

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du

DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES (D.E.A)

Spécialité : Géologie appliquée

Mention : hydrogéologie

Par

ABDERAMANE Hamit

**ETUDE DU FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE DU
SYSTEME AQUIFERE DE LA ZONE DE L'OFDA ET NYA PAR
MODELISATION MATHEMATIQUE (DOBA, TCHAD)**

Le 02 juillet 2007 devant le jury :

MM. C.B.GAYE	Président	Professeur	FST-UCAD
S.FAYE	Rapporteur	Maître de Conférences	FST-UCAD
A.FAYE	Examineur	Maître de Conférences	FST-UCAD
S.NDOYE	Examineur	Maître Assistant	ESP-UCAD
D.DJORET	Examineur	Maître Assistant	FSEA- UNDJ(Tchad)

Sommaire

Introduction	1
Chapitre I : GENERALITES	3
1.....	S
SITUATION GEOGRAPHIQUE	4
2.....	L
LA POPULATION	7
3.....	L
LE CONTEXTE CLIMATIQUE	7
3.1.....	
Le climat :	7
3.2.....	L
à zone tropicale.....	8
3.3.....	L
à température	10
3.4.....	L
l'humidité.....	11
4.....	L
LES PRECIPITATIONS	11
5.....	L
L'ÉVAPOTRANSPIRATION	12
6.....	S
BOIS ET VEGETATION	13
7.....	S
LE SYSTEME HYDROLOGIQUE.....	14
8.....	C
LE CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE	16
9.....	R
REPERES SUR LES TRAVAUX ANTERIEURS	19
Chapitre II : GEOLOGIE ET CARACTERISTIQUES STRUCTURALES ..	21
1.....	G
GEOLOGIE	22
1.1	L
Le socle cristallin	22
1.2	L
Les formations sédimentaires	23
1.2.1	L
Le Crétacé	24

1.2.2	L
e Tertiaire	25
1.2.3	L
e Quaternaire	26
1.3	
Les cuirasses ferrugineuses	27
2.....	C
ARACTERISTIQUES STRUCTURALES.....	29

Chapitre III : HYDROGEOLOGIE 33

1.....	D
DESCRIPTION DES AQUIFERES :	34
1.1	L
es aquifères sédimentaires	34
1.1.1	l
a nappe phréatique	35
1.1.2	l
es nappes du Quaternaire	35
1.1.3	L
es nappes profondes	35
1.2	L
'aquifère du socle.....	37
2.....	
COMPORTEMENT DE LA NAPPE PHREATIQUE	37
2.1	L
a Piézométrie et alimentation de la nappe	38
2.2	L
es fluctuations saisonnières.....	40
2.3	P
ropriétés hydrodynamiques.....	42

Chapitre IV : LA MODELISATION 43

1.....	O
BJECTIF ET OUTIL UTILISE.....	44
1.1	O
bjectif de la Modélisation	44
1.2.....	P
résentation de l'outil.....	44

1.3	Principes mathématiques du modèle	P	44
2	MODELE CONCEPTUEL	M	48
2.1	Le toit de l'aquifère	L	48
2.2	Le mur de l'aquifère	L	50
2.3	Les conditions aux limites	L	51
2.3.1	Limite à potentiel imposé	L	52
2.3.2	Condition de flux nul	C	52
2.3.3	Condition des Débits Imposés	C	53
2.4	Le domaine à modéliser	L	53
2.5	La discrétisation du domaine	L	53
3	MODELISATION DES ECOULEMENTS	M	55
4	VALIDATION DES PARAMETRES	C	55
4.1	Principe du calage	P	55
4.2	Validation du modèle en régime permanent	V	58
4.3	Bilan global du système	B	60
5	EXPLOITATION DU MODELE	E	66
5.1	Simulation des prélèvements	S	66
5.2	Simulations d'une augmentation de recharge		69
5.3	Simulation en régime transitoire de transport d'un contaminant		72
	Conclusion		78

Bibliographie :	80
Liste des figures :	I
Liste des tableaux :	II
Annexes :	III

Résumé

La zone de l'OFDA et Nya située au sud du Tchad, est essentiellement constituée des sédiments continentaux. Ces dépôts du Continental terminal, hétérogènes (sableux, argileux sablo-argileux) renferment une nappe libre qui s'écoule vers l'Est et le Nord Est. Dans cette étude, des mesures piézométriques ont été effectuées sur 42 piézomètres et 16 puits 2002-2006 dans le but d'évaluer le comportement du système aquifère par modélisation mathématique.

Les données collectées ont permis de préciser les paramètres physiques du système, la structure et la géométrie (toit et mur) de l'aquifère, la distribution et l'évolution de la piézométrie.

La modélisation réalisée a permis de comprendre la dynamique de l'écoulement et les échanges entre le domaine modélisé et ses limites. Le bilan global de la nappe montre que la nappe est essentiellement alimentée par les précipitations et que les pertes aux frontières sont importantes contrairement aux apports aux limites.

Les tests de sensibilité du modèle à la variation des paramètres physiques ont permis de simuler d'une part des prélèvements supplémentaires de 25% dans le but d'évaluer le comportement de la nappe suite à une demande supplémentaire en eau et d'autre part de simuler une recharge supplémentaire (250 à 320mm/an) due projet de recyclage des eaux des champs captant. Les résultats issus de la simulation des prélèvements montrent des rabattements de 1 à 5m au droit des puits villageois alors que ceux issus de la recharge supplémentaire mettent en exergue un battement de la nappe de 1 à 13m dans la zone présumé de recharge.

L'exploitation du modèle a permis aussi de simuler l'évolution d'une particule dans le temps et dans l'espace. Le résultat issu de cette simulation a permis de déterminer des périmètres de protection de la nappe.

Cette étude qui représente une première étape dans la compréhension du fonctionnement hydrodynamique du système aquifère de l'OFDA et Nya, a permis de faire l'état des connaissances sur les caractéristiques hydrauliques du système à savoir : la perméabilité et la recharge.

Mots clés : OFDA et Nya, Continental terminal, modélisation, bilan, recharge.

INTRODUCTION

Dans le cadre de l'exploitation du pétrole du bassin tchadien de Doba, le consortium Esso a mis sur pied un plan de gestion de l'environnement, dans lequel la gestion de la ressource en eau, tant souterraine que de surface fait l'objet d'une attention particulière.

Les populations de la zone de l'OFDA et NYA exploitent pour leurs besoins quotidiens en dehors des cours d'eau (Loule, Nya et Pendé très peu exploités) la nappe d'eau souterraine. Cette nappe exploitée gît dans des formations constituées par une alternance de sables fins à grossiers, de sables argileux et d'argiles appartenant au Continental terminal.

Le développement des champs pétroliers dans cette zone pourrait être à l'origine de source de contamination de cette nappe : soit par une pollution ponctuelle, soit par une pollution généralisée. La modélisation du fonctionnement hydrodynamique du système aquifère de la zone s'inscrit dans une optique prévisionnelle.

Cette étude a pour objet de caractériser le fonctionnement hydrodynamique du système aquifère de la zone d'étude et sa sensibilité à un prélèvement supplémentaire ou à une recharge supplémentaire. Ainsi nous avons utilisé la modélisation mathématique par la méthode des différences finies développée par Visual MODFLOW pour reproduire le comportement hydrodynamique de la nappe.

Le présent mémoire s'articule autour de quatre chapitres de la manière suivante :

Le premier chapitre présente les généralités où nous avons décrit la situation géographique, le contexte climatique, le système hydrologique et la géomorphologie de la zone d'étude.

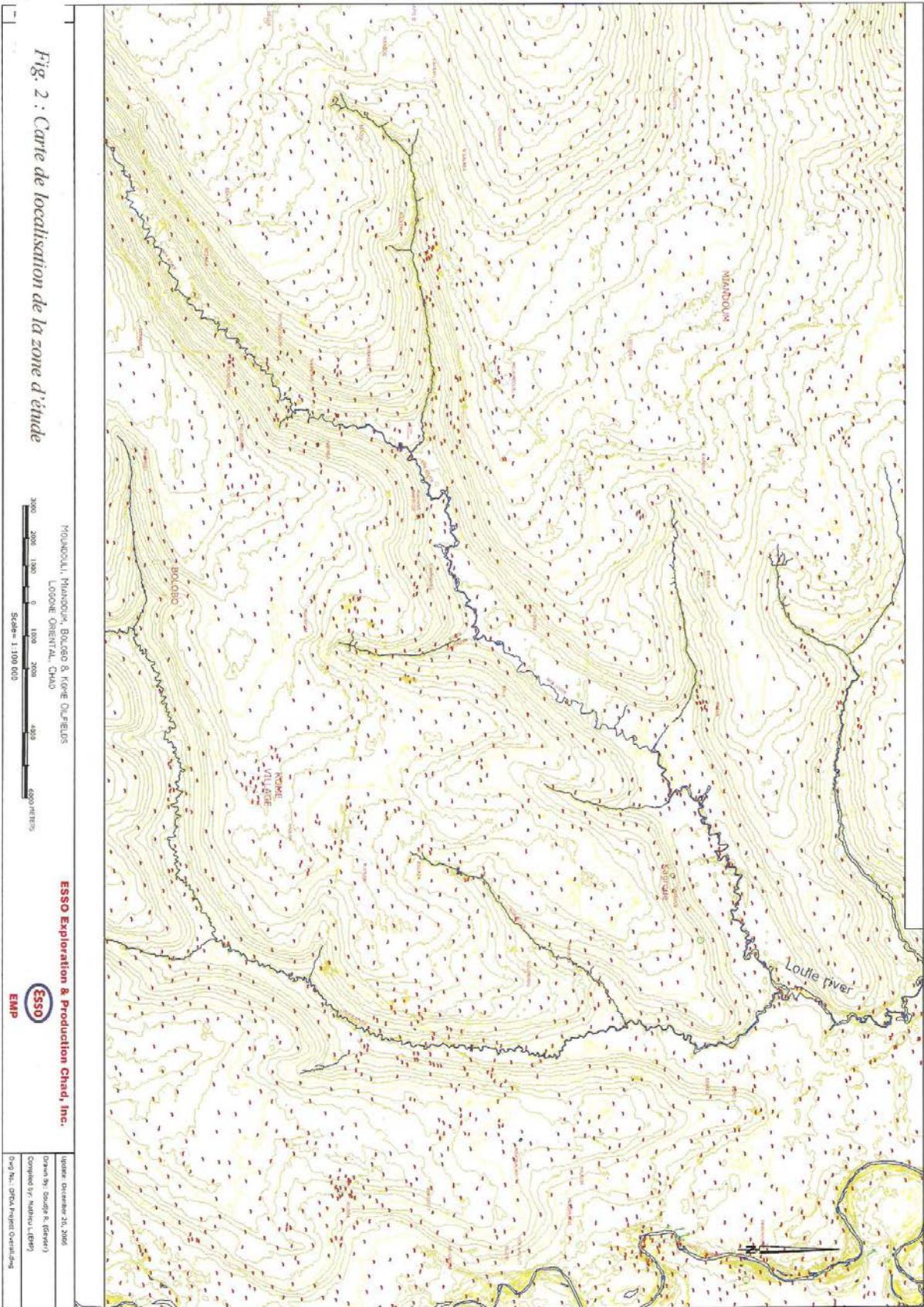
Le deuxième et le troisième chapitre sont consacrés respectivement à la description de la géologie et des caractéristiques structurales et à l'étude hydrogéologique.

Le quatrième chapitre est consacré à la modélisation dans lequel un modèle hydrodynamique du fonctionnement de la nappe est établi pour tester la sensibilité de la nappe.

Chapitre I : GENERALITES

1. SITUATION GEOGRAPHIQUE

La zone de l'OFDA et NYA, objet de la présente étude se trouve dans le bassin de Doba (Préfecture du Logone Oriental) entre 16°20' et 16°50' de longitude Est et entre 8°40' et 8°20' de latitude Nord ; elle se localise à environ 300 km à vol d'oiseau au sud de la capital N'djaména, République du Tchad. Le Tchad est un pays enclavé situé au cœur de l'Afrique avec une superficie de 1.284.000km². Il est limité au nord par la Libye, à l'Est par le Soudan, au Sud par la République Centrafricaine et à l'Ouest par le Cameroun, le Nigeria, et le Niger. (fig.1 et 2).



2. LA POPULATION

La population tchadienne est estimée en 2005 à environ 9,83 millions d'habitants avec une densité moyenne de 7,8 hab./km². Cette densité varie de 0,2 au nord à 11 hab./km² au sud avec un taux de croissance de 2,95%, un taux de mortalité infantile de 93,8⁰/₀₀ pour une espérance de vie de 48 ans.

Toutefois, elle est inégalement répartie sur trois zones de la manière suivante :

- Dans la zone sahélo-saharienne et saharienne (pluviométrie annuelle est inférieure à 250 mm) située au nord couvrant la quasi-moitié de la superficie totale du pays ; elle est de 2%
- Dans la zone sahélienne (pluviométrie est comprise entre 200 et 700 mm/ans) située au centre représentant le quart de la superficie du Tchad ; elle est de 50%.
- Dans la zone soudanienne caractérisée par une pluviométrie annuelle comprise entre 700 et 1500 mm, la population est d'environ 48%.

La zone d'étude appartient à cette dernière zone ; elle est essentiellement rurale avec une densité relativement élevée. C'est une zone assez bien arrosée et fertile et où la population vit de l'agriculture, de la pêche et de l'élevage.

3. LE CONTEXTE CLIMATIQUE

3.1 Le climat

La région est soumise à un climat de type tropical soudanien avec une influence guinéenne en limite sud de la zone d'étude. Ce climat tropical type est caractérisé par une saison sèche bien marquée qui a lieu au cours de l'hiver boréal et une saison des pluies également bien marquée (Rodier, 1964)

La saison des pluies dure six à sept mois (mai à début novembre) ; elle est caractérisée par des faibles écarts de températures et des moyennes assez faibles. Par contre la saison sèche

qui dure cinq à six mois (novembre à avril) est caractérisée par de grands écarts de températures où les nuits sont relativement froides et les journées chaudes.

3.2 La zone tropicale

La zone tropicale située au nord de l'équateur couvre environ le cinquième du territoire tchadien dans sa partie méridionale. Cette zone soudanienne du Tchad se caractérise par une pluviométrie moyenne de 1200 à 1500 mm irrégulièrement répartie dans le temps et dans l'espace. L'isohyète 700 mm constitue la limite nord de cette zone et la zone de l'OFDA et NYA qui fait l'objet de notre étude se situe entre les isohyètes 1200 et 1500 mm.

Le régime pluviométrique est marqué par une saison des pluies d'environ six à sept mois (mai à début novembre) et une saison sèche d'environ cinq à six mois (novembre à avril). Ces variations saisonnières sont la conséquence du déplacement de l'équateur météorologique ou zone intertropicale de convergence (ZITC).

La convection équatoriale des masses d'air continental sec et chaud (Harmattan) venant du Sahara en engendre des vents secs au nord et celle des masses d'air équatoriale maritime (Mousson) issues de l'anticyclone de Sainte-Hélène et de l'anticyclone Austral avec des vents relativement froids, humide et instables, constitue le moteur de cette circulation. En effet la ZITC présente une structure en front de pente très faible s'abaissant de l'équateur appelé Front Intertropical (FIT). L'évolution du FIT dépend du développement de l'anticyclone de Saint-Hélène qui favorise le remontée du flux du Mousson.

La ZITC se retrouve dans sa position la plus septentrionale en juillet avant de redescendre vers le Sud en janvier-février. Le passage au sol du FIT détermine la saison des pluies et celle-ci est d'autant plus tardive et brève que l'on se déplace vers le Nord (Massuel, 2001).

En somme le secteur de l'OFDA et NYA est soumis à l'influence du flux de mousson pendant l'été boréal et se trouve sous la structure de la ZITC où la mousson est la plus épaisse.

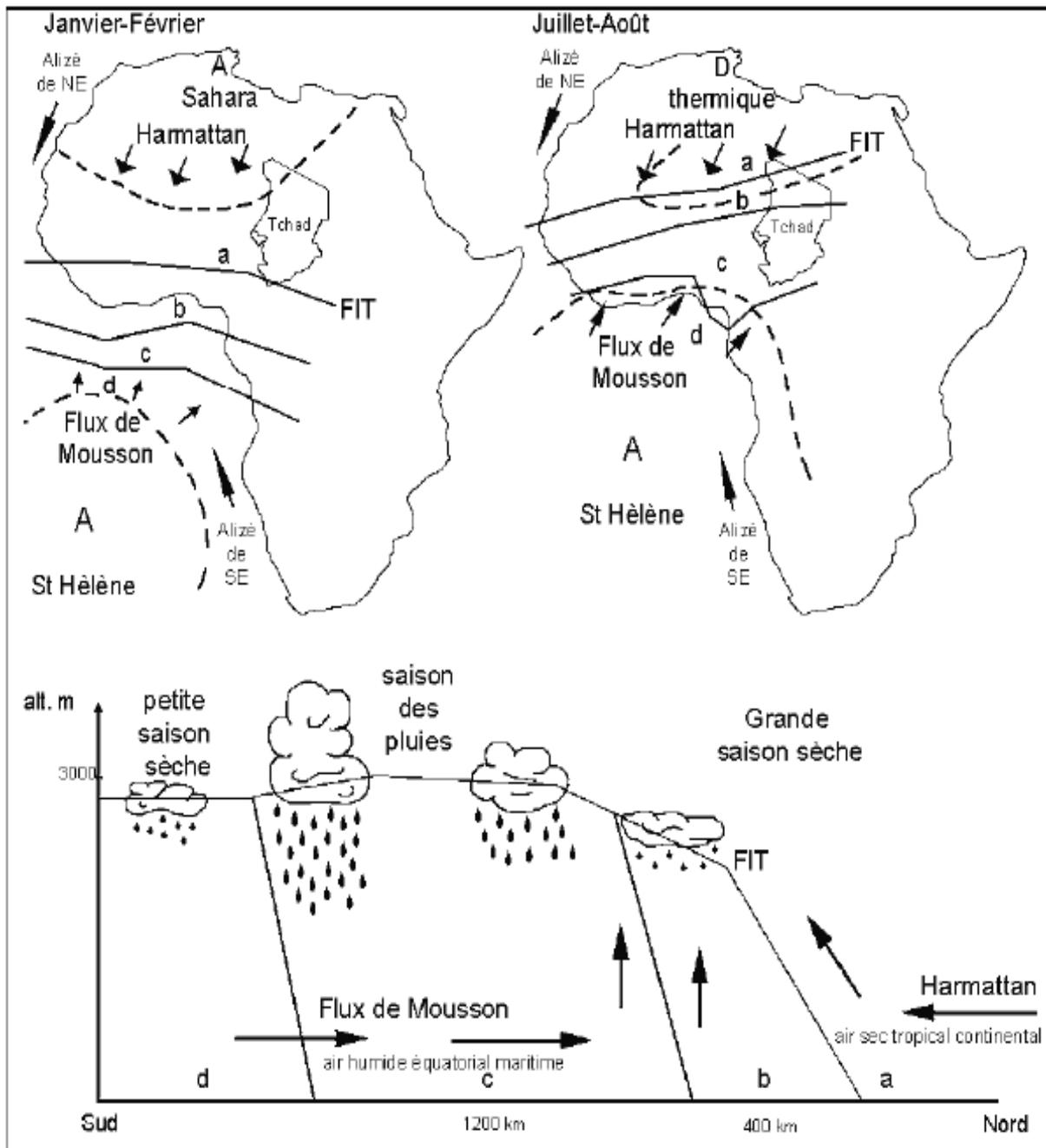


Fig.3 : Schéma des principaux flux de masses d'air en Afrique de l'Ouest et nord sud de la troposphère avec la localisation des zones pluvieuses au sol.

a-zone sans pluie ; b-zone avec des orages isolés ; c-zone où dominent les lignes de grain et les « pluies de mousson » ; d-zone avec des pluies réduites (d'après Olivry et al. 1996 ; Roche.1980 in Massuel.2003)

3.3 La température

Les températures caractérisent en premier lieu les masses d'air d'advection ; elles sont plus basses en atmosphère de Mousson que durant l'Harmattan. De ce qui précède, il en résulte qu'il fait plus chaud en saison sèche qu'en saison humide sur l'ensemble de notre zone d'étude.

Les données disponibles sont les valeurs moyennes mensuelles, mesurées aux stations de Bébédjia et de Doba et couvrent la période de 1990 à 2006.

Ces données nous permettent de déterminer l'indice de continentalité (K) selon la formule suivante :

$$K = 1,7 \frac{(T-t)}{\varphi} - 20,4$$

Si $K = 0$ représente un climat entièrement maritime et K supérieur à 0 correspond à un climat complètement continental.

T =Température moyenne du mois le plus chaud

t =Température moyenne du mois le froid

φ =Latitude

1,7 et 20,4 =Constantes

On trouve $K=68$ pour notre zone ; cette valeur obtenue indique que notre secteur est plus continental que maritime (une évidence) et que les cours d'eau (Pendé, Nya, et Loulé) ont peu d'influence atmosphérique sur l'aire de l'OFDA.

La température moyenne annuelle est de 28,5°C, les mesures de 1990 à 2006 présentent une moyenne de 28,1°C et des minima moyens annuels compris entre 21,1 et 16,4°C, et des maxima moyens annuels entre 34,4°C et 35,5°C (Frey, 1997).

3.4 L'humidité

L'évolution de l'humidité relative suit le cycle hydrologique. L'humidité est maximale entre la mi-juillet et la mi-septembre ; elle peut atteindre 65 à 75% pendant cette période hivernale. Elle est minimale de janvier à avril où elle est inférieure à 35°.

4. LES PRECIPITATIONS

La pluviométrie annuelle varie en général de 1000 à 1350mm. La région étudiée se trouve donc à la limite des climats tropicaux semi-arides et des climats subtropicaux. On passe ainsi d'un climat soudano-guinéen au sud à un climat sahélo-soudanais au nord.

L'analyse des données pluviométriques des stations proches du secteur d'étude donne les résultats suivants :

- Les pluies sont irrégulières dans le temps et l'espace ;
- Le nombre de jours de pluie dans l'année varie d'un endroit à un autre, il est compris entre 60 et 90 jours ;
- Sur l'ensemble de l'étendue de la zone de l'OFDA, le nombre de jour de pluie est plus élevé aux mois de juillet et d'août ;
- Les pluies sont particulièrement violentes et on peut s'attendre à des averses plusieurs fois par mois ;
- Les pluies ne sont pas uniformes (Cf. annexe n°1), les mois de juillet et d'août sont les plus pluvieux et montrent un accroissement de la pluie du sud vers le nord.

5. ÉVAPOTRANSPIRATION

La température et l'humidité de l'air ont été mesurées mensuellement à la station de l'aéroport de Doba situé à environ 30km de Komé. Les valeurs moyennes annuelles obtenues à partir de la banque des données de la Direction de la Ressource en Eau et de la Météorologie du Tchad (DREM) sont de 28°C pour la température et de 57% pour l'humidité. Ces données utilisées ne couvrent que la période de 1990 à 2006.

Les mois les plus secs présentent les températures plus élevées. Pour calculer l'évapotranspiration potentielle, nous avons utilisé la formule d'Ivanov, du fait qu'elle permet de calculer l'évapotranspiration potentielle mensuelle moyenne à partir des moyennes mensuelles de température et d'humidité.

Le calcul d'évapotranspiration est très fondamental puisqu'elle permet d'apprécier les pluies efficaces.

$$ETP_{Ivanov} = 0,0011 * (T + 25)^2 * (100 - U)$$

Où

T est la température moyenne mensuelle de l'air en °C ;

U est la moyenne mensuelle de l'humidité relative de l'air en % ;

ETP_{Ivano} est la hauteur évapotranspirée en un mois en mm.

Ainsi la différence des pluies avec l'évapotranspiration potentielle calculée à partir de la formule d'Ivanov montre que le cumul annuel des précipitations est en moyenne de 546,77mm (cf. Annexe 2) et que l'infiltration dans le sol d'une partie des précipitations n'est possible qu'entre le mois de mai et de septembre.

6. SOLS ET VEGETATION

Les sols dans le secteur d'étude sont issus de plusieurs facteurs pédogéniques successifs des parties superficielles des formations du Continental Terminal. Ce sont généralement des sols ferrugineux tropicaux lessivés à taches et concrétions mais à caractère hydromorphe.

Dans l'OFDA et NYA, on peut distinguer plusieurs sols anciens tels que :

- Les sols bauxitiques des Koros sur la série paléotchadienne supérieure ;
- Les sols ferrallitiques dont les vestiges se retrouvent jusqu'au nord du 12^{ème} parallèle ;
- Les sols cuirassés au niveau des altérites comprises entre 420m et 500m ; ils proviennent du démantèlement des sols bauxitiques et qui ont été déformé ultérieurement ;
- Une deuxième variété de sol ferrallitique qui se confond avec le sol actuel dans notre secteur d'étude (Pias, 1968)

La couverture végétale sur ces sols varie selon les zones climatiques. Au sud, les sols non inondables sont occupés par la savane arborée forestière dont la hauteur et la densité dépendent de la topographie et de la nature des sols.

La savane arborée devient très vite clairsemée et qui peut se réduire à quelques arbustes lorsque de l'eau séjourne sur le terrain favorisant ainsi le développement de graminée.

Dans la zone où le relief est relativement plat et les plaines légèrement ondulantes, les savanes boisées sont nombreuses et des rivières à faible débit occupent les vallées encaissantes peu profondes et souvent larges.

