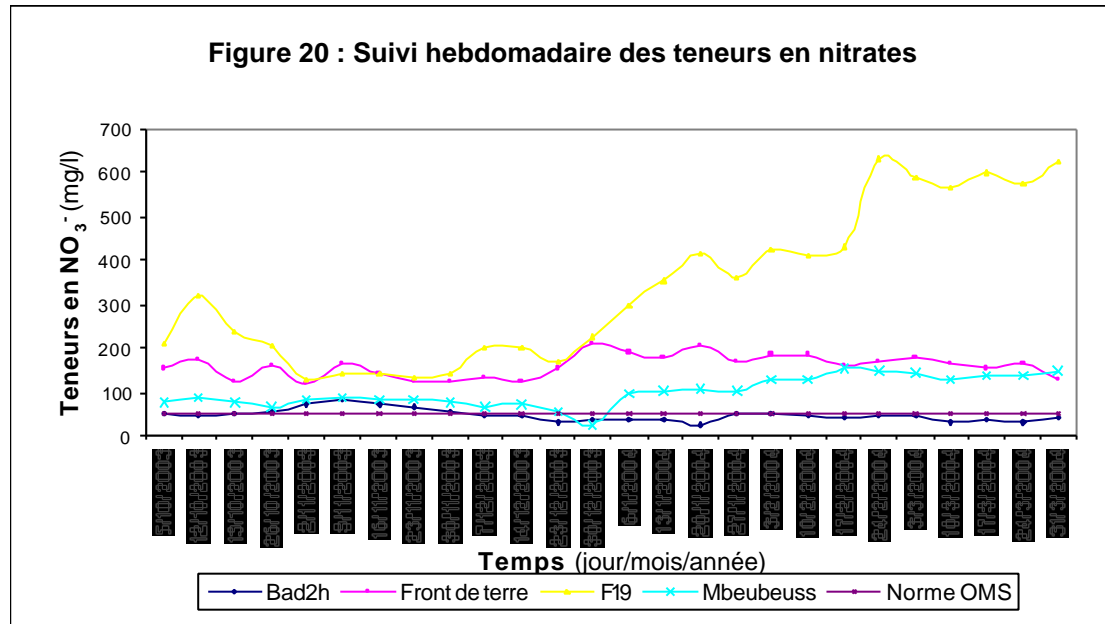


Dans le forage Front de Terre, les teneurs se stabilisent entre 116 et 175 mg/l avant de connaître une légère augmentation. Elles se stabilisent à nouveau de janvier à mars. L'influence externe est moins marquée mais comme le forage F19, le pompage provoque un flux convergent d'eau transportant des ions NO_3^- .

Le puits de Mbeubeus malgré sa proximité à la décharge est moins pollué que les forages F19 et Front de Terre. L'évolution des teneurs au cours des semaines est identique à celle des forages.

Dans le piézomètre Bad 2H, les concentrations en nitrates évoluent légèrement en dessous des 50 mg/l avec toutefois une exception au mois de novembre 2003. D'une manière générale, les teneurs n'évoluent pratiquement pas au cours de l'année.



4. Vulnérabilité de la nappe à la pollution azotée

4.1. Paramètres étudiés

La méthodologie adoptée pour l'étude de la vulnérabilité de la nappe est celle qui a été retenue par le projet lors du séminaire de formation qui s'est tenu à Abidjan du 08-04 au 12-04-2002.

Les différents paramètres qui sont tenus en compte pour la caractérisation de la vulnérabilité de la nappe sont les suivants :

- la pente,
- la capacité d'infiltration,
- l'occupation du sol,
- l'épaisseur de la zone non saturée,
- le réseau d'assainissement,

Ainsi, à chaque paramètre est associé une couche numérisée avec le logiciel ARC VIEW mis en place par le projet. Ensuite les différents facteurs sont divisés en quatre classes (très faible, faible, moyenne ou forte) et chacune est affectée d'un poids.

4.2. Cartes de vulnérabilité de la nappe

La combinaison des différents facteurs a permis de réaliser la carte de vulnérabilité de la nappe.

Les cartes de vulnérabilité de juillet 2003, de juillet 2004 et d'octobre 2004 montrent la même évolution spatiale (Fig 21 ; fig 22 ; Fig 23) avec :

- une zone de très faible à faible vulnérabilité à l'Ouest de la région au niveau de la tête de la Presqu'île, à l'Est et au niveau de Cambéréne.

Au niveau de la tête de la Presqu'île la nappe infrabasaltique donc captive semble bien protégée contre une pollution venant de la surface.

A l'Est les fortes pentes favorisent un ruissellement des eaux de surface au dépens de l'infiltration vers la nappe.

