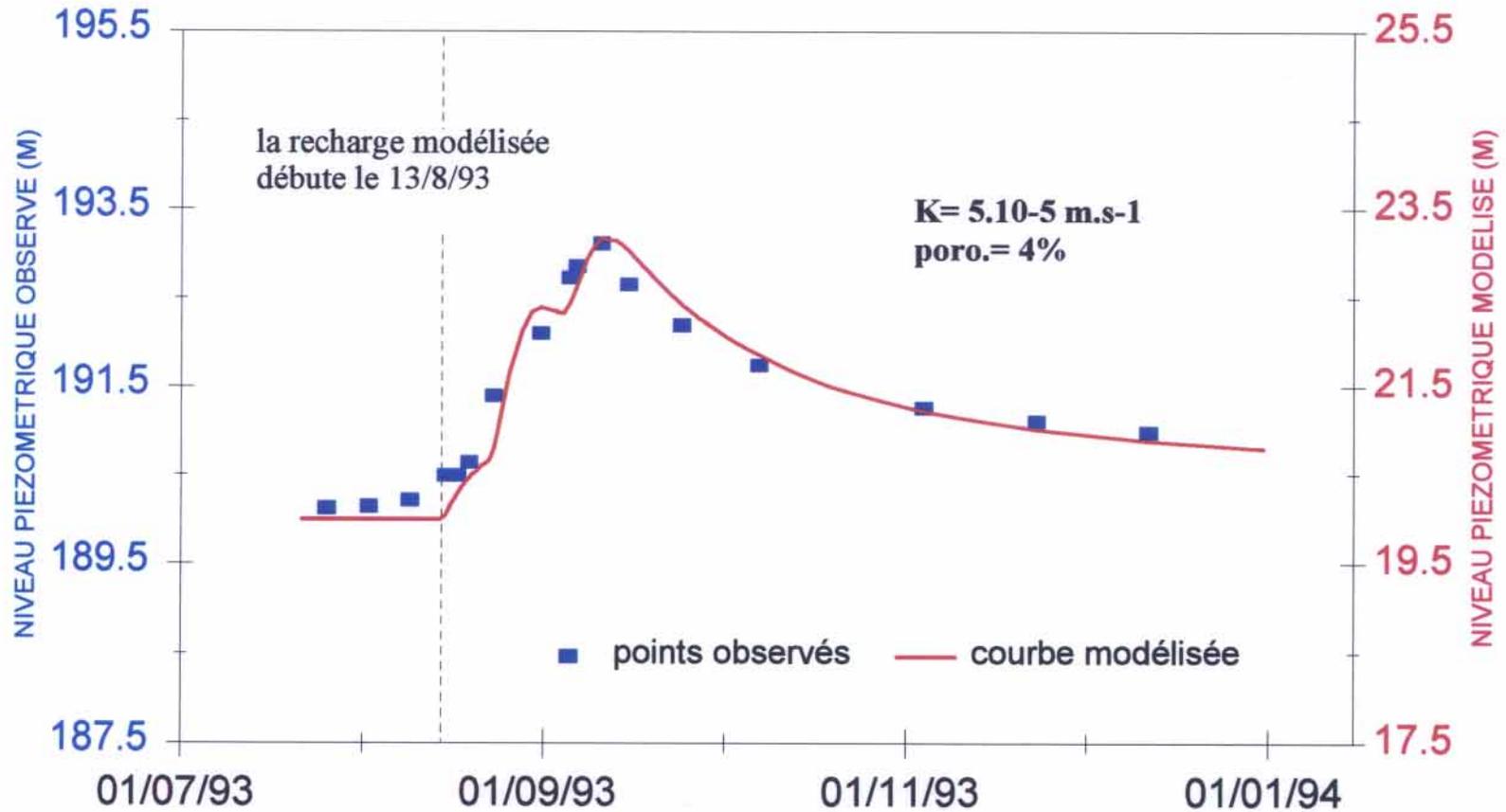
**figure 22A : 2ème série de tests en milieu isotrope -P1 -
infiltration différée au 13/8/93**



**figure 22B : 2ème série de tests en milieu isotrope - P2 -
infiltration différée au 13/8/93**



**figure 22C : 2ème série de tests en milieu isotrope -P3 -
infiltration différée au 13/8/93**



- Une libération progressive de l'eau emmagasinée en début d'hivernage dans la zone (non saturée ?) située sous la mare ; l'absence de suivi humidimétrique suffisamment complet de la zone non saturée sous la mare de Wankama (cf "présentation du site de Wankama") ne permet ni de confirmer cette hypothèse ni a fortiori d'estimer le volume ainsi restitué à la nappe en début de saison sèche.
- l'existence d'une zone aux propriétés hydrodynamiques différentes à une distance inconnue de la mare ; cette éventualité est rendue possible par l'origine continentale des sédiments de l'aquifère (brusques variations latérales de faciès, cf "cadre hydrogéologique") et par la situation géomorphologique de la mare ouest, située dans l'axe du kori de Dantiandou : au cours du quaternaire cette rivière fossile semble avoir entaillé largement son lit et peut donc être à l'origine de dépôts alluviaux aux propriétés hydrodynamiques différentes des terrains adjacents.

Dans le but de préciser l'effet piézométrique de la présence de deux zones hydrodynamiques différentes à l'intérieur de l'aquifère modélisé, une troisième série d'une quinzaine de tests a été effectuée avec pour inconnues la porosité et la perméabilité des deux secteurs considérés, et la distance à la mare de la transition hydrodynamique.

3 - 3ème série de tests (2 zones hydrodynamiques différenciées)

Compte tenu du nombre de paramètres pouvant être modifiés simultanément (cf ci-dessus), une modélisation rigoureuse est ici impossible. Les courbes modélisées présentées aux figures 23A, 23B, 23C doivent donc davantage être considérées comme des exemples représentatifs des tests exécutés que comme les expressions d'un calage abouti.

Commentaire des résultats

Sur les trois points de contrôle piézométrique P1, P2, P3 situés à proximité de la mare la présence d'une deuxième zone de perméabilité et de porosité plus faibles à 400 mètres de la mare provoque logiquement une diminution de la vitesse d'évacuation des eaux infiltrées, et donc une décroissance piézométrique de début de saison sèche plus lente que celle modélisée lors des deux premières séries de tests.

Sur les deux premiers points de contrôle P1 et P2 la courbe modélisée est très proche de la courbe observée, alors qu'il semble a priori possible d'ajuster encore plus finement les paramètres en poursuivant les tests.

L'évolution piézométrique modélisée au P3 montre cependant une décrue de la nappe trop lente par rapport à la décroissance observée de la nappe, l'effet de la zone à faibles propriétés hydrodynamiques s'y faisant logiquement sentir plus tôt et de manière plus forte qu'aux piézomètres 1 et 2.