Dans l'ensemble la végétation est représentée par des espèces soudaniennes dont la hauteur, la densité et la répartition sont généralement fonction de la topographie et de la nature des sols.

- ❖ Sur les sols ferrallitiques rouges et les sols plus humides, la strate arborée est essentiellement représentée par *Burkea africana*, *Daniellia oliveri*, *Isobertinia*

doka, Terminalia macopetra Terminalia avicennioïdes Prosopis africana, Butyrospermum parkii, Randia nilotica etc.

- ❖ Sur les sols alios ferrugineux la strate arbustive est représentée par *Monotes kerstingii* sur les sols bien drainés et par *Eragrostis cambessiadan* sur les sols mal drainés, on trouve également d'autres espèces telles que *Boswellia dalzielii*, *Sterculia tomentosa*, *Acacia hebecladiodes*, et *Erthrina spp.*

La végétation culminante de la zone est une savane boisée soudano-guinéenne avec des forêts galeries. Il est également possible que la forêt sèche, dominée par *Erythrophleum suaveoleus* et *Marauthes glabra* soit présente dans la zone d'étude ; mais cette formation n'a pas été observée.

7. LE SYSTEME HYDROLOGIQUE

La zone de l'OFDA est parcourue par trois cours d'eau qui sont la Nya, la Loulé et la Pendé (fig. 4). La Nya s'écoule du Sud-Ouest vers le Nord-Est traversant ainsi la zone de Miandoum, Bolobo et de Nya avant de se joindre à la Loulé qui, lui s'écoule d'Ouest en Est puis du Sud vers le Nord. Ces deux cours d'eau (la Nya et Loulé) drainent l'ensemble de ruissellement du bassin de Komé Village et du bassin de Maïkeri. La Pendé est ensuite rejoint par l'ensemble Nya-Loulé aux alentours de Doba

Les seules données que nous disposons pour l'étude du comportement des eaux de surface sont des mesures des débits de la Pendé à la confluence de l'ensemble Nya-Loulé prises à la station de Doba. Comme l'ensemble des eaux de surface qui arrivent à la station ne dérivent pas uniquement des cours d'eau qui intéressent notre secteur d'étude, l'estimation du débit d'eau de l'OFDA devient impossible.

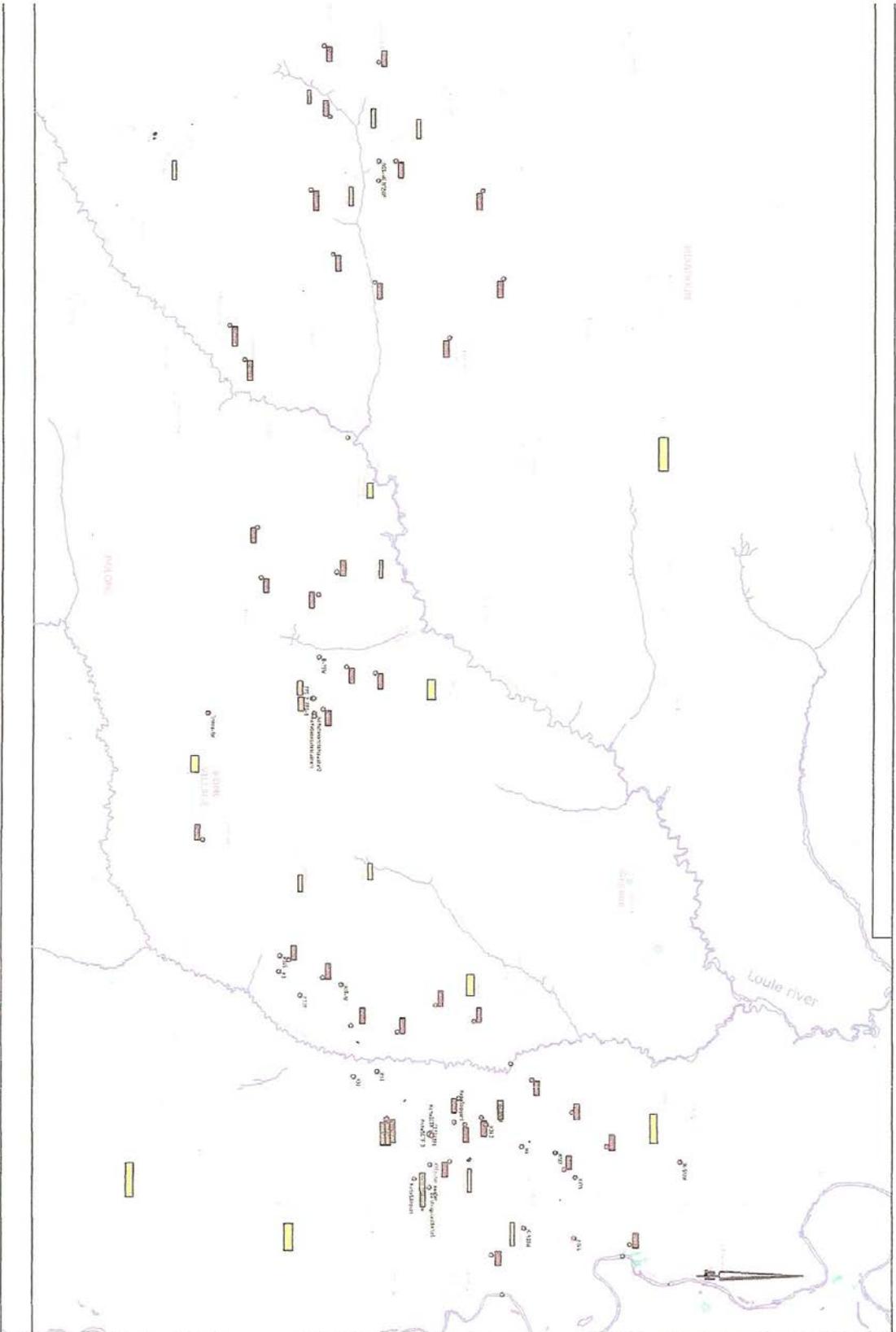
4 : carte hydrographique de la zone d'étude



ESSO Exploration & Production Canada, Inc.



ISSUE: December 26, 2006
 Drawn By: Donald A. (DAG) /
 Checked By: Murray (LSEW)
 Eng. Proj. Data Input: Overaleng



8. CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE

La zone de l'OFDA et NYA fait partie intégrante de la zone des plateaux appelés : «Koros ». La zone des Koros s'étend dans la partie méridionale du pays sur environ 49.500km² et couvre les préfectures de la Tandjilé, du Logone Oriental et du Logone Occidental. Elle est limitée au sud ouest par la frontière camerounaise, au sud par la République Centrafricaine, à l'est par le moyen Chari et au nord par les plaines du Chari Baguirmi au niveau du 10° parallèle et nord ouest par la préfecture du Mayo Kébbi.

Ces Koros présentent des altitudes qui peuvent dépasser 450-500m avec un sommet à plus de 627m à Bebangher situé à 45km de Moundou. Ils sont incisés par des vallées à cours d'eau permanents situés à 100-150m en contrebas des plateaux et le Logone, résultat de la confluence entre le Logone Occidental provenant du Cameroun et de la Pende prenant sa source en République Centrafricaine (Bureau de l'eau 1995).

La zone de l'OFDA et NYA constitue la partie Est d'une dépression d'orientation Est-ouest ; elle est entourée par huit (8) Koros de la manière suivante :

- Au nord par les Koros de Guidari et de Bewaïdou ;
- Au sud par des zones plus élevées du massif des grès de Bebo et par les koros de Timbéri et de Kagopal ;
- Au sud est par les Koros de Bebopen ;
- A l'ouest par les Koros de Miladi et de Bénoye.

Cette zone qui intéresse notre étude s'intègre en partie dans le koro de Miladi qui est entaillé au nord ouest par le Nya. Le reste (3/4) du secteur est occupé par des plaines alluviales avec des altitudes oscillant entre 400 et 380m (fig. 5 et 6).

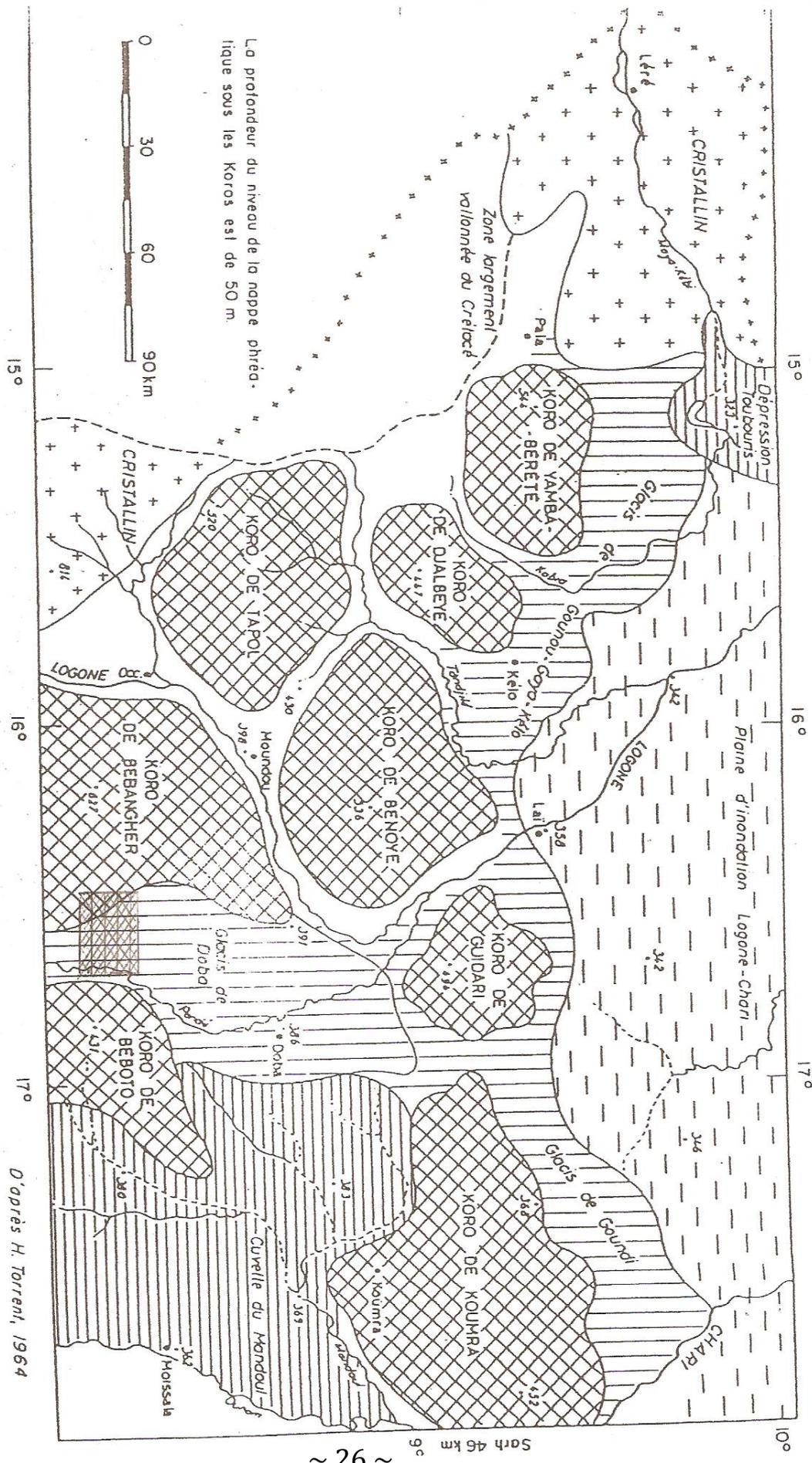


Fig.5 : Situation géographique des Koros (Bassin de Doba)

D'après H. Torrenl, 1964

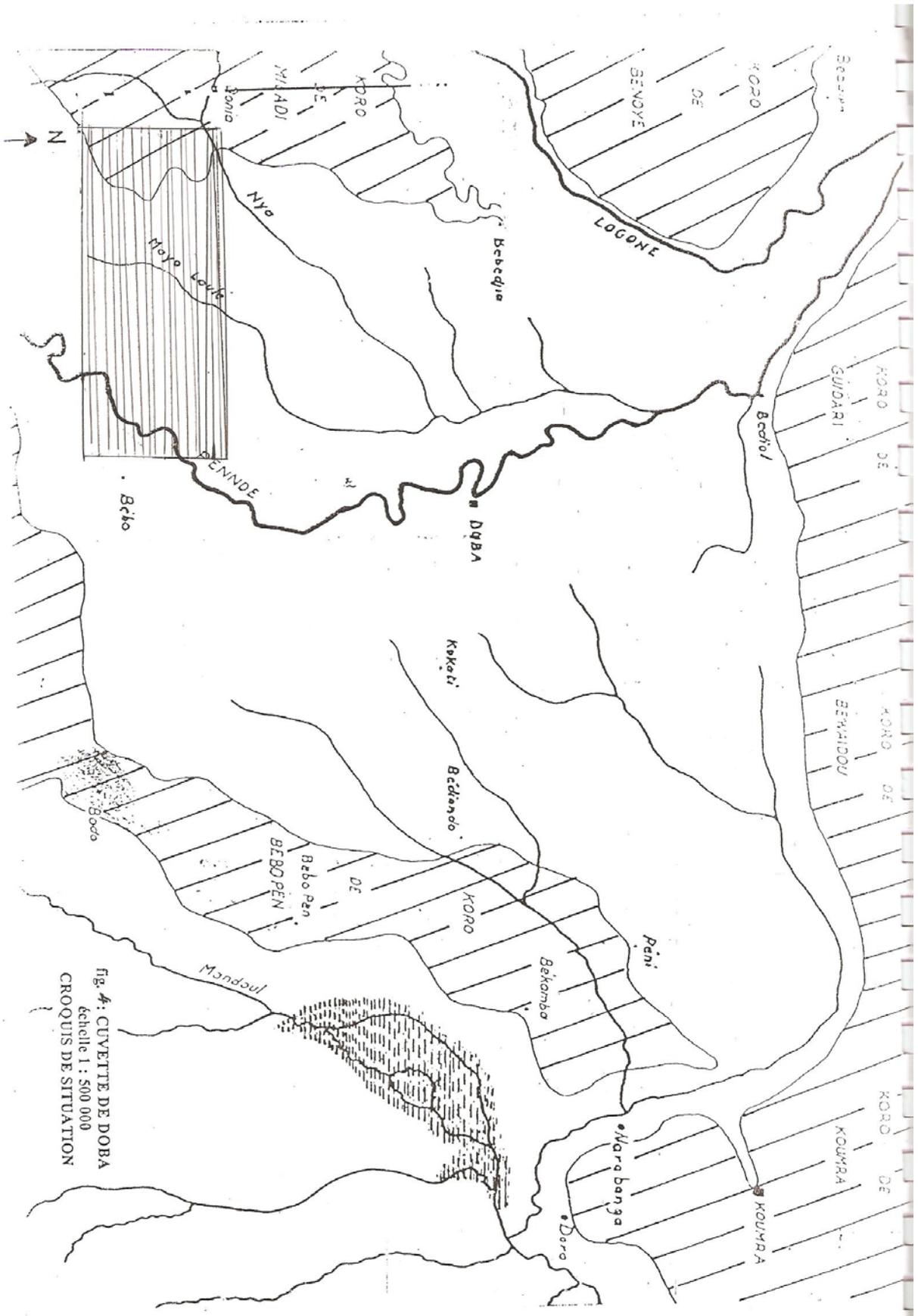


Fig. 4: CUVETTE DE DOBA
 échelle 1 : 500 000
 CROQUIS DE SITUATION

9. RAPPEL SUR LES TRAVAUX ANTERIEURS

La géologie du Tchad est restée pendant longtemps méconnue et ce n'est que vers 1952 que les travaux ont pris une importance surtout avec les levées de plusieurs coupes qui ont permis de dresser des cartes de synthèse au 1/200000° (Vincent, 1954, Gerard, 1958 ; Wacrenier; 1961). Egalement cette époque de 1952 a vu naître les premières prospections géophysiques.

Ainsi dans la partie méridionale du pays, les travaux de Creen et Godivier (1956) ont mis en évidence la fosse de Doba grâce à quelques itinéraires gravimétriques et des sondages électriques en lignes courtes.

L'année 1956 a fait l'objet d'une prospection aéroportée exécutée par l'ORSTOM. Cette prospection s'est focalisée principalement sur la région située à l'Ouest du 19° méridien mais n'a malheureusement pas dépassé l'axe Pala-Moussafoyo. Cette prospection a permis de mettre en évidence l'existence d'un bassin au Nord de Massenya, aussi d'un autre bassin d'orientation Est-Ouest au Sud de Bousso, et cela grâce à l'interprétation des données fournies par la prospection. Il a été aussi mis en évidence à la latitude de Koumra d'un affaissement du socle important vers le Sud et la bordure de la fosse orientée Ouest-Est.

D'autre part, Wacrenier (1961) a noté lors de l'interprétation de données structurales que l'allongement de la fosse était parallèle à celui des bancs crétacé qui affleurent à l'Ouest du Mayo-Kébbi et au Cameroun. Il a aussi émis l'hypothèse d'un comblement de la fosse de Doba par du matériel détritique lors de la transgression marine Cénomanienne, phénomène qui le conduisit à insister sur la nécessité d'une étude géophysique complémentaire pour l'interprétation des sondages stratigraphiques devant permettre de fixer l'intérêt pétrolier de la région.

L'ORSTOM (1961) a exécuté des prospections gravimétriques, électriques et un profil de sismique réfraction.

En 1963, Baudic (in Tabé, 1978) a réalisé une interprétation des résultats issus des prospections électriques et sismiques dans laquelle, il propose une coupe Nord-Sud de la région montrant le profil sismique passant par Doba. La figure 9 montre la situation de la coupe sur un fond structural schématique

Cette interprétation stimula le Gouvernement tchadien et, dans le souci de bien cerner ses ressources pétrolières il a accordé à la société CONOCO le Permis de Recherche Pétrolière dans le bassin de Doba (Permis du Chari). Cette campagne de prospection de sondage a commencé en 1973 par l'exécution à Doba d'un sondage arrêté à la profondeur de 4261m le plus profond de la campagne.

Chapitre II : GEOLOGIE ET

CARACTERISTIQUES STRUCTURALES

1. GEOLOGIE

La géologie du secteur a fait l'objet d'études approfondies grâce aux recherches pétrolières effectuées dans la région. On distingue dans cette zone qui se situe en bordure de la cuvette Paléotchadienne, trois ensembles géologiques correspondant aux unités morphologiques (les koros) citées ci-dessus (fig.5 et 6).

On distingue de bas en haut diverses formations géologiques qui constituent le bassin et son soubassement :

- au sud, le socle cristallin constitué des granitoïdes et des formations métamorphiques ;
- des dépôts crétacés qui reposent en discordance sur le socle ;
- au centre, des dépôts tertiaires-quaternaires (Continental terminal) de la Cuvette Paléotchadienne recouvrant la quasi-totalité de la zone ;
- au nord s'observe des alluvions anciennes et récentes sablo-argileuses qui couvrent la partie amont des grandes vallées alluviales situées entre les Koros.

La lithologie des formations détritiques est très imprécise, en effet les forages au rotary ne permettent pas une distinction nette des différentes couches traversées (Garin.1989).

1.1 Le socle cristallin

Les formations du socle affleurant dans la partie méridionale du Tchad constituent le prolongement du massif de Yadé en République Centrafricaine et du massif de l'Adamaoua au Cameroun. Ces formations affleurent principalement à l'extrémité sud de notre secteur d'étude et s'enfoncent progressivement sous des formations sédimentaires au fur et à mesure que l'on évolue vers le nord.

Le socle s'enfonce sous forme de gradins en partant de la bordure de la fosse vers le centre. Sa profondeur maximale est de 6,5Km au niveau de la fosse de Doba (Tabé, 1994).

Les formations du socle sont caractérisées essentiellement des granitoïdes (granites, syénites) et des formations métamorphiques (gneiss, micaschistes) précambriens. De façon générale, ces formations ont une configuration d'un grand batholite sur lequel flottent des

lambeaux plus ou moins vastes des roches métamorphiques diverses. Le tout est recoupé par des granites circonscrits (Kusnir, 2000).

Les roches intrusives constituées principalement des granites calco-alcalins et subalcalins présentent des affleurements plus métamorphisés de migmatites et des gneiss. Des roches à texture porphyroïde très altérées et diaclasées sont observées ; elles constituent en fait des cailloutis et des arènes des pentes des collines.

Globalement le socle précambrien supporte directement des formations d'âge post-paléozoïque. C'est le cas de notre secteur d'étude. Toutefois aucun témoin du primaire n'a été révélé par les forages profonds réalisés dans la grande fosse tectonique prospectée par les pétroliers comme CONOCO (Mathieu, 1978)

Ce substratum fortement altéré et recouvert par des formations sédimentaires du crétacé disparaît progressivement vers le nord.

1.2 Les formations sédimentaires

La configuration géologique du bassin des champs pétroliers de Doba est presque totalement connue grâce à la prospection pétrolière. Celle-ci révèle que le bassin est recouvert par des formations d'âge Cénozoïque supérieur à Eocène.

Le comblement de la fosse s'est fait par des sédiments issus des terrains du Continental terminal, et par des séries crétacées et tertiaires accumulées préférentiellement dans le centre de la fosse (Bellion, 1989)

La couverture sédimentaire actuelle est le résultat de l'interaction de trois facteurs principaux :

- les transgressions en période humide (dépôts de fines particules)
- les régressions en période aride (dépôts de sables)
- la subsidence du bassin responsable de l'épaisseur des couches.

Il en résulte des dépôts évoluant entre un faciès sableux (sables purs, fluviatiles ou éoliens) et un faciès argileux (argiles kaoliniques ou de néoformation) et ceci du crétacé jusqu'au quaternaire.

1.2.1 Le Crétacé

Il repose en discordance sur le socle et n'apparaît pas à l'affleurement.

Le crétacé supérieur est caractérisé par le Cénomaniens inférieur et moyen, le Cénomaniens-Turonien et le Sénonien inférieur.

Dans la fosse de Doba, ces dépôts sont représentés par un horizon pétrolifère lié à la base des dépôts Albien-Cénomaniens, et Sénonien qui correspond à des profondeurs se situant entre 1350m et 1900m. Cet horizon est constitué essentiellement des argiles et des marnes (Tabé, 1978)

Sur ces formations du Crétacé supérieur reposent des formations du crétacé moyen. Ces dernières sont d'âge Albien-Cénomaniens et représentent le second horizon. Elles sont puissantes de 500 à 600m à la périphérie de la fosse et de 2000 à 2500m au centre (Tabé, 1978).

Ces formations, formées essentiellement de sables et des grès puissants de plusieurs centaines de mètres, sont en fait rattachées aux dépôts continentaux de l'Hamadien (Cénomaniens-Albien à Doba). A celles-ci succèdent des dépôts du Continental intercalaire qui sont représentés par des formations argilo-sableuses.

Enfin les formations du Continental intercalaire sont rattachées à leur tour à la formation du Continental terminal qui recouvre environ $\frac{3}{4}$ de la zone d'étude.

Schneider (1992) et Génik (1993) ont qualifié les formations sédimentaires qui affleurent dans la zone de développement des champs pétroliers d'âge Continental terminal. D'une puissance d'environ 700m (Schneider, 1992) allant même à 1000m (Génik 1993), elles reposent sur des formations d'âge Crétacé dans lesquelles gît du pétrole.

Ces formations du Continental terminal sont constituées des grès, de latérites, d'argiles et des sables fins à grossiers. La série complète décrite au niveau des Koros par Wacréniens (in Djoret, 2000) permet de distinguer du bas en haut :

- ❖ la série paléotchadienne inférieure constituée de sables beiges, de grès et des roches schisteuses passant à des argiles ;

- ❖ la série paléotchadienne moyenne formée de sables rouges, des cuirasses et d'argiles ;
- ❖ la série paléotchadienne supérieure constituée d'argiles kaoliniques, de sables rouges et des cuirasses latéritiques. Ces dernières affleurent sur les Koros.

Dans le secteur d'étude, les coupes géologiques des 60 premiers mètres révèlent la succession suivante avec haut en bas :

- argiles latéritiques ;
- silts argileux ;
- sables fins à grossiers ;
- argiles compactes.

En somme l'ensemble des formations caractérisant le Crétacé est constitué par des matériaux détritiques tels que des dépôts alluviaux et des dépôts lagunaires. Certains de ces dépôts présentent des structures lenticulaires (fig.7). L'absence des fossiles dans ces dépôts rend difficile la détermination avec exactitude des niveaux repères permettant de reconstituer la lithologie de façon très précise. En effet dans l'interprétation du matériel de remplissage du fossé, Louis (1970) suppose que le Crétacé marin pourrait être représenté par 700m de marnes et d'argiles mais Mathieu (1978) signale que les forages pétroliers n'ont pas révélé la présence des sédiments marins (Bellion, 1989).

1.2.2. Le Tertiaire

La limite du Tertiaire avec le Crétacé est mal définie, toutefois les formations du Tertiaire sont représentées par le Continental terminal qui affleure dans toute la zone. Ce sont des formations hétérogènes, représentées par une alternance d'argiles, de sables, de kaolins et de grès dont il est difficile d'établir la succession stratigraphique. Toutefois des coupes de forages ont permis de distinguer de la base au sommet :

- des grès versicolores peu argileux avec des grains moyens de 0,1 à 0,6mm de diamètre ayant des passées plus sableuses qu'argileuses. Parmi ces grès, les faciès de couleur variant du rouge au verdâtre renferment par endroit de nombreux canalicules de diamètre millimétrique à centimétrique, lesquelles ont des parois recouvertes de colorations rougeâtres à brune ; coloration due aux oxydes de fer et d'alumine. Ces canalicules ont provoqué d'importantes pertes de boues lors de l'exécution des forages et aussi ces grès sont difficilement

reconnaissables dans les cuttings du fait qu'ils sont transformés en sable colorés plus ou moins argileux.

