

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP  
ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

GC.180

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

**Sujet : *Modèle de simulation des phénomènes  
d'intrusion saline***

**AUTEUR : BABACAR DIOUF**

**DIRECTEUR DE PROJET : AMADOU SARR**

JUIN 1995

## REMERCIEMENTS

Nous remercions tous les agents du bureau d'étude, et du service de la documentation du ministère de l'hydraulique, qui se sont montrés très disponibles à notre endroit.

Nous remercions très sincèrement tous ceux qui ont aidé à faire ce travail.

Merci à tous!

## SOMMAIRE

Ce projet de fin d'études porte sur la simulation de l'écoulement et des conditions d'équilibre de l'interface avec l'eau salée au niveau de la nappe du Littoral Nord entre Kayar et Saint Louis.

Le rapport comprend quatre grandes parties :

- dans la première, nous présentons un rappel des modèles mathématiques des différents types d'écoulements et la définition des paramètres qui interviennent dans ceux-ci;
- la deuxième partie traite des modèles numériques d'écoulement avec une présentation de la méthode des différences finies, suivie d'un exemple résolu;
- la troisième partie présente une synthèse de toutes les données géologiques, hydrogéologiques, les paramètres hydrodynamiques, les prélèvements sur la nappe, et l'évaluation des besoins futurs;
- la quatrième partie enfin donne la modélisation hydrodynamique et la simulation des effets de l'exploitation.

Nous dégagerons par la suite toutes les conséquences futures et les risques de salinisation dans certaines zones du Littoral.

Ce travail utilise les données collectées par le BRGM dans le

cadre de l'étude portant réévaluation des ressources en eau du Littoral Nord. Cette étude effectuée en 1992 comportait aussi la simulation de l'écoulement

## TABLE DES MATIERES

Remerciements.....	i
Sommaire.....	ii
Table des matières.....	iv
Liste des tableaux.....	v
Liste des figures.....	vi
Introduction.....	1
Chapitre 1 MODELES MATHEMATIQUES DES ECOULEMENTS	
1.1 Loi de Darcy.....	3
1.2 Equation de la continuité.....	4
1.3 Nappe confinée.....	4
1.4 Nappe phréatique.....	5
1.5 Ecoulement à travers une couche semi-perméable.....	8
1.6 Ecoulement plan vertical .....	10
1.7 Interface eau douce-eau salée.....	12
Chapitre 2 MODELES NUMERIQUES DES ECOULEMENTS	
2.1 Méthodes des différences finies.....	16
2.2 Exemple.....	18
Chapitre 3 SYNTHESSES DES DONNEES	
3.1 Introduction.....	24
3.2 Géologie et hydrogéologie de la zone.....	24
3.3 Données hydrogéologiques.....	29
3.4 Prélèvements.....	33
3.5 Besoins futurs.....	40
3.6 Conditions aux limites.....	40

**TABLE DES MATIERES** (Suite)

Chapitre 4 MODELISATION HYDRODYNAMIQUE

4.1 Evolution de la nappe .....40

4.2 Equation de la continuité.....44

4.3 Nappe confinée.....45

Conclusion .....49

Annexe

Bibliographie

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Nappe confinée.....
Figure 1.2	Nappe phréatique.....
Figure 1.3	Ecoulement à travers une couche semi-perméable..
Figure 1.4	Ecoulement plan vertical.....
Figure 1.5	Interface eau douce - eau salée.....
Figure 2.1	Discrétisation du domaine d'étude.....
Figure 3.1	Localisation de la zone à modéliser.....
Figure 3.2	Coupes géologiques.....

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Caractéristiques hydrodynamiques.....
Tableau 3.2	Mesures piézométriques du Littoral Nord.....
Tableau 3.3	Prélèvements urbains.....
Tableau 3.4	Prélèvements sur les forages de la DEM.....
Tableau 3.5	Débits prélevés au niveau des villages.....
Tableau 4.1	Données pluviométriques.....
Tableau 4.2	Moyennes décadaires des évapotranspirations....

## INTRODUCTION

L'eau est essentielle à toute vie, et doit donc être mise à la disposition des populations, en quantité suffisante et en qualité. Cependant sur un volume d'eau total de 1,39 milliard de kilomètres cubes (km<sup>3</sup>) on compte seulement 40 millions de km<sup>3</sup> d'eau douce , c'est à dire un peu moins de 3%. Sur ce volume d'eau douce les eaux souterraines représentent les deux tiers.

Les pays des zones sahélienne et saharienne enregistrent très peu de pluies. Ce déficit est à l'origine de l'assèchement d'une grande partie des cours d'eau. De plus, l'exploitation des eaux de surface lorsqu'elles existent, nécessite l'implantation d'infrastructures onéreuses telles que les barrages, et ces eaux sont exposées à tous les agents polluants.

Au Sénégal ,pays sahélien, on compte 66% de la population qui est agricole. La principale source d'eau potable exploitée est constituée par les nappes d'eaux souterraines. Le traitement des eaux de surface pour leur utilisation dans l'alimentation revient très cher.

Les eaux souterraines sont la plupart du temps, presque immédiatement utilisables du fait de la filtration naturelle, et

elles peuvent être disponibles en toute saison. Toutefois, elles sont parfois sujettes à la pollution bactériologique (dépôt d'ordures, engrais, insecticide etc.) ou chimique (aires de stockage des produits chimiques non étanches).

La recharge de ces nappes est cependant très lente, ce qui les expose au risque d'intrusion de l'eau salée.

Nous essaierons dans cette étude de voir les risques d'intrusion saline au niveau du littoral nord entre Kayar et Saint-Louis, à partir d'une simulation de l'écoulement prenant en compte les prélèvements et apports au niveau de l'aquifère étudié.

## CHAPITRE 1   MODELES MATHEMATIQUES DES ECOULEMENTS

### 1.1 LOI DE DARCY

Pour un fluide compressible, la hauteur piézométrique est donnée par :

$$h(x, y, z, t) = \int_{P_0}^P \frac{dP}{\gamma(x, y, z, t)} + z \quad (1.1)$$

Cette expression peut s'écrire pour un fluide incompressible :

$$h = P(x, y, z, t) / \gamma + z \quad (1.2)$$

La loi de Darcy (empirique) donne la relation :

$$V = -K \nabla h \quad (1.3)$$

où

$$K = Cd^2\gamma/\mu = k\rho g/\mu \quad (1.4)$$

$$V = k/\mu(\nabla P + \rho g \nabla z) \quad (1.5)$$

V : Vitesse par unité de surface (vitesse de Darcy) ; vitesse fictive du fluide (m<sup>3</sup>/s m<sup>2</sup>)

k(cm<sup>2</sup>) : "perméabilité intrinsèque"

$$k = Cd^2 \quad (1.6)$$

C est une constante dont la valeur varie entre :

$$45 \text{ (sol argileux)} < C < 140 \text{ (sable)}$$

d(cm) : diamètre efficace des grains

$\mu$  : Viscosité dynamique du fluide

$\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) : masse volumique du fluide

$g$  : accélération de la pesanteur

$z$  : élévation

$P$  : pression statique

## II EQUATION DE LA CONTINUITÉ

$$[\nabla \cdot \rho \mathbf{V} + \delta \rho n / \delta t] = 0 \quad (1.7)$$

fluide homogène dans un volume fixe

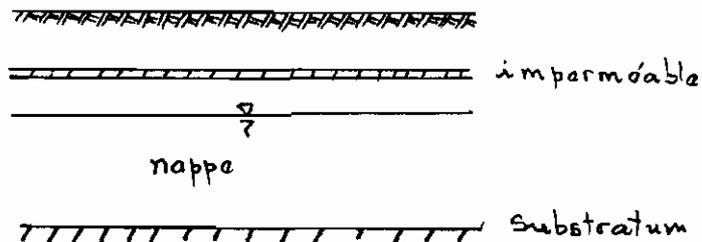
$n$  : porosité moyenne du milieu

$\rho$  : masse volumique moyenne

$V$  : vitesse fictive moyenne

Cette équation exprime la conservation de la matière au sein d'un volume fermé. On y ajoute généralement le terme de prélèvement ou d'injection.

### 1.3 NAPPE CONFINÉE



**Figure 1.1** : Nappe confinée

Les nappes confinées sont limitées au niveau supérieur et inférieur par des terrains imperméables. La surface de cette nappe est à une pression supérieure à la pression atmosphérique. L'équation de cet écoulement est donnée par :

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_{xx} \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_{yy} \frac{\partial \phi}{\partial y}) + q(b) = s \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1.8)$$

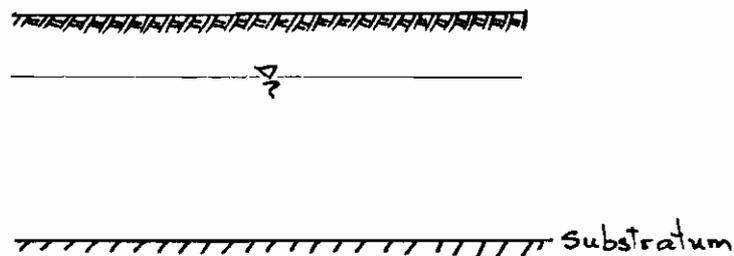
$q(b)$  est la décharge ou la recharge verticale.

Si le milieu est homogène et isotrope, l'équation devient :

$$T \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) = s \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1.9)$$

où  $\phi$  représente le niveau piézométrique.

#### 1.4 NAPPE PHREATIQUE



**Figure 1.2** : Nappe phréatique

La limite supérieure d'une telle nappe est à la pression atmosphérique.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ K_{xx} \frac{\partial h^2}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_{yy} \frac{\partial h^2}{\partial y} \right] + 2R = 2S \frac{\partial h^2}{\partial t} \quad (1.10)$$

$$\nabla \cdot K \nabla h^2 + 2R = 2S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( Kh \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( Kh \frac{\partial h}{\partial y} \right) &= S \frac{\partial h}{\partial t} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) &= 2S \frac{\partial h}{\partial t} \end{aligned} \quad (1.12)$$

R : recharge nette

T : transmissivité (T = Kb)

K : conductivité hydraulique

b : épaisseur de la nappe confinée

$\phi$  : niveau piézométrique

h : hauteur piézométrique

S : coefficient d'emmagasinement spécifique

Conditions aux limites :

Conditions de potentiel imposé :  $h = h(p)$  sur C.