figure 23A : 3ème série de tests - P1 -
2 zones hydrodynamiques différenciées

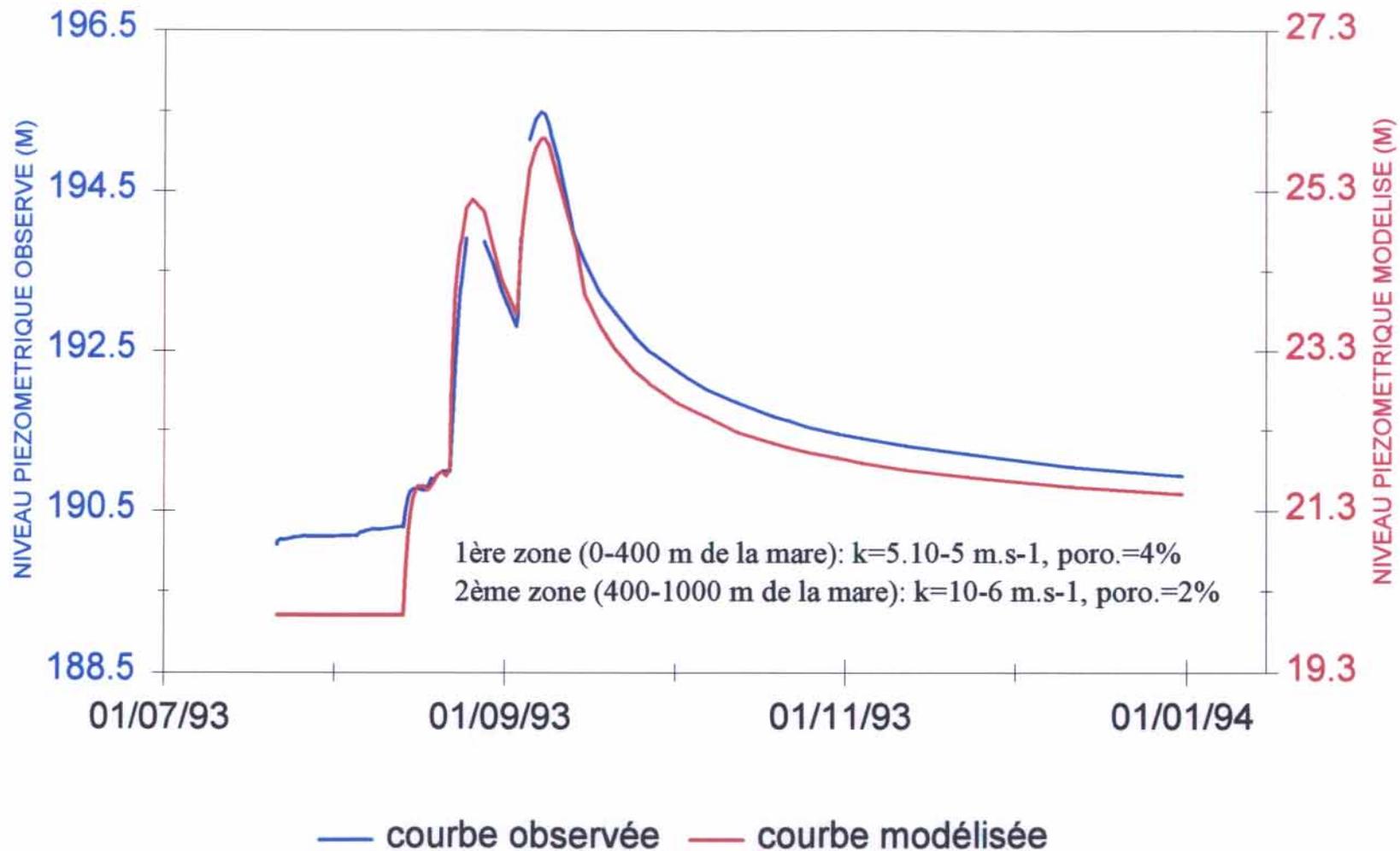


figure 23B : 3ème série de tests - P2 -
2 zones hydrodynamiques différenciées

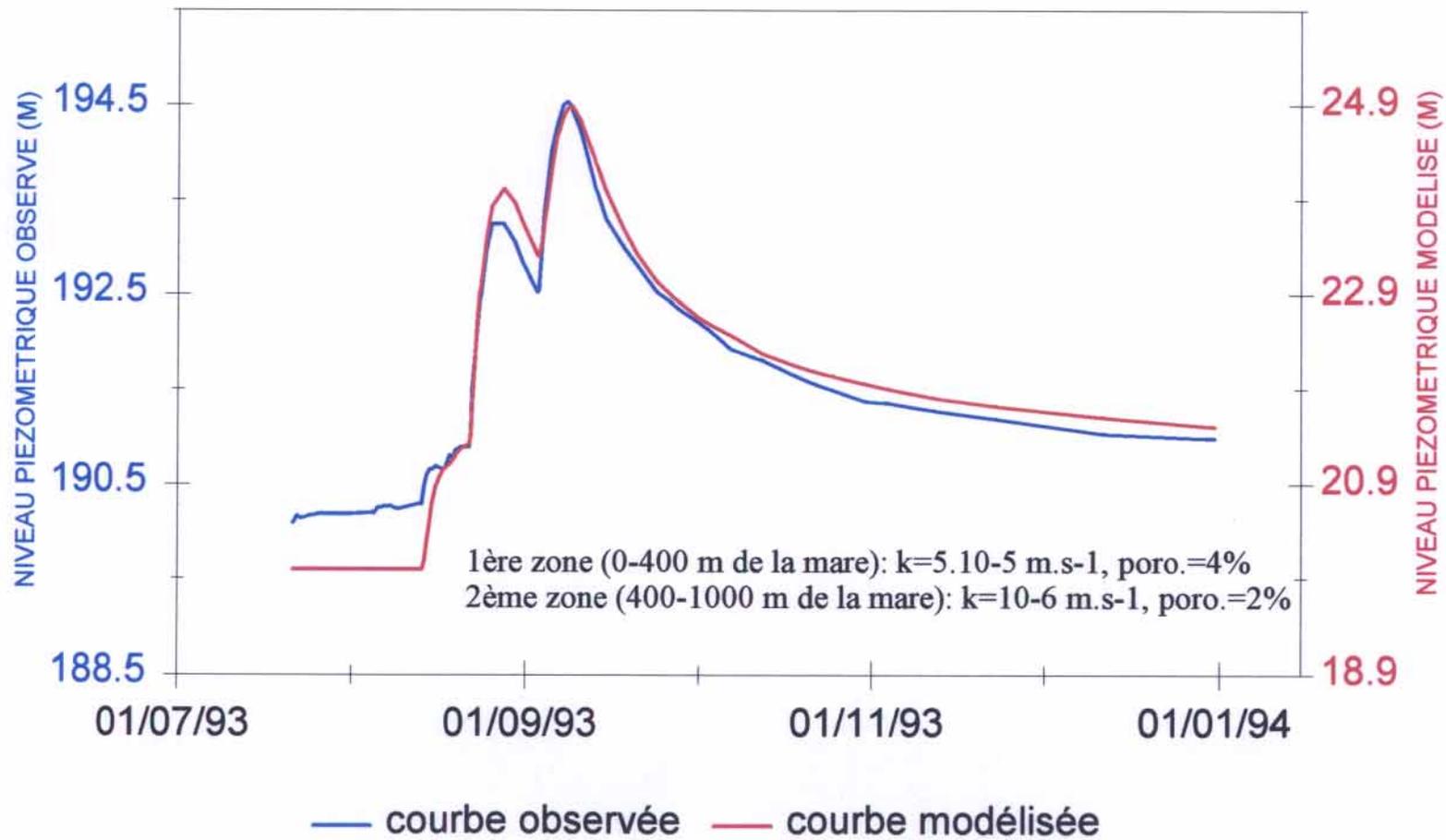
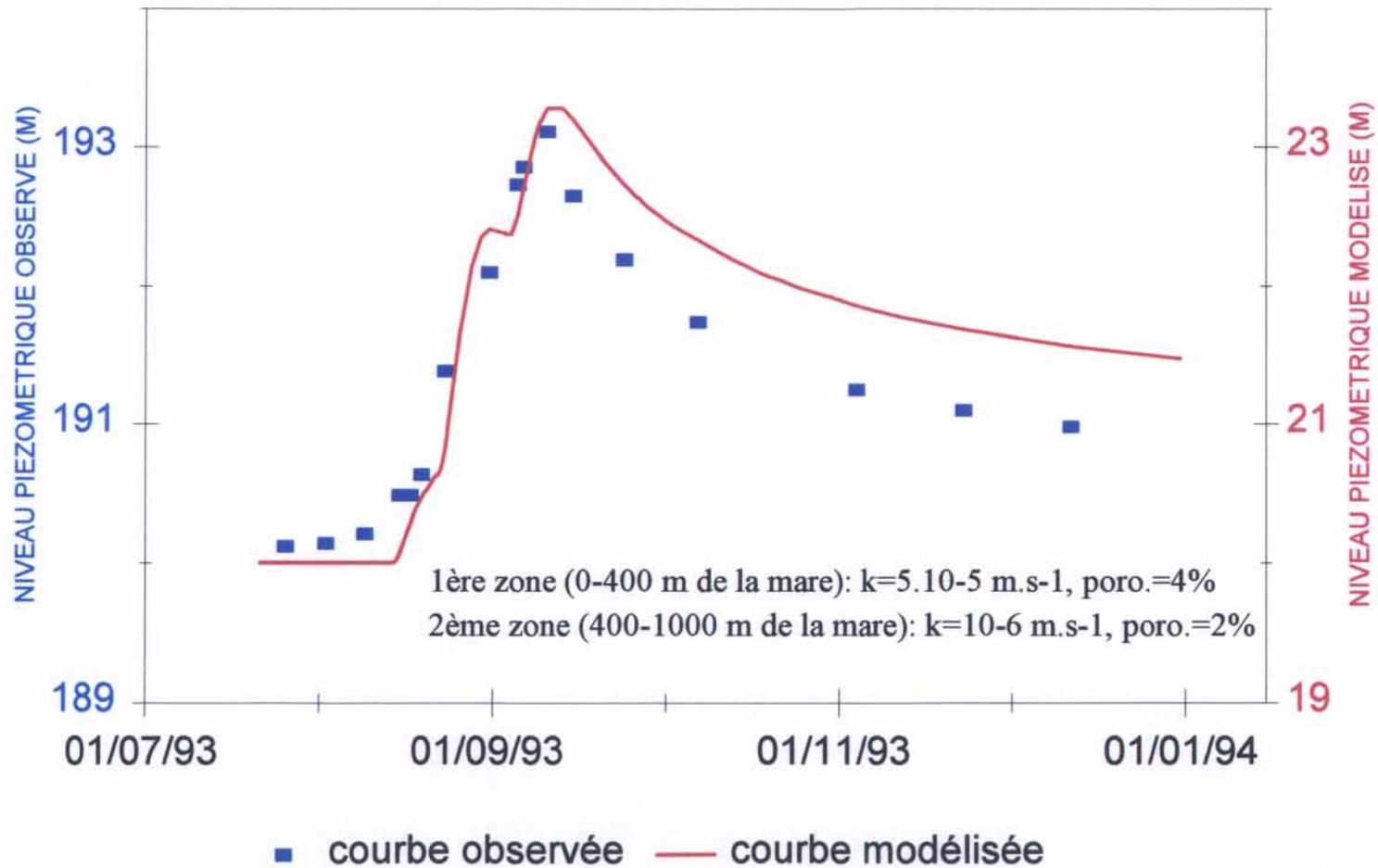


figure 23C : 3ème série de tests - P3 -
2 zones hydrodynamiques différenciées



Malgré l'impossibilité d'un calage précis des paramètres, cette 3ème série de tests confirme la possibilité d'invoquer la présence d'une zone à faibles propriétés hydrodynamiques à quelque distance de la mare pour expliquer la décrue piézométrique finale assez lente observée.

SENSIBILITÉ DU MODÈLE

La sensibilité du modèle est testée sur les conditions aux limites, la porosité, la perméabilité et l'épaisseur mouillée de l'aquifère. Les tests de sensibilité sont effectués sur les courbes modélisées obtenues à l'issue de la 1ère série de tests, sur l'enregistrement piézométrique le plus sensible au paramètre considéré : P3 pour les conditions aux limites, P1 pour la porosité, la perméabilité et l'épaisseur mouillée de l'aquifère.

1 - Sensibilité du modèle aux conditions aux limites

Le choix de l'extension spatiale du maillage avait pour but de permettre une modélisation où les fluctuations piézométriques seraient négligeables aux limites (à 1000 mètres de la mare les variations saisonnières de la piézométrie sont potentiellement très faibles - voir figure 14).

Pour vérifier cette hypothèse les influences respectives sur l'évolution piézométrique annuelle de la nappe de conditions à flux nul imposé ou à potentiel imposé aux limites de l'aquifère modélisé ont été comparées (fig. 24).

Commentaire des résultats

Les influences respectives des deux types de conditions sont très proches, le léger décalage observé ne s'effectuant qu'à la mi-octobre au P3 (et par conséquent encore plus tardivement au P1 et au P2) ; logiquement le choix de conditions à flux nul imposé aux limites réduit l'évacuation des eaux hors de l'aquifère et donc ralentit la décrue piézométrique modélisée, tandis qu'une limite à potentiel imposé tend à l'accélérer légèrement. Le très faible décalage obtenu entre les deux types de conditions aux limites confirme cependant l'hypothèse d'une très faible variation saisonnière de la piézométrie à 1 kilomètre de la mare.

2 - Sensibilité du modèle à la porosité

La sensibilité du modèle à la porosité de l'aquifère est présentée figure 25 (1ère série de tests, piézomètre 1).

