

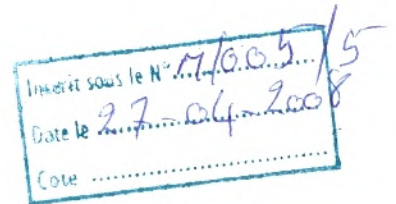
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID - TLEMCCEN
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE



MEMOIRE DE MAGISTER

Option
Hydrogéologie



HYDRODYNAMIQUE ET MODELISATION DE LA NAPPE

ALLUVIALE DE LA PLAINE DE SIDI BEL ABBÈS

(NORD-OUEST ALGÉRIEN)



Présenté par

Soumia YOUSFI

Soutenu le 7 avril 2008

devant les membres du jury :

<i>Président :</i>	Mr M. BENSALAH	Professeur à l'Université de Tlemcen
<i>Promoteur :</i>	Mr A. BOUANANI	Maître de conférence à l'Université de Tlemcen
<i>Co-promoteur</i>	Mme K. BABA-HAMED	Dr. C. C. à l'Université Tlemcen
<i>Examineur :</i>	Mr D. BOUDJEMLINE	Maître de conférence à l'Université d'Oran
<i>Examineur :</i>	Mme F. ADJIM	Maître de conférence à l'Université de Tlemcen

Année universitaire 2007-2008

"وَأَنْزَلْنَا مِنَ السَّمَاءِ مَاءً بِقَدَرٍ فَأَسْكَنَاهُ فِي الْأَرْضِ وَ إِنَّا عَلَى ذَهَابٍ بِهِ لِقَادِرُونَ"

قرآن كريم

À mes chers parents.

REMERCIEMENTS

Je remercie notre Bon Dieu le Tout Puissant de m'avoir guidé, aidé et donné la foi et le courage pour accomplir ce travail.

J'exprime ma plus vive gratitude à Monsieur A. BOUANANI, mon encadreur, pour sa disponibilité, son soutien sans réserve et surtout ses qualités humaines.

Au même titre, j'adresse ma vive reconnaissance à Madame K. BABA-HAMED qui a accepté de co-diriger ce travail, pour ses judicieux conseils et pour toutes ses contributions à la réalisation de ce mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur M. BENSALAH d'avoir bien voulu présider le jury et j'exprime également mes remerciements à Monsieur D. BOUDJEMLINE et Madame F. ADJIM pour avoir accepté d'examiner ce travail et qui m'ont fait l'honneur de le juger.

Je tiens aussi à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à me faciliter la réalisation de ce travail. Je pense tout particulièrement à Monsieur A. BENZEGUIR le Directeur de l'A.B.H. d'Oran qui a accepté volontiers de me fournir les documents que je convoitais. Je n'oublierai pas Monsieur A. BEKHDADI, chef de service à l'A.N.R.H d'Oran qui a su patiemment accepter la consultation des ouvrages bibliographiques. Je remercie aussi le personnel de l'Office Nationale de Météorologie d'Oran pour l'aide précieuse qui m'a été offerte.

Enfin que mes enseignants y trouvent ici l'expression de mes vifs remerciements.

ملخص

ينتمي سهل سيدي بلعباس إلى السهول الداخلية لغرب الجزائر يحوي جيبا مائيا حرا من ترسبات نهريّة بليوكواترنارنية التي ملأت حوض سيدي بلعباس .

نظرا للاحتياجات السكانية،الصناعية والفلاحية ، تعرض السهل للاستغلال الشديد في السنوات الأخيرة. إذ أصبحت إدارة موارده بالنموذج الرياضي مهمة.

سمحت الدراسة الجيوستاتيسكية بإجراء توزيع فضائي للخصائص الهيدروديناميكية والهندسية للجيب المائي.

بعد التمثيل الوظيفي العام للجيب المائي واستعمال النموذج الرياضي المعتمد على طريقة التباين التام في حالة النظام الدائم، تعرفنا على الخصائص الهيدروليكية لهذا الجيب والموازنة الهيدرولوجية الكاملة. توصلنا بتحسين النموذج في حالة النظام الانتقالي إلى تخمين قيم معامل التخزين . استثمر النموذج سمح لنا بإظهار تأثير المياه المستخرجة والتغير المناخي على تطور مستوى الماء في الجيب .

الكلمات المفتاحية :

سهل، سيدي بلعباس، الجزائر ، ترسبات نهريّة، الهيدروديناميك، الدراسة الجيوستاتيسكية، النموذج الرياضي، النظام الدائم، النظام الانتقالي، المظاهرة.

RESUME

La plaine de Sidi Bel Abbès fait partie des plaines intérieures de l'Algérie occidentale, elle renferme une nappe libre contenue dans un remblaiement alluvial plio-quadernaire qui a comblé la cuvette de Sidi Bel Abbès.

Face aux besoins des populations, des industries et de l'agriculture, la nappe a subi une exploitation intensive ces dernières années. Une gestion par modèle mathématique devient nécessaire.

Le traitement des paramètres hydrodynamiques et géométriques de l'aquifère par des méthodes géostatistiques nous a permis de réaliser la répartition spatiale de ces paramètres.

Après une représentation du fonctionnement global du système aquifère, l'utilisation du modèle mathématique basé sur la méthode des différences finies en régime permanent améliore la connaissance des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère et l'évaluation d'un bilan hydrologique complet. La seconde simulation en régime transitoire conduit à l'estimation des valeurs du coefficient d'emmagasinement.

L'exploitation du modèle a permis de déterminer l'impact des débits prélevés et les tendances climatiques sur l'évolution piézométrique de la nappe.

Mots-clés :

Plaine ; Sidi Bel Abbès ; Algérie ; Alluvions ; Hydrodynamiques ; Géostatistique ; Modèle mathématique ; Permanent ; Transitoire ; Simulations.

ABSTRACT

The plain of Sidi Bel Abbes forms part of the interior plains of West Algeria; it contains an unconfined aquifer contained in fill alluvial plio-quadernary which filled the basin of Sidi Bel Abbes.

Vis-à-vis with the needs for the populations, industries and agriculture, the groundwater underwent an intensive exploitation these last years. A management by mathematical model becomes necessary.

The treatment of the hydrodynamic and geometrical parameters of the aquifer by methods geostatistics made it possible for us to carry out space distribution of these parameters.

After a representation of the total functioning of the aquifer's system, the use of mathematical model based on the finite differences in permanent mode improves knowledge of the hydraulic characteristic of aquifer and the evaluation of a complete hydrological balance.

The second simulation in transient state led to the estimate of the values of the coefficient of storage.

The exploitation of the model made it possible to determine the impact of the flows taken and the climatic tendencies on the piezometric evolution of the aquifer.

Key words:

Plain; Sidi Bel Abbes; Algeria; Depots; Hydrodynamic; Geostatistics; Mathematical model; Permanent; Transient; Simulation.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : CONTEXTE GENERALE	3
INTRODUCTION	4
I- CONTEXTE GEOGRAPHIQUE	4
II- RESEAU HYDROGRAPHIQUE	5
III- CONTEXTE CLIMATIQUE	5
Introduction	5
III-1. Pluviométrie	6
III-1-1. Pluviométrie annuelle	6
III-1-2. Régime des pluies	8
a. Répartition mensuelle de la pluviométrie	8
b. Répartition saisonnière de la pluviométrie	8
III-2. Température et évapotranspiration	9
III-2-1. Température	9
III-2-2. Evapotranspiration	9
IV- CONTEXTE GEOLOGIQUE	10
Introduction	10
IV-1. Lithostratigraphie	11
IV-1-1. Quaternaire et Plio-quaternaire	11
IV-1-2. Tertiaire	11
IV-1-3. Secondaire	11
IV-2. Tectonique	12
CHAPITRE II : HYDROGEOLOGIE	15
INTRODUCTION	16
I- Géométrie de l'aquifère	16
I-1. Cartographie du mur du remplissage plio-quaternaire	17
I-2. Cartographie du toit de l'aquifère	17
I-3. Carte isopaches des conglomérats du Plio-quaternaire	19
II- Cartes piézométriques	20
II-1. Carte piézométrique (octobre/novembre 1971)	20
II-1-1. Schéma général	20
II-1-2. Zones d'alimentation	21
II-1-3. Zones de drainage	21
II-1-4. Gradients	21
II-2. Cartes piézométriques (mai 1989, novembre 1996)	23
III- Propriétés hydrauliques	25
III-1. Fluctuations de la nappe	25
III-2. Caractéristiques hydrodynamiques	25
III-2-1. Le coefficient d'emmagasinement	25
III-2-2. La transmissivité	25
IV- Bilan hydraulique	26
CONCLUSION	27

CHAPITRE III : GEOSTATISTIQUE	28
INTRODUCTION	29
I- THEORIE DE LA GEOSTATISTIQUE	29
I-1. Le variogramme	29
I-1-1. Définition	29
I-1-2. Les différents modèles du variogramme et leurs équations	30
I-2. Le krigeage	32
I-2-1. Définition	32
I-2-2. Les différents types de krigeage	32
I-3. La validation croisée	33
II- APPLICATIONS	33
II-1. Analyse variographique	33
II-1-1. Description des données	33
II-1-2. Elaboration des variogrammes	33
II-2. La validation croisée et l'élaboration des cartes krigées	37
CONCLUSION	40
CHAPITRE IV : MODELISATION	41
INTRODUCTION	42
I- Théorie sur la modélisation mathématique	42
I-1. Principes de discrétisation	42
I-2. Les Limites	43
I-3. Quelques équations discrétisées et leur résolution	43
I-3-1. Les équations	43
I-3-2. La résolution	44
I-4. Estimation des paramètres - Calibration	44
I-5. Exploitation du modèle - Simulation	44
II- Modélisation hydrodynamique de la nappe alluviale de la plaine de Sidi Bel Abbès	46
II-1. Le logiciel de simulation	46
II-2. Présentation du domaine à modéliser	46
II-2-1. Maillage	46
II-2-2. Conditions aux limites	46
II-3. Calage en régime permanent	47
II-3-1. Potentiels mesurés et calculés (oct. /nov. 1971)	47
II-3-2. Carte des transmissivités	50
II-3-3. Etude du bilan de la nappe	50
II-4. Calage en régime transitoire	51
II-4-1. Simulation des potentiels de 1989	52
II-4-2. Simulation des potentiels de 1996	55
II-4-3. Carte de coefficient d'emménagement	56
III- Exploitation du modèle	57
Introduction	57
III-1. Première simulation	57
III-2. Deuxième simulation	59
CONCLUSION	60
CONCLUSION GENERALE	61

LISTE DES TABLEAUX	64
LISTE DES FIGURES	65
ANNEXES	67
BIBLIOGRAPHIE	

INTRODUCTION

D'une superficie de 1000 Km², la plaine de Sidi Bel Abbès qui fait partie du bassin versant de la Mekerra, est considérée comme la plus importante du nord-ouest algérien.

Les formations d'âge Plio-quaternaire remplissent la grande vallée alluviale de Sidi Bel Abbès et sont le siège d'un écoulement souterrain qui forme la nappe la plus exploitée de la région.

Face aux besoins des populations, des industries et de l'agriculture, la nappe a subi une exploitation intensive ces dernières années.

Une gestion par modèle mathématique devient nécessaire pour orienter l'exploitation vers le développement général des ressources en eau afin de résoudre les problèmes d'alimentation en eau potable, agricole et industrielle.

La région de Sidi Bel Abbès sur laquelle porte la présente étude, a depuis longtemps intéressé les spécialistes des divers domaines des Sciences de la Terre. Les résultats de ces travaux sont utilisés comme documents de base à cette étude.

Après quelques données d'ordre général, nous présenterons dans le premier chapitre le contexte général de la zone d'étude, il s'agit de :

- ▲ La situation géographique,
- ▲ Le contexte climatique,
- ▲ et le contexte géologique.

Dans le deuxième chapitre, nous nous intéresserons à l'hydrogéologie et plus spécialement aux paramètres hydrodynamiques de l'aquifère plio-quaternaire. Nous synthétisons les résultats bibliographiques récoltés des travaux antérieurs réalisés sur la plaine en 1971, 1989 et 1996.

Le troisième chapitre sera consacré à la géostatistique. L'analyse de la répartition spatiale des paramètres géométriques et hydrodynamiques de l'aquifère nous conduira à une meilleure compréhension de l'écoulement souterrain. En plus elle nous permet d'extrapoler ces valeurs dans toute la zone d'étude et combler les lacunes qui se trouvent dans la partie sud de la plaine.

Notre quatrième chapitre portera sur la modélisation des écoulements du système aquifère en régime permanent et transitoire. Pour ce faire, nous utiliserons le code ASMWIN. Les calculs effectués pour les deux régimes seront présentés et analysés dans ce chapitre. Enfin dans sa dernière partie nous présenterons quelques scénarios d'exploitation pour estimer la ressource en eaux dans un temps future.

CHAPITRE I

CONTEXTE GENERAL

INTRODUCTION

La plaine de Sidi Bel Abbès fait partie des plaines intérieures de l'Algérie occidentale, elle renferme une nappe libre contenue dans un remblaiement alluvial qui a comblé la cuvette de Sidi Bel Abbès.

Dans ce chapitre et dans un premier temps nous présentons le contexte géographique du secteur étudié. Dans un second temps nous présentons le réseau hydrographique de la région. Après un bref exposé des différents paramètres climatiques qui influencent la recharge de la nappe, une détermination du contexte géologique sera primordiale pour la matérialisation de la géométrie et de la nature de l'aquifère.

I- CONTEXTE GEOGRAPHIQUE :

La plaine de Sidi Bel Abbès fait partie d'un des plus vastes bassins versants de l'Oranie, celui de l'oued Mekerra.

Ce bassin est limité, au nord par les Monts de Tessala, au sud par la ride anticlinale des Hauts-Plateaux de Ras-El-Maa, à l'ouest par le bassin de l'oued Isser et à l'est par les Monts des Béni Chougran et oued El Hammam (figure 1).

Le bassin correspondant à la région, a une topographie relativement plane de la plaine de Sidi Bel Abbès qui est encadrée par les reliefs suivants :

- Au nord : les Monts de Tessala, aux terrains peu ou pas perméables, plissés et charriés qui forment une barrière septentrionale continue et imperméable.
- Au sud : les Monts de Tlemcen-Saïda, aux terrains rigides, fracturés qui forment la limite méridionale continue et perméable.
- A l'ouest : les collines serravaliennes de l'oued Isser qui forment une limite occidentale continue et imperméable.
- A l'est : les reliefs des Béni-Chougran et Bou Henifia qui forment la limite orientale continue et imperméable.

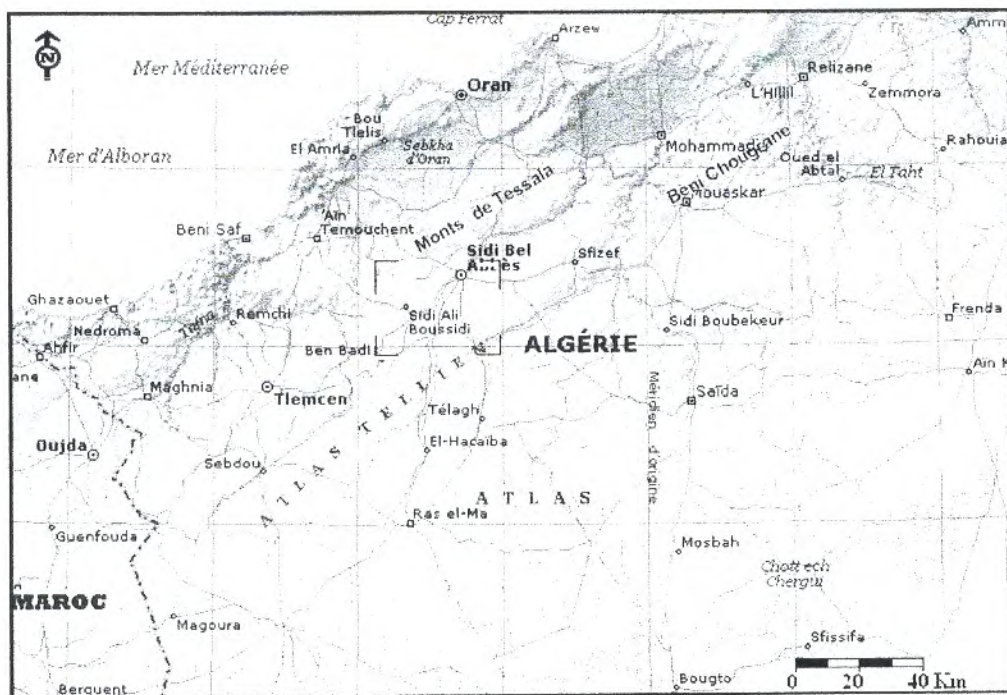


Figure 1 : La situation géographique de la plaine de Sidi Bel Abbès (Atlas mondial Encarta 2001, modifiée).

Entre ces reliefs la plaine s'étire en un croissant dont la pointe orientée sud-ouest et beaucoup plus large que celle effilée d'orientation nord-est.

II- RESEAU HYDROGRAPHIQUE :

La plaine de Sidi Bel Abbès est traversée du sud vers le nord par l'oued Mekerra. Son cours, plus ou moins rectiligne dans les Monts de Saïda, régime semi-torrentiel, devient sinueux dès son entrée dans la plaine. Au niveau de la ville de Sidi Bel Abbès, l'écran imperméable que forment les Monts du Tessala oblige la rivière à s'incliner de 90° pour trouver plus loin un exutoire vers le nord au lieu dit 'Le Rocher' (B. SOURISSEAU, 1973) (figure 2). En aval, la topographie s'inverse et le lit de l'oued entaille profondément la nappe alluvionnaire.

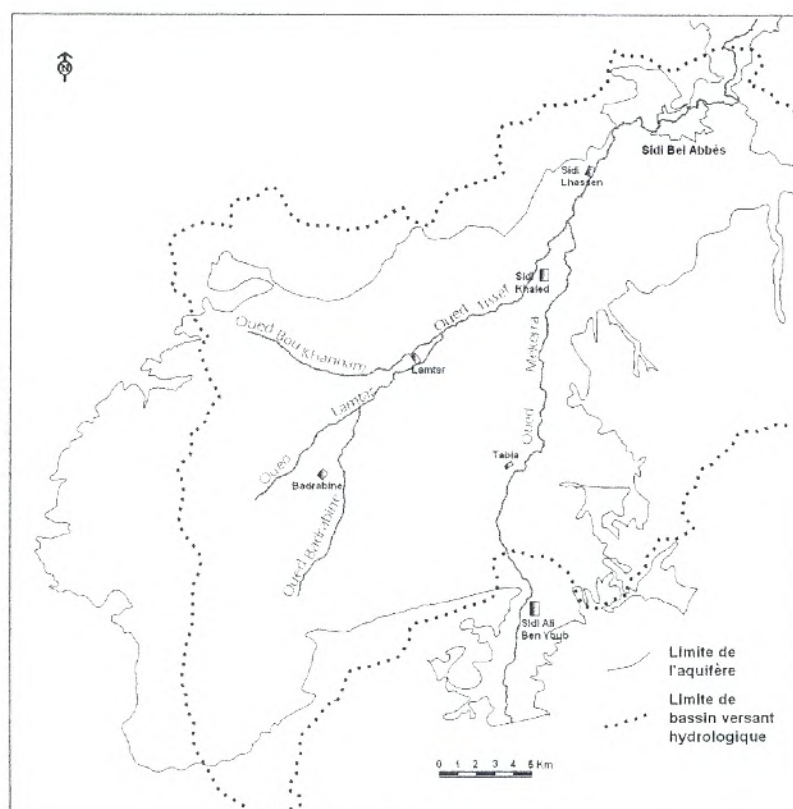


Figure 2 : La situation de l'oued Mekerra dans la plaine de Sidi Bel Abbès.

Dans la plaine, la Mekerra reçoit un seul affluent pérenne, l'oued Tissaf formé des oueds Bedrabine, Lamtar, Bou Khannam et Annefress.

Le réseau hydrographique est jeune, peu développé, et en cours de formation (B. SOURISSEAU, 1973).

III- CONTEXTE CLIMATIQUE

Introduction

Les phénomènes climatiques de la plaine de Sidi Bel Abbès qui appartient au bassin versant de la moyenne Mekerra, ont été observés depuis fort longtemps.

S'étendant sur une superficie de 1200 Km², ce bassin versant comprend 10 postes pluviométriques, qui fonctionnent durant différentes périodes.

Dans cette partie nous allons présenter une synthèse des travaux réalisés notamment par B. SOURISSEAU (1973) et H. LEBID (2001).

III-1. Pluviométrie :

III-1-1. Pluviométrie annuelle :

Une cartographie des précipitations a été présentée au 100.000^{ème}. Dans le secteur de la plaine de Sidi Bel Abbès il existe une dizaine de stations dont les moyennes annuelles de pluviosité ont été calculées par B. SOURISSEAU entre 1/4/1970 et 31/3/1972 (figure 3).

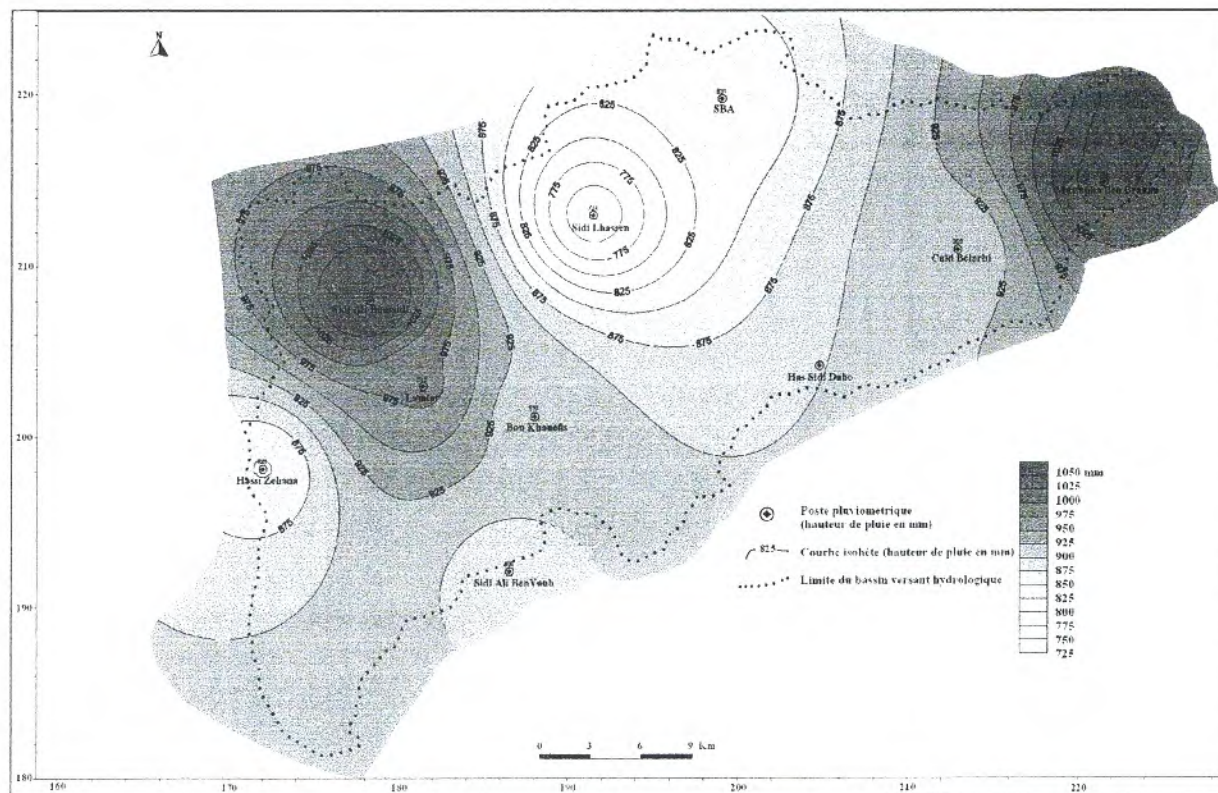


Figure 3 : Pluviosité entre le 1/4/1970 et le 31/3/1972.

Cette carte montre que les régions les plus arrosées sont les monts de Tessala et de Tenira qui ont reçu 1 mètre d'eau sur deux ans. A l'intérieur de la plaine la pluviosité augmente de la bordure nord vers le centre puis diminue du centre vers la bordure sud (B. SOURISSEAU, 1973).