A Cambéréne nous avons un dôme piézométrique.

- une zone de moyenne vulnérabilité dans une grande partie de la zone périurbaine caractérisée par l'absence d'assainissement
- une zone de forte vulnérabilité localisée dans le bassin de Thiaroye-Pikine caractérisée en plus d'un manque d'assainissement par une faible profondeur de la nappe

L'extension spatiale de la pollution avait été introduite comme paramètres dans l'élaboration de la carte de vulnérabilité de juillet 2003. Dans les cartes de juillet 2004 et octobre 2004, l'extension de la pollution azotée a permis de valider les cartes de vulnérabilités obtenus. Ainsi on observe que les zones fortement vulnérables correspondent aux zones où la pollution azotée est intense.

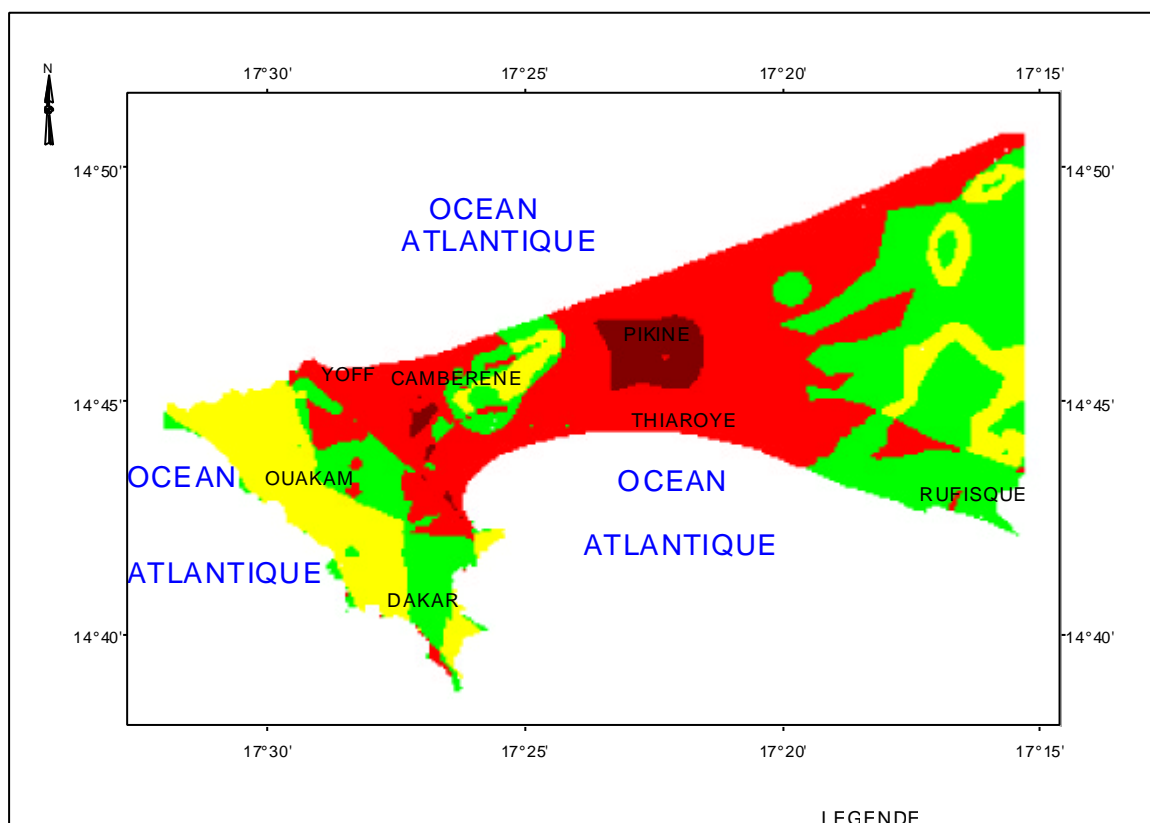


Figure 21 : carte de vulnérabilité de la nappe phréatique de la région de Dakar (septembre 2003)