Commentaire des résultats

Une faible différence de porosité de ± 1 % autour de la valeur calée (5 %) induit de fortes variations d'amplitude dans l'évolution piézométrique annuelle modélisée. La sensibilité apparaît plus forte lors des crues les plus importantes de l'année, très faible sur la décrue finale. La procédure de calage utilisée qui tient compte essentiellement

FIGURE 24 : SENSIBILITE AUX CONDITIONS AUX LIMITES

1ère série de tests -P3-

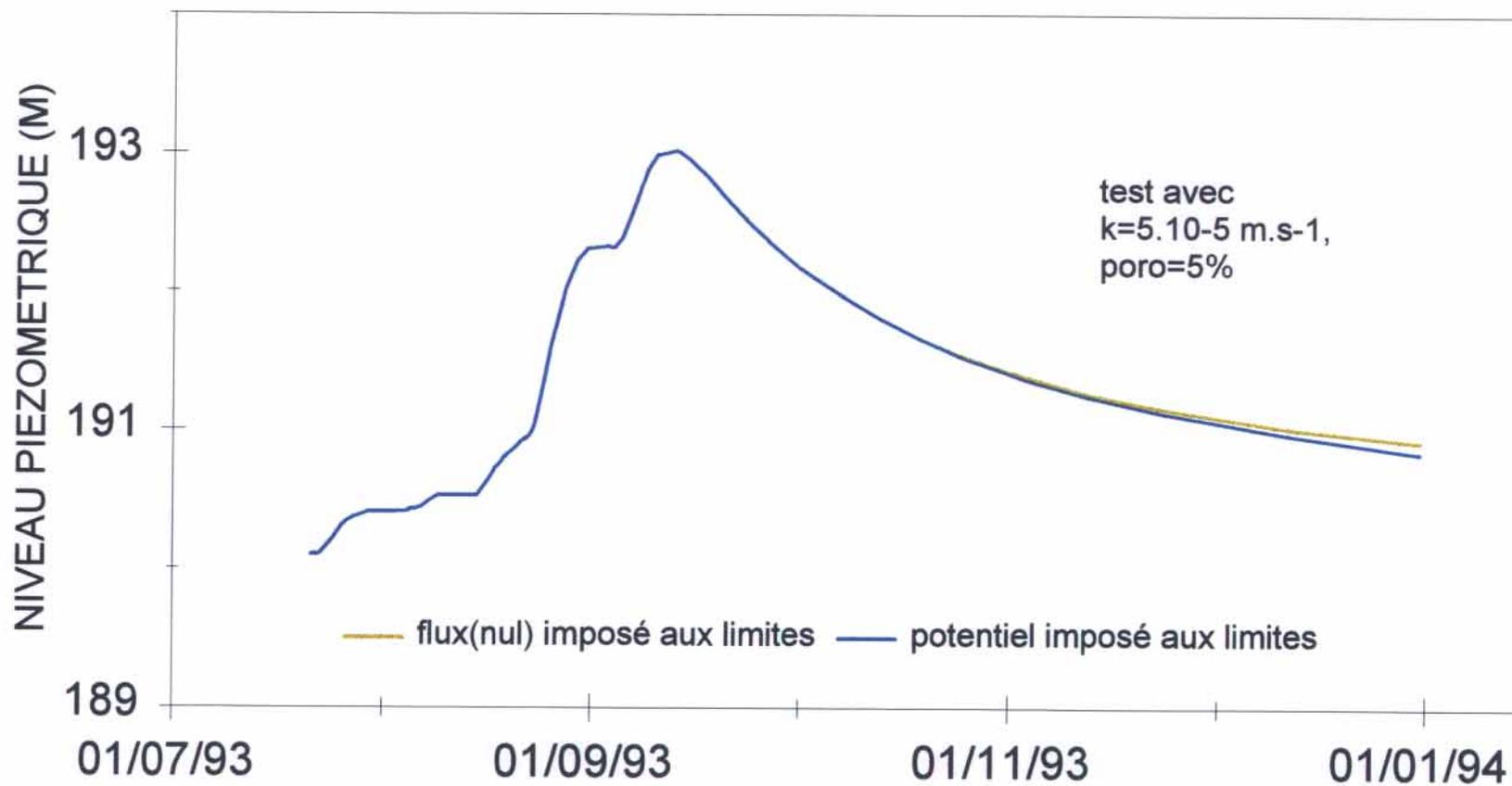
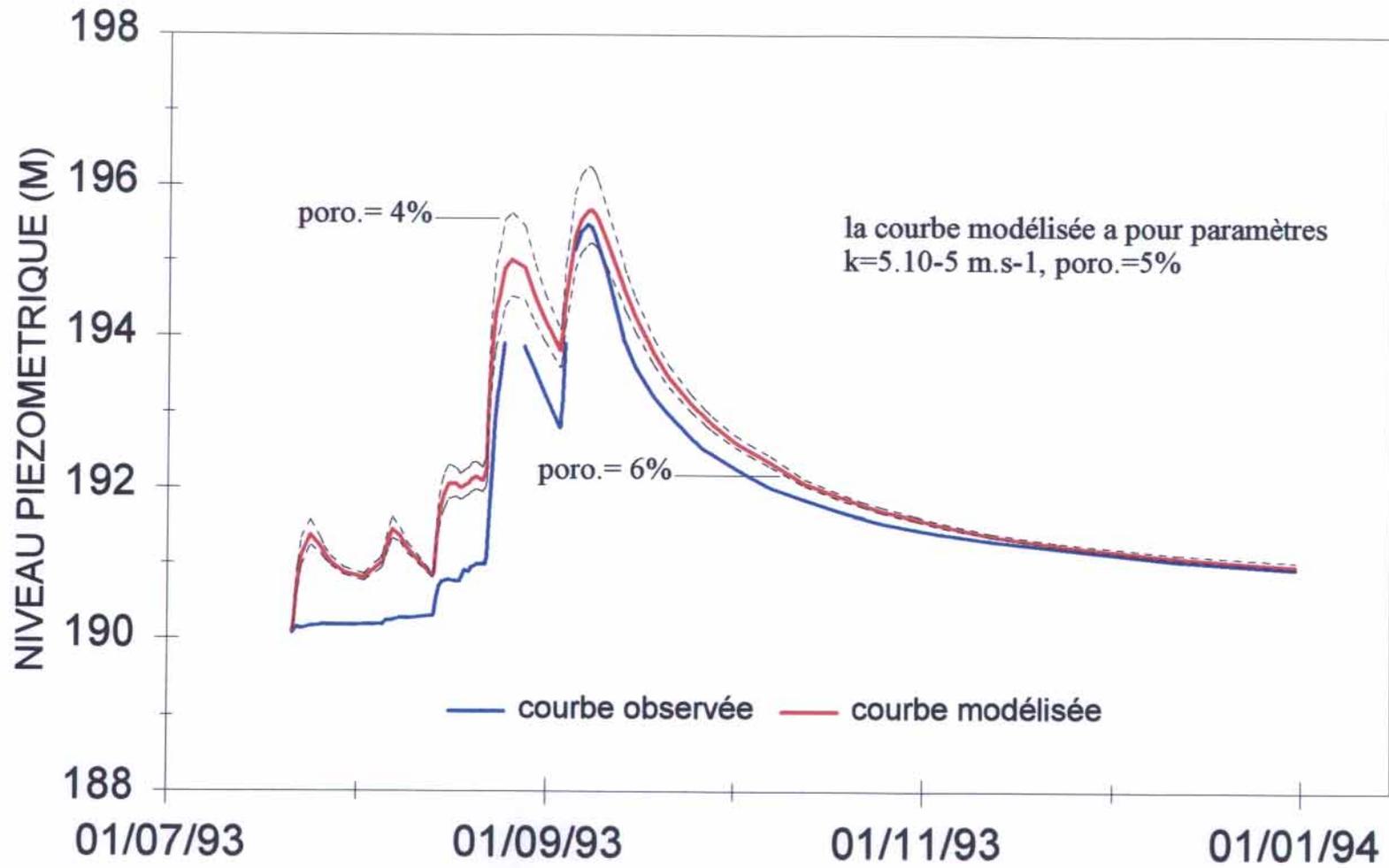


FIGURE 25 : SENSIBILITE A LA POROSITE

1ère série de tests - P1 -



de l'amplitude et de la forme des pics de crue se trouve ici justifiée.

Le modèle semble donc suffisamment sensible à la porosité de l'aquifère pour permettre une détermination précise de ce paramètre.

3 - Sensibilité du modèle à la perméabilité

La sensibilité du modèle à la perméabilité de l'aquifère est présentée figure 26 (1ère série de tests, P1).

Commentaire des résultats

La sensibilité du modèle à la perméabilité de l'aquifère apparaît très bonne, un écart de $\pm 2.10^{-5} \text{m.s}^{-1}$ autour de la valeur du coefficient de perméabilité calé ($k= 5.10^{-5} \text{m.s}^{-1}$) entraînant de fortes variations d'amplitude de la courbe modélisée. Contrairement à la sensibilité à la porosité, la sensibilité du modèle à la perméabilité est forte aussi bien sur les crues piézométriques les plus fortes de l'année que sur la décrue finale de saison sèche (fig.26).

L'estimation obtenue sur la perméabilité de l'aquifère peut donc là encore être considérée comme suffisamment précise pour être significative.

4 - Sensibilité du modèle à l'épaisseur mouillée de l'aquifère

La sensibilité du modèle à l'épaisseur mouillée de l'aquifère est présentée figure 27 (1ère série de tests, P1).

Commentaire des résultats

De manière identique aux deux paramètres hydrodynamiques présentés ci-dessus, la sensibilité du modèle à l'épaisseur mouillée de l'aquifère apparaît très forte : une variation de ± 10 mètres de l'épaisseur mouillée de l'aquifère entraîne d'importantes modifications sur l'amplitude des courbes modélisées. Comme pour la perméabilité la sensibilité est forte de manière égale sur toute la période modélisée. L'incertitude de 50% sur l'épaisseur réelle de la nappe à Wankama peut paraître forte mais n'est pas exagérée compte-tenu de la qualité des données disponibles : non seulement la description de la coupe de forage est en elle-même incertaine (voir la critique des données disponibles sur le site de Wankama) mais encore le fait que le mur ne soit pas défini lithologiquement de manière tranchée empêche toute certitude sur l'épaisseur mouillée de l'aquifère devant être prise en compte dans la modélisation : doit-on par exemple considérer les argiles sableuses jaunâtres entre 40 et 50 mètres de profondeur comme aquifères ? (cf fig. 12).

Les valeurs ajustées de la porosité et de la perméabilité ne sont donc valables que pour une épaisseur mouillée de l'aquifère de 20 mètres, ce qui réduit considérablement l'intérêt hydrogéologique des chiffres avancés.