Conditions de flux imposé :  $\partial h / \partial n = q = 0$ .

## **DEFINITIONS DES PARAMETRES**

Perméabilité : notée K (m/s) est aussi appelée conductivité hydraulique. C'est la propriété qui caractérise l'aptitude du matériau aquifère à transmettre l'eau sous pression. K représente le volume d'eau gravifique qui percole pendant l'unité de temps à travers la surface d'une section de terrain sous un gradient hydraulique égal à l'unité, à la température de 20 °C. Elle est obtenue grâce à la formule :

$$K = Q / (Sit)$$

Q : volume débité

S : surface section transversale traversée par le courant

i : gradient hydraulique

t : temps d'écoulement.

### Ordre de grandeur

K > 10 cm/s      roches très perméables

$10^{-4} < K < 10$       "      perméables

$10^{-7} < K < 10^{-4}$       "      peu perméables

K <  $10^{-7}$  cm/s      "      imperméables

Gradient hydraulique : perte de charge par unité de longueur.

Transmissivité :  $T = Kb$  où b désigne l'épaisseur de la nappe.

Coefficient d'emmagasinement S : C'est le volume d'eau pouvant être libéré par un prisme vertical de matériau aquifère de section égale à l'unité, pour une baisse unité du niveau piézométrique ou de charge. S est déterminé à partir d'essai de pompage.

Ordre de grandeur :

Nappe libre

10 à 20% alluvions et sable de dunes

30 à 40% formations très grossières dépourvues d'argile

1 à 5% limons

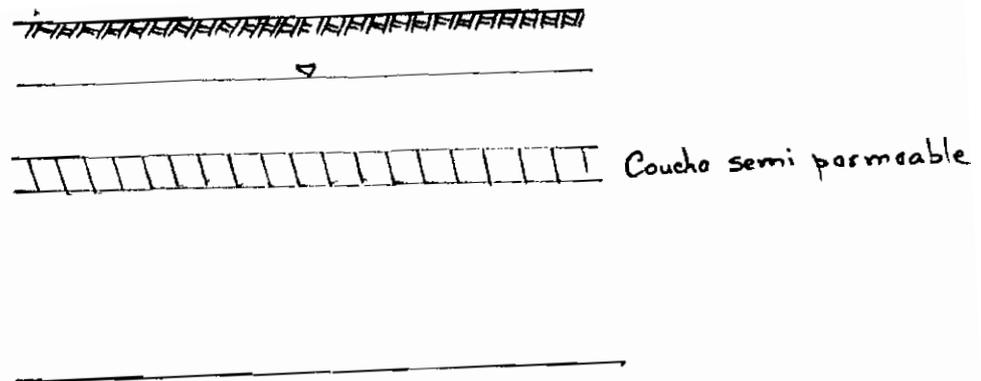
Nappe captive:  $10^{-3}$  à  $10^{-6}$

Porosité efficace C'est le rapport du volume d'eau gravifique au volume d'eau totale de la roche V.

### **1.5 ECOULEMENT A TRAVERS UNE COUCHE SEMI-PERMEABLE**

Nappe phréatique ,nappe confinée séparées par une couche semi-perméable.

$$\frac{\partial}{\partial x} [K_x (h-\eta) \frac{\partial h}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [K_y (h-\eta) \frac{\partial h}{\partial y}] + Q + \frac{K'_2}{b'_2} (h_b - h) = n_e \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1.13)$$



**Figure 1.3** : Ecoulement à travers une couche semi-perméable

$b'$  : épaisseur de la couche semi-perméable

$h$  : profondeur moyenne du niveau piézométrique

$h_b$  : niveau piézométrique moyen dans la nappe située en dessous de la nappe considérée

$K$  : conductivité hydraulique

$K'$  : conductivité hydraulique équivalente de la couche semi-perméable située en dessous

$n_e$  : porosité effective

$Q$  : flux vertical

$\eta$  : élévation du fond

## 1.6 ECOULEMENT PLAN VERTICAL AVEC CONTACT AVEC UN COURS D'EAU ET

### POMPAGE

L'équation de l'écoulement est donnée par:

$$\frac{\partial}{\partial x} [K(h-\eta) \frac{\partial h}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [K(h-\eta) \frac{\partial h}{\partial y}] + N(x, y, t) - P(x, y, t) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1.14)$$

Après quelques simplifications (Voir p.122 BEAR) on aboutit à la formulation suivante:

$$\frac{\partial}{\partial x} (T \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T \frac{\partial h}{\partial y}) + N(x, y, t) - P(x, y, t) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1.15)$$

Conditions initiales:

$h = f(x, y, t_0)$   $f$  connue pour tous les points du domaine considéré.

Conditions aux limites:

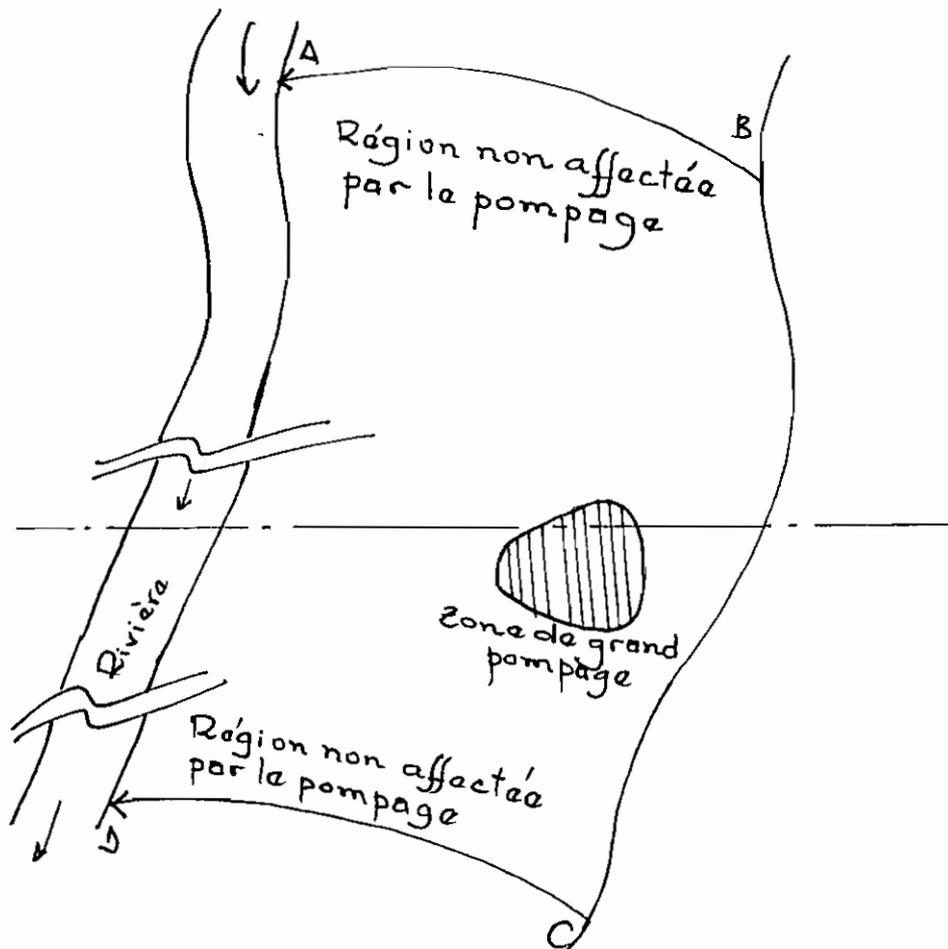
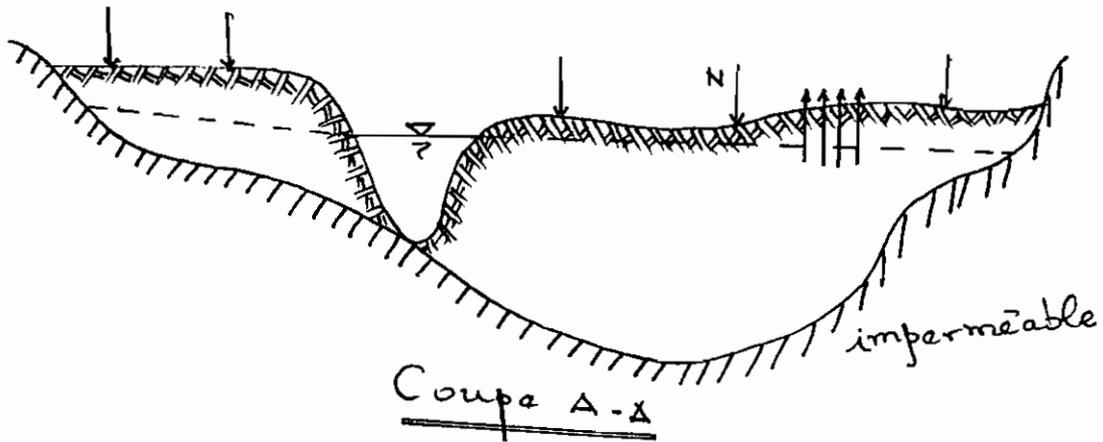
-  $h$  constante le long de AD

( Si la pente est forte  $h = f(x, y)$  le long de AD )

