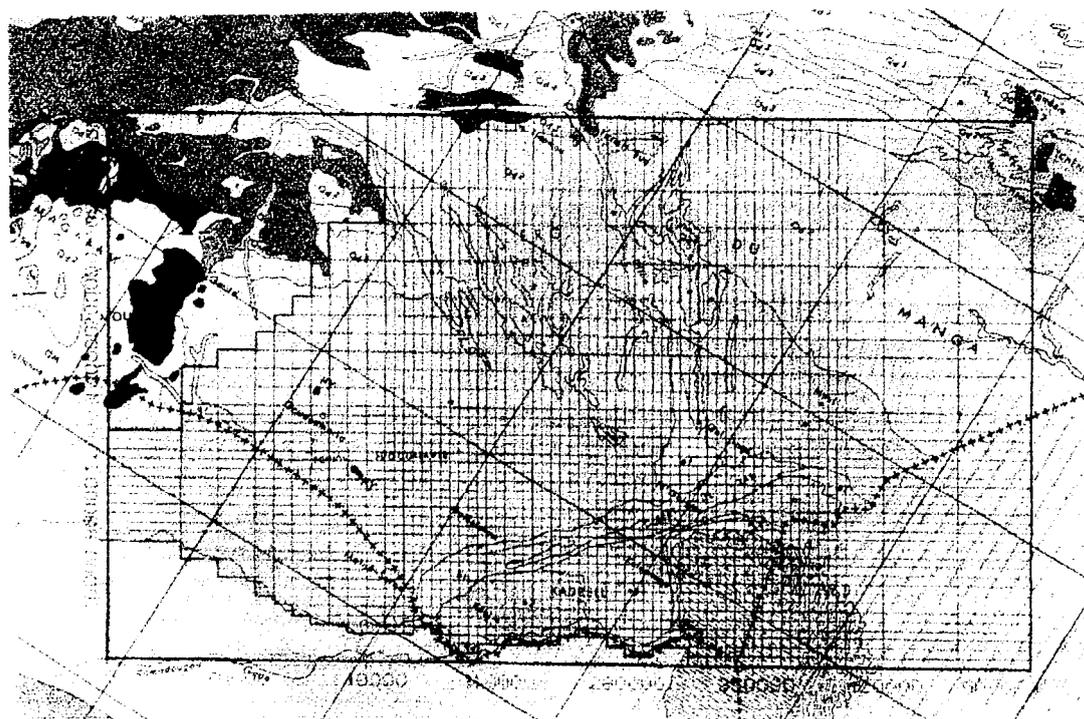


UNIVERSITE D'AVIGNON
ET DES PAYS DU VAUCLUSE
LABORATOIRE D'HYDROGEOLOGIE

ORSTOM DE MONTPELLIER
LABORATOIRE D'HYDROLOGIE

DESS HYDROGEOLOGIE ET ENVIRONNEMENT

MODELISATION NUMERIQUE DE LA NAPPE QUATERNAIRE DU MANGA (NIGER SUD-ORIENTAL)



Mémoire de DESS HYDROGEOLOGIE ET ENVIRONNEMENT
Présenté par Marc LEBLANC (Octobre 97)
sous la direction de C.LEDUC (ORSTOM)

MH 7*0008



Fonds Documentaire C
Cote : 14386

AVANT-PROPOS

Je tiens tout particulièrement à remercier M.Christian LEDUC qui a encadré mon stage de DESS hydrogéologie et environnement à l'O.R.S.T.O.M de Montpellier. Ces conseils et nos discussions furent pour moi un véritable enseignement. Tout au long de cette étude, le continent africain a constitué une part de rêve. C'est sans aucun doute, avec la compagnie d'une équipe de chercheurs et d'étudiants passionnés, ce qui a permis de mener à bien cette étude.

Ce rapport ne concerne qu'une partie des travaux effectués au cours de six mois de stage. C'est néanmoins le plus représentatif. Il illustre l'utilité des modèles numériques en hydrogéologie aussi bien comme outils de gestion que de compréhension. L'ensemble de ce stage de fin d'études s'est déroulé en deux parties d'une durée de trois mois chacune. La première était pour l'ORSTOM de Montpellier, la deuxième pour le bureau d'étude hydroexpert. Les autres travaux réalisés au cours de ce stage de fin d'études sont :

Pour l'O.R.S.T.O.M de Montpellier :

- La modélisation numérique d'une mare endoréique, en vue de déterminer les possibilités de quantifier la recharge, par l'analyse des décrues piézométriques en fin de saison pluvieuse.

Pour le bureau d'étude Hydroexpert :

- La recherche et développement d'un modèle conceptuel de type réservoir, fonctionnant en pluie-débit et en pluie-niveau, avec une recherche automatisée du jeu optimal de paramètres. Validation du modèle et mise en place avec calage sur des piézomètres et des cours d'eau.
- Le couplage d'un modèle conceptuel de type réservoir et d'un modèle numérique d'écoulements souterrains. Le modèle conceptuel quantifie la recharge au pas de temps désiré. Ce terme du bilan en eau est ensuite introduit dans le modèle numérique. Ce couplage a été appliqué au bassin versant de l'Hallue (département de la Somme) avec mise en place d'un modèle numérique et calage des modèles conceptuels et numériques.
- L'interprétation de pompages d'essai sur le bassin versant de l'Hallue. Etude de l'impact de forages sur la nappe et sur le réseau hydrographique
- La mise en œuvre de traçages avec interprétation quantitative sur le site de Grosoeuvre (environ d'Evreux) pour analyser la connexion hydraulique entre une doline et un captage.

SOMMAIRE

I INTRODUCTION

II SYNTHÈSE DES DONNÉES EN VUE DE LA MODÉLISATION

1 Introduction : objectifs et bibliographie

2 Contexte géologique

3 Hydrogéologie générale

3.1 L'aquifère quaternaire

3.2 L'aquifère pliocène

3.3 La série imperméable

4 Hydrodynamique de l'aquifère quaternaire

4.1 Piézométrie

4.2 Caractéristiques hydrodynamiques

4.2.1 Transmissivité

4.2.1.1 Pompage d'essai

4.2.1.2 Débit spécifique

4.2.1.3 Géologie

4.2.2 Porosité et emmagasinement

5 Bilan en eau de la nappe du Quaternaire

5.1 Introduction

5.2 Les alimentations de la nappe

5.2.1 L'infiltration par les précipitations

5.2.2 L'infiltration par la Komadougou

5.2.3 L'infiltration par le lac Tchad

5.2.4 Les échanges entre les aquifères pliocène et quaternaire

5.2.4.1 Dans le secteur Sud du Manga

5.2.4.2 Dans le secteur Nord du Manga

5.2.5 Les apports des nappes latérales

5.3 Les débits sortant de la nappe

5.3.1 Les prélèvements anthropiques

5.3.1.1 L'alimentation humaine

5.3.1.2 L'élevage

- 5.3.1.3 L'irrigation
- 5.3.2 Les écoulements vers le lac Tchad
- 5.3.3 L'évaporation dans le secteur du Kadzell
- 5.3.4 L'évaporation dans la région du lac Tchad
- 5.3.5 Les écoulements vers la frontière tchadienne
- 5.4 Conclusion du bilan en eau de la nappe du Quaternaire

6 Conclusion de la synthèse des données

III LA MISE EN PLACE DU MODELE

1 Les objectifs et les limites

- 1.1 Les objectifs
- 1.2 Les limites

2 Les moyens : le programme de modélisation et ses caractéristiques mathématiques

- 2.1 Le modèle retenu
- 2.2 Discrétisation spatiale
- 2.3 Discrétisation temporelle
- 2.4 Type de maillage

3 La mise en place du modèle régional de la nappe quaternaire du Manga

- 3.1 Les schématisations hydrauliques adoptées
- 3.2 Le maillage
- 3.3 Les conditions aux limites : description géographique et hydraulique
- 3.4 La géométrie du réservoir
 - 3.4.1 Le toit
 - 3.4.2 Le mur

IV RESULTATS DU CALAGE : (*Etat actuel, pas de lac, en régime permanent*)

1 Piézométrie de référence et état permanent

2 Résultats du calage pour une infiltration homogène

- 2.1 Comparaison entre piézométrie observée et piézométrie simulée
- 2.2 Répartition des débits

2.3 Répartition des perméabilités

3 Résultats du calage pour une infiltration hétérogène

3.1 Les raisons de cette recharge hétérogène

3.2 Comparaison entre piézométrie observée et piézométrie simulée

3.3 Répartition des débits naturels et distribution des perméabilités

V SENSIBILITE DU MODELE

1 Sensibilité à l'infiltration

2 Sensibilité à la recharge par la Komadougou

3 Sensibilité aux perméabilités

VI CONCLUSION

LISTE DES FIGURES

Figure n°1 : localisation de la région étudiée.

Figure n°2 : coupes géologiques de la région du Manga.

Figure n°3 : piézométrie de la région du Manga.

Figure n°4 : carte des débits spécifiques et valeurs de transmissivité.

Figure n°5 : les prélèvements anthropiques.

Figure n°6 : les termes du bilan en eau d'après la synthèse des données.

Figure n°7 : schéma théorique de la discrétisation spatiale d'un aquifère.

Figure n°8 : discrétisation spatiale avec noeuds centrés.

Figure n°9 : principe de la discrétisation temporelle et historique des charges.

Figure n°10 : maillage rectangulaire à taille variable.

Figure n°11 : le maillage du modèle et son positionnement.

Figure n°12 : le mur de l'aquifère quaternaire.

Figure n°13 : comparaison entre la piézométrie observée et la piézométrie simulée.

Figure n°14 : les flux excessifs transitant dans la nappe du quaternaire testés au début du calage.

Figure n°15 : les flux transitant dans la nappe du quaternaire obtenus à l'issue du calage.

Figure n°16 : répartition des débits naturels pour une recharge homogène à l'issue du calage.

Figure n°17 : répartition des perméabilités pour une recharge homogène à l'issue du calage.

Figure n°18 : pluviométrie moyenne annuelle sur le Manga.

Figure n°19 : piézométrie simulée pour une recharge hétérogène de 0.4mm/an

Figure n°20 : piézométrie simulée et répartition des perméabilités pour une recharge hétérogène de 0.4mm/an.

Figure n°21 : piézométrie simulée pour une recharge hétérogène de 0.8mm/an

Figure n°22 : piézométrie simulée et répartition des perméabilités pour une recharge hétérogène de 0.8mm/an.

Figure n°23 : piézométrie simulée pour une recharge hétérogène de 4mm/an

Figure n°24 : piézométrie simulée et répartition des perméabilités pour une recharge hétérogène de 4mm/an.

Figure n°25 : piézométrie simulée pour une recharge hétérogène de 10mm/an

Figure n°26 : piézométrie simulée et répartition des perméabilités pour une recharge hétérogène de 10mm/an.

LISTE DES PHOTOS

Photo n°1 : Massif de Termit.

Photo n°2 : Les dunes de l'erg du Manga.

Photo n°3 : Une cuvette dans la région de Mainé-soroa.

Photo n°4 : La Komadougou Yobé en étiage.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau n°1 : les termes du bilan en eau connus d'après la synthèse des données.

Tableau n°2 : les termes outranciers du bilan en eau testés au début du calage.

Tableau n°3 : les termes du bilan en eau retenus à l'issue du calage.

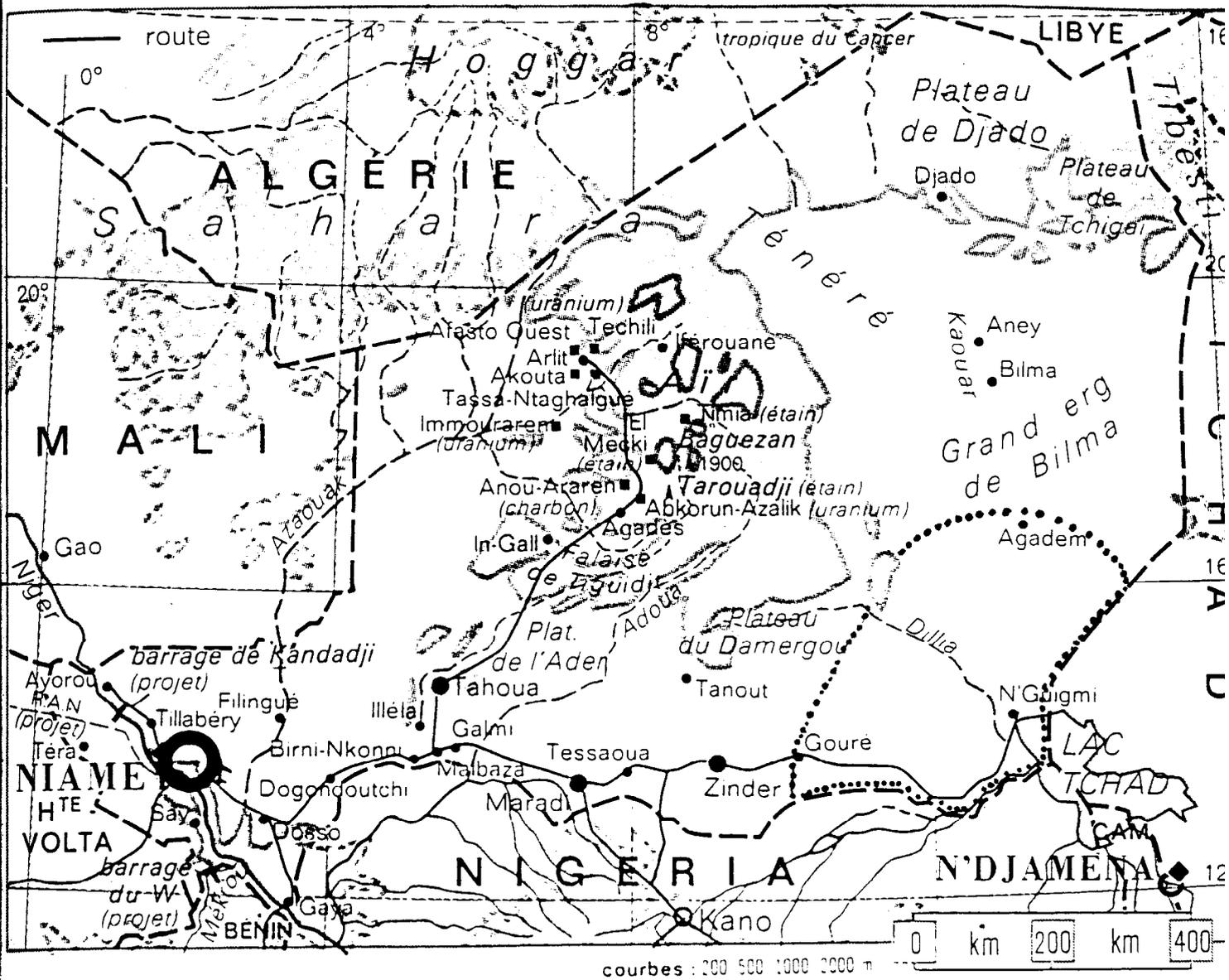
I INTRODUCTION

Le Manga est la région du Niger Sud-Oriental qui borde le lac Tchad. Le climat va d'un type sahélien au Sud, avec une courte saison pluvieuse, à un type saharien hyperaride dans le Nord. Seuls 200 000 habitants vivent au Manga, pour un territoire dont la superficie atteint 130 000 km². La majeure partie de cette population se concentre dans le secteur Sud où se situent toutes les villes.

Le Manga possède deux grands aquifères que sont l'aquifère du Quaternaire et l'aquifère du Pliocène. La nappe quaternaire constitue la principale ressource en eau de la région. C'est donc tout naturellement vers cette nappe que se focalisent nos travaux. Elle forme au niveau du Kadzell un exemple typique de nappe en creux, dont le fonctionnement hydraulique est encore largement sujet à discussion. L'amplitude de cette dépression régionale atteint quarante mètres. Le réseau hydrographique se caractérise par la présence du lac Tchad dont le niveau est instable. Il est actuellement asséché sur tout le secteur nigérien et ce depuis 1988.

Dans ce contexte nous avons entrepris un modèle numérique de l'aquifère quaternaire du Manga. Le premier objectif était de proposer un schéma de fonctionnement de la nappe et en particulier de la dépression piézométrique du Kadzell. Le deuxième, indissociable du premier, était de quantifier l'infiltration par les précipitations. La recharge est en effet un terme clef du cycle de l'eau. C'est elle, par exemple, qui permet une évaluation des ressources en eau souterraine à moyen terme.

Ce travail a été effectué à l'ORSTOM de Montpellier, sous la tutelle de Christian LEDUC. Il fait suite à une première modélisation réalisée en 1992 par C.LEDUC dont nous souhaitons confirmer les résultats, ou plus exactement vérifier qu'il n'existait pas d'autres scénarios possibles. D'une durée de deux mois, il fut l'objet d'une partie de mon stage de DESS Hydrogéologie. Le logiciel visualMODFLOW a été employé. Cette étude comprend toutes les phases classiques d'une modélisation hydrodynamique. Ainsi, le présent rapport abordera dans un premier temps une synthèse critique des données disponibles, ce qui permettra par la suite de mettre en place le modèle. Puis, à l'issue du calage, nous obtiendrons les principaux résultats, dont la distribution des perméabilités et, les flux transitant dans le modèle, avec la recharge de la nappe quaternaire par les précipitations. Enfin, le modèle fera l'objet de tests de sensibilité.



..... La région étudiée

Figure n° 1 : Localisation de la région étudiée.

II SYNTHÈSE DES DONNÉES EN VUE DE LA MODELISATION

(d'après la synthèse des ressources en eau du département de Diffa ; C.LEDUC)

1 INTRODUCTION : OBJECTIFS ET BIBLIOGRAPHIE

D'une manière générale, la fiabilité d'une modélisation hydrogéologique dépend avant tout de la quantité et de la qualité des données sur les caractéristiques et le fonctionnement de l'aquifère. La première étape de cette étude consiste donc à rassembler et à faire une synthèse critique des travaux déjà réalisés.

Cette synthèse a déjà fait l'objet d'un rapport par C.LEDUC dans le cadre d'un projet du PNUD : Les ressources en eau du département de Diffa. Tout ce chapitre en est un résumé. La carte géologique dressée par F.PIRARD et, les travaux de GREIGERT, constituent respectivement les documents essentiels pour une bonne compréhension de la géologie et de l'hydrogéologie du MANGA. La liste complète des documents disponibles est décrite en bibliographie.

2 CONTEXTE GEOLOGIQUE

La zone étudiée concerne le Manga, secteur Nigérien de la dépression quaternaire, qui ceinture le lac Tchad (altitude 278 m). La couverture de cette région est en majeure partie sableuse.

Au Sud, de N'guigmi à Mainé-Soroa s'étend la plaine argilo-sableuse du Kadzell. C'est sans doute le secteur où les dépôts quaternaires sont les plus argileux. Elle correspondrait à un fragment de paléolit de la rivière Komadougou.

En continuant, on accède au plateau du Manga. C'est une immense surface sableuse parsemée de cuvettes profondes de plusieurs dizaines de mètres. Son altitude s'élève régulièrement de 330 m vers le lac à 400m au contact du massif du Mounio.

Plus au Nord, les hautes dunes de l'erg du Manga forment un cordon continu allant du Sud-Ouest, à la frontière tchadienne à l'Est. Ce sont de vieilles dunes fixées, orientées N-S à NW-SE, encadrant d'étroites dépressions. A l'Ouest et au Nord les limites du Manga sont marquées par des pointements rocheux que forment le massif granitique du Mounio et, les massifs crétacés du Koutous, de Termit et d'Agadem.

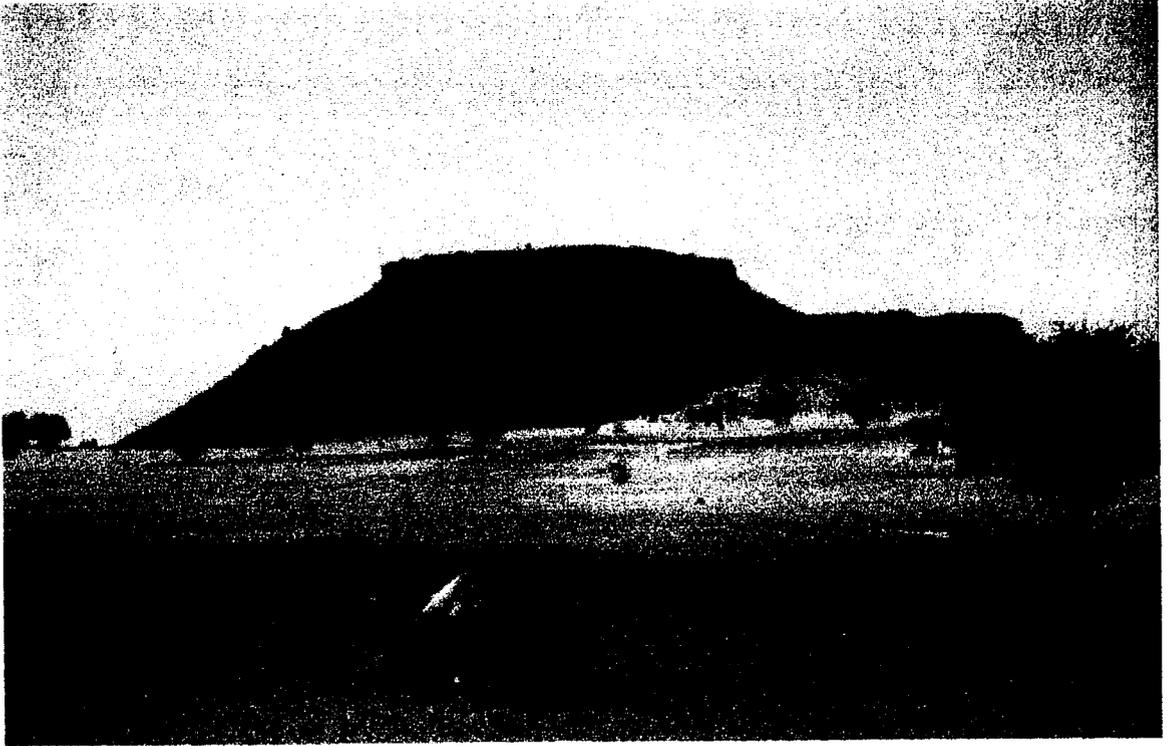


Photo n°1 : massif de Termit.

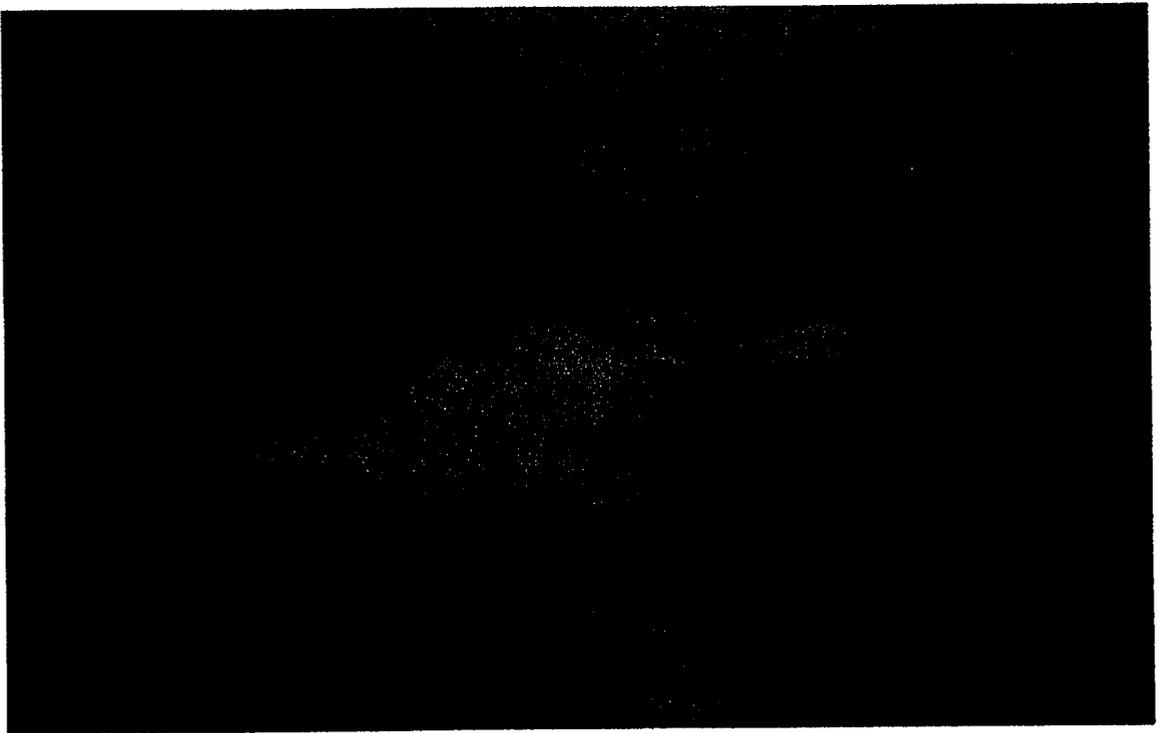


Photo n°2 : les dunes de l'erg du Manga.

3 HYDROGEOLOGIE GENERALE

La région possède essentiellement deux grandes nappes, que supportent les dépôts sédimentaires du Quaternaire et du Pliocène.

3.1 L'aquifère quaternaire

Il est de loin le plus exploité. C'est de lui dont dépend la vie de la région.

Les dépôts du Quaternaire du Manga sont de nature lacustre, fluviale et éluviale. Leurs faciès présentent une très grande variabilité horizontale. Ils correspondent à une alternance de sables fins et d'argiles en bancs épais de quelques décimètres à quelques mètres. Des descriptions de forages révèlent que la fraction sableuse est plus faible dans la région de Mainé-Soroa (50% de sable) qu'aux environs de N'guigmi (70% de sable).

Des niveaux silteux et argileux sont fréquemment décrits en surface et à faible profondeur. Cependant, les rapides variations de faciès limitent considérablement le rôle hydraulique de ces niveaux. La nappe du Quaternaire peut donc être considérée comme libre et, son toit assimilable à la surface topographique.

Les forages profonds qui exploitent la nappe du Pliocène, et les forages pétroliers, ont permis de tracer une carte du mur. Il plonge globalement vers le lac et l'axe du rift (voir figure n°11).

3.2 L'aquifère pliocène

Les terrains du Pliocène n'affleurent pas dans la région. Faute de forage profond, on ignore l'extension de cet aquifère dans la partie Ouest du Manga. Il semblerait absent dans le secteur Nord, tandis qu'au Sud et à l'Est il se prolonge dans les pays limitrophes que sont respectivement le Nigeria et le Tchad. Ces terrains ont un faciès sablo-argileux. La proportion des deux fractions reste indéfinie.

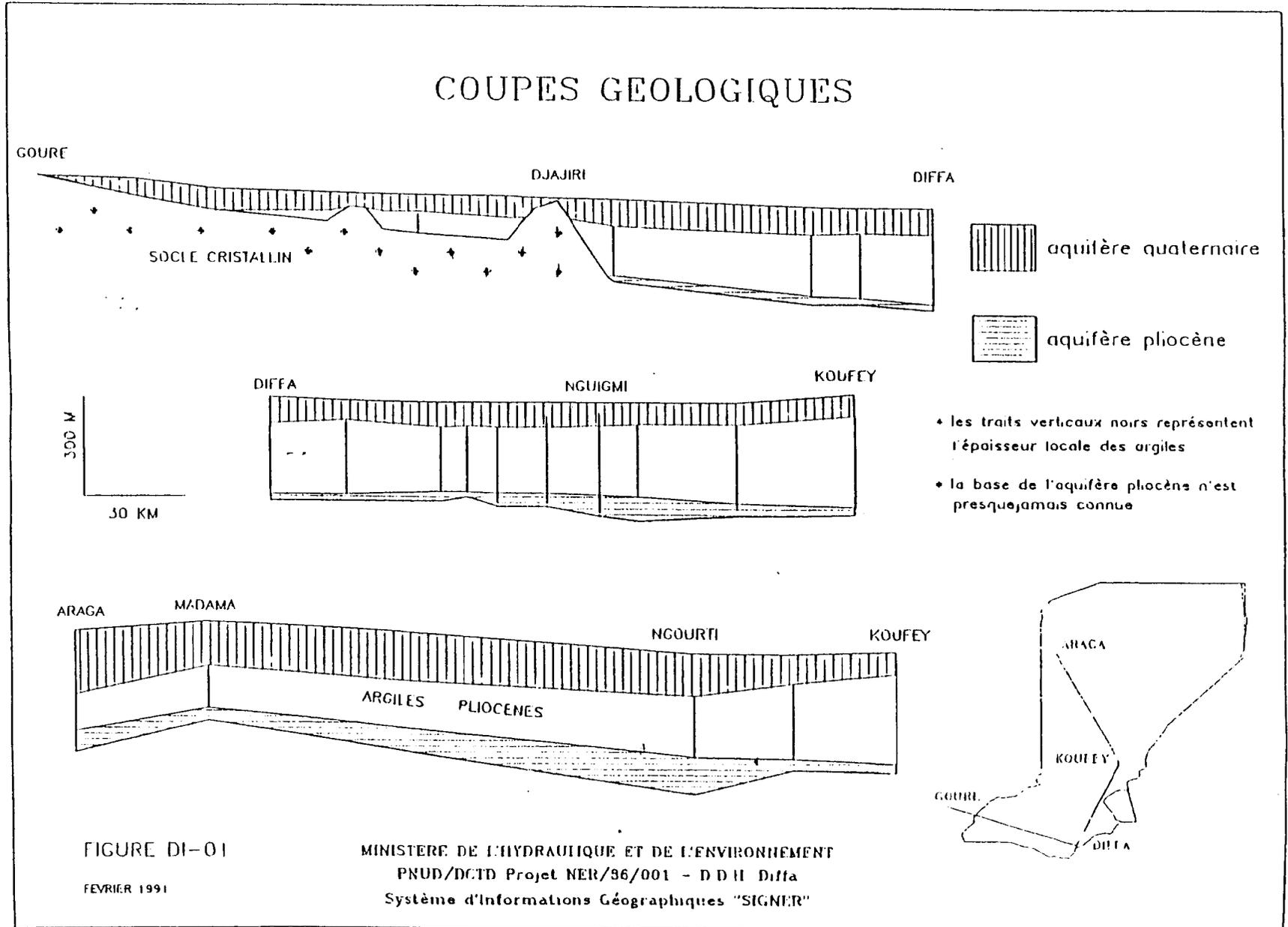
Dans la partie centrale du Manga, le toit de l'aquifère pliocène est rencontré à une profondeur d'environ 300 m soit 20 m au dessus du niveau de la mer. A l'Ouest de 12.3°E, le toit remonte rapidement jusqu'à des altitudes de 80 à 100 m. Les forages qui ont entièrement traversé le Pliocène sont très rares. Le mur de cet aquifère est donc méconnu.