FIGURE 26 : SENSIBILITE A LA PERMEABILITE

1ère série de tests - P1 -

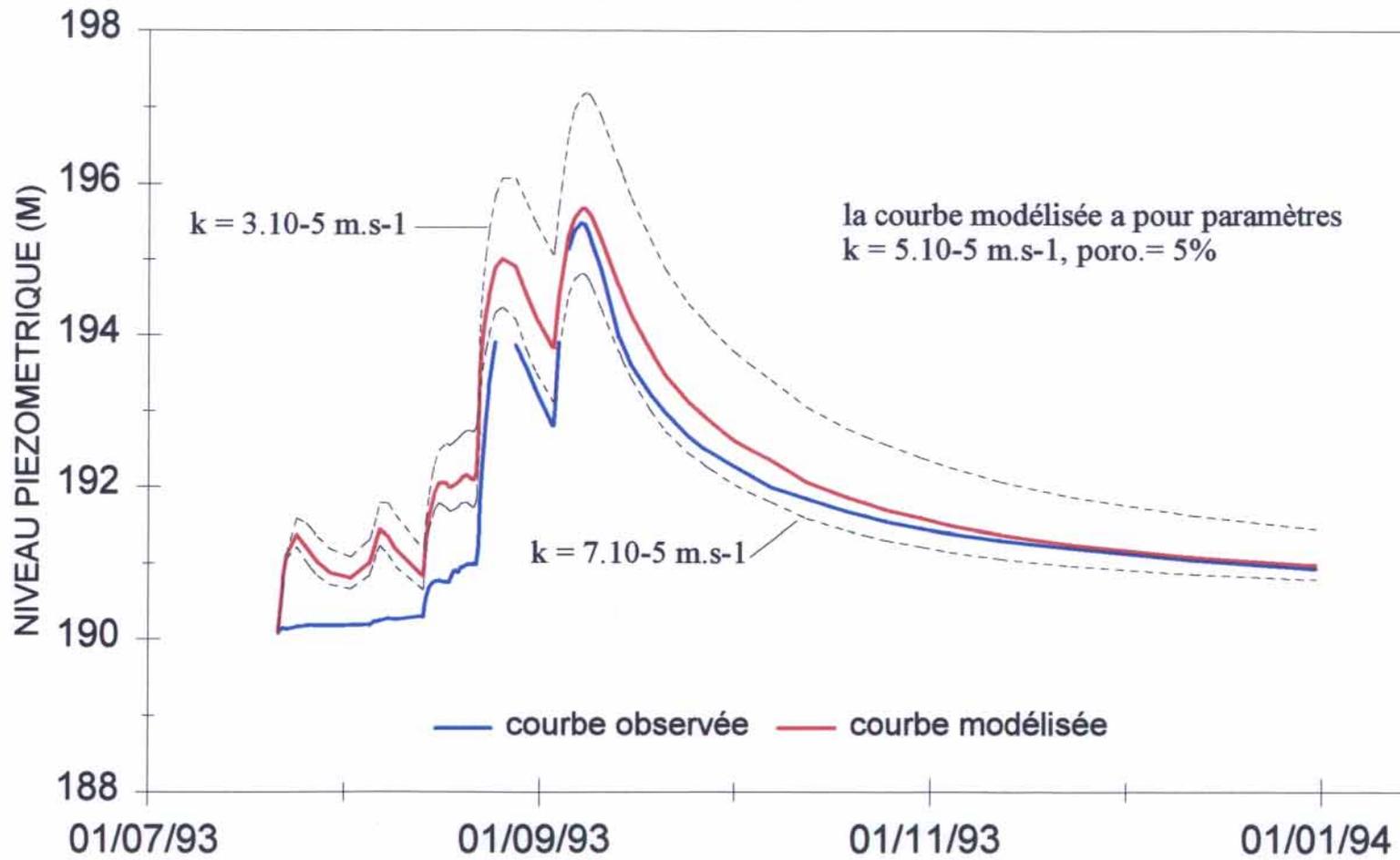
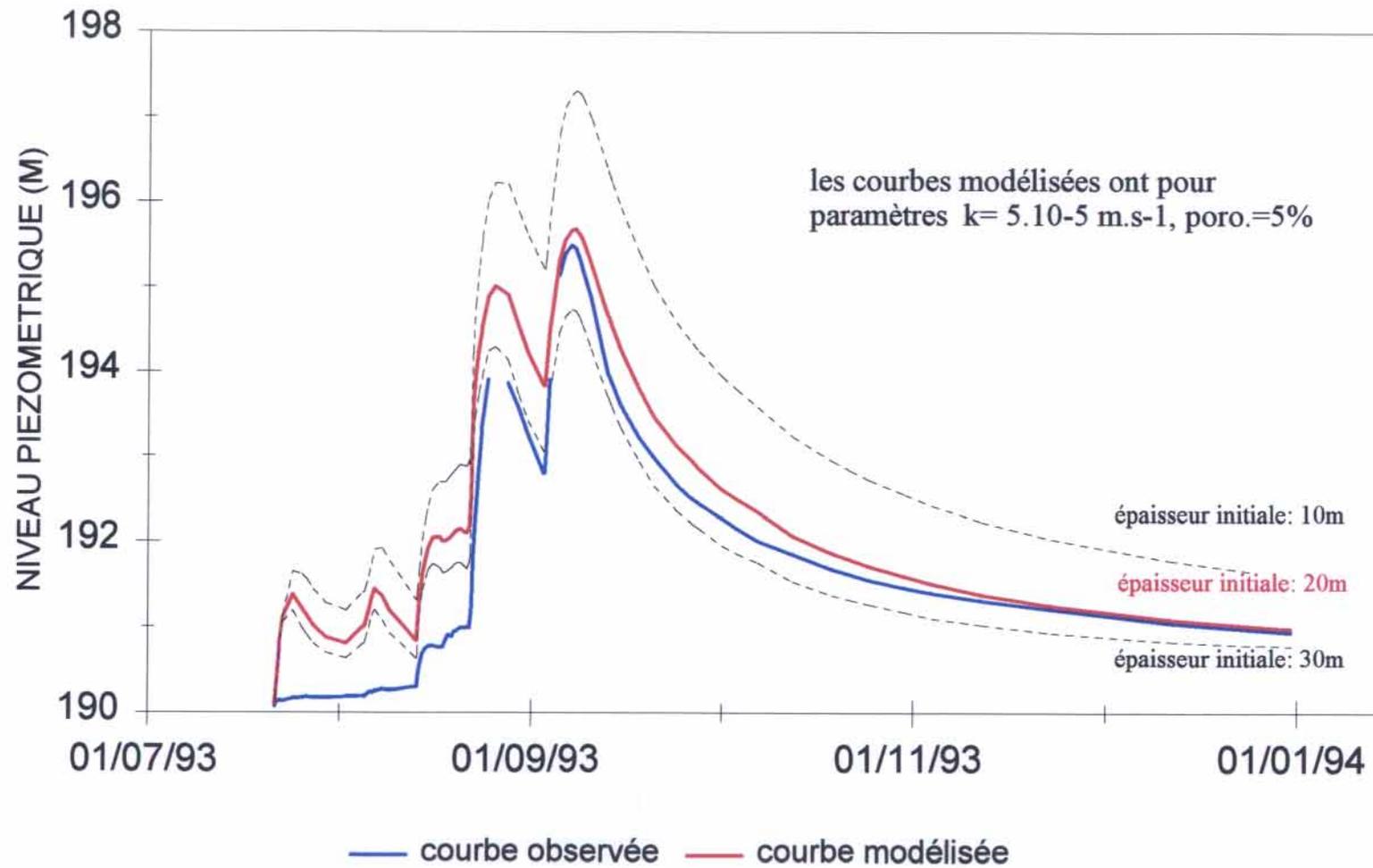


FIGURE 27 : SENSIBILITE A L'ÉPAISSEUR MOUILLÉE DE L'AQUIFERE

1ère série de tests - P1 -



CONCLUSION ET PERSPECTIVES

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

A l'issue de ce mémoire et malgré les nombreuses données incertaines initiales l'intérêt d'une modélisation locale de la recharge de la nappe phréatique paraît justifié a posteriori par la nature des renseignements obtenus sur l'aquifère et les processus de la recharge à Wankama.

Sur l'aquifère de la nappe phréatique

Les paramètres hydrodynamiques calés lors de la modélisation –porosité de 4-5%, perméabilité de $5.10^{-5}m.s^{-1}$ – bien que devant être largement relativisés par la sensibilité du modèle à l'épaisseur mouillée (inconnue) de l'aquifère, indiquent cependant une diffusivité de $0,02 m^2.s^{-1}$ cohérente avec celle estimée en première approche par une modélisation en 1 dimension ($0,06 m^2.s^{-1}$). En l'absence d'indications contraires l'ordre de grandeur obtenu de la diffusivité peut donc être considéré comme relativement fiable.

L'hypothèse d'une variation latérale du faciès lithologique de l'aquifère, liée à un probable alluvionnement du kori de Dantiandou et au milieu de dépôt fluvio-palustre des sédiments du continental terminal, d'abord suggérée en première approche, semble validée par des tests de modélisation en 2 dimensions ; la géométrie des différents corps sédimentaires de l'aquifère ainsi que la valeur de leurs paramètres hydrodynamiques respectifs ne peuvent cependant pas être estimés à partir d'une simple modélisation sans données supplémentaires.

A une échelle plus vaste l'hétérogénéité de l'aquifère paraît prouvée par la valeur très différente des paramètres hydrodynamiques estimés par essai de pompage sur le site de Banizoumbou (porosité de 20%, perméabilité de $2.10^{-3}m.s^{-1}$) dans le contexte géomorphologique identique du kori de Dantiandou, à quelques kilomètres au sud de Wankama.

La sensibilité du modèle aux conditions aux limites de l'aquifère confirme les observations piézométriques effectuées à proximité de la mare ouest de Wankama, à savoir que l'influence de l'infiltration sur la piézométrie de la nappe phréatique devient très faible à 1000 m de la zone de recharge constituée par la mare ; à cette distance un flux nul ou un potentiel fixe sont quasiment deux caractéristiques piézométriques équivalentes.

Sur les processus de la recharge

Le fait que les premières crues soient inefficaces en terme d'impact immédiatement visible ou bien n'entraînent pas de réaction instantanée de la nappe, alors que dans le même temps de l'eau s'infiltré sous la mare semble indiquer que de l'eau est momentanément stockée dans

la zone non saturée en début d'hivernage ; la modélisation de la recharge, qui montre systématiquement des fluctuations piézométriques trop fortes en début de saison confirme cette hypothèse et la complète en suggérant que l'intensité du stockage diminue progressivement jusqu'à tard dans la saison (mi-août en 1993).

Une constatation prometteuse sur les processus de la recharge a été effectuée en marge de la modélisation lors du calcul des débits d'infiltration sous la mare ouest de Wankama : pour une hauteur d'eau donnée dans la mare, les débits infiltrés diminuent progressivement et de manière systématique au cours de l'hivernage, et ce sur les trois années considérées 1993, 1994 et 1995. Un colmatage argileux progressif des bordures perméables de la mare au cours de la saison pourrait être à l'origine de cette constatation, qui supposerait en corollaire une évacuation des argiles colmatantes par déflation éolienne pendant la saison sèche.

L'essentiel de la recharge de la nappe serait donc non seulement un phénomène très localisé dans l'espace (les mares temporaires endoréiques) mais aussi réduit dans le temps aux quelques semaines pendant lesquelles les crues majeures de l'hivernage ont un impact réellement important sur la nappe (fin août/mi-septembre en 1993). L'efficacité et l'importance de la recharge annuelle seraient donc subordonnées à une bonne adéquation spatio-temporelle des précipitations avec les capacités infiltrantes de la zone non-saturée située sous les mares.