- Les lignes AB et CD agissent comme des frontières imperméables

$\partial h / \partial n = 0$  sur AB, BC, CD

Fig 1.4 Ecoulement plan vertical avec contact  
avec un cours d'eau et pompage



## 1.7 INTERFACE EAU DOUCE - EAU SALEE

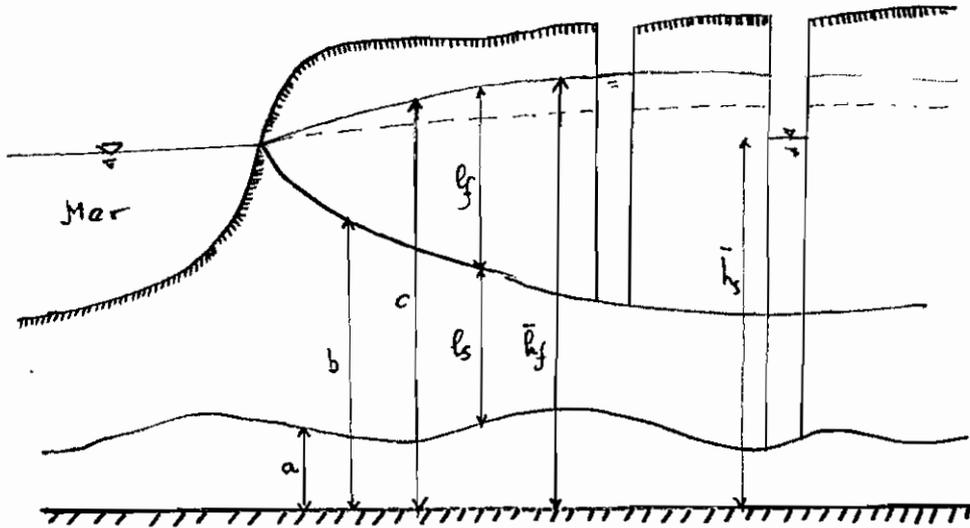


Fig 1.5: Interface eau douce - eau salée

$$\begin{aligned}
 & -\frac{\partial}{\partial x_i} (l_f K_{r1j} \frac{\partial \bar{h}_f}{\partial x_j}) + [V_{r3} - S_y V_3^*] - [V_{r1} - S_y V_1^*]_c \frac{\partial c}{\partial x_1} \\
 & + [V_{r1} \frac{\partial b}{\partial x_1} - V_{r3}]_b + (S_{rs} l_r + S_y) \frac{\partial \bar{h}_f}{\partial t} = 0 \quad 1, j = 1, 2
 \end{aligned}
 \tag{1.15}$$

$$K_{r1j} = k_{1j} \rho_g g / \mu_f$$

$$\bar{h}_f = \frac{1}{l_f} \int_b^c h_f dx_3$$

$$l_r = c - b = \bar{h}_f - b$$

$S_s$  : coefficient d'emmagasinement spécifique

$S = S_s l$  : coefficient d'emmagasinement

- exposant \* pour montrer que c'est à la surface libre.
- indice f pour eau douce
- indice 3 pour sens vertical

Conditions à l'interface (2)

$$\left[ \frac{\partial}{\partial t} (x_3 - b) + v_\alpha^0 \frac{\partial}{\partial x_\alpha} (x_3 - b) \right]_{x_3=b} = \left[ -\frac{\partial b}{\partial t} - v_i^0 \frac{\partial b}{\partial x_i} + v_3^0 \right]_{x_3=b} \quad (1.16)$$

$$\alpha = 1, 2, 3 \quad i = 1, 2$$

L'exposant 0 est mis pour montrer que c'est à l'interface.

Si on multiplie l'équation (1.16) par  $\phi$  on obtient (1.17):

$$\left[ -\phi \frac{\partial b}{\partial t} - \phi v_i^0 \frac{\partial b}{\partial x_i} + \phi v_3^0 \right]_{x_3=b} = 0 \quad (1.17)$$

L'addition de (1.17) à (1.15) donne :

$$-\frac{\partial}{\partial x_i} (l_f K_{fij} \frac{\partial \bar{h}_f}{\partial x_j}) - q_{fc} + q_{fb} + (s_{fs} l_f + s_y) \frac{\partial \bar{h}_f}{\partial t} - \phi \frac{\partial b}{\partial t} = 0 \quad i, j = 1, 2 \quad (1.18)$$

$$q_{fc} = [v_{fi} - s_y v_{fi}^*]_c \frac{\partial c}{\partial x_i} - [v_{fb} - s_y v_{fb}^*]_c \quad i, j = 1, 2 \quad (1.19)$$

$$q_{fb} = [v_{fi} - \phi v_i^0]_b \frac{\partial b}{\partial x_i} - (v_{f3} - \phi v_3^0) \quad i, j = 1, 2$$

$q_{fb}$  est normalement égal à 0 car l'eau douce ne traverse pas l'interface. De manière analogue on obtient pour l'eau salée :

$$-\frac{\partial}{\partial x_i} (I_s K_{sij} \frac{\partial \bar{h}_s}{\partial x_j}) - q_{sb} + q_{sa} + S_{s,s} I_s \frac{\partial \bar{h}_s}{\partial t} + \phi \frac{\partial b}{\partial t} = 0 \quad (1.20)$$

avec

$$q_{sb} = (V_{si} - \phi V_i^0)_b \frac{\partial b}{\partial x_i} - [V_{s3} - \phi V_3^0]_b \quad (1.21)$$

$$q_{sa} = [V_{si} \frac{\partial a}{\partial x_i} - V_{sb}]_a$$

$$K_{sij} = k_{ij} \rho_s g / \mu_s \quad (1.22)$$

$$h_s = \frac{1}{I_s} \int_a^b h_s dx_3$$

$$I_s = b - a$$

Une autre condition est offerte par l'égalité des pressions à l'interface:

$$p_s|_b - p_f|_b = 0$$

$$p_f|_b = \rho_f g (h_f|_b - b) \approx \rho_f g (h_f - b)$$

$$p_s|_b = \rho_s g (h_s - b)$$

$$\rightarrow \rho_f g (h_f - b) = \rho_s g (h_s - b) \quad (1.23)$$

On sort b :

$$b = \frac{\rho_s \overline{h_s} - \rho_f \overline{h_f}}{\rho_s - \rho_f} \quad (1.24)$$

On définit les paramètres adimensionnels

$$\rho_s^* = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_f} \quad \rho_f^* = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \quad (1.25)$$

Si on remplace  $(\partial b / \partial c)$  dans les équations (1.18) et (1.20)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} (l_r K_{rij} \frac{\partial \overline{h_f}}{\partial x_j}) + q_{rc} - (l_r S_{rs} + S_y + \phi \rho_f^*) \frac{\partial \overline{h_f}}{\partial t} + \phi \rho_s^* \frac{\partial \overline{h_s}}{\partial t} \\ \frac{\partial}{\partial x_i} (l_s K_{sij} \frac{\partial \overline{h_s}}{\partial x_j}) - q_{sa} + q_{sb} - (S_{ss} l_s + \phi \rho_s^*) \frac{\partial \overline{h_s}}{\partial t} + \phi \rho_f^* \frac{\partial \overline{h_f}}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (1.26)$$

## CHAPITRE II    MODELES NUMERIQUES DES ECOULEMENTS

Nous présenterons deux méthodes de calculs : la méthode des différences finies et celle des éléments finis en illustrant à chaque fois avec des exemples résolus.

### I METHODE DES DIFFERENCES FINIES

Le développement par les séries de Taylor donne :

$$\begin{aligned}\phi(x+\Delta x) &= \phi(x) + \frac{\partial\phi}{\partial x}\Big|_x \Delta x + \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}\Big|_x \frac{\Delta x^2}{2!} + \frac{\partial^3\phi}{\partial x^3}\Big|_x \frac{\Delta x^3}{3!} + \dots \\ \phi(x-\Delta x) &= \phi(x) - \frac{\partial\phi}{\partial x}\Big|_x \Delta x + \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}\Big|_x \frac{\Delta x^2}{2!} - \frac{\partial^3\phi}{\partial x^3}\Big|_x \frac{\Delta x^3}{3!} + \dots\end{aligned}\tag{2.1}$$

En réarrangeant ces deux équations on obtient les formules de dérivation avant et arrière

$$\begin{aligned}\frac{\partial\phi}{\partial x}\Big|_x &= \frac{\phi(x+\Delta x) - \phi(x)}{\Delta x} - \frac{\Delta x}{2!} \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}\Big|_x - \frac{\Delta x^3}{3!} \frac{\partial^3\phi}{\partial x^3}\Big|_x + \dots \\ \frac{\partial\phi}{\partial x}\Big|_x &= \frac{\phi(x) - \phi(x-\Delta x)}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{2!} \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}\Big|_x - \frac{\Delta x^3}{3!} \frac{\partial^3\phi}{\partial x^3}\Big|_x + \dots\end{aligned}\tag{2.2}$$

On peut prendre les valeurs approximatives :

$$\begin{aligned}\frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_x & \approx \frac{\phi(x+\Delta x) - \phi(x)}{\Delta x} \\ \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_x & \approx \frac{\phi(x) - \phi(x-\Delta x)}{\Delta x}\end{aligned}\tag{2.3}$$

L'erreur de troncature s'élève à :

$$\bar{E} = \pm \frac{\Delta x}{2!} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \Big|_{\xi} = O(\Delta x), \quad \begin{array}{l} x \leq \xi \leq x + \Delta x \\ x - \Delta x \leq \xi \leq x \end{array}\tag{2.4}$$

En faisant la différence des deux premières équations, on sort une nouvelle formulation de la dérivée première :

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_x \approx \frac{\phi(x+\Delta x) - \phi(x-\Delta x)}{2\Delta x}\tag{2.5}$$

l'erreur de troncature devient alors :

$$\bar{E} = -\frac{\Delta x^2}{3!} \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \Big|_{\xi} = O(\Delta x^2) \quad x - \Delta x \leq \xi \leq x + \Delta x\tag{2.6}$$

Cette erreur qui est un  $o(\Delta x^2)$  est plus faible que celle des deux premières formulations. La valeur calculée est plus exacte, nous utiliserons cette dernière approximation pour tous les calculs ultérieurs.