D'autres cartes ont été tracées par H. LEBID pour les périodes 1975-1986 et 1986-1991. La comparaison de ces cartes montre l'intensité du déficit pluviométrique qui a touché la région de 1975 jusqu'à 1991. La période 1986-1991 est encore plus déficitaire que celle de 1975-1986. Pour cette dernière période la pluie moyenne tombée sur la moyenne Mekerra est de 383.7 mm ; celle de la période 1986-1991 donne 312.8 mm. (H. LEBID, 2001) (figure 4)

La carte de SOURISSEAU sera utilisée pour l'estimation de la recharge de l'état initial en régime permanent, et celles de LEBID au calage en régime transitoire du modèle mathématique de la nappe de la plaine de Sidi Bel Abbès. (Chapitre 4)

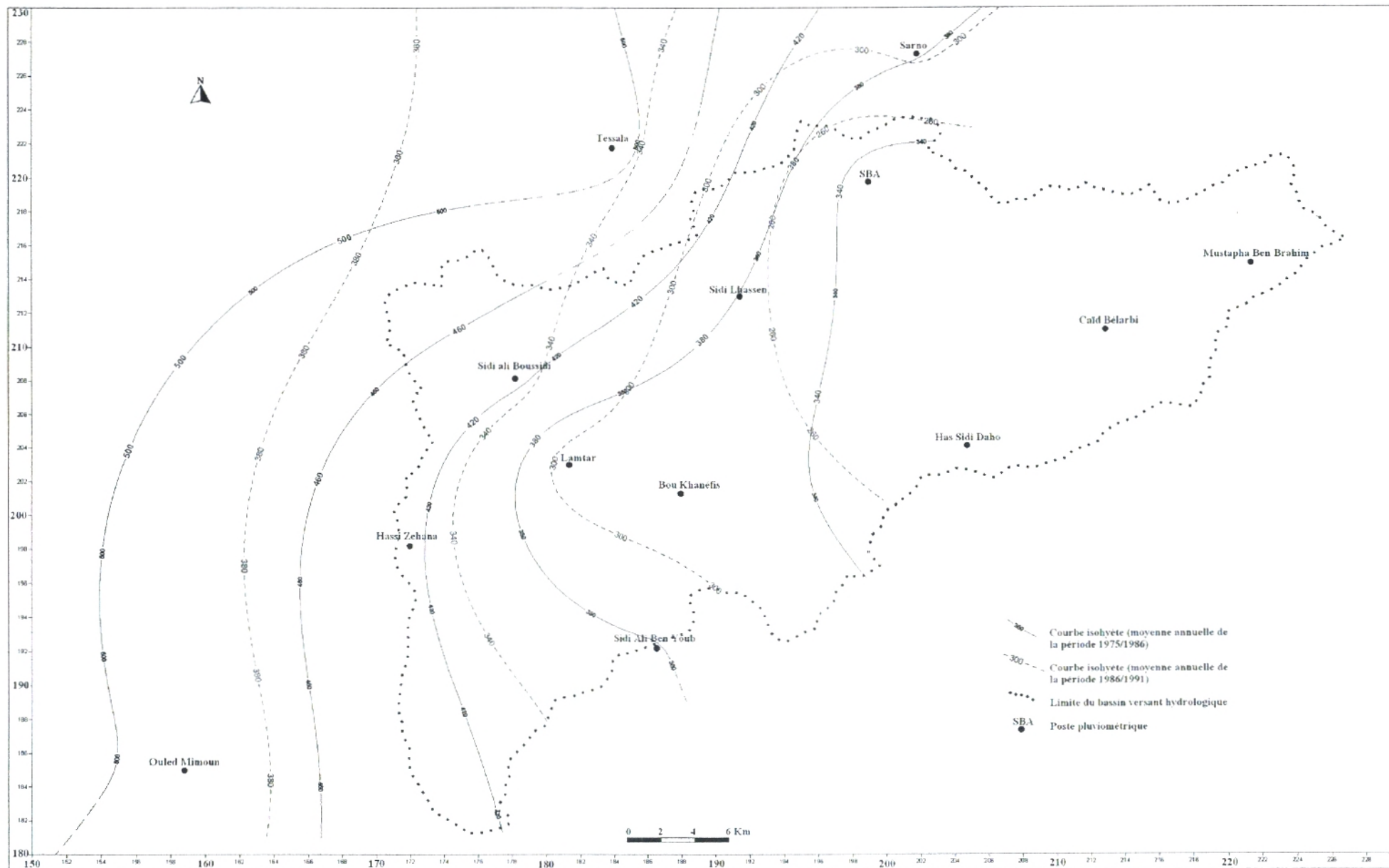


Figure 4 : Variation de la pluie moyenne annuelle dans le bassin versant de la moyenne Mekerra (1975-1986 / 1986-1991).

III-1-2. Régime des pluies :

a. Répartition mensuelle de la pluviométrie :

Située à 484 m d'altitude, la station de Sidi Bel Abbès est une station représentative de toute la plaine.

Les variations de la pluviométrie moyenne mensuelle de la station de Sidi Bel Abbès de la période 1975/1991 et de la période 1991/2005 (ONM Oran) sont présentées dans la figure 5.

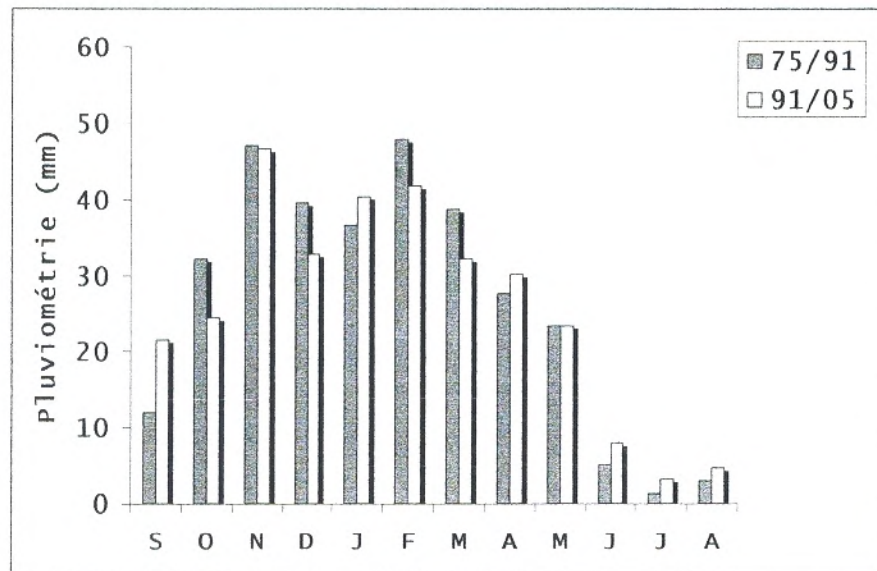


Figure 5 : Histogramme des variations de la moyenne mensuelle pluviométrique durant les périodes 1975/1991 et 1991/2005.

Il y a lieu de noter un contraste entre la période humide qui dure six à sept mois et la période sèche qui commence plus tôt vers avril et dure jusqu'au mois de septembre.

b. Répartition saisonnière de la pluviométrie :

L'histogramme des précipitations saisonnières des périodes 1975/1991 et 1991/2005 (figure 6) montre que la saison la plus pluvieuse est l'hiver, pour les deux périodes. En comparant les précipitations représentées en pourcentage des deux périodes (tableau 1), on constate que le régime saisonnier est le même.

Tableau 1 : Les précipitations saisonnières des périodes 1975/1991 et 1991/2005.

Saisons		Périodes				Année (mm)
		A	H	P	E	
75/91	mm	91.04	123.92	89.53	9.09	313.58
	%	29.03	39.52	28.55	2.9	
91/05	mm	92.74	115.1	85.88	15.61	309.336
	%	29.98	37.21	27.76	5.04	

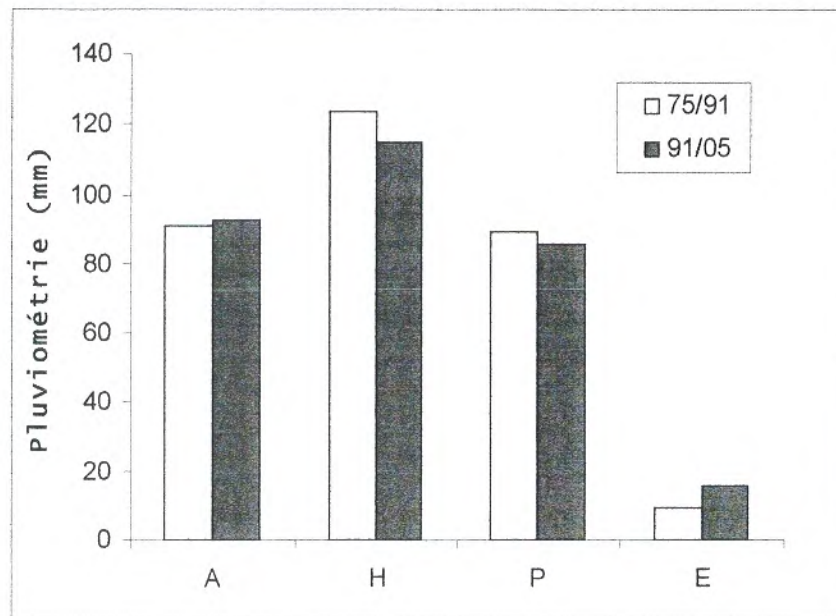


Figure 6 : Histogramme des précipitations saisonnières des périodes 1975/1991 et 1991/2005.

En conclusion, la pluviométrie dans la région de Sidi Bel Abbés, au cours des périodes 1970/1972 et 1975/2005, se caractérise par un déficit pluviométrique important à partir de 1975 ; ce qui correspond à la tendance déficitaire des précipitations lors des 30 dernières années, (A. BOUANANI, 2004).

III-2. Température et évapotranspiration :

III-2-1. Température :

Dans le bassin de la moyenne Mekerra, la température varie selon l'altitude et l'exposition par rapport à la mer.

Tableau 2 : Températures maximales, minimales et moyennes à la station de Sidi Bel Abbés.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	AN	
Max	85/92	31.47	24.82	19.51	15.96	14.14	16.37	17.8	20.3	24.65	29.07	34.38	35.57	23.67
	92/05	24.8	21.7	14.7	12.6	11.5	12.7	15.2	16.2	20.9	26	28.8	28.5	19.47
Min	85/92	14.81	10.64	6.44	3.99	2.11	3.52	4.46	5.97	9.14	12.91	16.31	17.12	8.95
	92/05	19.6	16	11.6	9	6.4	8.1	11.3	12.3	16	21	24.1	24.9	15.03
M+m/2	85/92	23.14	17.73	12.98	9.98	8.13	9.95	11.13	13.14	16.90	20.99	25.35	26.35	16.31
	92/05	19.74	16.11	10.91	8.53	6.67	8.11	10.32	11.49	15.35	19.97	23.07	23.51	14.48

Les données des températures moyennes mensuelles et annuelles de la station de Sidi Bel Abbés pour les périodes 1985/1992, permettent de reconnaître un maximum de température en août (26.35°C) et un minimum en janvier (8.13°C). Pour la période 1992/2005 le maximum est en août de 23.5 °C (tableau 2).

III-2-2. Evapotranspiration :

En 1953, TURC a établi une formule de l'ETR se basant sur les expérimentations entreprises sur des bassins versants de la méditerranée. Comparant les résultats de l'ETR obtenus sur cases lysimétriques et ceux obtenus à partir des bilans hydrologiques des bassins versants, l'auteur suggère la formule suivante valable à l'échelle annuelle :

$$ETR = P / \sqrt{0.9 + P^2/L^2} \quad \text{avec}$$

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$$

P : pluviométrie annuelle (mm)

T : température moyenne (°C)

Le tableau suivant nous donne les ETR annuelles calculées à Sidi Bel Abbès durant la période allant de 1992 à 2005.

Tableau 3 : Evapotranspiration réelle annuelle calculée selon TURC à la station de Sidi Bel Abbès (1992/2005).

	92/93	93/94	94/95	95/96	96/97	97/98	98/99	99/00	00/01	01/02	02/03	03/04	04/05
P (mm)	229.7	267.9	318.8	505.2	193.3	329.8	251.3	237	341.4	348.5	357.3	325.5	314.2
T (°C)	15.88	16.48	16.3	16.38	17.22	17.91	17.34	17.56	17.84	17.56	18.16	17.76	17.74
ETR (mm)	233.8	270.3	315.8	464.7	199.5	329.5	256.0	242.5	339.7	345.2	354.6	325.3	315.1

Les moyennes des précipitations, des températures et des évapotranspirations réelles de la période 1985/1992 (H. LEBID, 2001) et celle de 1992/2005 sont données dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Les moyennes des précipitations, des températures et des évapotranspirations. (Périodes 1985/1992, 1992/2005)

	85/92	92/05
P (mm)	302.8	309.2
T (°C)	16.13	17.24
ETR (mm)	301.2	307.1

Selon des études antérieures, les valeurs de l'ETR calculées par d'autres méthodes, au niveau de la station de Sidi Bel Abbès, sont autours de 300 mm.

IV- CONTEXTE GEOLOGIQUE

Introduction

La plaine de Sidi Bel Abbès est une cuvette dont les reliefs de bordure sont géologiquement très diversifiés.

Sur la bordure nord, les monts du Tessala sont allongés en direction sud ouest-nord est, très plissée à ossature crétacée et à recouvrement tertiaire très épais (B. SOURISSEAU, 1973).

La bordure sud, les monts de Tlemcen-Saïda sont formés presque totalement de matériaux jurassique moyen et supérieur et crétacé inférieur et moyen.

Compris entre deux môles granitiques, ce massif peu plastique du Mésozoïque est disloqué par deux systèmes de faille.

Sur la bordure ouest, les collines de marnes helvétiques séparent les bassins versants de l'oued Isser et l'oued Mekerra.

A l'est, un prolongement des Béni Chougran, par la série marneuse du Miocène de Bou Henifia, atteint l'extrémité orientale de la plaine de Sidi Bel Abbès.

Le centre de la plaine est une large cuvette à substratum uniforme argilo-marneux, gris et vert, daté du Miocène ou du Pliocène (B. SOURISSEAU, 1973).

IV-1. Lithostratigraphie

La carte géologique de la plaine de Sidi Bel Abbès (figure 7) réalisée par SOURISSEAU en 1973, montre la succession stratigraphique suivante :

IV-1-1. Quaternaire :

Les terrains observés du plus récent au plus ancien sont :

Le Soltanien et le Rharbien : au Soltanien on observe un limon rubéfié avec un horizon noirci et un autre plus clair correspondant à des apports colluviaux d'argiles sableuses. Au Rharbien se déposent en bandes le long des vallées des dépôts limoneux argileux noirs, puis des sables.

Le Moulouyen : ce sont des limons rouges associés à une croûte rouge parfois dure, représentant les collines du fond sud de la plaine avec parfois des dalles calcaires.

Le Salétien : ce sont des formations essentiellement conglomératiques de galets hétérométriques centimétriques à décimétriques, rarement libres, reliés le plus souvent par un ciment argilo-carbonaté. Les galets sont essentiellement calcaires et grès rouges provenant du remaniement des matériaux de destruction du Jurassique et du Crétacé. Ces dépôts occupent les anciennes vallées des oueds Mekerra et Lamtar qui ont raviné le Moulouyen.

Le Tensifien : en bordure des oueds (Mellinet, Bou Khanefis, Sidi Khaled), on observe des formations graveleuses, encroûtées et surmontées d'un alluvionnement plus terreux.

IV-1-2. Tertiaire :

Le Pliocène : Pendant toute la durée du Pliocène la plaine est restée exondée ce qui a permis les dépôts d'épaisses couches continentales. On observe un conglomérat de base puis des sédiments plus fins sableux et gréseux alternant avec des limons rouges, contenant des petites lentilles de conglomérats. A la fin du Pliocène un intense épisode torrentiel permet le dépôt de conglomérats.

Le Miocène : C'est l'assise imperméable argilo-marneuse des aquifères de la plaine. A l'est on rencontre des marnes grises et des grès argileux datés du Vindobonien. Ces argiles marneuses marines ont comblé toutes les dépressions du substratum mésozoïque, leur épaisseur peut dépasser 500 mètres. Elles apparaissent entre 25 et 50 mètres de profondeur sous la plaine (figure 8). Elles contiennent quelques petits épisodes régressifs de galets et graviers enrobés d'argile.

L'Oligocène : Il forme un ensemble de marnes parfois gypseuses grises, jaunes et vertes alternant avec des bancs métriques de grés à grains fins et à ciment calcaire. Cette formation correspond à l'oligo-miocène des terrains nappés du Tessala.

L'Eocène supérieur et moyen : Ce sont des calcaires durs, massifs, bien lités, percés de lapiez, pétris de fossiles (Ostracées, pectinides, échinides, thalles de lithothamnium). Cette formation très érodée appartient aux nappes de charriage. Elle repose en contact anormal sur le Miocène anté-nappe ou le Crétacé et recouverte en concordance par l'Oligo-Miocène nappé.

IV-1-3. Secondaire :

Crétacé moyen et supérieur : On rencontre dans le Tessala, des marnes gypseuses accompagnées de bancs de calcaires sombres et de calcaires gréseux peu épais. A la base apparaissent les roches salifères triasiques qui constituent la semelle des nappes de charriages.

Aptien : Il affleure au sud de Belarbi à la faveur d'un horst, on observe un calcaire microcristallin gris-bleu clair à traces de lamellibranches d'épaisseur de 130 à 160 mètres à pendage accentué vers le sud.

Barremien : On observe une formation calcaire-gréseuse de 700 mètres d'épaisseur qui n'affleure pas sur le bassin étudié.

Hauterivien : On le rencontre dans des Djebels Tenezara et Briouiga appelé membre 'D' de la formation des calcaires de Remaïlia, épaisseur 150 mètres avec un ensemble marneux à bancs de calcaires gréseux à empreintes de Nérinées (30 m) ; des grés massifs (20 m) de calcaires graveleux oolithiques (15 m) ; grés durs (10 m) ; calcaire graveleux-gréseux à traces de coquilles (20 m) ; grés (12 m) ; alternance de calcaires variés, gris zoogènes et lumachelliques (35 m). Il a une épaisseur de 170 mètres au forage SBA2.

Valanginien- Berriasien : On le rencontre au sud-est et sud-ouest de la plaine (figure 8). C'est le membre 'C' marno-calcaires, épais de 110 à 140 mètres. C'est un ensemble monotone de marnes vertes et jaunes et de calcaires graveleux, zoogènes ou lumachelliques à macrofaune importante (Ostea Couloni, trigonies, oursins, entroques, térébratules). Il pourrait correspondre aux argiles marnes, marno-calcaires, calcaires oolithiques rencontrés entre 400 et 525 mètres de profondeur au forage SBA2.

Portlandien : C'est le membre 'B' marno-calcaire qui affleure largement entre Sidi Ali Ben Youb et Aïn Tellout épais de 200 à 250 mètres avec des grés blancs et marnes violacées ; marnes verdâtres ou marno-calcaires blancs alternant avec des calcaires sublithographiques ou graveleux ; calcaires argileux jaunes et calcaires graveleux. Les forages SBA1 et SBA2 (Annexe 3) ont atteint cette formation qui aurait été dépassée à 670 mètres de profondeur à SBA1.

Kimméridgien : C'est le membre 'A' calcaire-dolomitique qui affleure dans les environs d'Aïn-Tellout et qui est très aquifère dans les monts de Tlemcen. On observe trois niveaux avec : des calcaires cristallins coiffés de dolomies et calcaires marneux (supérieur) ; 40 à 100 mètres de marnes intercalées de calcaires marneux et de dolomies gréseuse de plus de 200 mètres d'épaisseur (membre inférieur). Le membre supérieur dolomitique a été atteint entre 670 et 720 mètres de profondeur au forage SBA1.

Trias : Il affleure en semelle de nappe dans le Tessala, en diapir à Aïn Tellout et peut-être à Sidi Bel Abbès. On rencontre des marnes et argiles versicolores salifères avec sel, gypse, ophites, quartz en filons et bipyramidés, dolomies brèchiques, calcaires coquilliers noirs, cargneules et gabbros.

IV-2. Tectonique

Dans la plaine aucun accident tectonique majeur n'est visible. A la proximité d'Aïn Tellout au sud-ouest existe un important diapir triasique, un accident du même type aurait été signalé dans le quartier de la gare de Sidi Bel Abbès (B. SOURISSEAU, 1973). A l'intérieur de la plaine, au niveau des terrains quaternaire, seuls de petits décrochements de 10 à 20 mètres de rejets sont rencontrés. Par contre la bordure nord de la plaine présente un siège d'activités tectoniques intenses.

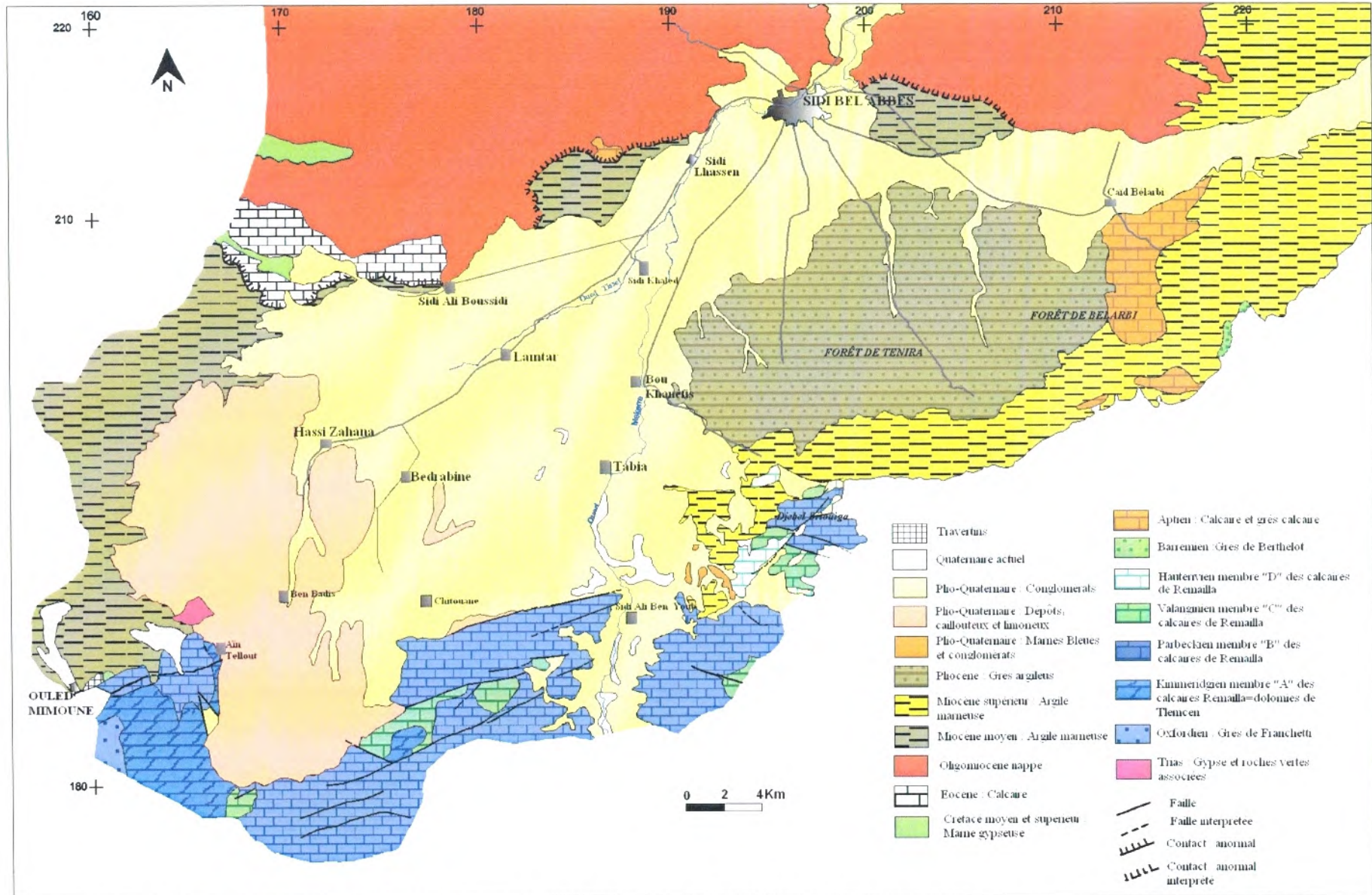


Figure 7 : Carte géologique de la plaine de Sidi Bel Abbès (B. SOURISSEAU, 1973) (digitalisée par CorelDraw 12.0 Graphic).

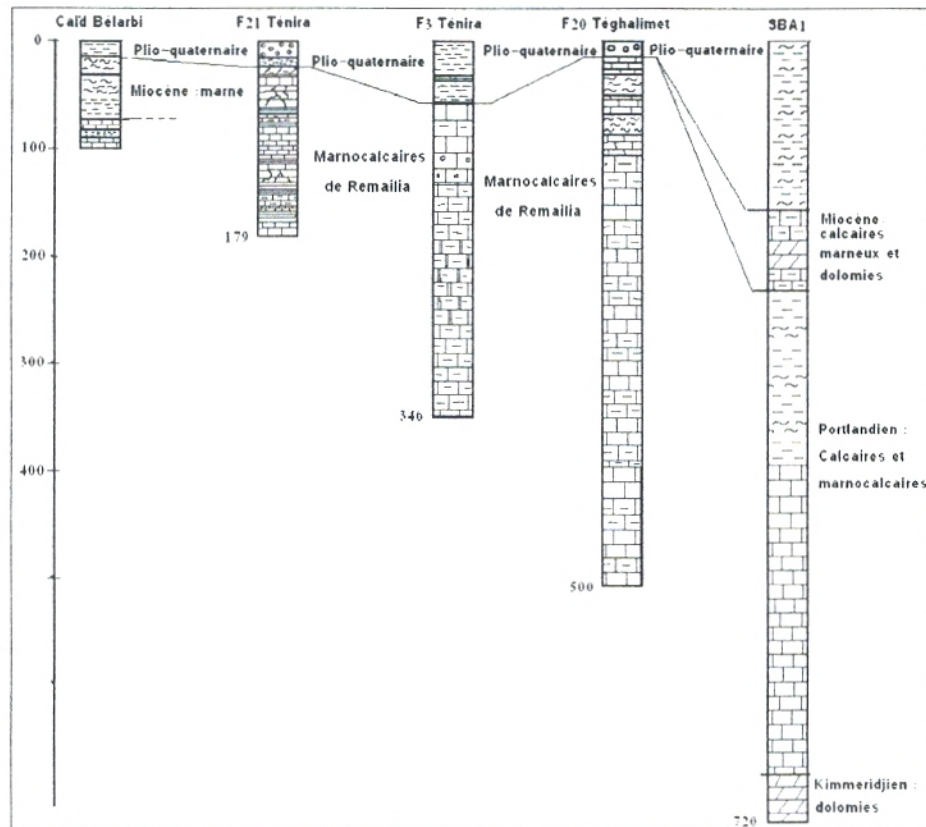


Figure 8 : Coupes lithostratigraphiques des forages implantés sur la bordure sud-est de la plaine de Sidi Bel Abbès (H. LEBID, 2001).