Perspectives

Dans la continuité des travaux effectués la modélisation de la recharge de la nappe phréatique à partir de la mare ouest de Wankama mérite d'être poursuivie sur les années 1994, 1995 et bientôt 1996 au titre de la validation des résultats obtenus. Sur le site de Banizoumbou un travail similaire permettrait une comparaison méthodologique de l'estimation des paramètres hydrodynamiques par modélisation et par essai de pompage (les valeurs de la porosité et de la perméabilité sont déjà connues sur le site par interprétation des quelques essais de longue durée).

Sur les processus de la recharge un calcul intéressant serait de comparer sur les trois années 1993, 1994 et 1995 les volumes infiltrés sous la mare avant réaction de la nappe ; ces estimations permettraient de valider (ou d'infirmer !) l'hypothèse émise d'un stockage de l'eau en début de saison des pluies dans la zone non-saturée séparant la mare de la nappe phréatique.

A l'échelle du degré-carré de Niamey, compte-tenu des incertitudes sur les données locales et de la grande variabilité naturelle du milieu une approche plus globale de la modélisation paraît

préférable car plus apte à fournir à la fois une valeur représentative moyenne des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère et une schématisation significative des processus de la recharge. Cette approche, enrichie des campagnes de prélèvements sur le degré-carré de Niamey qui seront effectuées en 1996-1997 en vue d'analyses isotopiques pourrait donner matière à une thèse en 1997.

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Cadre général de l'étude

- Figure 1 : Carte générale de localisation du Niger occidental
- Figure 2 : Répartition mensuelle des pluies à Niamey-ville pour la période 1950-1989
- Figure 3 : Totaux pluviométriques annuels à Niamey-ville de 1905 à 1990
- Figure 4 : Représentation schématique d'une toposéquence caractéristique du paysage du degré-carré de Niamey.
- Figure 5 : Carte géologique du bassin des Iullemeden
- Figure 6 : Coupe géologique schématique à travers le bassin des Iullemeden
- Figure 7 : Carte piézométrique de la nappe phréatique du degré-carré de Niamey (septembre 1993)
- Figure 8 : Coupe schématique ouest-est de la nappe phréatique du continental terminal à la hauteur de Niamey

Présentation du site de Wankama

- Figure 9 : Photographie aérienne numérisée du site de Wankama
- Figure 10 : Le bassin versant de la mare ouest de Wankama ; dispositif de mesures autour de la mare
- Figure 11 : Carte topographique reconstituée de la mare ouest de Wankama
- Figure 12 : Log stratigraphique du forage de Wankama
- Figure 13 : Données chimiques et isotopiques sur le site de Wankama
- Figure 14 : Coupe schématique de la mare ouest de Wankama

Modélisation

- Figure 15 : Modélisation en 1D sur l'année 1993 ; P2 d'après P1
- Figure 16 : Modélisation en 1D sur l'année 1995 ; P2 d'après P1
- Figure 17 : Modélisation en 1D sur l'année 1993 ; P3 d'après P1
- Figure 18 : Valeurs de diffusivité obtenues par modélisation 1D
- Figure 19 : Aspect du maillage utilisé pour la modélisation en 2 dimensions
- Figure 20 : Aspect du maillage à proximité immédiate de la mare
- Figures 21 : 1ère série de tests en milieu isotrope ; infiltration dès la 1ère hausse piézométrique observée
- Figures 22 : 2ème série de tests en milieu isotrope ; infiltration différée au 13/08/1993

- Figure 23 : 3ème série de tests ; 2 zones hydrodynamiques différenciées
- Figure 24 : Sensibilité du modèle aux conditions aux limites
- Figure 25 : Sensibilité du modèle à la porosité
- Figure 26 : Sensibilité du modèle à la perméabilité
- Figure 27 : Sensibilité du modèle à l'épaisseur mouillée de l'aquifère
-

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Cette bibliographie comprend quelques ouvrages classiques de l'hydrogéologie, consultés au cours du mémoire (Fontes 1976, de Marsily 1994, par exemple). Les autres références ont trait aux problèmes spécifiques des processus, de l'estimation et de la modélisation de la recharge en zone semi-aride et sont donc plus directement liées au sujet. Les auteurs cités sont soulignés.

Abdoulkarimou T., 1988 :

Détermination géologique des réservoirs du continental terminal à l'ouest du dallol Bosso (Niger). Rapport de D.E.A., Institut de géodynamique de Bordeaux III, 59 p.

Aranyossy J.F., Guerre A., Sidoru M., 1989 :

Etude des dépressions piézométriques par les isotopes de l'environnement ; premières données sur des exemples au Mali. Proceedings of the Sahel Forum "The state of the art of hydrology and hydrogeology in the arid and semi-arid areas of Africa", Ouagadougou, 18-23 février 1989, UNESCO/IWRA, pp. 660-670.

Bear J., Verruijt A., 1987 :

Modeling groundwater flow and pollution. Theory and applications of transport in porous media. Reidel edit., 416 p.

Boeckh E., 1965 :

Contribution à l'étude hydrogéologique de la zone sédentaire de la république du Niger. Rapport conjoint BRGM/BFBH -DAK.65.A20-, pp. 29-33.

Bonnet M., 1982 :

Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine (Nancy, 1978). Série Document n° 34, BRGM édit., 438 p.

Boudouresque L., Dubois D., Lang J., Trichet J., 1982 :

Contribution à la stratigraphie et à la paléogéographie de la bordure occidentale du bassin des Iullemeden au crétacé supérieur et au cénozoïque (Niger et Mali, Afrique de l'ouest). Bulletin de la Société Géologique de France, t. XXIV, n° 4, pp. 685-695.

Boulet G., 1993 :

Etude des processus contrôlant la recharge de l'aquifère du CT3 sur le site de la mare de Wankama (Niger). Magistère Rhône-Alpes-Auvergne des sciences de la terre, stage de 2e année, 27 p.

Bromley J., Brouwer J., Gaze S., 1995 :

The semi-arid groundwater recharge study (S.A.G.R.E.). In Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans Hapex-Sahel -dispositif de mesures au sol et premiers résultats, ORSTOM édit., pp. 161-179.

Carrera J., Neuman S.P., 1986 :

Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 3. Application to synthetic and field data. Water Resources Research, vol. 22, n° 2, february 1986, pp. 228-242.

- Casenave A., Valentin C., 1989 :**
Les états de surface de la zone sahélienne -influence sur l'infiltration. ORSTOM édit. (collection Didactiques), 229 p.
- Castany G., Margat J., 1977 :**
Dictionnaire français d'hydrogéologie. BRGM édit., 249 p.
- COHMAP Members, 1988 :**
Climatic changes of the last 18,000 years: observations and model simulations. Science, vol. 241, 26/8/88, pp. 1043-1052.
- Courault D., d'Herbes J.M., Valentin C., 1990 :**
Le bassin versant de Sama Dey. Premières observations pédologiques et phytoécologiques (programme Hapex-Sahel). Rapport ORSTOM-Bondy, pp. 1-31.
- Desconnets J.C., Taupin J.D., Lebel T., 1993 :**
Le rôle des mares dans le bilan hydrologique d'une région sahélienne. In Bolle H.J., Feddes R.A. and Kalma J. (editors): Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales (proceedings of the Yokohama Symposium, July 1993). IAHS publ. n° 212, pp. 299-311.
- Desconnets J.C., Taupin J.D., 1993 :**
Comparison of various methods for estimating pools evaporation in the sahel during the dry season. In Becker A., Sevruk B. and Lapin M. (editors): Evaporation, water balance and deposition (proceedings of the international symposium on precipitation and evaporation, Bratislava, September 1993). Printed by Slovak Hydrometeorological Institute ; vol. 3, pp. 62-67.
- Desconnets J.C., 1994 :**
Typologie et caractérisation hydrologique des systèmes endoréiques en milieu sahélien (Niger - degré carré de Niamey). Thèse de doctorat de l'université de Montpellier II, novembre 1994, 326 p.
- Desconnets J.C., Lebel T., Taupin J.D., 1995 :**
Bilan hydrologique de surface durant la période de suivi à long terme de Hapex-Sahel à partir du suivi des mares temporaires sur une zone test de 600 km². In Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans Hapex-Sahel -dispositif de mesures au sol et premiers résultats, ORSTOM édit., pp. 69-114.
- Desconnets J.C., Galle S., Leduc C., Peugeot C., 1996 :**
Les processus de redistribution des eaux en région sahélienne : l'hydrologie dans l'expérience Hapex-Sahel. IAHS, publ. n°238.
- Desconnets J.C., Taupin J.D., Lebel T., Leduc C., (à paraître) :**
Hydrology of the Hapex-Sahel central super-site: surface water drainage and aquifer recharge through the pool systems. Journal of Hydrology, Hapex-Sahel special issue.
- Dieng B., 1987 :**
Paléohydrogéologie et hydrogéologie quantitative du bassin sédimentaire du Sénégal. Essai d'explication des anomalies piézométriques observées. Thèse de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 172 p.
- Durand A., Fontes J.Ch., Gasse F., Icole M., Lang J., 1980 :**
Le nord-ouest du Lac Tchad au quaternaire : étude de paléoenvironnements alluviaux, éoliens, palustres et lacustres. Paleocology of Africa, Coetzee J.A. and Van Zinderen Balkar E.M. edit. (Balkema, Rotterdam), vol. 16, pp. 215-243.

- Engerrand C., 1995 :**
Contribution à la compréhension des processus hydrologiques et hydrogéologiques en milieu sahélien (Niger : degré-carré de Niamey). Rapport de stage de magistère, université de Paris-sud, 77 p.
- England L.A., Freeze R.A., 1988 :**
Finite-element simulation of long-term transient regional groundwater flow. Ground Water, vol. 26, n° 3, may-june 1988, pp.298-308.
- Fontes J. Ch., 1976 :**
Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles : quelques aspects. Thèse de doctorat d'état, université de Paris VI, 208 p.
- Fontes J.Ch., Edmunds W.M., 1989 :**
The use of environmental isotope techniques in arid zone hydrology: a critical review. I.H.P.-III, project 5.2, UNESCO/Paris edit., 75 p.
- Fontes J.Ch., Gasse F., Andrews J.N., 1993 :**
Climatic conditions of holocene groundwater recharge in the Sahel zone of Africa. From isotope techniques in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and the atmosphere. Proceedings of an international symposium on applications of isotope techniques in studying past and current environmental changes in the hydrosphere and the atmosphere, organized by the IAEA and held in Vienna, 19-23 april 1993. IAEA edit., pp. 231-248.
- Greigert J., 1966 :**
Description des formations crétacées et tertiaires du bassin des Iullemeden (Afrique occidentale). Direction des Mines et de la Géologie de la république du Niger, publication n°2, BRGM édit., 234 p.
- Greigert J., Bernert G., 1979 :**
Atlas des eaux souterraines du Niger, état des connaissances (mai 1978). Tome 1, fascicule V : Les nappes du continental terminal du synclinal de Dogondoutchi. Rapport BRGM/Ministère des mines et de l'hydraulique de la république du Niger, réf.79.AGE.001, BRGM édit., pp. 81-102.
- Heinl M., Brinkmann P.J., 1989 :**
A groundwater model of the Nubian aquifer system. Journal des Sciences Hydrologiques, 34, 4, 8/1989, pp. 425-447.
- Huyakorn P.S., Jones B.G., Andersen P.F., 1986 :**
Finite element algorithms for simulating three-dimensional groundwater flow and solute transport in multilayer systems. Water Resources Research, vol. 22, n° 3, march 1986, pp. 361-374.
- Leduc C., Desconnets J. C., 1994-1 :**
Pools and recharge of the continental terminal phreatic aquifer near Niamey, Niger. Proceedings of the International workshop on groundwater monitoring and recharge in semi-arid areas, Hyderabad, India, UNESCO-IAHS, january 18-20, 1994, pp. SV13-SV22.
- Leduc C., Desconnets J. C., 1994-2 :**
Variability of groundwater recharge in the Sahel: piezometric survey of the continental terminal aquifer (Niger). In Future Groundwater Resources at Risk (Soveri & Suokko edit.), proc. of the Helsinki conference, IAHS publ. n° 222, june 1994, pp. 505-511.