- des kaolins et argiles mais de moindre importance ; l'on rencontre des niveaux argileux, très finement sableux ou gréseux par endroit, d'épaisseurs variables allant du décimètre au mètre rencontrés par endroit. Ces argiles présentent une multitude de couleur variant du blanc au violet avec des couleurs intermédiaires telles que le jaune et le rose. Elles prennent le nom d'argiles fines et très compactes ou de pélites à faciès plus silteux dans les logs des forages selon leur finesse et leur compacité.
- Des sables purs à grains plus ou moins translucides avec des éléments fins à moyens, et les sables à grains grossiers sont rarement rencontrés
- Des niveaux latéritiques surmontant les koros, indurés passent des cuirasses aux carapaces puis aux grès et argilites ferrugineuses dont les canalicules et les fissures sont recouvertes d'une fine pellicule indurée ferrugineuse. Les cuirasses surmontent des grès et des argilites de teinte rouge plus ou moins foncée passant à des colorations plus claires et bariolées (Wackenier, 1961).

En somme, la succession lithologique schématique suivante de bas en haut représente en moyenne la stratigraphie du tertiaire de la région.

- argiles blanches à violettes ;
- sables blancs à jaunâtres fluviatiles ;
- grès et passés argilo-gréseuses de teinte beige ;
- grès versicolores passant à des grès à canalicules plus rouges ;
- carapaces latéritiques dans certaines zones.

Cette succession proposée est issue des diverses observations des coupes des puits et des forages. On note par ailleurs que les études géophysiques réalisées montrent que les séries du continental terminal sont relativement puissantes et peuvent atteindre localement plus de 800m (Mbaïtoudji, 1984).

1.2.3 Le Quaternaire

Le Quaternaire au Tchad est essentiellement caractérisé par des formations issues soit du démantèlement des surfaces anciennes formées sur des terrains d'âge Continental terminal soit des massifs (Pias, 1968).

Comme pour la limite entre le Crétacé et Tertiaire, la limite entre les sédiments du quaternaire et ceux du Continental terminal est aussi mal définie. Cependant on peut distinguer :

- un quaternaire ancien constitué d'une série sablo-argileuse, d'argiles à pigmentation gris noir ou jaunâtre représentant des alluvions anciennes, des gravillons ferrugineux ;
- un quaternaire récent représenté par des sables hétérogènes avec des graviers à quartz et à fragments latéritiques correspondant aux alluvions récentes et actuelles déposées par les fleuves. Il affleure le long des principaux cours d'eau et aussi dans la dépression de Doba.

1.3 Les cuirasses ferrugineuses

Elles sont particulièrement développées dans la zone de l'affleurement du Continental terminal et se présente sous diverses formes dans la zone (Frey, 1997) :

- en forme de buttes de 3 à 20m d'épaisseur coiffant les Koros de Miladi ;
- en forme de franges formant des corniches le long des dépressions (près de Doba) et des cours d'eau;
- en forme de grands affleurements sporadiques ;
- en forme d'horizons concrétionnés au voisinage de la nappe phréatique.

L'induration des cuirasses peut être très variable allant des produits à peine cohérents jusqu'à des blocs très durs (grès ferrugineux). Les sols ferrallitiques (sables rouges) de la zone sont caractéristiques de ces matériaux.

2. CARACTERISTIQUES STRUCTURALES

Notre secteur d'étude, situé au sud de la république du Tchad a subi au cours des temps géologiques des mouvements tectoniques occasionnant une subsidence du socle où se sont déposés les sédiments.

La configuration structurale de la région a été décrite grâce aux diverses études géophysiques et aux logs des forages pétroliers. Il ressort que l'orogénèse Pan Africaine qui s'est produite entre 700 et 600M d'années a été à l'origine de la mise en place des bassins sédimentaires. Cet événement tectonique majeur a joué sur l'ensemble des formations du précambrien.

L'ouverture des grands fossés d'effondrement s'est poursuivie pendant la période jurassique supérieur-crétacé inférieur soit vers 150-120M d'années accentuant l'effondrement des bassins jusqu'à une profondeur d'environ 3500m (fossé de Doba). Ce bassin présente une structure géologique synclinale dont l'axe passe à 10km au Nord de Doba et, il a une direction Nord Ouest-Sud Est. Ce synclinal présente des limites allant de Goré situé à 100km au Sud de Doba jusqu'au Koro de Gamoua situé à 50km au Nord de Doba.

. C'est le dernier évènement géologique qu'a connu la géologie le Tchad sur le plan structural ; en effet ce phénomène représente la phase tectonique majeure correspondant au démantèlement du Continent de Gondwana (Louis, 1970), comme le montre la figure 8.

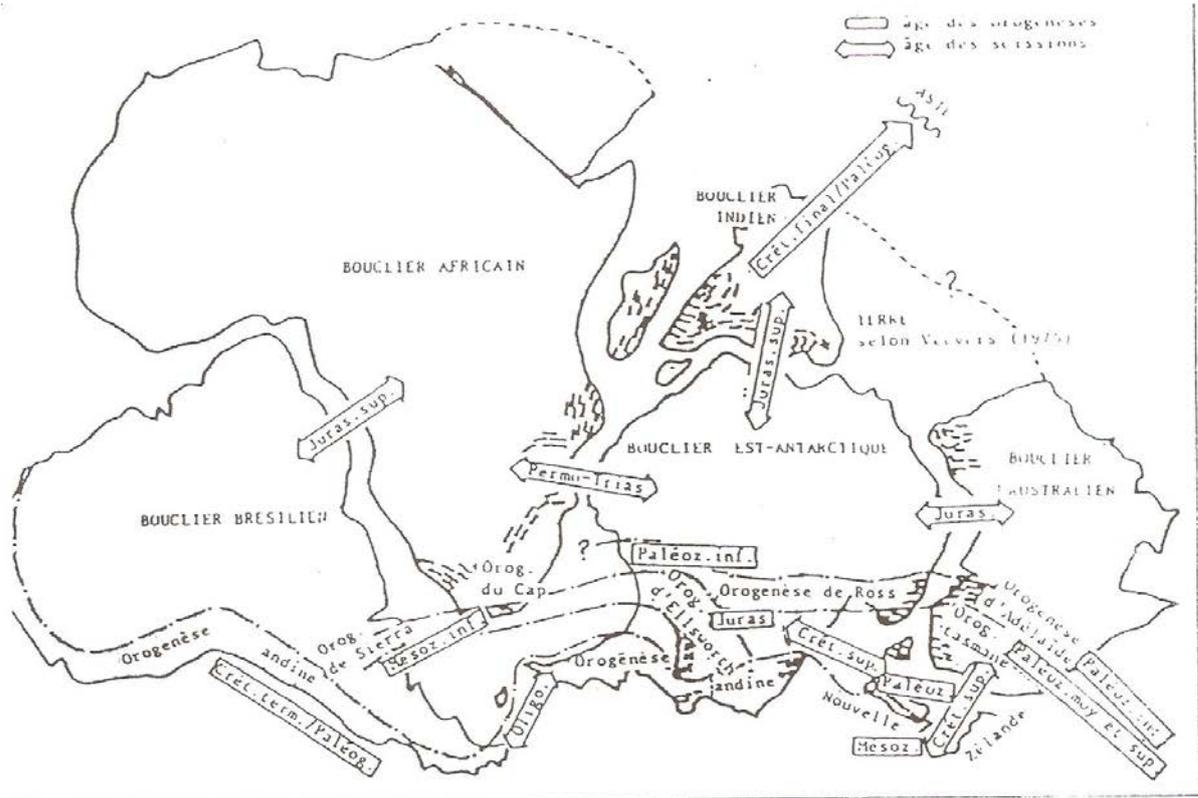
La profondeur de ces fossés d'effondrement pouvant atteindre plusieurs milliers de mètres. Des études antérieures ont montré que le fossé de Doba se prolonge au Soudan vers l'Est-Nord Est où il recoupe la structure d'Abu Gabra, de Bousso, du Lac Tchad et se prolonge aussi au Niger vers le Nord Ouest.

D'une manière générale, le substratum qui affleure dans la partie méridionale du pays est représenté par des formations cristallines d'âge précambrien. Ce substratum disparaît progressivement vers le Nord sous les formations de couverture (40m de profondeur à 20km des affleurements). Le comblement par du matériel essentiellement détritique s'est opéré à la faveur de cet affaissement à grande profondeur du socle cristallin précambrien. La sédimentation a commencé au crétacé. Elle est essentiellement continentale avec quelques incursions marines mises en évidence par Guiraud et Maurin (1992).

Les milles premiers mètres de dépôts révèlent que la sédimentation s'est faite grâce à des phénomènes d'altération des massifs de bordure pendant le tertiaire. En effet la stratigraphie de ces formations met en relief la présence des matériaux détritiques continentaux d'âge Continental intercalaire (Crétacé moyen) puis des sédiments du Continental terminal marqueront l'ère tertiaire (Guiraud et Maurin, 1992).

En dernier essor, le quaternaire est caractérisé par d'importantes activités volcaniques au Tibesti et par une sédimentation alternant des dépôts argileux aux dépôts sableux.

Ces divers sédiments présentent des caractères hétérogènes parfois lenticulaires liés au milieu de dépôt qui peut être soit lacustre (formations des dépôts argileux), soit continental par des remaniements et des transports relativement courts (formations des glacis le long des pentes des Koros) ainsi que des phénomènes pédogénétiques de formation de cuirasses et de latérisation (Schneider, 1989).



La fragmentation du Gondwana, difficile à établir, est la conséquence d'une douzaine de faits que l'on peut résumer ainsi :

- 1) Première séparation de l'Ouest Gondwana (Amérique du Sud-Afrique) de la partie Est (Antarctique, Inde, Australie). Valencio (1975) suggère que celle-ci a débuté au Permien, Ravich (1973) pense au Trias, mais d'autres auteurs avancent le Jurassique.
- 2) Sur l'Australie du NW s'établit un rift au Jurassique inférieur avec fonctionnement du plancher océanique au Jurassique supérieur.
- 3) La séparation Afrique - Amérique du Sud peut être estimée fin Jurassique, début Crétacé.
- 4) La séparation Inde - Antarctique aurait eu lieu à la même époque.
- 5) La rupture Broken Ridge - Kerguelan se serait produite au Crétacé supérieur vers 90-100 MA.
- 6) L'activité des dorsales a migré : Au Crétacé supérieur de la dorsale SE Pacifique, vers l'Ouest Indienne au Tertiaire inférieur, puis vers la dorsale de Carlsberg au Néogène. Le système des dorsales actives a évidemment joué un rôle majeur dans la migration de la Nouvelle-Zélande, de l'Australie et de l'Inde au large de l'Antarctique.
- 7) Les arguments morphologiques font coïncider le plateau de Nouvelle-Zélande avec l'Ouest Antarctique, la séparation s'étant produite, au vu des anomalies magnétiques, vers 80-85 MA (Falconer, 1973 ; Molnar, 1975 ; Wellman, 1976).
- 8) La Nouvelle-Zélande est un microcontinent probablement rattaché à l'Australie avant l'ouverture de la mer de Tasmanie, la scission s'étant produite entre 80 et 60 MA selon Molnar (1975), 85 et 55 MA selon Griffiths (1976).
- 9) Un déplacement tangentiel relatif de l'Ouest antarctique par rapport à l'Est est probable selon l'axe des Mts Ellsworth et aurait eu lieu fin Crétacé-début Tertiaire (Molnar, Craddock, 1975).
- 10) La rupture Antarctique-Australie peut avoir débuté dès le Jurassique pour s'achever vers 55 MA avec formation d'un nouveau plancher océanique.
- 11) La collision Inde-Asie est difficile à établir, fin Crétacé selon Ravich (1973), fin Eocène, début Oligocène pour la plupart des auteurs, même Miocène pour Gansser (1973) Verma (1973).
- 12) La séparation Amérique du Sud - Antarctique est probablement le dernier événement majeur de la rupture du Gondwana. Si les ressemblances entre les deux provinces semblent évidentes, l'âge de la rupture ne recueille pas l'unanimité des auteurs, le passage de Drake aurait été ouvert fin Oligocène selon Barker (1976), la subduction de la ride chilienne et de la péninsule antarctique étant active depuis le Miocène.

M WATERLOT in CIFEG - 1985

Fig.8 : Le Gondwana avant sa fragmentation au Mésozoïque inférieur (l'orogénèse andine - Crétacé terminal/Paléogène a été ajoutée.)

Chapitre III : HYDROGEOLOGIE

Dans l'état actuel de nos connaissances résumées à partir des travaux de Schneider (1989) et de Pias (1968), le système aquifère de la zone est composé de :

- Une nappe superficielle exploitée par les puits traditionnels présentant une continuité hydraulique avec l'ensemble de la série du Continental terminal
- Une nappe profonde
- Une nappe plus profonde dans le socle fissuré

1. DESCRIPTION DES AQUIFERES

La connaissance de la géologie de la région a permis de mettre en évidence dans les formations sédimentaires diverses couches gréseuses et sableuses aquifères. Ces réservoirs sont représentés par les formations du Continental terminal qui recèlent une nappe phréatique généralisée qui est drainée dans les vallées par les cours d'eau. La faible profondeur de la surface de la nappe (7m environ) dans les plaines alluviales et l'importante profondeur de la nappe (environ 40m) sous les Koros met en exergue une relation entre les eaux de surface et les eaux souterraines. En effet on remarque que les lignes de courant sont orientées dans le même sens que les pentes topographiques vers les vallées ; mettant en évidence la drainance de la nappe par les cours d'eau.

Par ailleurs l'hétérogénéité de ces formations du Continental terminal rend la productivité de la nappe très variable où les débits spécifiques varient de 6.1 à 36m³/h. cette variation peut s'expliquer par l'alternance des sables, pélites et silts entrecoupés par de petits niveaux plus ou moins argileux. (fig.11).

1.1 Les aquifères sédimentaires

La région comporte deux types d'aquifères à porosité d'interstice où l'on peut distinguer un aquifère à nappe phréatique généralisée et un aquifère à nappe perchée auxquels est associé un aquifère plus profond.

1.1.1 la nappe phréatique

Elle est reconnue sur tout le Continental terminal en partant des terrains du socle situé au sud jusqu'aux terrains quaternaires du nord. Le système hydrographique de surface draine en général cette nappe qui est fractionnée en un certain nombre d'unités structurales hydrogéologiques coïncidant avec les unités morphologiques.

Les essais de pompage réalisés dans les piézomètres et les puits montrent que l'aquifère présente de bonnes caractéristiques hydrodynamiques et présente aussi une qualité chimique satisfaisante du point de vue potabilité.

1.1.2 les nappes du Quaternaire

Les formations du quaternaire recèlent des nappes dans les plaines alluviales où les profondeurs sont assez réduites. Ce sont des nappes perchées qui se sont développées localement en saison pluvieuse au dessus des nappes phréatiques généralisées du Continental terminal. Ces nappes perchées sont temporaires et possèdent des débits très réduits qui ne dépendent que des cours d'eau ; en effet la plupart des puits creusés dans ces nappes tarissent dès le mois du février (saison sèche).

1.1.3 Les nappes profondes

Les études géophysiques réalisées dans la région de Doba ont permis de mettre en évidence plusieurs couches aquifères superposées et bien individualisées dans la fosse de Doba. Ces nappes sont connues dans des formations sableuses du Continental hamadien et du Continental intercalaire puissantes d'environ 500m (URS, 2002). La puissance de ces couches est observée sous le sol à Miandoum, Doba et Komé. D'autres réserves sous jacentes ont aussi été identifiées à Doba 1, à komé et à Damalla ;

La figure 7 montre bien la situation des couches sableuses aquifères, leur puissance, de même l'appartenance de ces nappes au crétacé supérieur et surtout au tertiaire (CT).

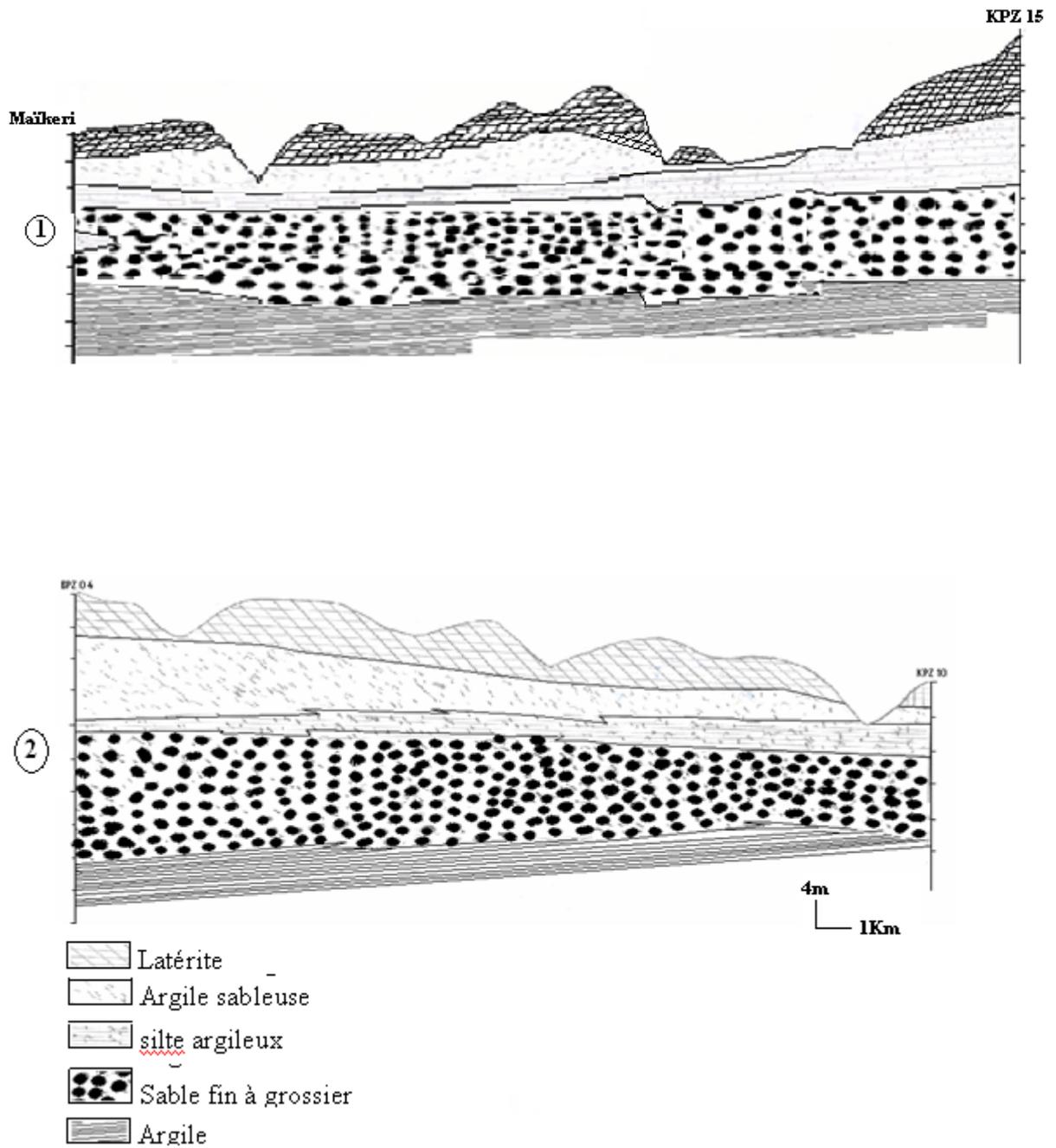


Fig. 11 : 1°) Coupes géologiques de Maikeri à KPZ 15 et 2°) de BPZ 4 à KPZ 10 du toit au mur d'argile de la nappe superficielle.

1.2 L'aquifère du socle

La nappe est constituée des altérites et des arénites peu perméables qui recouvrent le socle. Dans ces réservoirs, la circulation de l'eau est tributaire de l'existence des failles et de la densité du réseau des fractures du socle. C'est pourquoi des forages réalisés donnent des débits très souvent faibles (0.5 à 2m³/h).

2. COMPORTEMENT DE LA NAPPE PHREATIQUE

Mermillod (1961) avait mis en évidence dans la région de Doba la présence de deux horizons gréseux séparés par une couche imperméable d'argile :

- un horizon gréseux supérieur bénéficiant outre de l'infiltration des eaux pluie et une infiltration par le lit des cours d'eau
- un horizon gréseux plus profond et plus épais qui probablement ne reçoit une alimentation que sous les Koros de Guidari.

La nappe est alimentée par des infiltrations d'eau de pluie dans les sables beiges ou rouges qui recouvrent les grès (Garin, 1989).

Seule la nappe phréatique dite « nappe du Continental terminal » intéresse notre domaine d'étude. L'analyse des figures 12 et 13 représentant respectivement le maximum (septembre) et le minimum (mai) des niveaux d'eau montrent que les champs de Miandoum, Bolobo et Komé sont situés sur les flancs des dômes piézométriques. Les niveaux d'eau sont plus élevés à Miandoum qu'à Bolobo et ceux de Bolobo plus élevés qu'à komé. L'eau s'écoule de Miandoum vers Bolobo puis de vers komé. En général dans la zone de l'OFDA, l'eau s'écoule vers le Nord Est.

2.1 La Piézométrie et alimentation de la nappe

La piézométrie a été réalisée sur la base de quarante deux (42) piézomètres de surveillance et de seize (16) puits villageois répartis sur l'ensemble du secteur concerné. Il faut cependant noter que le choix de l'emplacement des piézomètres de surveillance a pris en compte la position des forages pétroliers par rapport aux villages. Les piézomètres servent de garde-fou pour la société ESSO, car ils sont forés entre les forages pétroliers et les Villages ; dans le but de contrôler l'évolution piézométrique de la nappe et l'impact de l'exploitation pétrolière sur la qualité de la nappe.

Pour cette étude, nous disposons des mesures piézométriques régulières couvrant la période de décembre 2002 à janvier 2007. L'analyse de la piézométrie de la zone d'étude pour la période allant de janvier à décembre 2003 montre les faits suivants :

- Les niveaux piézométriques décroissent d'octobre jusqu'à la mi-juin ;
- Au-delà de la mi-juin jusqu'en septembre, les niveaux piézométriques montent et atteignent leur maximum vers la mi-septembre avant de décroître (fig.14 et 15).

L'analyse de l'évolution piézométrique révèle que les cours d'eau drainent la nappe, ce qui exclut une alimentation de la nappe par les cours bien que ce cas de figure puisse se produire lors des premières crues. En effet les côtes topographiques deviennent de plus en plus importantes au fur à mesure que l'on s'éloigne des cours d'eau. Ainsi la nappe semble bénéficier des apports d'eau de pluie et la lame d'eau infiltrée (infiltration efficace) déterminée par le modèle Gardenia est de 170mm/an (Schneider, 1989).