L'étude géologique permet de localiser l'extension des différentes couches et de préciser les relations existantes entre elles et particulièrement pour les terrains perméables.

Cette étude montre que la plaine de Sidi Bel Abbès présente une cuvette remblayée par des dépôts plio-quaternaires provenant du démantèlement des terrains qui l'entourent (calcaires de l'Eocène, calcaires et dolomies du Purbeckien).

Dans l'étude hydrogéologique nous développerons les caractéristiques hydrodynamiques du remplissage du Plio-quaternaire qui forme l'aquifère le plus exploitable de la plaine.

CHAPITRE II

HYDROGÉOLOGIE

INTRODUCTION

La région de Sidi Bel Abbès est caractérisée par la présence de cinq aquifères à savoir :

- Les calcaires de Zigyne (Aptien) de la forêt domaniale de Belarbi ;
- Les calcaires et dolomies jurassico-crétacés des monts de Sidi Ali Ben Youb ;
- Les calcaires éocènes de Sidi Ali Boussidi ;
- Les grès pliocènes de la forêt de Ténira ;
- La nappe alluviale du Plio-quaternaire de Sidi Bel Abbès.

Cette dernière acquiert un intérêt particulier du fait que tous les autres horizons perméables sont en communication hydraulique, directe ou indirecte, avec celle-ci.

Le remplissage argilo-sableux contient une nappe souvent exploitable dont le débit des eaux est proportionnel aux pourcentages d'éléments sableux et argileux présents. Le chenal conglomératique situé entre Lamtar, Sidi Khaled, Sidi Lhassen et Sidi Bel Abbès, le long des oueds Tissef et Mekerra constitue la nappe aquifère la plus riche de la plaine de Sidi Bel Abbès.

I. Géométrie de l'aquifère :

Les formations argilo-sableuses très étendues dans la plaine, entaillées par un chenal des conglomérats qui longe la Mekerra de Sidi Ali Ben Youb jusqu'à Sidi Bel Abbès, contiennent l'aquifère le plus important de la région (figure 9).

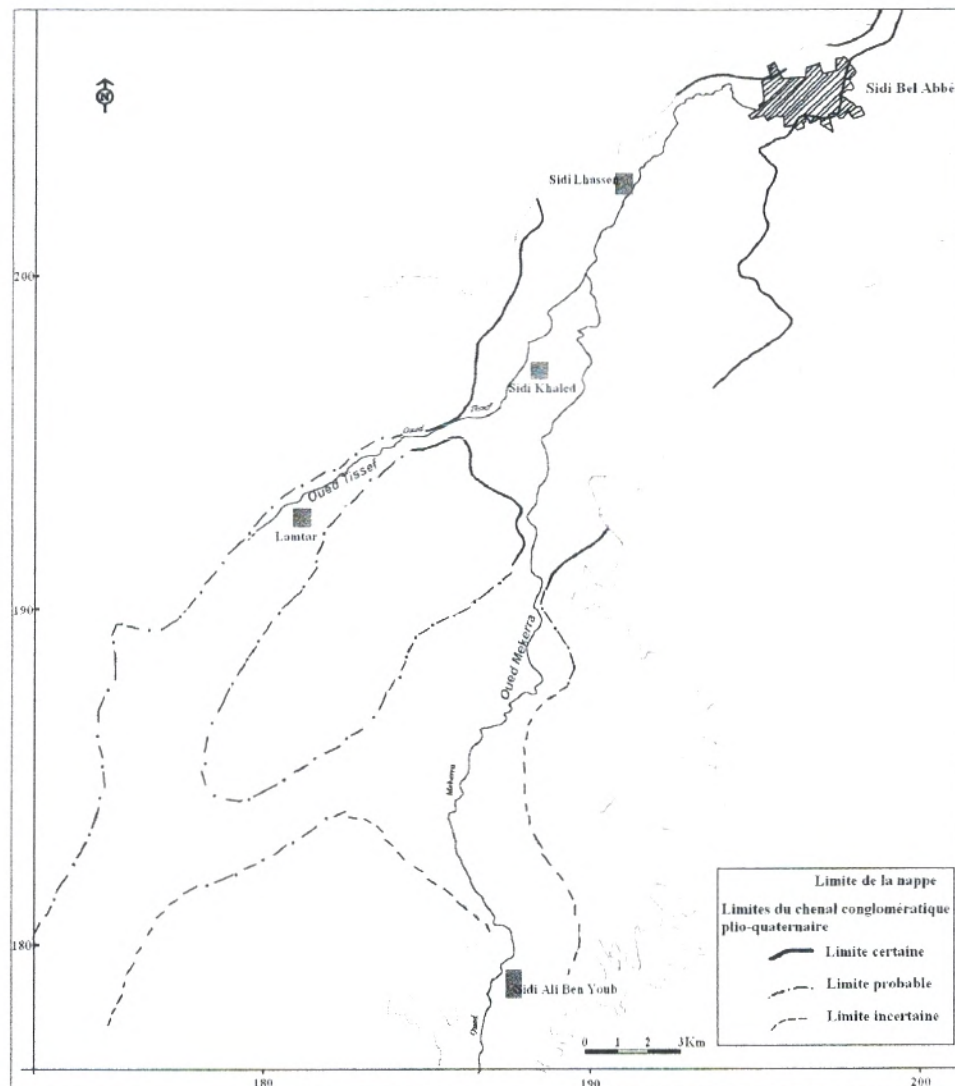


Figure 9 : Limite du chenal conglomératique selon B. SOURISSEAU (1973).

La stratigraphie de quelques puits dans la plaine indique la variation de l'épaisseur du chenal, où elle peut atteindre les 38 mètres au centre du remplissage conglomératique (figure 10).

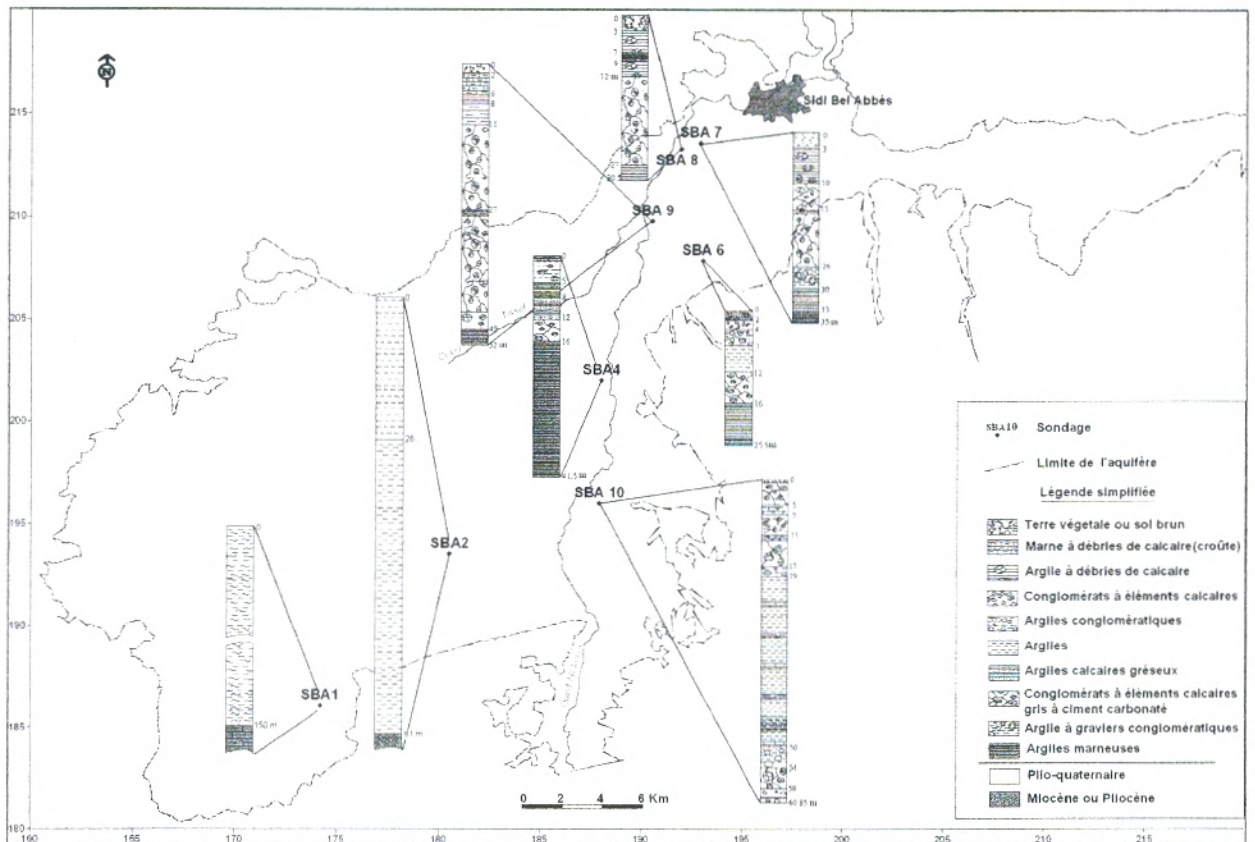


Figure 10 : Coupes schématiques des forages réalisés en 1972 par B. SOURISSEAU.

I-1. Cartographie du mur du remplissage du Plio-quaternaire :

Nous nous sommes efforcés de reconstituer la morphologie générale du mur du terrain plio-quaternaire, afin d'estimer l'épaisseur de l'aquifère. Le Miocène argilo-marneux est le niveau lithologique le plus vraisemblable pour représenter le substratum de l'aquifère.

Après interpolation par krigeage on obtient la carte de la figure 11. La surface du mur montre une pente sud-ouest extrêmement faible, d'environ $6.4 \cdot 10^{-3}$.

I-2. Cartographie du toit de l'aquifère :

Nous avons utilisé le maximum de données pour l'interpolation par krigeage, pour reconstituer une carte topographique adaptée à nos besoins (figure 12).

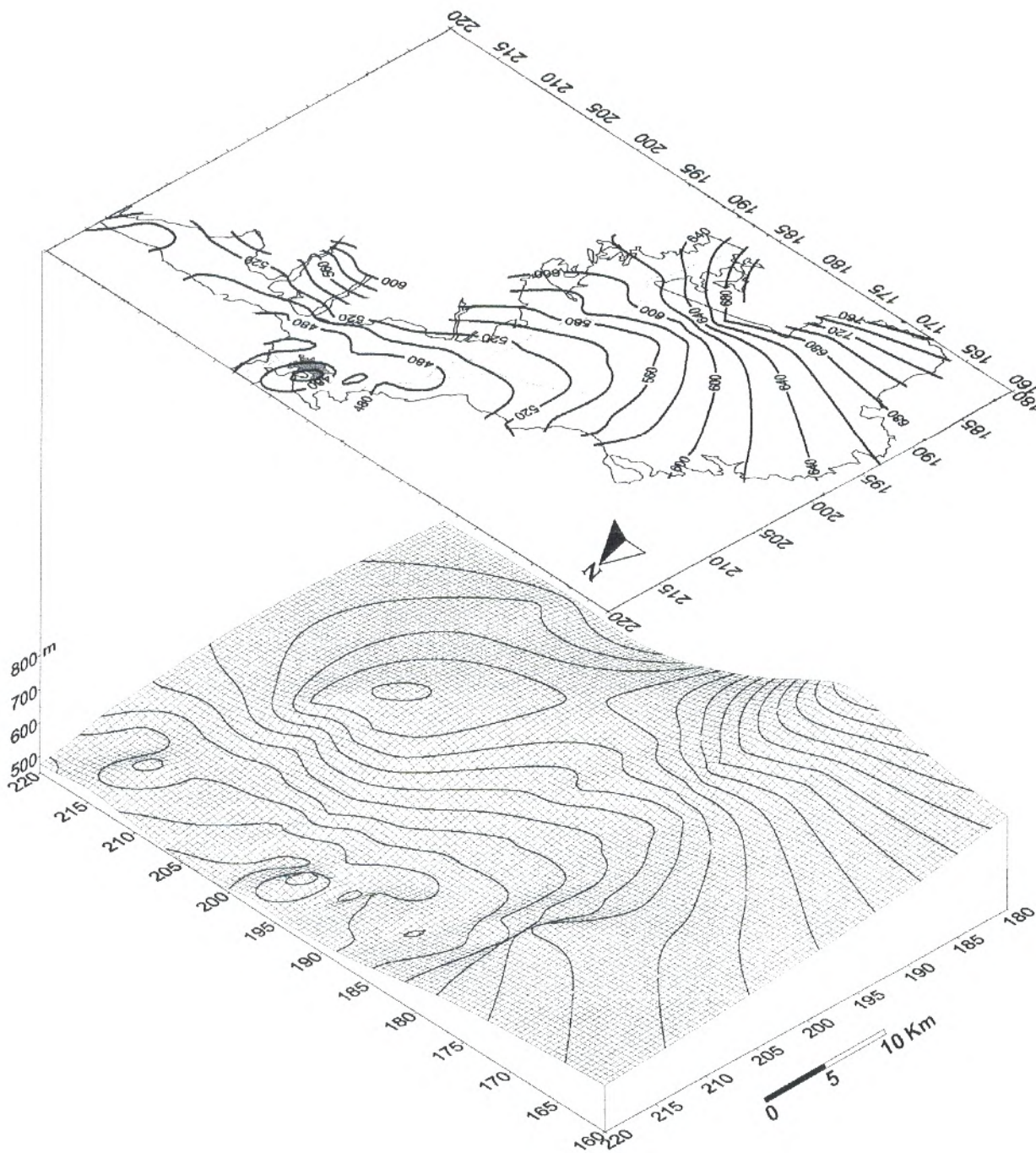


Figure 11 : Présentation, en 3D, du mur du remplissage plio-quaternaire.

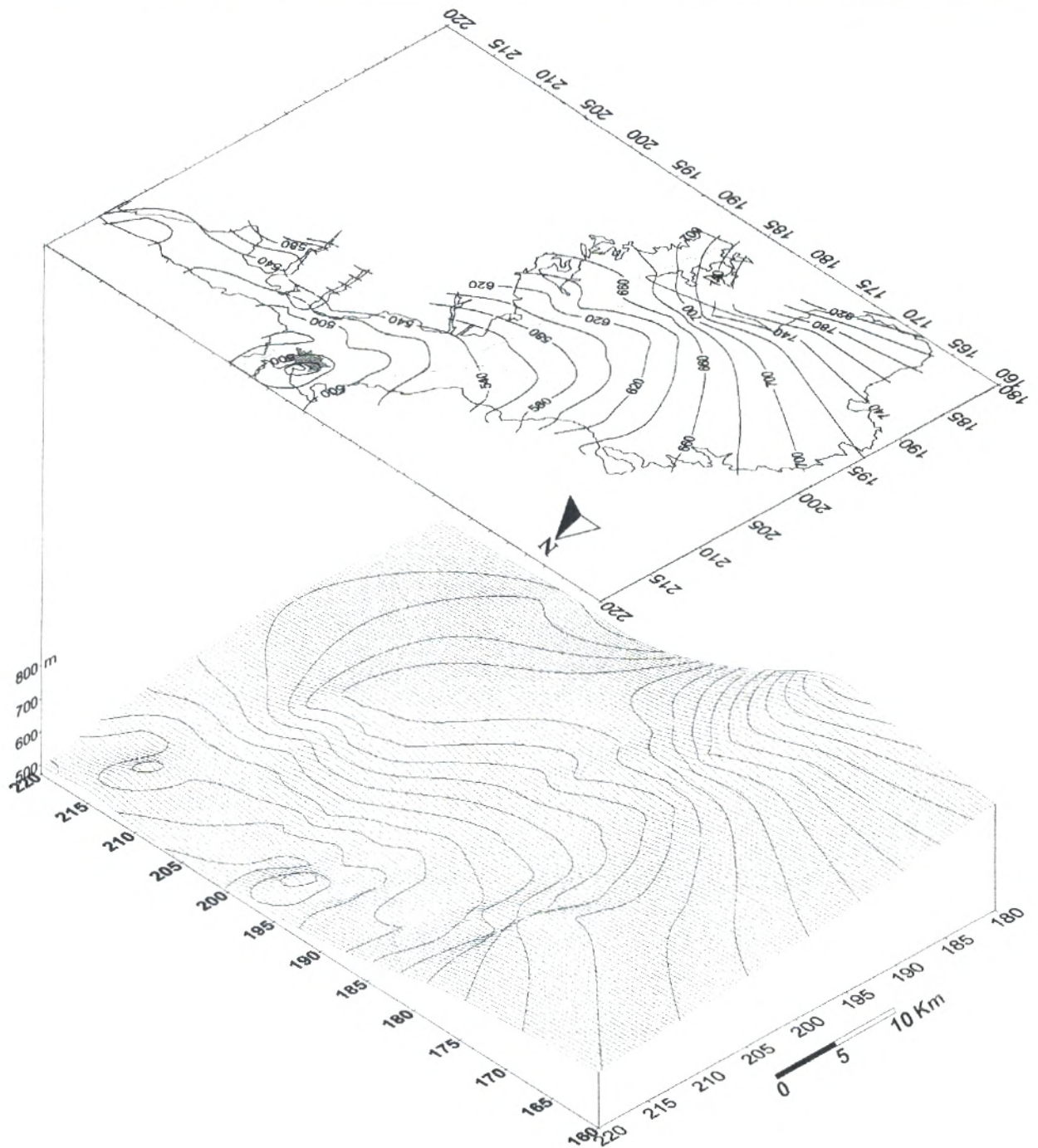


Figure 12 : Présentation, en 3D, du toit du remplissage plio-quadernaire.

I-3. Carte des isopaches des conglomérats plio-quadernaire :

Une cartographie des isopaches du chenal conglomératique indique un épaissement concentrique en cuvette du chenal qui est étiré selon une direction nord-sud. En son centre l'épaisseur des conglomérats ne dépasse pas 20 mètres (figure 13) (Annexe 4).

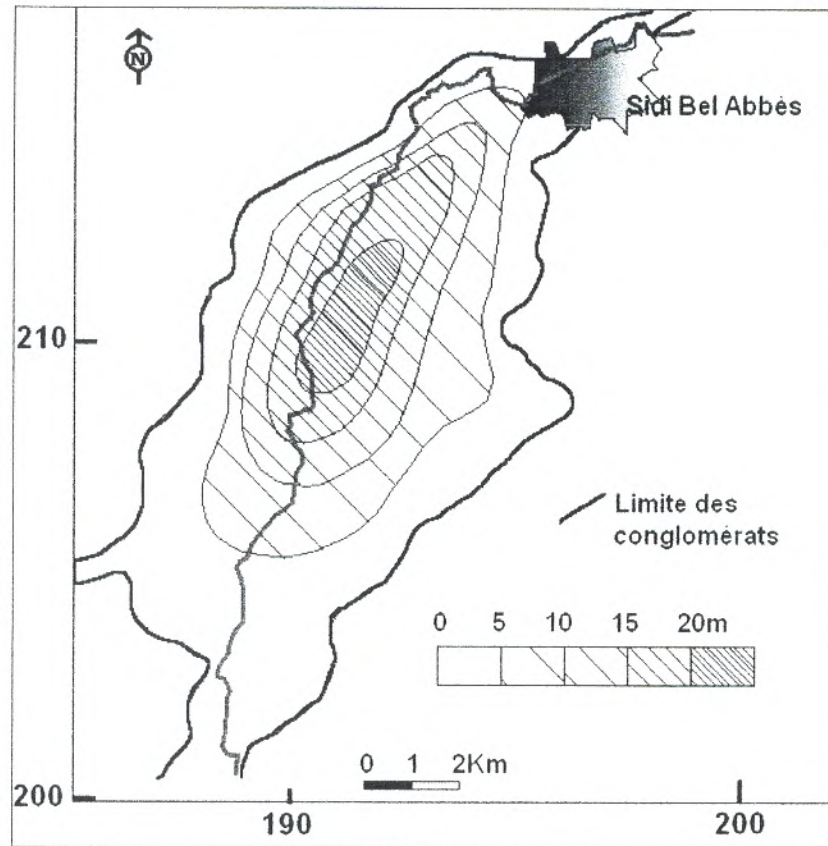


Figure 13 : Carte des isopaches des conglomérats plio-quaternaires. (B. SOURISSEAU, 1973) (digitalisée par CorelDraw 12.0 Graphic)

II- Cartes piézométriques :

Nous avons réalisé plusieurs cartes piézométriques synthétiques de la nappe phréatique en se basant sur les données piézométriques fournies par l'ANRH d'Oran (1971), SOURISSEAU (1973) et LEBID (1989 et 1996).

II-1. Carte piézométrique (octobre/novembre 1971) (données ANRH) :

Nous avons tracé à l'échelle du $1/100.000^{ème}$, par krigeage, une carte isopiézométrique de la nappe (figure 14).

II-1-1. Schéma général :

La nappe est convergente vers un seul exutoire dans la Mekerra au lieu dit Le Rocher. Sa profondeur moyenne par rapport au sol est de l'ordre de 15 à 20 mètres avec toutefois des zones moins profondes (moins de 10 m) le long des oueds Lamtar et Tissaf, au sud-ouest de Sidi Bel Abbès, Belarbi, Sidi Lhassen et Tabia, et des zones plus profondes (environ 30 m) sous les reliefs de la plaine (A. BEKHDADI).

Les courbes piézométriques permettent de fixer une ligne des partage des eaux d'une direction nord-sud, située à l'ouest de la plaine et passant à quelques mètres de Ben Badis et Hassi Zahana.

La carte montre trois directions d'écoulement :

- Une direction générale sud-ouest nord-est dans la majeure partie de la plaine ;
- Une direction est-ouest dans la vallée de Caïd Belarbi- Mostapha Ben Brahim ;
- Une direction est-ouest de Aïn Tallout, Ben Badis et Hassi Zahana vers la limite ouest.

II-1-2. Zones d'alimentation :

La hauteur piézométrique est maintenue élevée dans le sens de l'écoulement. Ces zones correspondent aux secteurs suivants :

- Ecoulement divergent de deux nappes provenant des calcaires de l'Eocène aux environs de Sidi Ali Boussidi et drainées par l'oued Annefress.
- Nappe divergente provenant des calcaires sub-affleurants des Monts de Tlemcen dans la région de Chitouane.
- Dans les environs de Sidi Ali Ben Youb, une alimentation par les aquifères adjacents ; soit par infiltration latérale directe dans les alluvions des eaux provenant des calcaires ; soit par l'intermédiaire de sources (Aïn Skrouna et Mekareeg) dont les eaux s'infiltrent ensuite dans les alluvions. Cette alimentation est masquée par le drainage de l'oued Mekerra.
- Dans la forêt de Tenira, l'avancée des courbes isopiézométriques est due à la présence de petites nappes perchées.
- Deux petites nappes divergentes d'importance réduite proviennent des calcaires de l'Aptien à Belarbi et des environs de Gouecem (B. SOURISSEAU, 1973).

II-1-3. Zones de drainage :

La hauteur piézométrique est baissée ce qui donne à la nappe une surface concave. Le phénomène de drainage le plus remarquable est observé au Rocher par rétrécissement de la section perméable du réservoir. Les oueds déforment la surface piézométrique de la nappe par drainage (figure 15).

II-1-4. Gradients

Les forts gradients hydrauliques intéressent les zones de bordures où la nappe est rapidement drainée (Sidi Ali Boussidi, Ben Badis, Chitouane, forêt Messer). Les gradients moyens intéressent les zones intermédiaires entre les interfluves et les zones d'accumulation ou d'alimentation (Le Rocher, Tinguemar, Sidi Yacoub, Bedrabine, Tabia).

Les faibles gradients sont dus soit à l'accumulation des eaux souterraines, soit à un mauvais drainage (Vallée de Belarbi). La plus caractéristique est la zone située entre Sidi Bel Abbès et Sidi Khaled dont la faiblesse des gradients est due à la fois aux fortes perméabilités, à la convergente des écoulements et au drainage de l'oued Mekerra qui sur-impose son propre gradient à celui de la nappe (les environs de Sidi Bel Abbès, entre Sidi Ali Boussidi et Lamtar, entre Bou Khanefis et Tabia et la vallée de la Mekerra de Sidi Ali Ben Youb à Tabia).