- Leduc C., Karbo A., 1994 :**
Variabilité spatio-temporelle de l'impact de l'infiltration sur la nappe phréatique du continental terminal (Hapex-Sahel, Niger). ORSTOM édit., Recueil provisoire des communications des dixièmes journées hydrologiques (13 et 14 septembre 1994), pp.229-239.
- Leduc C., Lenoir F., 1995 :**
Etude de la recharge du continental terminal 3 en rive gauche du Niger. In Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans Hapex-Sahel -dispositif de mesures au sol et premiers résultats. ORSTOM édit., pp. 115-159.
- Leduc C., Bromley J., Schroeter P., 1996 :**
Water table fluctuation and recharge in semi-arid climate: some results of the Hapex-Sahel hydrodynamic survey (Niger). Journal of Hydrology, Hapex-Sahel special issue.
- Leduc C., Taupin J.D., Le Gal La Salle C., (sous presse) :**
Estimation de la recharge de la nappe phréatique du continental terminal -(Niamey, Niger)- à partir des teneurs en tritium. Compte-Rendu à l'Académie des Sciences.
- Leduc C., Taupin J.D., (en préparation) :**
Hydrochimie et recharge de la nappe phréatique du continental terminal (Niamey, Niger). Congrès AIHS, Rabbat 1997.
- Le Gal La Salle C., 1994 :**
Circulation des eaux souterraines dans l'aquifère captif du continental terminal - Bassin des Iullemeden, Niger. Méthodologie et application : isotopes stables de la molécule d'eau, carbone-14, chlore-36, uranium et gaz nobles. Thèse de doctorat de l'université de Paris-sud, mai 1994, 127 p.
- L'Hôte Y., Mahé G., 1996 :**
Afrique de l'ouest et centrale : Carte des précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989). ORSTOM édit., 1/6 000 000, 90 × 60 cm, en couleur.
- Mangin A., 1996 :**
Modèles descriptifs en traitement des données : application à l'hydrogéologie. Document de cours, Laboratoire souterrain du CNRS, 79 p.
- de Marsily G., 1994 :**
Hydrogéologie : comprendre et estimer les écoulements souterrains et le transport des polluants. Document de cours de l'École des Mines de Paris, 237 p.
- Monfort M., 1996 :**
Reconstitution géologique des aquifères du continental terminal dans la région de Niamey. Mémoire de maîtrise, université des sciences et techniques du Languedoc, 50p.
- Ndiaye B., Aranyosy J.F., Faye A., 1993 :**
Le rôle de l'évaporation dans la formation des dépressions piézométriques en Afrique sahélienne : hypothèses et modélisation. In Les ressources en eau au Sahel, AIEA édit., réf. TECDOC-721, pp. 53-63.
- Parissopoulos G.A., Wheater H.S., 1992 :**
Effects of hysteresis on groundwater recharge from ephemeral flows. Water Resources Research, vol. 28, n° 11, november 1992, pp. 3055-3061.
- PNUD/DCTD, 1990-1 :**
Atlas des ressources en eaux souterraines du continental terminal. République du Niger, Ministère de l'hydraulique et de l'environnement, 42 p.

PNUD/DCTD, 1990-2 :

Synthèse des ressources en eaux du département de Tillabéri. République du Niger, Ministère de l'hydraulique et de l'environnement, 24 p.

PNUD/DCTD, 1991 :

Les ressources en eau du département de Dosso. République du Niger, Ministère de l'hydraulique et de l'environnement, 35 p.

Rasheeduddin M., Yazicigil H., Al-Layla R.I., 1989 :

Numerical modeling of a multi-aquifer system in eastern Saudi Arabia. *Journal of Hydrology*, 107, n° 1-4, pp. 193-222.

Sauty J.P., Vandenbeusch M., 1984 :

Quelques réflexions sur l'apport des modèles dans l'étude des systèmes hydrogéologiques. *Annales des mines*, mai-juin 1984, pp. 127-134.

Schroeter P., 1993 :

Les fluctuations des niveaux d'eau dans les nappes du continental terminal et de la formation du Tchad. Premières interprétations, période 1987-1993. Rapport au Ministère nigérien de l'hydraulique, Programme Hydraulique Niger-Suisse, 17 p.

Tandia A.A., Aranyosy J.F., Gaye C.B., 1993 :

Evaluation de la recharge des nappes phréatiques sous climat semi-aride. Exemple du nord-Sénégal. In *Les ressources en eau au Sahel*, AIEA édit., réf. TECDOC-721, pp.39-51.

Taupin J.D., 1990 :

Evaluation isotopique de l'évaporation en zone non-saturée sous climat sahélien, et évolution géochimique des solutions du sol (vallée du moyen Niger). Thèse de doctorat de l'université de Paris-sud, octobre 1990, 172 p.

Taupin J.D., Amani A., Lebel T., 1993 :

Small scale spatial variability of the annual rainfall in the Sahel. In Bolle H.J., Feddes R.A. and Kalma J. (editors): *Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales*. Proceedings of the Yokohama symposium, july 1993. IAHS publ. n° 212, pp. 593-602.

Tehet R., Gasse F., Durand A., Schroeter P., Fontes J.Ch., 1990 :

Fluctuations climatiques du tardiglaciaire à l'actuel au sahel (Bougdouma, Niger méridional). *Compte-Rendu à l'Académie des Sciences*, t. 311, série II, pp. 253-258.

Thierry D., 1994 :

Automatic calibration of groundwater models by the head gradient method. Groundwater quality management (proceedings of the GQM 93 conference held at Tallinn, september 1993). IAHS Publ. n° 220, pp. 291-300.

Tirat M., 1964 :

Contribution à l'étude hydrogéologique du continental terminal. Rapport du BRGM NIA.64.A1, 75 p.

Vicat J.P., Léger J.M., Ahmed Y., Willems L., 1994 :

Les indices de déformations plio-quatérnaires de la bordure occidentale du bassin des Iullemeden dans la région de Niamey. *Revue de Géographie Alpine*, "Au contact Sahara-Sahel -milieux et sociétés du Niger-", collection Ascendances, hors-série, vol. 1, pp. 14-24.

ANNEXES

LISTE DES ANNEXES

Les données de base nécessaires au calcul des débits d'infiltration (annexes 1 et 3) ainsi qu'au contrôle des courbes modélisées obtenues (annexe 2) sont présentées en annexe.

Annexe 1A - Niveaux de la mare ouest sur l'année 1993.

Annexe 1B - Niveaux de la mare ouest sur l'année 1994.

Annexe 1C - Niveaux de la mare ouest sur l'année 1995.

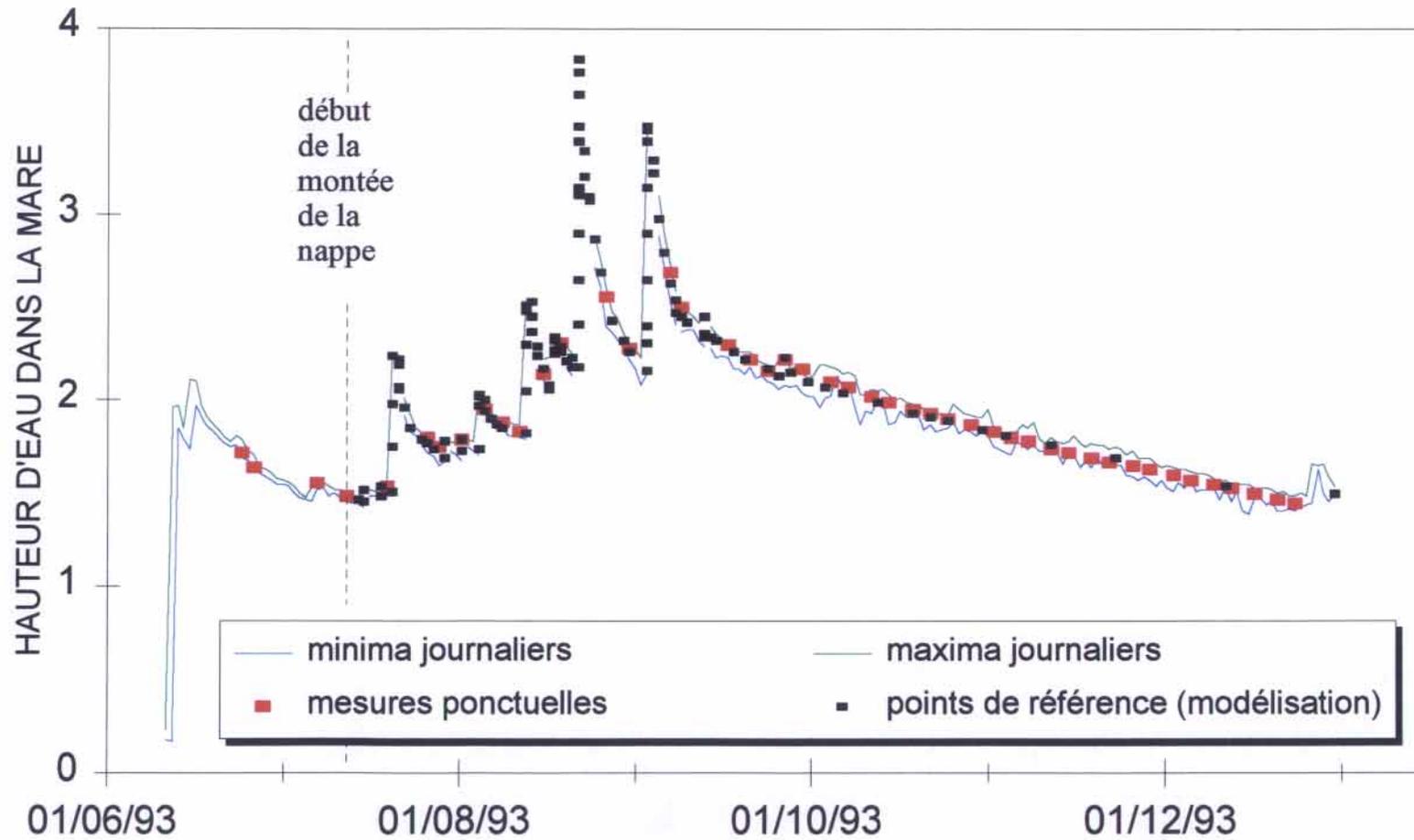
Annexe 2A - Niveaux piézométriques sur l'année 1993.