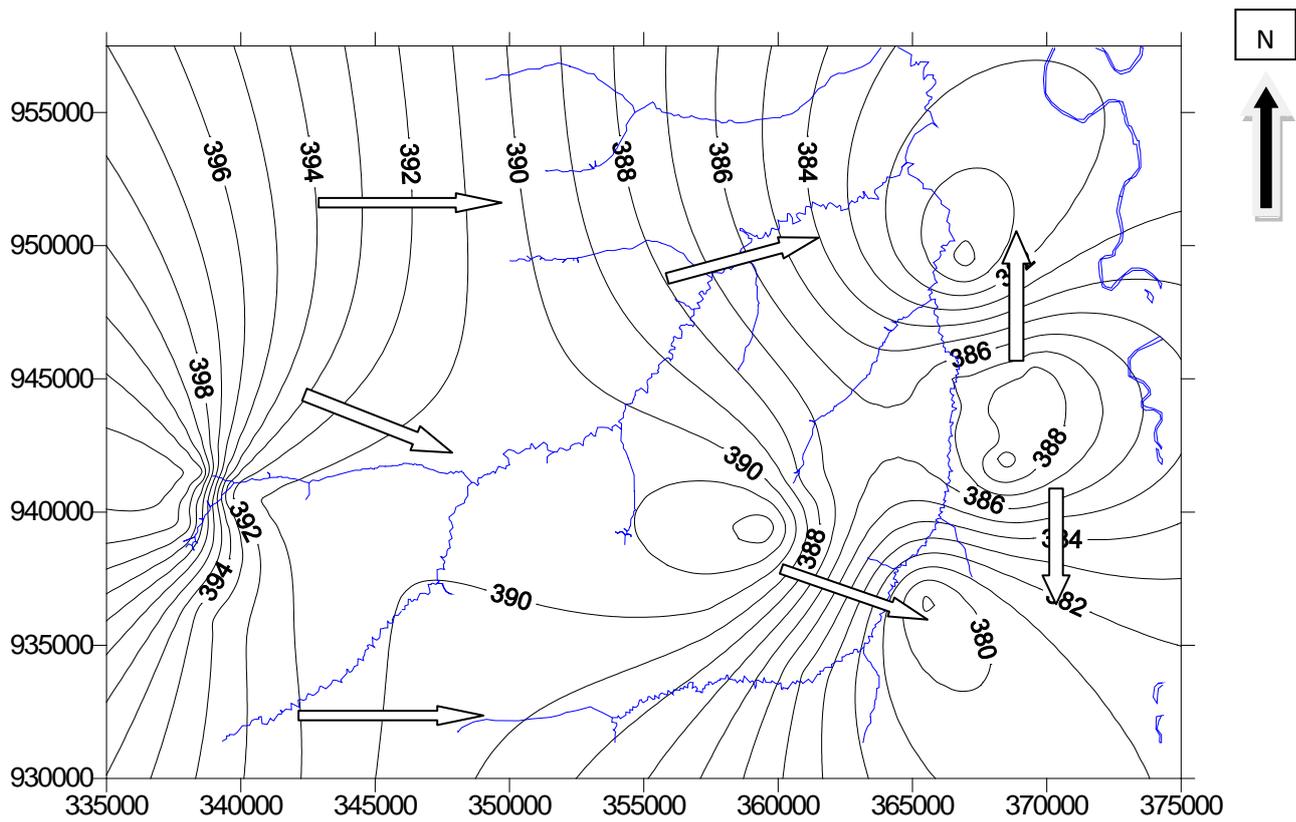


Fig.14 : piézométrie de mai 2006

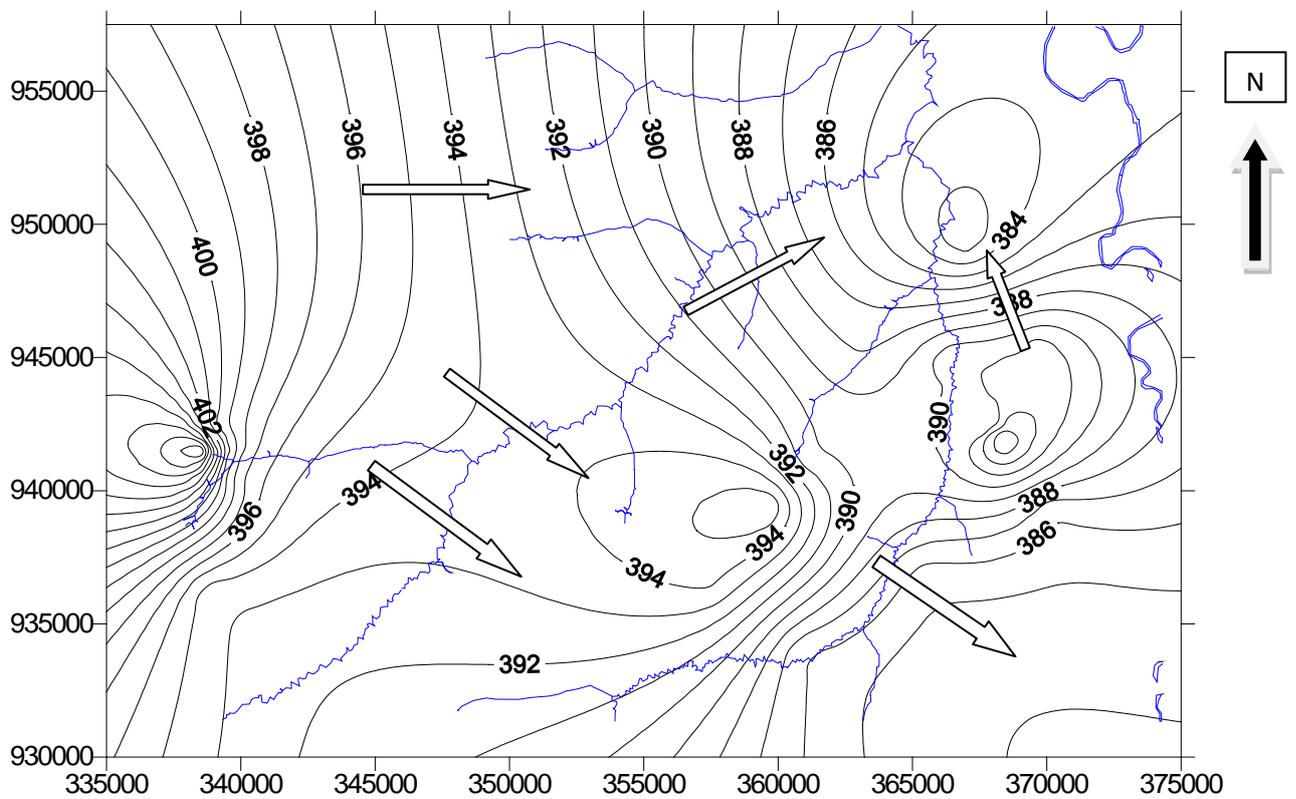
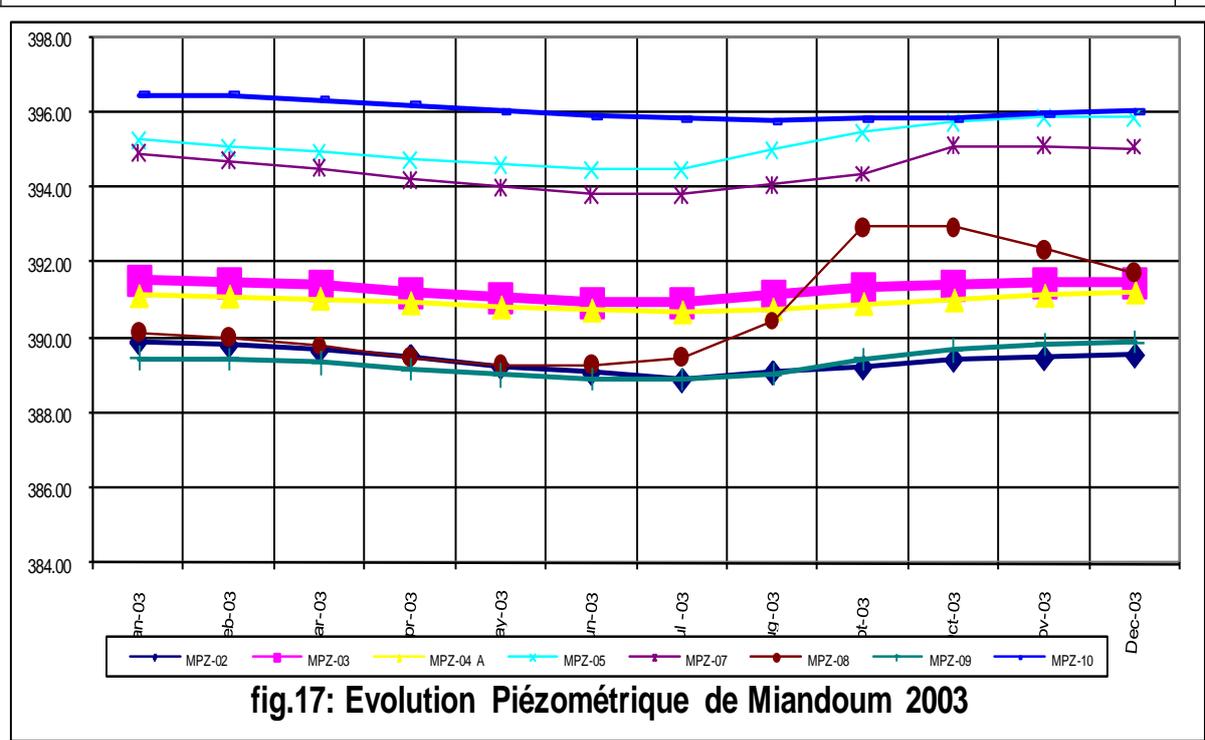
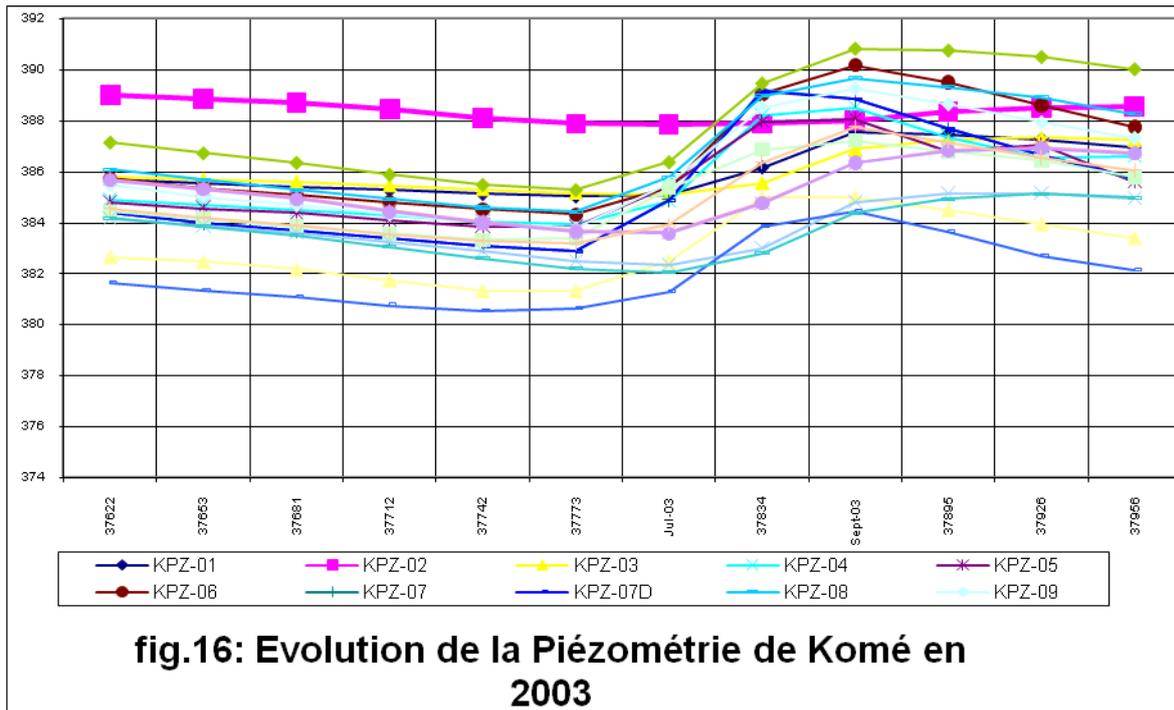


Fig.15 : piézométrie de septembre 2006

2.2 Les fluctuations saisonnières

Les fluctuations de la nappe à faible profondeur peuvent être assez importantes par endroit, notamment dans la zone de drainage où elles peuvent atteindre 2 à 3m. Les niveaux baissent rapidement dès que les pluies diminuent mais cette baisse est beaucoup plus lente que la remontée du niveau de la nappe.



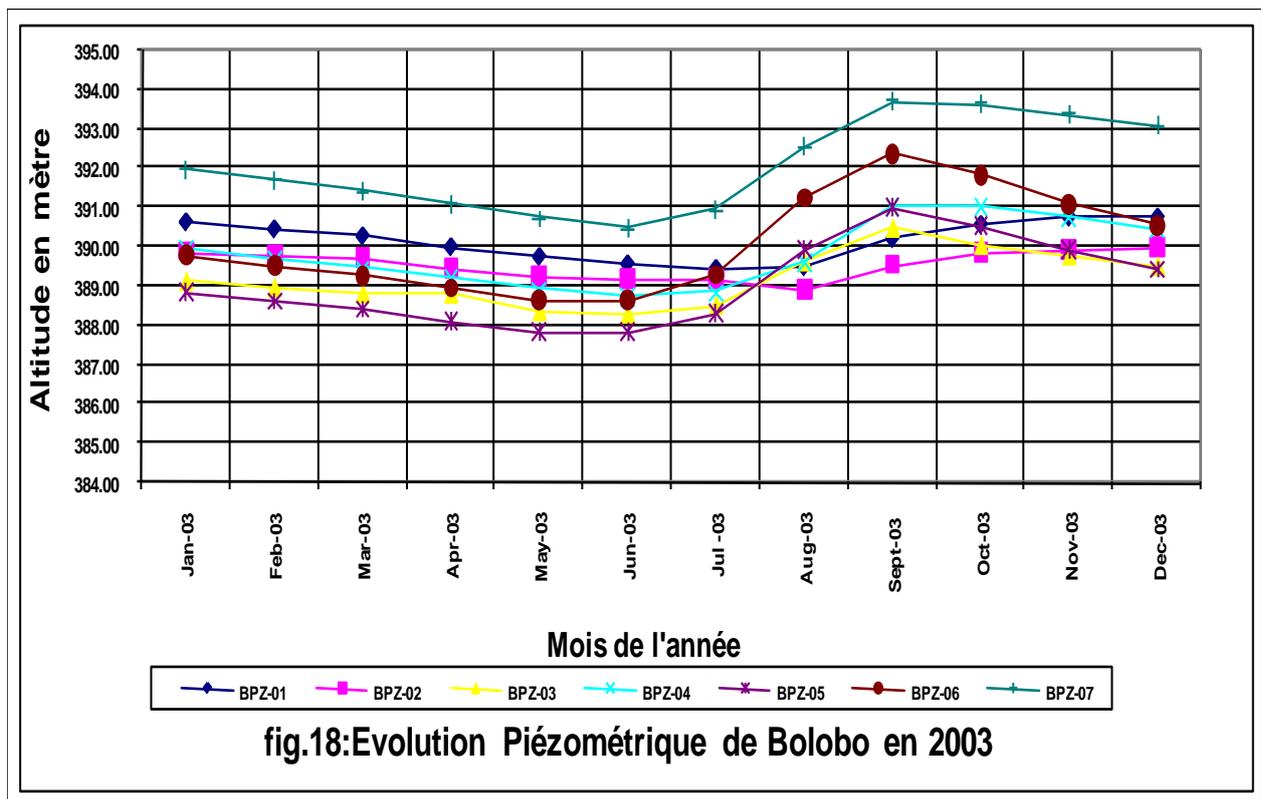


fig.18:Evolution Piézométrique de Bolobo en 2003

Les variations piézométriques sont d'une part fonction des précipitations et d'autre part du temps de percolation dans la zone non saturée. La recharge de la nappe étant assurée par les précipitations ; toutefois, les premières pluies n'ont pas beaucoup d'influence sur la nappe. En effet les premières gouttes d'eau qui s'infiltrent n'atteignent généralement pas la zone saturée du fait qu'elles sont absorbées par la zone non saturée. Des longues chroniques piézométriques (fig.16, 17 et 18) montrent que les variations saisonnières sont en adéquation avec les précipitations et les hauteurs maximales de la piézométrie s'observent en septembre.

Le battement de la nappe qui est de 2 à 3m environ est plus important dans les zones situées à proximité des cours d'eau où la piézométrie semble être liée aux fluctuations du niveau des cours d'eau. Par contre, la baisse des niveaux piézométriques dépend largement de la décrue ; en effet les cours d'eau drainent les eaux de la nappe phréatique. Mais cet effet de drainance est beaucoup plus important dans les zones proches des cours d'eau.

En somme on note une variabilité des niveaux relevés dans les ouvrages situés à proximité des cours d'eau, à l'inverse une presque constance des niveaux dans les zones éloignées des cours d'eau.

2.3 Propriétés hydrodynamiques

Des essais de pompages réalisés par l'Office National de l'Hydraulique Pastoral et Villageoise (ONHPV) en 1987 dans la zone du projet ont donné les valeurs de transmissivité résumées dans le tableau suivant :

Village	transmissivité
Bégada	$1,4.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
Madana	$6,6.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
Miandoum	$5,6.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
Dangdan	$1,0.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
Komé	$2,9.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

Tab.1. valeurs de transmissivité obtenues par l'ONHPV en 1987 lors des essais de pompage

L'épaisseur de l'aquifère n'étant pas homogène et se situant entre 15 et 35m ; on peut donc calculer les valeurs de perméabilité en utilisant l'épaisseur du forage. Ainsi le calcul nous donne des valeurs qui avoisinent l'ordre de grandeur donnée par l'USGS (United States Geological Survey) pour la perméabilité des sédiments meubles (cf. annexe 2)

D'après Schneider (1989), le coefficient d'emmagasinement est variable de 5.10^{-2} à 10.10^{-2} pour le Continental terminal du sud du Tchad, ces valeurs obtenues ont permis d'estimer le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère en prenant la moyenne qui est de $7,5.10^{-2}$.

Chapitre IV : LA MODELISATION

1. OBJECTIF ET OUTIL UTILISE

1.1 Objectif de la Modélisation

Dans le cadre de l'étude de la zone de l'OFDA et NYA (bassin de Doba), nous avons utilisé le logiciel Visual MODFLOW pour modéliser les écoulements souterrains, dans le but de comprendre le fonctionnement hydrodynamique du système aquifère, mais également de simuler le transfert de polluant à partir des sources ponctuelles existantes ou supposées.

1.2 Présentation de l'outil

Le logiciel de modélisation Visual MODFLOW choisi, est constitué d'un pré et d'un post-processeur autour du code de calcul MODFLOW. Le modèle MODFLOW est un modèle hydrogéologique qui décrit le transfert hydrique dans un milieu poreux. Le programme MODFLOW, développé en 1988 par l'USGS (United States Geological Survey) et résout les équations hydrodynamiques avec la méthode des différences finies et la méthode de résolution itérative (McDonald et Harbaugh, 1988 in Faye et al, 1998). C'est l'un des programmes le plus utilisé dans la recherche et surtout dans la gestion de la ressource en eau du fait de sa fiabilité et de sa configuration simple et modulaire.

Il faut souligner aussi que Visual MODFLOW est un programme bien adapté pour les modélisations et simulations en régime permanent et en régime transitoire que ce soit dans le cas des nappes multicouches, des nappes captives ou des nappes libres.

1.3 Principes mathématiques du modèle

La réalisation d'un modèle mathématique permet d'intégrer toutes les données recueillies lors de l'étude de terrain et les données issues des travaux antérieurs afin de déterminer de façon logique les données manquantes et de fournir une réponse globale montrant toutes les tendances de la nappe dans le domaine de l'écoulement.

Étant donné que notre système aquifère est poreux. On peut le considérer comme un continuum dont les propriétés peuvent être globalisées sur « Élément de Volume Représentatif » (Bear et al, 1997. in Dérouane et al.1994), ce qui nous conduit à retenir en

fonction des exigences du programme Visual MODFLOW, la loi de Darcy pour l'écoulement d'un fluide incompressible et le principe de conservation de masse.

- La loi de Darcy est une loi expérimentale pour un fluide incompressible et l'équation d'écoulement en nappe libre pour un Elément de Volume Représentatif traitée par le modèle s'écrit :

$$Q = -K \cdot A \cdot \frac{dh}{dl}$$

$$q = \frac{Q}{A} = -K \frac{dh}{dl} \quad (1)$$

Q : représente le volume traversant la section A et s'exprime en m³/s

K : représente le coefficient de perméabilité

dh : représente la variation de la charge en mètre (m)

dl : Variation de longueur de l'élément de Volume Représentatif.

Sachant que : $\frac{Q}{A} = q = -K \frac{dh}{dl}$ est comme l'écoulement se fait en trois dimension

$q = q_x + q_y + q_z$ où :

$$q \equiv \begin{cases} q_x = -K_x \frac{dh}{dx} \\ q_y = -K_y \frac{dh}{dy} \\ q_z = -K_z \frac{dh}{dz} \end{cases}$$

et en remplaçant ces valeurs de q_x , q_y et q_z dans l'équation(1) on aura :

$$q = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] \cdot \rho dx dy dz \pm Q \rho dx dy dz \quad (2)$$

Le principe de conservation de masse prend en compte l'égalité sur le volume entrant et le volume sortant. Il est exprimé par l'équation de continuité(3) dans le modèle :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \left(\rho n \frac{\partial dz}{\partial t} + \rho dz \frac{\partial n}{\partial t} + n dz \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) dx dy = (\alpha \rho g + n \beta \rho g) \frac{\partial h}{\partial t} \rho dx dy dz \quad (3)$$

Ainsi en combinant les équations (2) et (3), on obtient l'équation d'écoulement suivante :

$$\left(\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial h}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] \pm Q \right) \rho dx dy dz = (\alpha \rho g + n \beta \rho g) \frac{\partial h}{\partial t} \rho dx dy dz$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial h}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] \pm Q = (\alpha \rho g + n \beta \rho g) \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$\text{Or} \quad \alpha \rho g + n \beta \rho g = S_s$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial h}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] \pm Q = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Q : Débit d'infiltration ou de pompage

S_s : Coefficient d'emmagasinement

k_x, k_y, k_z : Perméabilités suivant x, y et z

h : Charge piézométrique (m)

t : temps (s)

Cette équation est résolue par le programme par la méthode des différences finies. Cette méthode est basée sur la recherche d'une valeur de charge supposée être représentative de la valeur moyenne de la charge réelle au centre de chaque maille. Elle a pour principe d'établir pour chaque maille et chaque pas de temps, l'équation du bilan associée à la loi de

Darcy et sachant que dans les systèmes aquifères, l'expérimentation privilégie l'extension horizontale devant l'extension verticale qui est le plus souvent négligé au profit de la composante horizontale pour la simple raison qu'on estime que la charge varie de façon très insignifiante. Ceci permet alors de ramener le nombre des variables d'espace à deux.

Si $\frac{\partial h}{\partial z} = 0$, on aura

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right] \pm Q = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

En intégrant cette dernière équation on aura :

$$\int \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) dz + \int \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) dz \pm \int Q dz = \int S_s \frac{\partial h}{\partial t} dz$$

Et en admettant que z_1 et z_2 varient très peu en fonction de x et y on aura :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\int_{z_1}^{z_2} k_x dx \right) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\int_{z_1}^{z_2} k_y dy \right) \frac{\partial h}{\partial y} \right) \pm \int_{z_1}^{z_2} Q dz = \left(\int_{z_1}^{z_2} S_s \frac{\partial h}{\partial t} dz \right)$$

Et en posant :

$$T_x = \int_{z_1}^{z_2} k_x dz \quad ; \quad T_y = \int_{z_1}^{z_2} k_y dz \quad ; \quad S = \int_{z_1}^{z_2} S_s dz \quad ; \quad q = \int_{z_1}^{z_2} Q dz$$

En fin l'équation devient :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) \pm q = S \frac{\partial h}{\partial t}$$

En régime permanent $t=0$ ce qui implique que

$S \frac{\partial h}{\partial t} = 0$ Et le programme résout le problème avec l'équation suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) \pm q = 0$$

2. MODELE CONCEPTUEL

2.1 Le toit de l'aquifère

Pour le calage du modèle, nous devons utiliser l'épaisseur de la nappe (différence entre le toit et le mur). Notre système aquifère étant une nappe libre, nous considérerons dans la suite la limite du toit de l'aquifère comme étant la surface du sol et non la profondeur de la nappe par rapport au sol.

Pour ce faire, nous nous sommes efforcé à attribuer à chaque maille une hauteur du toit conforme à la réalité en estimant à partir d'une carte topographique au 1/500 000 la côte du sol. Cette carte présente une marge d'erreur très réduite de l'ordre de 0,7m à 0,2m et une équidistance de 1m. Ceci étant nous estimons qu'une telle marge d'erreur ne biaisera pas les niveaux.

Avec le logiciel Surfer.7 (Golden Software Inc.) nous avons interpolé par krigeage en 2D puis en 3D pour avoir les cartes présentées aux figures 19 et 20.

La figure 20 montre que la zone de Miandoum présente les altitudes maximales (420m) et les pentes sont orientées vers le Nord Est en direction de Bero II où les altitudes sont les plus basses (386m). Toutefois la morphologie du toit de l'aquifère est un peu contrastée dans la zone de Komé Ndolébé, Missimadjia où apparaissent des zones hautes et où les pentes sont orientées vers le Nord Ouest pour rejoindre la Pendé.

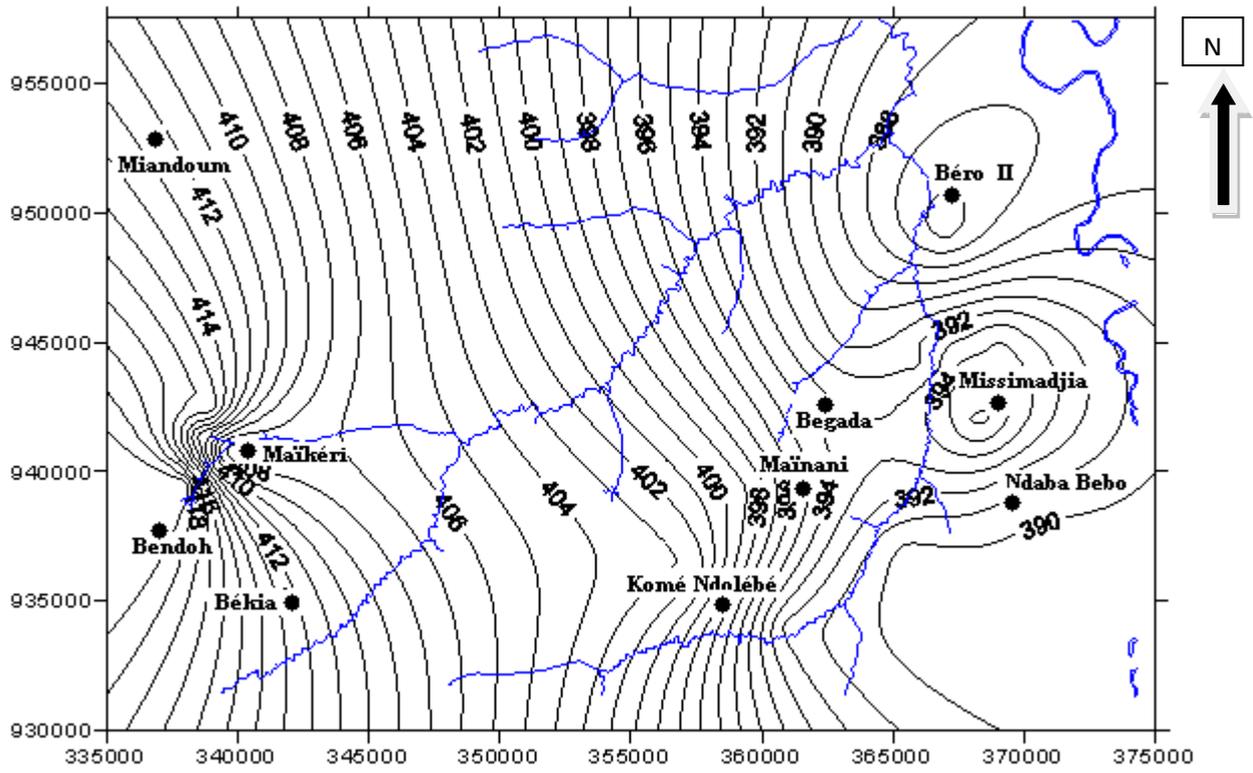


Fig.19 : carte du toit en 2D obtenue par interpolation et krigage de la zone d'étude.