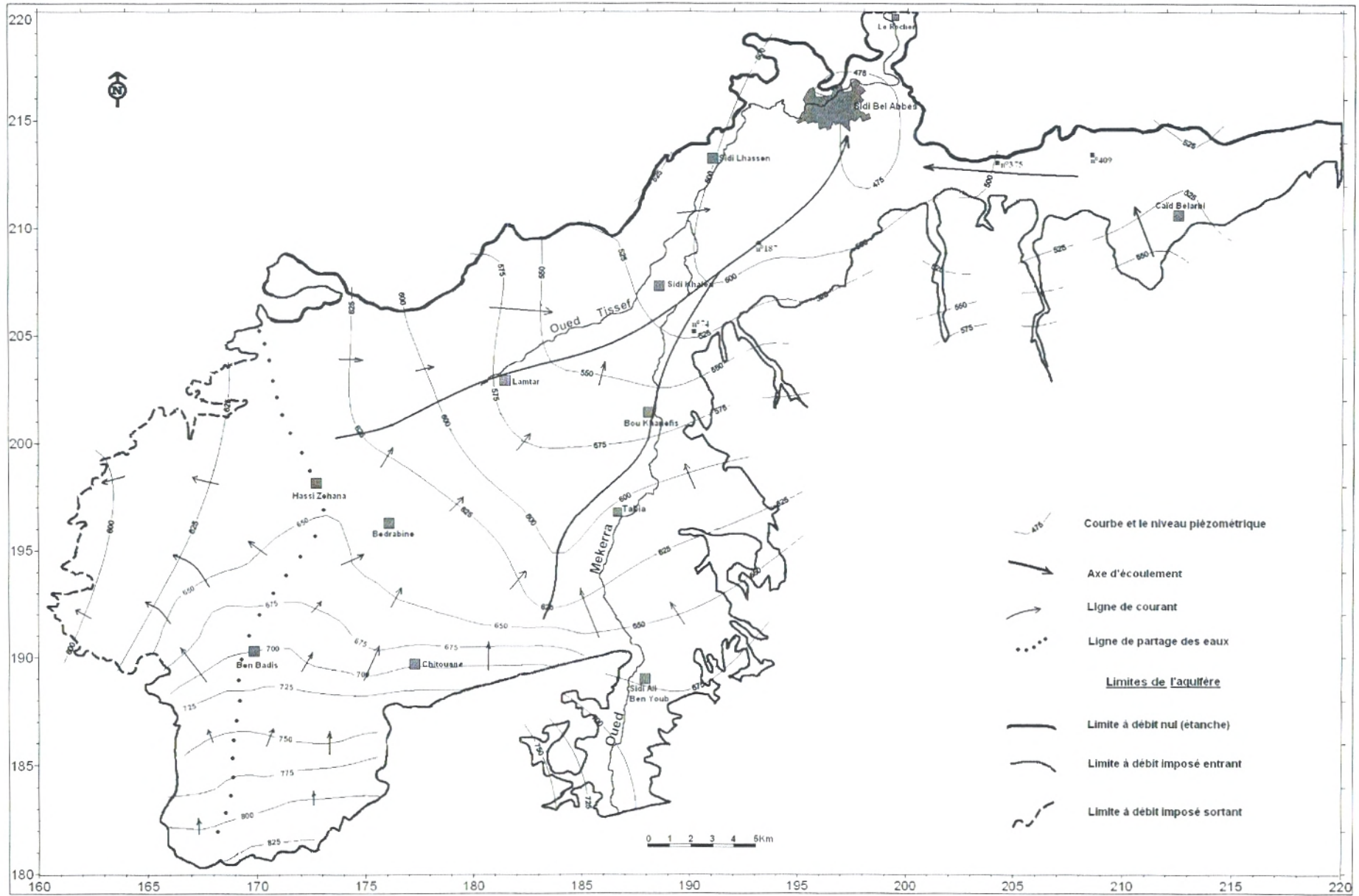


Figure 14 : Carte piézométrique de la nappe libre plio-quaternaire de Sidi Bel Abbès (oct. /nov. 1971).

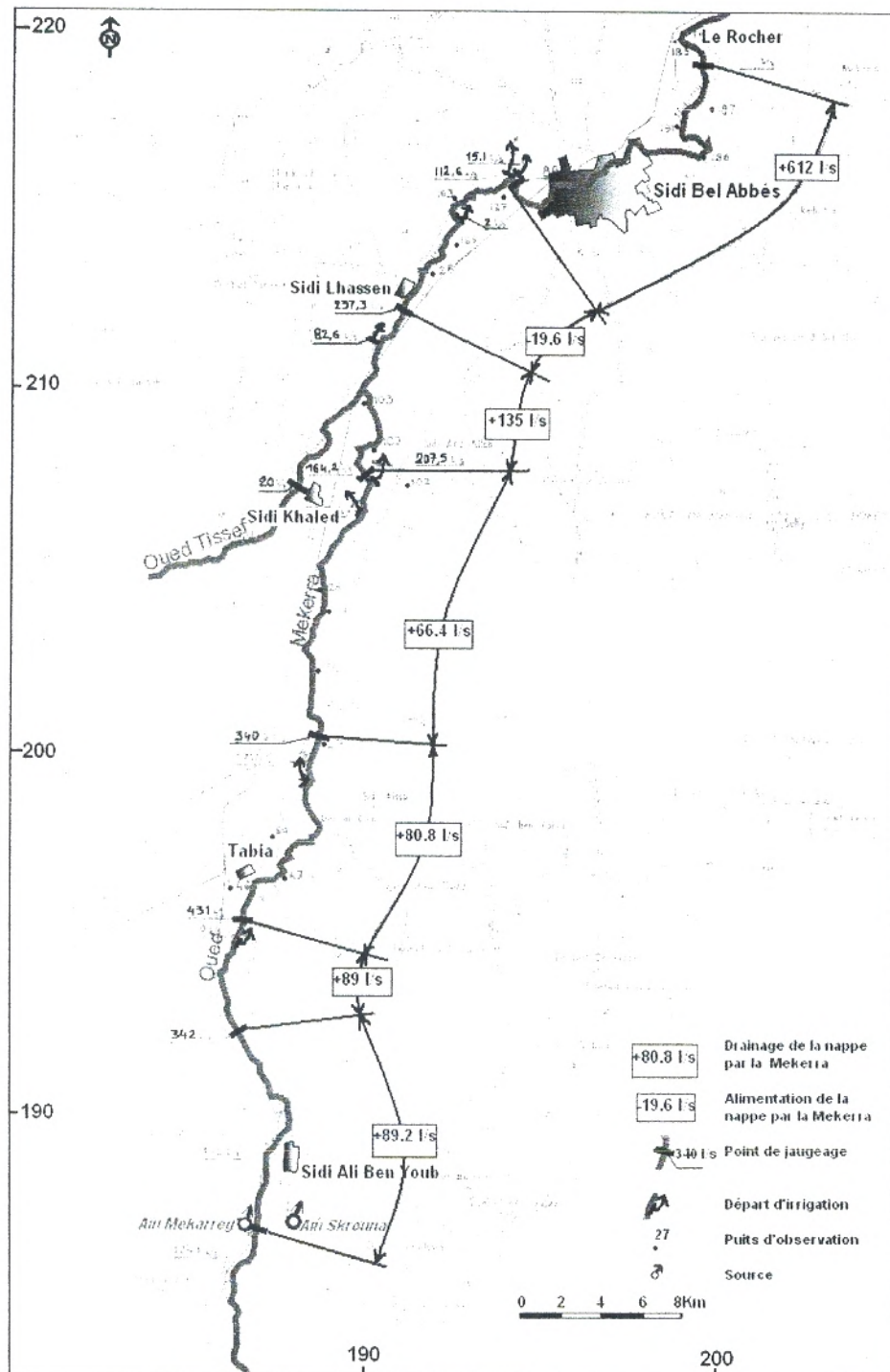


Figure 15 : Alimentation et drainage de la nappe par l'oued Mekerra. (B. SOURISSEAU, 1973)

II-2. Carte piézométrique (mai 1989, nov. 1996) :

Les cartes obtenues des hautes eaux (mai 1989) et des basses eaux (nov. 1996) (figure 16 et 17) montrent un écoulement de la nappe du sud vers le nord et du sud ouest-nord est, un rassemblement des eaux s'effectue des bordures vers l'aval de la plaine. En période des basses eaux des dépressions locales apparaissent sur toute l'étendue de la nappe plio-quaternaire.

L'alimentation par les calcaires du sud ainsi que par les grès du Pliocène continental situé à l'ouest ressort nettement sur les cartes piézométriques correspondant aux deux périodes (H. LEBID, 2001).

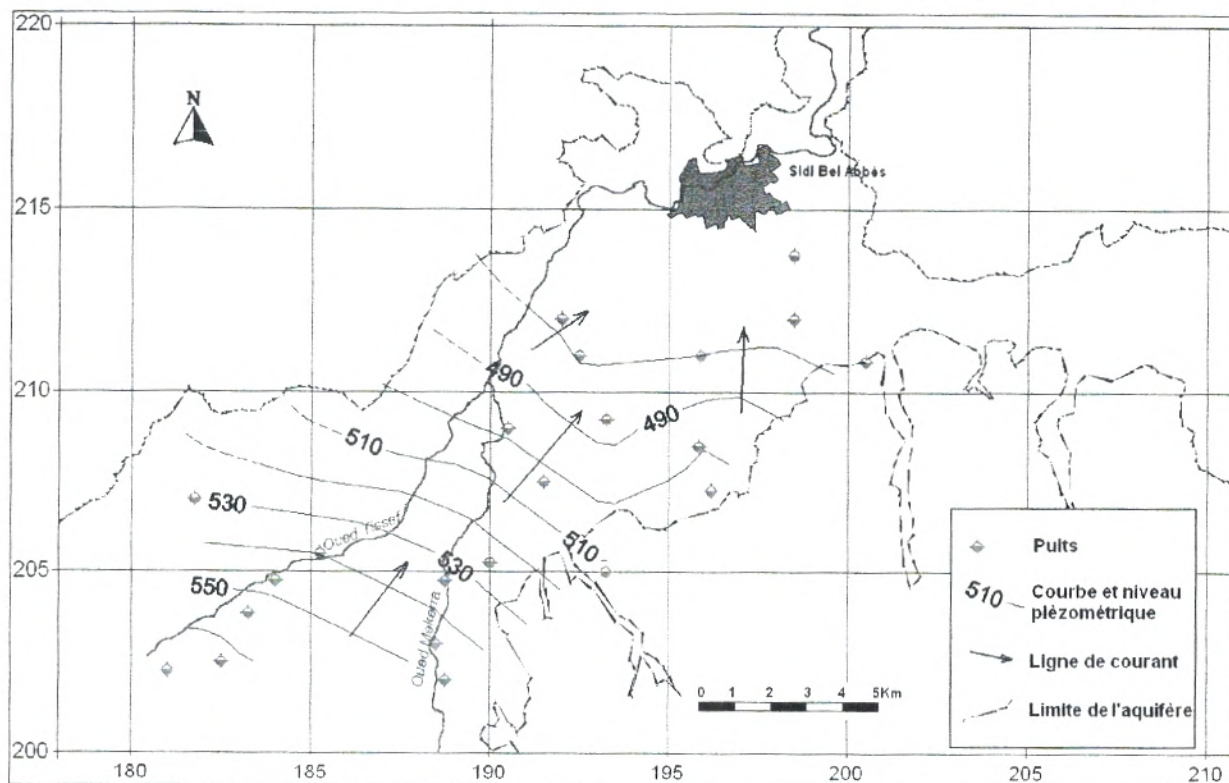


Figure 16 : Carte piézométrique de la nappe de la plaine de Sidi Bel Abbès (mai 1989).

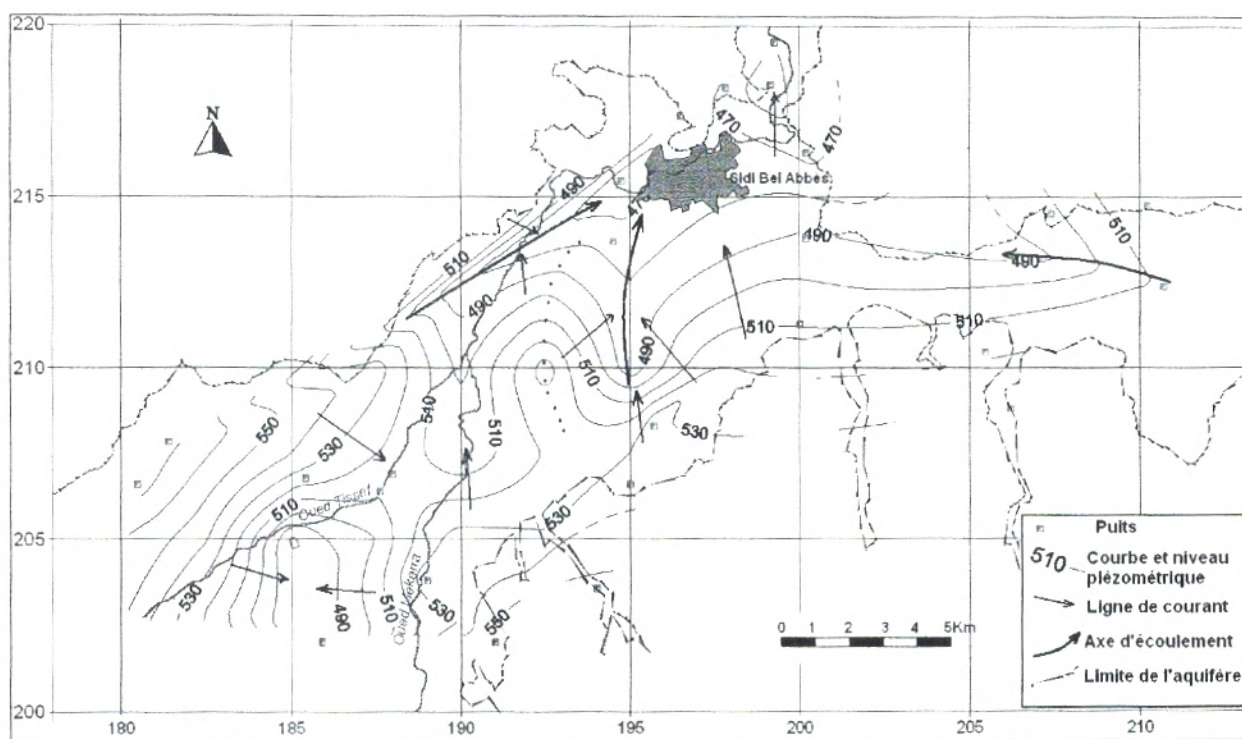


Figure 17 : Carte piézométrique de la nappe de la plaine de Sidi Bel Abbès (novembre 1996).

III- Propriétés hydrauliques

III-1. Fluctuations de la nappe :

Les fluctuations du niveau statique de deux puits situés au centre de la plaine (n°74 et n°187) et deux autres au niveau de la vallée de Belarbi (n°375 et n°409) représentées sur la figure 18, indiquent que le niveau piézométrique a sensiblement baissé à partir de 1975, qui est expliqué par le déficit pluviométrique important. Il y a lieu de noter aussi que cette variation est plus sensible au centre de la plaine, près de l'axe de drainage.

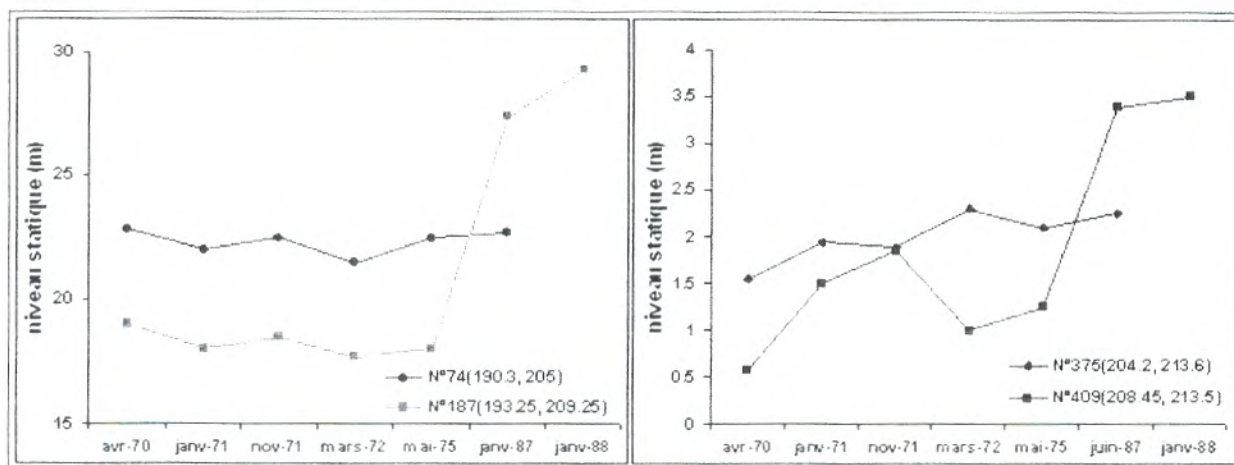


Figure 18 : Fluctuation de niveau statique dans quelques puits de la nappe de la plaine de Sidi Bel Abbès.

Des niveaux de 20 puits témoins ont fait l'objet d'un suivi pendant deux ans (d'avril 70 à mars 72) montrent que les fluctuations annuelles dépassent rarement 3 mètres d'amplitude et la nappe se recharge rapidement à chaque période de crue proportionnellement à la pluviosité. (B. SOURISSEAU, 1973)

III-2. Caractéristiques hydrodynamiques :

Les mesures des paramètres hydrodynamiques ont été effectuées sur les forages équipés de piézomètres et les puits existants, trop souvent imparfaits. Les valeurs ont été calculées par B. SOURISSEAU et présentées dans le tableau en annexe 4.

III-2-1. Le coefficient d'emmagasinement :

Les fortes valeurs des coefficients d'emmagasinement correspondent aux zones de bonne transmissivité. Les zones à emmagasinement important ($S = 20\%$) sont : vallée de Bedrabine ; oued Lamtar ; vallée de Tabia ; vallée de Sidi Ali Ben Youb. D'autres zones présentent des valeurs d'emmagasinement de l'ordre de 10% : vallée de Tatfamane ; le long de l'oued Mekerra ; vallée d'oued Annfress ; une partie de la vallée de Caïd Belarbi. Partout ailleurs les valeurs de S sont inférieures (2 à 3%).

III-2-2. La transmissivité :

Les valeurs de bonne transmissivité dépendent de la nature géologique des terrains :

- Alluvions grossières de galets et chenal conglomératique : $5 \cdot 10^{-3}$ à 10^{-2} m²/s.
- Conglomérats pliocènes : $5 \cdot 10^{-4}$ à 10^{-3} m²/s.
- Alluvions argilo-sableuses : 2 à $3 \cdot 10^{-4}$ m²/s.
- Grès et sables argileux : 10^{-4} m²/s.
- Calcaires éocènes : 10^{-3} m²/s.

La carte des transmissivités (figure 19) (Annexe 5) met en évidence deux chenaux aquifères souterrains :

- Un large chenal traversant toute la plaine le long de l'oued Mekerra, presque interrompu près de Bou Khanefis.
- Un chenal nord-est sud-ouest suivant le cours des oueds Bedrabine et Tissaf et rejoignant le premier chenal près de Sidi Khaled.

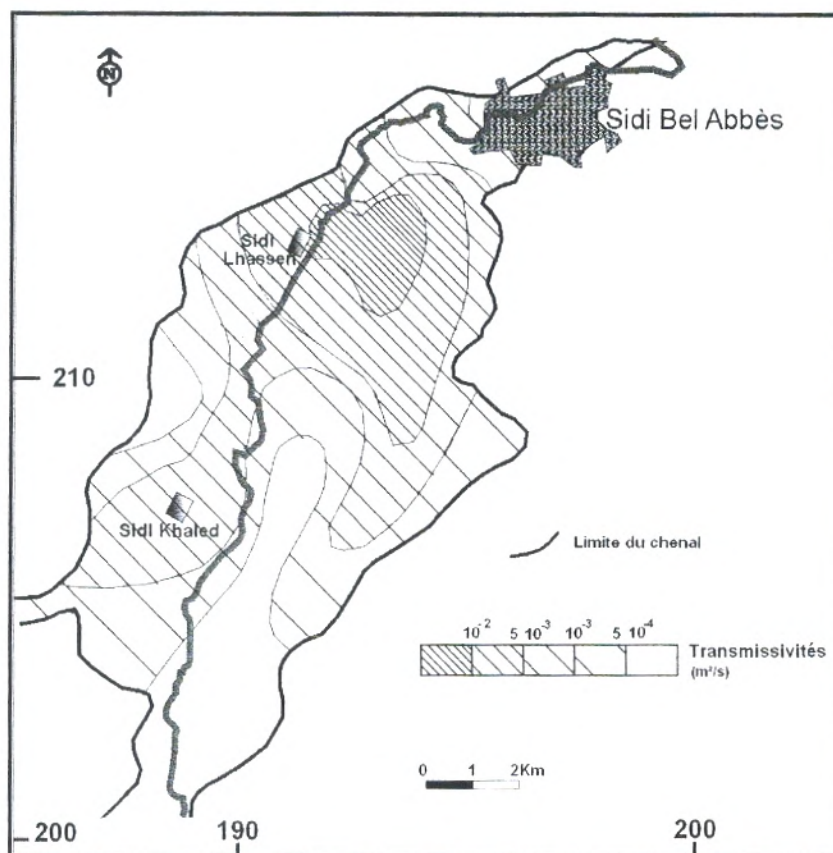


Figure 19 : Carte des transmissivités du chenal conglomératique.
(B. SOURISSEAU, 1973) (digitalisée par CorelDraw 12.0 Graphic)

IV- Bilan hydraulique :

Un bilan hydraulique a été calculé par SOURISSEAU, utilisant l'équation suivante :

$$P = ETR + Q_n + Q_{rn} + Q_e \pm dV + Q_{rn}' \pm \Delta$$

Avec

P : pluviosité ;

ETR : évapotranspiration réelle ;

Q_n : écoulement souterrain, quantité d'eau qui sort par la nappe à l'exutoire de la zone étudiée ;

Q_{rn} : écoulement superficiel, quantité d'eau évacuée par les oueds ;

Q_e : débits extraits, par puits, forages ou sources pour satisfaire aux besoins de l'irrigation, de l'industrie et des alimentations en eau potable ;

dV : variation des réserves de la nappe, quantité d'eau qui a été restituée ou emmagasinée par la nappe entre le début et la fin du cycle hydrogéologique ;

Q_{rn}' : débits des prises au fil de l'eau sur les oueds ;

Δ : différence qui équilibre le bilan entre les entrées et les sorties.

En fait, une partie des eaux épanchées sur la plaine est récupérée par la nappe et aux quelles s'ajoutent des apports en provenance du sud, à savoir :

- Q_n : débit souterrain à l'entrée de la plaine à Sidi Ali Ben Youb ;
- Q_{rn} : réinfiltration des débits extraits ;
- Q_{rn}' : réinfiltration des débits dérivés ;
- Q_{nn} : apports par les sources de Sidi Ali Ben Youb ;

Donc l'équation définitive proposée est :

$$P + Q_n + Q_e' + Q_{rn}'' + Q_{nn} = ETR + Q_n + Q_{rn} + Q_e \pm dV + Q_{rn}' \pm \Delta$$

Ce bilan a été calculé sur la superficie du bassin versant hydrogéologique $S = 1145 \text{ Km}^2$, pendant un intervalle de 24 mois du 1 avril 1970 au 31 mars 1972 (figure 20).

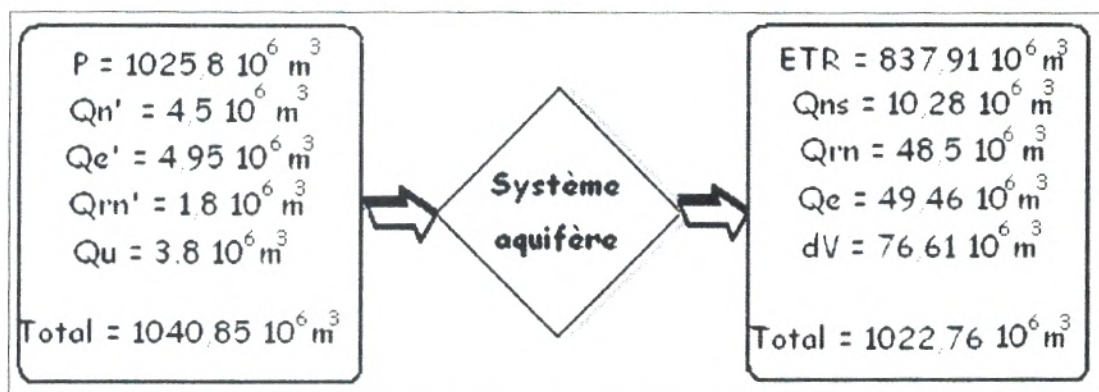


Figure 20 : Bilan hydraulique de la nappe de la plaine de Sidi Bel Abbès entre 01/04/70 et 31/03/72. (B. SOURISSEAU, 1973)

CONCLUSION

La nappe superficielle de la plaine de Sidi Bel Abbès est très hétérogène du fait des nombreuses variations de faciès des terrains aquifères, qui entraînent des modifications de pente, d'écoulement, de réserve et de perméabilité. Elle représente une unité à écoulement convergent vers Sidi Bel Abbès caractérisé par une piézométrie relativement homogène. Elle est alimentée par infiltration directe saisonnière et par les nappes de bordure et drainée par des chenaux conglomératiques dans la zone axiale.

Une cartographie des paramètres hydrodynamiques et géométriques de l'aquifère paré donc difficile, pour ce faire, nous baserons sur la méthode géostatistique afin de résoudre le problème de l'interpolation et l'extrapolation.

CHAPTER II

GEOSTATISTIQUE

INTRODUCTION

La géostatistique est "*l'étude des phénomènes qui fluctuent dans l'espace et/ou le temps*" (DEUTSCH et JOURNAL, 1992, in F. GAGON 1998). La base de la géostatistique repose sur la théorie des variables régionalisées, qui s'applique particulièrement bien aux phénomènes naturels tels que les écoulements souterrains.