Annexe 2B - Niveaux piézométriques sur l'année 1994.

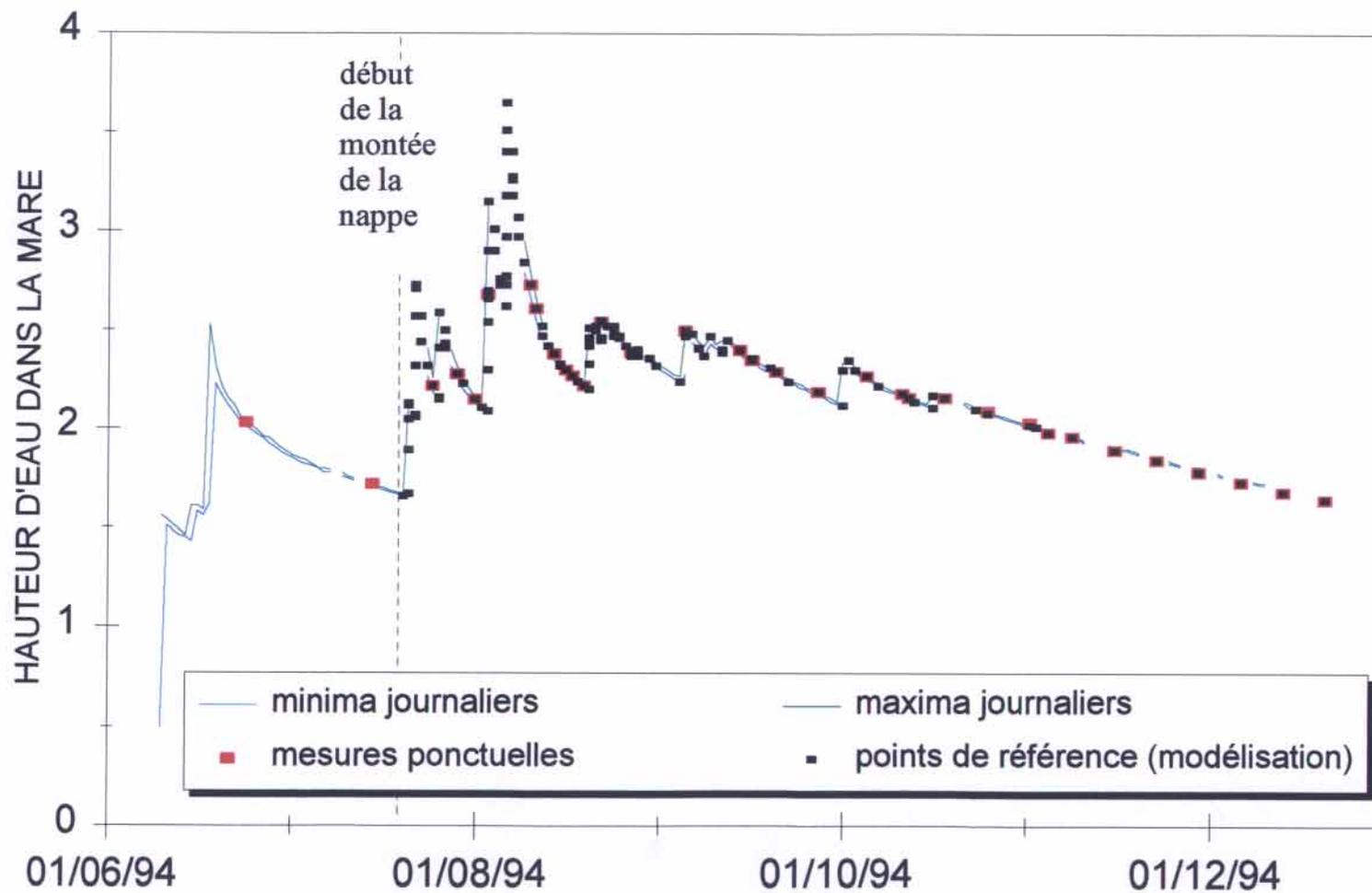
Annexe 2C - Niveaux piézométriques sur l'année 1995.

Annexe 3 - Coefficients ajustés de la relation hauteur / volume de la mare ouest de Wankama.

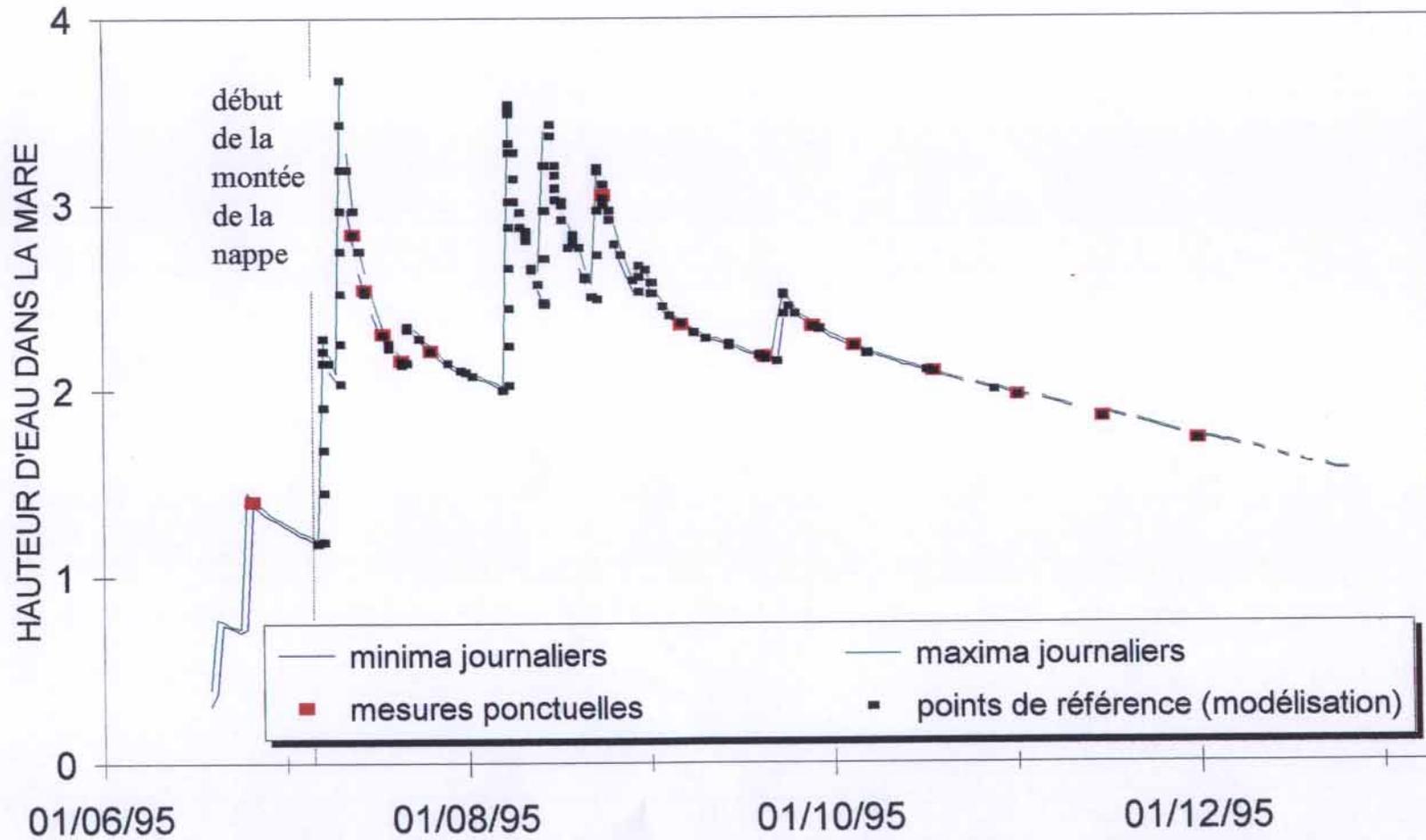
annexe 1A : niveaux de la mare ouest 1993, données corrigées



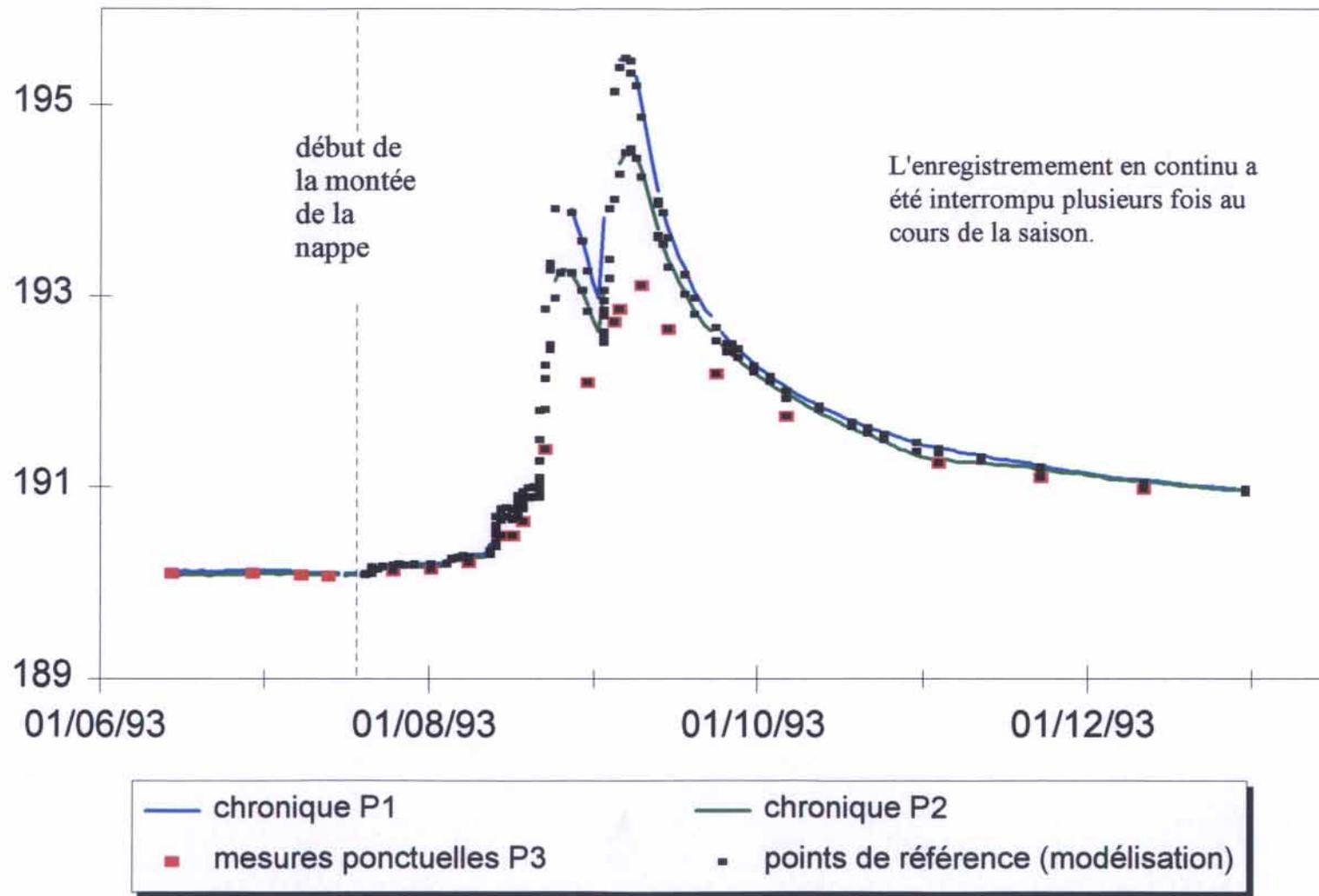
annexe 1B : niveaux de la mare ouest 1994, données corrigées