Pour la dérivée seconde, l'approximation est donnée par la formule:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \Big|_x \approx \frac{\phi(x+\Delta x) - 2\phi(x) + \phi(x-\Delta x)}{\Delta x^2}\tag{2.7}$$

et l'erreur de troncature s'obtient :

$$\bar{E} = \frac{\Delta x^2}{12} \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} \Big|_{\xi} = O(\Delta x^2) , \quad x - \Delta x \leq \xi \leq x + \Delta x \quad (2.8)$$

**EXEMPLE : NAPPE SEMI-CONFINÉE, HOMOGENE, ANISOTROPE**

Le modèle mathématique de cet écoulement est :

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{K_a (H_a - h)}{m_a} \pm \sum_{w \in \Omega} Q_w \delta(x - x_w, y - y_w) = S \frac{\delta h}{\delta t}$$

$i = 1, \dots, m$  et  $j = 1, \dots, n$

L'approximation en différences finies est donnée par :

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta x^2} \{ T_{xx}^{i+1/2, j} (h_{i+1, j} - h_{i, j}) - T_{xx}^{i-1/2, j} (h_{i, j} - h_{i-1, j}) \} \\ & + \frac{1}{\Delta y^2} \{ T_{yy}^{i, j+1/2} (h_{i, j+1} - h_{i, j}) - T_{yy}^{i, j-1/2} (h_{i, j} - h_{i, j-1}) \} \\ & \pm \frac{Q_{w, i, j}}{\Delta x, \Delta y} + \frac{K_{a, i, j} (H_{a, i, j} - h_{i, j})}{m_a} = S_{i, j} \dot{h}_{i, j} \end{aligned}$$

Le terme de la transmissivité peut être évalué au milieu de l'élément par la moyenne harmonique :

$$T^{i+1/2, j} = \frac{2 T^{i+1, j} \cdot T^{i, j}}{T^{i+1, j} + T^{i, j}}$$

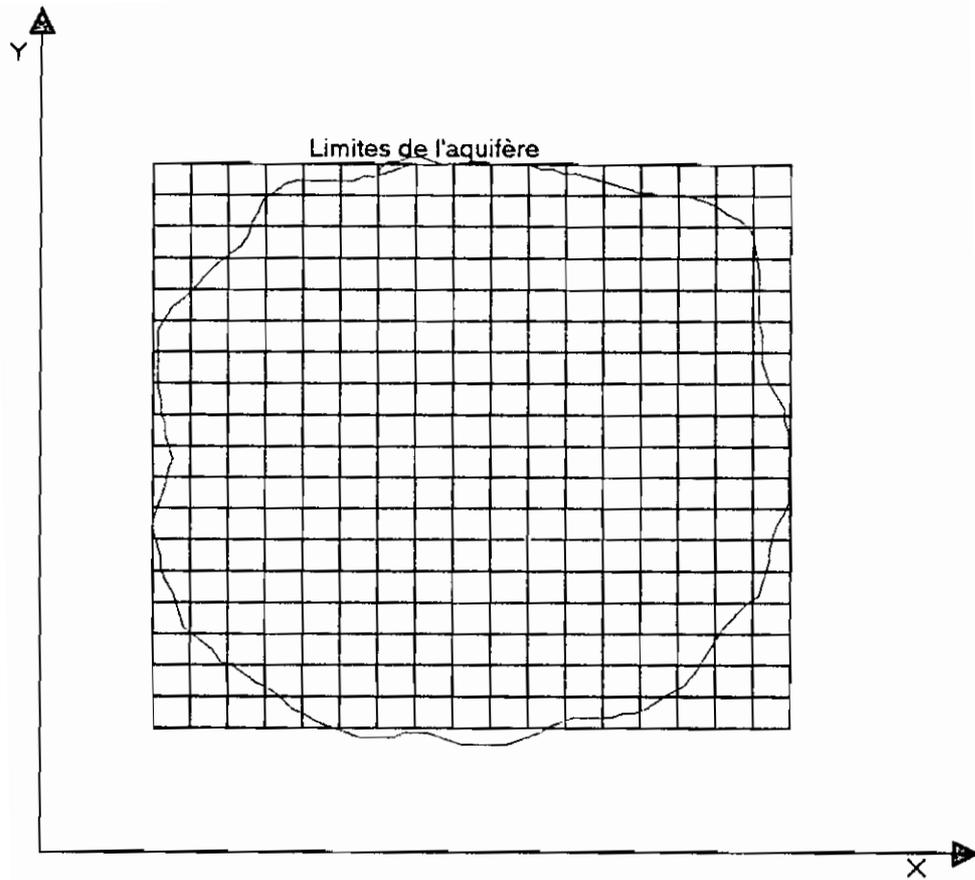


Figure 2.1 : Discrétisation du domaine d'étude

L'erreur de troncature pour cette approximation est d'ordre 2 et son expression est :

$$\bar{E} = \pm \frac{\Delta x^2}{3!} \left. \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \right|_{\xi} = O(\Delta x^2) , \quad x - \Delta x \leq \xi \leq x + \Delta x$$

Les conditions aux limites seront aussi exprimées en différences finies.

Conditions de potentiel imposé :

$$\begin{aligned} h_{i,j} &= \bar{h} \\ \frac{h_{i,j} - h_{i-1,j}}{\Delta x} &= 0 \\ \frac{h_{i,j} - h_{i,j-1}}{\Delta y} &= 0 \end{aligned}$$

On écrit l'équation 2.2 pour tous les noeuds du système, c'est à dire,  $i, j \in \Gamma$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, n$ . Le système d'équations linéaires qui en résulte peut être écrit sous forme matricielle :

$$\begin{aligned} Ah + Bh + g &= 0 \\ h(0) &= h_0 \end{aligned}$$

Dans ce système d'équations, les niveaux piézométriques sont représentés par un vecteur colonne  $h$

$$h = (h_{11} \dots h_{1m} \dots h_{n1} \dots h_{nm})^T$$

Les matrices A et B dépendent du type d'écoulement et des paramètres d'emmagasinement.

On peut combiner les indices i et j pour avoir une seule variable l donnée par :

$l = m(j-1) + i$  avec m représentant le nombre de lignes.

La matrice A est une matrice diagonale dont les éléments sont donnés par:

$$A_{l,l} = S_l, \quad l=1, \dots, mn$$

$$g_l = \pm \frac{Q_l}{\Delta x \Delta y} + \frac{K_l H_l}{m_l}$$

On réécrit la formule E1 avec la valeur de transmissivité données par la moyenne harmonique.

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{\Delta x^2} \left\{ \frac{2 T_{xx}^{i+1,j} \cdot T_{xx}^{i,j}}{T_{xx}^{i+1,j} + T_{xx}^{i,j}} (h_{i+1,j} - h_{i,j}) - \frac{2 T_{xx}^{i-1,j} \cdot T_{xx}^{i,j}}{T_{xx}^{i-1,j} + T_{xx}^{i,j}} (h_{i,j} - h_{i-1,j}) \right\} \\
& + \frac{1}{\Delta y^2} \left\{ \frac{2 T_{yy}^{i,j+1} \cdot T_{yy}^{i,j}}{T_{yy}^{i,j+1} + T_{yy}^{i,j}} (h_{i,j+1} - h_{i,j}) - \frac{2 T_{yy}^{i,j-1} \cdot T_{yy}^{i,j}}{T_{yy}^{i,j-1} + T_{yy}^{i,j}} (h_{i,j} - h_{i,j-1}) \right\} \\
& \pm \frac{Q_{w,i,j}}{\Delta x, \Delta y} + \frac{\kappa_{a,i,j} (H_{a,i,j} - h_{i,j})}{m_a} = S_{i,j} \dot{h}_{i,j}
\end{aligned}$$

On a après le changement d'indice

$$l = m(j-1) + i$$

$$l = mj - m + i$$

$$\rightarrow h_{i,j} = H_l$$

$$h_{i+1,j} = H_{m(j-1)+i+1} = H_{l+1}$$

$$h_{i-1,j} = H_{m(j-1)+i-1} = H_{l-1}$$

$$h_{i,j+1} = H_{mj+1} = H_{l+m}$$

$$h_{i,j-1} = H_{m(j-2)+i} = H_{l-m}$$

Les éléments de B peuvent s'obtenir à partir de l'équation E1 et des conditions aux limites.

$$\begin{aligned}
B_{1,1} &= -\frac{2 T_{xx}^{i+1} T_{xx}^i}{(T_{xx}^{i+1} + T_{xx}^i) \Delta x^2} - \frac{2 T_{xx}^i T_{xx}^{i-1}}{(T_{xx}^i + T_{xx}^{i-1}) \Delta x^2} \\
&\quad - \frac{2 T_{yy}^{i+1} T_{yy}^i}{(T_{yy}^{i+1} + T_{yy}^i) \Delta y^2} - \frac{2 T_{yy}^i T_{yy}^{i-1}}{(T_{yy}^i + T_{yy}^{i-1}) \Delta y^2} \\
B_{1,i+1} &= \frac{2 T_{xx}^i T_{xx}^{i+1}}{(T_{xx}^{i+1} + T_{xx}^i) \Delta x^2} \\
B_{1,i-1} &= \frac{2 T_{xx}^i T_{xx}^{i-1}}{(T_{xx}^i + T_{xx}^{i-1}) \Delta x^2} \\
B_{1,i+m} &= \frac{2 T_{yy}^{i+m} T_{yy}^i}{(T_{yy}^{i+m} + T_{yy}^i) \Delta y^2} \\
B_{1,i-m} &= \frac{2 T_{yy}^i T_{yy}^{i-m}}{(T_{yy}^i + T_{yy}^{i-m}) \Delta y^2}
\end{aligned}$$

## **CHAPITRE 3     SYNTHESE DES DONNEES**

### **3.1 INTRODUCTION**

La zone qui fait l'objet de cette étude est le Littoral Nord entre Kayar et Saint-Louis, les données utilisées pour procéder à la simulation de l'écoulement, ont été obtenues à partir d'enquêtes effectuées sur les lieux, par des techniciens du ministère de l'hydraulique en compagnie d'un autre du BRGM.

Pour les prélèvements aux autres années, on procède à des extrapolations, en gardant un taux identique à celui des vingt dernières années.

Les données concernent la géologie, l'hydrogéologie, les paramètres hydrodynamiques, les prélèvements sur la nappe, l'évaluation des besoins futurs et les conditions aux limites du modèle.