La modélisation de l'écoulement des eaux souterraines est un domaine essentiel de l'hydrogéologie dans lequel il s'effectue beaucoup de recherches actuellement. Les paramètres importants qui définissent les caractéristiques d'un aquifère sont généralement connus à seulement quelques points répartis sur l'ensemble du domaine d'étude et sont aussi sujets à des imprécisions. On cherche donc à estimer ces paramètres sur l'ensemble du domaine à partir d'une information partielle, et ce dans le but de déterminer le plus précisément possible les caractéristiques de l'écoulement souterrain.

I- Théorie de la géostatistique :

I-1. Le variogramme :

I-1-1. Définition :

L'outil de base de la géostatistique est le variogramme. L'idée fondamentale du variogramme est que la variance de la différence entre deux observations situées dans un champ donné ne dépend que de la distance entre ces deux observations et de l'orientation dans l'espace, mais pas de la position de la paire d'observations dans le champ.

Le variogramme expérimental (figure 21) est défini comme suit (F. GAGON 1998) :

$$\gamma_e = \frac{1}{2N(h)} \sum_{(i,j) \in D(h)} [Z(x_i) - Z(x_j)]^2$$

Où

N (h) : Nombre de paires dont les points sont espacés de la distance h.

D (h) : Ensemble des paires dont les points sont espacés de la distance h.

Le variogramme théorique se définit comme suit :

$$\gamma(|h|) = 0.5 \text{ Var } [Z(x) - Z(x+h)]$$

Où

x : Vecteur de coordonnées

h : Vecteur de déplacement (distance)

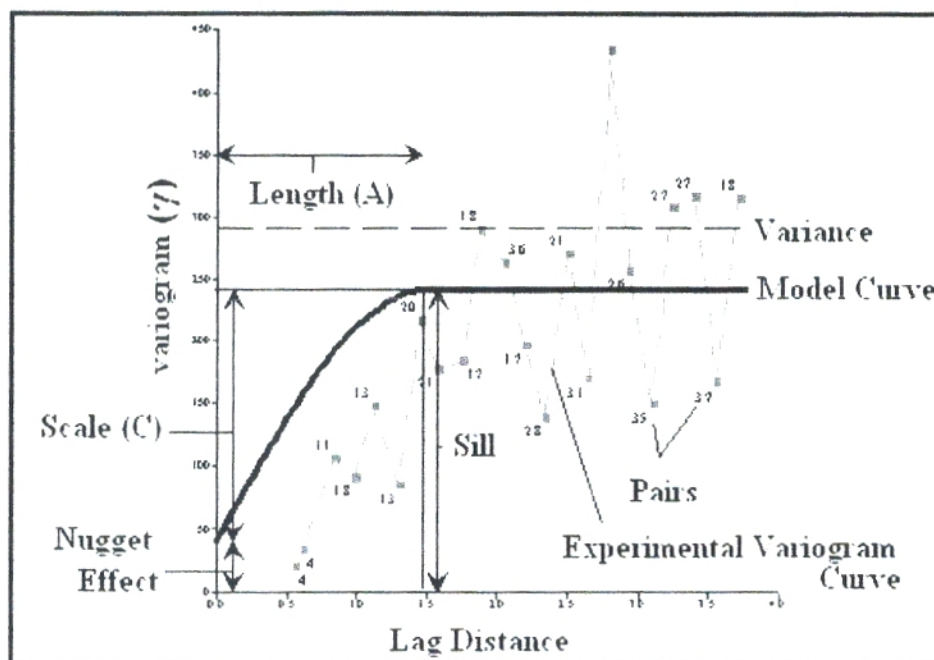


Figure 21 : Variogrammes expérimental et théorique (Source Surfer Help)
 Length (range) = portée ; Nugget Effect = effet pépite ; Sill : variance totale ; Scale : variance de structure.

I-1-2. Les différents modèles du variogramme et leurs équations :

Les variogrammes expérimentaux peuvent être ajustés par différents modèles théoriques dont les plus communs sont les modèles sphériques, exponentiels et gaussiens (figure 22).

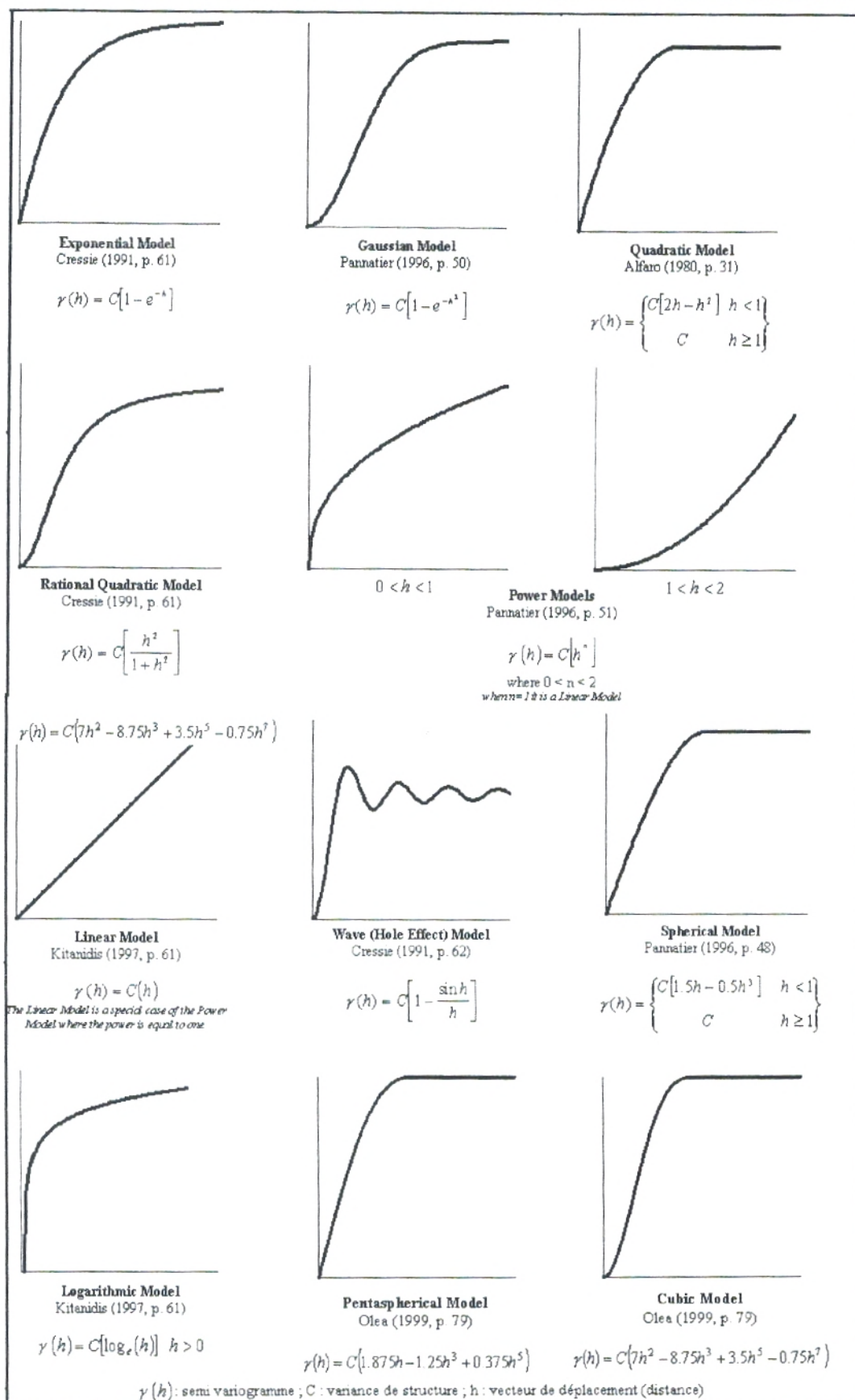


Figure 22 : Les modèles des variogrammes disponibles au Surfer et leurs équations
(Source : Surfer Help)

I-2. Le krigeage

I-2-1. Définition :

« Le problème du krigeage consiste à trouver la meilleure estimation possible de la teneur d'un panneau, compte tenu de l'information disponible, c'est-à-dire des teneurs des différents échantillons qui ont été prélevés, soit à l'intérieur, soit à l'extérieur du panneau que l'on veut estimer. » (G. MATHERON, 1969).

Le Krigeage est une interpolation qui estime les valeurs aux points non échantillonnés par une combinaison des données. Les poids des échantillons sont pondérés par une fonction de structure qui est issue des données. On tient ainsi compte des distances, des valeurs et des corrélations. La fonction n'est pas fixée à priori mais suite à l'analyse du variogramme. On considère que la valeur estimée en un point est le produit d'un processus sous-jacent, il fournit une variance d'estimation contrairement aux autres approches. Elle permet d'appréhender la structure spatiale du phénomène étudié. Le Krigeage s'inscrit donc dans une démarche d'analyse des données géostatistique. (L. DRAPEAU)

I-2-2. Les différents types de krigeage :

Il existe trois types de Krigeage univarié (i.e. à une seule variable) : le Krigeage simple, le Krigeage ordinaire et le Krigeage universel. La différence entre ces types d'estimation réside dans la connaissance de la statistique de la variable à interpoler :

- Krigeage simple : variable stationnaire de moyenne connue ;
- Krigeage ordinaire : variable stationnaire de moyenne inconnue ;
- Krigeage universel : variable non-stationnaire (qui contient une tendance). (Y. GRATTON, 2002)

Le Krigeage ordinaire, aussi appelé Krigeage ponctuel par certains auteurs, est le plus fréquemment utilisé.

Sous forme matricielle, le krigeage ordinaire prend la forme suivante (F. GAGNON, 1998) :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{1} \\ \mathbf{1}' & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda} \\ \boldsymbol{\mu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{k} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Où

\mathbf{K} : Matrice des (n x n) covariances entre les observations

$\mathbf{1}'$: Vecteur colonne de taille n

$\boldsymbol{\lambda}$: Vecteur des poids du krigeage

\mathbf{k} : Vecteur des (n) covariances entre les observations et le point à estimer.

$\boldsymbol{\mu}$: Multiplicateur de Lagrange

La solution du système de krigeage ordinaire est généralement exprimée sous la forme simplifiée suivante :

$$\mathbf{K} \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{k}$$

$$\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{k}$$

En général, le krigeage présente un effet écran. Les observations qui sont situées près du point à estimer reçoivent des poids plus importants.

I-3. La validation croisée :

La pertinence d'un modèle géostatistique est souvent analysée par « validation croisée ». Cela consiste à effacer certaines données pour en effectuer l'estimation à partir des données conservées. L'erreur d'estimation et l'erreur quadratique « expérimentale » sont alors comparées aux prévisions du modèle géostatistique suivant différents critères (C. BERNARD-MICHEL, 2006).

II- Applications :**II-1. Analyse variographique :****II-1-1. Description des données :**

Certaines données relatives à la nappe de la plaine de Sidi Bel Abbès seront traitées grâce aux méthodes d'estimation apportées par les outils de la géostatistique linéaire. Les perméabilités, les transmissivités, les altitudes du sol et la piézométrie sont les paramètres examinés dans cette partie par le logiciel Surfer 8.0.

Une base de données formée par une centaine de sondages a été collectée. Ces données qui ont été cartographiées (figures : 23, 24, 25 et 26) montrent la répartition des valeurs expérimentales dans la zone d'étude.

II-1-2. Elaboration des variogrammes :

L'application du variogramme suppose la connaissance du phénomène étudié en certains points ou en tout point d'un maillage du domaine en question. Dans cette étude, l'analyse portera sur des valeurs ponctuelles des paramètres hydrogéologiques cités ci-dessus.

L'effet de pépite est nul dans tous les variogrammes, ce qui traduirait un caractère continu et régulier de ces phénomènes (figure 27).

Les variogrammes de la perméabilité et la transmissivité au delà d'une distance h et après une croissance plus ou moins rapide atteignent un palier ($h =$ la portée) ; théoriquement deux points séparés par $h >$ portée sont non corrélés (L. DRAPEAU). Par contre, les variogrammes du niveau du sol et de la piézométrie montrent une bonne corrélation même à grande distance.

CONCLUSION

L'application des techniques géostatistiques nous a permis d'utiliser au mieux les données disponibles et d'obtenir des résultats satisfaisants.

Les valeurs krigées obtenues dans cette partie nous ont permis aussi de comprendre au mieux la variation spatiale des paramètres étudiés. Pour la modélisation mathématique, les paramètres hydrodynamiques doivent être connus dans tout le domaine, ce qui est fourni par l'étude géostatistique.

MODELISATION

CHAPITRE IV

INTRODUCTION

Une modélisation hydrodynamique de la nappe de la plaine de Sidi Bel Abbès est nécessaire pour une compréhension du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère plio-quaternaire voir son hétérogénéité.

Les objectifs de cette modélisation sont la connaissance de la distribution des perméabilités et des coefficients d'emmagasinement et la réalisation des simulations serviront plus tard à la gestion et la protection des ressources en eau.

I- Théorie sur la modélisation mathématique

I-1. Principes de discrétisation

On utilise généralement un découpage de l'aquifère à étudier en mailles homogènes de formes variables dans lesquelles les différents éléments caractéristiques ont des valeurs moyennes :

- Transmissivité – T –
- Coefficient d'emmagasinement – S –
- Débit prélevé ou injecté – Q –
- Infiltration par la pluie efficace – Inf –
- Niveau piézométrique ou charge – H –

On applique à chaque maille les lois fondamentales de l'hydrodynamique. On mène les calculs d'une maille à l'autre par approximations successives de manière itérative. Partant d'un état initial des charges dans les mailles, on les recalcule les unes après les autres plusieurs fois avec les charges des mailles voisines et les conditions de débit, d'infiltration et de charges imposées dans certaines mailles situées en limite. On arrête les itérations lorsqu'on obtient une quasi stabilisation des charges calculées dans toutes les mailles.

Il est possible, au cours du calcul, de tenir compte des variations de transmissivité avec la hauteur d'eau (nappe libre), de l'assèchement ou du débordement en d'autres points (rivières, gravières, etc....).

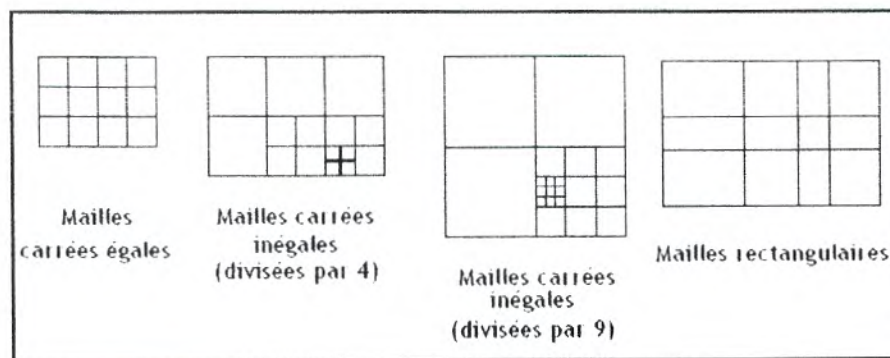


Figure 33 : Taille et forme des mailles (P.A. ROCHE, 2005)

La taille des mailles dépend de plusieurs facteurs :

- De la précision souhaitée sur les calculs,
- Des contours plus ou moins sinueux des limites,
- Du nombre et de l'éloignement des singularités (puits),
- Mais aussi de la capacité de l'ordinateur.

Il est évident que pour une même précision il y aura un plus grand nombre de mailles carrées égales que de mailles inégales, choisies plus petites dans les zones sensibles. Mais un modèle à mailles égales est beaucoup plus facile à utiliser. Suivant le problème, la dimension des mailles peut être de l'ordre de 5 mètres (pour l'étude d'une digue ou d'un champ captant) à 5 Km (pour

l'étude d'une nappe régionale). En pratique, on essaiera de limiter le nombre de mailles à une valeur comprise entre 1000 et 10000 mailles (par couche).

I-2. Les Limites

La géométrie de la nappe est définie (en chaque point) par :

- Le substratum (mur) : le fond de la ou des couche(s) aquifères,
- Le toit : la limite supérieure de l'aquifère. Dans certains cas cependant si on est assuré que l'aquifère sera toujours en charge au cours des exploitations, ou bien si la variation de hauteur mouillée est faible, on peut se contenter de déterminer l'épaisseur de l'aquifère.
- Les limites latérales peuvent être :
 - Des limites naturelles à *potentiel imposé* (niveau imposé). En ces limites, le niveau est fixé (par un cours d'eau, par la mer, etc...) et le modèle calcule le débit d'échange qui permet d'imposer ce niveau (le débit que la rivière fournit à la nappe ou au contraire que la nappe fournit à la rivière ; le débit de la nappe qui se perd dans la mer, etc. ...)
 - Des limites naturelles imperméables : collines, zones argileuses. En ces limites, l'aquifère se termine, mais un débit constant peut arriver (ou partir) par exemple par ruissellement sur un coteau. Parfois ces limites sont appelées à *débit imposé*, car le débit y est constant (ou nul).
 - Des limites arbitraires : il est indispensable d'étudier une nappe dans son ensemble. Dans certains cas cependant, quand la nappe est très étendue, on pourra n'en étudier qu'une partie en prenant soin d'isoler une zone assez grande pour que les modifications ou les sollicitations (pompages) qu'on veut faire subir à la nappe aient des influences négligeables sur les limites introduites dans le modèle.

On choisira donc une limite :

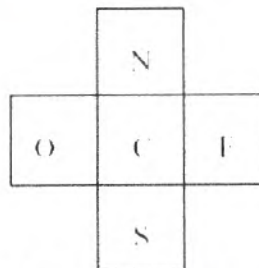
- soit le long d'une ligne de courant : le débit d'échange par cette limite sera alors nul,
- soit le long d'une ligne équipotentielle sur laquelle on impose la charge mesurée sur le terrain. Le modèle donne alors le débit d'échange par cette limite. Si cette limite est suffisamment éloignée des exploitations prévues (captage), on peut supposer que ce débit ne changera pas. Pour simuler les exploitations prévues, on mettra alors une limite imperméable et on imposera le débit calculé précédemment (P.A. ROCHE, 2005).

I-3. Quelques équations discrétisées et leur résolution

I-3-1. Les équations :

On peut appliquer les lois fondamentales de l'hydrodynamique directement à tout élément d'aquifère qu'on considère comme homogène et donc aux mailles.

- La discrétisation se fait généralement par la méthode des différences finies. Si les mailles sont carrées l'équation de l'hydrodynamique en régime permanent avec les hypothèses de Duperoy (vitesses horizontales) décrit le fait que le bilan d'échange est équilibré (P.A. ROCHE, 2005). On a alors :



$$Q + Inf + \sum T_{Ci} (H_i - H) = 0$$

Avec

T_{Ci} Transmissivité entre les mailles C et i.

L'équation d'équilibre à laquelle obéit toute maille est :

$$A \cdot S (H_{t-dt} - H_t) \cdot dt = Q - \text{Inf} - \sum_{i=1}^4 T_i (H_{t,i} - H_t)$$

Avec :

- A : aire de la maille (=dx² pour une maille carrée de côté dx) ;
- S : coefficient d'emmagasinement (libre ou captif, suivant le cas) ;
- H_t : charge à la date t ;
- t : temps ;
- dt : pas de temps ;
- i : numéro de la maille Nord, Sud, Est et Ouest ;
- Inf : infiltration.

I-3-2. La résolution :

En pratique les calculs se font par approximations successives. Partant d'un état initial des charges dans les mailles, on les recalcule toutes, les unes après les autres plusieurs fois, à partir des équations précédentes avec les charges des mailles voisines et les conditions de débit, d'infiltration et de charge imposée aux limites. On arrête le calcul lorsqu'on obtient une quasi stabilité des charges recalculées.

On peut tenir compte au cours du calcul des variations de transmissivité avec la hauteur d'eau (eau de nappe libre), de l'assèchement ou du débordement en certains points.

Les calculs en régime transitoire se font également par approximations successives avec un découpage en intervalles (subdivisions des pas de temps) en partant d'un état équilibré.

Pour toutes les méthodes de résolution, on donne sur la périphérie du modèle étudié (qui forme les limites du modèle) :

- soit les niveaux : le modèle calcule alors les débits qui transitent par cette limite,
- soit une perméabilité nulle : c'est une limite imperméable,
- soit (plus rarement) un débit d'échange imposé (entrant ou sortant).

I-4. Estimation des paramètres - Calibration

Dans la plupart des cas d'étude, la connaissance quantitative des propriétés de l'aquifère est le problème majeur lors de l'élaboration d'un modèle, à cause de l'insuffisante connaissance quantitative de la géologie, de l'hydrogéologie et des paramètres hydrodispersifs du milieu étudié. Ces constatations démontrent l'obligation de vérifier si les résultats d'un modèle sont réalistes ou non par rapport à la réalité. Cette procédure appelée **calibration** : elle consiste à minimiser la différence entre '**mesures et résultats**' par l'ajustement des données d'entrée (une période du passé dont les conditions initiales, les sollicitations et la réponse du système sont mesurées) jusqu'à ce que le modèle reproduise les conditions du champ mesuré avec un niveau de précision acceptable. (A. DASSARGUES, 1995)

I-5. Exploitation du modèle - Simulation

Après la calibration, le modèle est prêt à l'emploi pour des prévisions. Il a la capacité de calculer des extrapolations dont les résultats constituent une aide précieuse lorsque des décisions concernant des modifications de sollicitations de l'aquifère sont à prendre. Parmi les applications possibles des modèles d'écoulement (A. DASSARGUES, 1995) :

- **Etudes de bilans :**
 - Détermination des tendances régionales des écoulements dans le réservoir et les interactions avec les eaux de surfaces, les autres réservoirs, ... etc.

CHAPTER 1

CONTEXT GENERAL

- **Puits de pompage :**
 - Prédiction des effets du pompage sur la piézométrie et sur la suppression de certains flux ;
 - Détermination de périmètres de protection ;
 - Prédiction du mouvement de l'interface entre eau douce et eau salée ;
 - Prédiction de l'effet de l'épandage d'eau pompée lors de l'irrigation.
- **Changements dans la réalimentation de la nappe :**
 - Prédiction des effets dus à l'urbanisation ;
 - Prédiction des changements résultants de l'irrigation ou de l'infiltration en provenance d'un nouveau canal ;
 - Analyse à long terme des influences des tendances climatiques sur les niveaux piézométriques et la distinction des effets dus aux facteurs anthropiques.
- **Estimation des paramètres :**
 - Précision de la distribution régionale des paramètres hydrogéologiques.
- **Planning des mesures in situ :**
 - Rationalisation dans la collecte ultérieure des données par détermination des mesures les plus nécessaires.
- **Gestion des eaux souterraines :**
 - Planning idéal d'exploitation des ressources ;
 - Stockage souterrain saisonnier d'eaux de surface.

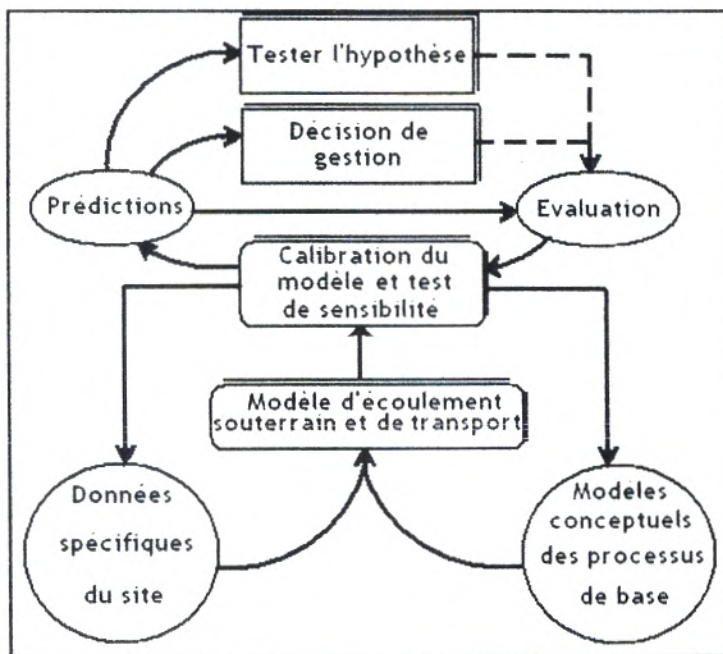


Figure 34 : Utilisation et rôle des modèles dans la résolution des problèmes hydrogéologiques (L.F. KONIKOW, 1996 in L.F. KONIKOW 2000).

Toute mesure de sauvetage ou de prévision doit être précédée d'une excellente compréhension des conditions existantes. Les modèles mathématiques fournissent un moyen d'intégrer les paramètres d'un tel problème. Ils constituent un outil indispensable pour guider l'interprétation et la ligne de conduite à appliquer dans les cas d'étude.

II- Modélisation hydrodynamique de la nappe alluviale de la plaine de Sidi Bel Abbès :

II-1. Le logiciel de simulation :

Nous avons utilisé le code **ASMWIN**, qui est l'implantation complète d'un modèle d'eaux souterraines en deux dimensions utilisable sous Microsoft Windows. Il a été initialement développé (W. Kinzelbach et R. Rausch, 1995) comme un outil pédagogique à l'intention d'étudiants en hydrogéologie, ingénierie civile et environnementale. Ce logiciel a pour qualité première d'être simple et modulaire.

II-2. Présentation du domaine à modéliser :

II-2-1. Maillage

Le fond de la carte ayant servi de référence pour le modèle est obtenu par la numérisation de la carte géologique 1/100 000^{ème} (B. SOURISSEAU, 1973). Pour la discrétisation spatiale, nous avons placé sur 2400 Km² de la zone, un maillage carré uniforme de 1 Km de côté, dont 775 mailles actives (figure 35).