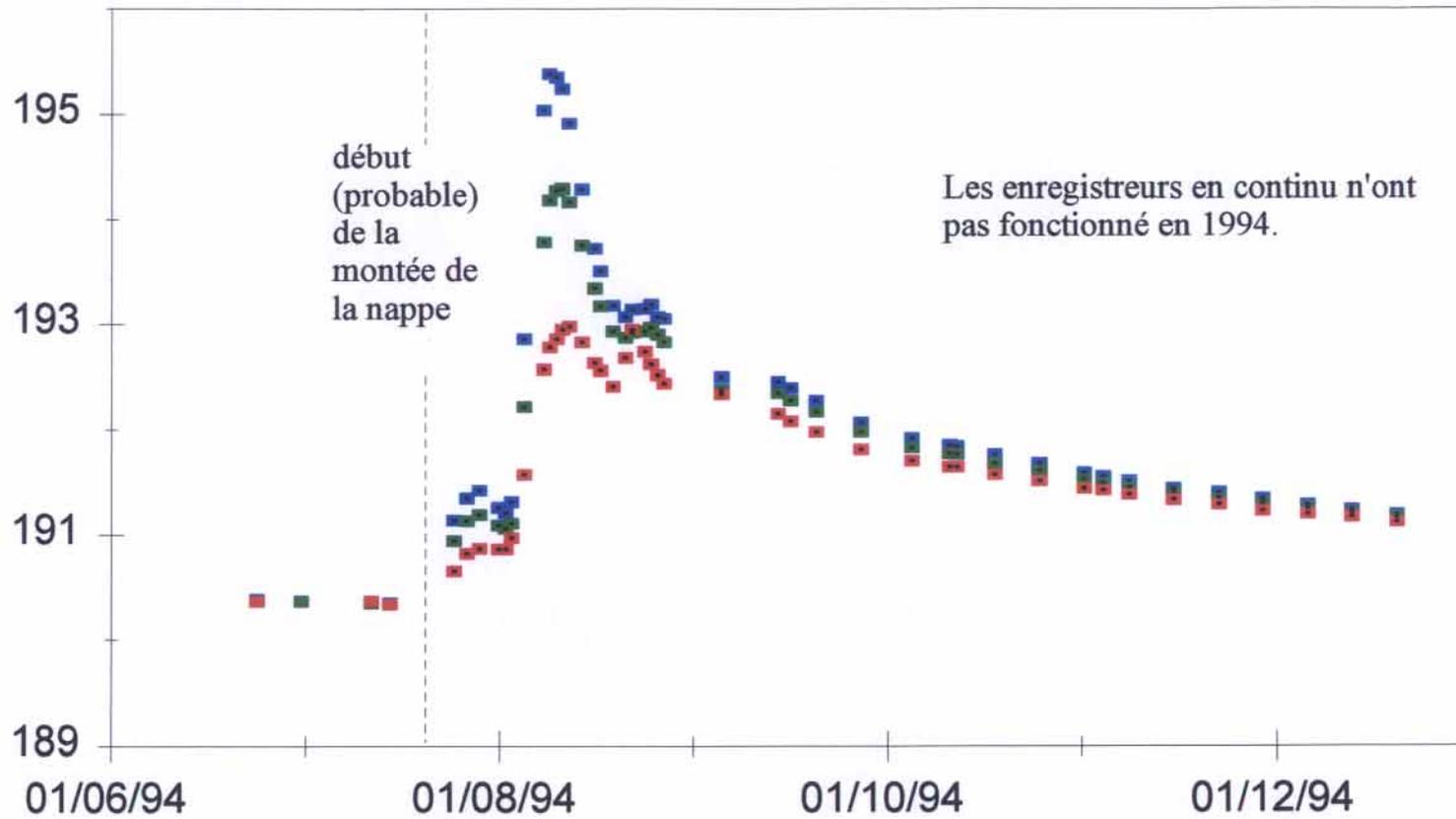
annexe 1C : niveaux de la mare ouest 1995, données corrigées



annexe 2A : niveaux piézométriques 1993, données ponctuelles et enregistrées

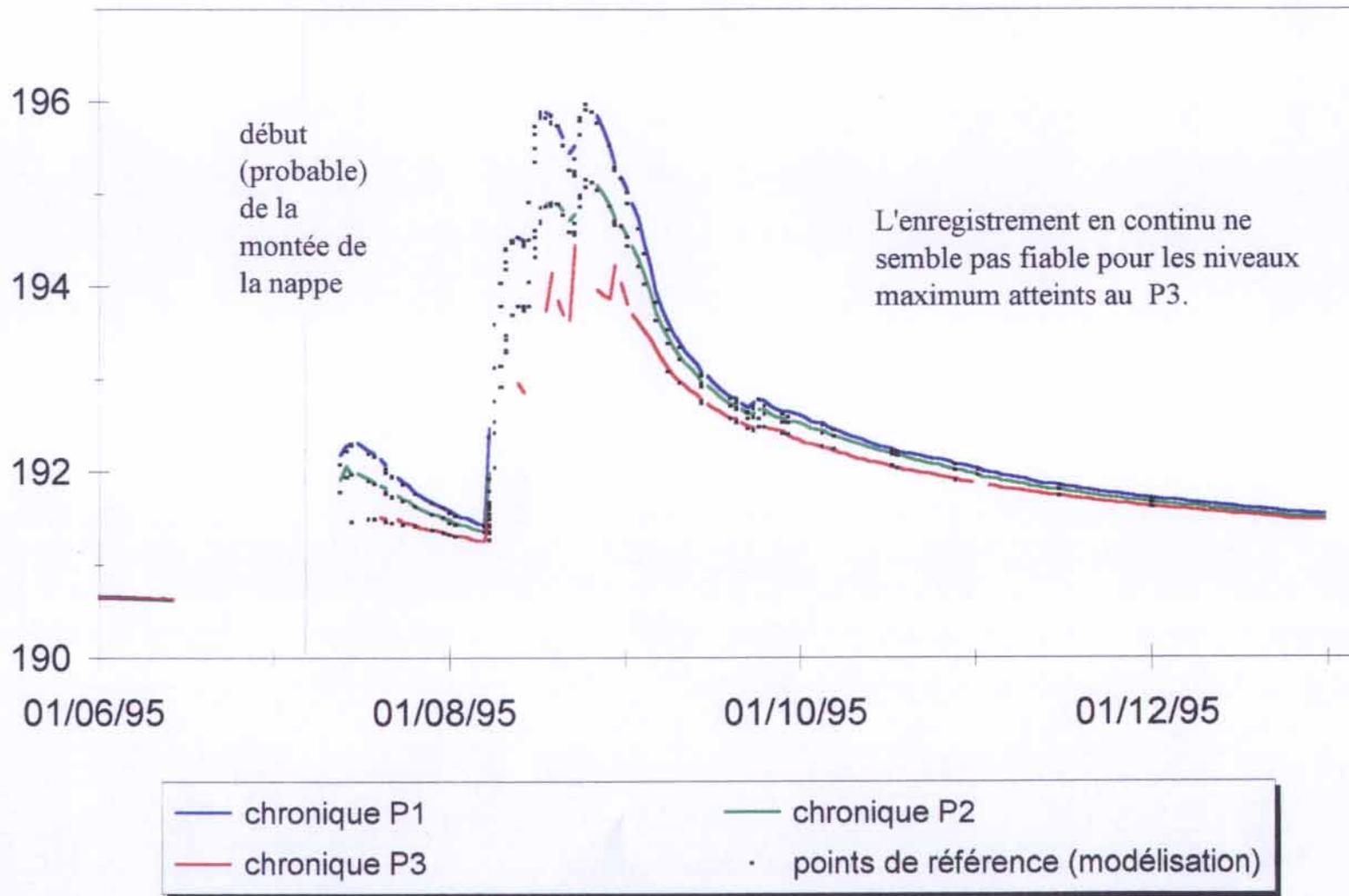


annexe 2B : niveaux piézométriques 1994, données ponctuelles



- mesure ponctuelle P1
- mesure ponctuelle P2
- mesure ponctuelle P3
- points de référence (modélisation)

annexe 2C : niveaux piézométriques 1995, données ponctuelles et enregistrées



**ANNEXE 3 : COEFFICIENTS AJUSTES DE LA RELATION HAUTEUR/VOLUME DE LA MARE OUEST DE WANKAMA
(D'APRES DESCONNETS, 1994)**

la relation hauteur/volume est ajustée par un modèle statistique de type polynomial, d'équation :

$V(h) = A + B.h + C.h.h + D.h.h.h$, avec : - $V(h)$ le volume d'eau en m³ pour la hauteur h .
 - h la hauteur d'eau en mètres.
 - A, B, C, D les coefficients ajustés.

domaine de validité *	de 0.5 à 1.29 m	de 1.29 à 1.79 m	de 1.79 à 3.30 m
A	-217.8	-508.3	22741.0
B	1120.0	2301.1	-35600.0
C	-1932.0	-3458.9	16229.0
D	1119.0	1750.6	-1474.9
nombre de valeurs	7	7	18
coefficient de corrélation	0.99	0.99	0.99

* le domaine de validité correspond à l'intervalle des hauteurs d'eau dans lequel les coefficients ajustés sont utilisés.
 le point de référence $h=0$ est donné par rapport à la cote 0 de l'échelle limnimétrique.