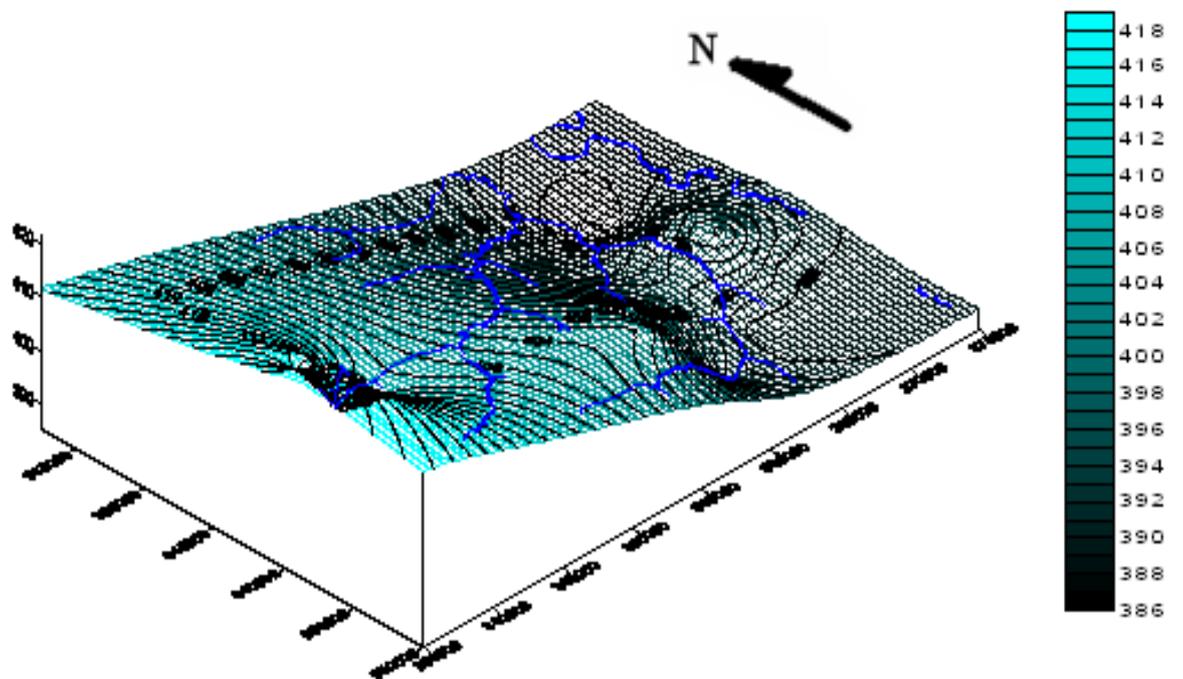


Fig.20 : carte du toit en 3D obtenue par interpolation et krigage de la zone d'étude.

2.2 Le mur de l'aquifère

Pour reconstituer la morphologie du mur du système aquifère, nous avons utilisé le même procédé que celui du toit. Nous avons choisi comme niveau lithologique représentant le substratum du système aquifère la couche d'argile, ceci du fait que la nappe phréatique dans la zone d'étude repose sur cette couche qui semble représenter vraisemblablement une limite à flux nul ne présentant pas un échange par drainance avec un autre aquifère situé à un niveau plus profond.

Comme c'est le cas avec le toit, le nivellement présente une marge d'erreur très réduite. La cartographie du mur permet aussi d'appréhender avec celle du toit une représentation globale de l'épaisseur du système aquifère de la zone d'étude. Par interpolation et krigeage avec Surfer.7 (Golden Software Inc.) on obtient une carte (Fig.21 et 22) dont le pendage est très faible de l'ordre de 10% allant de Miandoum à BéroII.

La figure.22 montre que la profondeur maximale du mur se situe à environ 361m d'altitude et les profondeurs minimales sont de l'ordre de 394m. On remarque la pente est beaucoup plus accentuée dans la zone de Begada et de Bero II. La morphologie du mur met en relief des zones hautes dont les sommets correspondent aux zones de dômes piézométriques.

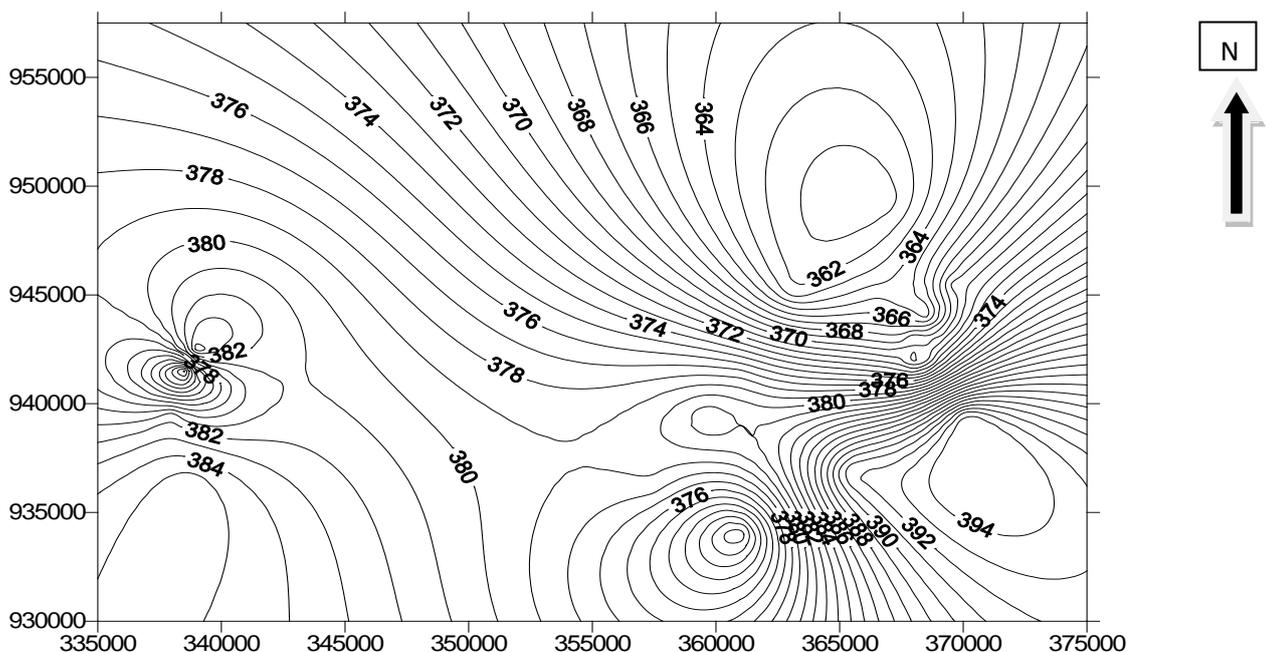


Fig.21 : carte du mur en 2D obtenue par interpolation et krigeage de la zone d'étude.

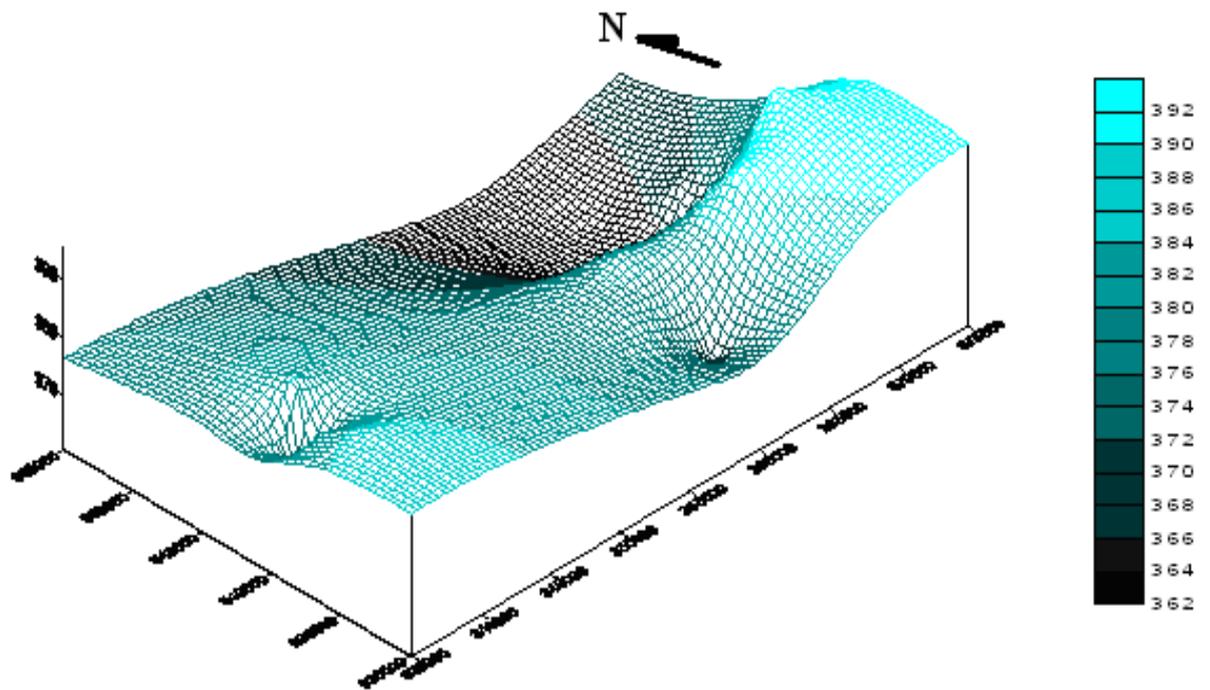


Fig.22 : carte du mur en 3D obtenue par interpolation et krigeage de la zone d'étude.

2.3 Les conditions aux limites

Dans l'optique d'une modélisation mathématique d'un système aquifère, il est fondamental de distinguer clairement les limites du domaine c'est-à-dire les conditions aux limites qui régissent les échanges de flux entre le système et l'extérieur.

Dans le cas de notre étude du fait de l'étendue faible du domaine, le choix des conditions aux limites extérieures du modèle n'est pas tout à fait évident, mais toutefois la carte piézométrique nous permet de distinguer :

- une limite à potentiel imposé au contact d'un cours d'eau en aval ;
- un flux nul aux limites du bassin hydrogéologique en amont ;
- un flux nul latéralement du fait que les écoulements étant perpendiculaire à la limite de la zone à modéliser.

D'une manière générale, il est rare que les limites géologiques physiques coïncident avec les frontières imposées au modèle mais il est très important de s'assurer que les différences éventuelles puissent être justifiées conceptuellement et qu'elles n'influencent pas ou très peu la solution attendue (Dassargues, et *al* 1992).

2.3.1 Limite à potentiel imposé

Cette limite est connue sous le nom de Condition de Pression ou Condition de Dirichlet ne dépend pas des conditions de circulation de la nappe, elle représente de façon générale, le contact entre un aquifère et les eaux libres de surface (cours d'eau par exemple). Dans notre cas ici, elle est représentée par la Pendé (Logone Occidental).

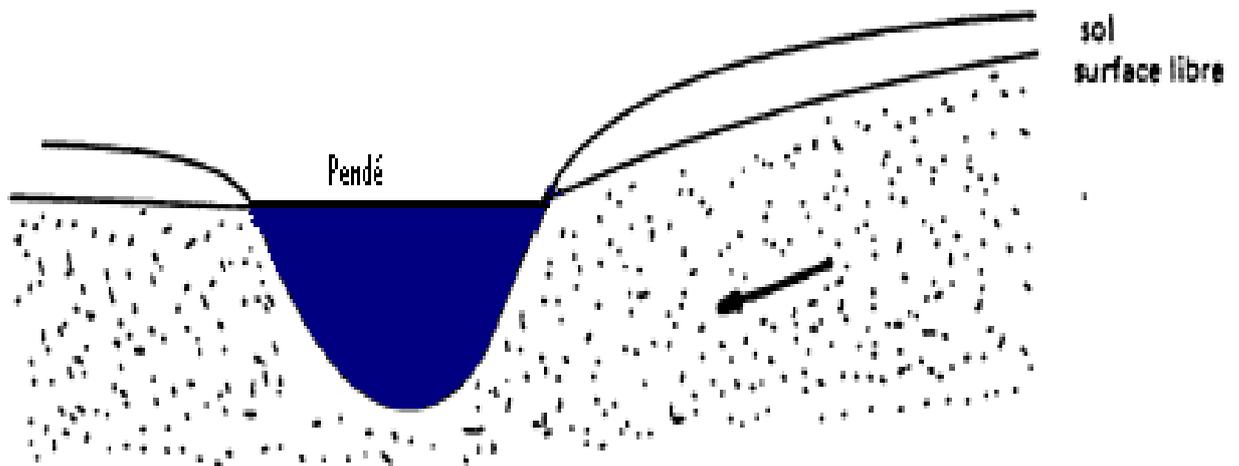


Fig.23 : contact surface libre et la Pendé.

2.3.2 Condition de flux nul

L'analyse de la carte piézométrique de la zone de l'OFDA révèle d'une part, l'existence des lignes des partages des eaux dans l'axe du dôme de Miandoum. Etant donné qu'au niveau du dôme piézométrique le flux s'annule, cette ligne de partage des eaux constituera une condition de flux nul pour notre système aquifère d'étude.

D'autre part, la carte montre qu'il existe un domaine où les écoulements sont parallèles aux frontières du domaine ; ne présentant ainsi aucun flux d'échange avec l'extérieur : c'est une condition de flux nul.

2.3.3 Condition des débits imposés

On l'appelle aussi condition de flux imposé ou condition de Neumann. Cette condition est utilisée dans le cas où on se trouve dans une situation telle que les limites ne sont pas identifiables ; on impose ainsi des débits aux limites concernées en conformité avec la réalité.

2.4 Le domaine à modéliser

L'observation de la carte piézométrique nous révèle que les directions de l'écoulement de l'aquifère de notre zone d'étude suivent la pente topographique de surface. Cette hypothèse semble tenir pour la simple raison que notre secteur ne présente pas un relief contrasté et aussi sa superficie est petite.

De cette observation, on définit le domaine à modéliser comme étant délimité :

- En amont (W) par un cours d'eau (la Pendé) ;
- à l'aval (E) par le dôme piézométrique de Miandoum ;
- au Sud et au Nord de la zone de Bolobo et de Miandoum, les limites latérales sont perpendiculaires aux courbes isopièzes ;
- au sud et Nord de la zone de Komé, les courbes se rétrécissent ce qui nous conduit à imposer un débit pour pouvoir délimiter le domaine.

2.5 La discrétisation du domaine

Dans le cadre de cette étude nous proposons de faire une discrétisation de l'aquifère en maille d'aire carré invariable sur l'ensemble du domaine. La carte utilisée pour la discrétisation est obtenue par numérisation d'une carte hydrologique au 1/500 000 établie par le consortium ESSO en 2006.

Ainsi la discrétisation horizontale du domaine à modéliser est faite grâce à un système de cellules carrées, organisées en colonnes, en lignes et en couches géologiques. Ces cellules carrées sont de 500m de côté et représentant au total 3822 mailles (fig.24). Ces mailles distribuées sur 55 lignes et 80 colonnes selon les directions EW et NS suivant les coordonnées géographiques UTM du domaine d'étude qui sont : X (335 000m, 375 000m), Y (930 000m, 957 500m).

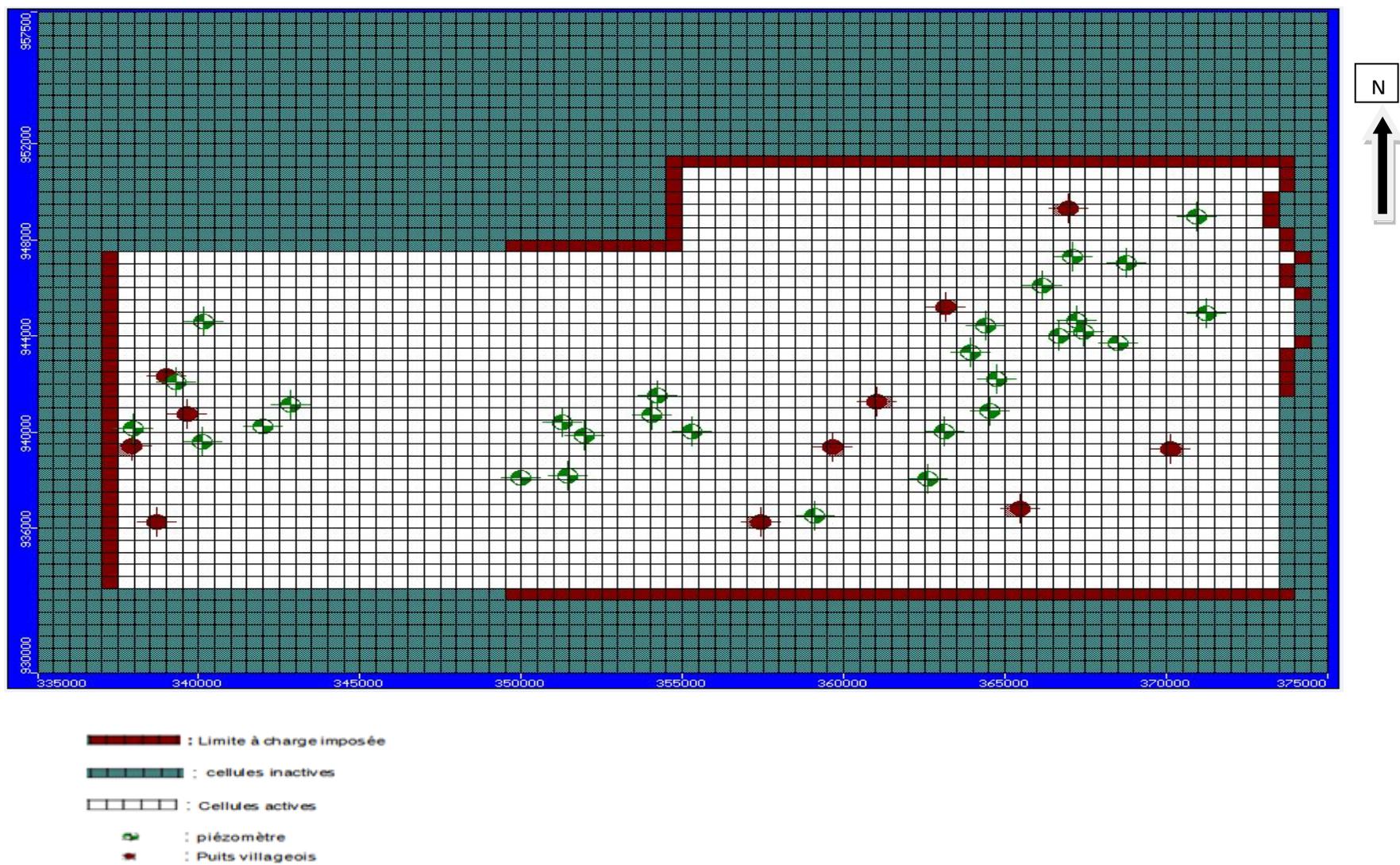


Fig.24 : domaine d'étude délimité par les limites à charges imposées et à charges nulles

3. MODELISATION DES ECOULEMENTS

Le but de cet exercice de modélisation est de représenter par calage le comportement hydrodynamique de la nappe à partir des données peu nombreuses obtenues des puits, des forages et piézomètres implantés dans la zone d'exploitation des champs pétroliers de Komé.

Ainsi cette modélisation se focalisera à évaluer le comportement de la ressource en eau au travers d'un réseau des piézomètres de surveillance et de quelques puits villageois de la zone. Les données piézométriques que nous disposons, sont celles d'un suivi piézométrique de 2002-2006, ces données nous ont conduit au choix d'une représentation en régime permanent qui sera suivie d'une simulation de prélèvement supplémentaire et de recharge

4. CALIBRATION DES PARAMETRE

4.1 Principe du calage

Le calage a pour but de juger la pertinence des conditions aux limites choisies pour le modèle et aussi de reproduire avec une erreur acceptable l'ensemble des données de terrain par une simple modification des paramètres d'entrée qui sont fonction du comportement géologique du système aquifère (Dassargues et *al.* 1996).

Généralement, on utilise pour le calage les paramètres telles que la charge, la conductivité hydraulique, la recharge, la porosité pour le régime permanent. Pour le régime transitoire, en plus des premiers paramètres cités on y ajoute le coefficient d'emménagement et les conditions initiales (Nadège, 2005).

Les calages ont été d'abord réalisés en régime permanent et la comparaison entre les charges calculées et les charges mesurées est basée sur les données des mesures de la campagne piézométrique de mai 2006. Dans un premier temps, nous avons réalisé un calage de la piézométrie calculée par modification des conductivités hydrauliques qui étaient estimées de l'ordre de 10^{-3} , 10^{-4} et 10^{-5} m/s respectivement pour la zone de Bolobo, la zone de Komé et la zone de Miandoum. Ensuite nous avons terminé l'ajustement par une modification de la recharge dans certaines zones (au début une recharge identique de 170mm/an a été attribuée à l'ensemble de la zone). Cette calibration a été jugée acceptable dès lors que la différence des charges calculées à celles mesurées au niveau des piézomètres d'observations approche zéro (Tab.2)

Piézomètre de surveillance	Maille Rang-Colonne	Charge mesurée	Charge calculée	Différence Hm-Hc
KPZ 01	[38 , 56]	387.24	386.53	0.71
KPZ 02	[42 , 49]	388.84	389.09	-0.25
KPZ 03	[35 , 57]	387.47	387.41	0.06
KPZ 04	[34 , 60]	385.68	385.83	-0.15
KPZ 05	[31 , 60]	385.17	386.22	-1.05
KPZ 06	[29 , 59]	386.24	385.98	0.26
KPZ 07	[27 , 59]	384.56	384.04	0.52
KPZ 08	[27 , 66]	387.01	386.33	0.68
KPZ 09	[26 , 65]	385.92	385.87	0.05
KPZ 10	[28 , 64]	384.8	385.41	-0.61
KPZ 11	[23 , 63]	382.88	383.29	-0.41
KPZ 12	[21 , 65]	384.47	384.64	-0.17
KPZ 13	[21 , 68]	386.36	385.53	0.83
KPZ 15	[25 , 73]	385.31	385.89	-0.58
KPZ 16	[18 , 73]	381.49	381.92	-0.43
KPZ 18	[28 , 68]	388.97	388.5	0.47
MPZ 02	[26 , 11]	391.8	391.08	0.72
MPZ 03	[35 , 06]	392.94	393.49	-0.55
MPZ 04	[36 , 11]	392.01	392.1	-0.09
MPZ 05	[33 , 09]	396.48	395.6	0.88
MPZ 07	[33 , 03]	398.66	399	-0.34
MPZ 08	[33 , 16]	391.03	391.04	-0.01
MPZ 09	[35 , 15]	390.29	390.53	-0.24
BPZ 01	[40 , 34]	390.16	390.49	-0.33
BPZ 02	[39 , 31]	389.93	390.5	-0.57
BPZ 03	[35 , 33]	389.2	389.42	-0.22
BPZ 04	[36 , 34]	389.74	390.44	-0.7
BPZ 05	[32 , 39]	388.9	389.06	-0.16
BPZ 06	[34 , 39]	389.85	390.06	-0.21
BPZ 07	[35 , 41]	392.21	392.23	-0.02

Tabl.2 : Valeurs des charges obtenues après calage en régime permanent.