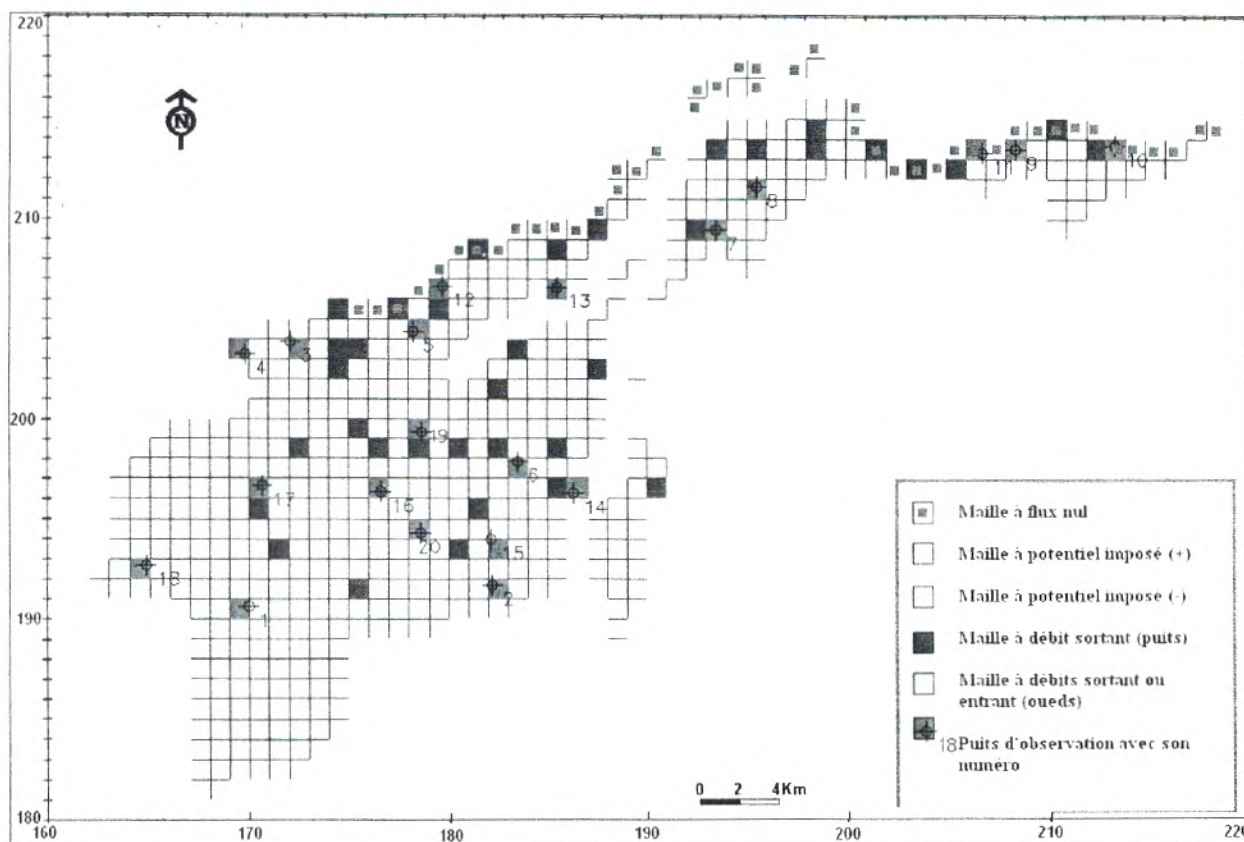


Figure 35 : Le maillage et les conditions aux limites du domaine à modéliser.

II-2-2. Condition aux limites :

Le remplissage plio-quaternaire de la plaine de Sidi Bel Abbès a été étudié dans sa globalité, il peut être considéré comme monocouche pour le modèle. Les limites du domaine sont précisées par les études ultérieures. Elles sont constituées par :

- Les calcaires des monts de Tlemcen, les grès du Pliocène continental et de l'Aptien au sud et de l'Eocène au nord-ouest ;
- Les marnes d'Oligomiocène et les argiles marneuses du Miocène au nord.

Les conditions aux limites suivantes ont été imposées (figure 35) (la carte hydrogéologique de la plaine de Sidi Bel Abbès 1978, ANRH Oran) :

- Au sud et à l'est : limite à potentiel imposé d'entrée,
- A l'ouest : limite à potentiel imposé de sortie,
- Au nord : limite étanche avec l'exutoire principal de la nappe.

Par ailleurs les débits en continu ont été imposés aux mailles où existent les pompages. La figure 36 montre la répartition des débits de pompage ; le débit est important dans les mailles où les puits sont multiples.

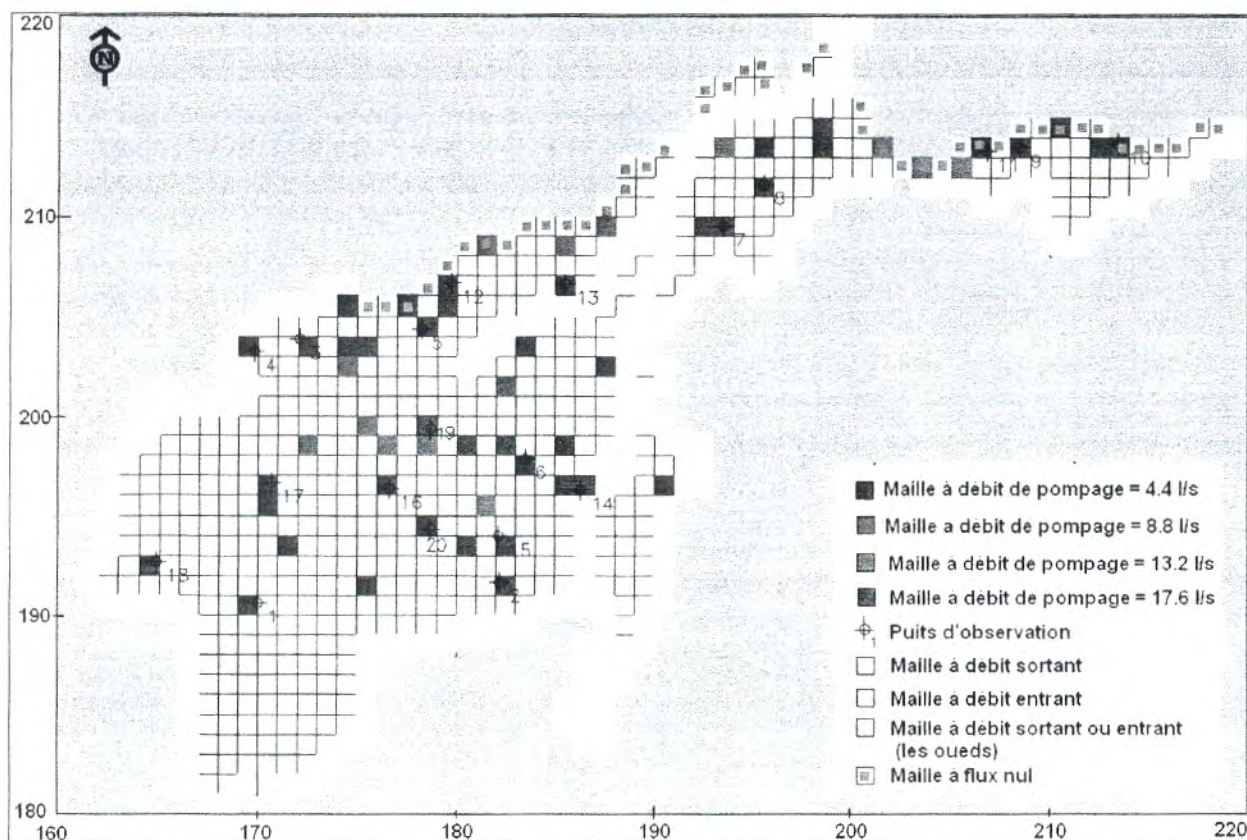


Figure 36 : La répartition des débits de pompage des puits de la plaine de Sidi Bel Abbès.

II-3. Calage en régime permanent

L'état de référence retenu pour caler le modèle en régime permanent est la piézométrie de 1971.

Cette modélisation nous permet de déterminer les transmissivités des alluvions plio-quaternaires de la plaine de Sidi Bel Abbès. Elle conduit également à ajuster les paramètres des fonctions rivière (drain/alimentation). Enfin, cette étape suppose également de déterminer les flux d'entrée et de sortie imposés aux limites de la nappe.

II-3-1. Potentiels mesurés et calculés (oct. /nov. 1971) :

Les figures 37 et 38 représentent les cartes des potentiels mesurés et calculés pour l'état de la piézométrie d'octobre/novembre 1971 qui a servi de référence à l'étalonnage.

Les écarts après l'étalonnage aux points d'observations sont mentionnés dans le tableau 5. Les valeurs de $H_{\text{calculé}}$ sont prises au centre de chaque maille.

La figure 39 représente une comparaison des valeurs des potentiels calculés et mesurés ($H_c = F(H_m)$) pour toute les mailles. Par construction, le nuage est bien situé autour de la droite définie par l'équation $H_c = H_m$.

Nous pouvons dire que la piézométrie calculée est globalement proche de la piézométrie mesurée, et les écarts restent relativement acceptables.

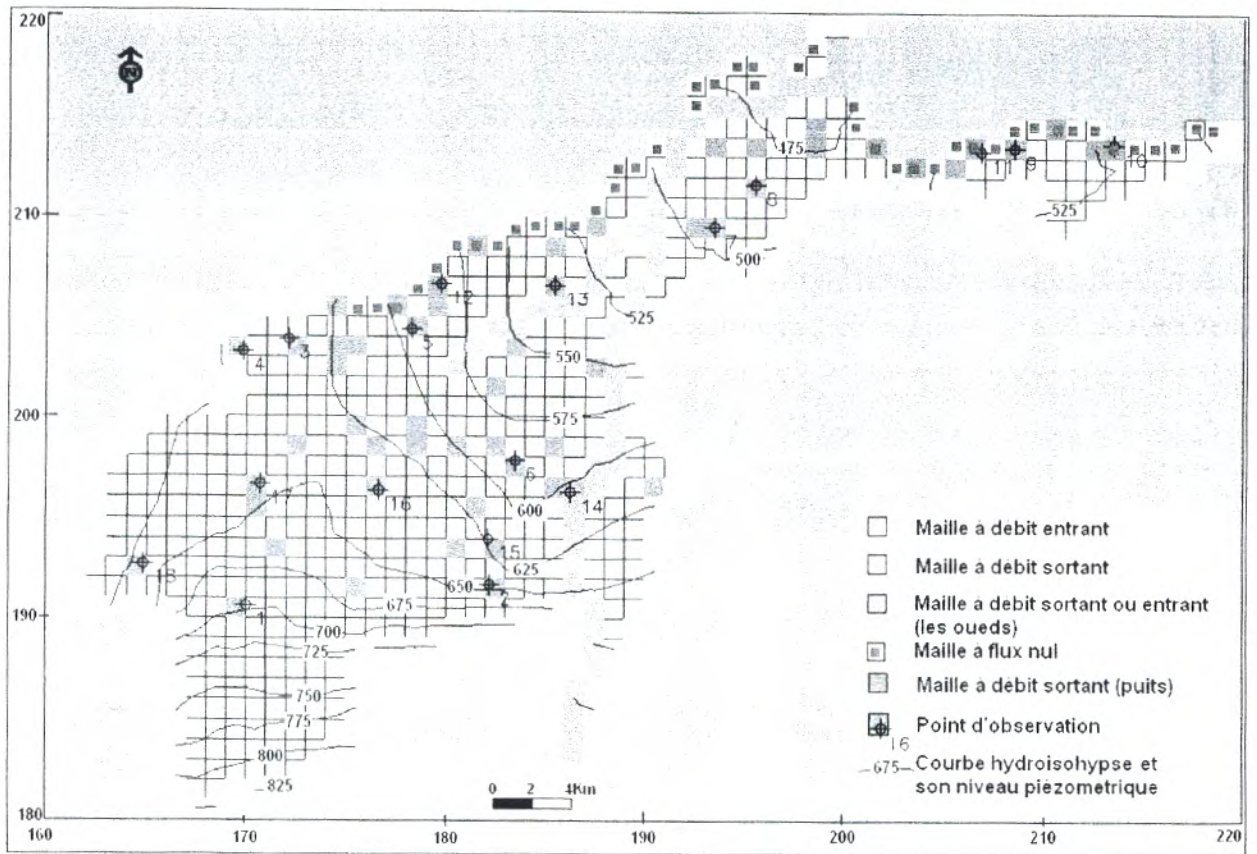


Figure 37 : Potentiels mesurés (oct. /nov. 1971).

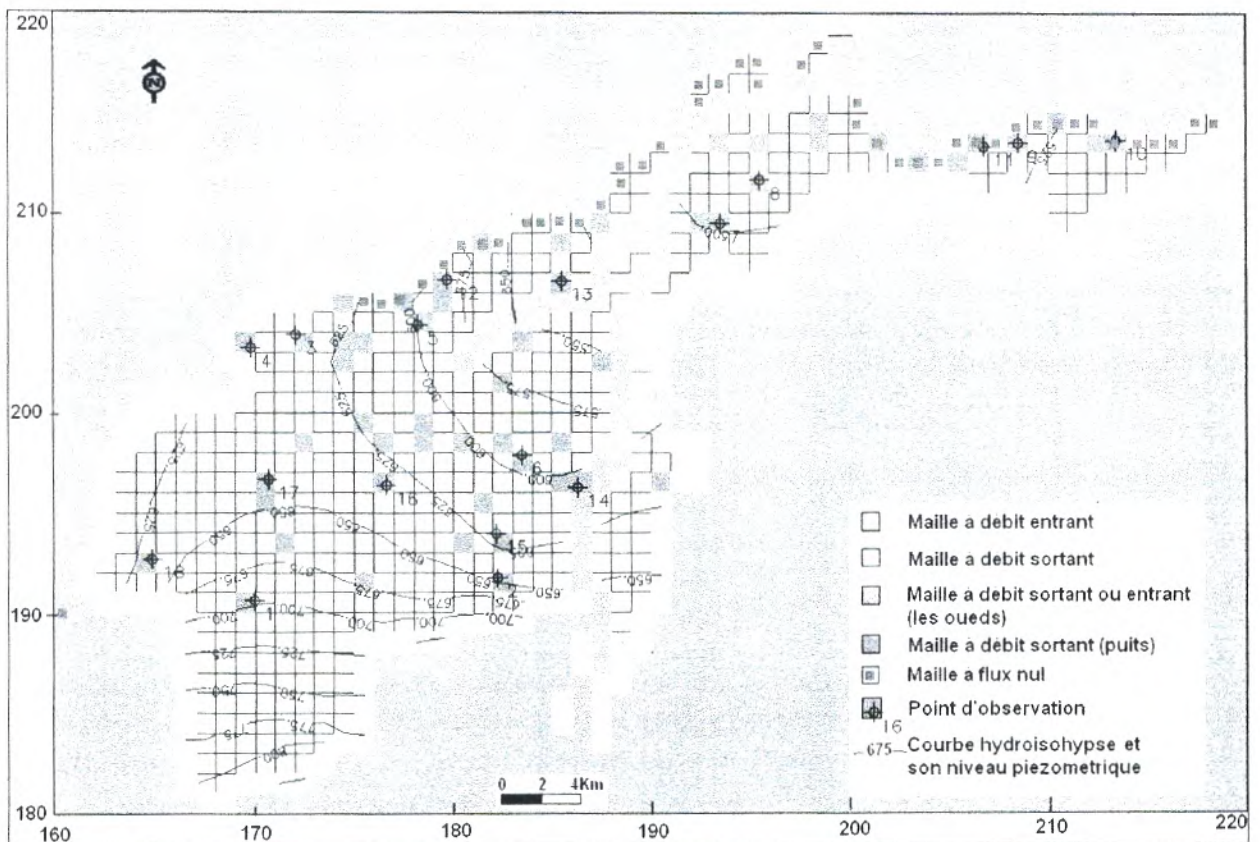


Figure 38 : Potentiels calculés après le calage du modèle en régime permanent.

Tableau 5 : Ecart entre les potentiels mesurés et calculés après calage du modèle en régime permanent.

N° puits d'observation	Coordonnées (colonne, ligne)	$H_{\text{mesuré}} - H_{\text{calculé}}$ (m)
1	(10, 30)	0.2
2	(23, 29)	1.0
3	(13, 17)	0.6
4	(10, 17)	0.9
5	(19, 16)	0.6
6	(24, 23)	-1.0
7	(34, 11)	-0.9
8	(36, 9)	-1.0
9	(49, 7)	-0.2
10	(54, 7)	0.4
11	(47, 7)	-0.3
12	(20, 14)	0.8
13	(26, 14)	-0.6
14	(27, 24)	0.6
15	(23, 27)	-0.6
16	(17, 24)	-0.6
17	(11, 24)	0.7
18	(5, 28)	-0.5
19	(19, 21)	0.2
20	(19, 26)	-0.4

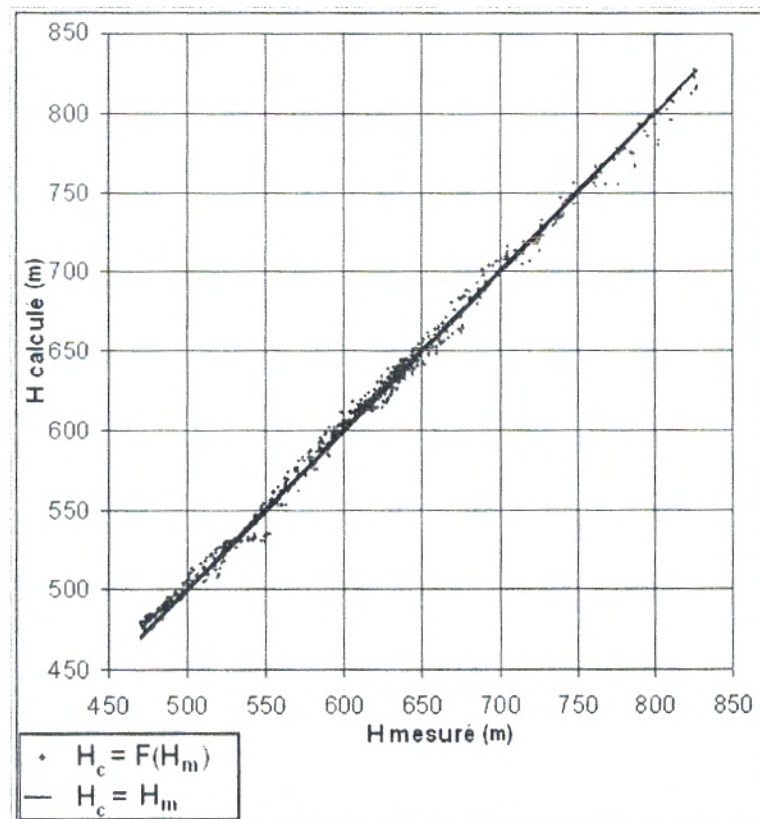


Figure 39 : Comparaison des potentiels calculés et mesurés ($H_c = F(H_m)$) de toutes les mailles pour le régime permanent.

II-3-2. Carte des transmissivités :

Comme nous le montre la figure 40, nous avons adopté une zonation des transmissivités très découpée pour tenir compte de l'hétérogénéité de l'aquifère. Cinq plages de perméabilité comprises entre 10^{-4} et 10^{-2} m²/s ont été définies.

Il apparaît cependant que la transmissivité au sud est faibles (10^{-4} à $2 \cdot 10^{-3}$ m²/s) et elle est plus élevée au centre et au nord ($2 \cdot 10^{-3}$ à $1.2 \cdot 10^{-2}$ m²/s). Cela dénote l'existence du chenal congglomératique dans la zone axiale de la plaine.

II-3-3. Etude du bilan de la nappe :

Afin de quantifier les effets du drainage des cours d'eau, l'alimentation aux limites et l'impact de l'infiltration efficace sur la piézométrie, il est nécessaire de dresser un bilan de la nappe. Le tableau 6 résume les débits d'échange de la nappe aux limites calculés par le modèle :

Tableau 6 : Bilan de la nappe calculé par le modèle.

FLOW TERM FLOWS (m ³ /s)	IN	OUT	IN-OUT
CONSTANT HEAD	1.14	1.96	-8.14 10 ⁻¹
WELL	0.00	3.94 10 ⁻¹	-3.94 10 ⁻¹
BOUNDARY FLOW	2.01 10 ⁻²	0.00	2.01 10 ⁻²
RECHARGE	1.19	0.00	1.19
SUM	2.35	2.35	-3.10 ⁻⁶

Tous d'abord, nous pouvons voir que le bilan est équilibré. Toute fois ce signe (-) est dû aux valeurs de la piézométrie calculés qui sont plus basses que celles mesurés dans la grande partie de la nappe.

Par ailleurs, nous pouvons constater que l'alimentation de la nappe se fait surtout par les infiltrations efficaces.

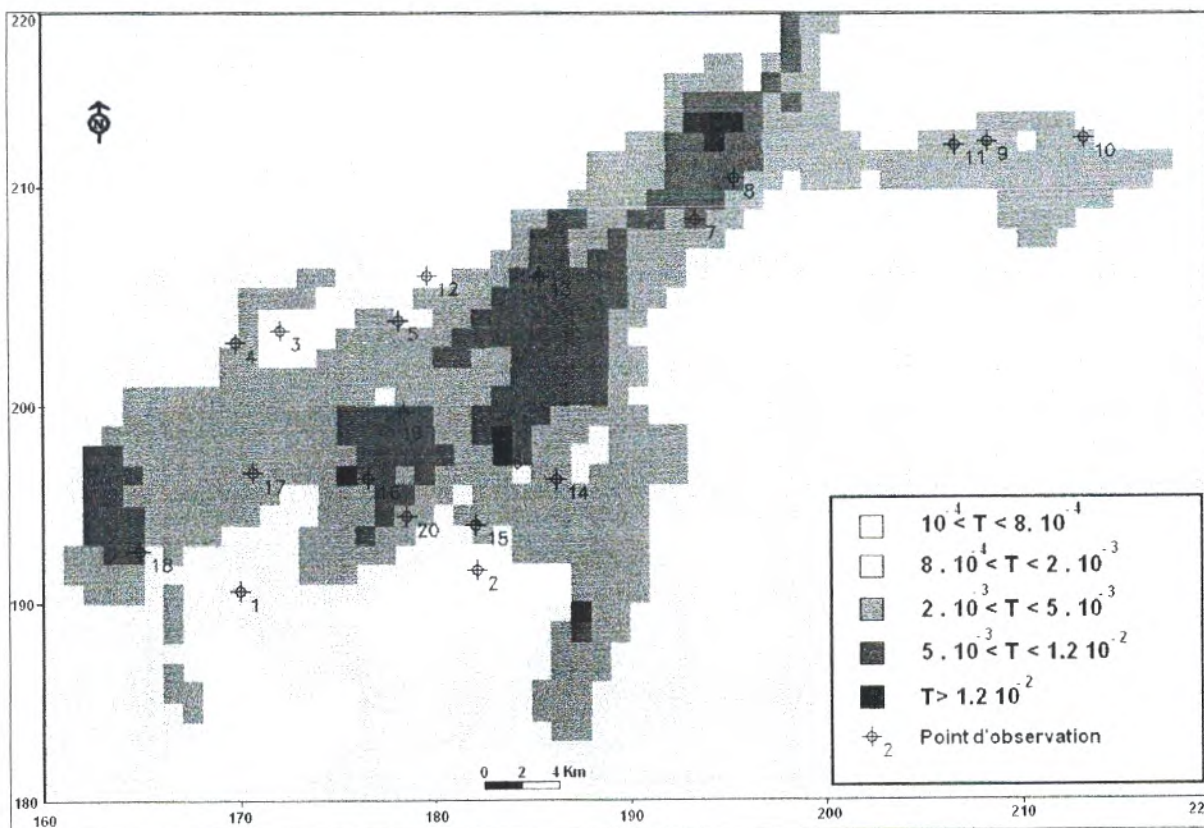


Figure 40 : Carte des transmissivités (m²/s) adoptées pour le calage du modèle en régime permanent.

L'utilisation de tous les paramètres hydrodynamiques nous a permis de caler le modèle hydrodynamique en régime permanent pour reconstituer l'état de 1971.

A l'issue du calage, un découpage de la plaine en plages des transmissivités équivalentes a été réalisé. Il apparaît que la partie nord et centre de la plaine présente la zone des transmissivités la plus forte. Ce découpage qui suit une direction sud-ouest/ nord-est coïncide avec le chenal conglomératique de la plaine.

L'étude du bilan de la nappe donne des résultats satisfaisants quant à l'équilibre entrées-sorties.

II-4. Calage en régime transitoire :

Cette partie, consacrée au modèle en régime transitoire représente une continuité au calage en régime permanent.

La modélisation en régime transitoire par la méthode des différences finies permet de caler le coefficient d'emmagasinement et d'appréhender l'évolution de la piézométrie suite à des perturbations multiples et variables (débits extraits, l'infiltration efficace...).

La phase de simulation est considérée de 1971 à 1996. L'absence de données consistantes nous a conduit à subdiviser cette phase en 25 périodes avec un pas de temps d'une année. La distribution de la porosité efficace a été obtenue à partir des données disponibles variant entre 10 à 15 %.