### **3.2 GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE DE LA ZONE**

#### **3.2.1 Géologie**

La zone d'étude localisée sur la figure 3.1, le "Littoral Nord", présente des systèmes de failles N25-27°, N0°, N65-72° et N140°, révélés par une étude de J Le Priol (Synthèse hydrogéologique du

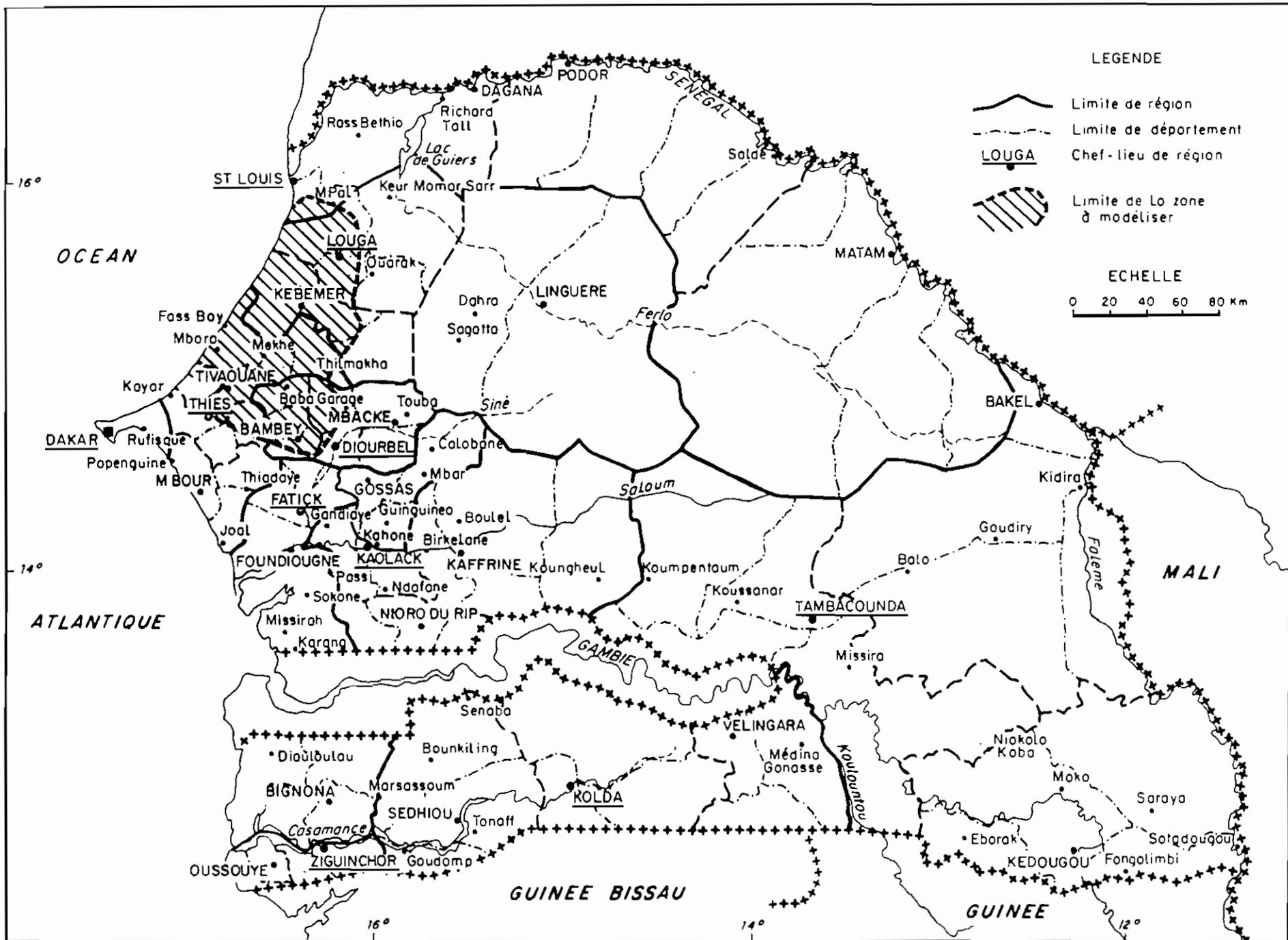
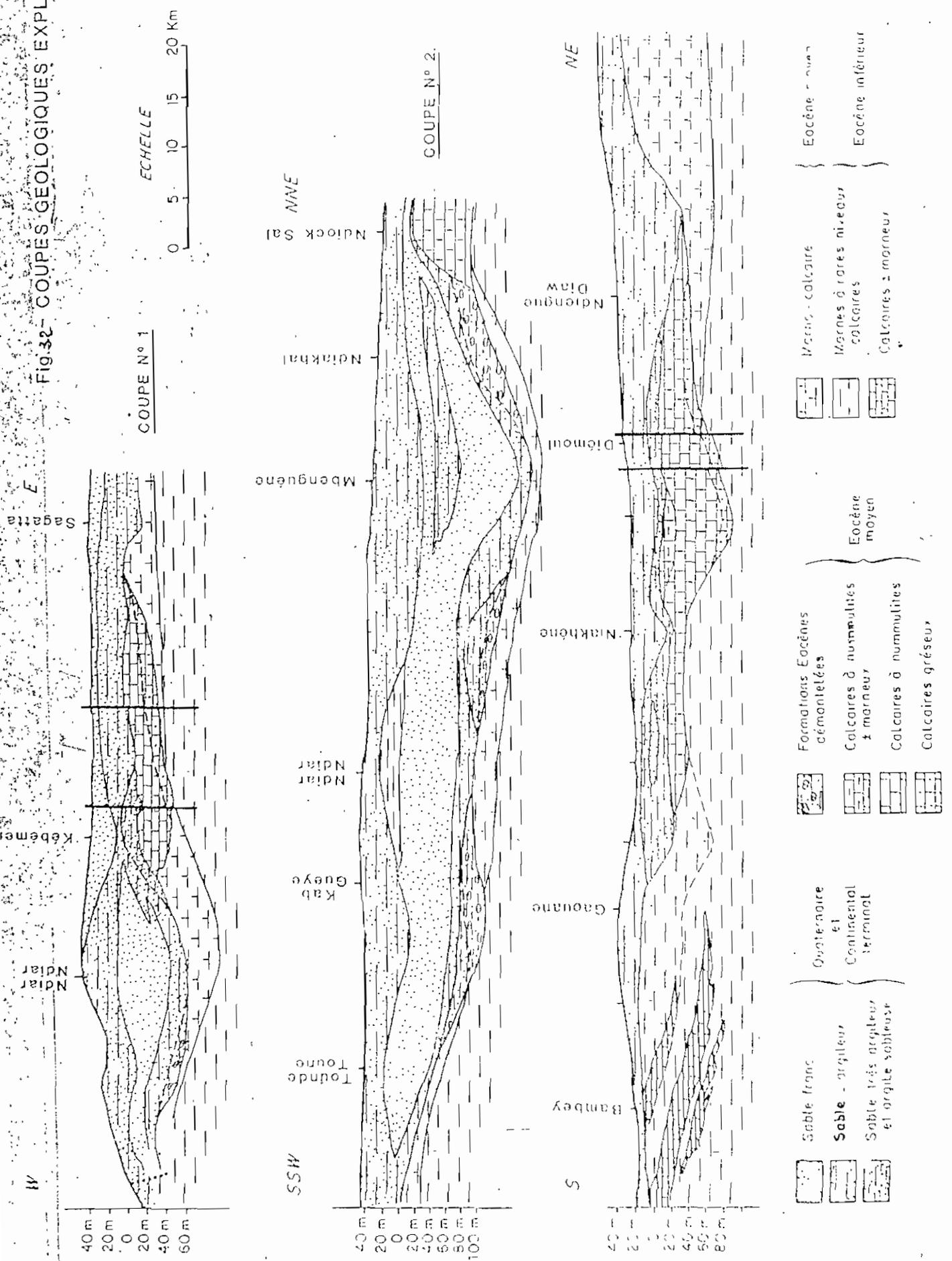


Fig. 31 - LOCALISATION DE LA ZONE A MODELISER

Fig. 32 - COUPES GEOLOGIQUES EXPLICATIVES



Source : Etude BRGM.

Sénégal 1984-1985). Ces failles ont engendré un affaissement du socle et entraîné des formations sédimentaires dans le Nord et le Nord Ouest. Ceci peut être observé sur la figure A1 en annexe A et les coupes réalisées sur la zone (figure 3.2).

On distingue dans le "Littoral nord" trois zones géologiques distinctes:

- un dépôt sableux du quaternaire reposant sur un substratum marneux à l'Ouest de la route Thiés - Saint-Louis et au dessus de la latitude de Méouane;
- des calcaires lutétiens à l'Est de la route Thiés - Saint-Louis;
- des marnes et formations marno-calcaires au Sud de la ligne Méouane-Baba Garage.

### **3.2.2 Hydrogéologie**

#### **3.2.2.1 L'aquifère**

La nappe du "Littoral Nord est contenue:

- dans les sables quaternaires à l'Ouest de la route Thiés Saint-Louis et Nord Méouane ;
- dans les calcaires karstifiés à l'Est.

#### **3.2.2.2 Caractéristiques hydrodynamiques**

Les valeurs sont issues de l'étude effectuée par le BRGM sur la

zone en 1974, complétée par les mesures de 1986, et les études de World Vision International.

Dans les sables quaternaires les valeurs de transmissivité notée T varient entre  $5.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  et  $8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  et celles de perméabilité (K) entre  $2.8 \text{ m/s} \cdot 10^{-5}$  et  $8.9 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ . On remarque que la perméabilité K est peu variable dans ces formations et la valeur moyenne est  $4.59 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ .

Dans les calcaires, les valeurs sont beaucoup plus variables. La transmissivité varie entre  $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  et  $2.9 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$  et la perméabilité entre  $2.5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  et  $7.4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ .

La nappe aussi bien dans les sables que dans les calcaires est libre et le milieu sera supposé isotrope.

### **3.2.2.3 Piézométrie de la nappe**

On considère la piézométrie de 1975 (voir figure A5) comme référence d'un état initial stable. On remarque :

- un bombement piézométrique dans la partie ouest. Le gradient très fort au sud de Méouane, diminue vers le nord. Tout à fait au nord le niveau piézométrique est proche de celui de la mer.
- une piézométrie plate au niveau des calcaires, du fait de la forte perméabilité
- un léger bombement piézométrique au nord de Sagata, dû à la remontée des marnes qui ne permet qu'un faible écoulement pour l'alimentation des calcaires.

- une dépression très poussée au sud-est de Sagatta.

### **3.3 DONNEES HYDROGEOLOGIQUES**

#### **3.3.1 Géométrie de l'aquifère**

La nappe est connue grâce aux travaux de l'OMS et du BRGM et au nord à partir des nombreux forages réalisés par l'organisation non gouvernementale World Vision International.

L'aquifère est limité à l'Ouest par l'océan, à l'Est par une remontée des calcaires, au Nord-Est par des sables, au Sud par les marnes calcaires.

#### **3.3.2 Paramètres hydrodynamiques**

Les valeurs de perméabilité, obtenues à partir d'essais de pompage du BRGM surtout, sont répertoriées dans le tableau 3.1.

Le tableau donne pour toutes les localités, les valeurs de perméabilité et la nature du terrain.