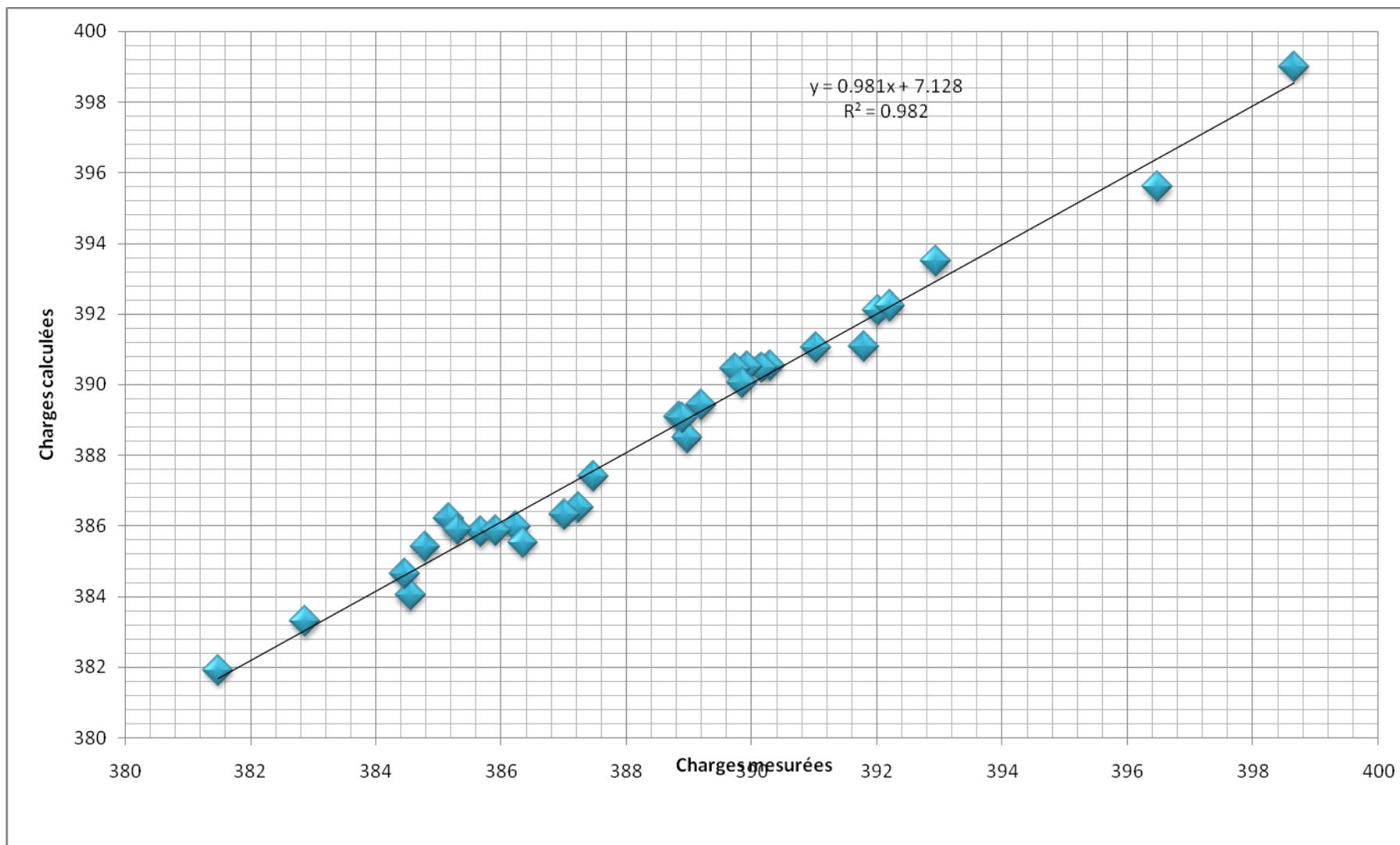


Fig.25: corrélation entre charges calculées et charges mesuré

4.2 Validation du Modèle en Régime permanent

A l'issue de la calibration, le résultat obtenu est satisfaisant, et le modèle semble refléter au mieux la réalité pour les raisons suivantes :

- D'une part la piézométrie calculée par le programme restituée de façon très acceptable la piézométrie mesurée sur le terrain même s'il y a par endroit un très léger décalage entre les izopièzes calculés et mesurés (fig.26). En effet selon Dinu (1997), un tel décalage peut s'expliquer soit par un manque d'information de certains paramètres de la nappe et que ces derniers ont fait l'objet d'une estimation, soit par une erreur induite dans le nivellement des cotes.

On note également que les valeurs de perméabilité sont dans l'ordre de 10^{-3} à 10^{-5} m/s donc raisonnable par rapport aux caractéristiques de l'aquifère définies plus haut (fig.29).

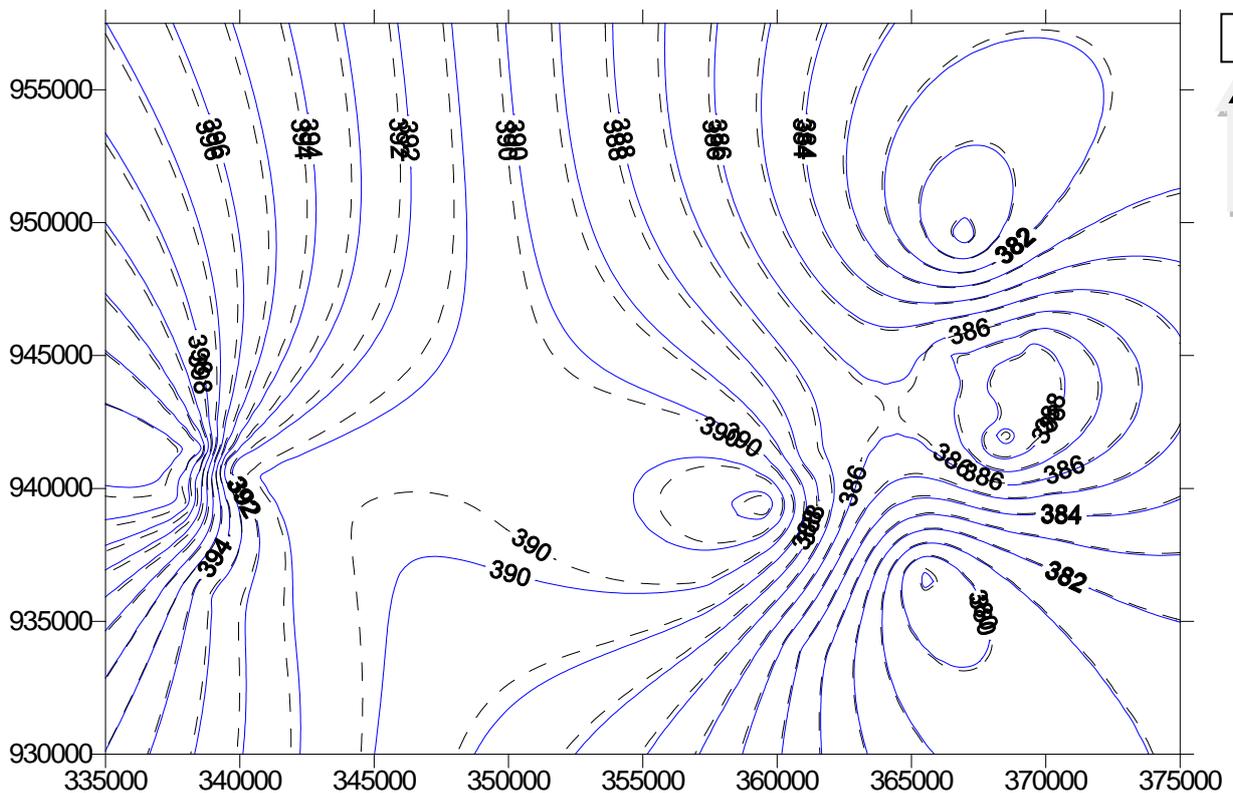


Fig.26 : comparaison entre la carte piézométrique calculée et celle issue des mesures pour la validation de la calibration

- D'autre part les marges d'erreur issues de la calibration entre les charges calculées et mesurées semblent être acceptables après évaluation (Ndoye, 2003) pour la quantification de l'erreur sur la calibration à partir de l'erreur moyenne, de l'erreur moyenne absolue et de la déviation standard.

- L'erreur moyenne (EM) est l'erreur issue de la différence entre les charges mesurées (Hm) et celles calculées (Hc). Elle est calculée par Visual MODFLOW lors de la calibration et s'obtient aussi par la formule suivante :

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Hm - Hc)$$

L'erreur moyenne obtenue à l'issu de la calibration est de :

-0,063

- L'erreur moyenne absolue (EMA) est la différence des moyennes absolues entre les charges mesurées et les charges calculées et s'obtient selon la formule suivante :

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(Hm - Hc)|$$

L'erreur moyenne absolue obtenue après calcul est de : 0,409

- La Déviation Standard (DS) : elle est égale la moyenne des carrés de Hm et Hc et est donnée par la formule suivant :

$$DS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Hm - Hc)^2}$$

La Déviation Standard pour le cas de notre secteur d'étude est de : 0,430

La droite de régression linéaire, $y = 0,981x + 7,128$, définie à partir de la corrélation entre les charges mesurées et celles calculées présente un coefficient de corrélation R^2 égal à 0,982.

4.3 Bilan global du système

Le bilan global du système a été calculé à partir des paramètres hydrodynamiques par le modèle. L'analyse nous révèle que les flux d'eau entrant et sortant du système sont égaux (tab.3). Cet équilibre est contrôlé d'une part par les entrées qui sont essentiellement constituées par l'infiltration des eaux météoriques et d'autre part par les sorties constituées par les prélèvements dans les puits villageois et la reprise par l'évapotranspiration.

On constate aussi qu'au niveau des limites, les pertes d'eau sont considérables, elles sont de l'ordre de $65540\text{m}^3/\text{j}$ contre un pompage de $359\text{m}^3/\text{j}$ dans les puits villageois. Ce grand écart entre les pertes aux limites et les prélèvements au niveau des puits met en exergue la sous exploitation du système aquifère de l'OFDA et Nya. Corrélativement les apports d'eau aux limites qui s'élèvent à $41597\text{m}^3/\text{j}$ dont la différence avec les pertes donne un excédant de pertes d'environ $24303\text{m}^3/\text{j}$. Comme la perte aux frontières est largement supérieure l'apport aux limites, on peut donc conclure que la nappe regorge un potentiel important de réserve en eau.

Entrées	m ³ /j	Sorties	m ³ /j
Infiltration de l'eau de l'eau de pluies	255039	Décharge par évapotranspiration	230736
Apports aux limites	41597	Sorties aux limites	65540
		Puits villageois	360
Emmagasinement	0	Emmagasinement	0
Total	296636	Total	296636

Tabl.3 : Bilan global en eau du système calculé après calage en régime permanent.

L'analyse des flux (fig. 27) montre que les débits échangés aux limites ne sont pas homogènes à l'intérieur du domaine, de même qu'au niveau des limites. Ces flux d'échanges au niveau des limites ont permis d'identifier 16 zones d'échanges appelées « zones de budget ». (fig.28)

Au niveau des limites, les débits échangés révèlent que les zones de budget 3, 4, 11, 12 et 14 participent en grande partie dans l'apport d'eau latéralement dans le domaine alors que les zones de budget 1, 5, 6, 7, 8, 13 et 16 constituent les principales zones de sortie d'eau du domaine modélisé (tab.4).

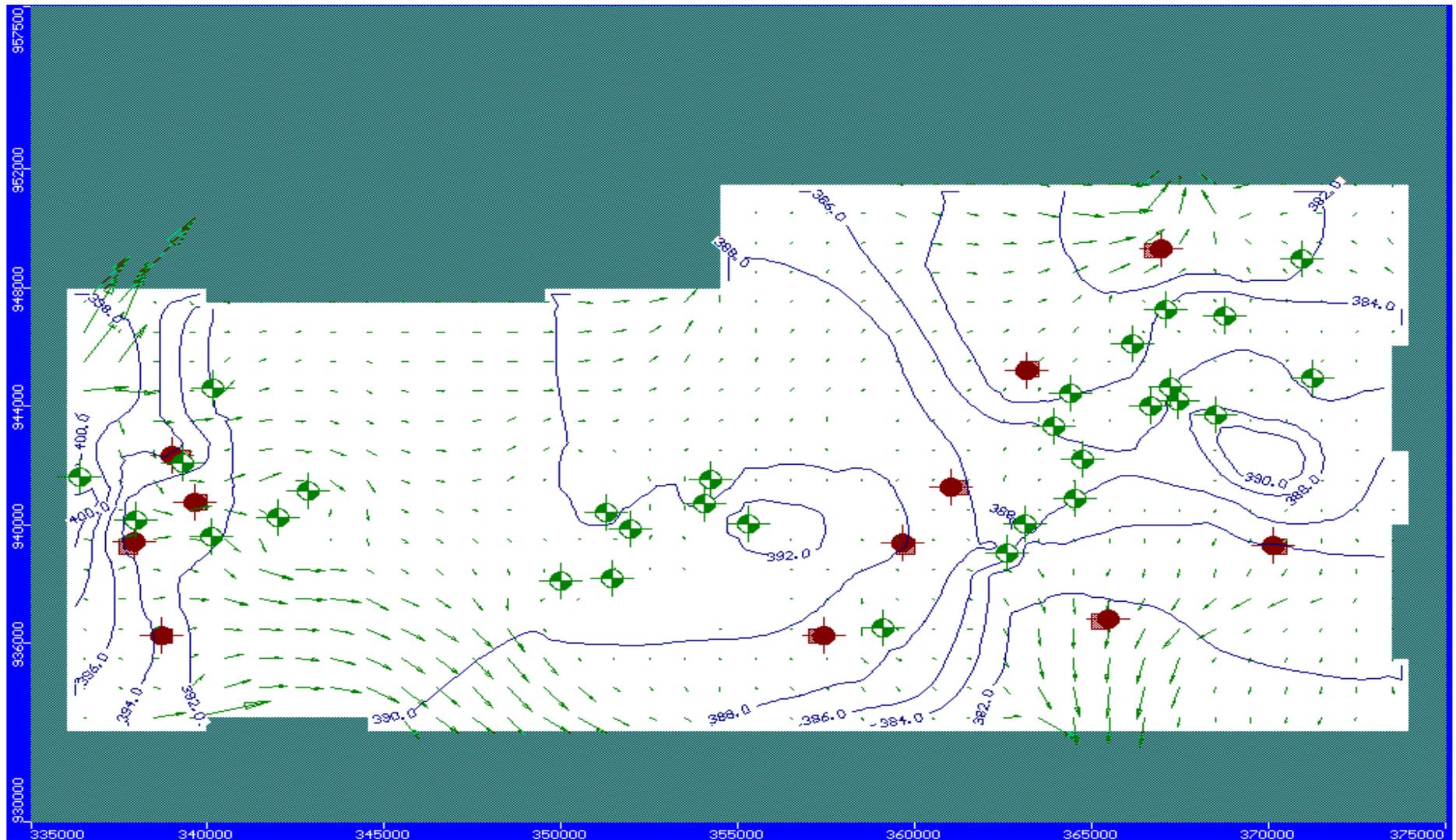


Fig.27 : carte d'évolution des sorties et entrées des eaux dans le domaine

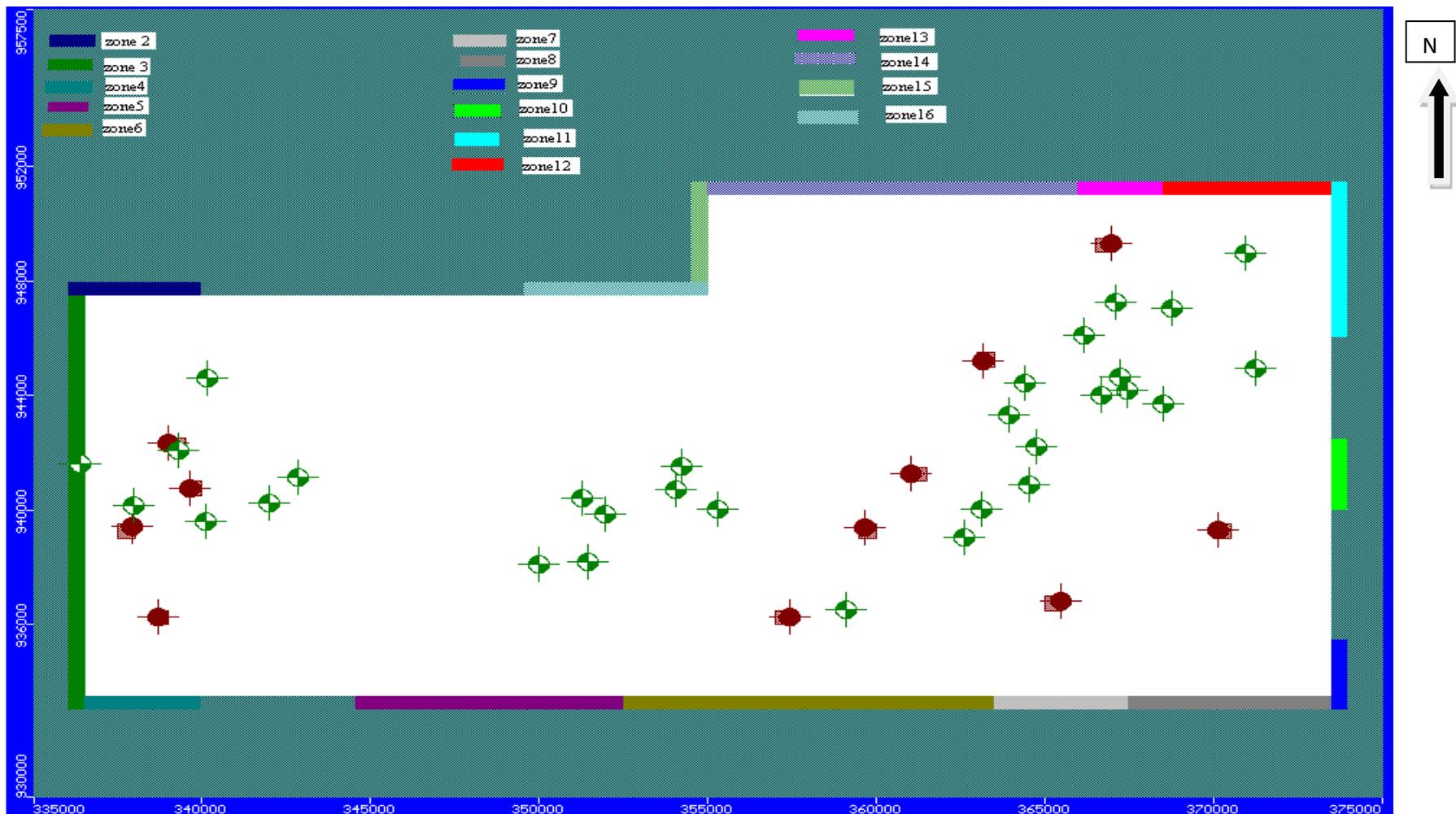


Fig.28 : carte de zones de budget du domaine modélisé

Zones	Entrées (m³/j)	Sorties (m³/j)
Zone 2	557	19145
Zone 3	27300	100
Zone 4	2110	74
Zone 5	0	12250
Zone 6	335	3076
Zone 7	0	6394
Zone 8	0	1600
Zone 9	16	243
Zone 10	0	396
Zone 11	1342	555
Zone 12	3178	2651
Zone 13	0	12554
Zone 14	5972	1895
Zone 15	108	125
Zone 16	654	4478
Total	41572	65536

Tab.4 : Débits échangés entre le milieu extérieur (zone 2 à 16) avec le domaine modélisé (zone 1).

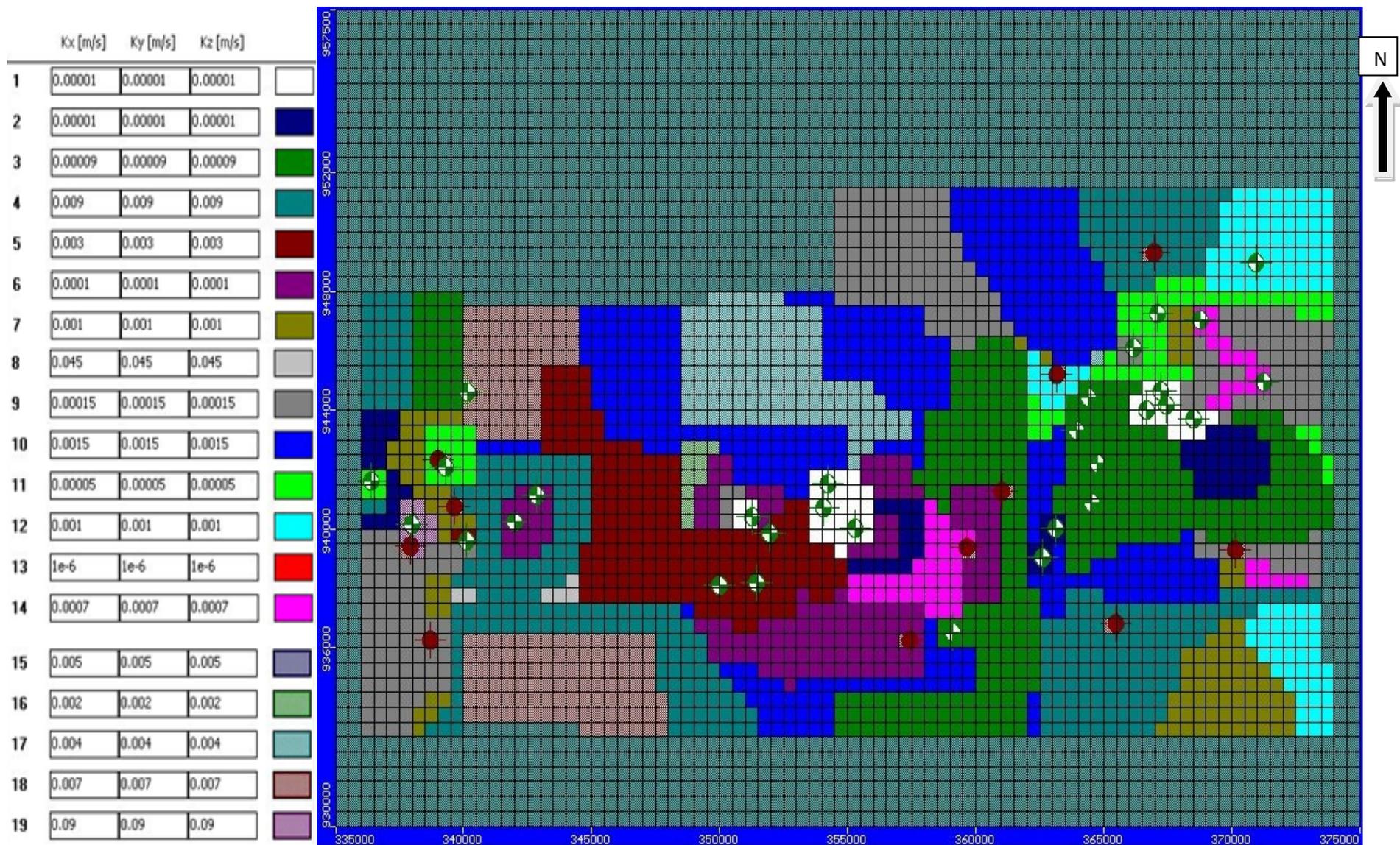


Fig. 29 : Répartition des Perméabilités obtenues à l'issu du calage

5. EXPLOITATION DU MODELE

5.1 Simulation des prélèvements

Le comportement hydrodynamique de la nappe a été étudié en considérant une augmentation de 25% des prélèvements actuels dans le but de répondre à une éventuelle demande en eau pour la consommation. Les simulations ont été effectuées dans les mêmes conditions climatiques que celles actuelles où les débits de pompage dans tous les puits villageois sont augmentés de 25%.

Les résultats montrent un déséquilibre du système qui se traduit par une très légère augmentation aux niveaux des entrées surtout dans certaines zones de budget compensant ainsi cet appel d'eau dû aux prélèvements supplémentaires. On constate également que les échanges entre le milieu extérieur (zone 2 à 16) avec le système ont légèrement affecté les entrées et les pertes (tab.5 et 6).

Du point de vue rabattement induit, la nappe s'est affaissée au droit de 0,5m en moyenne et varie de 1 à 5m (fig.30).

Entrées	m ³ /j	Sorties	m ³ /j
Infiltration de l'eau de l'eau de pluies	255040	Décharge par évapotranspiration	230730
Apports aux limites	41630	Sorties aux limites	65459
		Puits villageois	481
Emmagasinement	0	Emmagasinement	0
Total	296670	Total	296670

Tab.5 : Bilan global en eau du système calculé pour un prélèvement double après calage en régime permanent.

Zones	Entrées (m³/j)	Sorties (m³/j)
Zone 2	558	19145
Zone 3	27325	100
Zone 4	2115	75
Zone 5	0	12237
Zone 6	339	369
Zone 7	0	6377
Zone 8	0	1597
Zone 9	17	242
Zone 10	0	395
Zone 11	1343	555
Zone 12	3180	2649
Zone 13	0	12540
Zone 14	5986	1884
Zone 15	108	124
Zone 16	657	4469
Total	41628	62758

Tab.6 : Débits échangés entre le milieu extérieur (zone 2 à 16) avec le domaine modélisé (zone 1) après simulation de 25% de prélèvements supplémentaires.