Pour calculer la recharge de chaque période, un coefficient d'infiltration de 10% est utilisé pour la totalité de la nappe. Le tableau 7 donne le taux de recharge pour chaque période.

Tableau 7 : Recharge de la nappe en Mm^3/an par période.

Période	Année	Recharge (Mm^3 / an)
1	1972	15.32
2	1973	15.32
3	1974	14.63
4	1975	13.63
5	1976	13.69
6	1977	13.56
7	1978	13.08
8	1979	12.97
9	1980	12.77
10	1981	11.70
11	1982	12.72
12	1983	12.73
13	1984	12.73
14	1985	13.06
15	1986	12.73
16	1987	10.68
17	1988	12.72
18	1989	13.07
19	1990	12.87
20	1991	12.87
21	1992	9.65
22	1993	11.24
23	1994	13.37
24	1995	21.15
25	1996	8.18

Les pompages n'ayant commencé à se développer qu'à partir de 1975. En 1971, ils sont concentrés surtout entre Sidi Bel Abbès et Lamtar, alors qu'entre 1989 et 1996 il y a eu une migration progressive des pompages vers le centre et le sud, en se concentrant entre Bou Khénafis et Bedrabine, et stabilisation du débit global prélevé du fait de la régression des pompages à cause de l'assèchement. La figure 41 donne les prélèvements par périodes.

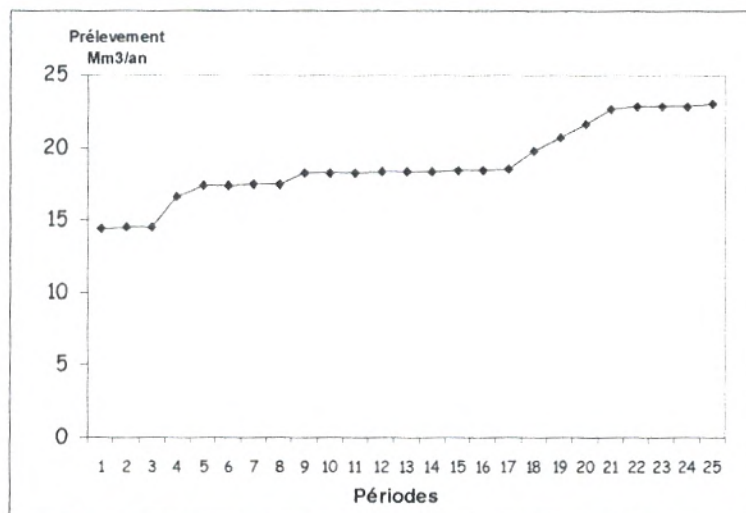


Figure 41 : Prélèvement par périodes en Mm^3/an .

II-4-1. Simulation des potentiels de 1989 :

Les cartes piézométriques simulées permettent de restituer l'évolution du niveau piézométrique de la nappe au pas annuel. Les écarts entre les potentiels calculés et mesurés ont été évalués entre -1.5 et 1.5 mètre (tableau 7).

La présentation des potentiels calculés en fonction de ceux mesurés (figure 42) montre que la majorité des points est autour de la droite. Mais le nuage est plus proche aux valeurs mesurées lorsque les potentiels dépassent les 750 m (partie sud de la plaine). Ce-ci est expliqué par l'absence des données en amont pour l'état de référence de 1989.

La carte des potentiels calculés pour l'année 1989 (la période n°18) est donnée dans la figure 43.

Tableau 8 : Ecarts entre les potentiels mesurés et calculés aux points d'observations après calage du modèle en régime transitoire.

Maille	$H_{mesuré} - H_{calculé}$ (m)
(32, 13)	-1.5
(27, 14)	-1.2
(22, 8)	-1.2
(25, 18)	-1.14
(24, 18)	-1
(37, 13)	-0.9
(39, 8)	-0.7
(32, 14)	-0.51
(36, 9)	0.1
(25, 15)	0.2
(26, 17)	0.47
(32, 15)	0.82
(28, 17)	0.87
(26, 15)	1.15
(25, 17)	1.18
(25, 16)	1.5
(27, 16)	1.5

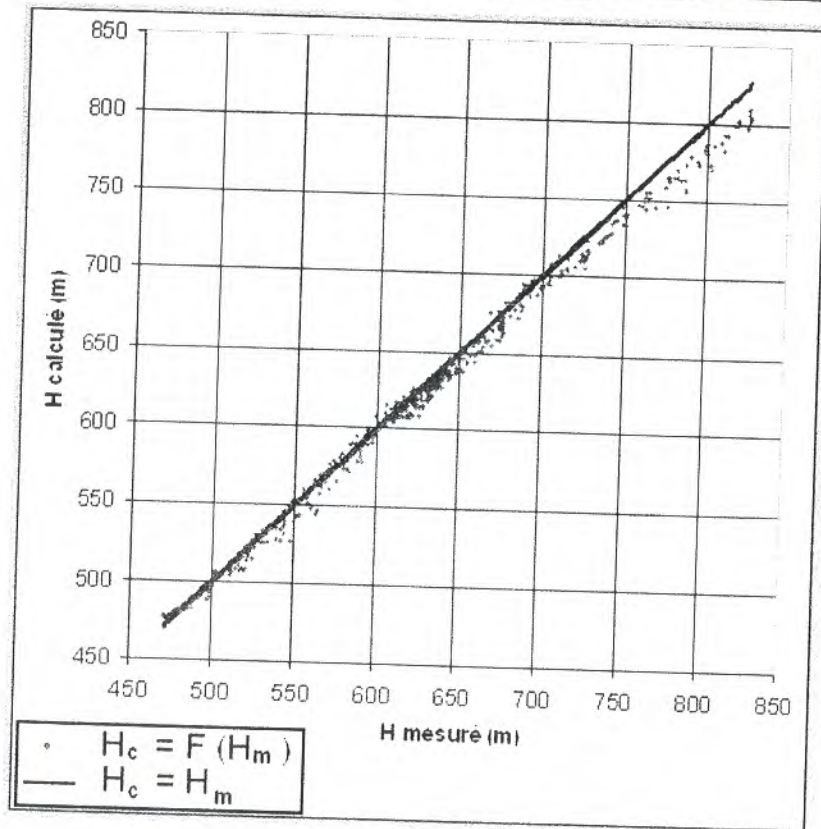


Figure 42 : Comparaison des potentiels calculés et mesurés ($H_c = F(H_m)$) de toutes les mailles pour le régime transitoire.

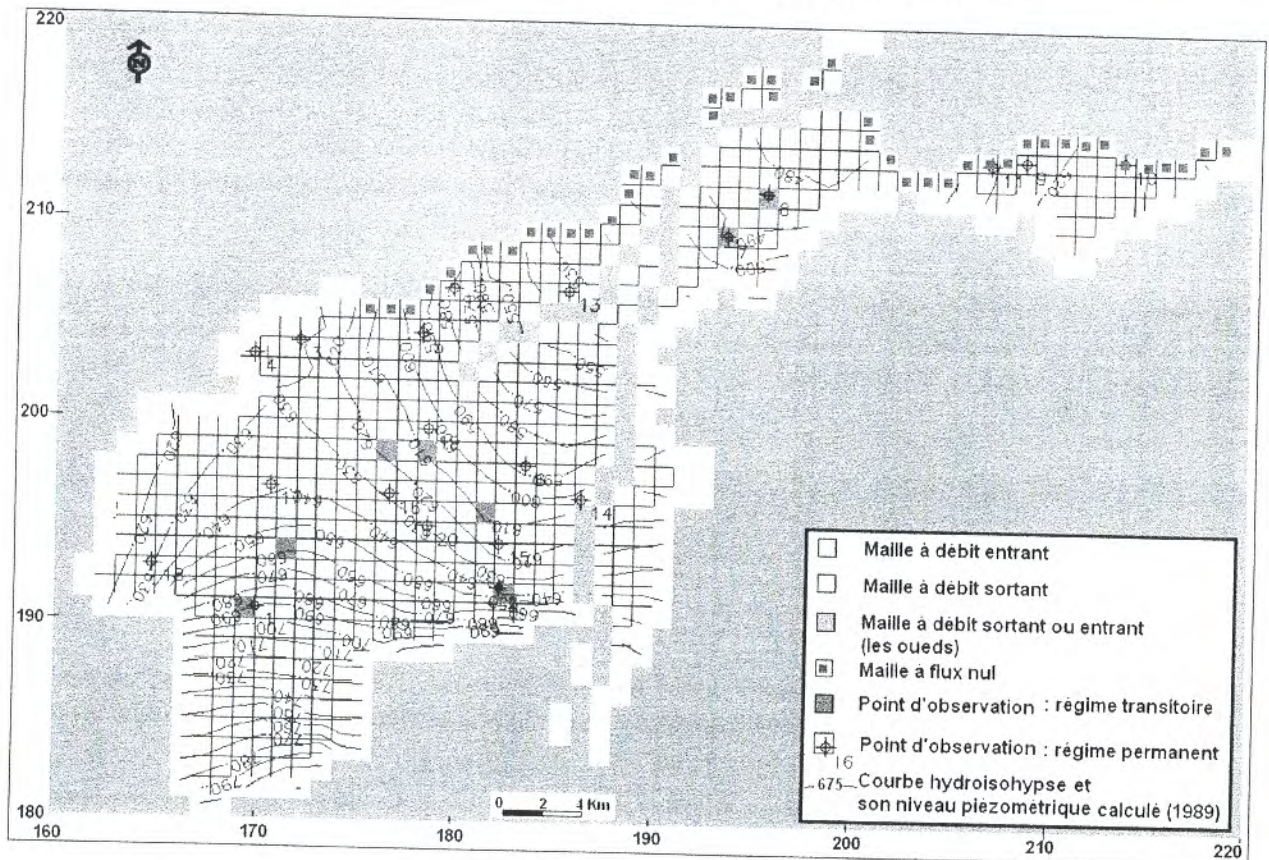


Figure 43 : Potentiels calculés après le calage du modèle en régime transitoire (état 1989).

L'évolution a été remarquée en plusieurs points dans différentes zones (figure 44). La variation des potentiels calculés, durant la période 1971/ 1989, est présentée dans les graphes de la figure 45.

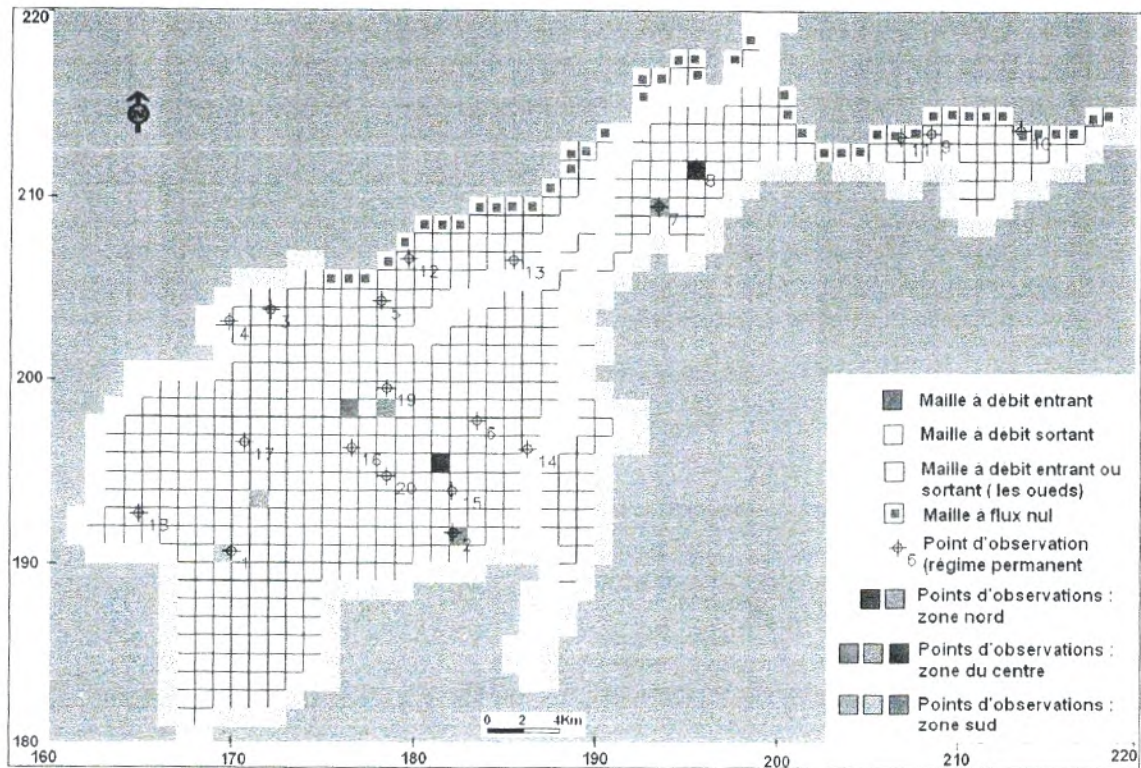


Figure 44 : Points d'observation de l'évolution piézométrique en régime transitoire.

Dans un premier temps, on observe un battement de la nappe dans presque sa totalité. L'amplitude des variations des niveaux piézométriques est de l'ordre de quelques mètres au nord et une dizaine de mètre au centre et au sud.

Cette différence entre le rabattement du niveau piézométrique entre le nord et le sud est due à la concentration des puits au niveau du chenal d'une part, et de la géométrie de l'aquifère et les paramètres hydrodynamiques d'autre part ; le chenal conglomératique jouant le rôle du drain des formations peu perméables qu'il les superpose.

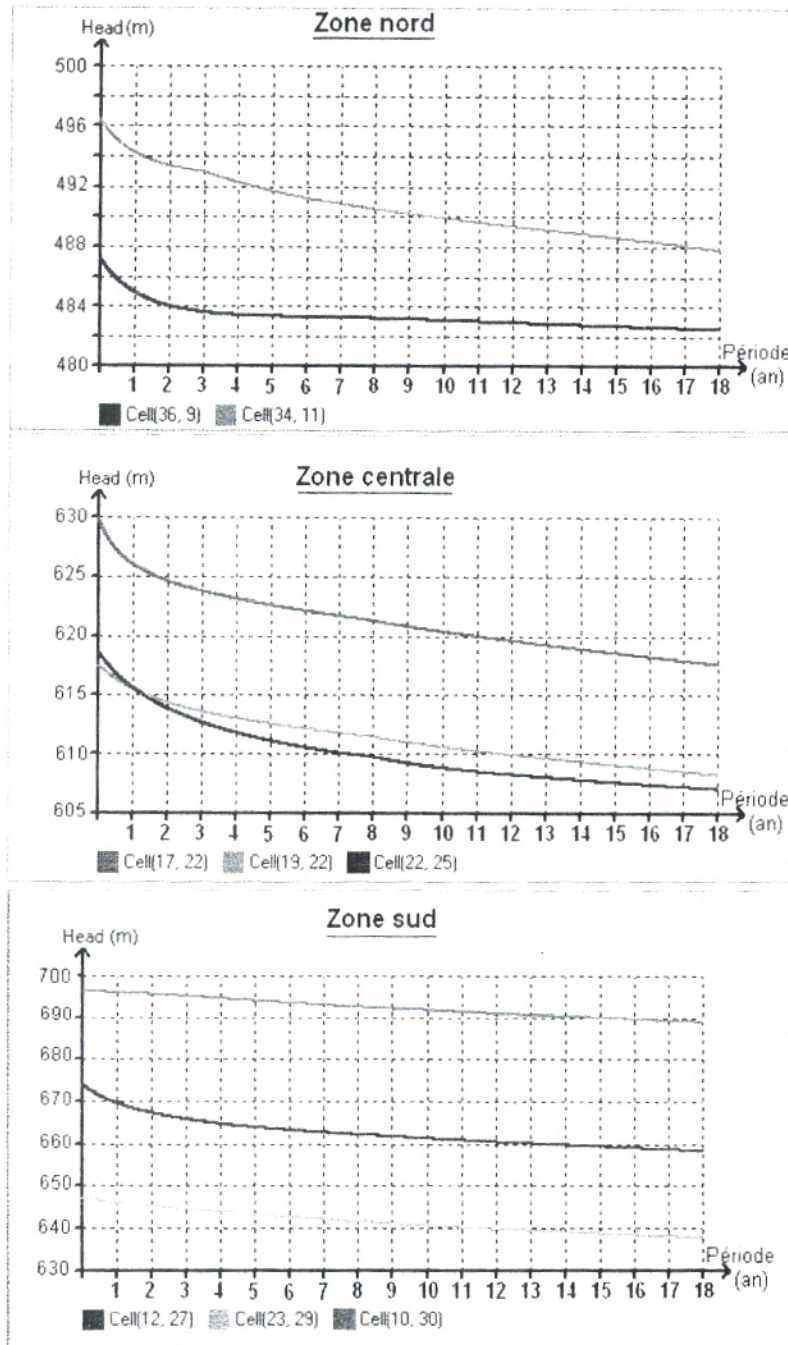


Figure 45 : Evolution piézométrique simulée par le modèle au niveau des différentes mailles.

II-4-2. Simulation des potentiels de 1996 :

Après avoir reconstituer l'état de 1989, une simulation des potentiels à un état plus récent nous permet de valoriser les résultats du calage en régime transitoire.

La piézométrie de 1989 calculée par le modèle, représente un état initial pour la simulation de celle de 1996.

La différence des potentiels calculés de l'état de 1996 et celle de 1989 est donnée dans la carte de la figure 46.

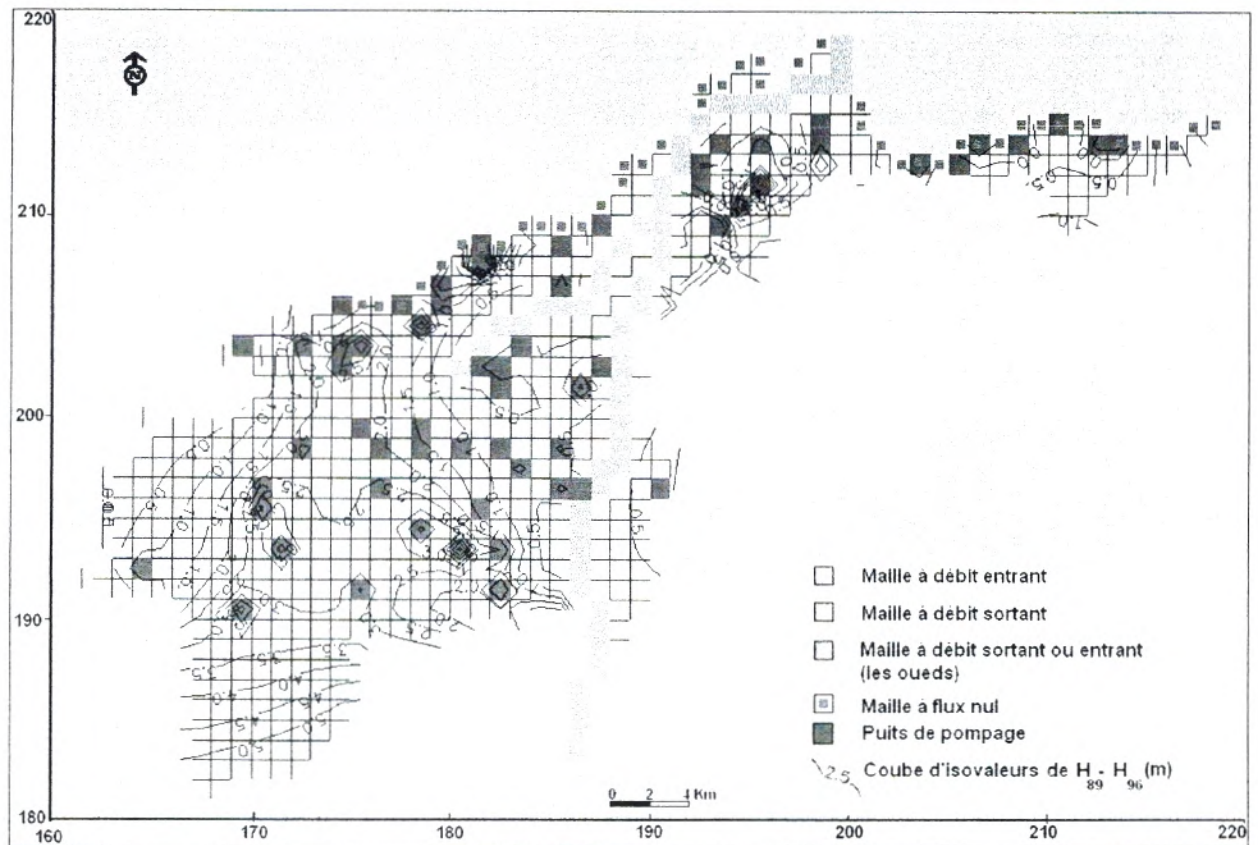


Figure 46 : Carte des ΔH de la simulation de l'état 1996. ($H_{89} - H_{96}$)

La carte montre un rabattement qui varie de 1 m au nord à 5 m au sud. Cette diminution est due à l'augmentation des débits de pompage et aux faibles apports des précipitations.

II-4-3. Carte de coefficient d'emmagasinement :

Afin de caler le modèle hydrodynamique en régime transitoire, une carte de distribution des valeurs du coefficient d'emmagasinement a été établie (figure 47).

On peut constater que la répartition spatiale du coefficient d'emmagasinement est la même que celle des transmissivités. Ce qui confirme l'existence d'une hétérogénéité de l'aquifère par la présence du chenal des conglomérats situé au centre de la plaine.

Le calage du modèle en régime transitoire a permis d'affiner la distribution spatiale du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère. La zonation de ce paramètre coïncide avec la nature géologique du réservoir. Des difficultés ont été rencontrées pour reconstituer l'état de 1989. Ceci est dû au manque des données concernant la période 1971/1989.

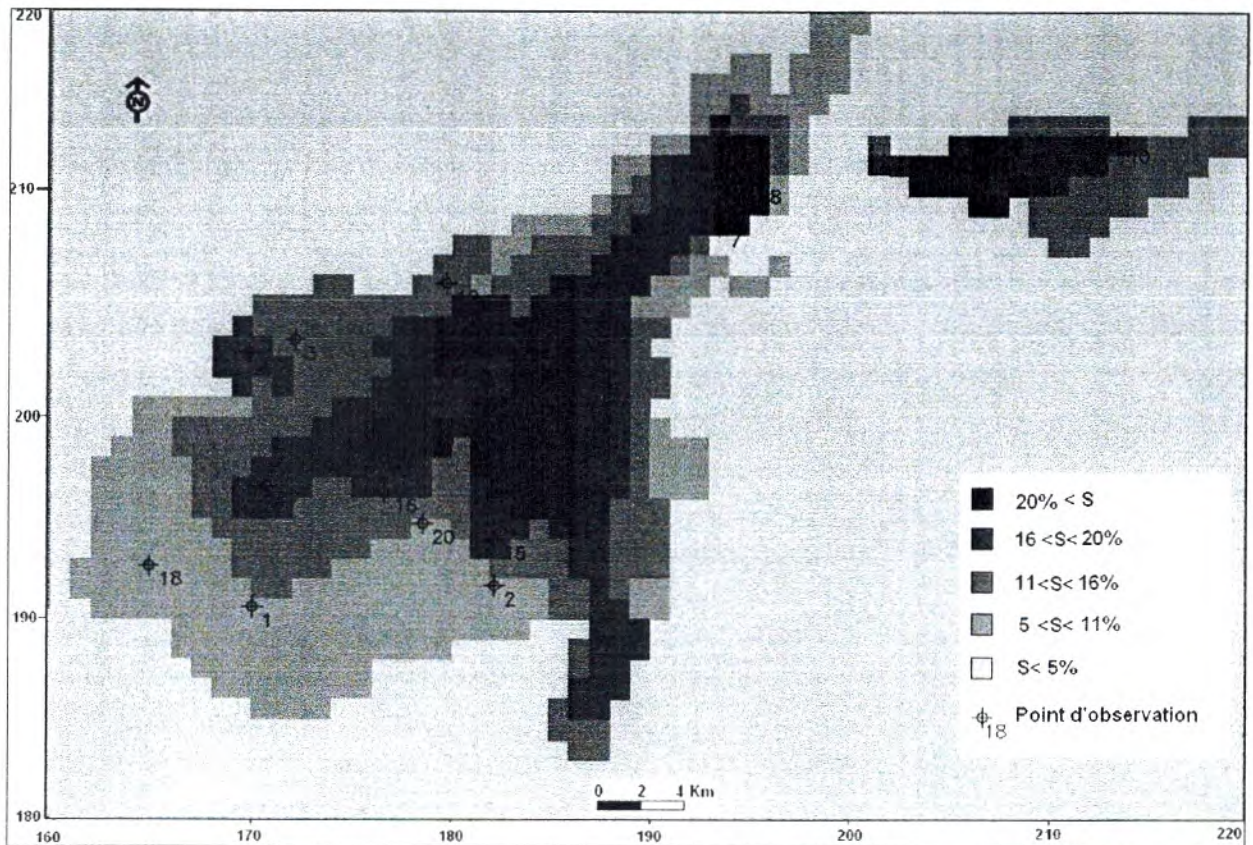


Figure 47 : Carte de distribution des valeurs du coefficient d'emmagasinement adoptées pour le calage du modèle en régime transitoire.

III- Exploitation du modèle

Introduction

Après avoir calé le modèle hydrodynamique, il apparaît intéressant de réaliser quelques simulations afin de pouvoir estimer les potentialités en eaux souterraines de la nappe de la plaine de Sidi Bel Abbès. Nous avons testé en premier temps l'effet de l'exploitation sur la nappe suivant différentes hypothèses de simulation. Puisque l'alimentation de la nappe se fait principalement par les précipitations, une autre simulation a été faite par une diminution de la recharge.