Tableau 3.1 : Caractéristiques hydrodynamiques du réservoir

Localisations	Perméabilités (m/s)	Nature du réservoir
Kaba Diack	$3 \cdot 10^{-3}$	Calcaires
Tawa Fall	$1.1 \cdot 10^{-3}$	"
Ndiaga Ndiaye	$6.5 \cdot 10^{-3}$	"
Lappel	$5 \cdot 10^{-5}$	"
Mbédienne	$1 \cdot 10^{-4}$	"
Guéoul	$2 \cdot 10^{-3}$	"
Ndiengue Diaw	$2.9 \cdot 10^{-3}$	"
Battel	$2.5 \cdot 10^{-6}$	"
Diémoul	$6.4 \cdot 10^{-3}$	"
Tétiour	$2 \cdot 10^{-5}$	"
Ngalick	$1.8 \cdot 10^{-3}$	"
Tiekève	$3.6 \cdot 10^{-4}$	"
War Cissé	$2 \cdot 10^{-4}$	"
Bangoye	$1.2 \cdot 10^{-3}$	"
Ndate Fall	$8.9 \cdot 10^{-4}$	"
Ndougour	$1.4 \cdot 10^{-4}$	"
Palméo	$5 \cdot 10^{-4}$	"
Médina Dakhar	$1.6 \cdot 10^{-3}$	"
Niakhène	$2.7 \cdot 10^{-3}$	"
Dangalma	$5.7 \cdot 10^{-4}$	"
Baba Garage	$3.3 \cdot 10^{-4}$	"

Tableau 3.1 : Caractéristiques hydrodynamiques (suite)

Localisations	Perméabilités (m/s)	Nature du réservoir
Louga	$5.9 \cdot 10^{-4}$	Calcaire
Kébémér	$5.7 \cdot 10^{-4}$	"
Pékess	$3.3 \cdot 10^{-4}$	"
Kab Gaye	$5.9 \cdot 10^{-4}$	Sable
Ndiar Ndiar	$8.5 \cdot 10^{-4}$	"
Tounde Diop	$6.4 \cdot 10^{-4}$	"
Toundou Tioune	$6 \cdot 10^{-4}$	"
Mbenguène	$2.4 \cdot 10^{-4}$	"
Darou Diop	$2.5 \cdot 10^{-4}$	"
Mérina Ndiaye	$2.8 \cdot 10^{-5}$	"
Ndiakhal	$3.8 \cdot 10^{-5}$	"
Séal	$3 \cdot 10^{-5}$	"
Tawa Fall(p)	$1.2 \cdot 10^{-4}$	"
Thiam Bam	$4.1 \cdot 10^{-5}$	"
Ndande	$1.8 \cdot 10^{-4}$	"
Keur Saer	$1 \cdot 10^{-6}$	Marno-calcaire
Coki Ndianguène	$4.3 \cdot 10^{-4}$	"
Tiaytou Gap	$4.4 \cdot 10^{-5}$	"
Mbotel	$3.6 \cdot 10^{-5}$	"
Naké	$1 \cdot 10^{-5}$	"
Ndiaye Dankhe	$2 \cdot 10^{-3}$	"

Tableau 3.1 : Caractéristiques hydrodynamiques (suite)

Localisation	Perméabilités (m/s)	Nature du réservoir
Fass	$1.8 \cdot 10^{-3}$	Calcaire
Ndiok Sall	$8.7 \cdot 10^{-4}$	
Nguène Sarr	$1.2 \cdot 10^{-3}$	"
Ngourane	$9 \cdot 10^{-4}$	"
Massar Diop	$8.3 \cdot 10^{-4}$	"
Ndiourki	$9.1 \cdot 10^{-4}$	"
Kawal Diaw	$7 \cdot 10^{-4}$	Sable
Sam Ndiaye	$8.9 \cdot 10^{-4}$	"

(source: Ministère de l'hydraulique)

### 3.3.3 Evolution piézométrique

On suivra cette évolution dans les sables quaternaires et la bordure ouest des calcaires, le réseau piézométrique couvrant cette zone étant assez dense.

Les valeurs observées sur la zone au mois de février 1995 sont données dans le tableau 3.2 :

Tableau 3.2 : Mesures piézométriques du Littoral Nord

Localités	fev 95	Localités	fev 95	Localités	fev 95
Boptir P.	7.52 m	Fass Boye	3.76 m	ICS 72	32.23 m
Ndiop Sao	22.21	Mbâ	9.71	ICS 75	32.13
Ndeune	9.65	ICS 73	24.61	ICS 74	25.74
Taïba ND.	16.67	ICS 62	24.97	ICS 63	37.2
Taïba S.	65.49	ICS 61	32.23	ICS 64	33.56
Gokho	5.61 m	ICS 71	34.83 m	ICS 48	35.05 m
Naïlou	9.05	T. OMS	34.91	Lakhasso	36.52
Mbakalo	37.14	Kad Peul	7.73	Guéoul	36.26
Palméo1	38.74	Diourmel	6.21	War Cissé	34.86
Palméo2	37.10	Thioucoug	5.29	Niakhal	32.01
Siweul R.	33.09	Thiambène	11.13	S.Mbengue	36.54
Kab Gaye	37.33	Nguer Ng.	36.68	T. Diop	34.37
Tawa Fall	19.06	Thiékène	37.05	Darou Si.	36.27
Boudougni	16.62	Daw	7.16	Khomal	13.62
Thiangal.	7.91	K. Koura	8.40	Touba G.	13.75
Bendiouga	10.78	S. Mérina	14.39	Madyana	16.72
Boudouhou	8.55	Semeule	8.43	Mouril	5.90

source : ministère de l'hydraulique

### 3.4 PRELEVEMENTS

Les résultats des enquêtes effectuées sur la zone, en distinguant

les différents types de prélèvements :

- les prélèvements urbains et industriels,
- les prélèvements des forages de la DEM (division entretien et maintenance du ministère de l'hydraulique),
- les prélèvements villageois,
- les prélèvements agricoles dans les Niayes et les autres zones.

### 3.4.1 Les prélèvements urbains

Ils sont principalement effectués par la SONEES pour l'alimentation en eau Dakar et de quelques centres urbains situés dans la zone étudiée, pour des villages situés au nord de la zone, et les ICS (forages de Tounde Toune). L'évolution de ces prélèvements est donnée dans le tableau qui suit :

Tableau 3.3 : Prélèvements urbains

Année	1987	1988	1989	1990	1991
m <sup>3</sup> /an	11175149	12661842	13234671	13387102	14907028

Année	1992	1993	1994	1995
m <sup>3</sup> /an	15950520	17067560	18261750	19540072

### 3.4.2 Prélèvements des forages de la DEM

Ce sont des forages motorisés ruraux avec des débits d'exploitation faibles. Ces débits sont donnés dans le tableau 3.4 .

Tableau 3.4 : Prélèvements des forages de la DEM (1991)

Régions	Villages	Débits exploités	
Diourbel	Keur Yaba	0.5 l/s	
	Baba Garage	0.9	
	Tawa Fall	1.0	
	Dinguiraye	0.2	
	Ngogam	0.6	
	Coki NDianguène	0.5	
Louga	Nguène Sarr	1.3	
	Keur MBarick	2	
	War Cissé	0.2	
	NDiambour Fall	4.4	
	Sam NDiaye	2.2	
	NDatt Diokoul	1.4	
	Thiolam Fall	1	
	Diokoul NDiawrigue	0.5	
	Kab Guèye	3.3	
	Thieppe	0.2	
	Bale Haya NDiaye	0.5	
	Kébé NDeurka	4.2	
	Thiès	Koul	0.2
		Ngalick Kouma	1.7
Pékesse		2.9	

Tableau 3.4 : Prélèvements sur les forages de la DEM (suite)

Régions	Villages	Débits exploités
Thiés	Ngandiouf	0.1 l/s
	Niakhène	0.6
	Ndiengue Diaw	3.6

### 3.4.3 Prélèvements villageois

On comprendra à travers cette appellation tous les prélèvements villageois à partir des puits , mais également ceux faits des forages qui ne sont pas gérés par la DEM. Ils sont destinés à l'alimentation en eau des populations et du cheptel (Tableau 3.5)

### 3.4.4 Prélèvements pour l'agriculture

Ce sont des consommations difficiles à quantifier de manière exacte. Elles sont déduites des surfaces cultivées.

On essaiera de faire la distinction entre la zone des Niayes et les autres zones agricoles.

#### Les Niayes

C'est la zone des cultures irriguées à partir des forages ou des puits qui y existent en nombre très élevé. On y rencontre de nombreux projets (la station fruitière de Mboro, le projet maraîcher de Méouane, le projet fruitier de Darou Ndoye, le projet CIFOB, PNVA de Louga...) et des domaines privés.

Tableau 3.5 : Débits prélevés au niveau des villages (m3/jour)

Régions	Arrondissements	Débits prélevés										
		1975	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Saint-Louis	Rao	84	111	115	118	121	124	127	130	133	136	139
Iouga	Darou Mousty	89	118	121	124	127	130	134	137	140	143	145
	Ndande	657	866	889	911	934	958	983	1008	1022	1037	1055
	Sagatta	799	1054	1080	1108	1136	1165	1195	1225	1254	1284	1295
	Mbédiène	929	1063	1077	1090	1104	1117	1131	1145	1160	1176	1190
	Sakal	636	728	737	747	756	765	775	784	794	795	810
Thiès	Pambal	399	508	519	530	542	554	567	580	592	604	616
	Méouane	589	749	766	784	801	819	837	855	873	890	908
	Mérina Dakhar	1205	1534	1569	1603	1639	1675	1713	1750	1786	1823	1860
	Niakhène	1446	1841	1882	1924	1967	2010	2055	2100	2144	2187	2230
	Thiénaba	1140	1618	1670	1724	1780	1837	1896	1954	2010	2068	2127
Diourbel	Baba Garage	627	801	819	838	857	876	895	914	933	952	970
	Lambaye	3440	4394	4492	4593	4697	4803	4910	5016	5122	5229	5336
	Ngoye	1511	1930	1973	2018	2064	2110	2157	2204	2250	2296	2343
	Ndindy	2862	3728	3818	3911	4006	4103	4203	4300	4398	597	4597
	Ndoulo	656	838	857	876	896	916	937	958	978	998	1019

Mais à part ces domaines identifiés, on note des projets villageois de maraîchage sur presque tout le littoral, sur une bande large de 3 à 4 kilomètres, avec une grande concentration des activités sur la côte ouest qui présente la caractéristique d'avoir l'eau très proche de la surface.