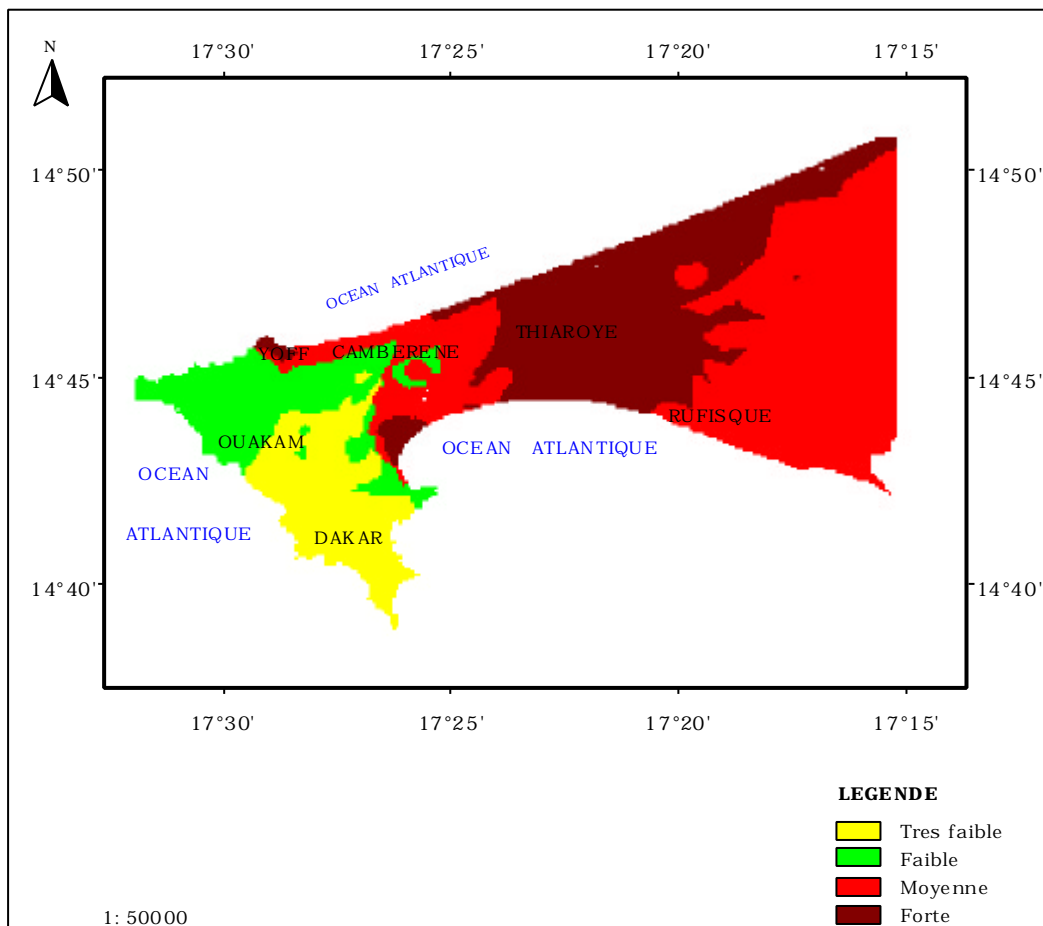


Figure 22 : carte de vulnérabilité de la nappe phréatique de la région de Dakar
(juillet 2004)