Les observations montrent qu'il est captif dans le Sud du Manga, mais qu'il pourrait être en connexion hydraulique avec l'aquifère quaternaire dans la partie Nord.

3.3 La couche imperméable

Les deux aquifères sont séparés par une série imperméable. Il s'agit d'une puissante formation argileuse du Pliocène.

Figure n°2 : coupes géologiques de la région du Manga.



4 HYDRODYNAMIQUE DE L'AQUIFERE QUATERNAIRE

4.1 Piézométrie

Les données dont nous disposons sur la piézométrie du Quaternaire sont peu nombreuses et discontinues dans le temps. Certaines mesures datent de plusieurs décennies et, pour beaucoup de points nous ne disposons que d'un seul relevé. D'autre part, nos informations se concentrent essentiellement dans le Sud.

Au problème de cette hétérogénéité spatio-temporelle, s'ajoute le fait que nous connaissons très mal l'altitude des ouvrages. En effet, celle-ci est bien souvent extraite des cartes topographiques qui ont été réalisées grâce à des relevés barométriques anciens, et dont l'incertitude peut atteindre plusieurs mètres (Rapport PNUD-UNESCO-CBCT,1972)

Pour l'essentiel les informations viennent du réseau piézométrique de la Division Hydraulique du département de Diffa. Mais d'autres mesures ont été récoltées durant des opérations telles que le projet palmier ou bien par l'A.F.V.P.

Les principales particularités de la nappe peuvent être résumées par les points suivants :

- *phénomènes hydrogéologiques locaux* : ce sont les petites dépressions piézométriques de la région des cuvettes de Mainé-Soroa (voir photo n°3) et, le dôme piézométrique aux abords de la Komadougou, qui est causé par l'infiltration depuis la rivière.
- *phénomène hydrogéologique régional* : il s'agit de la dépression piézométrique du Kadzell. On parle de nappe en creux. Elle atteint 40 m d'amplitude.
- *variabilité annuelle* : la variation annuelle de la nappe en un même point est faible. Elle atteint généralement quelques centimètres, voire au maximum 0.5 à 1 m pour la région des cuvettes, et 2 m pour la bordure de la Komadougou.
- *variabilité interannuelle* : elle semble également faible. Cependant, des successions d'années particulièrement pluvieuses ont provoqué dans le passé des remontées spectaculaires et durables de la nappe. Ainsi Greigert relate une augmentation de 5 m dans les Koramas, au Sud du Mounio, après la seconde guerre mondiale. Dans son rapport (synthèse des ressources en eau du département de Diffa) C.LEDUC conclut qu'apparemment en 15 ans la piézométrie du Manga n'a pas connu de fluctuation

importante sauf, dans la région de Bosso où, la disparition du lac suffit à expliquer une baisse marquée de la nappe. Selon les derniers travaux effectués par l'ORSTOM (1997), un suivi de la dépression du Kadzell depuis les années 1960 montre que les niveaux piézométriques de ce secteur sont stables.

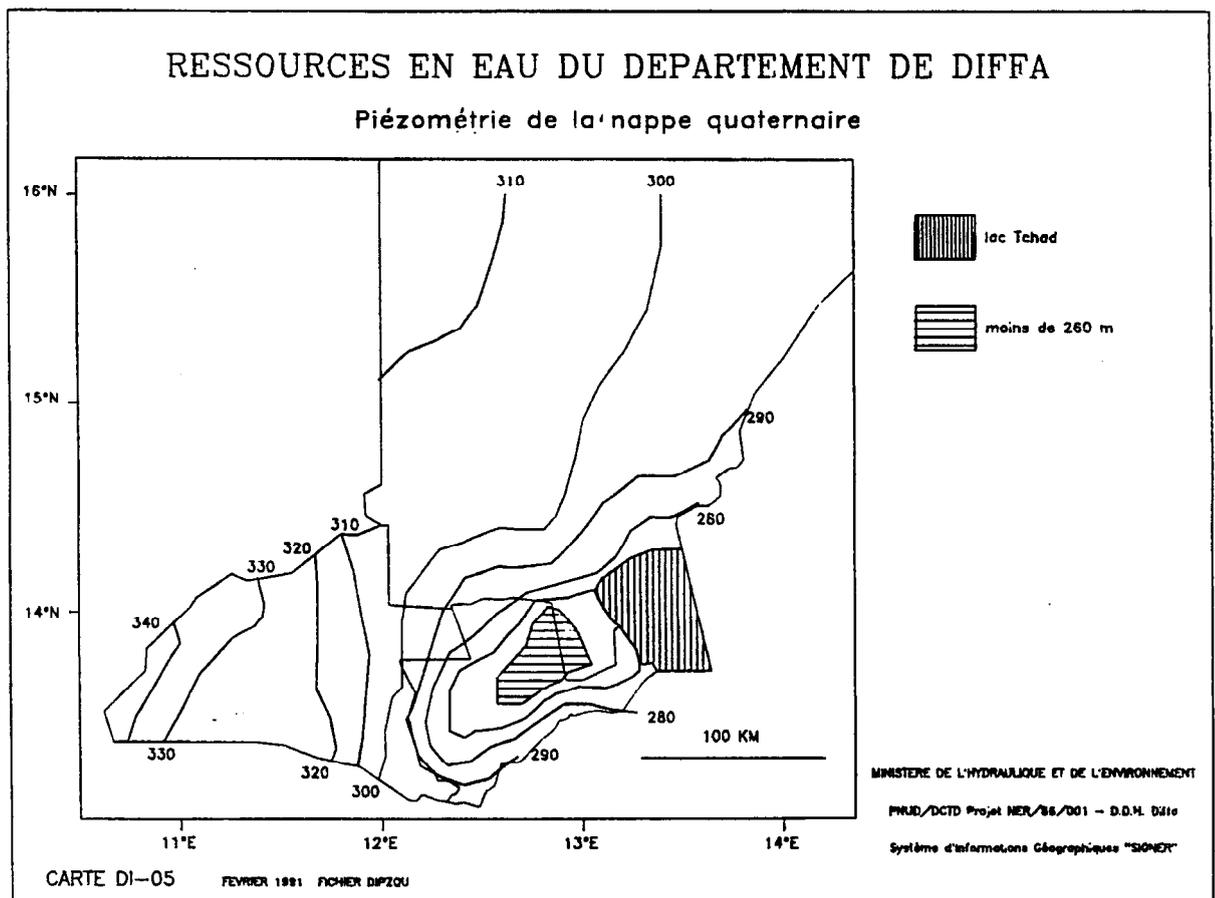


Figure n°3 : piézométrie de la région du Manga

Une carte piézométrique a été tracée à partir de l'ensemble de ces données (voir figure n°3). Elle peut être considérée comme représentative, compte tenu des très faibles fluctuations temporelles du niveau de la nappe. La dépression du Kadzell apparaît clairement sur la carte. Son amplitude est d'environ 40m, ce qui rend sa présence indéniable malgré l'incertitude des mesures. Les écoulements convergent vers le lac Tchad , le Kadzell, et la frontière tchadienne.



Photo n°3 : une des cuvettes de la région de Mainé-Soroa.

4.2 Caractéristiques hydrodynamiques

4.2.1 Transmissivité

4.2.1.1 Pompage d'essai

Peu d'ouvrages ont fait l'objet de pompage d'essai. Ces derniers sont souvent de type, essai par palier de débit. Dans tout le Manga, seulement une vingtaine d'essais sont de durée suffisante pour fournir des valeurs de transmissivité de l'aquifère quaternaire. Elles varient généralement entre 10^{-3} m²/s et 10^{-2} m²/s, la médiane étant de $4,5 \cdot 10^{-3}$ m²/s. Ces données proviennent de trois zones d'extension très limitées (Goudoumaria, Diffa, Dagaya) et ne peuvent donc pas représenter la diversité de l'aquifère (Figure n°4). Pour une dizaine de puits moins profonds testés par des essais plus courts, les valeurs obtenues sont comprises entre $2 \cdot 10^{-4}$ m²/s et $2 \cdot 10^{-3}$ m²/s.

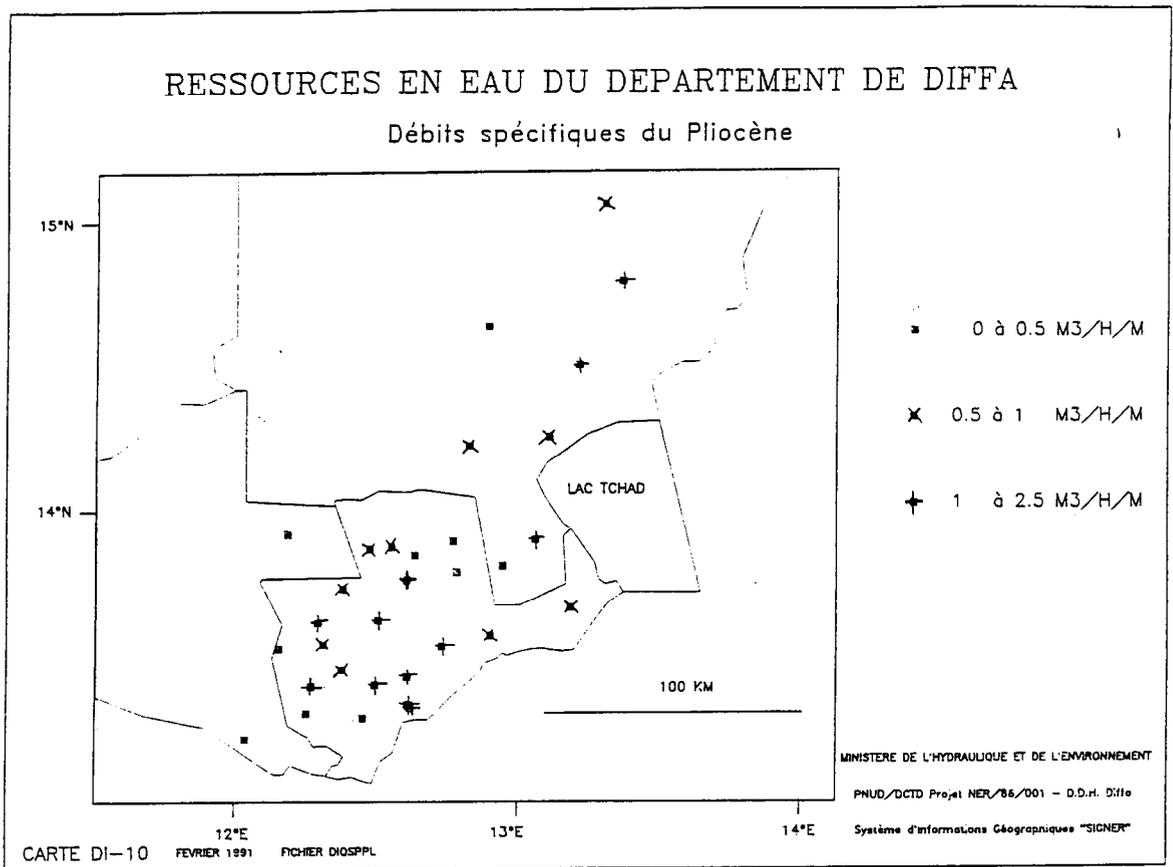


Figure n°4 : carte des débits spécifiques et valeurs de transmissivité.

4.2.1.2 Débits spécifiques

Par contre, de nombreux essais de débit ont été réalisés sur les puits du département de DIFFA (voir figure n°4). La moyenne de ces mesures est de 4,1 m³/h/m avec une médiane de 2,5 m³/h/m. La carte des débits spécifiques ne donne aucune valeur directe de paramètre hydrodynamique. Quelques points nous fournissent à la fois un débit spécifique et une transmissivité mais leur nombre est insuffisant pour définir une corrélation entre débit spécifique et perméabilité.

4.2.1.3 Géologie

Elle décrit la lithologie des roches et leur répartition spatiale. Nous ne disposons comme source d'information que de la carte géologique de reconnaissance du Manga au 1/500000^{ème}

établie par F.PIRARD en 1967 pour le BRGM, et d'une étude sur les paléoenvironnements du Nord-Ouest du lac au Quaternaire (Le Nord-Ouest du lac Tchad au Quaternaire : A.DURAND et al.)

4.2.2 Emmagasinement

Il n'existe qu'une seule valeur connue de porosité pour tout l'aquifère quaternaire du Manga. De plus, cette information ne provient pas d'un essai de pompage, mais simplement d'une interprétation des diagraphies géophysiques du forage de Kangartilo. La porosité proposée pour les horizons sableux de la zone entre 50 m et 95 m de profondeur est de 15,5 %.

5 BILAN EN EAU DE LA NAPPE DU QUATERNAIRE D'APRES LES DONNEES DISPONIBLES

5.1 Introduction

Pour aboutir à une modélisation hydrogéologique fiable, il est nécessaire de connaître avec la plus grande précision possible, l'ensemble des débits soutirés ou apportés à la nappe. Ces débits sont : les échanges au travers des limites internes et périphériques du modèle, la recharge par les précipitations, les prélèvements anthropiques, les échanges avec le réseau hydrographique... . Tous les débits qui pourront être quantifiés de manière classique au cours de cette synthèse des données seront introduits sans modification dans le modèle. Toutefois, si certains flux ne peuvent être déterminés, ils feront alors partie des paramètres à caler. Le bilan en eau à partir des données disponibles est donc une étape importante au cours de laquelle nous nous devons d'être très critiques.

5.2 Les alimentations de la nappe du quaternaire

5.2.1 L'infiltration par les précipitations

La recharge de la nappe par une partie des pluies est confirmée d'une part, grâce à des datations isotopiques montrant qu'il existe des eaux postérieures à 1955 dans des sites significativement éloignés des cours d'eau. Et ce, alors que beaucoup de ces points appartiennent aux zones supposées sans infiltration, c'est à dire au Nord du quatorzième

parallèle. D'autre part, les chroniques piézométriques comportent des fluctuations saisonnières ou interannuelles qui ne sont explicables que par une alimentation pluviale.

L'un des buts de la modélisation est de proposer une valeur de cette recharge par les précipitations. Compte tenu des particularités du climat sur l'ensemble de la région, on peut en effet difficilement accepter une approche classique qui consisterait à faire un bilan hydrique, où le sol est assimilé à un réservoir. Elle fera donc l'objet d'un calage, où nous procéderons par tâtonnement en commençant par des valeurs excessives.

La première modélisation numérique du département de Diffa, entreprise par C.LEDUC en 1992 dans la continuité de la synthèse sur les ressources en eau de ce département, aboutit à une recharge répartie uniformément de 0.3 mm/an.

5.2.2 L'alimentation par la Komadougou

C'est le principal cours d'eau de la région. Son écoulement est temporaire, il débute avec la saison des pluies (première quinzaine de juillet), atteint son maximum en novembre ou décembre et devient nul quelques semaines plus tard. La durée de l'écoulement est très liée aux fluctuations climatiques : 10 mois en 1962-63 et seulement 4,5 mois en 1983-84.



Photo n4 : la Komadougou Yobé en étiage

D'après IWACO 1985, en année "moyenne", la Komadougou Yobé a un débit annuel de 1,296 milliard de m³ au niveau de Gashua, au Nigéria, 526 millions de m³ à Bagara, 397 millions de m³ à Gueskérou et 337 millions de m³ près de son débouché dans le lac Tchad à Yau.

La Komadougou semble alimenter la nappe sur l'ensemble de son parcours. Le volume entrant vers la nappe peut être évalué par les méthodes suivantes :

- Jaugeage différentiel : le chiffre proposé de 37 millions de m³/an dans le rapport IWACO est à considérer avec beaucoup de précaution car le rôle de l'évaporation y est difficilement quantifiable. Ces 37 millions de m³/an se répartissent de manière égale entre le Niger (rive gauche) et le Nigeria (rive droite). En acceptant un tel calcul, il faudrait donc retenir une valeur de 19 millions de m³/an alimentant la nappe quaternaire du coté nigérien.
- Une autre approche peut être tentée, plus analytique mais tout aussi grossière : l'infiltration atteindrait 25 millions de m³/an au total, soit 12.5 millions de m³/an vers le Manga, avec un coefficient de drainance verticale de 10^{-7} s^{-1} , une surface d'échange de 5.10^{+6} m^2 , une différence de charge de 3 m entre l'aquifère et la rivière et un phénomène actif 6 mois par an.
- Un troisième calcul serait basé sur la piézométrie du Kadzell : en supposant que la rivière constitue la seule alimentation de la nappe dans ce secteur, une transmissivité moyenne de $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, un gradient hydraulique de 2.10^{-3} , une longueur du front d'infiltration de 200 km, l'écoulement depuis la Komadougou vers le Nord (nappe quaternaire du Manga) serait de 12,5 millions de m³/an.

Malgré toute l'incertitude qui pèse sur ces chiffres obtenus de trois manières très différentes, l'ordre de grandeur reste le même. Sans autre possibilité de préciser ces estimations, le chiffre de 12 millions de m³/an peut être retenu pour l'alimentation du Manga par la Komadougou.

5.2.3 Le lac Tchad

La partie nigérienne du lac Tchad appartient à la cuvette Nord de ce lac. Elle est alimentée seulement par la Komadougou (qui représente moins de 1% du total des apports) et le débordement des eaux de la cuvette Sud.

Le fond du lac, dans sa partie Nord, est à une altitude moyenne de 278 m ; il peut s'abaisser jusqu'à 274 m. Les niveaux du lac, mesurés ou reconstitués par l'ORSTOM, ont connu des fluctuations significatives au cours des cents dernières années entre un minimum de 278 m et un maximum probablement supérieur à 284 m. La baisse constatée à partir du milieu des années soixante a provoqué la disparition totale des eaux au Niger à plusieurs reprises ; la dernière année où le lac a atteint le territoire nigérien est 1988. Le lac est donc actuellement asséché sur le territoire nigérien. Ce phénomène avait déjà été observé en 1908, mais la phase actuelle est nettement plus critique par sa durée et son intensité.

Malgré la faible perméabilité des argiles qui tapissent son fond, le lac doit jouer un rôle hydraulique important, de part sa grande superficie. Si l'on en croit les cartes piézométriques dressées précédemment, on trouverait autour du lac une série de dômes et de creux indiquant qu'il agit en drainage ou en alimentation de la nappe quaternaire selon les secteurs.

La baisse du niveau du lac se traduit par un moindre apport le long du Kadzell et par une augmentation de l'évaporation sur toute la zone.

Pour la région concernée par la présente étude, la bordure du Kadzell doit constituer, sur un front d'une cinquantaine de kilomètres, la seule zone d'apport depuis le lac vers la nappe. En retenant un gradient hydraulique de 6.10^{-4} et une transmissivité de 10^{-3} m²/s, le volume provenant de la zone du lac est inférieur à un million de m³/an.

5.2.4 Echanges entre les aquifères quaternaire et pliocène

5.2.4.1 Dans le Sud du département

Dans toute la partie Sud du Manga, la nappe pliocène est à une charge plus élevée que la nappe quaternaire. Ceci permet un échange par drainance entre ces deux aquifères, entraînant un départ d'eau du Pliocène vers la surface.

Ce phénomène touche une zone de plus de 20.000 km². il pourrait être particulièrement important dans la région du Kadzell où le décalage entre les deux nappes atteint une cinquantaine de mètres.

Si on accepte une couche imperméable de 200 m d'épaisseur avec une perméabilité verticale de 5.10^{-11} m/s et une différence de charge variant entre 5 et 50 m, on aboutit à une estimation du volume échangé de l'ordre de 4 millions de m³/an. Mais ce chiffre retenu pour la drainance, $2,5.10^{-13}$ s⁻¹, est tout à fait hypothétique.

5.2.4.2 Dans le Nord du département

Au Nord du Manga, vers le secteur Termit-Agadem, la séparation entre Pliocène et Quaternaire semble beaucoup moins nette qu'au Sud : la diminution sensible de la fraction argileuse autorise les échanges entre les deux aquifères. De plus, la similitude des niveaux piézométriques, environ 320 m, pourrait indiquer une jonction hydraulique.

5.2.5 Nappes latérales

Quatre ensembles hydrogéologiques sont susceptibles de participer à l'alimentation de l'aquifère quaternaire. Il s'agit, en allant du Sud-Ouest au Nord-Est, des grès crétacés du Koutous, des grès crétacés de Termit, des sables et graviers plio-quaternaires d'Oussini et des grès crétacés d'Agadem.

Dans tous les cas, les estimations des déversements de ces nappes vers le Manga sont très approximatives ; les régions en question ne comportent que très peu de points d'observation et les calculs présentés ci-après ne peuvent être que des ordres de grandeur.

Dans le Koutous, la partie orientale de la nappe présente un gradient moyen de 0,8 pour mille. Les perméabilités étant réputées basses, le chiffre de 10^{-4} m²/s peut être retenu pour la transmissivité. Avec une largeur utile d'une quarantaine de kilomètres, ces grès crétacés fourniraient environ 0,1 million de m³/an.

Entre le Koutous et le massif de Termit, une épaisse série argileuse ne doit contribuer que très modestement, si ce n'est pas du tout, à l'alimentation du Quaternaire du Manga. Cet apport est au maximum égal à celui du Koutous.

L'apport des grès de Termit est impossible à évaluer : certains puits sont secs alors qu'il existe des lignes de sources. Aucune estimation sérieuse n'est réalisable. Nous admettrons qu'il n'y a pas d'échange entre ces grès et l'aquifère quaternaire, l'erreur alors commise n'est pas très grave étant donné la faible surface d'échange.

La nappe d'Ounissoui est très probablement en continuité avec l'aquifère du Manga. Si l'on retient une largeur de 175 km, un gradient de 0,4 pour mille et une transmissivité de 10^{-3} m²/s, le volume transitant vers le Sud serait d'environ 2 millions de m³/an.

Pour les grès d'Agadem, comme pour le massif de Termit, le manque de données interdit toute évaluation des apports. Nous admettrons comme nul l'apport du massif d'Agadem vers la nappe du Quaternaire.

5.3 Les prélèvements

5.3.1 Les prélèvements anthropiques

5.3.1.1 Alimentation humaine

Les prélèvements destinés à la consommation humaine sont estimés à 1,3 million de m³/an pour le département de DIFFA. Ils suivent la répartition de la population, et sont donc largement concentrés dans le Sud.

5.3.1.2 Elevage

On estime que l'élevage représente une consommation de 6 millions de m³/an.

5.3.1.3 Irrigation

L'irrigation est plus difficile à quantifier :

- les pompages dans la nappe ne durent environ que deux mois et le reste de l'année l'eau provient de la Komadougou.
- la part de l'irrigation pouvant s'infiltrer et participer à la réalimentation de la nappe est inconnue.

A raison de 300 m³/j par unité de 5 hectares pendant deux mois de l'année, elle peut être estimée à 4,3 millions de m³/an.

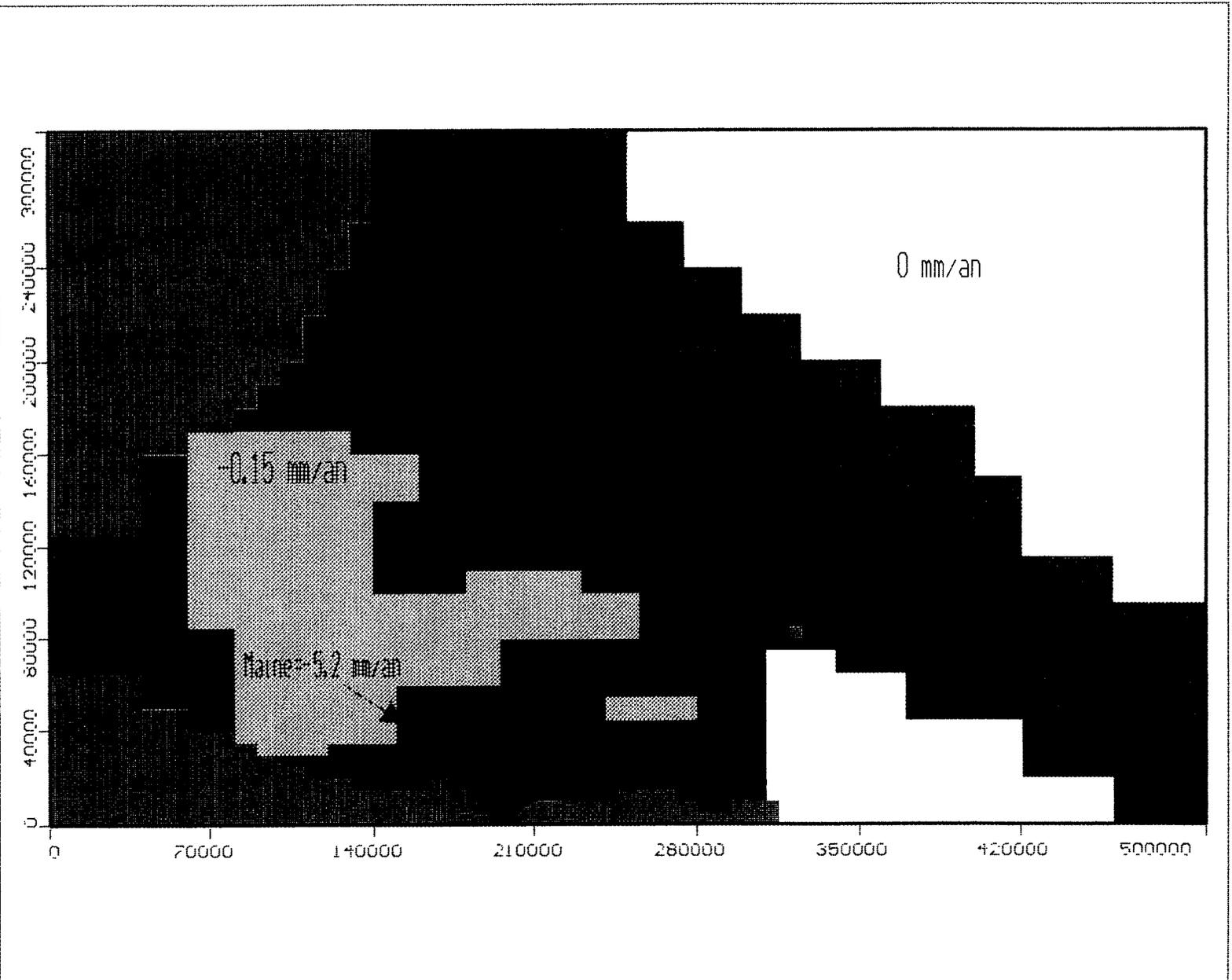


Figure 5 Répartition des prélèvements anthropiques

5.3.2 Ecoulement vers le lac

L'ensemble des relevés piézométriques indique un écoulement de la nappe du Manga vers le lac Tchad, excepté au niveau du Kadzell où, comme nous l'avons vu, l'écoulement se fait du lac vers le Kadzell.

5.3.3 Evaporation dans la zone du Kadzell

Toute la région du Kadzell est caractérisée par une dépression piézométrique. Les sédiments de cette région correspondent aux dépôts d'un paléolit de la Koumadougou. Ils sont de nature sablo-argileuse.

Nous savons également qu'en milieu non saturé la force de capillarité est d'autant plus forte que la granulométrie est faible. Il est donc possible qu'une évaporation, aussi infime soit elle, ait lieu à quelques dizaines de mètres de profondeur.

D'autre part, les premiers mètres du sol sont des dépôts argileux, ils ont eux aussi une très mauvaise perméabilité. La plupart de la pluie ne s'infiltré pas.

5.3.4 Evaporation dans la région du lac

Comme nous venons de le voir la partie Nigérienne du lac Tchad est asséchée depuis 1988. Sur toute cette zone la nappe est très proche de la surface. Les premiers mètres du sol sont constitués par des dépôts lacustres à très faibles perméabilités. De telles conditions favorisent l'évaporation au niveau de la surface de la nappe. Celle-ci est difficilement estimable.

5.3.5 Ecoulement vers la frontière tchadienne

Les relevés piézométriques établis au Niger montrent un écoulement de la nappe du Manga vers les Pays Bas tchadiens. Pour une largeur de 150 km, un gradient de $1,5 \cdot 10^{-4}$ et une transmissivité de $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, le volume serait d'environ 2 millions de m^3/an .