Les superficies cultivées dans cette zone étaient en 1991 de 5200 hectares et la consommation estimée de 235000 m<sup>3</sup>/jour.

La direction de l'horticulture avance de son côté de 800 hectares (ha) cultivés pour une consommation totale d'environ 50000 m<sup>3</sup>/jour.

#### Les autres zones

A Diourbel les principaux consommateurs sont :

- le CNRA de Bambey environ 600 m<sup>3</sup>/jour soit 7 l/s
- l'ENCR 130 m<sup>3</sup>/jour ou 1.5 l/s en 1991.

A Louga, les prélèvements importants se font au niveau de :

- la SODEVA 140 m<sup>3</sup>/jour (1.6 l/s)
- de la résidence de Feu Djily Mbaye 1400m<sup>3</sup>/jour (16.2 l/s)
- de la SERPA 4550 m<sup>3</sup>/j (53l/s)
- du village de Nguer Nguer 52m<sup>3</sup>/j (0.6l/s)
- et enfin du village de Toundou Diop 64m<sup>3</sup>/j (0.7l/s).

#### **3.4.5 Bilan des prélèvements**

Le bilan des prélèvements en 1991 se répartit ainsi:

SONEES : 40840 m<sup>3</sup>/j i.e. 473 l/s

DEM : 2881 m<sup>3</sup>/j i.e. 33 l/s

Prélèvements villageois : 24515 m<sup>3</sup>/j i.e. 284 l/s

Prélèvements agricoles : 2386 m<sup>3</sup>/j i.e. 27.6 l/s

Soit un total de 70620 m<sup>3</sup>/j ou 817 l/s.

### **3.5 LES BESOINS FUTURS**

On suppose pour les besoins de nos simulations une augmentation de nos prélèvements. Les valeurs pour toutes ces années sont des extrapolations

### **3.6 CONDITIONS AUX LIMITES**

Les conditions aux limites de notre modèle sont un potentiel imposé à l'ouest, niveau piézométrique égal à zéro le long de la côte.

Les autres limites de la frontière sont imperméables, exceptées au Nord Ouest où il y a du sable.

## **CHAPITRE 4    MODELISATION    HYDRODYNAMIQUE**

Dans cette partie, nous présenterons à partir des données de prélèvements issues des enquêtes :

- de reconstituer l'évolution de la nappe sur la période 1975-1995
- de procéder à une simulation de l'évolution de la nappe, à la suite des prélèvements complémentaires de 1995 à 2015.

Nous insisterons surtout sur les risques d'intrusion saline.

### **4.1 EVOLUTION DE LA NAPPE DE 1975 à 1995**

#### **4.1.1 Les prélèvements**

Ils sont divisés en cinq catégories :

- Les prélèvements dans les Niayes : zone principale d'agriculture (cultures maraîchères), c'est une bande de 3 à 4 kilomètres longeant le Littoral. On distingue trois localités très sollicitées : Mboro-Diogo qui s'étend sur une longueur totale d'environ 35km, Loumpoul (15km), et Potou (15km).

Pour l'enregistrement des prélèvements au niveau du logiciel de simulation, nous répartissons les 50000 m<sup>3</sup>/jour sur l'ensemble des mailles de la zone cultivée.

- Les prélèvements SONEES : La SONEES a proposé trois scénarii d'exploitation dans cette zone qui sont de 25000 m<sup>3</sup>/jour, 38000 m<sup>3</sup>/jour et enfin 50000 m<sup>3</sup>/jour avec toutefois la contrainte

m<sup>3</sup>/jour et enfin 50000 m<sup>3</sup>/jour avec toutefois la contrainte d'utiliser des forages dont le débit n'excède pas 250 m<sup>3</sup>/heure.

La simulation est faite avec des forages de 150 m<sup>3</sup>/h et 250 m<sup>3</sup>/h.

Les prélèvements SONEES sont ponctuels et touchent une quinzaine de mailles.

- Les prélèvements DEM (division entretien et maintenance) sont ponctuels comme pour la SONEES, ils sont aussi de débits beaucoup plus faibles.

- Les prélèvements villageois concernent quelques localités et leur estimation a été faite en tenant compte de l'accroissement des populations dans la zone.

- Nous prenons également en compte les prélèvements industriels, tels ceux au niveau de Taïba, estimée à 100 l/s qui seront répartis sur 4 mailles.

L'impact de tous ces prélèvements sur les échanges nappe-océan fera l'objet de notre attention tout le long de ces simulations.

#### **4.1.2 Les données pluviométriques**

Elles sont données dans le tableau 4-1 pour les stations de Dakar, Louga, Saint-Louis. Ce sont les moyennes de 1951-1990, 1951-1970 et enfin 1971-1990.

Les données pluviométriques ont connu des variations notables au cours des années, avec une tendance déficitaire très marquée.

**Tableau 4.1 : Données pluviométriques**

Stations	Moy. 51-90	Moy. 51-70	Moy. 71-90
Tivaouane	495.2	595.1	395.3
Dakar Yoff	462.7	578.5	347.0
Mbao Thiaroye	454.7	551.7	357.6
Rufisque	473.6	584.5	362.7
Sébikotane	551.2	661.9	440.5
Mont Rolland	512.3	627.4	397.2
Kébémér	383.1	487.1	297.1
Loumpoul	360.8	462.6	259.1
Thiès	566.9	687.5	446.4
Mboro	409.1	502.8	315.4
Louga	375.2	471.3	279.2
Keur Momar Sarr	356.5	436.2	276.7
Saint Louis aéro	277.3	336.3	218.3

#### **4.1.3 L'évapotranspiration potentielle**

Les valeurs annuelles d'évapotranspiration au niveau de la zone d'étude le "Littoral Nord" (précisément les stations de Dakar, Saint-Louis et Louga) sont répertoriées au niveau du tableau 2.1. Elles sont données par mois et pour tous les dix jours (moyennes décadaires) pour l'année 1994. Elles dépendent de la température, de la durée d'insolation et de l'humidité relative.

**Tableau 4.2 : Moyennes décadaires des évapotranspirations en 1994**

Stations	Décades	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
St Louis	1 ère	5.8	6.4	6.5	7.6	6.3	5.6	5.4	5.6	5.0	5.5	5.0	5.1
	2 ème	5.7	6.8	6.4	6.8	6.5	5.3	5.6	5.2	5.1	5.8	5.7	5.3
	3 ème	6.0	6.7	8.5	7.1	6.3	5.2	5.6	4.7	5.1	5.8	5.3	5.4
Louga	1 ère	6.2	6.3	6.7	8.4	7.5	7.1	6.4	6.2	5.4	5.8	6.3	5.9
	2 ème	5.4	6.5	5.6	7.9	7.5	6.3	6.0	5.8	5.1	6.2	5.9	5.4
	3 ème	6.2	6.8	8.0	8.0	7.4	6.1	5.7	5.4	5.4	6.5	5.8	5.6
Dakar	1 ère	4.3	4.3	5.0	5.1	5.0	4.8	5.1	5.0	4.7	4.8	4.6	4.6
	2 ème	4.2	4.4	4.6	4.8	4.8	4.8	5.2	4.9	4.6	4.9	5.0	4.8
	3 ème	4.0	4.5	5.5	5.1	4.8	4.9	5.0	4.8	4.8	4.7	4.8	4.4

## **4.2 CONDITIONS DE SIMULATION**

Dans les deux cas de simulation nous avons :

- le potentiel qui est imposé le long de la côte ouest du fait du contact avec l'océan.
- les paramètres hydrodynamiques qui restent identiques de même que la géométrie de l'aquifère (voir en annexe).
- les frontières imperméables sur à l'est et au Nord.

Cette simulation sera effectuée à l'aide du logiciel Modflow (Processing Modflow Version 3.0 ) de W. Chiang et K. Kinzelbach, qui date de 1993. Ce logiciel permet une saisie relativement facile des données, de visualiser les isopièzes, et tous les paramètres entrés. De plus il nous est loisible de faire le bilan des échanges.

### **4.2.1 Conditions de simulation en régime permanent**

Les conditions de simulation sont celles prévalant en 1975. Nous analyserons l'évolution de la nappe soumise aux conditions pluviométriques, aux échanges atmosphériques et aux prélèvements de l'année 1975. Cette simulation permet de faire le calage du modèle, en comparant les résultats aux piézométries observées sur les lieux.

#### **4.2.2 Conditions de simulation en régime transitoire**

Elle se fera entre 1975 et 1991 .

Les coefficients d'emmagasinement de 6% pour les sables littoraux et 10% pour les calcaires et marno-calcaires restent maintenues.

### **4.3 RESULTATS DE LA SIMULATION**

#### **4.3.1 Simulation en régime permanent**

La nappe du Littoral Nord va connaître à terme, après une très longue période d'exploitation , au rythme actuel, un abattement très important. Les niveaux piézométriques ne vont guère dépasser 5 mètres. Cette simulation a été effectuée avec une recharge faible et les débits d'exploitation de 1975. Les résultats des simulations faites sont observables sur la figure 4.1.

#### **4.3.2 Simulation en régime transitoire**

Une simulation de l'évolution de la nappe entre 1975 et 1995 ne laisse transparaître aucune invasion d'eau salée sur le Littoral à part la zone Nord de Louga.

Cette zone est affectée actuellement par une pénétration de l'eau salée.

\* Scénario 1 : Implantation de nouveaux forages (pour une exploitation de 25000 m<sup>3</sup>/jour supplémentaires)

Ce scénario à l'horizon 2015 sera une cause d'intrusion saline même sur la zone des Niayes qui fait l'objet d'une très forte exploitation par les maraîchers. Cette exploitation a connu une augmentation avec la dévaluation qui a dopé le secteur du fait du prix de revient élevé des produits importés

\* Scénario 2 : exploitation de 38000 m<sup>3</sup>/jour supplémentaires.

L'effet observé avec le premier scénario connaît un léger changement, toutefois la tendance générale est maintenue, à savoir l'important rabattement de la nappe, mais cette situation ne cause pas la salinisation des terres des Niayes, zone importante de cultures de légumes et fruits.

\* Scénario 3 : exploitation de 50000m<sup>3</sup>/jour supplémentaires

Cette exploitation importante destinée à résorber, ou plutôt réduire le déficit en eau du pays, en particulier la capitale Dakar, est tout à fait possible, sans entraîner d'intrusion saline.

Les résultats de simulation montrent en effet un isopièze de 2 mètres qui longent la côte et qui permet d'empêcher l'invasion salée.