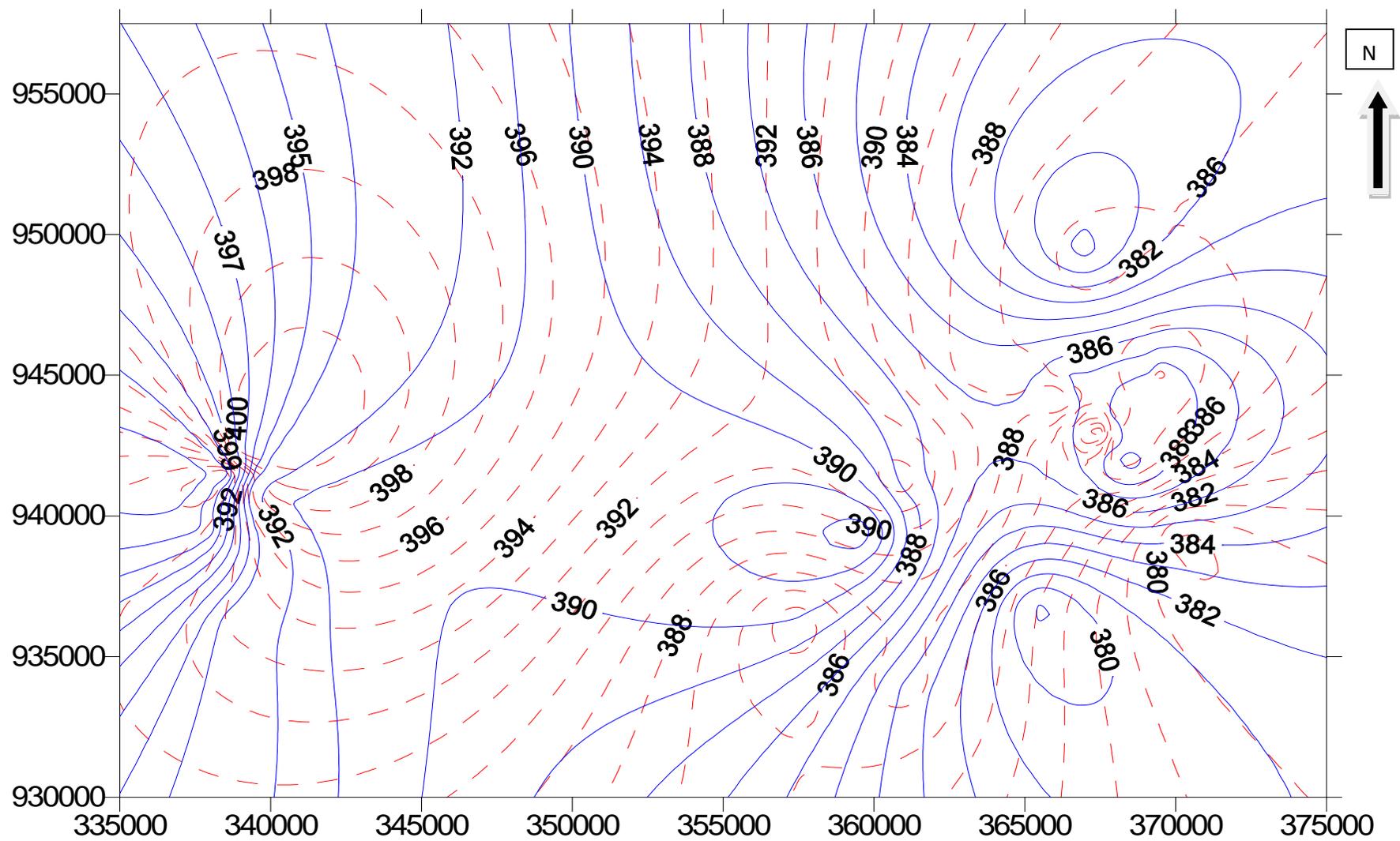


Fig.30 : carte piézométrique calée superposée à la carte piézométrique issue de la simulation d'un prélèvement supplémentaire

5.2 Simulation d'une augmentation de la recharge

Le comportement de la nappe a été également simulé en considérant une recharge supplémentaire dû à un apport extérieur d'eau provenant de l'irrigation. En effet dans le cadre de l'exploitation du pétrole, le consortium envisage un traitement d'eau pompée avec le brut puis de le réinjecter. Cette initiative devrait permettre de mettre à la disposition de la population de l'eau pour l'irrigation. Dans cette optique, nous avons retenu deux scénarios d'infiltration qui simulent respectivement une recharge de 250mm/an et 350mm/an dans la zone située entre Miandoum et Komé (fig.31).

Les résultats issus de ces deux scénarios de recharge (250mm/an et 320mm/an), nous révèle que :

- Une recharge supplémentaire de 250mm/an dans la zone présumée d'irrigation provoquerait un battement de la nappe variant de 1m 10m en fonction de la proximité à la zone de recharge (fig.32).

On constate aussi que les apports aux limites sont presque inchangés alors que ceux dus à la recharge ont augmenté ainsi que les débits de sortie ont considérablement augmenté.

- Une recharge supplémentaire de 320mm/an dans la même zone induirait un battement de la nappe de l'ordre de 5 à 13m.

En résumé on peut dire qu'un nouvel apport par infiltration dû aux eaux destinées à l'irrigation déstabiliserait l'état actuel de la piézométrie et les échanges aux limites.

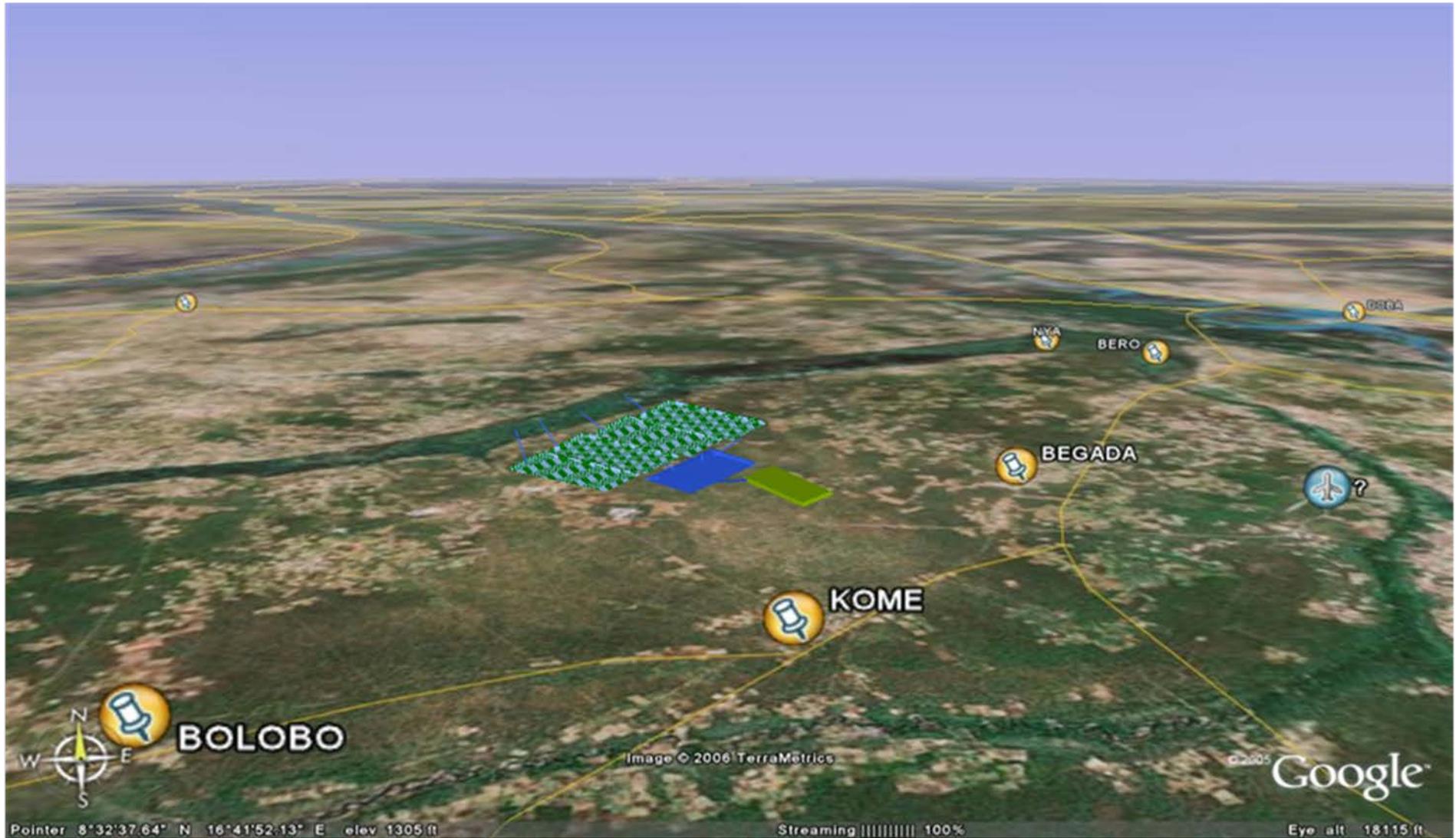


Fig.31 : zone de simulation pour une recharge supplémentaire

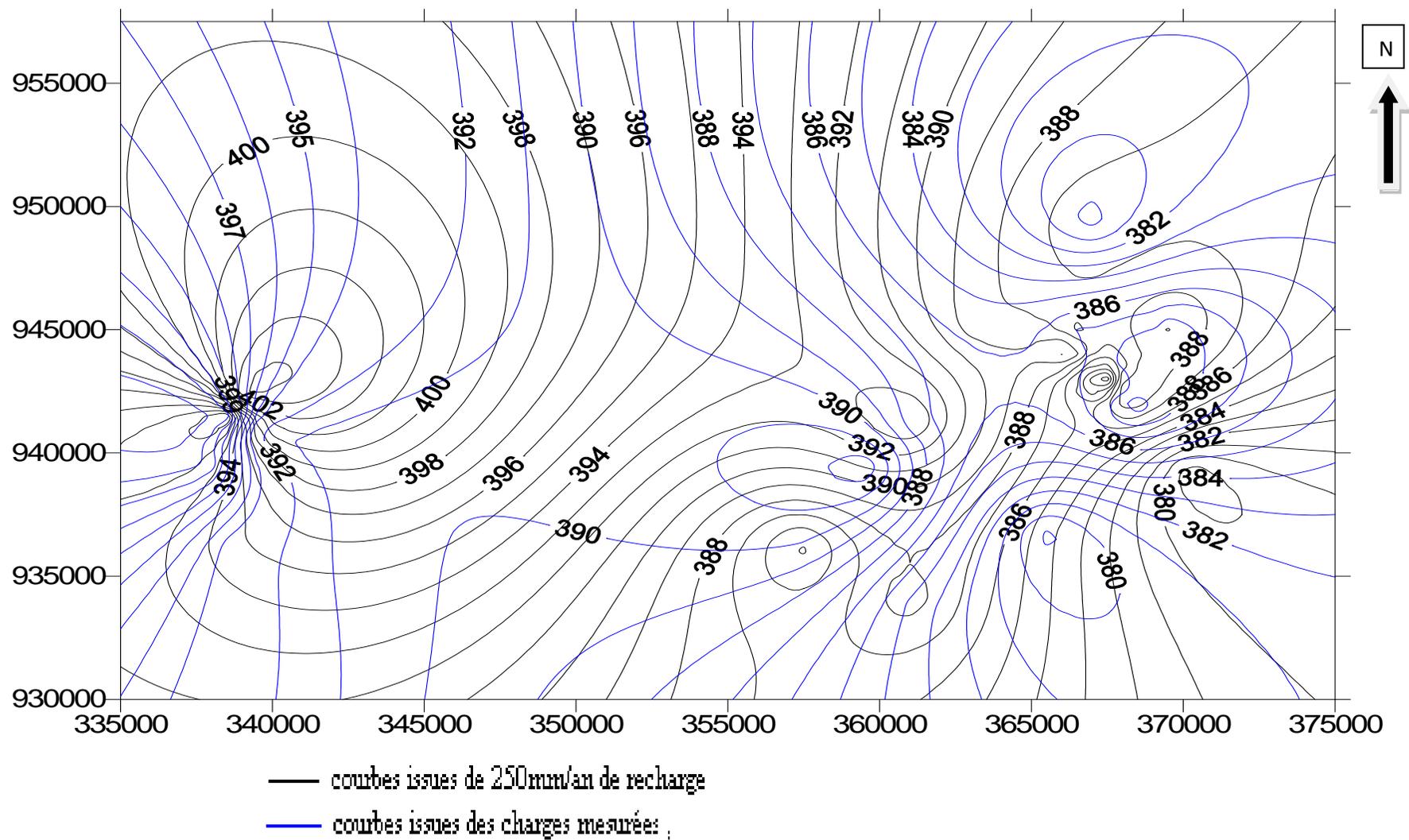


Fig.32 : carte piézométrique calée superposée à la carte piézométrique issue de la simulation d'une recharge supplémentaire

5.3 Simulation en régime transitoire de transport de contaminant

Cette simulation concerne deux zones stratégiques dans la gestion qualitative des eaux du système aquifère. Ces deux zones sont respectivement la zone des puits de réinjection (K223) et la zone de stockage des déchets (landfill). En effet dans ces deux zones potentiellement polluées, on a procédé à une étude de transfert de particules afin d'avoir une idée sur leur évolution spatiale et temporelle en cas de pollution.

La simulation des particules dans la zone de stockage des déchets et dans la zone des puits de réinjection, nous a permis de voir l'évolution des particules dans l'espace (fig.33 et 34). Cette évolution se fait dans le sens des lignes d'écoulement de la nappe.

En régime transitoire, la simulation réalisée dans les conditions climatiques actuelles mais avec variation temporelle révèle que les particules ont été transportés que très faiblement (K223) et parfois presque stationnaire (landfill). En considérant une échelle de temps plus grande (100, 150 et 200ans) l'évolution spatiale des particules est plus étendue, et par conséquent les vitesses d'écoulement pourraient être déduites et des zones de protections pourraient également être établies.

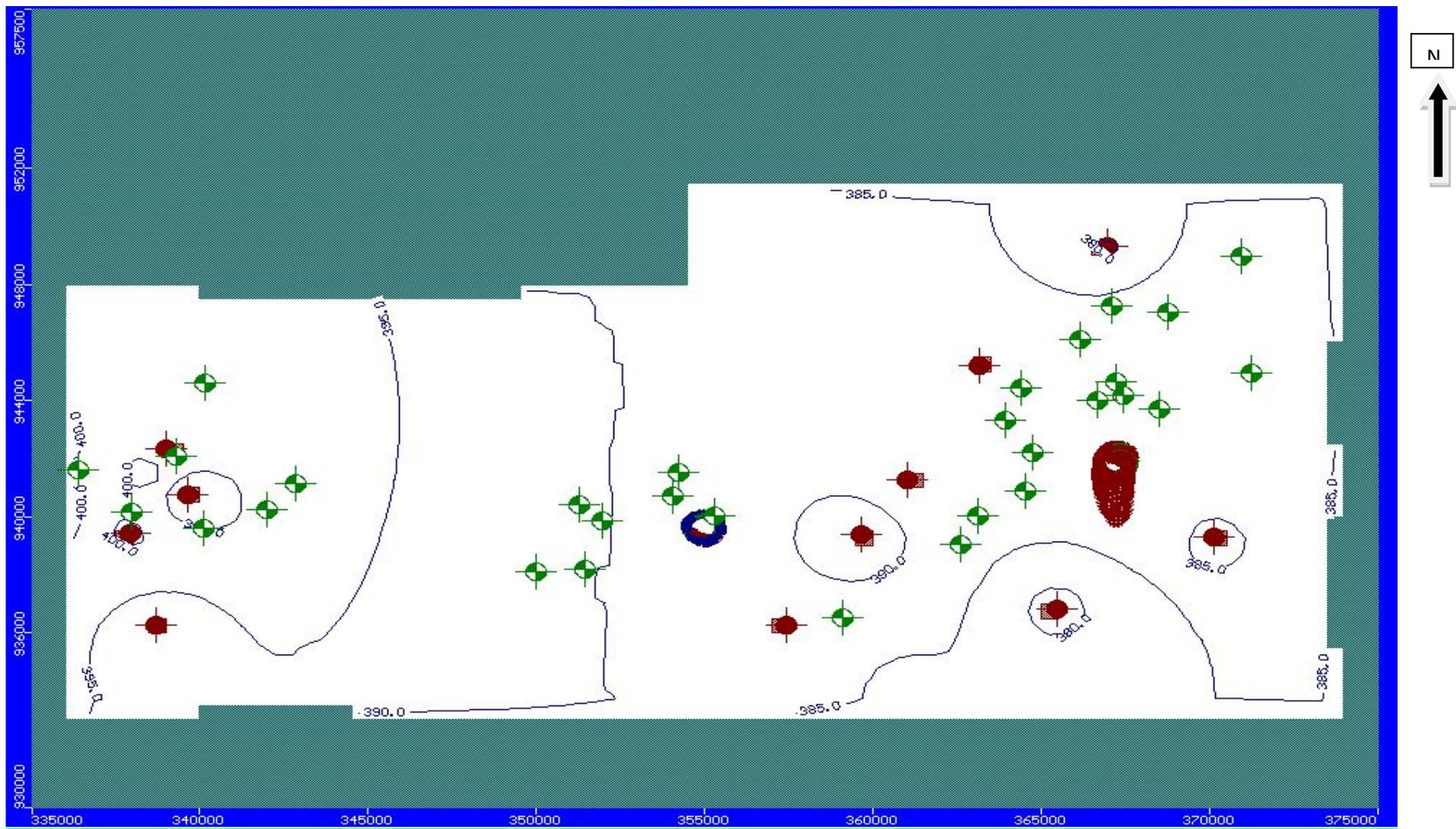


Fig.33: évolution des particules dans la zone d'études

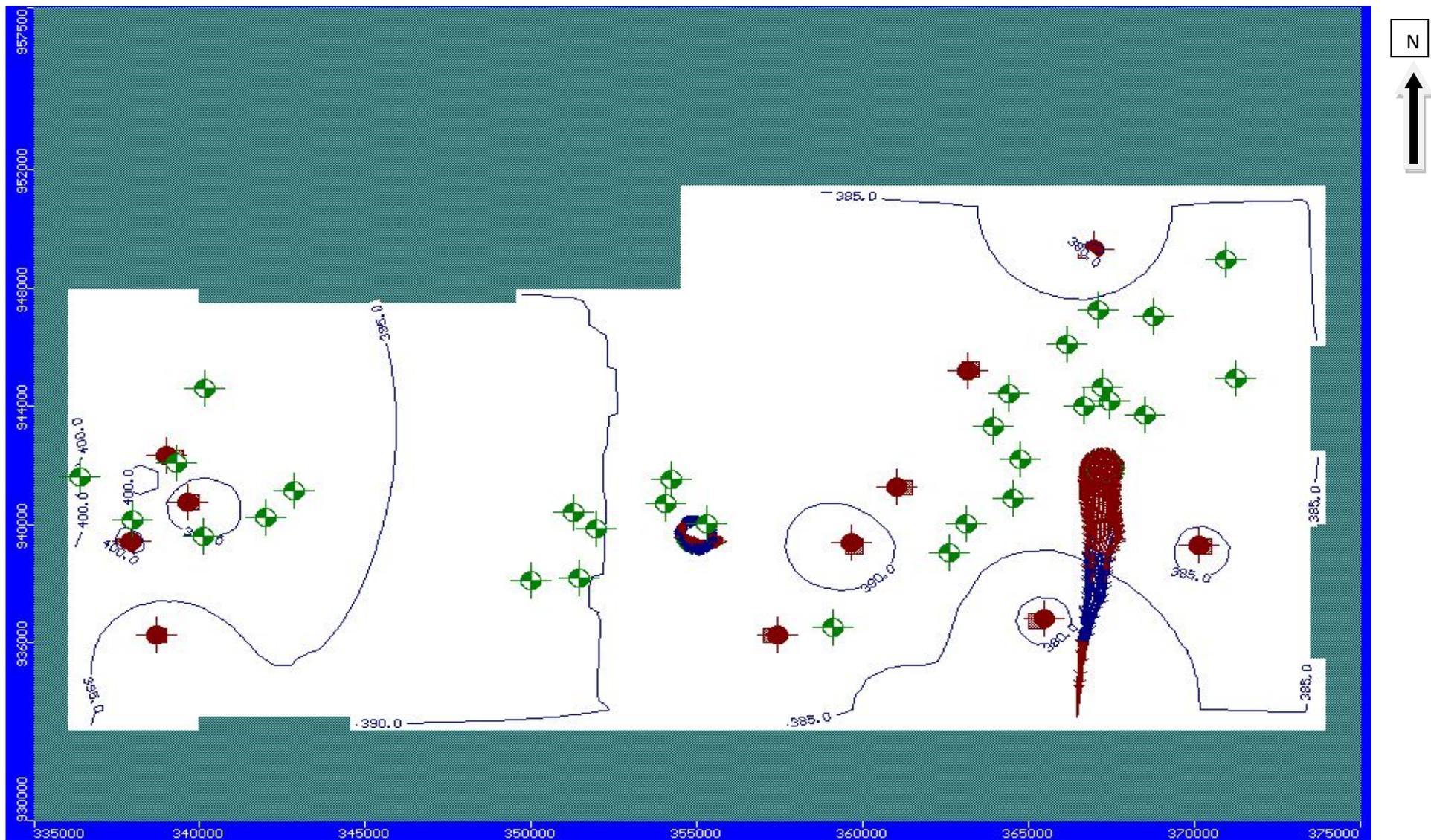


Fig34: évolution des particules dans la zone d'études

Ainsi l'examen de la figure 34 montre que l'ensemble des lignes d'écoulement de la zone de Komé, de Bolobo et de Miandoum converge plus ou moins vers les puits villageois. Ces puits vers lesquels convergent les lignes d'écoulement constituent un domaine géographique correspondant à l'aire d'alimentation de la nappe.

Suivant la même procédure, des périmètres de protection ont été établis dans le domaine d'exploitation des champs pétroliers de Komé (fig. 35 et 36).

Cette simulation nous a permis non seulement de délimiter les zones probables d'où peut arriver un éventuel contaminant mais également d'identifier le périmètre de protection de la nappe.

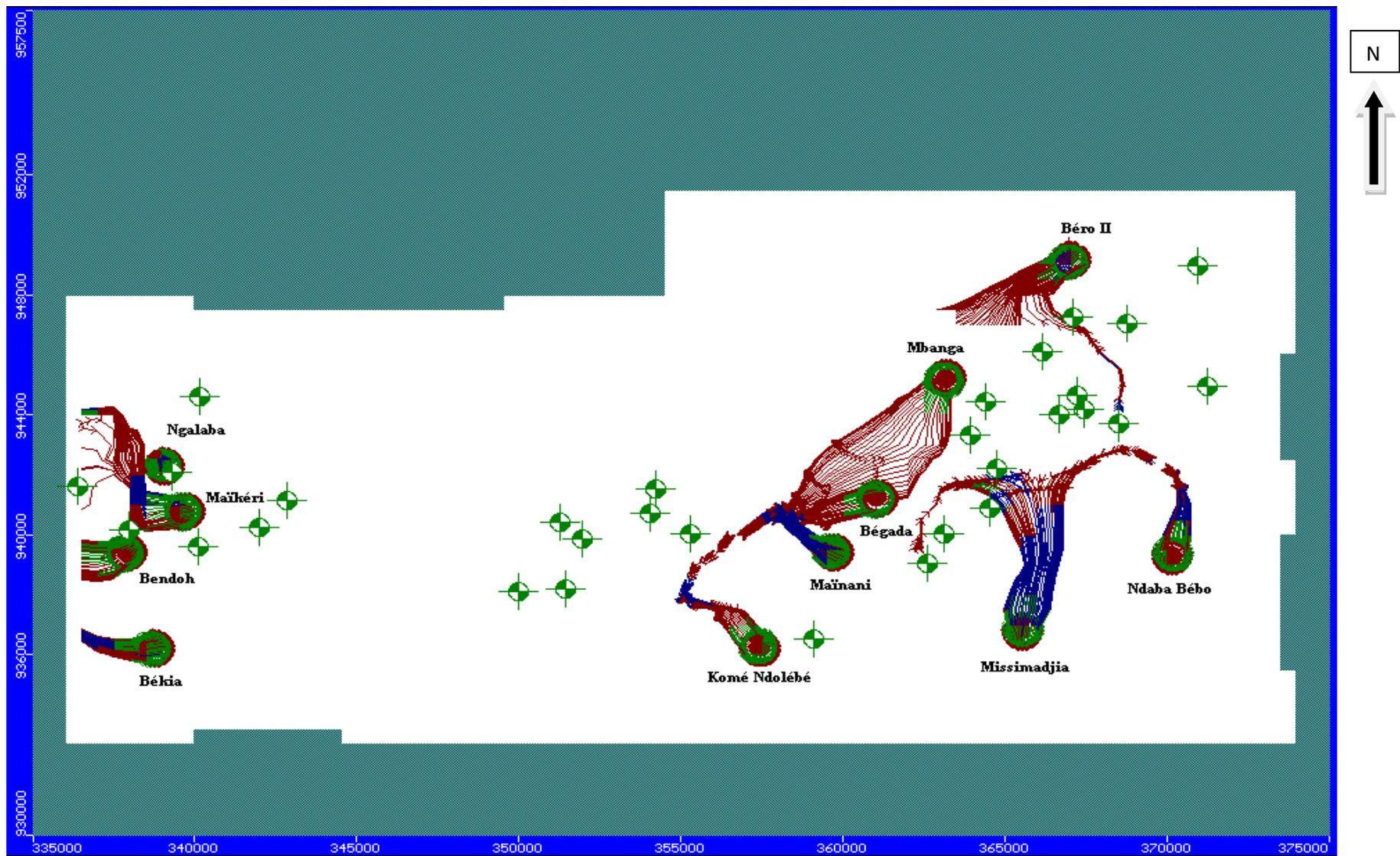


Fig.35 : carte prévoyant la délimitation de zones de protection.