5.4 Conclusion du bilan en eau de la nappe du quaternaire d'après la synthèse des données.

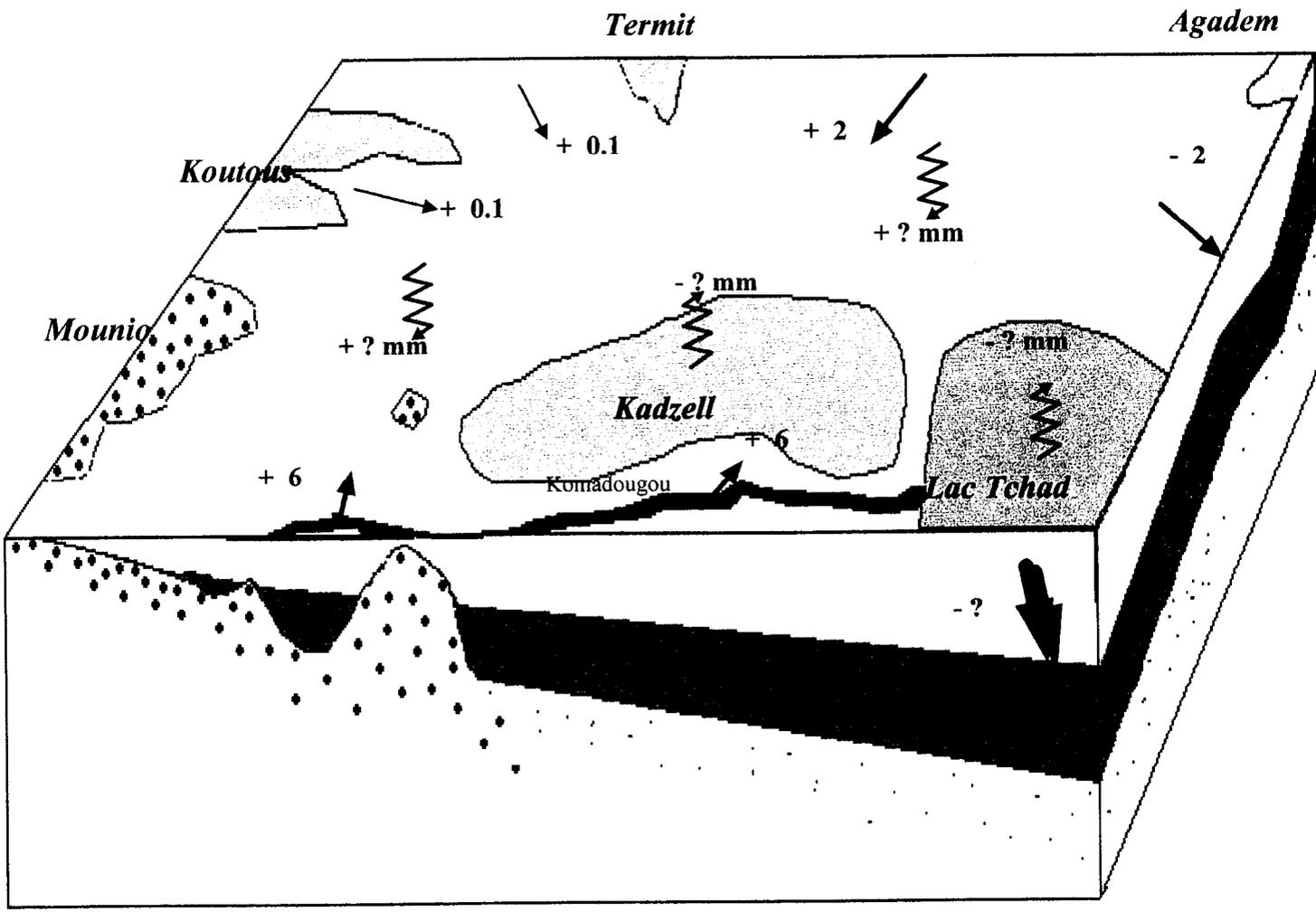
Les prélèvements anthropiques se distinguent des débits naturels. Notre connaissance des

premiers est en effet bien meilleure, ils seront donc admis comme fiables. Il n'en est pas de même pour certains débits naturels que nous ne pouvons approcher que très approximativement. Il serait, par exemple, extrêmement délicat de proposer un ordre de grandeur de la recharge. Nous rechercherons donc, non seulement une distribution spatiale des perméabilités, mais aussi un schéma de répartition des débits naturels. La recharge, les apports par la Komadougou, les exfiltrations sur le Kadzell et le lac Tchad seront donc estimés lors du calage par tâtonnement.

DEBITS ENTRANT	DEBITS SORTANT
infiltration par la pluie : <i>à déterminer</i>	écoulement vers le Tchad : 2.10 ⁶ m ³ /an
apports par les nappes latérales : - grès du Koutous=0,1.10 ⁶ m ³ /an - nappe d'Oussini=2.10 ⁶ m ³ /an - entre le massif de Termit et du Koutous=0,1.10 ⁶ m ³ /an	prélèvements anthropiques :12.10 ⁶ m ³ /a dont : 1.4 10 ⁶ m ³ /an pour l'alimentation humaine. 6 10 ⁶ m ³ /an pour l'élevage. 4.6 10 ⁶ m ³ /an pour l'irrigation.
Apports par la Komadougou : 12*10 ⁶ m ³ /an ?	

Tableau n°1 : les termes du bilan en eau d'après la synthèse des données.

Figure n°6 : FLUX TRANSITANT DANS LA NAPPE QUATERNAIRE DU MANGA D'APRES LA SYNTHÈSE DES DONNÉES.



LEGENDE :

-  EVAPORATION en mm/an
-  INFILTRATION par la pluie en mm/an
-  DEBITS TRANSITANT en million de m³/an
-  Aquifère du Quaternaire : sables et argiles
-  Couche imperméable : argiles du Pliocène
-  Aquifère du Pliocène : sable et argile
-  Grès du Crétacé
-  Granite

6 CONCLUSION DE LA SYNTHÈSE DES DONNÉES

A l'issue de cette synthèse, il apparaît que les données disponibles sont rares pour un territoire dont la superficie couvre environ un quart de la France. De plus les informations sont inégalement réparties entre le Nord, d'accès difficile, et le Sud qui est doté des rares infrastructures de la région. Nous connaissons donc trop peu la nappe à laquelle nous nous intéressons. Aussi, au premier abord, il semble que les résultats issus de la modélisation entreprise ne pourront fournir que des ordres de grandeurs, et seront fortement dépendants des hypothèses émises au cours de la démarche de modélisation.

III LA MISE EN PLACE DU MODELE

1 LES OBJECTIFS ET LES LIMITES

1.1 Les objectifs

Nous avons choisi de ne pas représenter la nappe du Pliocène et de concentrer nos travaux sur l'aquifère du Quaternaire. Le modèle mis en place ne concerne donc que la nappe du Quaternaire, d'abord parce qu'elle constitue la principale ressource en eau de la région et enfin parce que nous ne possédons que très peu d'informations sur la nappe du Pliocène.

Le premier objectif de cette modélisation est une quantification des débits naturels transitant dans la nappe quaternaire. Parmi ces flux, la recharge est le terme essentiel du bilan en eau que nous cherchons à estimer. C'est elle qui permettra, par exemple, une estimation des ressources à moyen terme.

Par ailleurs, nous tenterons de déterminer la distribution et l'ordre de grandeur des transmissivités dans le Manga.

L'ensemble de ces résultats (caractéristiques hydrodynamiques, débits transitant) sera obtenu à l'issue du calage. Ils permettront de proposer un schéma global du fonctionnement de l'aquifère quaternaire, et notamment de la dépression piézométrique du Kadzell.

Derrière ces objectifs scientifiques se cachent des préoccupations. Quelles sont les ressources en eau, et quelle sera l'évolution de la nappe à moyen terme ? Quelle est la dépendance de cette nappe vis à vis des fluctuations climatiques ? Ou autrement dit, quelle est sa sensibilité aux variations de la recharge et du réseau hydrographique?

1.2 Les limites

Le manque de données et la mauvaise qualité de celles-ci sont les principales restrictions à cette modélisation. Ainsi, il est évident que les valeurs issues du calage ne fourniront que des ordres de grandeurs.

Ajoutons également que ce modèle est régional. Il représente les écoulements dans leur globalité et ne peut en aucun cas décrire les impacts que pourraient avoir d'éventuels aménagements locaux. Ceux-ci devraient faire l'objet d'un modèle local à une échelle plus restreinte.

Enfin, les nappes en creux, telles que le Kadzell, restent sujettes à discussion. Si la présente modélisation peut permettre de valider le schéma hydraulique que nous proposons : faibles apports latéraux accompagnés d'une légère évaporation. Cela ne veut pas pour autant dire que ce soit le seul possible. Une autre solution serait par exemple; un état transitoire, dans lequel l'augmentation générale de la piézométrie de la nappe (par exemple due à des fluctuations climatiques ou du niveau eustatique), se produise avec un grand retard dans les zones à très faibles perméabilités.

2 LES MOYENS : LE PROGRAMME DE MODELISATION ET SES CARACTERISTIQUES MATHÉMATIQUES.

2.1 Le modèle retenu et les équations fondamentales utilisées.

Le logiciel visualMODFLOW a été employé pour la modélisation. C'est un modèle déterministe. Il est basé sur l'équation de l'écoulement de l'eau en milieu poreux (équation de diffusivité), et sa résolution par la méthode des différences finies.

Equation aux dérivées partielles de l'écoulement des eaux souterraines en trois dimensions à densité constante et en milieux poreux (équation de diffusivité).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

avec

K_{xx} , K_{yy} et K_{zz} sont les conductivités hydrauliques suivant les axes x, y, et z.

h la charge.

W les débits injectés ou pompés.

S_s l'emmagasinement spécifique.

t le temps.

2.2 Discrétisation spatiale.

La résolution de l'équation de diffusivité nécessite une discrétisation spatiale. La figure 7 décrit la discrétisation spatiale d'un système aquifère par un réseau de blocs appelés mailles et, dont la localisation est donnée en terme de lignes, de colonnes, et de couches.

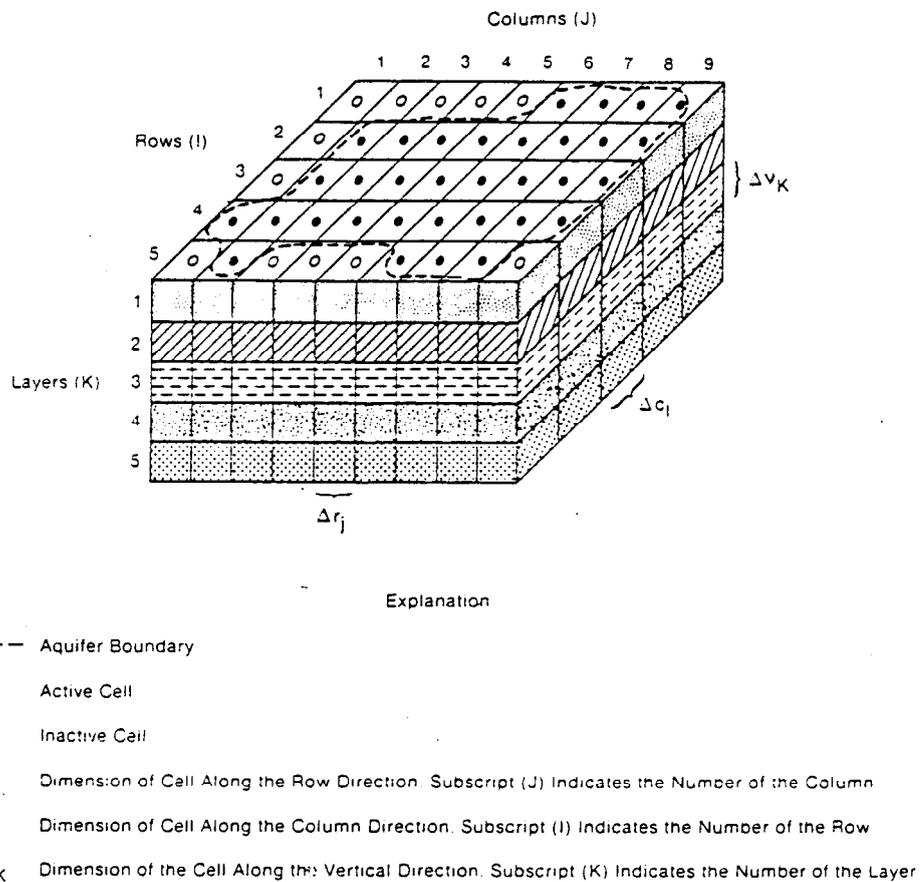


Figure n°7 : schéma théorique de la discrétisation spatiale d'un aquifère.

Pour chaque maille, le calcul se fait en un point appelé noeud. Ici la schématisation retenue est celle des noeuds centrés (figure n°8).

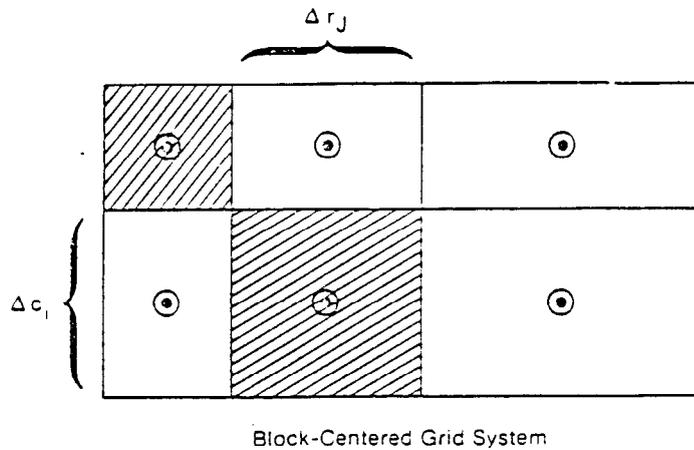


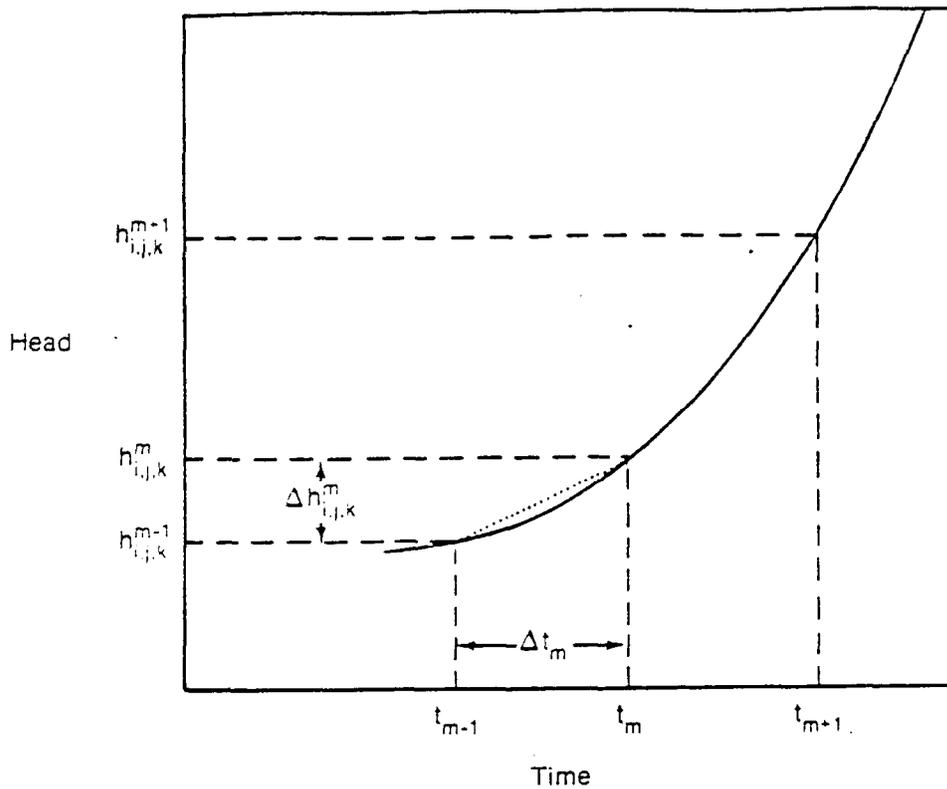
Figure n°8 : Discrétisation spatiale avec noeuds centrés.

2.3 Discrétisation temporelle.

En régime transitoire, le temps est pris en compte dans l'équation aux dérivées partielles de l'écoulement souterrain. Ainsi, dans la formulation aux différences finies, la discrétisation du temps dans un domaine continu est nécessaire. La figure n°9 montre un historique des charges au noeud (i,j,k) qui sont respectivement $h_{i,j,k}^m$ et $h_{i,j,k}^{m-1}$. L'approximation de la dérivée de la charge par le temps devient donc, dans l'intervalle de temps $[t_{m-1} \text{ à } t_m]$:

$$\left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \right)^m = \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}}$$

Il s'agit d'une approximation par arrière, "backward difference", où l'approximation de $\frac{\Delta h}{\Delta t}$ est obtenue à partir du temps précédent.



Explanation

- t_m time at end of time step m
- $h_{i,j,k}^m$ head at node i,j,k at time t_m
- Backward difference approximation to slope of hydrograph at time t_m

figure n°9 : principe de la discrétisation temporelle et historique des charges

2.4 Le type de maillage.

La géométrie du maillage est dans le cas présent basée sur des mailles rectangulaires à tailles variables, que l'on ajuste par lignes et colonnes entières.

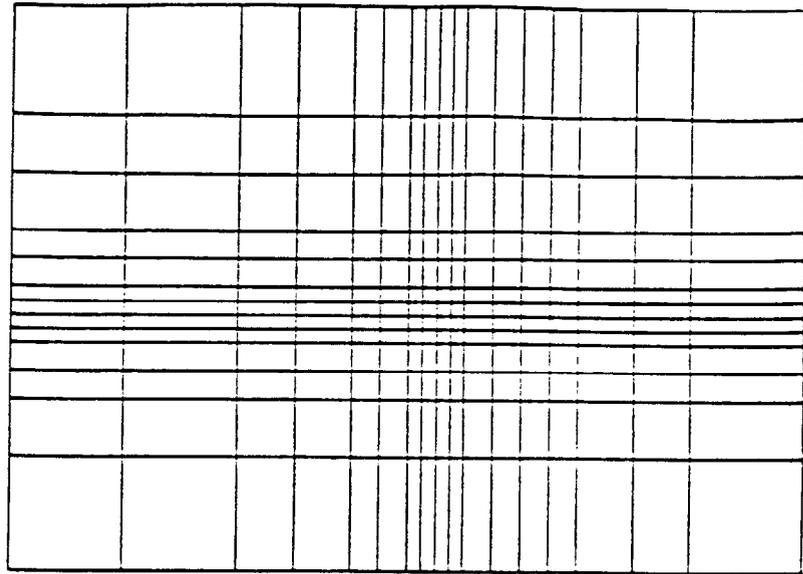


Figure n°10 : Maillage rectangulaire à taille variable.

3 LA MISE EN PLACE DU MODELE REGIONAL DE LA NAPPE QUATERNAIRE DU MANGA

3.1 Les schématisations hydrauliques adoptées.

Le modèle permet des calculs pour des aquifères multicouches. Dans le cas de la nappe quaternaire du Manga, nous supposerons dans une première approche, l'aquifère quaternaire comme totalement isolé de l'aquifère pliocène par la formation imperméable. En définissant les objectifs nous avons choisi de concentrer nos efforts uniquement sur la nappe du quaternaire. Seul l'aquifère quaternaire est donc représenté, le modèle est monocouche.

Il est possible de simuler des écoulements en trois dimensions. Ce serait par exemple utile pour représenter l'avancement d'un tunnelier dans un massif. Le tunnel engendre alors une dépression des charges avec une géométrie tridimensionnelle très accentuée au voisinage de la galerie. Dans le Manga, de tels écoulements n'ont pas lieu. Dans ce cas, ces derniers peuvent à juste titre être considérés comme sub-horizontaux. La schématisation hydraulique adoptée est alors celle de Darcy-Dupuits : les pertes de charges sont proportionnelles aux débits et la distribution des pressions dans chaque couche est hydrostatique (écoulements sub-horizontaux).

3.2 Le maillage

Le modèle couvre une superficie de 124 500 km². Pris dans son ensemble, c'est à dire en incluant quelques cellules inactives, il forme un rectangle de 300km de large selon une direction NW-SE, par 500km de long selon une direction NE-SW. Les plus grandes mailles sont des carrés de 40km de coté. Elles sont au Nord, là où nous n'avons que peu d'informations. Cependant, quand les données disponibles le permettent, et que les problèmes posés le rendent nécessaire (zone d'écoulement complexe, besoin d'informations précises, etc...) le maillage se doit d'être plus fin. Ainsi, nous avons construit des petites mailles carrées de 5km de coté en bordure de la Komadougou et sur le Kadzell.

Notre modèle est donc de grande dimension, on parle de modèle régional. Les interprétations tirées de cette modélisation seront globales. Elles fourniront des ordres de grandeur et permettront de schématiser le fonctionnement de l'aquifère quaternaire.

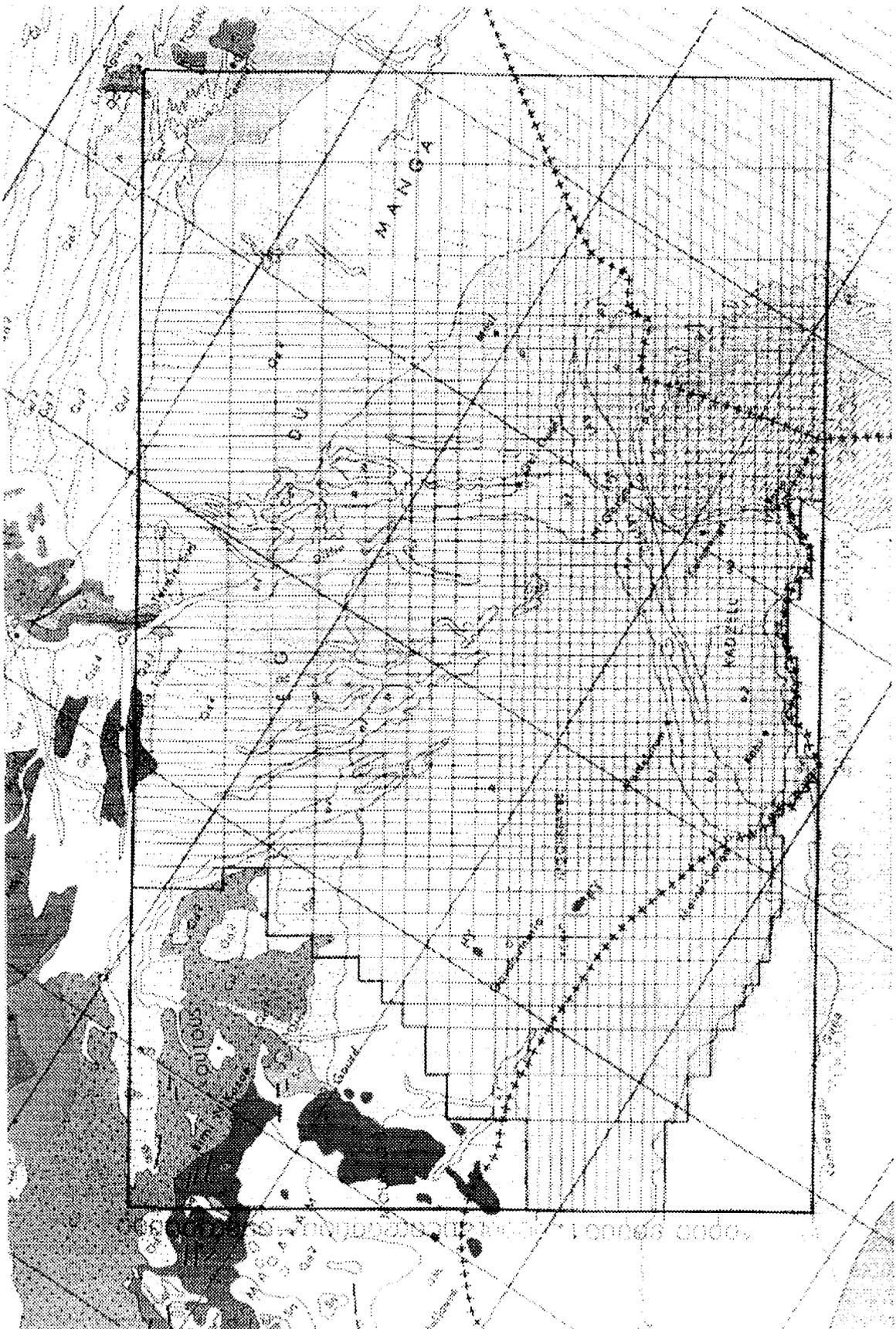


Figure n°11 : le maillage du modèle et son positionnement.

3.3 Les conditions aux limites : description géographique et hydraulique

La nature des limites est fondamentale. Elle se doit de refléter une réalité hydrogéologique et de ne pas trop contraindre le modèle.

Il n'existe pas dans le modèle du Manga de conditions aux limites internes, toutes les conditions aux limites imposées se situent en effet en périphérie du modèle. L'ensemble de ces limites sont à flux imposé. Elles correspondent ainsi au fonctionnement hydrogéologique, et nous permettent de mieux contrôler les débits entrant et sortant. Ces conditions aux limites externes sont :

- La Komadougou qui constitue une grande partie de la limite Sud-Ouest. Dans sa partie aval elle joue le rôle de frontière entre le Niger et le Nigeria. Les relevés de terrain ne montrent pas clairement une connexion hydraulique entre le réseau hydrographique et la nappe. Une condition aux limites de type Fourier où la rivière serait assimilée à un potentiel imposé est donc à exclure. Dans ce cas, la solution la plus simple et la plus sûre est de représenter la Komadougou par une limite de flux. Ce qui permettra par ailleurs un meilleur contrôle des débits entrant. L'infiltration des eaux de surface de la Komadougou est donc imposée par des débits entrant sur les mailles représentant cette rivière.
Les relevés piézométriques montrent que tout le long de son cours cette rivière est perpendiculaire aux isopièzes. Elle constitue en cela une limite à flux nul. Au niveau de la Komadougou, il n'y a donc pas d'échange d'eau entre le Niger et le Nigeria. D'autre part, le volume d'eau qui s'infiltré depuis la rivière vers la nappe se répartie de manière égale vers les deux rives. On considère donc que sur le débit total qui s'infiltré de la rivière vers la nappe, une moitié alimente l'aquifère quaternaire du Manga, alors que l'autre moitié alimente l'aquifère quaternaire du Nigéria.
- Le lac Tchad forme le reste de la limite sud. Il est à flux sortant imposé. Il simule ainsi des écoulements souterrains de la nappe vers le lac puis les Pays Bas tchadiens.
- La limite Nord repose sur les massifs d'Agadem, de Termit et du Koutous. Elle est à débit imposé entrant. Entre Agadem et Termit elle représente les échanges entre la nappe d'Oussini et du Manga, qui sont en continuité hydraulique.
- De même, la limite Ouest longe les bordures des massifs du Koutous et du Mounio. Elle est à débit imposé entrant.

- La limite Est est à cheval sur le Niger et le lac Tchad. Les relevés piézométriques traduisent un écoulement des eaux souterraines vers le Tchad. C'est une limite à débit imposé sortant.

3.4 La géométrie du réservoir

Elle est définie par le volume compris entre le toit et le mur. Elle est donc guidée par la géologie. Les limites latérales décrites dans le chapitre précédent coupent parfois arbitrairement ce volume.

Il s'agit pour nous de paramètres fixes, que nous ne recherchons pas à caler. Nous devons cependant rester très attentifs. Comme la transmissivité est une fonction directe de l'épaisseur de l'aquifère, les écoulements en dépendent également.

3.4.1 Le toit :

Même s'il est fréquent de rencontrer des niveaux silteux en proximité de la surface, la faible extension géographique de ceux-ci limite considérablement leur rôle hydraulique. La nappe peut donc être considérée comme libre. Le toit de l'aquifère quaternaire correspond alors à la surface du sol. Cependant, Le toit a été fixé arbitrairement à une cote de 360 m car nous n'avons que peu de données précises sur la topographie. Ceci est sans importance hydraulique car comme nous venons de le montrer, notre nappe est libre. Dans le cas d'un aquifère recouvert par une couche imperméable, celui-ci devient captif lorsque les niveaux piézométriques dépassent la cote du toit. Nous n'avons pas ici à tenir compte de ce phénomène. Par ailleurs, nous avons choisi une cote élevée pour éviter l'apparition de lignes de sources.

3.4.2 Le mur :

L'aquifère quaternaire repose sur les séries argileuses du Pliocène. Le mur est donc défini par le passage entre ces argiles et les sables argileux du Quaternaire. La cote du mur a été relevée lors de forages profonds. On constate un relèvement progressif vers le Nord et plus abrupt vers l'Ouest.