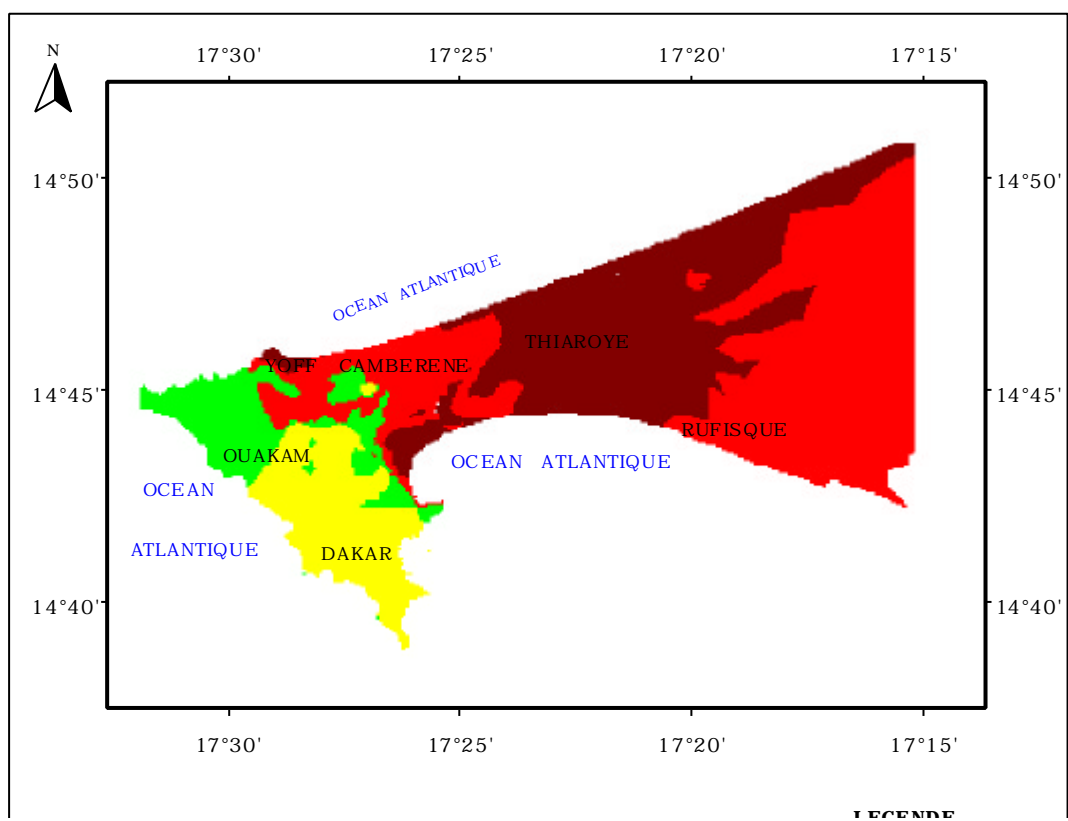


Figure 23 : carte de vulnérabilité de la nappe phréatique de la région de Dakar
(octobre 2004)

5. Relation eaux de mer – eaux de la nappe : problème du biseau salé

La région de Dakar entourée des trois cotés (Nord, Ouest et Sud) par la mer. Dans ce contexte particulier le système aquifère subit l'influence de la mer avec qui il est en contact direct du fait de l'absence de parois latérales. L'exploitation non contrôlée de la nappe vers les années 1970 a provoqué l'intrusion d'eau saline dans certains ouvrages situés sur le littoral. Une des conséquences de cette contamination fût la fermeture de ces ouvrage et la diminution du débit journalier au niveau de la Presqu'île. Un programme de surveillance du biseau a été mis en place avec la réalisation de piézomètres doubles qui captent l'aquifère à deux niveaux (supérieur et inférieur). Actuellement pour la plupart de ces ouvrages seul le piézomètre captant le niveau supérieur est fonctionnel, ce qui constitue un facteur limitant pour l'étude de la contamination saline. Ainsi, avons-nous à partir d'observations piézométriques, physico-chimiques et chimiques faites sur les ouvrages en bordure de l'océan essayé d'appréhender ce problème du biseau salé. Au niveau du piézomètre double Bad 3H (niveau supérieure) et Bad 3B (niveau inférieur) une comparaison de la minéralisation a été tentée.

L'évolution spatiale des ions chlorures (Fig 24 et 25) montre une localisation des fortes teneurs dans la zone périurbaine habitée (Thiaroye-Pikine) et au niveau de la tête de la

Presqu'île où une concentration de 1500 mg/l a été retrouvée au Sud-Est. Mise à part l'influence anthropique et les pluies salines, les fortes teneurs localisées au niveau de la Presqu'île ne peuvent être dues qu'à une contamination directe de la nappe par les eaux marines. Dans ces ouvrages les teneurs élevées en Cl sont associées à une minéralisation élevée et de grandes valeurs de Na^+ .

La conductivité trois fois plus élevée dans le piézomètre Bad 3B que dans le Bad 3H (864 contre 6700 en octobre 2001) peut être le résultat d'un mélange des eaux salées profonde avec l'eau de la nappe.

Sur le plan chimique la plupart de ces ouvrages situés sur le littoral présentent un faciès chloruré calcique témoignant d'un mélange entre les eaux de mer et celle de la nappe. En effet quand l'eau de mer est en contact avec l'eau de la nappe, cette dernière s'enrichit en Ca^{2+} et s'appauvrit en Na^+ d'où le changement de faciès. Ce changement de faciès permet d'apprécier le degré de contamination car ayant lieu au delà de 15% de mélange (Magaritz et Luzier, 1985)

Par ailleurs les cartes piézométriques révèlent qu'une cote de 1 à 2 m est maintenue à l'Ouest et au Nord de la Presqu'île. La position de l'interface eau douce \eau salée dépendant de la charge piézométrique, cette cote permet d'assurer une protection relative de la nappe contre une intrusion saline. Cependant cette protection n'est que relative car l'écoulement étant convergent vers les forages d'exploitation (Front de Terre et PN bis) les rabattements peuvent provoquer la rupture de l'équilibre dynamique entre l'eau douce et l'eau salée.

Au Sud-Est les altitudes du niveau d'eau sont inférieures à 0 m, ce qui rend vulnérable la nappe à une intrusion saline. Des concentrations de 1500 mg/l et une conductivité de 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sont enregistrées dans cette zone.