## CONCLUSION

Notre pays connaît des problèmes réels pour répondre aux besoins des populations en eau potable, nous avons dans cette étude essayé de traiter du problème d'intrusion saline, dans les aquifères côtiers. Notre pays possède en effet une longue frontière marine et doit par conséquent, resté toujours attentif à cette menace.

Nous nous sommes appuyés pour ce faire sur des données issues d'enquêtes du BRGM, et en extrapolant pour les valeurs des années à venir.

Les simulations ont permis de montrer qu'une exploitation au rythme actuel, sans aucune augmentation de la pluviométrie, qui aurait pu permettre une réalimentation de la nappe, serait sans grand effet sur le Littoral Nord.

En effet, les trois scénarii de prélèvements à partir de forages, proposés par la SONEES ne provoquent aucune invasion salée.

Toutefois, nous signalerons le problème des enquêtes. Des disparités considérables sont observées entre les valeurs du service de l'horticulture et celles du ministère de l'hydraulique, problème qui se sent surtout au niveau de l'estimation des consommations agricoles. Il serait en effet bien de s'accorder au niveau des statistiques pour une adéquation des études menées

## BIBLIOGRAPHIE

- 1 - Bear, Jacob. **Hydraulics of grounwater**, Mc Graw Hill, 1979.
- 2 - Bouwer, Herman. **Grounwater hydrology**, Mc Graw Hill book company inc., 1978.
- 3 - BRGM. **Etude des ressources en eau du Littoral Nord (Kayar - Saint-Louis)**, 1974.
- 4 - BRGM. **Réévaluation de la ressource en eau du Littoral Nord**, 1992.
- 5 - CASTANY, G. **Traité pratique des eaux souterraines**, Paris, deuxième édition, Dunod, 1967.
- 6 - HUYAKORN Peter S. et PINDER George F. **Computational Method in subsurface flow**, Academic Press, 1983.
- 7 - TORNO, Harry C. **Computer applications in water resources**, American society of civil engineers, 1985.

## ANNEXE A

Nous présentons dans cette partie les schémas qui nous ont servi de support pour notre étude.

Figure A-1 : Coupes géologiques de la zone d'étude.

Figure A-2 : Isohypses du toit des calcaires lutétiens.

Figure A-3 : Isohypse du toit de l'aquifère

Figure A-4 : Carte des transmissivités

Figure A-5 : Carte piézométrique (1975)

Figure A-6 : Carte piézométrique (1991)

Ces figures sont tirées de l'étude menée par le BRGM sur la zone du Littoral Nord en 1992.

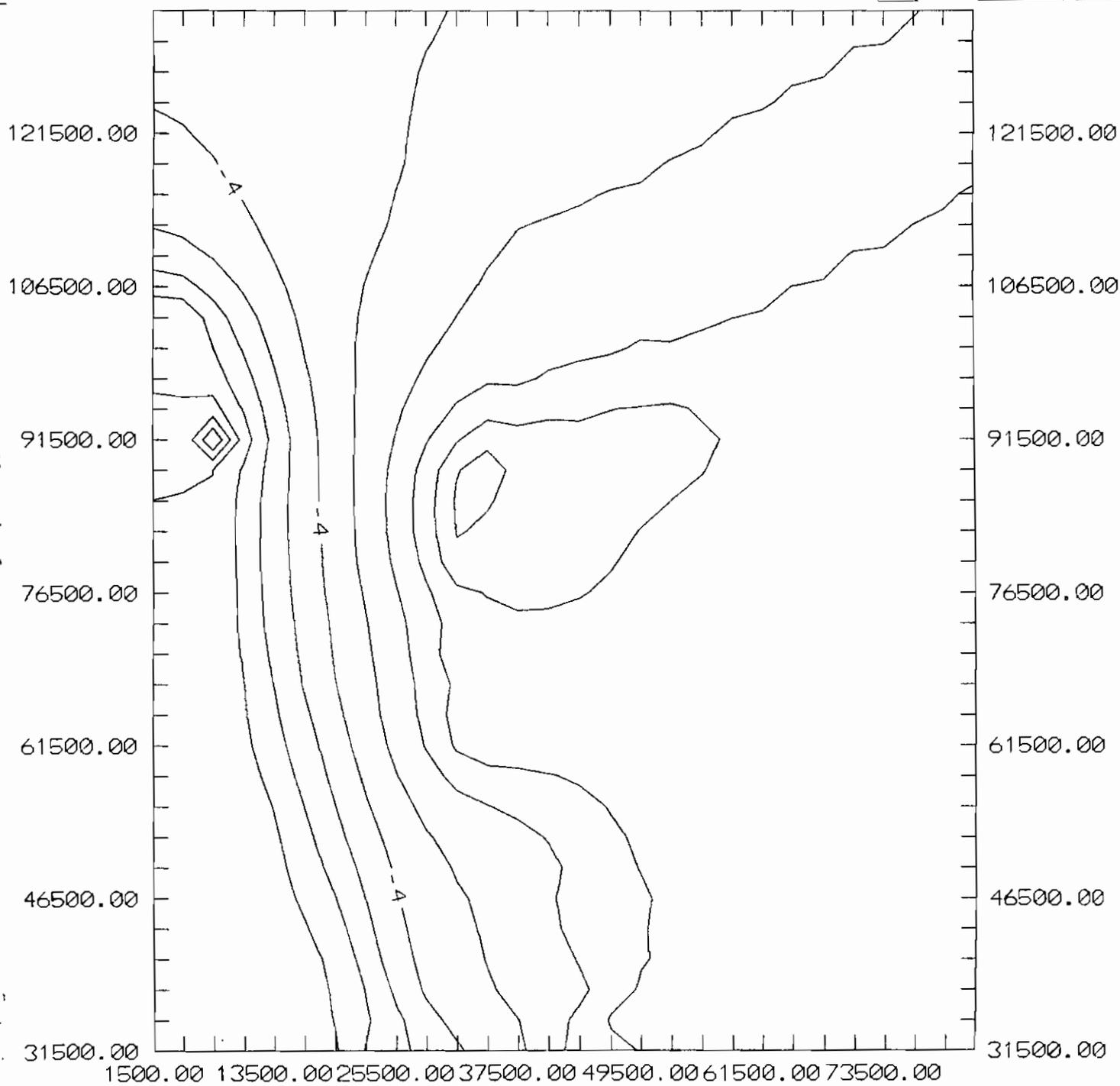


fig 4: Simulation en régime permanent

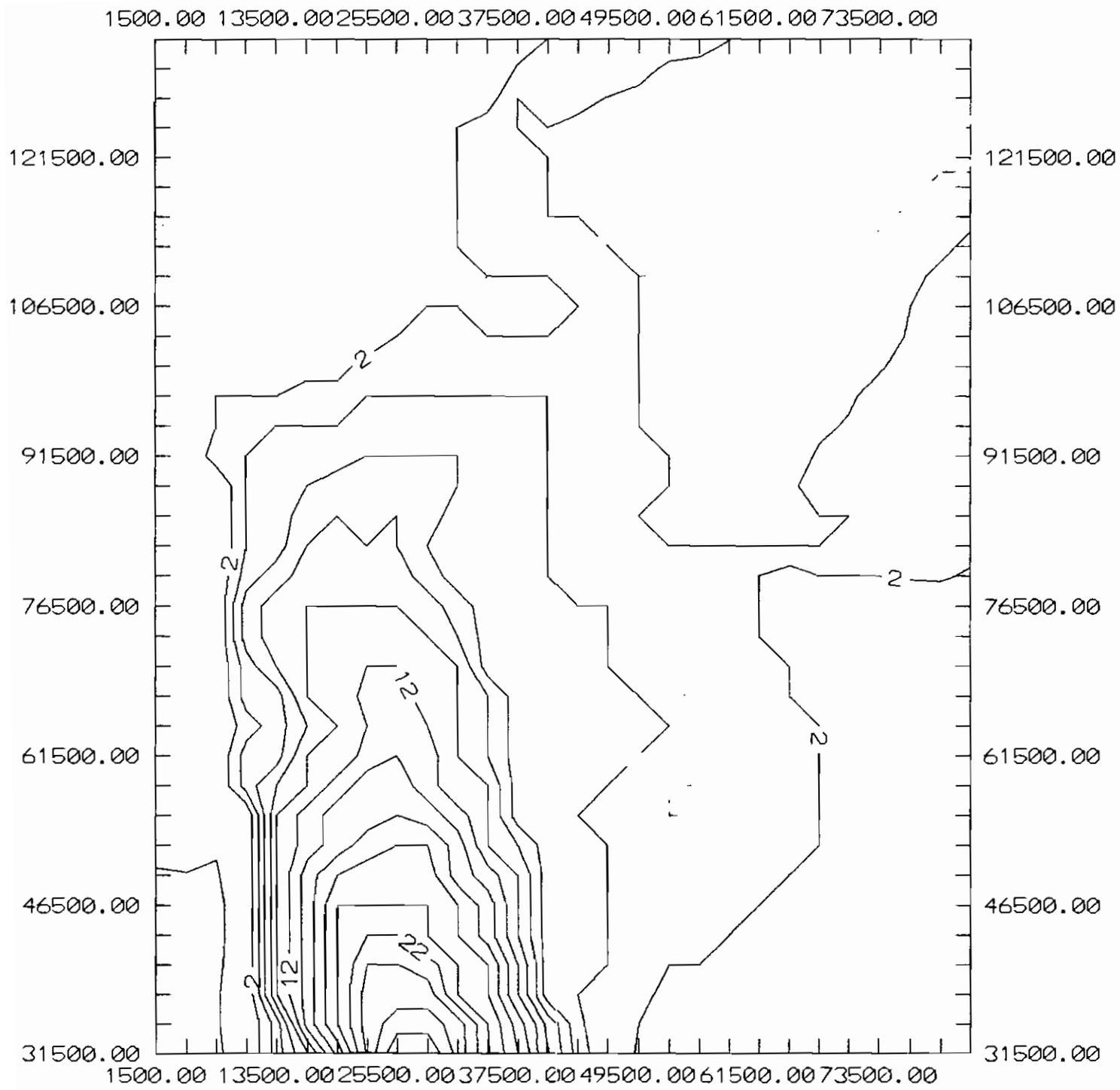


Fig 42: Piézométrie en 2015  
Régime transitoire