Le mur de l'aquifère Quaternaire

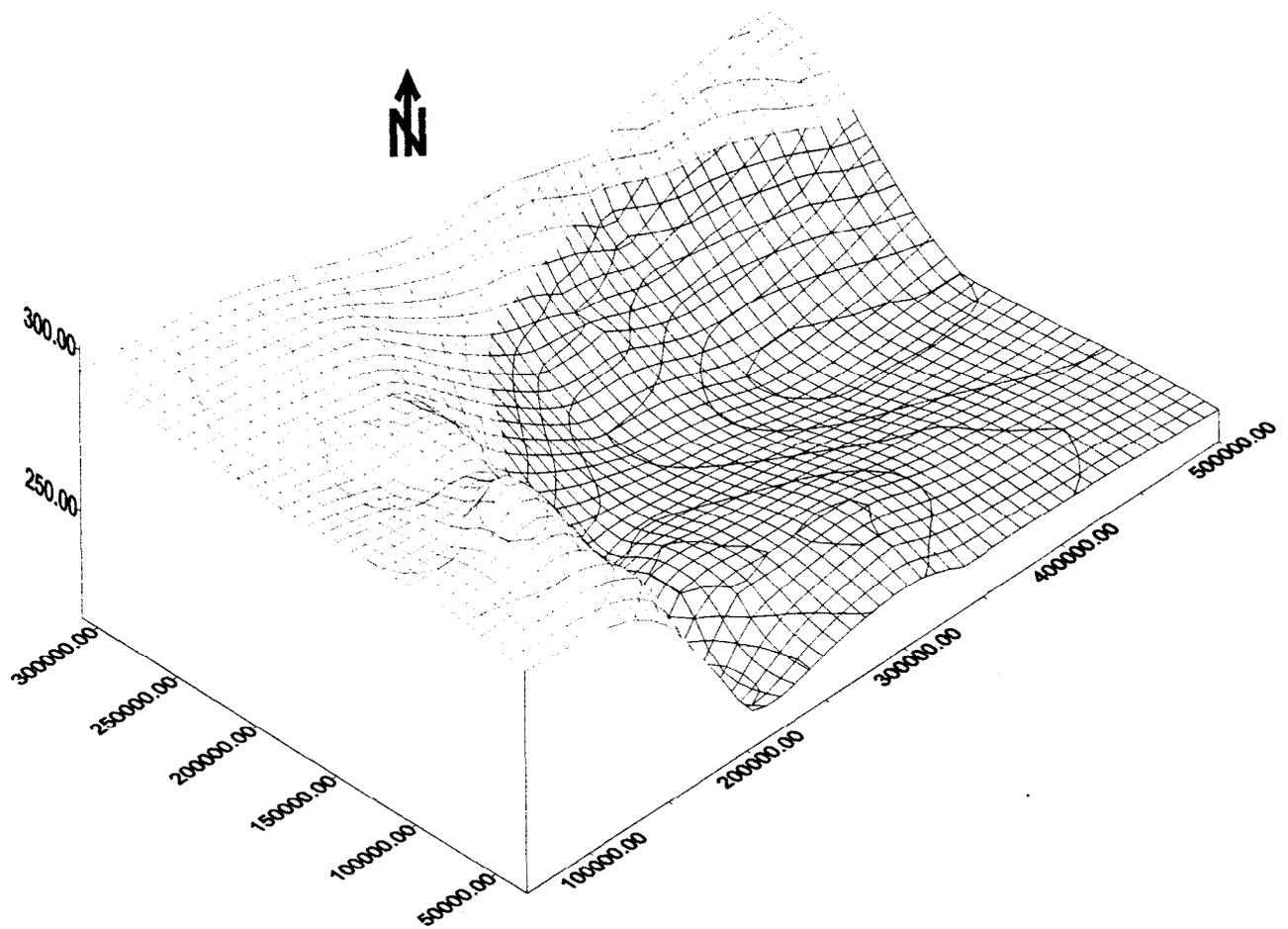


Figure n° 10 :

IV^{eme} PARTIE : RESULTATS DU CALAGE

ETAT ACTUEL (pas de Lac) EN REGIME PERMANENT

Le calage a été obtenu par tâtonnement en recherchant le meilleur compromis sur les perméabilités. Nous avons également procédé au calage de certains débits naturels que sont la recharge, l'alimentation par la Komadougou, et l'exfiltration au niveau du Kadzell et du lac Tchad.

Le calage s'est déroulé en deux étapes. Dans un premier temps, pour plus de facilité, nous avons travaillé en considérant la recharge par les précipitations comme répartie uniformément sur l'ensemble de la région. Puis dans un deuxième temps nous avons décidé d'affiner notre travail et donc de considérer que l'infiltration augmente du Nord vers le Sud, ce qui paraît beaucoup plus proche de la réalité (climat saharien au Nord et sahélien au Sud).

1 ETAT PERMANENT ET PIEZOMETRIE DE REFERENCE

Les variations des niveaux piézométriques au cours de l'année sont très faibles (de l'ordre du centimètre), pour la majeure partie de la nappe. Seule la région des cuvettes de Mainé-Soroa et la bordure de la Komadougou présentent une variation annuelle importante, pouvant atteindre un à deux mètres. La variabilité spatio-temporelle de la piézométrie peut donc être considérée comme faible. D'autre part, les écoulements de la nappe sont très lents, son inertie est donc importante. Ces deux faits justifient un travail en régime permanent basé sur une piézométrie et des débits annuels moyens.

Une carte piézométrique (figure n°3) a été dressée à partir d'une cinquantaine de points concentrés vers le Sud et dispersés vers le Nord.

Les relevés ne sont pas synchrones, ils s'étalent dans le temps. Ils vont de 1960 à 1990 pour le secteur Nord, ce qui peut rester acceptable compte tenu de la très faible variabilité à moyen terme de ce secteur. Pour la région Sud (Lac Tchad, Kadzell, bordure de la Komadougou...), les mesures sont beaucoup plus rapprochées dans le temps. Cette carte constitue la piézométrie de référence, c'est à dire celle que nous avons cherchée à reproduire lors du calage.

2 RESULTATS DU CALAGE POUR UNE RECHARGE UNIFORME

2.1 Piézométrie observée et piézométrie simulée

La Figure n°13 montre ensemble la piézométrie observée sur le Manga (piézométrie de référence) et, la piézométrie simulée obtenue à l'issue du calage. Dans son ensemble, la piézométrie simulée reproduit correctement les observations. La dépression du Kadzell y est clairement représentée.

Cependant, l'écart entre l'observé et le simulé atteint parfois plusieurs mètres. Une difficulté est par exemple apparue pour caler la bordure Nord du Kadzell et, la divergence entre l'isopièze 310 et l'isopièze 300. Toutefois, compte tenu du faible nombre de mesures, de leur étalement dans le temps et, de l'incertitude sur la cote des ouvrages, nous ne pouvons accorder qu'une confiance modérée à la carte piézométrique de référence. C'est pourquoi nous considérons que le calage obtenu est satisfaisant dans son ensemble, même s'il présente certaines différences avec la piézométrie de référence.

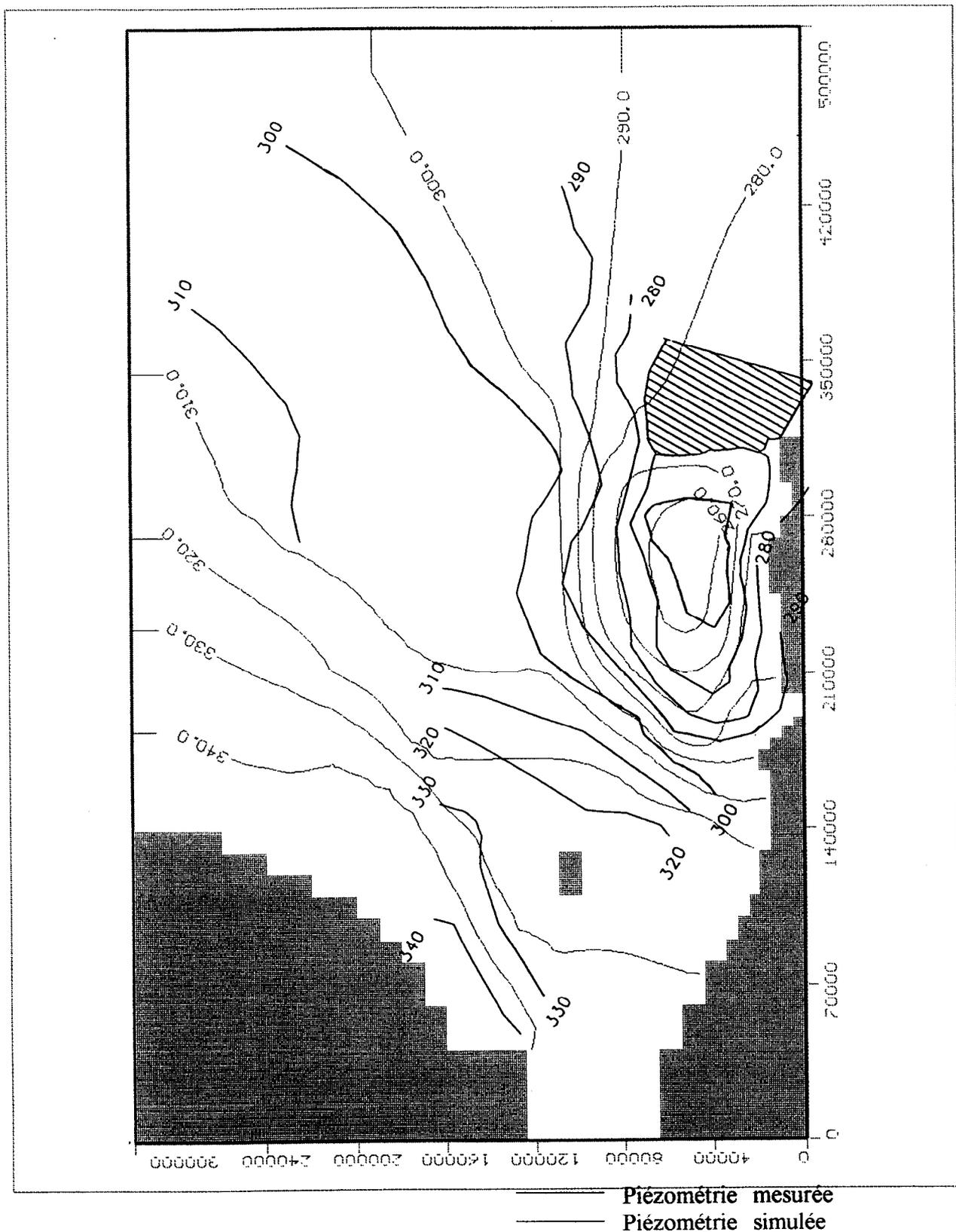


Figure 13 : Comparaison entre la piézométrie mesurée et la piézométrie simulée .

2.3 Répartition des débits naturels.

Classiquement lors d'un calage de modèle hydrogéologique, les débits entrant et sortant sont fixés, seuls les perméabilités sont modifiées. Les prélèvements anthropiques, les alimentations par la nappe d'Oussini, les grès du Koutous et, entre le massif du Koutous et de Termit, ont été considérés comme connus, et directement introduits dans le modèle, sans aucune modification. Cependant, la synthèse des données confirme que faute d'informations, nous ne pouvons pas quantifier de manière classique certains débits naturels. Ainsi la recharge par les précipitations, l'alimentation par la Komadougou et l'exfiltration sur le lac Tchad et le Kadzell ont fait l'objet d'un calage par tâtonnement.

Nous avons choisi de débiter le calage de ces débits naturels avec des valeurs qui nous semblaient correspondre aux maximums plausibles. Le tableau n°2 et la figure n°14 représentent ces débits outranciers circulant dans le modèle au début du calage. Le calage a révélé très nettement que ces débits devaient respecter certains points et tendre vers de faibles valeurs. Le tableau n°3 et la figure n°15 donnent la valeur des débits naturels obtenus à la fin du calage.

Le calage a donc permis une approche quantitative de la recharge par les précipitations et des apports par la Komadougou-Yobé. Ces résultats peuvent être résumés comme suit :

- L'apport par la Komadougou doit être faible et sa répartition nettement croissante vers l'aval. Au départ, une série de premiers tests a été réalisée en imposant un volume entrant de 20 millions de mètres cubes avec une répartition homogène le long de la Komadougou. Nous n'avons alors trouvé aucun jeu de perméabilités pouvant compenser la hauteur excessive des niveaux piézométriques constatée au Sud, le long de la Komadougou, et à l'Ouest en bordure des massifs du Koutous et du Mounio. Finalement on s'aperçoit qu'une répartition croissante des débits vers l'aval est nécessaire pour reproduire les piézométries au Sud-Ouest et, baisser la piézométrie. C'est d'ailleurs une meilleure approximation de la réalité, puisque les quelques jaugeages différentiels réalisés montrent que les pertes par infiltration sont plus importantes en aval. Il apparaît également nécessaire de diminuer le volume total, après plusieurs baisses progressives, nous trouvons un débit annuel entrant inférieur à 10 millions de mètres cubes.
- L'infiltration par les précipitations, c'est à dire la recharge de la nappe a fait l'objet de toute notre attention. Le calage a débuté avec une valeur de la recharge de 10 mm/an. Il n'apparaît alors pas possible de reproduire la piézométrie observée. On a donc diminué progressivement la valeur de cette infiltration et testé fréquemment si une représentation de

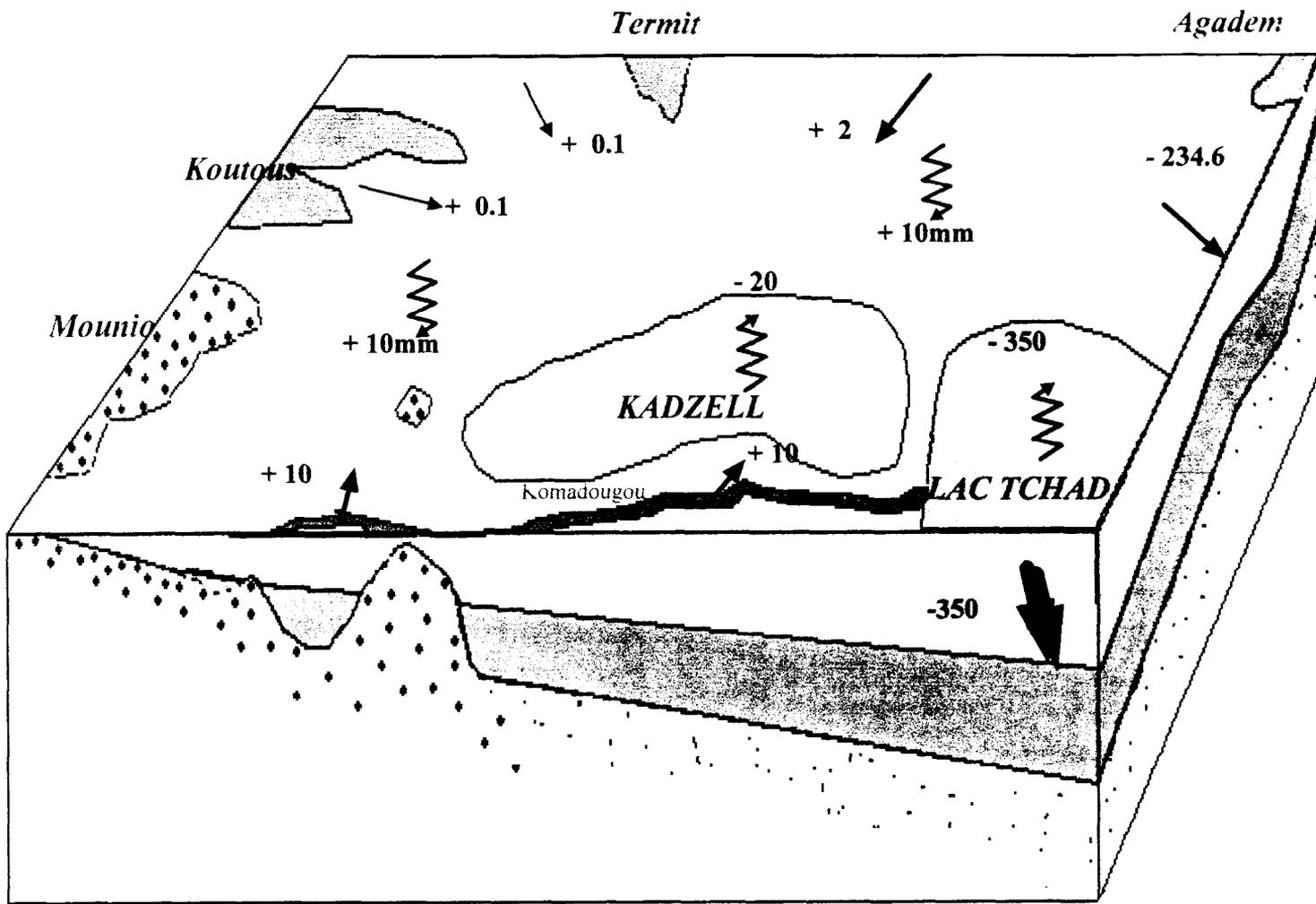
la piézométrie observée était possible, tout en restant dans des gammes de transmissivité réalistes. Au bout du compte, la valeur de l'infiltration a ainsi été cernée avec une précision relative. En effet, le modèle permet de reproduire correctement la piézométrie pour une infiltration homogène de l'ordre de 0.3 mm/an. On peut donc penser que la recharge sur la région du Manga est vraisemblablement inférieure à 1 mm/an.

- Afin de reproduire la dépression du Kadzell, il apparaît nécessaire d'imposer une légère évaporation sur cette région. Les premiers mètres du sol sont constitués d'argile noire, la plupart de la pluie ne s'infiltré donc pas. Nous savons également qu'en milieu non saturé la force de capillarité est d'autant plus forte que la granulométrie est faible. A l'échelle annuelle, il est donc possible qu'une évaporation, aussi infime soit elle, ait lieu à quelques dizaines de mètres de profondeur. Ainsi par tâtonnement avec les perméabilités de ce secteur, nous avons fini par trouver qu'il était nécessaire pour reproduire la nappe en creux, de fixer une évaporation selon une couronne concentrique décroissante vers le centre du Kadzell. La valeur de cette exfiltration est de 0,05 mm/an au centre du Kadzell et atteint 1,2 mm/an en périphérie.

DEBITS ENTRANT	test de sensibilité	DEBITS SORTANT	test de sensibilité
Infiltration par la pluie : 10 mm par an soit : $945 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ Volontairement surestimée	oui	Ecoulement vers le Tchad : $234,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$	
Nappe pliocène = 0		Evaporation au niveau du Lac Tchad = $350 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$	
Apports par les nappes latérales : <ul style="list-style-type: none"> • Grès du Koutous = $0,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ • Nappe d'Oussini = $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ entre le massif de Termit et du Koutous = $0,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ • Grès Termit = $0 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ • Grès Agadem = $0 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ 		Prélèvements anthropiques : $12,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ <ul style="list-style-type: none"> • $1,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ pour l'alimentation humaine. • $6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ pour l'élevage. • $4,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ pour l'irrigation. 	
		Ecoulement vers le lac Tchad = $234,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$	
Apport par la Komadougou : <ul style="list-style-type: none"> • $10 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ avant Geidam • $10 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ après Geidam Volontairement surestimé	oui	Evaporation dans le Kadzell : $20 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$	
Somme des débits entrant : $967,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$		Somme des débits sortant : $967,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$	

Tableau n°2 : les termes outranciers du bilan en eau testés au début du calage.

Figure n°14 : FLUX EXCESSIFS TRANSITANT DANS LA NAPPE DU MANGA AU DEBUT DU CALAGE



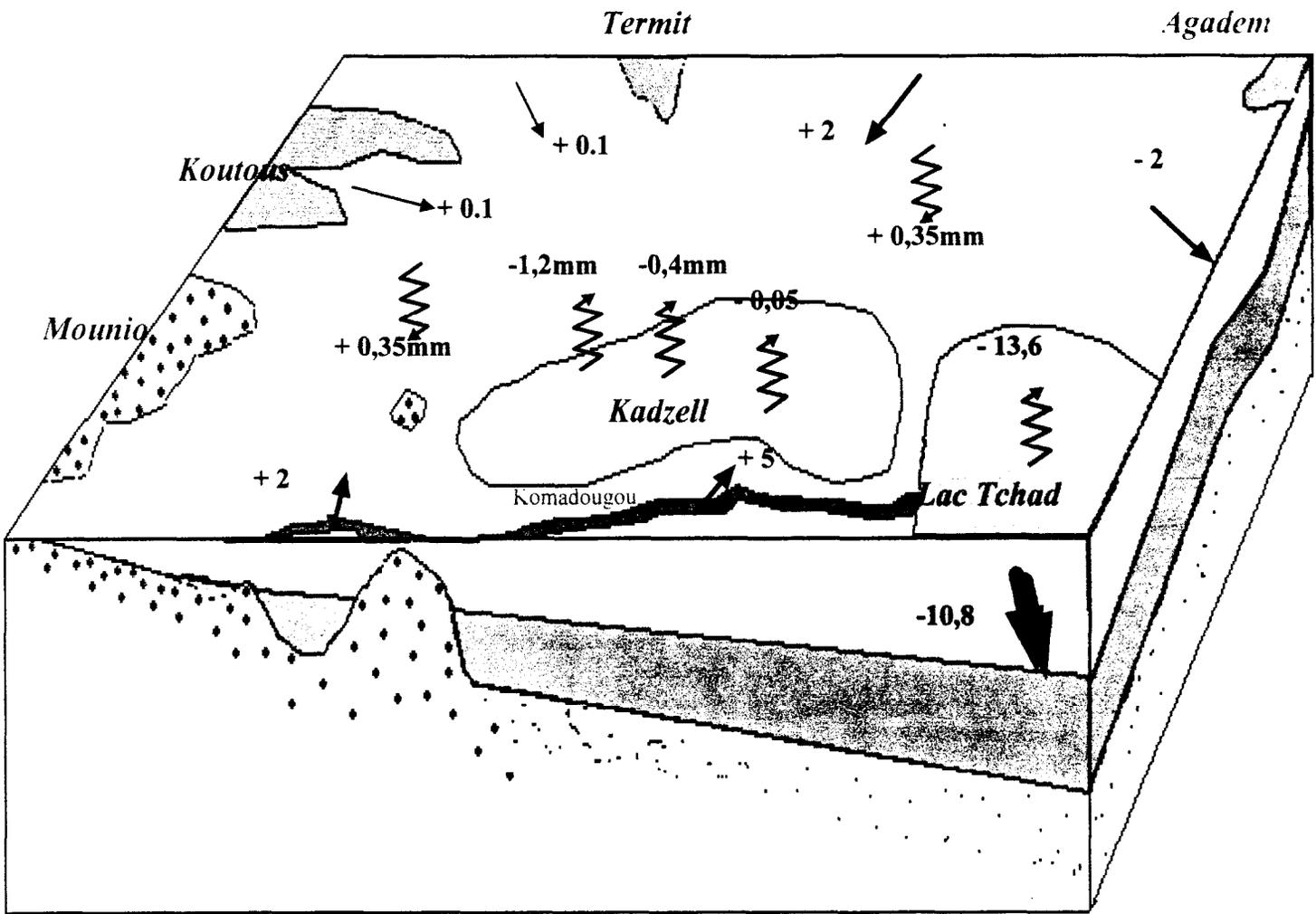
LEGENDE :

- | | | | |
|--|--|--|------------------------------------|
| | EVAPORATION en million de m ³ /an | | INFILTRATION PAR LA PLUIE en mm/an |
| | DEBITS TRANSITANT en million de m ³ /an | | |
| | Aquifère du Quaternaire : sables et argiles | | |
| | Couche imperméable : argiles du Pliocène | | |
| | Aquifère du Pliocène : sable et argile | | |
| | Grès du Crétacé | | |
| | Granite | | |

DEBITS ENTRANT	test de sensibilité	DEBITS SORTANT	test de sensibilité
Infiltration par la pluie : 0.35 mm par an soit : 37.27.10 ⁶ m ³ /an	oui	Ecoulement vers le Tchad : 2.10 ⁶ m ³ /an	
Nappe pliocène= 0. 10 ⁶ m ³ /an		Evaporation au niveau du Lac Tchad= 13,6.10 ⁶ m ³ /an	
Apports par les nappes latérales : <ul style="list-style-type: none"> • grès du Koutous=0,1. 10⁶ m³/an • nappes d'Oussini=2.10⁶ m³/an • entre le massif de Termit et du Koutous=0,1.10⁶ m³/an • Grès Termit= 0 10⁶ m³/an Grès agadem= 0. 10⁶ m³/an 	non	Prélèvements anthropiques :12,6.10 ⁶ m ³ /an <ul style="list-style-type: none"> • 1.4 10⁶ m³/an pour l'alimentation humaine. • 6 10⁶ m³/an pour l'élevage. 4.6 10⁶ m³/an pour l'irrigation. 	
		Ecoulement vers le lac Tchad= 10,8 10 ⁶ m ³ /an	
Apport par la Komadougou : <ul style="list-style-type: none"> • 2. 10⁶ m³/an avant Geidam • 5. 10⁶ m³/an après Geidam 	oui	Evaporation dans le Kadzell : <ul style="list-style-type: none"> • centre : -0,05 mm/an soit 0,061300. 10⁶ m³/an • intermédiaire : -0,4 mm/an soit 1,5. 10⁶ m³/an • périphérie : -1.2 mm/an soit 5,67. 10⁶ m³/an. 	
entrant= 46,2.10 ⁶ m ³ /an		Somme des débits sortant= 46,29.10 ⁶ m ³ /an	

Tableau n°3 : les termes du bilan en eau à l'issue du calage.

Figure n°15 : FLUX TRANSITANT DANS LA NAPPE DU MANGA AU TERME DU CALAGE



EVAPORATION en mm/an
 INFILTRATION PAR LA PLUIE en mm/an

DEBITS TRANSITANT en million de m³/an

Aquifère du Quaternaire : sables et argiles

Couche imperméable : argiles du Pliocène

Aquifère du Pliocène : sable et argile

Grès du Crétacé

Granite

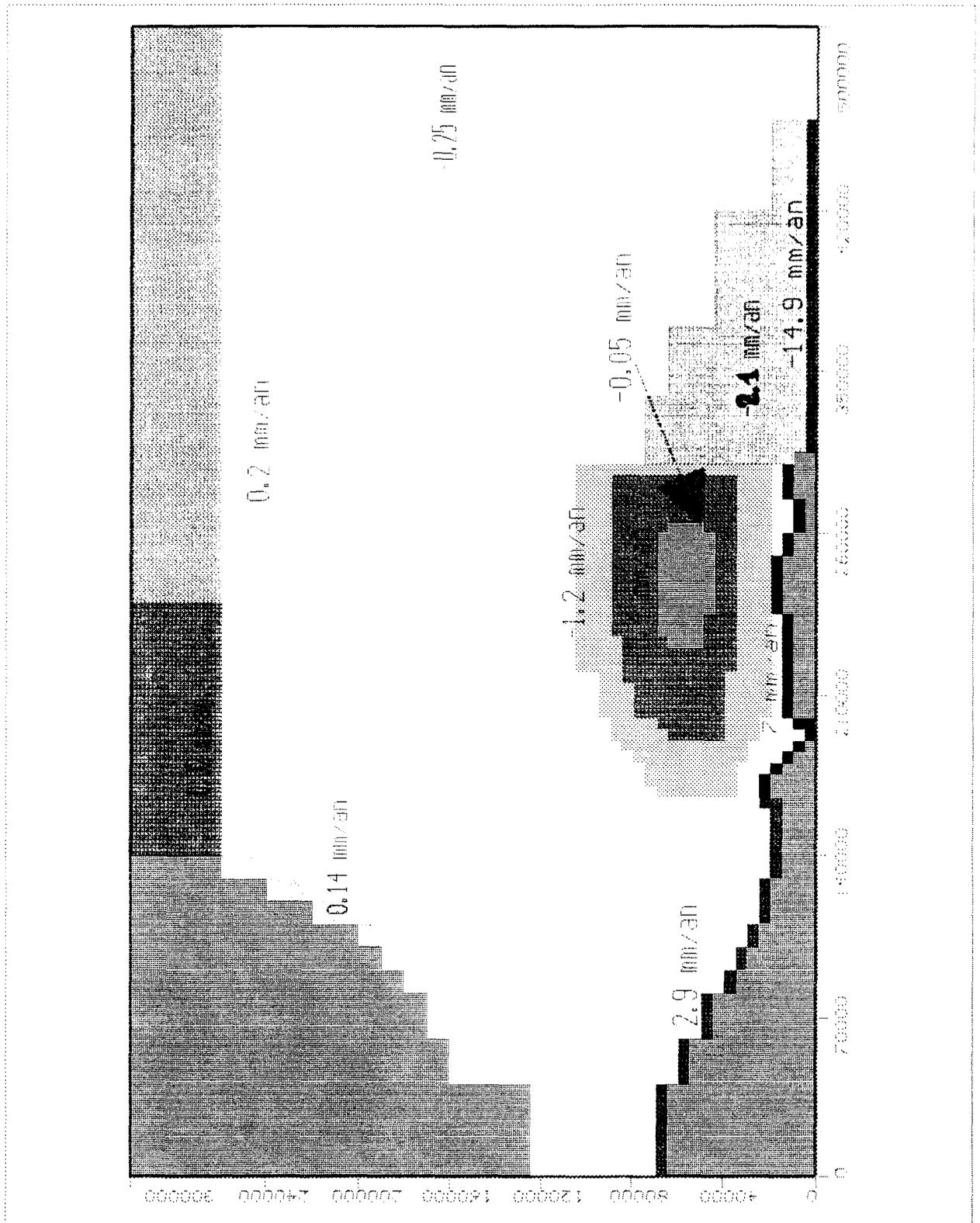


Figure 16 : Répartition des débits naturels

2.4 Distributon des perméabilités

Comme il est usuel en modélisation, les paramètres hydrodynamiques font l'objet du calage. Une simulation en régime permanent nous permet de n'avoir à caler que la transmissivité. Lors de la synthèse des travaux existants, il est apparu que nous disposions de très peu de données. Cependant, nous nous sommes efforcés de respecter les quelques mesures obtenues par pompages d'essai, ainsi que les pistes déduites de la géologie et, de la carte des débits spécifiques. Ces données ne sont pas assez détaillées pour fournir des renseignements directement utilisables, mais seulement des indications à suivre. Le jeu de perméabilités trouvé après calage doit notamment rester proche d'une interprétation géologique plausible.

Au terme du calage, les valeurs obtenues sont comprises entre 4.5 E-6 m/s et 8 E-4 m/s . Les résultats fournis sont intéressants et proposent un schéma de fonctionnement global.

Les points suivants sont à retenir :

- Le résultat le plus important est la mise en évidence d'une zone à très faible perméabilité sur le Kadzell. Elle est nécessaire pour limiter les échanges latéraux et reproduire ainsi la dépression piézométrique dès que l'on applique une très faible évaporation. Des premiers essais avec de petites surfaces ont montré qu'il fallait étendre cette zone vers l'Ouest et le Nord. Ces résultats sont en plein accord avec l'étude géomorphologique réalisée sur les dépôts quaternaires (Durand et al.). Le Kadzell y est notamment décrit comme une zone à sédiments fins correspondant à des dépôts fluvio-deltaïques, déposés lors de la divagation du cours de la Komadougou.
- Pour obtenir de hauts niveaux piézométriques et des isopièzes de direction Nord-Sud, une large bande à faible perméabilité doit également être affectée à l'Ouest, le long des massifs de Ternit, du Koutous et du Mounio. Notons qu'il s'agit d'un compromis, si la perméabilité de cette zone diminue trop les piézométries s'élèvent excessivement, si elle est trop faible les isopièzes s'orientent d'Est en Ouest.
- Le secteur Nord-Est apparaît comme une zone à bonne transmissivité. Il correspond également aux sédiments déposés dans l'axe du Rift ce qui peut expliquer un matériau plus grossier.