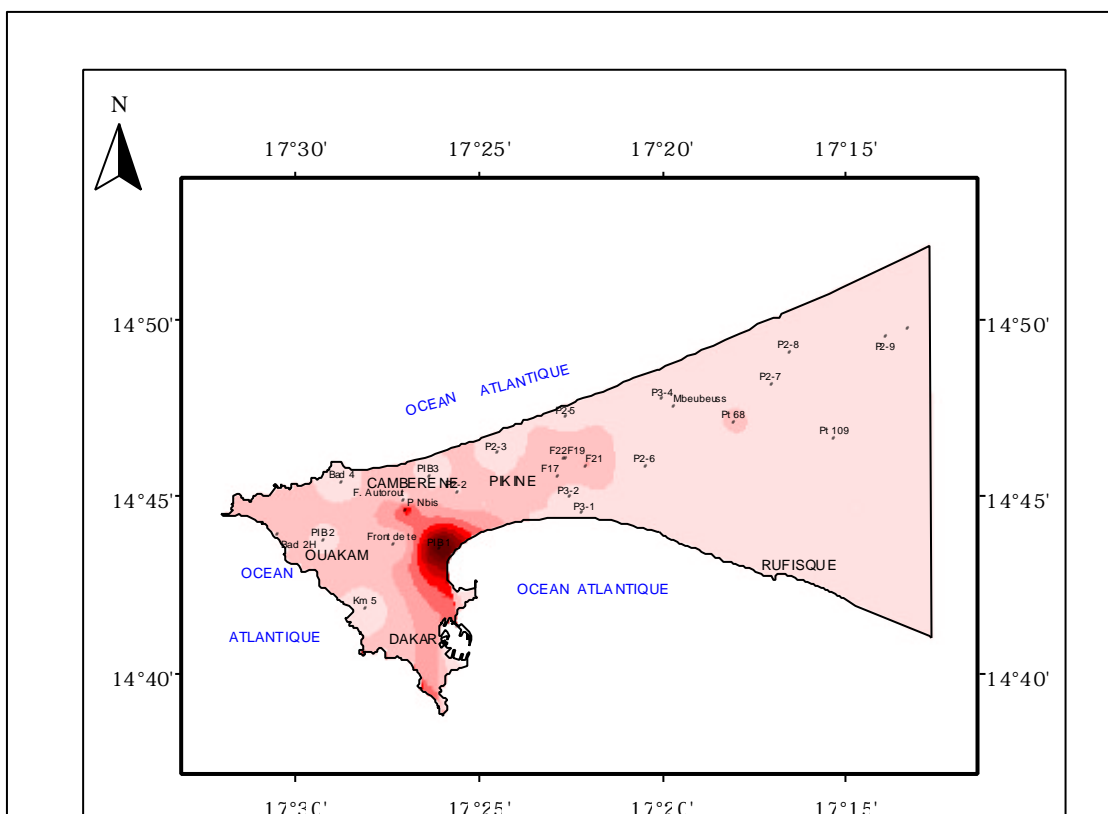
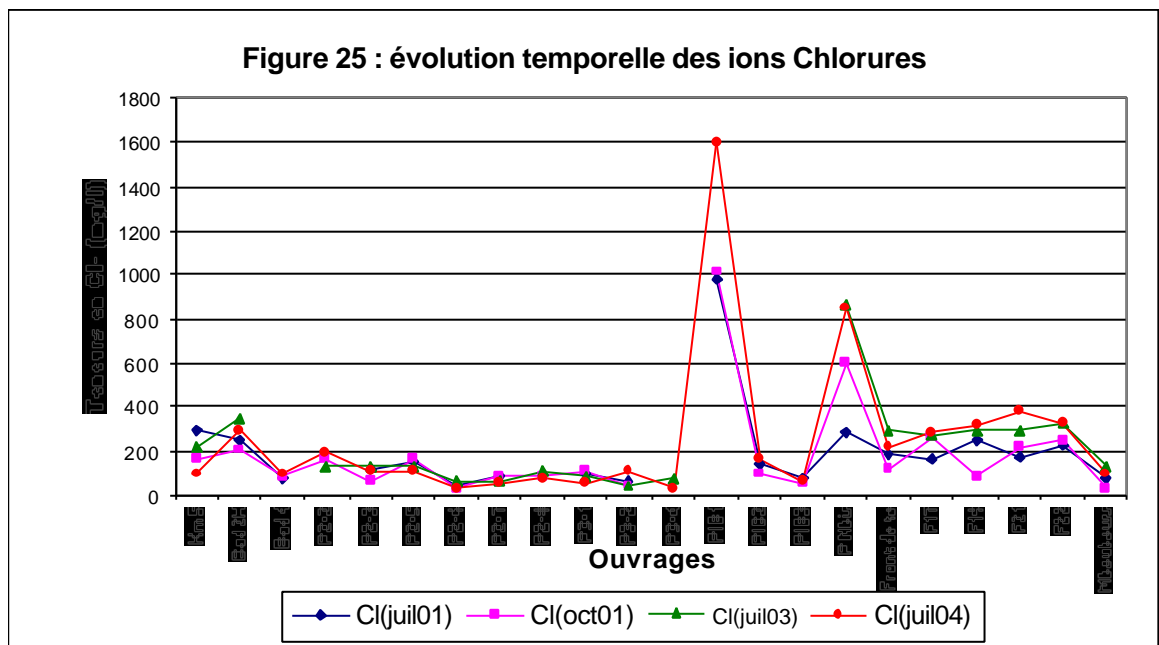