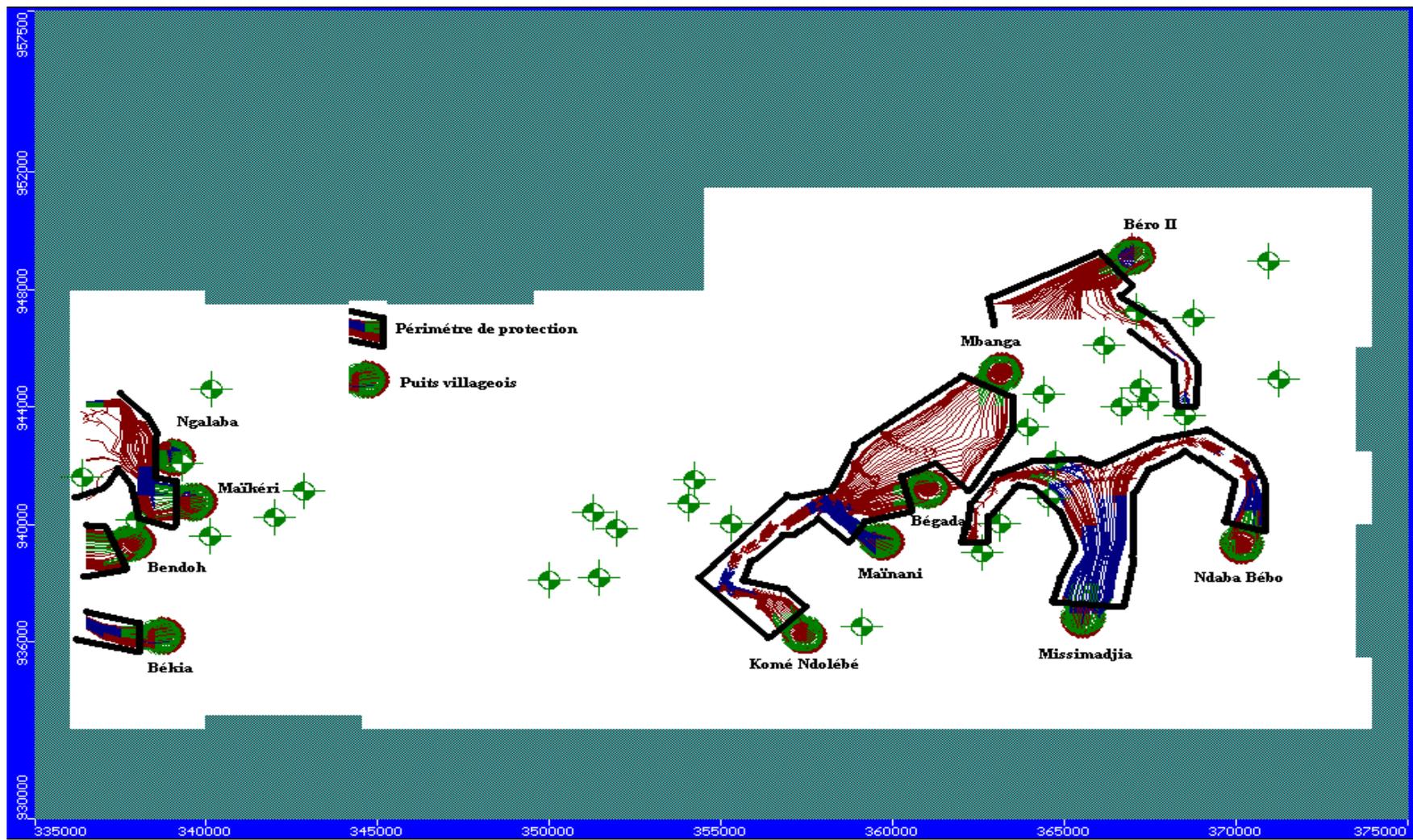


Fig.36 : carte de délimitation de zones de protection.

CONCLUSION

Le fonctionnement hydrodynamique du système aquifère a été étudié par la modélisation mathématique. Ce modèle hydrogéologique de la zone de l'OFDA et Nya a été réalisé après un calage en régime permanent des paramètres physiques principalement la perméabilité et pour une moindre mesure la recharge.

Ces paramètres qui sont jusque là mal connus ont pu être bien cernés grâce au calage de la piézométrie valide après l'obtention d'une corrélation très acceptable des charges mesurées à celles des charges calculées.

Les échanges avec le milieu extérieur du domaine, nous ont permis de connaître d'une part les zones d'alimentation latérale de la nappe et de pertes latérales, et d'autre part d'appréhender la capacité productive du réservoir d'eau souterraine du domaine modélisé.

La simulation de deux scénarios qui sont respectivement une demande supplémentaire de 25% de prélèvement et une recharge supplémentaire (250 et 320mm/an) due à un apport extérieur ; par l'irrigation, nous a permis d'apprécier les effets sur l'état de la piézométrie par un rabattement variant entre 1 et 5m du niveau d'eau, ou par un battement de la nappe variant entre 1 et 13m pour un apport supplémentaire par infiltration.

Enfin la simulation l'évolution des particules dans la zone de stockage des déchets ou dans la zone des puits de réinjection a permis de voir l'évolution de la particule et de délimiter une zone de protection contre une éventuelle contamination ponctuelle.

En somme, même si ce modèle représente de façon simplifiée la réalité, nous estimons qu'elle restitue de façon acceptable le comportement de la nappe de notre secteur d'étude et qu'on peut prétendre qu'il pourra servir dans certain cas dans la gestion du système aquifère d'outil d'aide à certaines décisions. Toutefois une étude géochimique et isotopique complémentaire apporterait plus de lumière sur le comportement tant hydrodynamique qu'hydrochimique et isotopique du système aquifère et de suivre l'évolution d'un polluant chimique dans la nappe.

Bibliographie

- BELLION Y.** 1989. Histoire géodynamique post-paléozoïque de l'Afrique de l'Ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudenni, Iullemmeden, Tchad). Publication occasionnelle, thèse d'état CIFEG 19, 1989, 302p.
- BUREAU DE L'EAU** (République du Tchad). 1995. Rapport de synthèse de la situation environnementale du bassin de Doba. Rapport technique, 46p.
- CRENN Y & GODIVIER X.** 1956. Anomalie de la pesanteur au Tchad. Rapport Technique ORSTOM., 18p.
- DAIRA Dj.** 2000. Etude de la recharge de la nappe du Chari Baguirmi (Tchad) par les méthodes chimiques et isotopiques. Thèse. Univ. Avignon, 161p.
- DASSARGUES A.** 1995. Modèles mathématiques en hydrogéologie. Programme Tempus Jep 3801, Science de l'Eau et Environnement, 132p.
- DASSARGUES A. & MONJOIE A.** 1992. Modélisation mathématique des aquifères. Bulletin d'Information de l'ANSEAU, 29-49.
- DEROUANE J. & DASSARGUES A.** 1994. Modélisation mathématique appliquée à la délimitation des zones de protection : cas du site de captage de Vivegnis (plaine alluviale de la Meuse, Belgique). Bulletin du Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel **13**, 53-68.
- DINU I.** 1997. Modélisation des écoulements dans les aquifères fissurés de la Dobrogea du Sud (Roumanie), Hydrogéologie N°4, pp33-42.
- FAYE S., GAYE C.B., & FAYE A.** 1998. Modélisation du fonctionnement hydrodynamique du système aquifère du littoral nord du Sénégal. Simulation de prélèvements supplémentaires pour réduire le déficit de distribution d'eau potable de la région de Dakar. BRGM Hydrogéologie N°1, pp 13-22.
- FREY C.** 1987. Projet d'hydraulique villageoise et pastorale dans la région des Koros (ANTEA). Rapport technique, 35p.
- GARIN H.** 1989. Programme d'hydraulique villageoise dans les préfectures de la Tandjilé, du Logone Occidental et du Logone Oriental : suivi technique et contrôle des travaux de forages. Rapport technique, 67p+annexes.
- GENIK G.J.** 1993. Petroleum Geology of Cretaceous –Tertiary Rift Basins in Niger, Chad, and Central African Republic. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin. Vol.77, No 8 pp1405-1435.
- GERARD G.** 1958. Carte géologique de l'Afrique Equatoriale Française au 1/2.000.000. notice explicative. Imprimerie typographique d'édition. Paris.

- GUIRAUD R., & MAURIN J-C.** 1992. Early Crétaceous of Western and Central Africa: an overview. *Tectonophysics*, 213, pp. 153-168.
- KUSNIR I.** 2000. Géologie, ressources minérales et ressources en eau du Tchad. Travaux en documents scientifiques du Tchad. *Connaissance du Tchad I.*, 100p.
- LOUIS P.** 1970. Contribution géophysique à la connaissance du bassin du lac Tchad. *Mém. O.R.ST.O.M. n° 42*, 311p.
- MASSUEL S.** 2001. Modélisation hydrodynamique de la nappe phréatique quaternaire du bassin du lac Tchad. Mémoire de DEA. Univ. Avignon., 85p.
- MATHIEU P.** 1978. Lexique stratigraphique du post-paléozoïque du Tchad. *Mém. O.R.S.T.O.M. N°27*, 208p.
- MBAÏTOUDJI M.M.** 1984. Lois des répartitions, hypothèses de pronostics et méthodologie de recherche des gisements des minéraux utiles solides dans le territoire de la République du Tchad. Publication occasionnelle CIFEG 1984/1, 14p.
- MERMILLOD I.** 1961. Notice préliminaire sur les structures et le remplissage de la fosse de Doba, zone sud de la République du Tchad (d'après les campagnes géophysiques 1960-1961 de l'ORSTOM et de la C.P.G. française). *Rapport technique*. 51p.
- NADEGE N.** 2005. Approche par modélisation pour améliorer la compréhension du fonctionnement hydrogéologique dans la région de la ville de Kaboul en Afghanistan. Mémoire de DEA. Univ. Avignon., 103p.
- ORSTOM.** 1961. Annuaire hydrologique de la République du Tchad. Année 1960 CRT. Centre de Recherches Tchadiens, Fort Lamy, *Rapport technique*. 156p.
- NDOYE S.** 2003. Comportement hydrodynamique et hydrochimique de la nappe cotière du Continental terminal du Saloum. Thèse de 3^{ème} Cycle. Ucad. Dakar., 152p.
- PIAS J.** 1968. Les formations sédimentaires tertiaires et quaternaires de la cuvette tchadienne et des sols qui en dérivent. *Mém. O.R.S.T.O.M. N°43*, 407p.
- RODIER J.** 1964. Régimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'ouest du Congo. Thèse ORSTOM., 163p.
- SCHNEIDER J.L.** 1989. Géologie et hydrogéologie de la République du Tchad. Thèse d'Etat Univ. Avignon, vol 1 et 2, 818p.
- SCHNEIDER J.L. & WOLFF J.P.** 1992. Carte géologique et hydrogéologique au 1/500 000 de la République du Tchad. Mémoire explicatif. Document BRGM N° 209, vol. 1 et 2, 689p.
- TABE E.N.** 1978. Recherche géophysique dans la fosse sédimentaire de Doba (Partie sud de la République du Tchad). Dans le recueil « Matériaux de la V^e conférence scientifique des jeunes savants » -Section géophysique- 1978. VINITI. 28.09.78. N°3124-78.

URS France. 2002. Geology and hydrogeology of the oilfield development area (chad export project). Rapport technique, 15p.

VINCENT P.M. 1954. Coupure géologique Amtiman Ouest. Rap. Ann. SG. A.E.F., pl.VIII. pp 41-48.

WACKRENIER Ph. 1961.Recherche de la bauxite au Logone et au Mayo Kebbi. (Tchad). Bull. IERGM. N°14, pp 324-328.

Liste des figures

Fig.1 : les régions et les localités du Tchad

Fig.2 : Carte de localisation de la zone d'étude

Fig.3 : Schéma des principaux flux de masses d'air en Afrique de l'Ouest et nord sud de la troposphère avec la localisation des zones pluvieuses au sol. *a*-zone sans pluie ; *b*-zone avec des orages isolés ; *c*-zone où domine les lignes de grain et les « pluies de mousson » ; *d*-zone avec des pluies réduites (d'après Olivry et al. 1996 ; Roche.1980 in Massuel.2003)

Fig.4 : carte hydrographique de la zone d'étude

Fig.5 : situation géographique des Koros (Bassin de Doba)

Fig.6 : localisation du secteur par rapport aux cours d'eau

Fig.7 : sondages pétroliers du Bassin de Doba (1 000 premiers mètres)

Fig.8 : le Gondwana avant sa fragmentation au Mésozoïque inférieur (l'orogénèse andine-Crétacé terminal/Paléogène a été ajouté)

Fig.9 : structure géologique De fosse de Doba d'après Y. BAUDIC (1963).

Fig.10 : structure tectonique du bassin d'après Oceanseu (2006).

Fig.11 : (1 et 2) Coupes géologiques de Maïkeri à KPZ 15 et de BPZ 4 à KPZ 10 du toit au mur d'argile de la nappe superficielle

Fig.12 : Carte de profondeur d'eau sept 2006

Fig.13 : Carte de profondeur d'eau juin 2006

Fig.14 : piézométrie de mai 2006

Fig.15 : piézométrie de septembre 2006

Fig.16 : Evolution de la piézométrie de komé 2003

Fig.17 : Evolution de la piézométrie de Miandoum 2003

Fig.18 : Evolution de la piézométrie de Bolobo 2003

Fig.19 : carte du toit en 2D obtenue par interpolation et krigeage de la zone d'étude.

Fig.20 : carte du toit en 3D obtenue par interpolation et krigeage de la zone d'étude.

Fig.21 : carte du mur en 2D obtenue par interpolation et krigeage de la zone d'étude

Fig.22 : carte du mur en 3D obtenue par interpolation et krigeage de la zone d'étude

Fig.23 : contact surface libre et la Pendé.

Fig.24 : domaine d'étude délimité par les limites à charges imposées et à charges nulles

Fig.25 : corrélation entre charges calculées et charges mesuré

Fig.26 : comparaison entre la carte piézométrique calculée en tiret et celle issue des mesures en trait plein pour la validation de la calibration

Fig.27 : carte d'évolution des sorties et entrées des eaux dans le domaine

Fig.28 : carte de zones de budget du domaine modélisé

Fig.29 : Répartition des Perméabilités obtenues à l'issu du calage

Fig.30 : carte piézométrique calée en bleu superposée à la carte piézométrique issue de la simulation en rouge d'un prélèvement supplémentaire

Fig.31 : zone de simulation pour une recharge supplémentaire

Fig.32 : carte piézométrique calée superposée à la carte piézométrique issue de la simulation d'une recharge supplémentaire

Fig.33 : évolution des particules dans la zone d'étude

Fig.34 : évolution des particules dans la zone d'étude

Fig.35 : carte prévoyant la délimitation de zones de protection.

Fig.36 : carte de délimitation de zones de protection.

Liste des tableaux

Tab.1. valeurs de transmissivité obtenues par l'ONHPV en1987 lors des essais de pompage

Tab.2 : valeurs des charges obtenues après calage en régime permanent.

Tab.3 : Bilan global en eau du système calculé après calage en régime permanent.

Tab.4 : Débits échangés entre le milieu extérieur (zone 2 à 16) avec le domaine modélisé (zone 1).

Tab.5 : Bilan global en eau du système calculé pour un prélèvement double après calage en régime permanent.

Tab.6 : Débits échangés entre le milieu extérieur (zone 2 à 16) avec le domaine modélisé (zone 1) après simulation de 25% de prélèvements supplémentaires.

e 1 : données pluviométriques, chronique de 1990 à 2006 des stations de Bébédjia, Doba aéroport, Doba préfecture et de Goré

STATION DE BEBEDJIA

Pluviométrie (mm)													
Année	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	CUMUL
1990	0.0	0.0	0.0	16.2	57.1	154.3	289.8	336.5	205.2	43.1	0.1	0.0	1102.3
1991	0.0	9.9	0.0	61.4	191.0	99.5	111.1	237.6	161.0	93.2	0.0	0.0	964.7
1992	0.0	9.9	4.1	30.5	82.9	173.9	207.3	432.1	221.6	64.5	9.7	**	1236.5
1993	0.0	0.0	0.0	12.4	40.4	57.3	192.4	202.4	80.4	34.1	0.2	0.0	619.6
1994	0.0	0.0	29.2	17.6	36.9	126.8	350.8	441.8	292.5	26.8	0.0	0.0	1322.4
1995	0.0	0.0	11.5	40.8	132.0	147.0	302.4	203.9	169.2	87.0	13.6	**	1107.4
1996	0.0	0.0	0.0	108.2	108.2	89.9	193.1	294.4	238.8	54.5	0.0	0.0	1087.1
1997	0.0	0.0	6.5	133.2	108.6	153.7	238.8	204.0	115.7	33.9	37.3	0.0	1031.7
1998	0.0	0.0	0.0	26.9	35.4	124.6	412.7	351.3	153.3	68.3	5.0	0.4	1177.9
1999	0.0	0.0	0.0	36.7	60.0	132.3	133.3	199.5	215.8	224.9	0.0	0.0	1002.5
2000	0.0	0.0	7.5	0.0	32.5	96.4	234.2	273.3	120.1	32.0	0.0	0.0	796.0
2001	0.0	0.0	6.6	7.9	107.9	101.8	552.9	382.1	**	81.6	0.0	0.0	1240.8
2002	0.0	0.0	19.0	23.2	11.5	196.0	236.8	317.2	203.2	50.0	9.5	0.0	1066.4
2003	0.0	0.0	0.0	28.4	102.1	183.5	**	280.3	124.4	72.6	18.3	0.0	809.6
2004	0.0	0.0	0.0	18.0	172.6	180.5	206.5	227.0	134.6	95.4	13.3	0.0	1047.9
2005	0.0	0.0	0.0	4.4	68.3	156.2	211.2	257.4	207.6	45.2	0.0	0.0	950.3
2006	0.0	0.0	0.2	22.1	22.1	131.5	183.0	456.8	227.9	45.7	30.0	0.0	1119.3
MOY	0.0	1.2	5.0	34.6	80.6	135.6	253.5*	299.9	179.5*	67.8	8.1	0.0*	1022.2

STATION DE DOBA AEROPORT

Pluviométrie (mm)													
Année	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	CUMUL
1991	0.0	0.0	3.2	88.9	274.8	112.9	283.8	314.2	120.7	79.4	0.0	0.0	1277.9
1992	0.0	0.0	28.3	**	15.4	144.4	334.6	**	**	**	**	**	522.7
1993	0.0	0.0	0.0	39.7	95.6	55.6	280.6	224.5	107.9	**	0.0	0.0	803.9
1994	0.0	0.0	24.7	29.6	59.4	**	**	**	271.2	**	0.0	0.0	384.9
1995	**	**	**	**	266.2	**	**	219.2	211.5	**	5.0	0.0	701.9
1996	0.0	0.0	2.0	65.8	139.1	138.4	188.9	**	242.0	**	**	**	776.2
1998	**	**	**	**	**	**	283.7	**	**	**	**	**	283.7
1999	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	0.0
2000	0.0	0.0	7.0	19.0	100.0	123.0	244.6	203.5	150.7	42.6	0.0	0.0	890.4
2001	**	**	**	**	**	119.6	352.6	3.0	**	**	**	**	475.2
2002	0.0	0.0	0.0	17.1	0.0	115.3	199.6	285.7	271.8	69.8	16.8	0.0	976.1

2003	0.0	0.0	0.0	**	**	**	**	343.2	**	**	0.0	0.0	343.2
2004	0.0	0.0	0.0	**	**	**	**	0.0	**	**	**	**	0.0
2005	0.0	**	**	**	**	**	**	0.0	**	**	**	**	0.0
2006	0.0	0.0	0.0	**	**	**	**	405.0	**	**	**	**	1056.9
MOY	0.0*	0.0*	6.5*	43.4*	118.8*	116.4*	263.3*	249.8*	204.2*	65.8*	3.1*	0.0*	1048.1

STATION DE DOBA PREFECTURE

Pluviométrie (mm)													
Année	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	CUMUL
1990	0.0	0.0	0.0	25.0	107.0	190.0	161.1	291.6	179.1	84.0	0.1	0.0	1037.9
1991	0.0	0.0	4.5	62.3	173.7	104.3	244.1	243.6	81.3	152.0	0.0	0.0	1065.8
1992	0.0	0.0	36.7	14.7	33.5	89.1	322.0	268.8	190.0	67.5	0.0	0.0	1021.3
1993	0.0	0.0	0.0	36.3	72.9	70.5	188.3	122.0	132.7	57.1	0.0	0.0	679.8
1994	0.0	0.0	0.0	23.2	40.6	132.2	259.8	407.7	221.1	117.2	1.6	**	1203.4
1995	0.0	0.0	0.0	14.5	116.0	80.8	200.5	227.5	131.0	49.0	11.0	0.0	830.3
1996	0.0	0.0	0.0	41.5	119.6	110.5	181.2	191.2	271.5	57.5	0.0	0.0	973.0
1997	79.0	0.0	13.5	135.5	103.0	178.5	265.5	281.1	151.5	66.5	79.0	0.0	1353.1
1998	0.0	0.0	0.0	0.0	28.4	242.5	186.5	251.1	121.5	94.8	4.4	0.0	929.2
1999	0.0	0.0	2.0	16.5	63.7	155.4	122.0	270.9	238.7	253.8	0.0	0.0	1123.0
2000	0.0	0.0	0.0	28.5	70.0	139.7	190.5	157.6	129.0	52.8	0.0	0.0	768.1
2001	0.0	0.0	2.3	0.0	92.5	72.1	605.7	340.4	220.0	93.0	0.0	0.0	1426.0
2002	0.0	0.0	11.0	30.0	51.5	67.0	158.9	280.8	49.0	2.0	0.0	0.0	650.2
2003	0.0	0.0	0.0	8.5	107.2	301.2	275.0	361.0	150.6	78.0	13.7	0.0	1295.2
2004	0.0	0.0	0.0	25.8	179.2	90.5	**	**	**	82.5	23.0	0.0	401.0
2005	0.0	0.0	0.0	45.0	**	149.4	280.7	248.9	235.8	79.4	0.0	0.0	1039.2
2006	**	**	1.5	**	55.2	172.5	271.2	330.6	196.4	65.0	**	**	1092.4
MOY	4.9*	0.0*	4.1	31.7*	88.4*	138.0	244.6*	267.2*	168.7*	85.4	8.3*	0.0*	1011.8

STATION DE GORE

Pluviométrie (mm)													
Année	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	CUMUL
1990	0.0	0.0	0.0	43.2	119.6	208.5	220.0	458.6	174.4	78.6	0.0	0.0	1302.9
1991	0.0	0.0	0.0	144.0	200.3	172.0	262.3	232.5	144.3	96.2	0.0	0.0	1251.6
1992	0.0	0.0	0.0	60.4	81.5	127.0	145.7	369.0	272.0	29.0	**	**	1084.6
1993	0.0	0.0	0.0	30.0	51.5	128.5	242.7	322.5	**	85.0	0.0	**	860.2
1994	0.0	0.0	0.0	39.0	124.0	76.4	200.6	274.1	268.7	73.0	12.0	0.0	1067.8
1995	0.0	0.0	18.0	72.0	139.8	160.9	322.0	299.3	201.0	112.4	5.3	0.0	1330.7
1996	0.0	0.0	12.5	108.3	151.5	191.5	195.6	343.0	201.2	90.0	0.0	0.0	1293.6
1997	0.0	0.0	12.0	46.8	161.3	219.5	353.2	139.5	**	200.0	77.0	0.0	1209.3
1998	0.0	0.0	0.0	45.5	70.5	196.5	294.1	**	**	**	0.0	0.0	646.6
1999	0.0	0.0	0.0	9.5	22.3	181.6	228.1	346.8	223.5	177.6	0.0	0.0	1199.4
2000	0.0	0.0	21.0	**	63.5	140.0	229.3	219.7	164.0	**	0.0	0.0	837.5
2001	0.0	0.0	2.7	3.8	105.5	167.2	389.9	235.2	279.3	64.3	0.0	0.0	1247.9
2002	0.0	0.0	22.0	51.1	60.0	208.5	90.5	228.3	**	**	**	**	660.4
2003	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	0.0
2004	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	0.0
2005	0.0	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	0.0
MOY	0.0*	0.0*	6.8*	54.5*	103.9*	171.4*	244.2*	289.0*	214.3*	100.6*	8.6*	0.0*	1242.0

Annexe 2 : valeurs de porosité efficace utilisées pour différents types sédiments

Valeurs caractéristiques de la porosité efficace

Types de sédiments	d ₁₀ mm	n%	n _e %	K m/s
Gravier moyen	2,5	45	40	3.10 ⁻¹
Sable gros	0,225	38	34	2.10 ⁻³
Sable moyen	0,125	40	30	6.10 ⁻⁴
Sable fin	0,9	40	28	7.10 ⁻⁴
Sable très fin	0,045	40	24	2.10 ⁻⁵
Sable silteux	0,005	32	5	1.10 ⁻⁹
Silt	0,003	36	3	3.10 ⁻⁹
Silt argileux	0,001	38	-	*1.10 ⁻⁹
argile	0,0002	47	-	*5.10 ⁻¹⁰

*Valeurs calculées

Tab.1 : valeurs caractéristiques de la porosité efficace de sédiments meubles d'après documents de l'U.G Geological Survey.

Types de réservoirs	porosité efficace %	Types de réservoirs	porosité efficace %
Gravier gros	30	Sable gros +silt	5
Gravier moyen	25	Silt	2
Gravier fin	20	Vases	0,1
Gravier +Sable	15 à 25	Calcaire fissuré	2 à 10
Alluvions	8 à 10	Craie	2 à 5
Sable gros	20	Grès fissuré	2 à 15
Sable moyen	15	Granite fissuré	0,1 à 2
Sable fin	10	Basalte fissuré	8 à 10
Sable très fin	5	schistes	0,1 à 2

Tab.2 : valeurs de la porosité efficace moyennepour les principaux réservoirs d'après documents de l'U.G Geological Survey.