- Le long de la Komadougou les perméabilités ne doivent pas descendre en dessous de $1e-4$ m/s.
- La transition entre les deux zones à faible perméabilité du Kadzell et de la bordure des massifs doit se faire par une zone de forte perméabilité, faute de quoi les piézométries du secteur Ouest remontent trop.

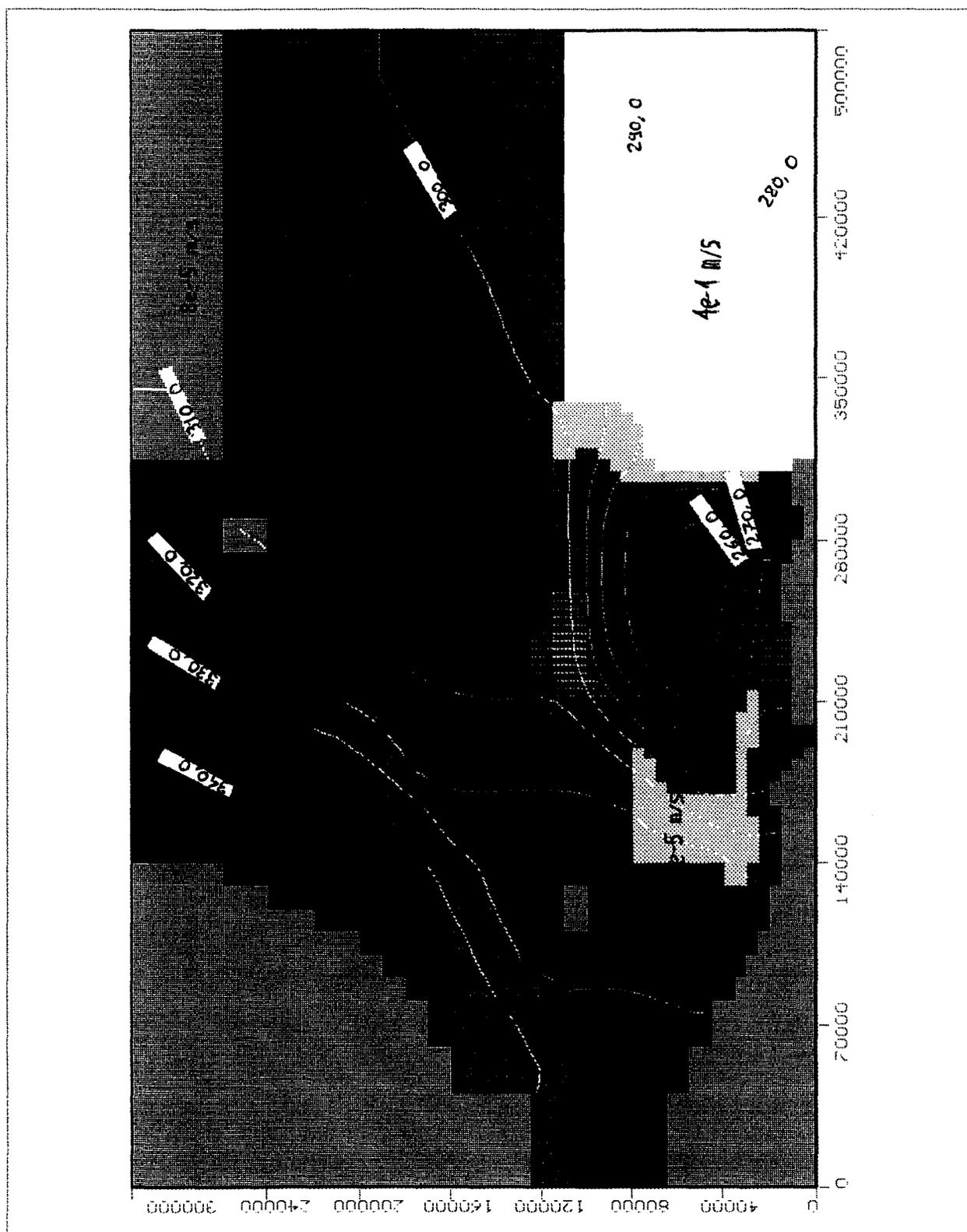


Figure 17 : Répartition des perméabilités et piézométrie correspondante

3 RESULTATS DU CALAGE POUR UNE RECHARGE HETEROGENE

3.1 Les raisons d'une recharge hétérogène

Comme nous l'avons déjà vu, le climat du Manga va d'un type saharien désertique au Nord à un type sahélien avec une saison pluvieuse au Sud. Il varie donc selon un gradient Nord-Sud. La figure n°18 représente la pluviométrie annuelle moyenne sur le Manga. Elle montre que les pluies témoignent de ce phénomène. Il est donc normal que la recharge de la nappe par les précipitations suive également cette répartition. Il nous est apparu souhaitable d'en tenir compte. Par nécessité de simplification, nous avons alors choisi de séparer en deux parties la recharge appliquée dans le modèle, une partie Nord et une partie Sud. Le modèle est alors divisé selon une ligne arbitraire Nord-Sud, allant de la bordure Est du lac Tchad au massif de Termit. On considère qu'au Nord de cette limite l'infiltration est inexistante, et que seule la partie Sud du modèle reçoit une recharge par les précipitations.

PLUVIOMETRIE MOYENNE (1980-1988)

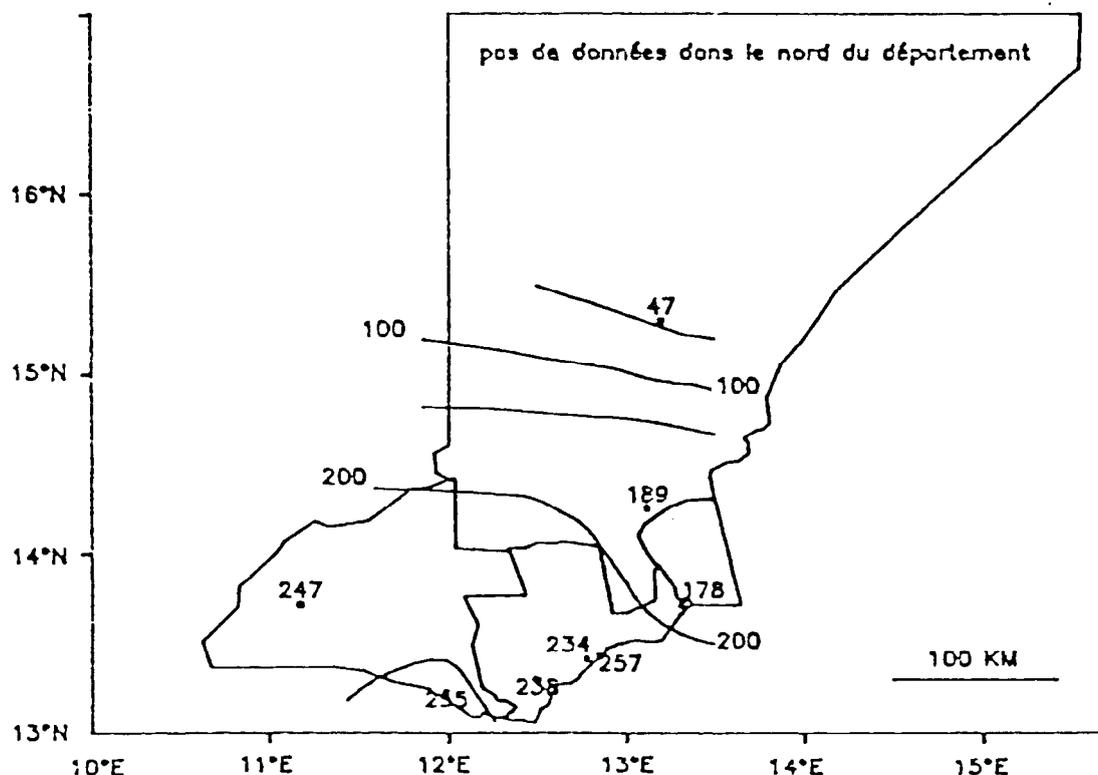


Figure n°18 : pluviométrie moyenne annuelle sur le Manga.

3.2 Comparaison entre la piézométrie observée et la piézométrie simulée.

Pour reproduire au mieux la piézométrie observée, nous avons adopté la même démarche que pour la recharge homogène. Nous avons procédé à des calages par tâtonnement sur les perméabilités, tout en diminuant par étapes les débits naturels qui transitent dans la nappe. En partant de flux naturels (recharge) excessifs, on s'aperçoit qu'il est nécessaire de diminuer leur valeur. Trois de ces étapes ont été conservées : calage pour une recharge de 4 mm, de 0.8 mm, et de 0.4 mm.

Même si localement la différence avec l'observé atteint parfois plus d'un mètre, régionalement et compte tenu de l'imprécision relative à la carte elle-même (topométrie, nombre de points) ces trois calages reproduisent dans leur ensemble correctement la piézométrie observée.

3.3 Répartition des débits naturels et des perméabilités.

On retrouve les mêmes grands secteurs de perméabilité que dans le cas d'une infiltration homogène (paragraphe IV.2.3) : de très faibles perméabilités sur le Kadzell, de faibles perméabilités le long des massifs de Termit, du Koutous et du Mounio, et de fortes transmissivités sur le secteur Nord-Est et le long de la Komadougou.

Dans le détail le calage réalisé avec une infiltration de 4 mm dans le Sud du Manga révèle qu'un tel scénario est improbable. En effet les perméabilités qu'il faut alors affecter pour reproduire la piézométrie apparaissent trop fortes dans leur ensemble. Elle dépasse d'environ 10 fois les valeurs des pompages d'essai sur les secteurs de Goudoumaria, de Diffa et, de Dagaya.

D'autres calages ont été tentés avec des valeurs plus fortes de l'infiltration. Ils montrent qu'il est alors impossible de reproduire la piézométrie avec des valeurs réalistes de perméabilité. En effet pour une recharge de 10mm (figure n°26) les perméabilités qu'il faut affecter dans le modèle dépassent de plus de 100 fois les valeurs mesurées. Dans un tel cas les sédiments des secteurs Est et Nord correspondraient à des graviers ou à des sables très grossiers.

Le calage effectué pour une recharge de 0.8mm/an est particulièrement intéressant puisque le volume total de la recharge est alors égal à celui que l'on avait pour une recharge de 0.3 mm/an dans le cas d'une infiltration répartie sur l'ensemble de la

région. Il permet donc la comparaison entre une recharge uniforme et une recharge uniquement appliquée dans le Sud du Manga. On voit (figure n°23) que la distribution des perméabilités conserve une configuration semblable et que l'on retrouve les mêmes secteurs caractéristiques. L'évaporation et les perméabilités sont restées presque inchangées dans le Kadzell. De même le Lac Tchad et le Nord-Est du modèle gardent pratiquement les mêmes particularités. Cependant dans la partie Sud-Ouest qui reçoit ici la totalité de l'infiltration par les pluies les perméabilités ont dû être augmentées (par rapport au scénario d'une recharge homogène). Elles augmentent notamment du double le long de la Komadougou et, entre le Kadzell et le massif du Mounio.

Le test réalisé avec une infiltration de 0.4 mm/an dans le Sud montre des résultats satisfaisants. La piézométrie y est correctement reproduite et les perméabilités du modèle se rapprochent de celles mesurées sur le terrain.

Par rapport à une infiltration de 0.35 mm/an sur tout le territoire, on note que les perméabilités sont pratiquement les mêmes, sauf le long des massifs de Termit et du Koutous, ainsi que dans le secteur compris entre cette zone et le Kadzell où elles diminuent respectivement de moitié et de deux tiers.

Enfin si on compare les résultats pour une infiltration dans le Sud de 0.4 mm/an à ceux d'une recharge de 0.8 mm/an. On s'aperçoit que ce qui change ce sont uniquement les perméabilités du secteur Sud (Kadzell excepté) qui doublent de valeurs alors que le reste du modèle ne change pas. Ce sont les perméabilités obtenues pour une infiltration de 0.4 mm/an qui se rapprochent le plus des valeurs obtenues par pompages d'essai.

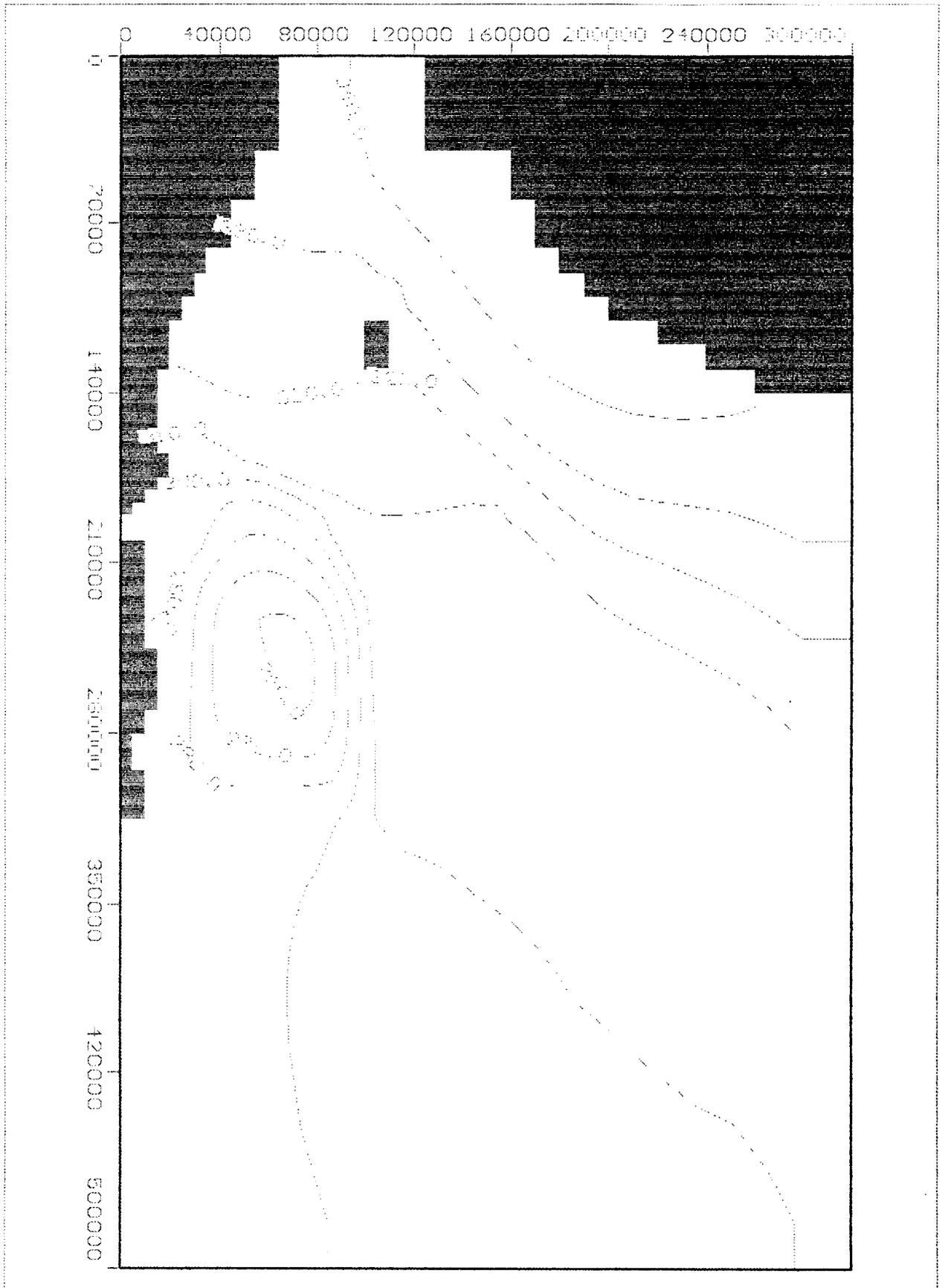


Figure n°19 : piézométrie simulée pour une recharge hétérogène de 0.4mm/an

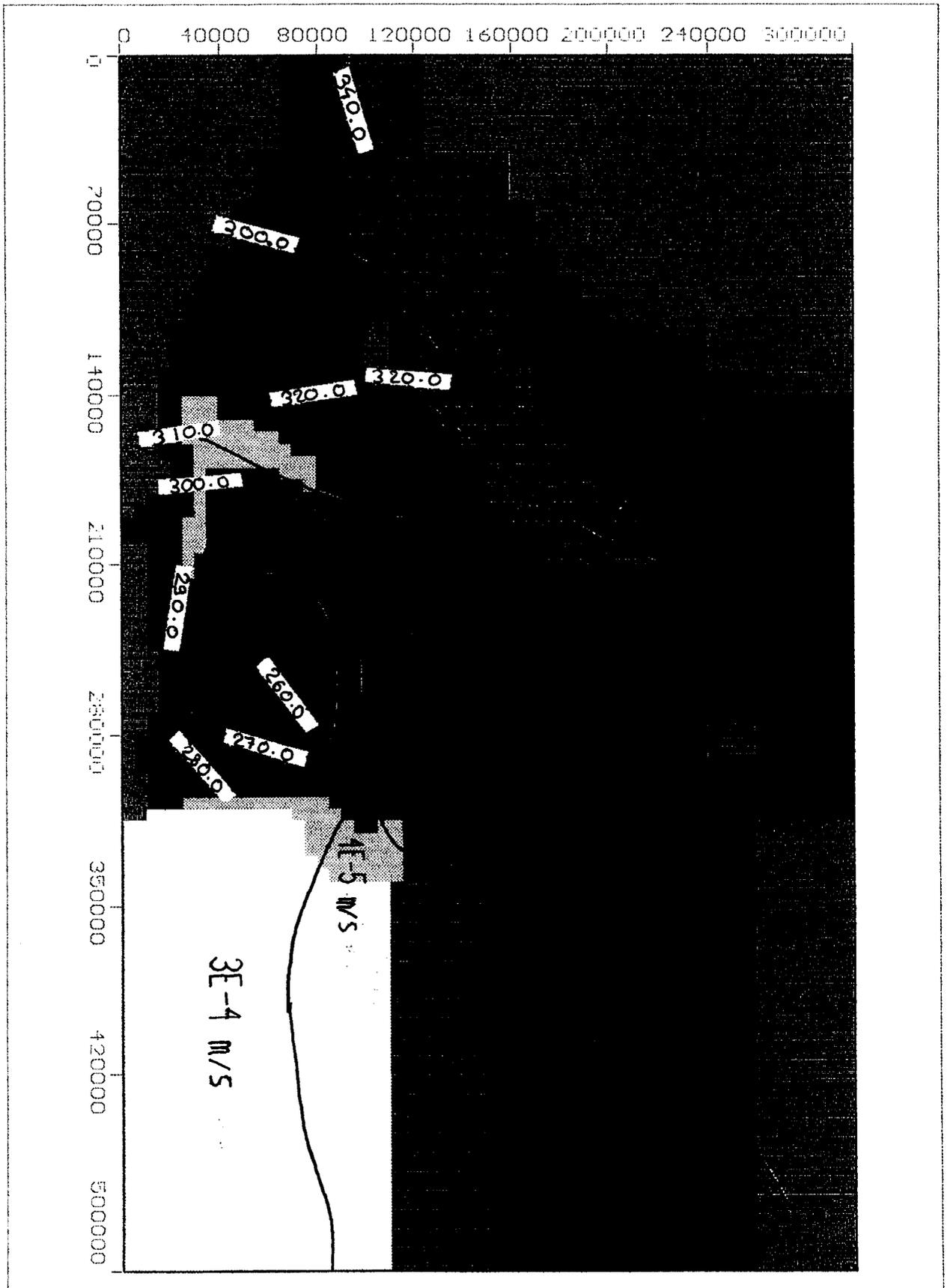


Figure n°20 : piézométrie simulée et répartition des perméabilités pour une recharge hétérogène de 0.4mm/an.

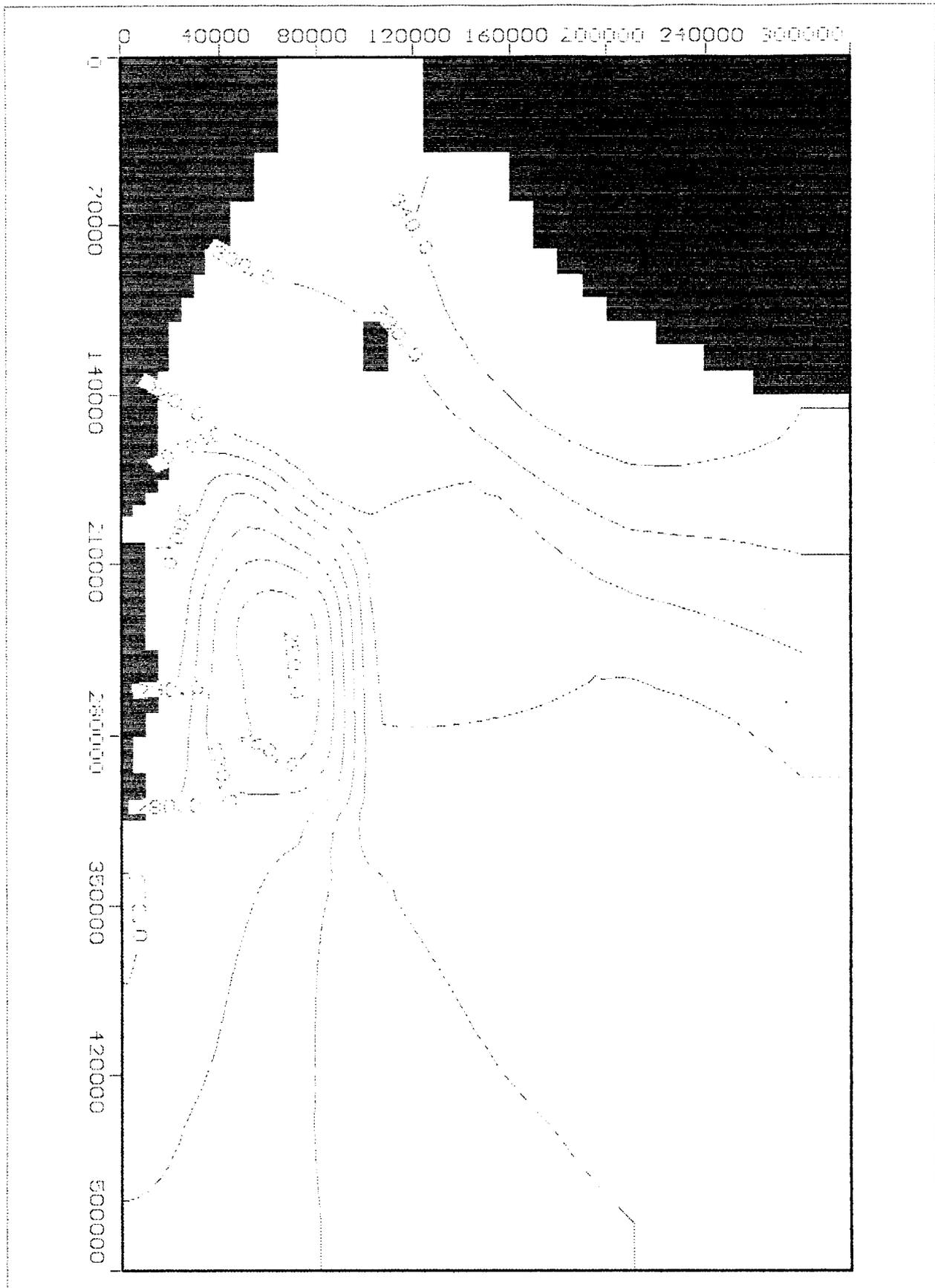


Figure n°21 : piézométrie simulée pour une recharge hétérogène de 0.8mm/an

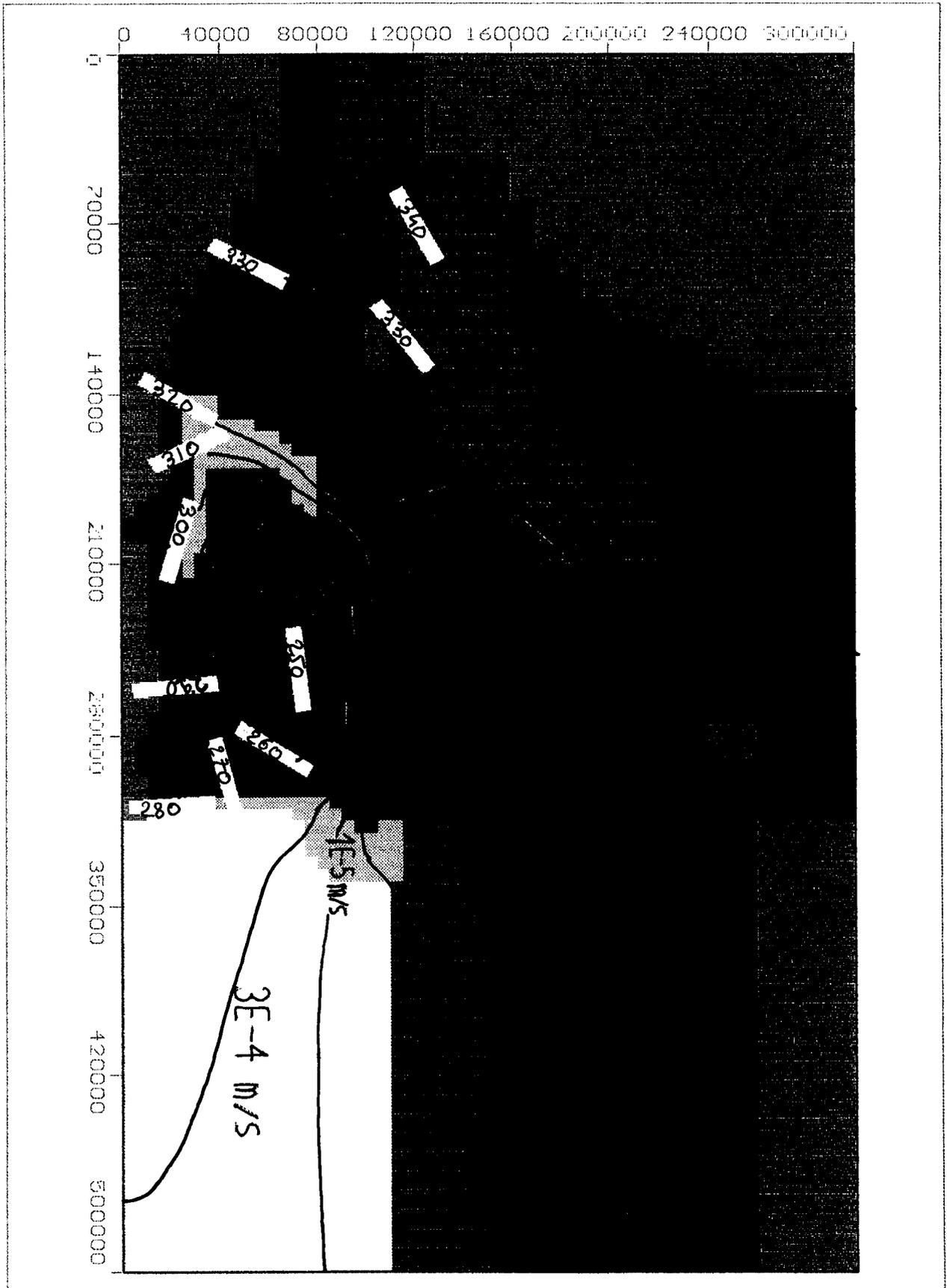


Figure n°22 : piézométrie simulée et répartition des perméabilités pour une recharge hétérogène de 0.8mm/an.