Figure 24 : Carte d'évolution spatiale des chlorures dans la nappe de Dakar (octobre 2004)



6. Modélisation de l'écoulement au niveau dans la nappe infrabasaltique

L'objectif visé est de faire un bilan de la nappe infrabasaltique à partir de la simulation par la méthode des différences finies. Le PM WIN a permis de réaliser un modèle de la nappe. Ceci ne constituant qu'une ébauche car l'objectif futur consiste entre autres à la modélisation des échanges eaux de surface et eaux de mer et aux transport de contaminants.

6.1. Principe des modèles

6.1.1 Equation de diffusivité de l'écoulement

L'équation d'écoulement est basée sur la loi de Darcy et le principe de conservation de masse :

$$Q = -K \cdot A \cdot dh / dl$$

Q : volume traversant une section A (m²)

dh : variation de charge hydraulique (m)

dl : longueur de l'élément de volume (m)

K : conductivité hydraulique où coefficient de perméabilité.

L'équation de masse ou équation de continuité s'exprime comme suit :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \rho \cdot n \cdot \frac{\partial (dx \cdot dy \cdot dz)}{\partial t}$$

$\frac{\partial M}{\partial t}$: variation de masse (kg)

$\frac{\partial t}{\partial t}$: variation de temps (s)

ρ : densité du fluide (kg/ m³)

n : porosité

dx. dy. dz : volume élémentaire considéré (m³)

L'équation de la diffusivité qui est la combinaison des deux expressions peut s'écrire dans le cas d'un écoulement tridimensionnel

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial h}{\partial z}) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + q$$

6.1.2. Résolution numérique par la méthode des différences finies :

La résolution numérique est basée sur le concept que l'équation différentielle peut être remplacée par une équation similaire pouvant être résolue par une méthode arithmétique.

Si l'on considère un volume de terrain délimité par les plans Z₁ et Z₂, l'équation de diffusivité possède une solution si l'on connaît :

- le domaine d'intégration qui correspond au domaine d'étude,
- les conditions aux limites,
- les conditions initiales sur tout le domaine d'étude.

6.2. Construction du modèle :

La première qualité d'un modèle est la représentativité du domaine réel du mode de fonctionnement. La mise en œuvre d'un modèle de simulation hydrogéologique débute par une phase de rassemblement des données relatives :

- à la structure de l'aquifère (altitude du toit et du mur de l'aquifère donnés par la géologie) ;
- aux paramètres hydrodynamiques (perméabilité, transmissivité, porosité et coefficient d'emmagasinement) ;
- aux échanges avec le milieu extérieur (débits entrants par les limites et recharge ainsi que les débits pompés et les pertes naturelles) ;
- aux états piézométriques mesurés permettant de définir l'état de référence ;
- aux conditions aux limites

6.2.1. Structure de l'aquifère

L'aquifère des sables infrabasaltiques repose sur les marnes et argiles d'âge eocène moyen à inférieur. Il affecte la forme d'un plan incliné vers le nord passant de la côte -20 mètres au pied du plateau de Dakar à -75 mètres vers la zone de Cambéréne. Il se subdivise en deux dépressions NE et N séparées par une crête au niveau de la zone englobant le Terme Nord, le Camp Pénal et Le Point N.

Le toit formé par la base des produits volcaniques présente une forme très irrégulière (fig 26). Il décroît d'Ouest en Est, les variations d'enfouissement des coulées sont relativement importantes -65 m au Fort A et plus de 10 m à front de Terre, deux points distants de moins de 2kms. Cette base se situe dans l'ensemble de la partie occidentale de la tête de la Presqu'île largement en dessous du niveau de la mer alors qu'elle est au dessus du niveau de la mer dans la partie orientale.