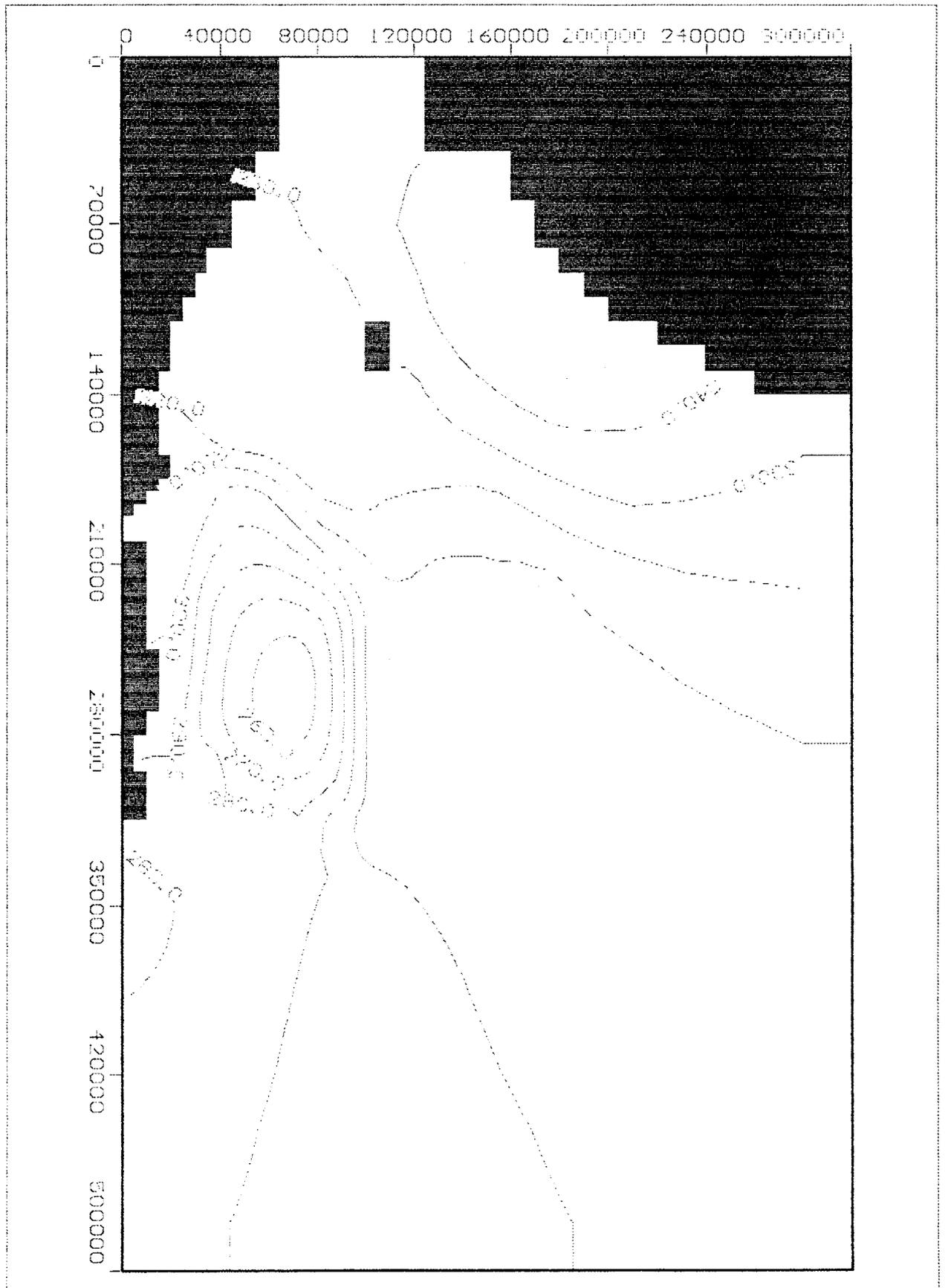


Figure n°23 : piézométrie simulée pour une recharge hétérogène de 4mm/an

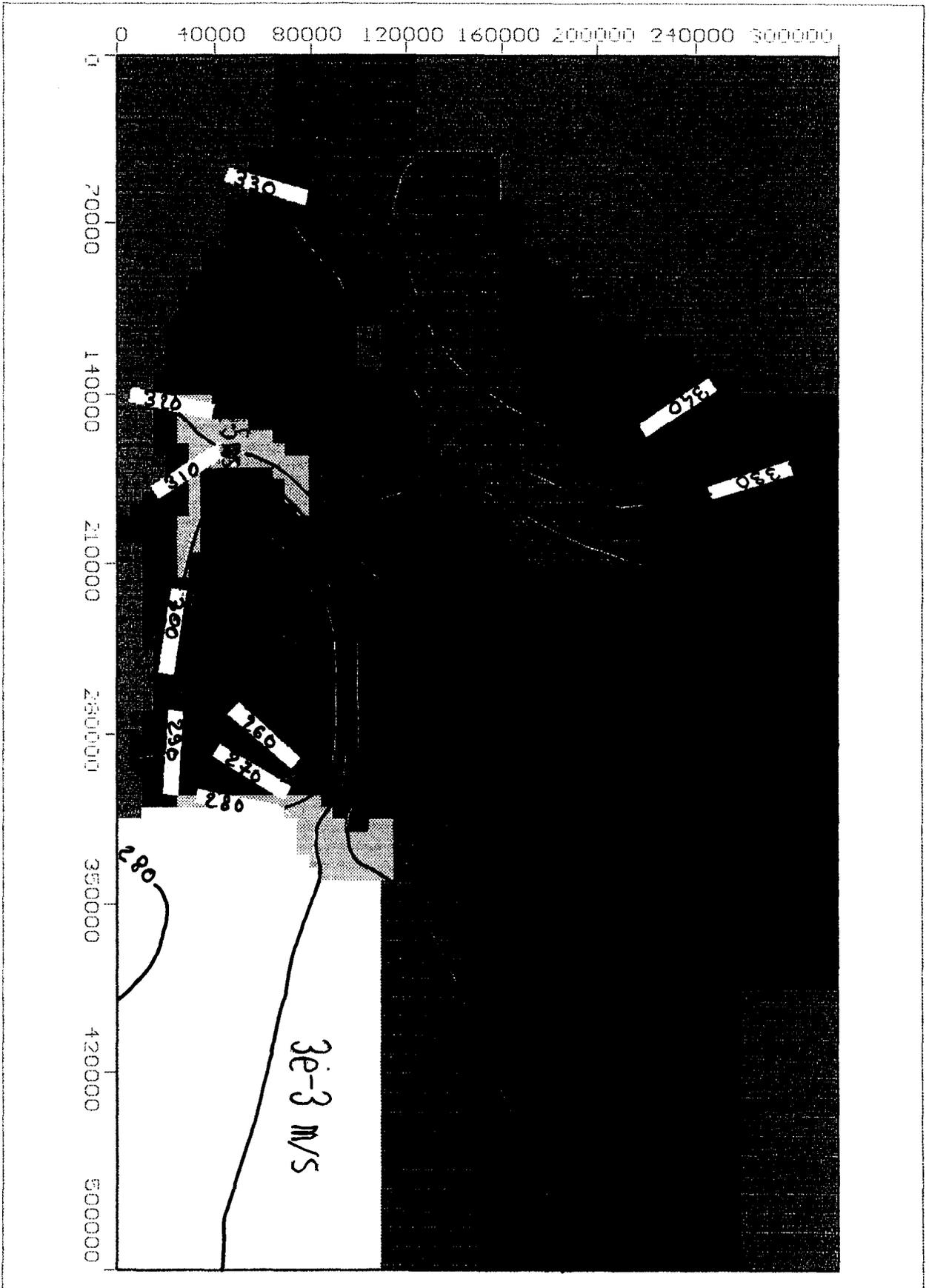


Figure n°24 : piézométrie simulée et répartition des perméabilités pour une recharge hétérogène de 4mm/an.

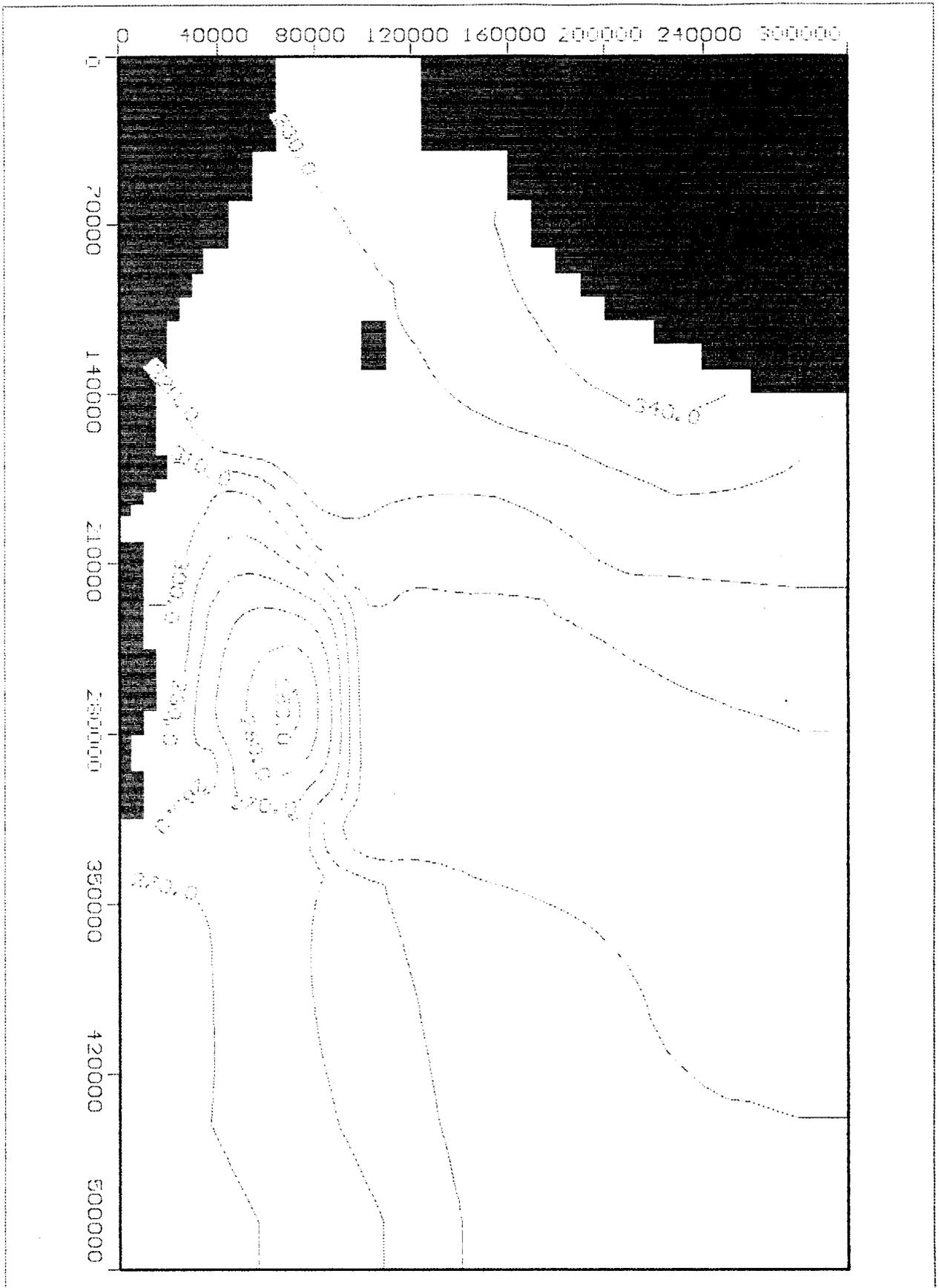


Figure n°25 : piézométrie simulée pour une recharge hétérogène de 10mm/an

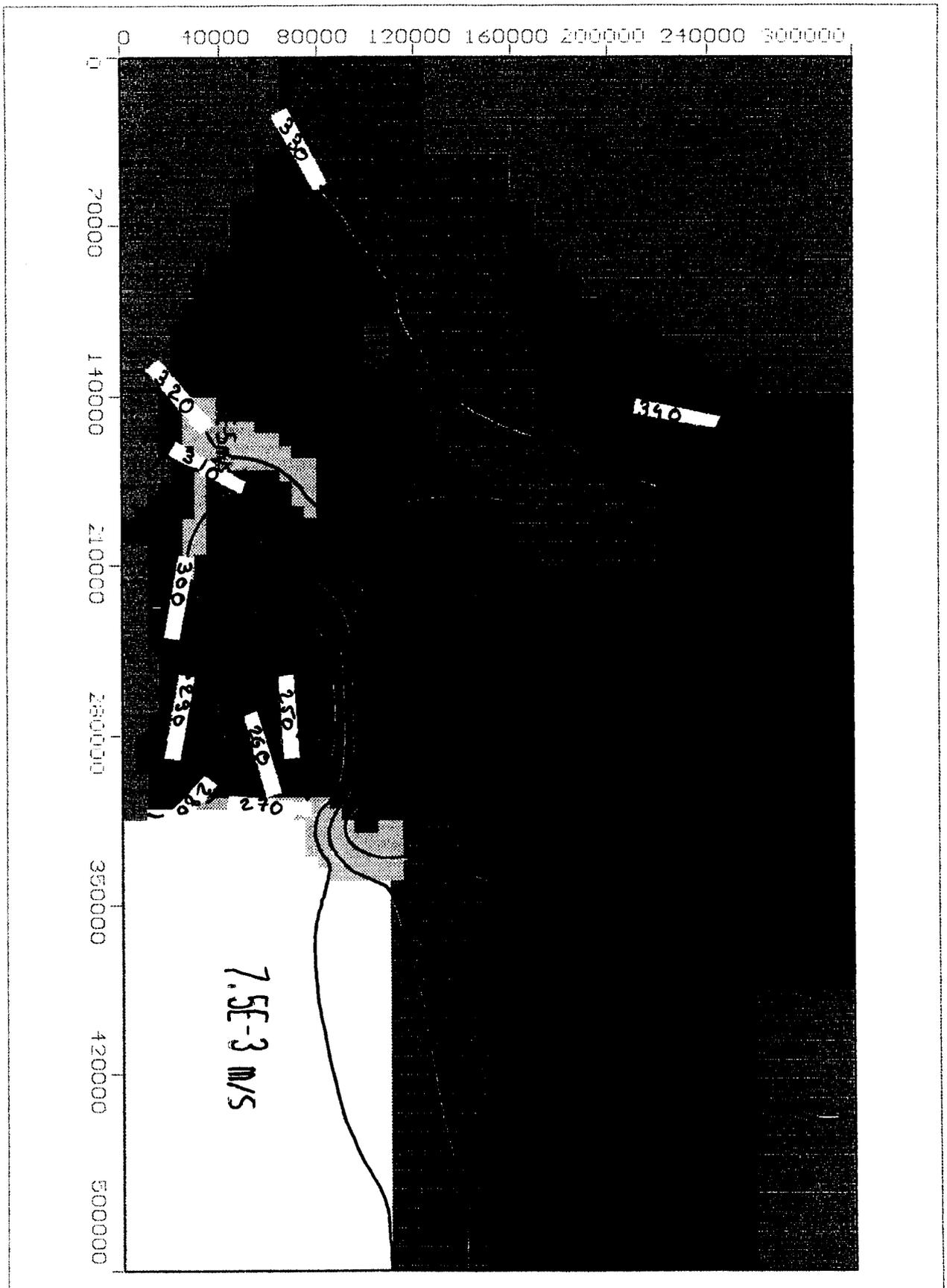


Figure n°26 : piézométrie simulée et répartition des perméabilités pour une recharge hétérogène de 10mm/an.

V SENSIBILITE DU MODELE.

Les tests de sensibilité ont été effectués sur les paramètres obtenus à l'issue du calage, c'est à dire la recharge par les précipitations, l'apport par la Komadougou et, les perméabilités.

La sensibilité du modèle est donnée par l'impact sur la piézométrie suite à la modification d'un seul des paramètres, les autres étant inchangés.

Notons dès à présent que le modèle possède une très grande sensibilité à l'ensemble des paramètres. Ceci explique en partie qu'avec des données initiales très floues, constituant plus des ordres de grandeurs à ne pas dépasser que de véritables données, nous arrivons finalement à cerner avec une précision satisfaisante les valeurs de l'ensemble du jeu de paramètres.

Les résultats de ces tests de sensibilités sont reportés en annexe.

1 SENSIBILITE A L'INFILTRATION

Lors de la simulation et du calage, nous avons retenu pour l'infiltration une valeur de 0.35 mm/an répartie de manière homogène sur l'ensemble du domaine, ce qui représente un volume de $37.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$. Pour une variation de $\pm 20\%$ et de $\pm 40\%$ du volume total de l'infiltration les tests de sensibilité ont montré les points suivants :

- Le modèle présente une grande sensibilité au volume total de l'infiltration. Même une variation de 20% de ce volume engendre des forts décalages dans les piézométries.
- Il est possible de distinguer deux zones dont la sensibilité est différente :
 - le Nord du modèle est le secteur le moins sensible.
 - à l'inverse, l'Ouest du Kadzell montre une grande sensibilité. Les niveaux piézométriques y enregistrent une forte baisse pour une diminution des débits infiltrés.

2 SENSIBILITE A LA RECHARGE PAR LA KOMADOUGOU

Comme hypothèse initiale, nous avons retenu un débit s'infiltrant par la Komadougou d'environ $20.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$, le calage a révélé qu'il fallait diminuer ces apports jusqu'à environ $8.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$. Le Kadzell ainsi qu'une large zone bordant la partie amont de la Komadougou sont très sensibles à l'alimentation de la Komadougou.

3 SENSIBILITE AUX PERMEABILITES

Nous avons choisi d'étudier la sensibilité du modèle aux perméabilités, sur quatre secteurs : les bords de la Komadougou, le Kadzell, les bordures des massifs du Mounio, de Koutous et de Termit, le lac Tchad.

Les tests ont montré les points suivants :

- Une différence de $\pm 50\%$ des valeurs de perméabilité en bordure de la Komadougou engendre des variations piézométriques significatives. Notre modèle est donc sensible à ce paramètre, et ce essentiellement pour deux zones dont le fonctionnement est inverse.

1) La partie amont de la Komadougou dont les niveaux piézométriques augmentent de 4m pour une diminution de 50% de la perméabilité, et diminuent de 3m pour une hausse de 50% de la perméabilité.

2) A l'opposé, pour une même diminution et augmentation des perméabilités, le centre du Kadzell et ses abords vers la Komadougou, subissent respectivement une baisse de 5m et une hausse de 3m.

Au vu de ces résultats, un deuxième calage consisterait à faire varier séparément ces deux zones amont et aval de la Komadougou. Des perméabilités plus faibles dans le secteur aval permettraient de simuler la dépression piézométrique du Kadzell en diminuant les flux évaporatoires.

- On remarque que la zone sensible à la perméabilité du Kadzell est restreinte au Kadzell lui-même. Cette sensibilité est forte : les piézométries enregistrent une hausse allant jusqu'à 10 mètres au centre du Kadzell pour une augmentation de 50% de la perméabilité.
La dépression piézométrique du Kadzell résulte d'un compromis entre les débits sortant par évaporation et les faibles apports latéraux dus aux mauvaises perméabilités.
- L'impact d'une variation de la perméabilité dans le secteur du lac se fait ressentir sur une zone couvrant le lac lui-même et le Kadzell.

VI CONCLUSION

La synthèse des données a mis en évidence le peu de connaissances et de mesures dont nous disposons. Ceci pouvait apparaître en premier lieu comme un handicap majeur pour cette modélisation. Pourtant, le calage a révélé clairement, que même en partant d'un champ de possibilités très vaste, nous arrivons à un jeu de paramètres. C'est ce qu'illustre bien la grande sensibilité du modèle. A posteriori, le modèle régional de la nappe quaternaire du Manga paraît justifié par les renseignements obtenus sur l'aquifère. Il a en effet permis de comprendre les écoulements souterrains de cette région, de définir la distribution des transmissivités et, de quantifier la recharge par les précipitations.

Les perméabilités issues du calage varient entre $4,5 \cdot 10^{-6}$ m²/s et $8 \cdot 10^{-4}$ m²/s pour une recharge homogène. Elles se répartissent d'une part, selon deux zones à faibles valeurs que sont le Kadzell et les bordures des massifs du Mounio, de Koutous et, de Termit, et d'autre part, selon une zone à fortes valeurs couvrant tout le secteur Nord Est.

La présente modélisation a permis de valider le schéma hydraulique que nous proposons pour la nappe en creux du Kadzell : faibles apports latéraux accompagnés d'une légère évaporation. En effet, cette schématisation s'accompagne de paramètres (perméabilité, évaporation) ayant des valeurs réalistes et la dépression piézométrique est correctement reproduite.

La recharge de la nappe par l'infiltration des pluies apparaît très faible. Elle serait de l'ordre du mm/an. Ce résultat confirme les ordres de grandeurs déjà avancés par C.LEDUC dans une première modélisation. Une telle valeur de recharge indique des eaux souterraines âgées. Des datations par le carbone C14 vont prochainement être entreprises. Il sera alors très intéressant de confronter les résultats obtenus par cette approche hydrogéochimique.

Une autre perspective d'évolution de ce modèle passe par la mise en place de la simulation des écoulements en régime transitoire. Ce qui permettrait par exemple de simuler les variations du niveau du lac et de leurs impacts sur la piézométrie.

BIBLIOGRAPHIE

PAR AUTEURS :

- Armand.C, Actualisation de l'atlas des eaux souterraines du Niger. BRGM/FAC/Ministère de l'hydraulique, 1987.
- Bonnet.M Mise en place d'un système de suivi et de gestion de la nappe phréatique du Chari-Baguirmi. Direction de l'Hydraulique et de l'assainissement N'DJAMENA, 1995.
- Durand.A, Fontes.JC, Gasse.F, Icole.M, Lang.J, Le nord-ouest du lac Tchad au Quaternaire : étude de paléo- environnements alluviaux, palustres et lacustres. Palaeoecology of Africa, vol 16, pp 215-244, Coetzee et Van Zinderen Bakker ed., Rotterdam, 1984.
- Eberschweiler.C : Suivi et gestion des ressources en eau dans le bassin du lac Tchad. Prémодélisation des systèmes aquifères. Rapport intermédiaire n°2. Rapport BRGM R 35985 EAU-4S-93, 1993.
- Favraud.G : modélisation locale de la recharge de la nappe phréatique sur le site de Wankama (Sud Ouest du Niger) : mémoire deDEA hydrologie et hydrogéologie : géostatistiques et géochimie, ORSAY; ORSTOM de Montpellier 1996.
- Greigert.J, Les eaux souterraines de la république du Niger. Volume 2 : les nappes du Tertiaire et du Quaternaire. BRGM/Ministère des travaux publics, 1968.
- Greigert.J, Atlas des eaux souterraines du Niger ; état des connaissances en mai 1978. BRGM, 1979.
- Leduc.C : Les ressources en eau du département de DIFFA. Projet PNUD / DCTD NER/86/001, 1991.
- Lemoine.L et Prat.J-C, Cartes d'évapotranspiration potentielle, volume 6. CIEH, Ouagadougou, 1972
-
- Monfort.M : Les aquifères du degré carré de NIAMEY : approche géologique, géochimique et hydrodynamique : mémoire deDEA hydrologie et hydrogéologie : géostatistiques et géochimie, ORSAY; ORSTOM de Montpellier 1997.
- Pirard.F, Hydrogéologie du Niger oriental. BRGM / Ministère des travaux publics, 1962.
- Pirard.F, Notice explicative sur la carte géologique de reconnaissance du Manga (Niger sud-oriental) à l'échelle du 1/500000. BRGM/Ministère des travaux publics, 1967.
- Ponsardin.P, Elevage et hydraulique pastorale au Niger. Rapport de consultant dans le cadre

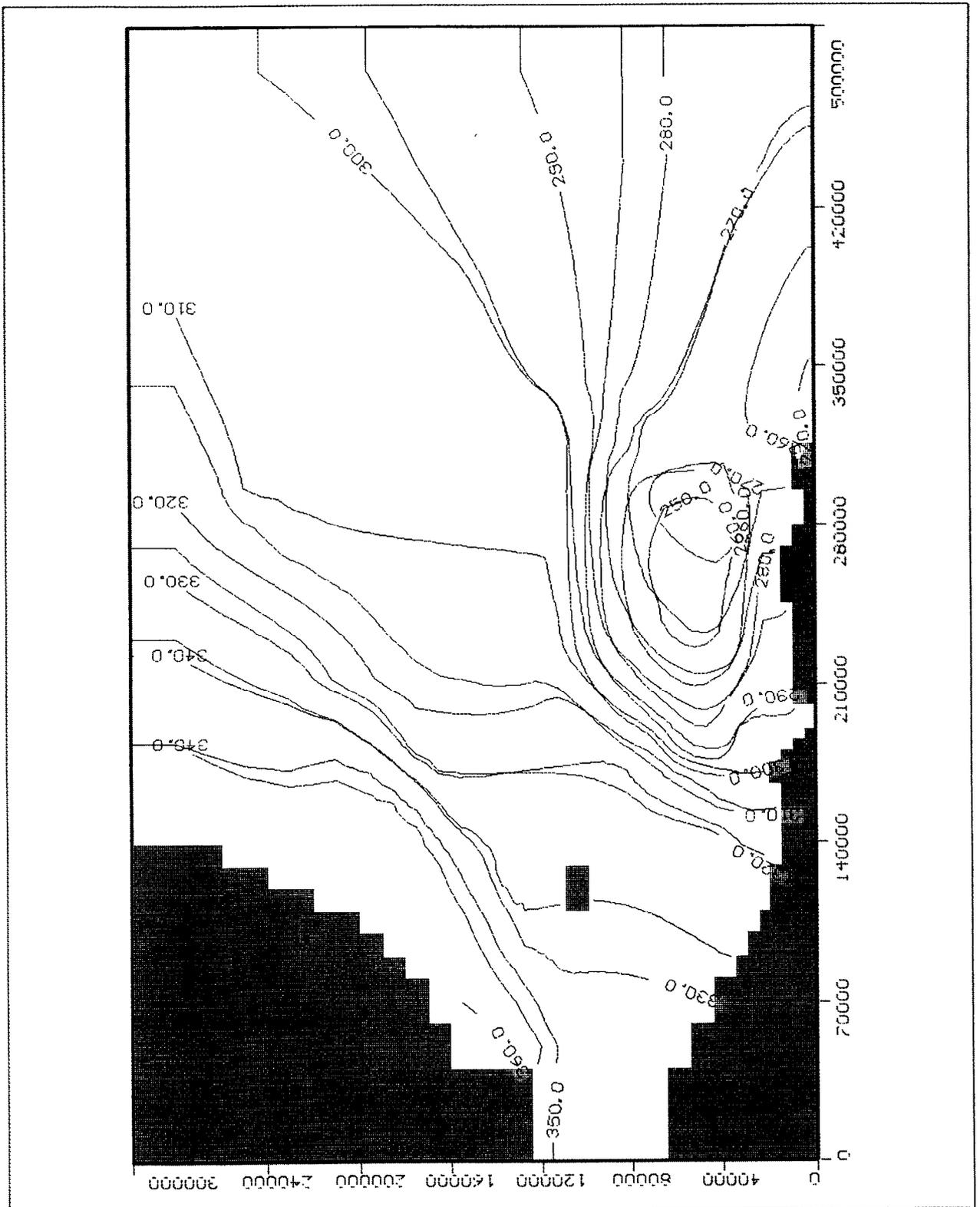
du projet NER86001, 1990.

- Schneider, Carte hydrogéologique de la république du Tchad. BRGM/FAC 1969.

SANS AUTEURS MENTIONNES :

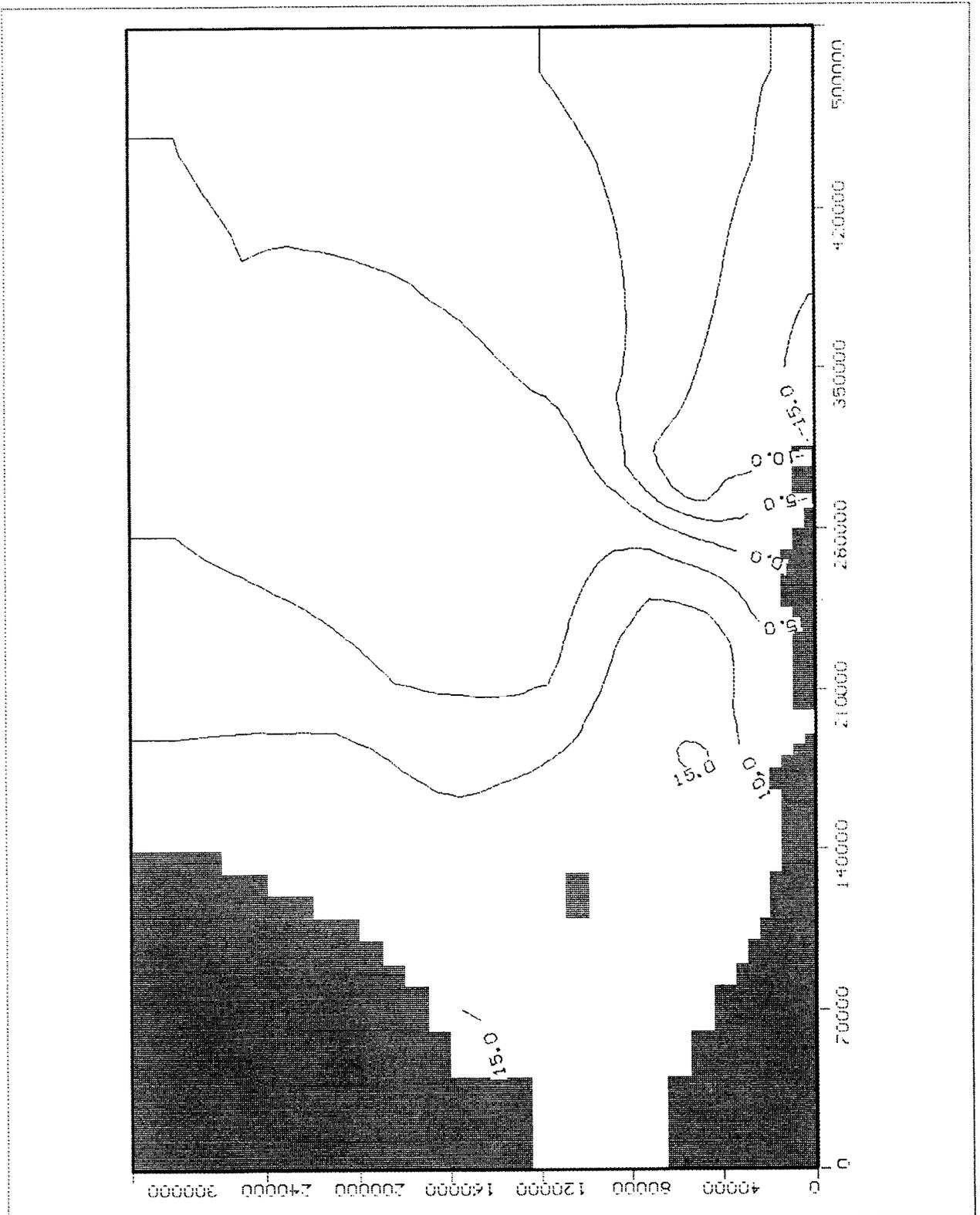
- Synthèse hydrologique du bassin du lac Tchad, 1966-1970. PNUD/UNESCO/CBLT, Paris 1972.
- Etude des ressources en eau du bassin du lac Tchad en vue d'un programme de développement. Tome 1 : étude hydrogéologique. PNUD/FAO/CBLT, Rome 1973.
- Route de l'unité ; alimentation en eau. Rapport final. HYDROGEO CANADA, 1976.
- Puits prioritaires du département de Diffa. Rapport final. HYDROGEO CANADA/ACDI, 1976.
- Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965. ORSTOM/CIEH, Paris 1976.
- Pre-drilling hydrogeological investigations, areas XIV and XV. SCET International/Federal ministry of water resources of Nigeria, 1979.
- Mise en valeur des ressources en eau du bassin de la Komadougou Yobé. FAO/Commission nigéro-nigériane de coopération, Rome 1980.
- Projet d'irrigation de la vallée de la Komadougou. Euroconsult/Ministère néerlandais des Affaires Etrangères/CBLT, Arnhem, 1981.
- Aptitude des eaux souterraines à l'irrigation des cultures. HYDROSULT/ACDI/Ministère du développement rural, Montréal 1984.
- Etude des ressources en eau du bassin de la Komadougou Yobe. IWACO B.V./FED/Commission nigéro-nigériane de coopération, 1985.
- Expérimentation des eaux souterraines pour fins d'irrigation dans le département de Diffa. BRGM/ACDI-PADADD, 1987.
- Premier programme d'hydraulique villageoise et pastorale de la C.E.A.O. ; 87 puits Diffa. BRGM/BADEA/Ministère de l'Hydraulique, Orléans, 1989.

ANNEXES

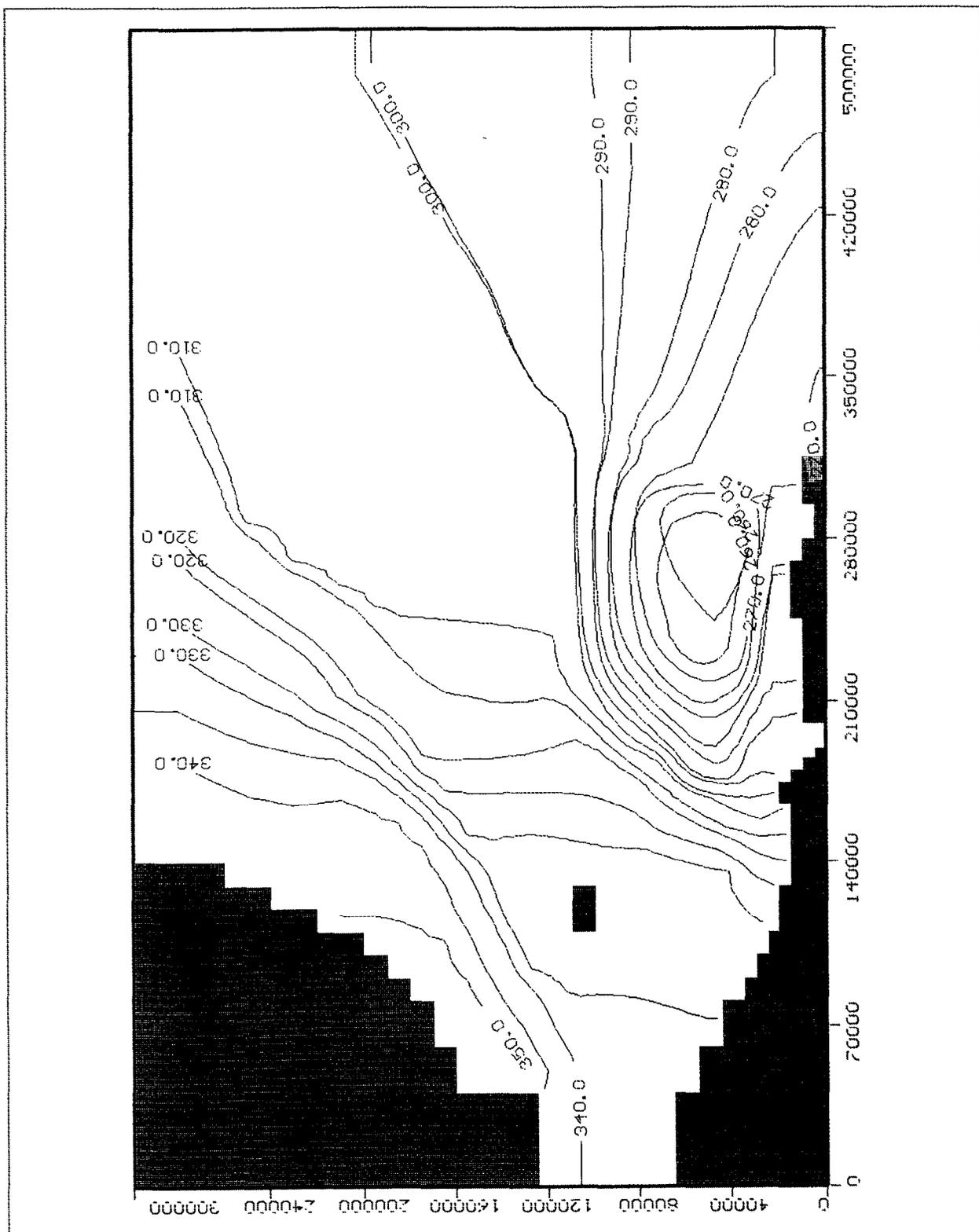


- Piézométrie issue du calage, infiltration de 0.35 mm/an
- - - Piézométrie avec une infiltration de 0.49 mm/an

Sensibilité au volume de l'infiltration

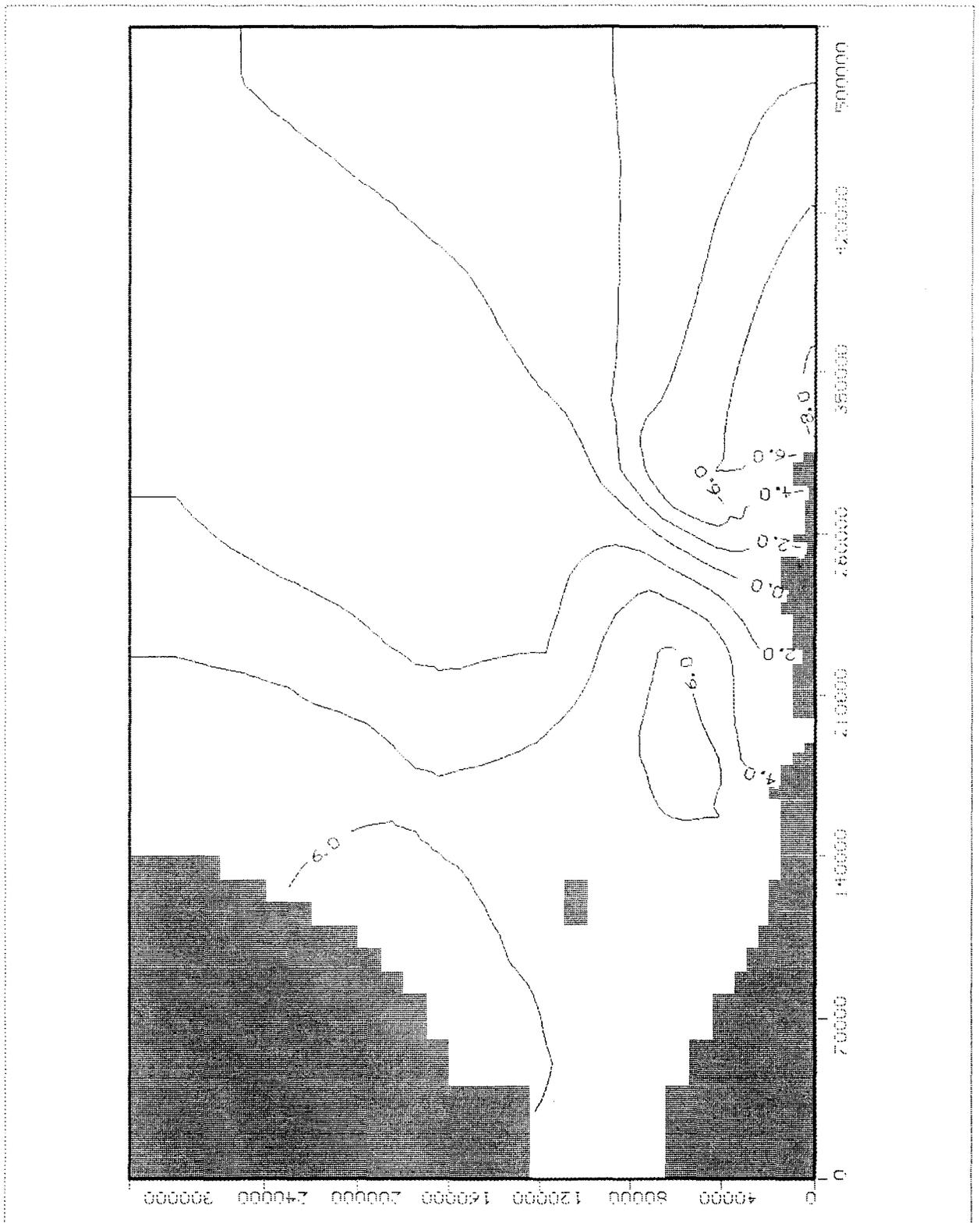


Difference entre les piézométries avec une recharge de 0.49mm/an et 0.35 mm/an
Sensibilité au volume de l'infiltration

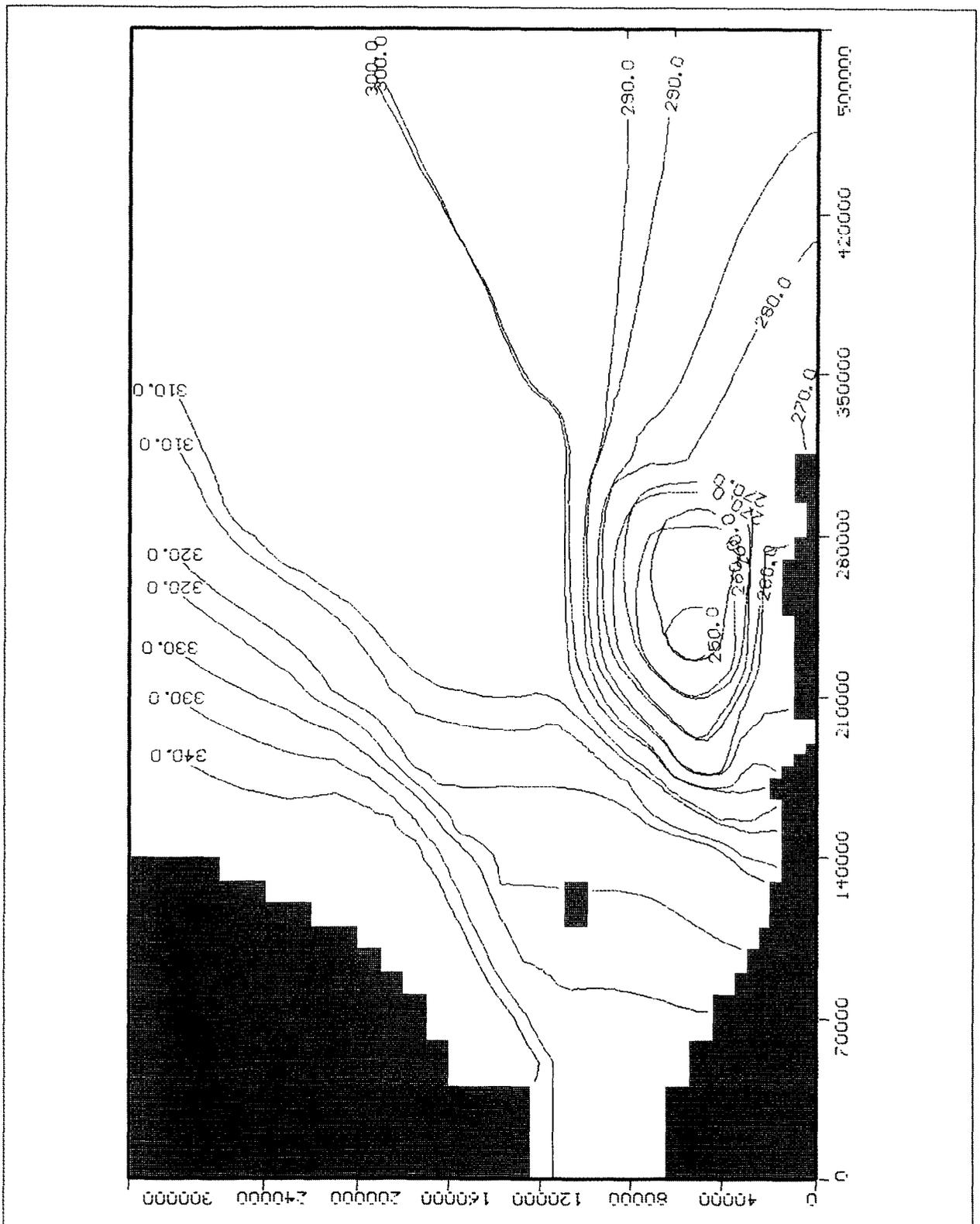


——— Piézométrie issue du calage, infiltration de 0.35 mm/an
 - - - Piézométrie avec une infiltration de 0.42 mm/an

Sensibilité au volume de l'infiltration

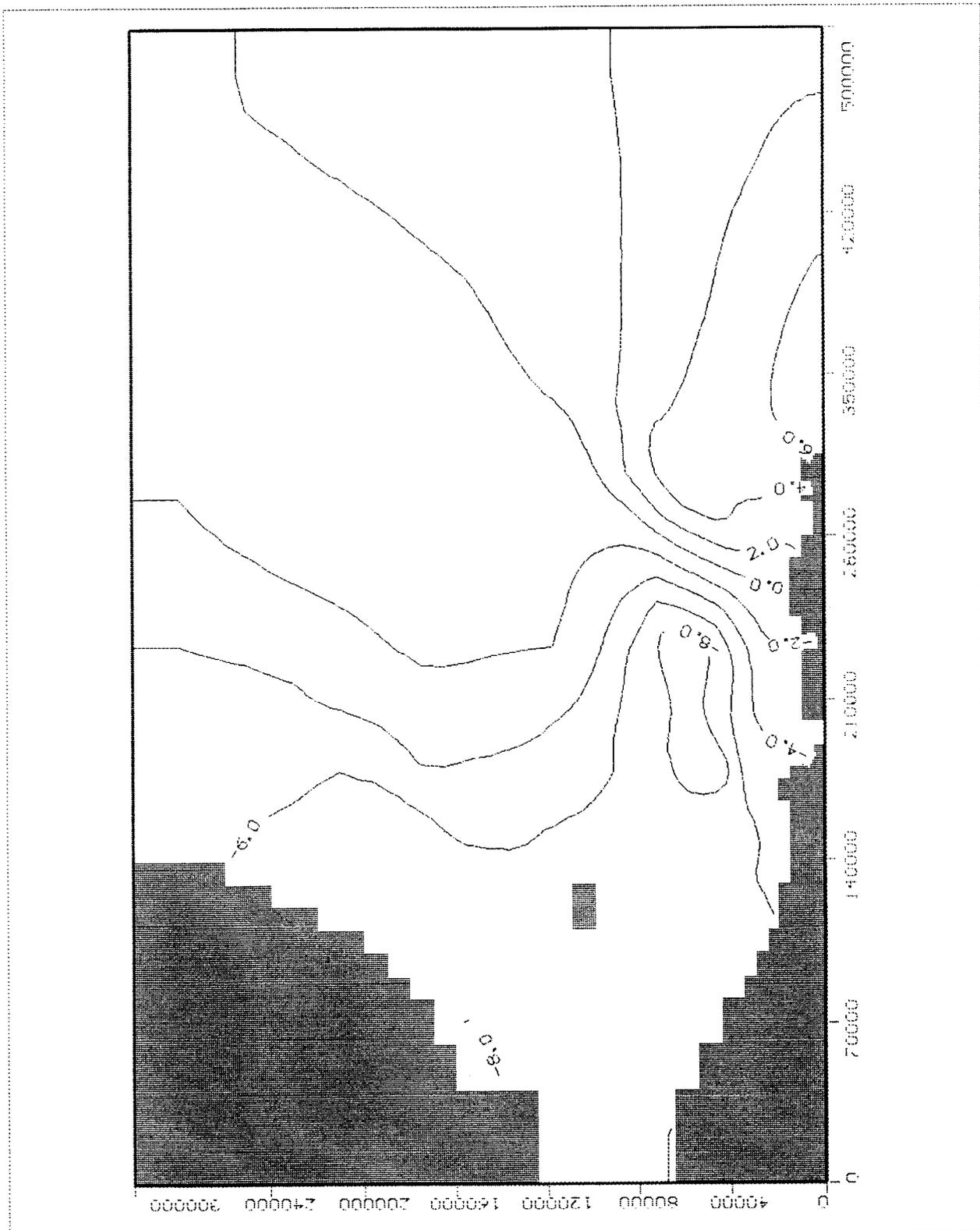


Difference entre les piézométries avec une recharge de 0.42mm/an et 0.35 mm/an
Sensibilité au volume de l'infiltration

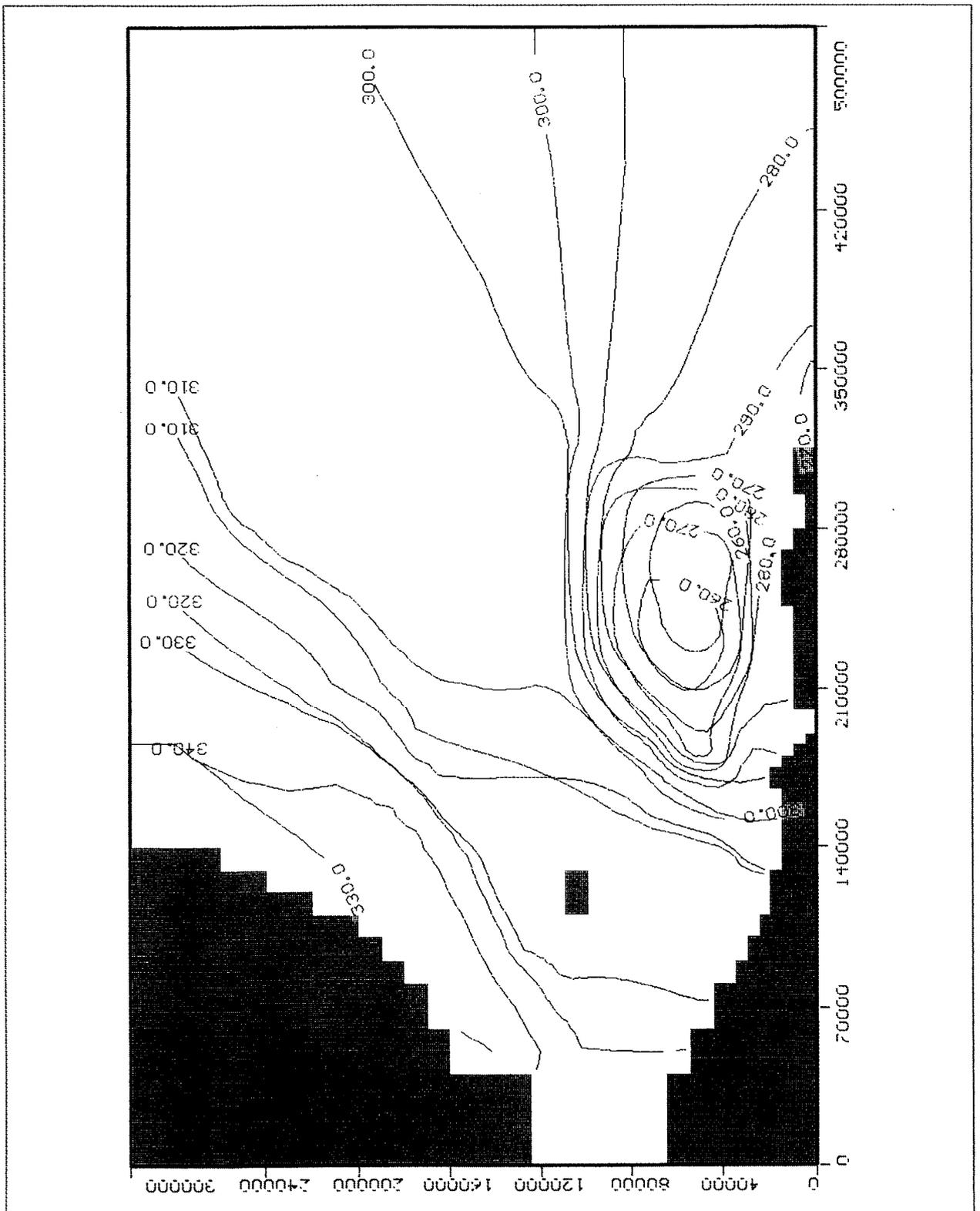


——— Piézométrie issue du calage, infiltration de 0.35 mm/an
 - - - Piézométrie avec une infiltration de 0.28 mm/an

Sensibilité au volume de l'infiltration

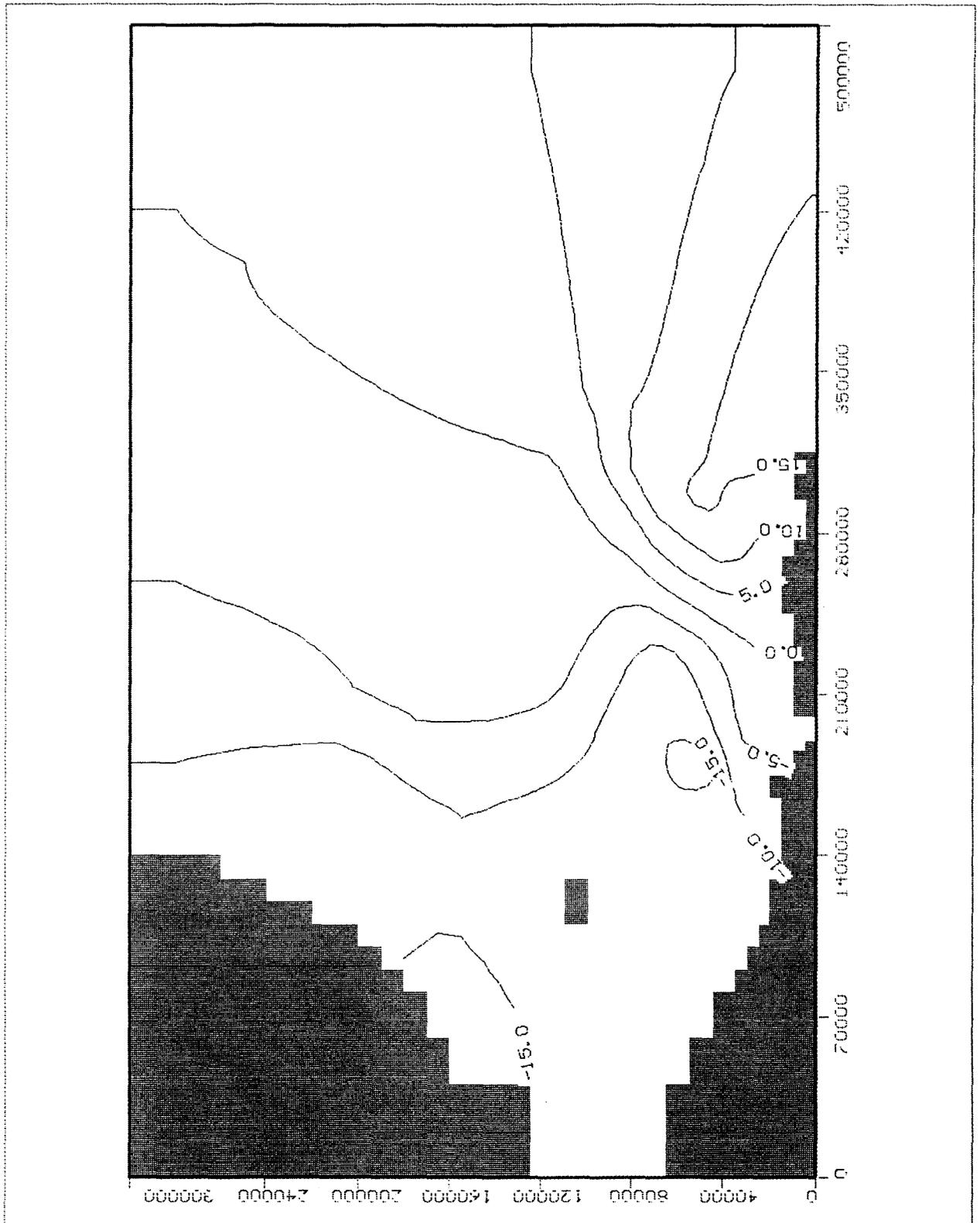


Difference entre les piézométries avec une recharge de 0.28mm/an et 0.35 mm/an
Sensibilité au volume de l'infiltration

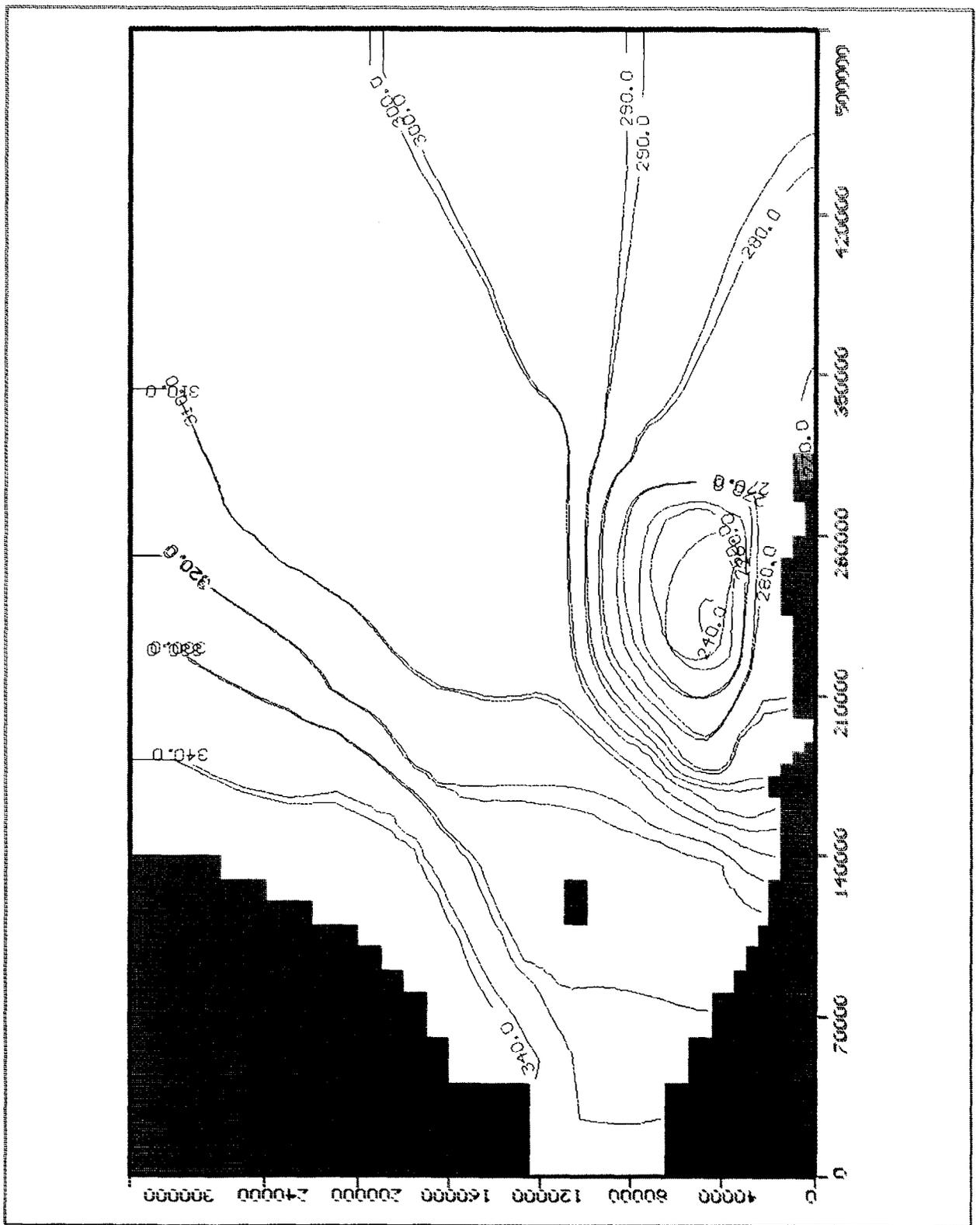


——— Piézométrie issue du calage, infiltration de 0.35 mm/an
 - - - Piézométrie avec une infiltration de 0.21 mm/an

Sensibilité au volume de l'infiltration



Difference entre les piézométries avec une recharge de 0.21mm/an et 0.35 mm/an
Sensibilité au volume de l'infiltration

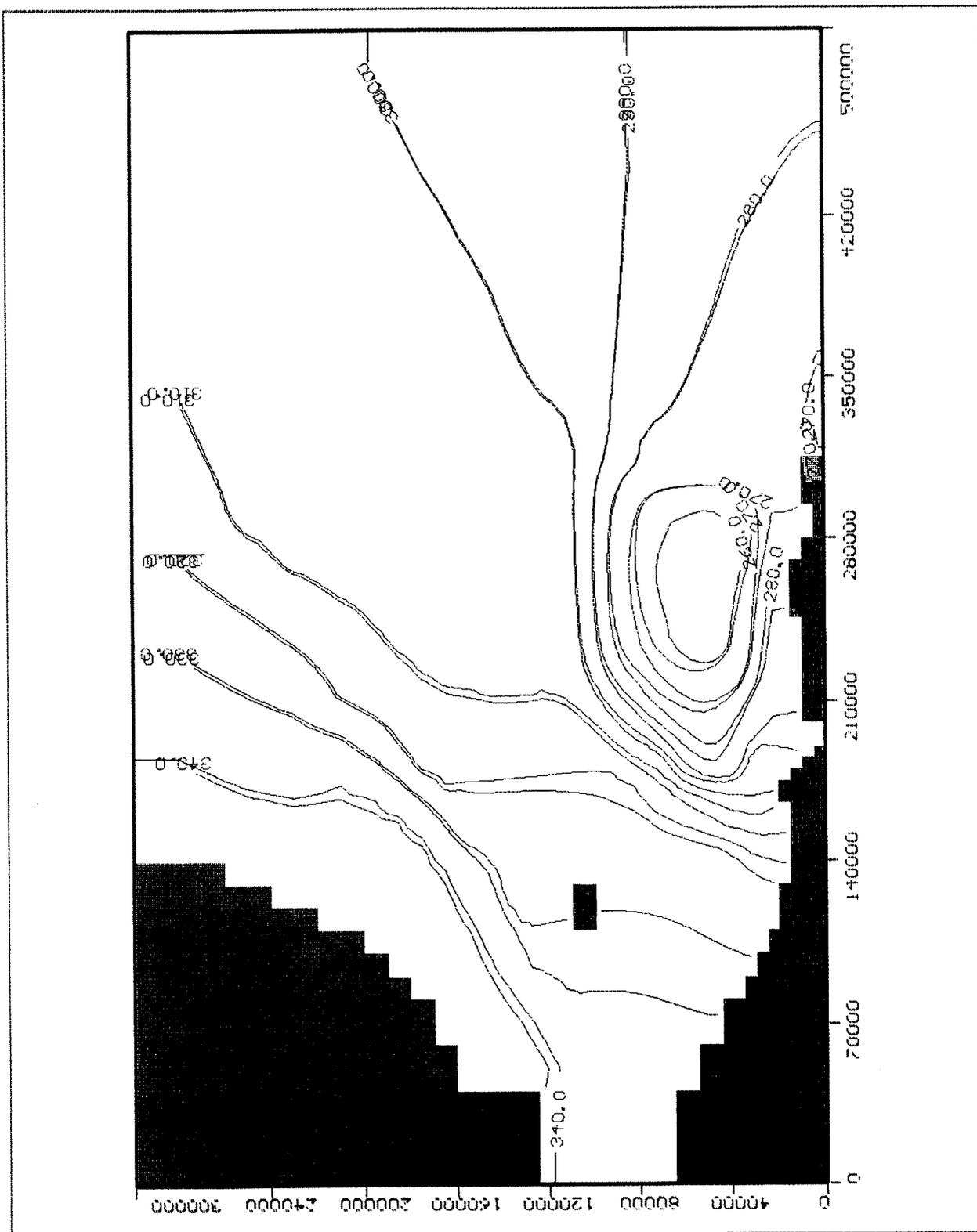


- Piézométrie issue du calage
- - - Piézométrie avec une diminution des apports par la Komadougou de 20%

Sensibilité aux apports par la Komadougou.