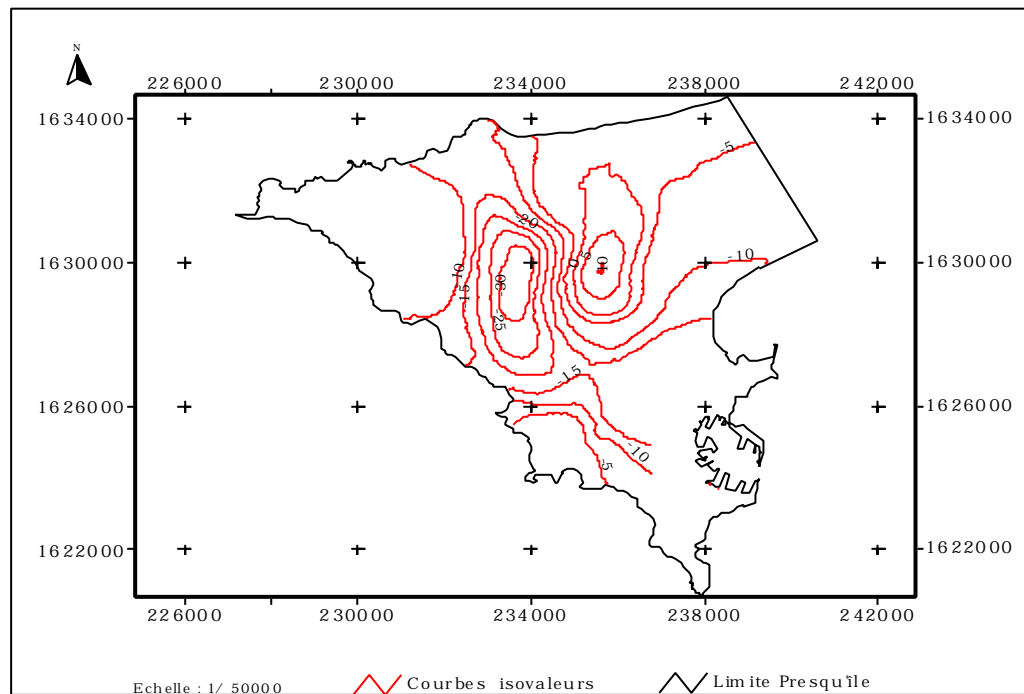


Figure 26 : Carte du toit de l'aquifère

6.2.2. Conditions aux limites

les conditions aux limites dont dépendent les relations d'échange de flux entre le domaine modélisé et l'extérieur, sont au niveau de la Presqu'île de deux sortes.

6.2.2.1. Potentiels imposés

Au Nord, à l'Ouest et au Sud-est un potentiel nul a été imposé car la nappe est en contact avec la mer.

Dans la partie Est de la nappe un potentiel différent de 0 a été imposé. Il correspond aux différentes valeurs des altitudes du niveau d'eau observées dans cette zone.

6.2.2.2. Flux imposés

un flux nul a été imposé au Sud de l'aquifère correspondant à une limite imperméable.

6.2.3. Discrétisation

Le maillage doit être assez fin pour que l'erreur de discrétisation (ou erreur numérique) due à la méthode par différences finies soit largement inférieure à l'incertitude (Bonnet, 1982). Un maillage régulier de 500m de coté a été adopté. Il comporte 546 mailles utiles au niveau desquels la charge piézométrique est calculée à chaque simulation.

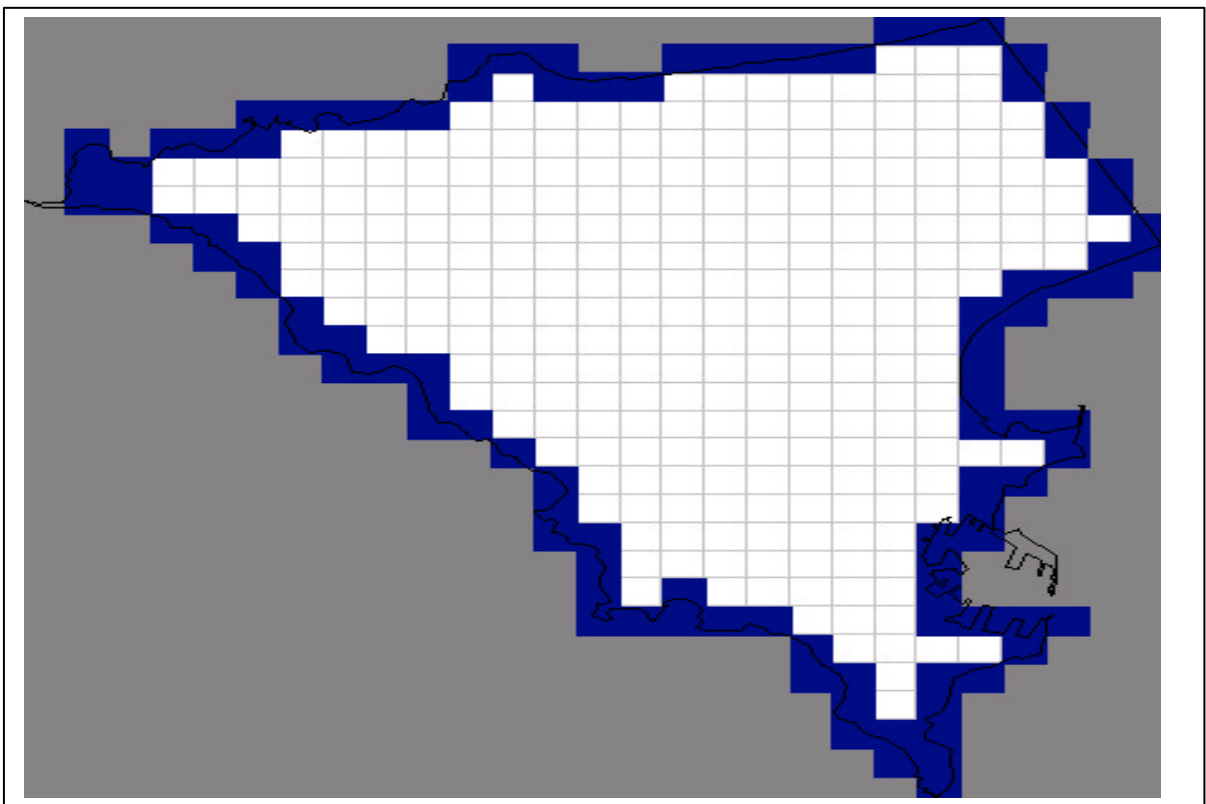


Figure 27 : Maillage et limite de la zone modélisée

6.2.4. Prélèvements

La nappe des sables infrabasaltiques est captée par 8 forages avec des débits journaliers variant de 971,70 à 3460,92 m³/j. Les débits prélevés par ces forages ont été pris en compte dans la simulation.

6.2.5. Paramètres hydrodynamiques

les valeurs initiales de perméabilités et de transmissivités et de coefficients d'emmagasinement initialement introduites ont été plusieurs fois modifiées au cours du calage en régime permanent. A partir des valeurs de perméabilités prises dans la littérature on a essayé de calculé les valeurs de la transmissivité en fonction de l'épaisseur à partir de Arc View.

Le coefficient d'emmagasinement a été fixé à 0,15 à l'Est et à 0,015 à l'Ouest. Les transmissivités varient de $2 \cdot 10^{-3}$ à $1 \cdot 10^{-2}$ et les perméabilité de $1 \cdot 10^{-4}$ à $0,72 \cdot 10^{-4}$.

6.2.6. Recharge

La recharge est le paramètre qui présente le plus d'incertitude comparée aux autres données d'entrée du modèle. C'est un paramètre ajustable donc permettant d'optimiser le modèle. La recharge calculée avec le bilan hydrique d'Albrecht a été prise comme valeur initiale (40 mm/an). Cette valeur a été modifiée plusieurs fois sans nous donner une piézométrie proche de l'état de référence. Les valeurs de recharge obtenues à partir de la méthode géochimique (Cissé 1993) ont donné une piézométrie proche de la réalité. Ces valeurs varient de 2.42 mm/an à l'Ouest à 15.81 mm/an à l'Est.

6.3. Validation du modèle en régime permanent

La piézométrie de la nappe à partir des années 1980 montre une baisse de faible amplitude. Le niveau étant relativement stable avec le creux qui est observé à dans la zone de Front de Terre le régime permanent est calibré avec les données piézométriques de juillet 2004 où nous avons les débits journaliers de tous les forages.

La validation se fait en comparant la piézométrie observée sur le terrain et celle calculée par le modèle. La surface piézométrique est bien restituée par la piézométrie calculée. Le creux piézométrique est bien reproduit.

Le calage en régime permanent nous a donné le bilan hydrique de la nappe.

	Débits		
	Entrées	Sorties	Entrées - Sorties
Emmagasinement	0	0	0
Apport aux limites	20309	6342	13967
Forages	0	18085	-18085
Recharge	5121	0	5125
Total	25430	25427	3

Le bilan montre un équilibre entre les débits d'entrée et les débits de sortie. L'alimentation de la nappe se fait essentiellement de manière latérale à partir des eaux de la nappe libre de Thiaroye. Un débit de 6341 s'écoule vers la mer qui est l'exutoire naturel. Cependant ce débit est compensé par un débit entrant à partir des mailles à potentiel 0 c'est à dire à partir de la mer.