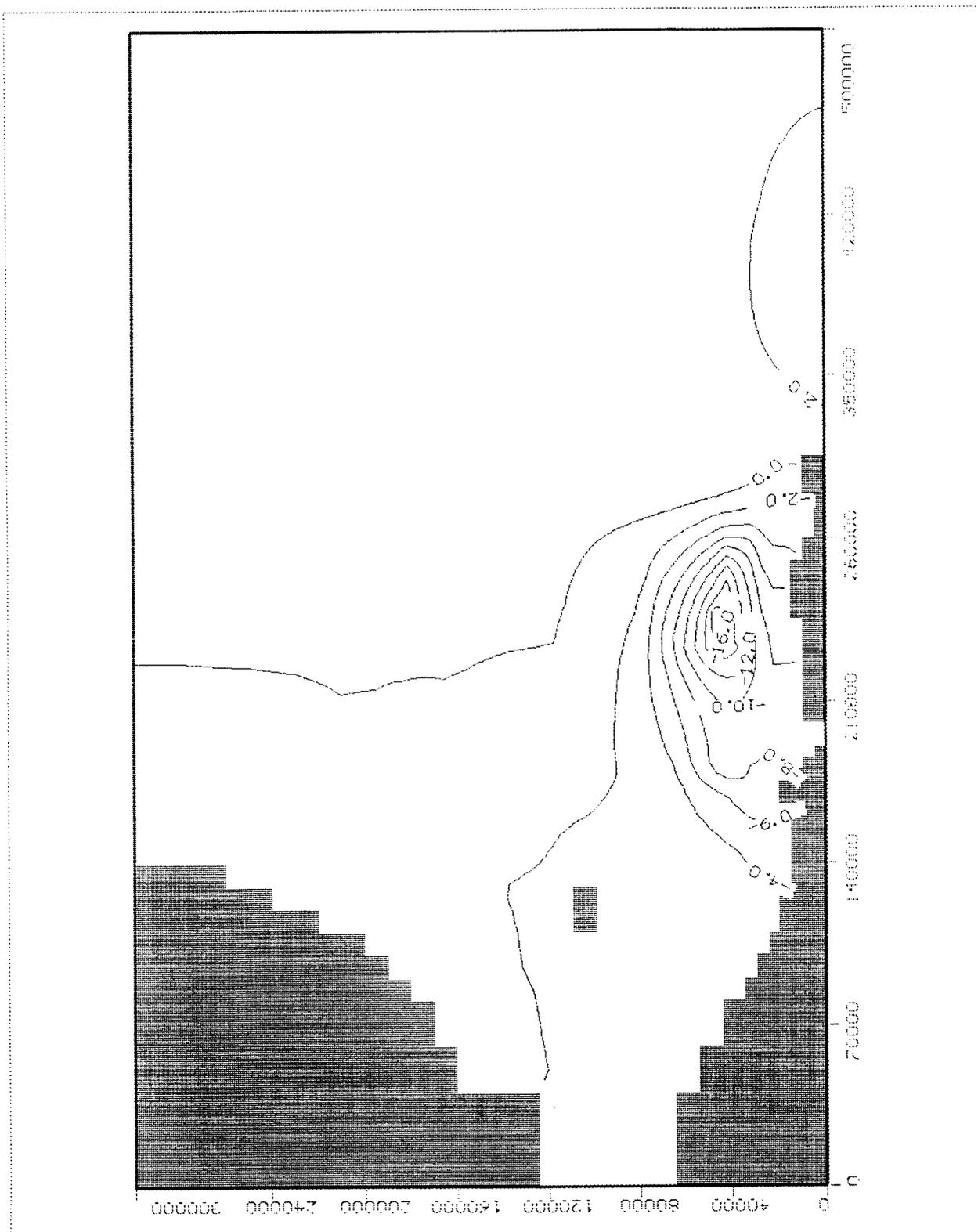


Impact sur la piézométrie de l'augmentation de 20% des apports par la Komadougou
Sensibilité aux apports par la Komadougou.

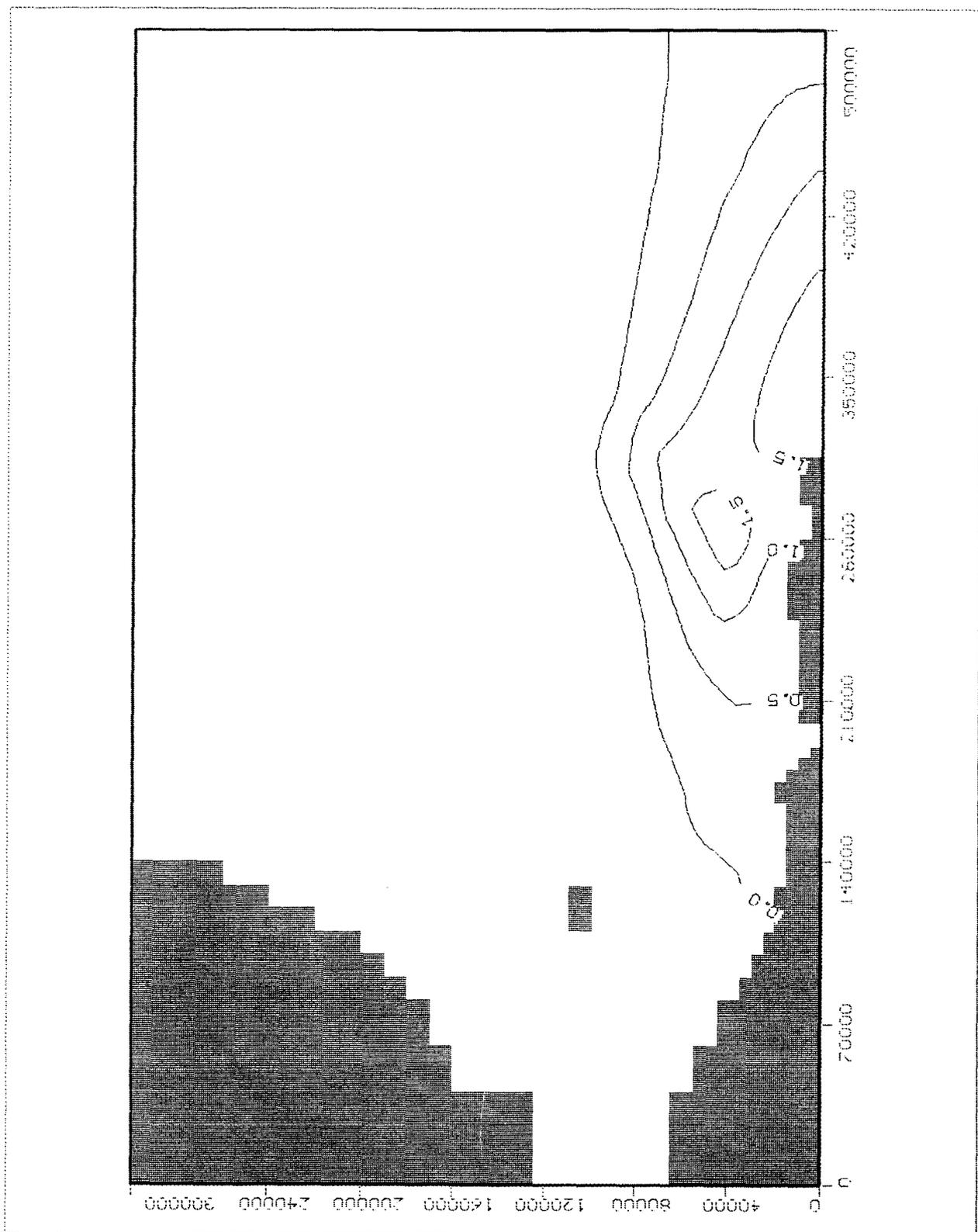


- Piézométrie issue du calage
- - - Piézométrie avec une augmentation des apports par la Komadougou de 20%

Sensibilité aux apports par la Komadougou.

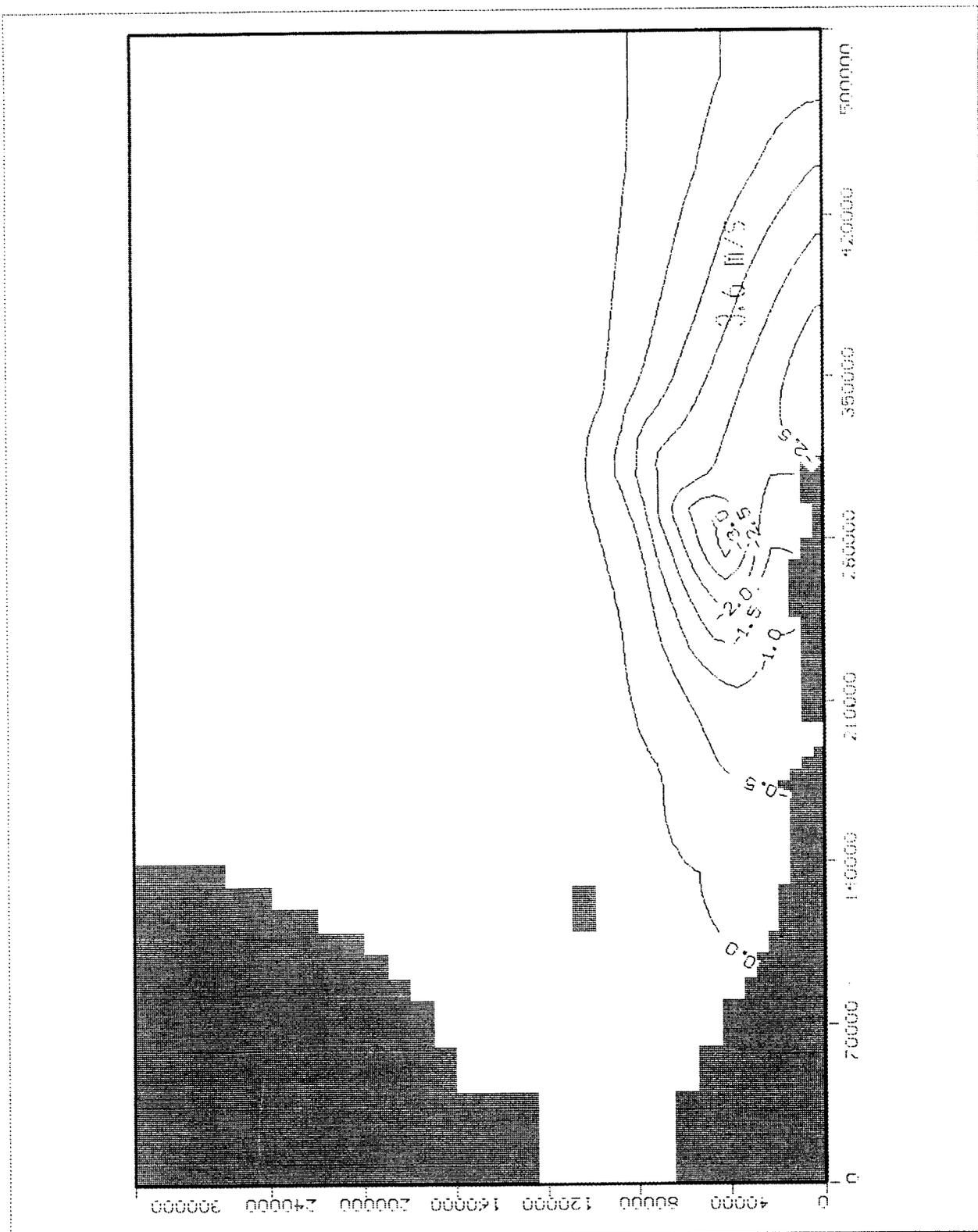


Impact sur la piézométrie de la diminution de 20% des apports par la Komadougou
Sensibilité aux apports par la Komadougou



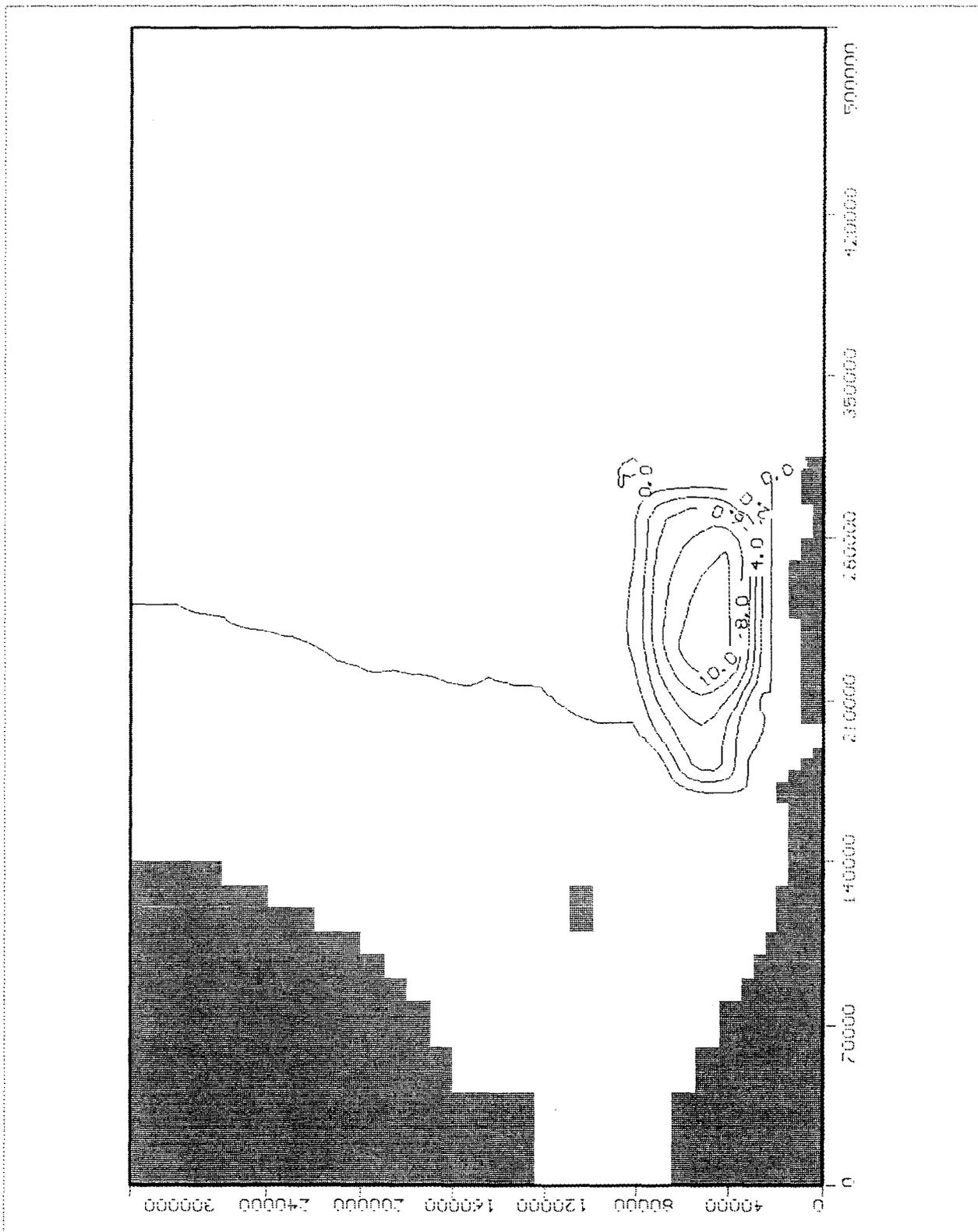
Impact sur la piézométrie d'une augmentation de 10% de la perméabilité dans le secteur du lac Tchad.

Sensibilité aux perméabilités

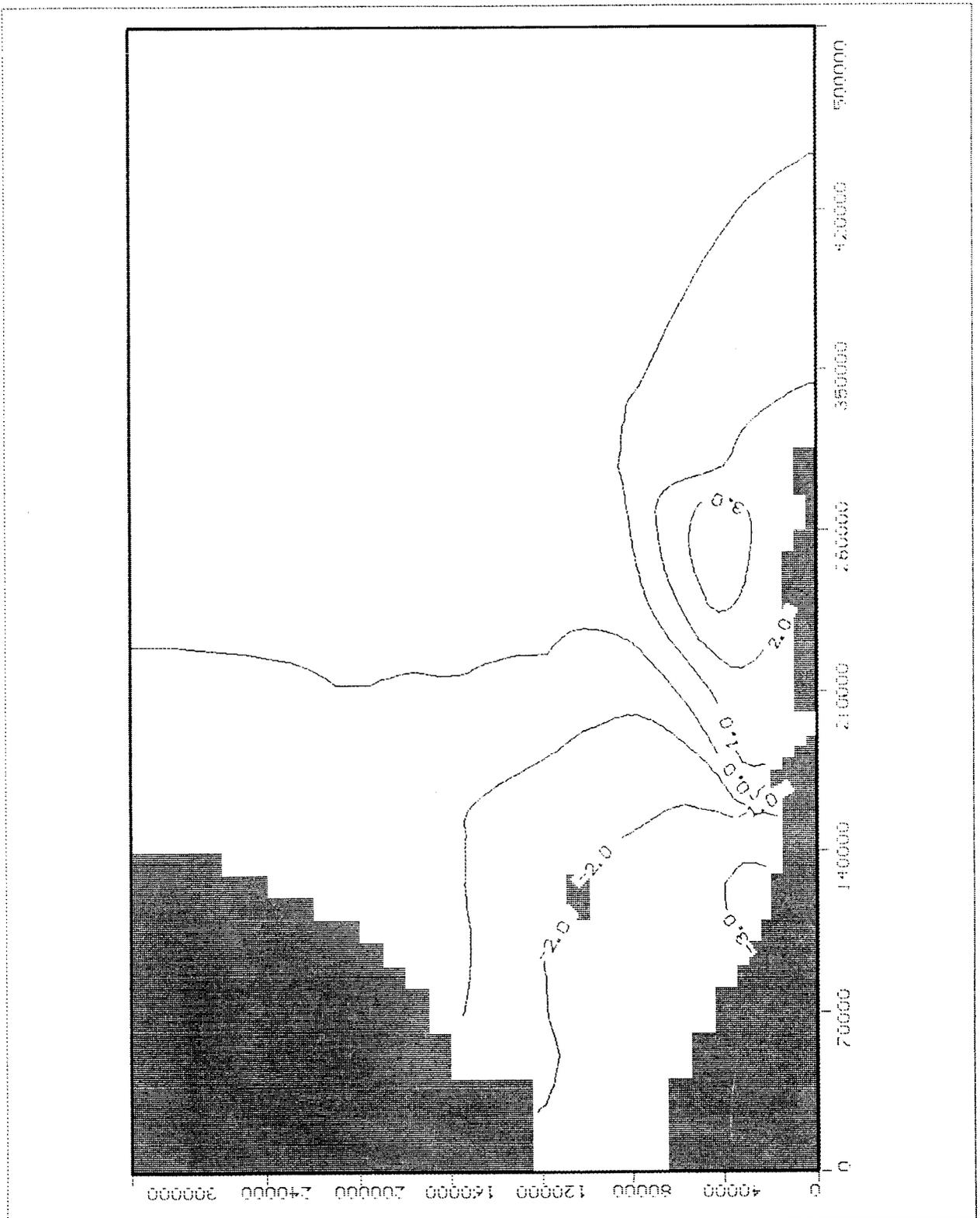


Impact sur la piézométrie d'une diminution de 10% de la perméabilité dans le secteur du lac Tchad.

Sensibilité aux perméabilités

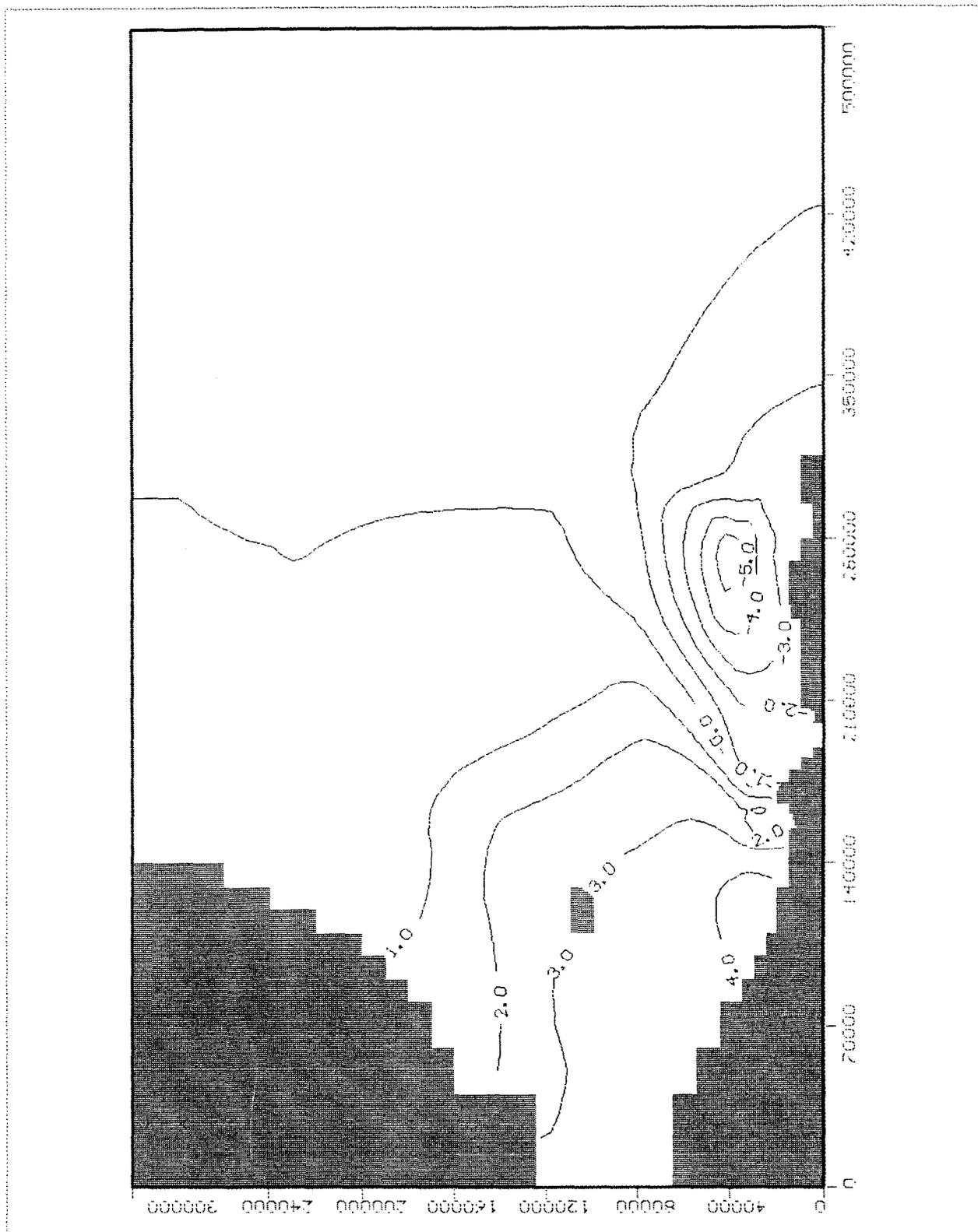


Impact sur la piézométrie d'une augmentation de 50% de la perméabilité dans le Kadzel.
Sensibilité aux perméabilités



Impact sur la piézométrie d'une augmentation de 20% de la perméabilité aux abords de la Komadougou.

Sensibilité aux perméabilités



Impact sur la piézométrie d'une diminution de 20% de la perméabilité aux abords de la Komadoukou.

Sensibilité aux perméabilités

Tableau 15 - Quelques caractéristiques de sédiments meubles.
D'après documents de l'U.S. Geological Survey.

Types de sédiments	d_{10} mm	n %	n_e %	K m/s
Gravier moyen	2,5	45	40	$3 \cdot 10^{-1}$
Sable gros	0,250	38	34	$2 \cdot 10^{-3}$
Sable moyen	0,125	40	30	$6 \cdot 10^{-4}$
Sable fin	0,09	40	28	$7 \cdot 10^{-4}$
Sable très fin	0,045	40	24	$2 \cdot 10^{-5}$
Sable silteux	0,005	32	5	$1 \cdot 10^{-9}$
Silt	0,003	36	3	$3 \cdot 10^{-8}$
Silt argileux	0,001	38	-	$*1 \cdot 10^{-9}$
Argile	0,0002	47	-	$*5 \cdot 10^{-10}$

*Valeurs calculées

Tableau 17 - Valeurs du coefficient de perméabilité.
Influence de la granulométrie : diamètres des grains
et diamètres respectifs

K (m/s)		10 ¹ 1 10 ⁻¹ 10 ⁻² 10 ⁻³ 10 ⁻⁴ 10 ⁻⁵ 10 ⁻⁶ 10 ⁻⁷ 10 ⁻⁸ 10 ⁻⁹ 10 ⁻¹⁰ 10 ⁻¹¹										
		Gravier pur		Sable pur	Sable très fin	Silt	Argile					
GRANULOMETRIE	homogène	Gravier pur		Sable pur	Sable très fin	Silt	Argile					
	variée	Gravier gros et moyen	Gravier et sable	Sable et argile-Limons								
DEGRES DE PERMEABILITE		TRES BONNE BONNE			M A U V A I S E		NULLE					
TYPES DE FORMATIONS		P E R M E A B L E S			S E M I - P E R M E A B L E S		I M P E R .					

limites conventionnelles

RESUME

Cette étude est consacrée à l'hydrogéologie quantitative de la nappe quaternaire du Manga. Le Manga est une région du Niger Sud-Oriental, bordant le lac Tchad, où vivent environ 200 000 habitants. Elle couvre approximativement 130 000 km². Le climat y évolue d'un type sahélien avec une courte saison des pluies au Sud, à un climat de type saharien au Nord. Nous avons construit un modèle régional de la nappe quaternaire du Manga. Le premier objectif était de proposer un schéma global du fonctionnement de la nappe, et en particulier de la dépression piézométrique du Kadzell. Le second était d'évaluer l'infiltration par les précipitations.

Compte tenu du manque de données, le champ de possibilités pour les valeurs des termes hydrogéologiques était très vaste. Pourtant, après avoir testé l'ensemble des valeurs possibles, en partant des limites maximales admissibles, il apparaît que le jeu de paramètres aboutissant à une telle piézométrie est restreint, et que les débits circulant dans la nappe tendent vers de faibles valeurs. Le modèle s'avère donc a posteriori comme très intéressant.

Au terme de cette modélisation la recharge obtenue est de l'ordre du millimètre par an, ce qui est très faible et suppose des eaux relativement âgées. Par ailleurs, la dépression piézométrique du Kadzell apparaît correctement représentée lorsque les flux latéraux sont limités par de faibles perméabilités et que l'on impose une légère exfiltration.

Mots-Clefs : hydrogéologie ; Niger ; Manga ; Kadzell ; lac Tchad ; nappe du Quaternaire ; nappe en creux ; milieu poreux ; modélisation numérique ; recharge par les précipitations.