III-1. Première simulation :

Dans un premier temps, un scénario de surexploitation de la nappe est simulé par des pompages intensifs induisant des débits fortes ($Q \times 4$).

Les résultats de cette simulation sont présentés par l'évolution de niveau piézométriques dans trois zones de la nappe. Les graphes de la figure 48 montrent une baisse du niveau piézométrique d'environ 10 m dans toute la nappe.

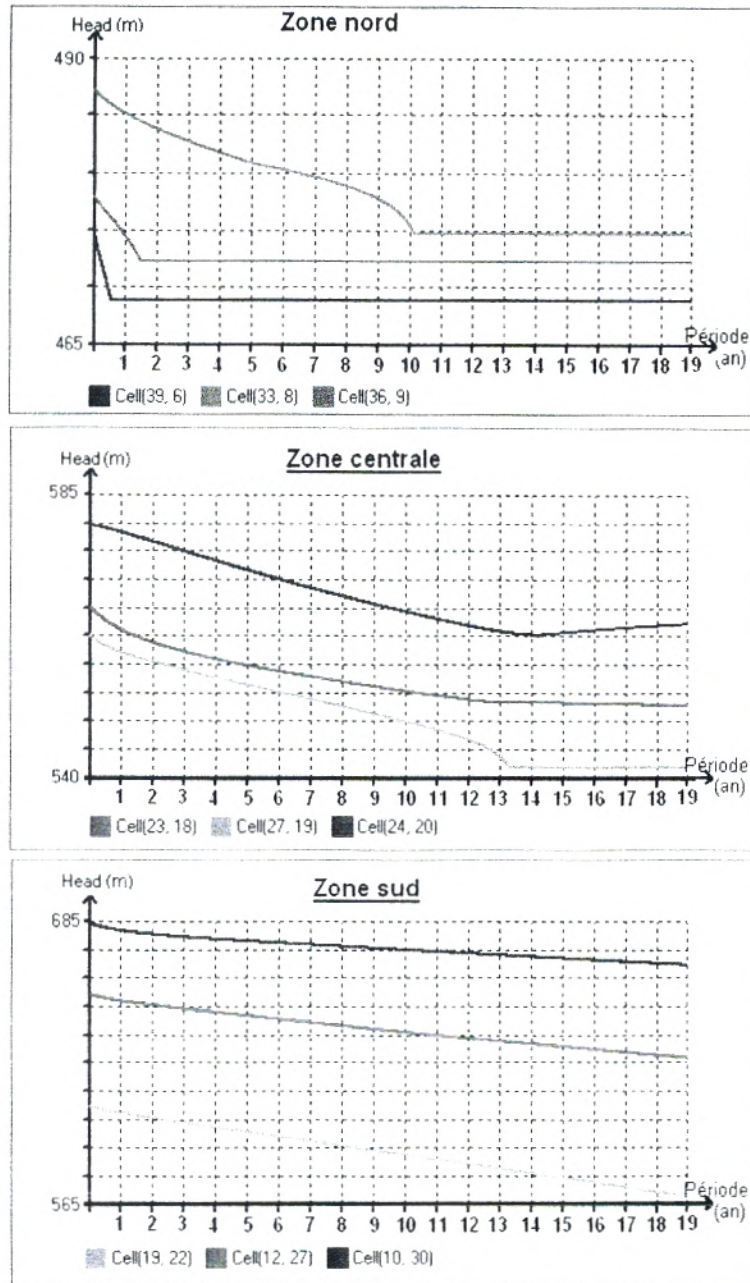


Figure 48 : Evolution piézométrique de la première simulation dans différentes mailles.

La carte des potentiels calculés après la première simulation montre un dénoyage de plusieurs mailles situées surtout au nord et au centre où l'épaisseur des conglomérats est faible (figure 49). L'effet des pompages se fait ressentir dans les bords de la nappe. Il se traduit au centre par l'étirement des isopièzes en direction des pompages.

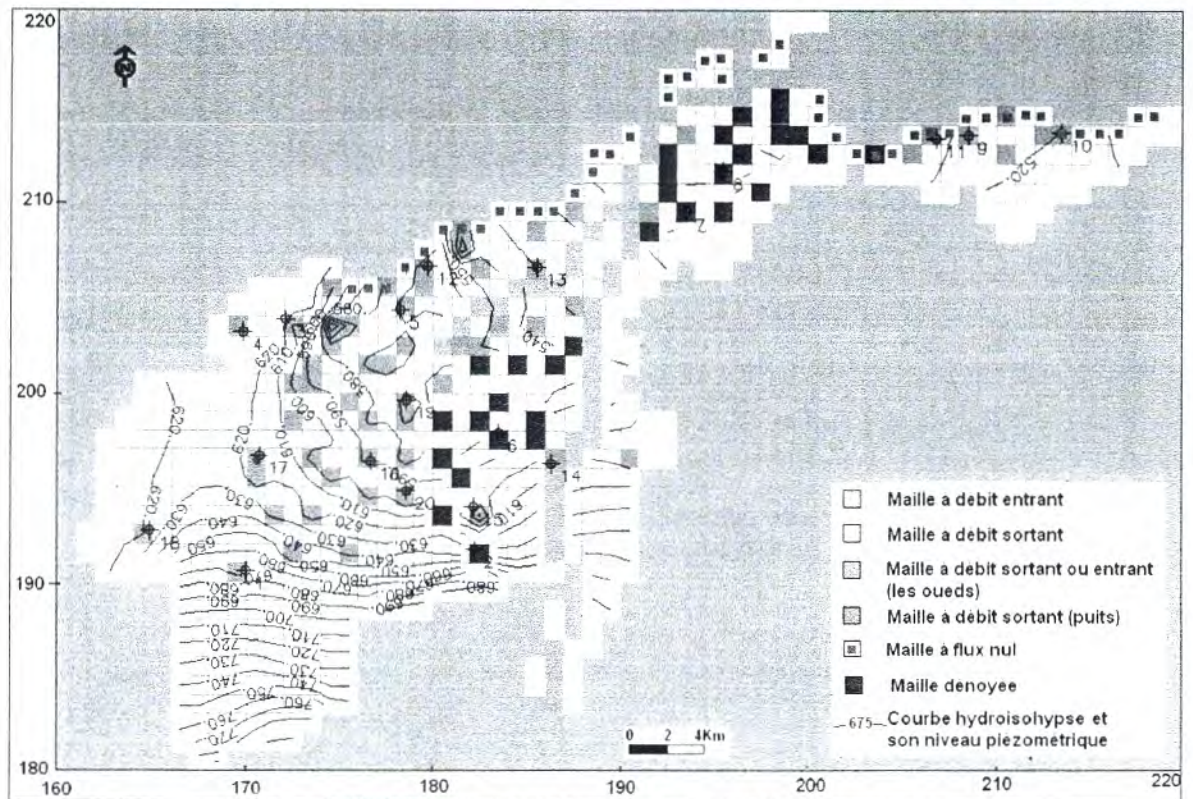


Figure 49 : Simulation hydrodynamique N°1 (année 2015).

III-2. Deuxième simulation :

Dans ce scénario, nous avons diminué la recharge par les précipitations efficaces et le débit d'alimentation de la nappe par sa limite sud.

La carte piézométrique montre le dénoyage de quelques mailles situées au nord (figure 50).

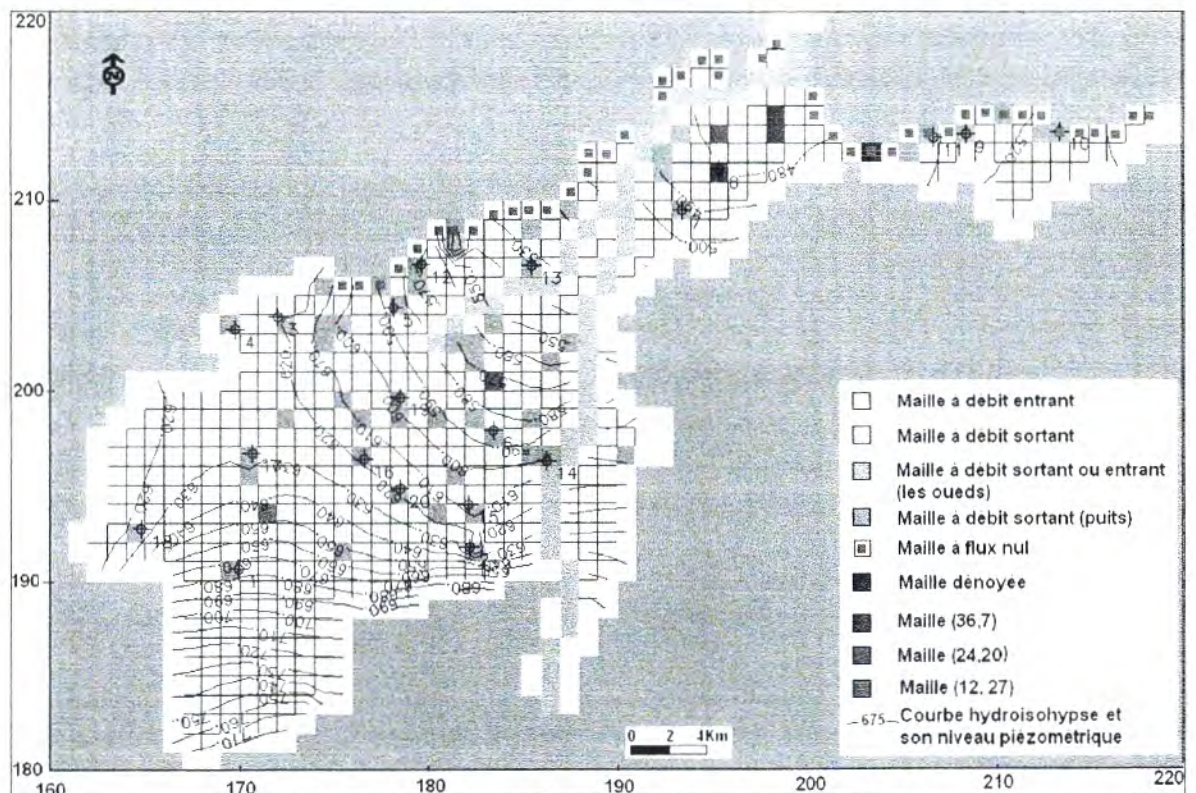


Figure 50 : Simulation hydrodynamique N°2 (année 2015).

Les graphes qui représentent la variation des ΔH dans le temps montrent une diminution considérable dans le niveau de la nappe (figure 51). Mais cette diminution reste faible par rapport à celle de la première simulation.

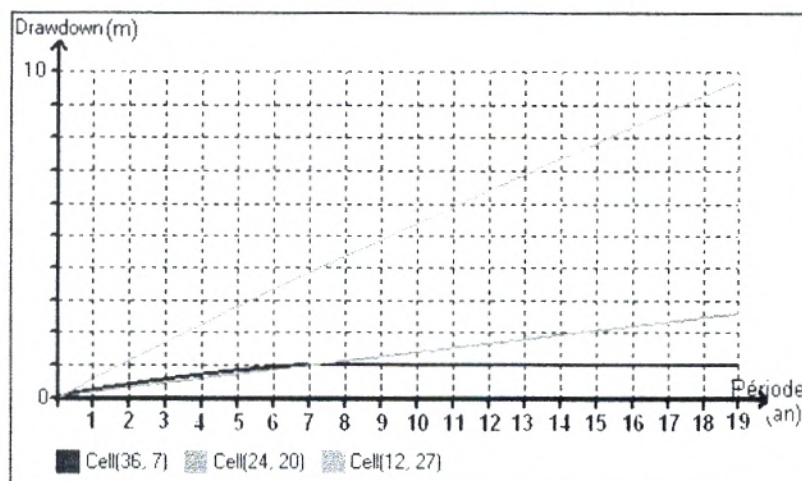


Figure 51 : L'évolution des ΔH durant la deuxième simulation.

La réalisation de ces deux scénarios d'exploitation nous montre que l'influence des tendances climatiques sur les niveaux piézométriques est minime par rapport aux effets des facteurs anthropiques.

CONCLUSION

La modélisation hydrodynamique de la nappe de la plaine de Sidi Bel Abbès par le programme ASMWIN nous a permis de comprendre le fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère, en estimant l'alimentation latérale de la nappe et la recharge par l'infiltration efficace puis l'influence des prélèvements par pompage sur l'écoulement souterrain.

Le modèle mathématique en régime permanent a permis d'affiner la distribution spatiale de la transmissivité sur l'ensemble du domaine et de dresser le bilan de la nappe en régime permanent.

Le modèle en régime transitoire a permis d'affiner la distribution spatiale du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère.

L'exploitation du modèle par la réalisation des scénarios nous a permis de simuler le comportement futur de la nappe en cas d'une surexploitation.

GENERAL CONCLUSIONS

La plaine de Sidi Bel Abbès, se situe entre l'Atlas Tellien au Nord et le massif tabulaire de Tlemcen-Saïda au sud. Elle fait suite à la plaine d'Hennaya-Isser à l'Ouest et se prolonge vers l'Est par la plaine de Mascara.

Cette plaine fait partie du bassin versant de la moyenne Mekerra entre la cluse de Sidi Ali Ben Youb et le seuil du Rocher en aval de la ville de Sidi Bel Abbès.

Des formations d'âge Plio-quadernaire remplissent la grande vallée de Sidi Bel Abbès et sont le siège d'un écoulement souterrain transitant principalement par les alluvions plus ou moins cimentés et les conglomérats des chenaux aquifères.

La synthèse des travaux antérieurs nous a permis d'analyser le comportement hydrodynamique de la nappe. L'écoulement a deux directions : une générale Sud ouest – Nord est dans la majeure partie de la plaine et une autre secondaire Est-Ouest dans la vallée de Caïd Bel Arbi.

L'analyse géostatistique des paramètres hydrodynamiques et géométriques de l'aquifère nous aide à réaliser une bonne répartition spatiale de ces paramètres. Les résultats forment la base des données pour le modèle hydrodynamique.

Une modélisation hydrodynamique du système aquifère a été réalisée. Le calage en régime permanent, en reconstituant l'état initial de 1971 est satisfaisant. Il nous a permis de réaliser une distribution des transmissivités. Cette distribution confirme l'existence du chenal conglomératique drainant au centre de la plaine.

A partir des cartes piézométriques de 1989 et 1996 nous avons essayé de caler le modèle en régime transitoire. Les données disponibles permettent néanmoins d'aboutir à des résultats cohérents. La carte adoptée de la distribution du coefficient d'emménagement réaffirme la présence du paléochenal.

Les simulations hydrodynamiques qui complètent les résultats d'étalonnage, montrent l'influence des tendances climatiques et l'effet des facteurs anthropiques sur le comportement de la nappe.

Cette modélisation mathématique pourra apporter une contribution à la connaissance du fonctionnement de la nappe alluviale de la plaine de Sidi Bel Abbès, et constituer un outil de gestion et de prévision pour les futures exploitations. Néanmoins, nous recommander un meilleur suivi du niveau piézométrique, l'intégration et la répartition des piézomètres sur la totalité de la surface ainsi qu'une actualisation des données.

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : La situation géographique de la plaine de Sidi Bel Abbès (Atlas mondial Encarta 2001, modifiée).
- Figure 2 : La situation de l'oued Mekerra dans la plaine de Sidi Bel Abbès.
- Figure 3 : Pluviosité entre le 1/4/1970 et le 31/3/1972 (B. SOURISSEAU, 1973).
- Figure 4 : Variation de la pluie moyenne annuelle dans le bassin versant de la moyenne Mekerra (1975-1986 / 1986-1991) (H. LEBID, 2001).
- Figure 5 : Histogramme des variations de la moyenne mensuelles pluviométriques des périodes 75/91 et 91/05.
- Figure 6 : Histogramme des précipitations saisonnières des périodes 1975/1991 et 1991/2005.
- Figure 7 : Carte géologique de la plaine de Sidi Bel Abbès (B. SOURISSEAU 1973).
- Figure 8 : Coupes lithostratigraphiques des forages implantés sur la bordure sud-est de la plaine de Sidi Bel Abbès (H. LEBID, 2001).
- Figure 9 : Limite du chenal conglomératique selon B. SOURISSEAU (1973).
- Figure 10 : Coupes schématiques des forages réalisés en 1972 par B. SOURISSEAU.
- Figure 11 : Présentation, en 3D, du mur du remplissage plio-quadernaire.
- Figure 12 : Présentation, en 3D, du toit du remplissage plio-quadernaire.
- Figure 13 : Carte des isopaches des conglomérats plio-quadernaires.
- Figure 14 : Carte piézométrique de la nappe libre plio-quadernaire de Sidi Bel Abbès (oct. /nov. 1971)
- Figure 15 : Alimentation et drainage de la nappe par l'oued Mekerra. (B. SOURISSEAU, 1973)
- Figure 16 : Carte piézométrique de la nappe de la plaine de Sidi Bel Abbès (mai 1989).
- Figure 17 : Carte piézométrique de la nappe de la plaine de Sidi Bel Abbès (nov. 96).
- Figure 18 : Fluctuation de niveau statique dans quelque puits de la nappe de la plaine de Sidi Bel Abbès (H. LEBID, 2001).
- Figure 19 : Carte des transmissivités du chenal conglomératique.
- Figure 20 : Bilan hydraulique de la nappe de la plaine de Sidi Bel Abbès entre 01/04/70 et 31/03/72. (B. SOURISSEAU, 1973)
- Figure 21 : Variogrammes expérimental et théorique.
- Figure 22 : Les modèles des variogrammes disponibles au Surfer et leurs équations.
- Figure 23 : Carte de la répartition des points de mesure de la perméabilité dans le domaine d'étude.
- Figure 24 : Carte de la répartition des points de mesure de la transmissivité dans le domaine d'étude.
- Figure 25 : Carte de la répartition des points d'une altitude connue dans le domaine d'étude.
- Figure 26 : Carte de la répartition des puits et leur niveau statique (oct. /nov. 1971) dans le domaine d'étude.
- Figure 27 : Les variogrammes des phénomènes étudiés et ces équations.
- Figure 28 : Carte krigée des perméabilités. L'erreur d'estimation = $-3.62452E-06$.
- Figure 29 : Carte krigée des transmissivités. L'erreur d'estimation = $5.1981E-05$.
- Figure 30 : Carte krigée des altitudes. L'erreur d'estimation = -0.56568568 .
- Figure 31 : Carte piézométrique krigée. L'erreur d'estimation = 0.82411127 .
- Figure 32 : Carte d'isopache de l'aquifère alluvionnaire de la plaine de Sidi Bel Abbès.
- Figure 33 : Taille et forme des mailles (P.A. ROCHE, 2004).
- Figure 34 : Utilisation et rôle des modèles dans la résolution des problèmes hydrogéologiques (L.F. KONIKOW, 1996 in L.F. KONIKOW 2000).
- Figure 35 : Le maillage et les conditions aux limites du domaine à modéliser.
- Figure 36 : La répartition des débits de pompage des puits de la plaine de Sidi Bel Abbès.
- Figure 37 : Potentiels mesurés (oct. /nov. 1971).
- Figure 38 : Potentiels calculés après le calage du modèle en régime permanent.

- Figure 39 : Comparaison des potentiels calculés et mesurés ($H_c = F(H_m)$) de toute les mailles pour le régime permanent.
- Figure 40 : Carte des transmissivités (m^2/s) adoptées pour le calage du modèle en régime permanent.
- Figure 41 : Prélèvement par périodes en Mm^3/an .
- Figure 42 : Comparaison des potentiels calculés et mesurés ($H_c = F(H_m)$) de toute les mailles pour le régime transitoire.
- Figure 43 : Potentiels calculés après le calage du modèle en régime transitoire (état 1989).
- Figure 44 : Points d'observation de l'évolution piézométrique en régime transitoire.
- Figure 45 : Evolution piézométrique simulée par le modèle sur des différentes mailles.
- Figure 46 : Carte des ΔH de la simulation de l'état 1996. ($H_{89} - H_{96}$).
- Figure 47 : Carte de distribution des valeurs du coefficient d'emmagasinement adoptées pour le calage du modèle en régime transitoire.
- Figure 48 : Evolution piézométrique de la première simulation dans différentes mailles.
- Figure 49 : Simulation hydrodynamique N°1(*année 2015*).
- Figure 50 : Simulation hydrodynamique N°2(*année 2015*).
- Figure 51 : L'évolution des ΔH durant la deuxième simulation.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les précipitations saisonnières des périodes 1975/1991 et 1991/2005.

Tableau 2 : Températures maximales, minimales et moyennes à la station de Sidi Bel Abbès.

Tableau 3 : Evapotranspiration réelle annuelle calculée selon TURC à la station de Sidi Bel Abbès (1992/2005).

Tableau 4 : Les moyennes des précipitations, des températures et des évapotranspirations. (Périodes 1985/1992, 1992/2005)

Tableau 5 : Ecart entre les potentiels mesurés et calculés après calage du modèle en régime permanent.

Tableau 6 : Bilan de la nappe calculé par le modèle.

Tableau 7 : Recharge de la nappe en Mm^3/an par période.

Tableau 8 : Ecart entre les potentiels mesurés et calculés après calage du modèle en régime transitoire.

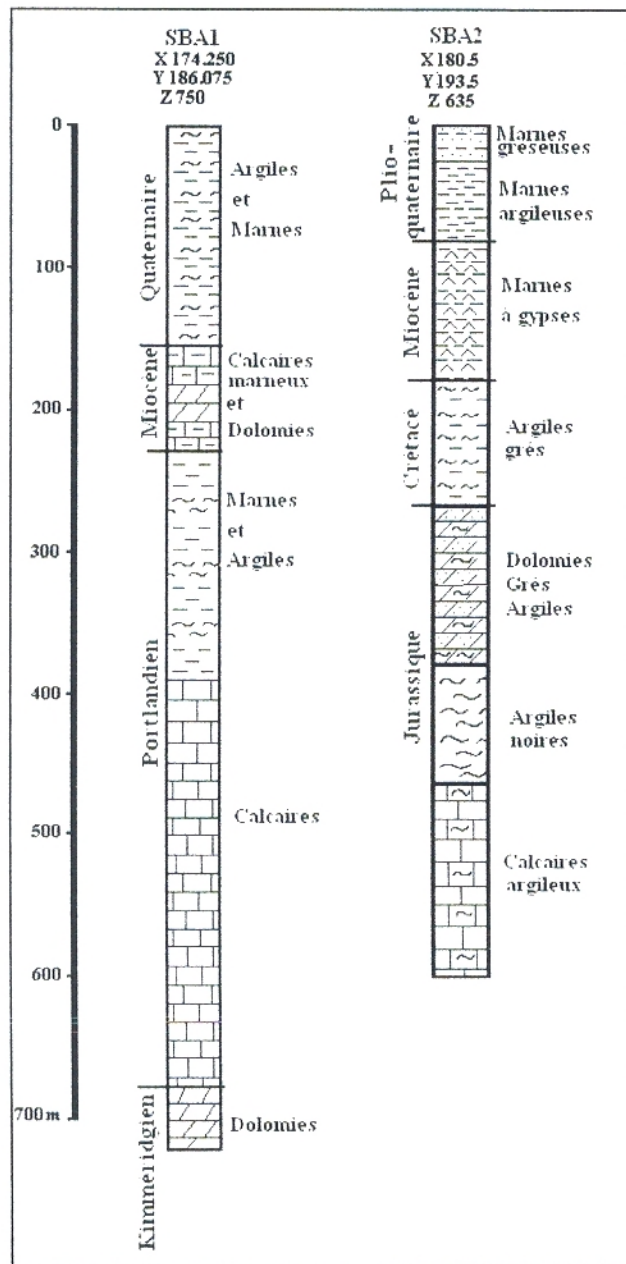
ANNEX 2

Mois Année	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
91/92	6.2	17.6	33.6	15.3	24.7	20.5	73.5	27.4	64	23.1	0.7	0.2
92/93	1	16.5	16.2	16.1	1.7	67.4	13.7	52.9	31.4	2.6	0	10.2
93/94	10.8	25.4	48	11.4	52.9	51.3	7.5	37.5	7.7	0.1	14.6	0.7
94/95	56	31.6	22.2	19.1	24.5	25.2	109.8	25.2	0.9	0.9	0	3.4
95/96	17	12.7	21.4	44.8	92.2	102.3	46.1	58.9	33.4	51.3	25.1	4
96/97	18.6	5.1	16.5	24.3	56.4	0	0.1	33.7	14.8	4.1	1.9	17.8
97/98	78	21.3	65.7	28.9	18.9	41.7	10.1	28.5	28.8	0.7	0	7.2
98/99	3.6	1.2	21.7	32.2	35.5	83	72.1	0	0.3	0.5	0	1.2
99/00	32.1	17.1	60	67.8	0.4	0	15.5	14.2	29.4	0.1	0	0.4
00/01	32.5	71	70.9	16.6	89.3	33.7	1.4	14.6	10.8	0.6	0	0
01/02	26	30.9	116.2	34.1	4.2	6	33.2	55.4	32.5	0	0	10
02/03	0	23.4	69.7	6.6	103.2	86.1	21.5	23.2	11.8	10.9	0.8	0.1
03/04	0.1	23.6	43.8	50.3	45.2	29.3	14.5	39.4	61.3	9.9	0.2	7.9
04/05	19.6	46.3	47.3	92.5	15.8	40	32.7	10.6	2.1	6	1.3	0

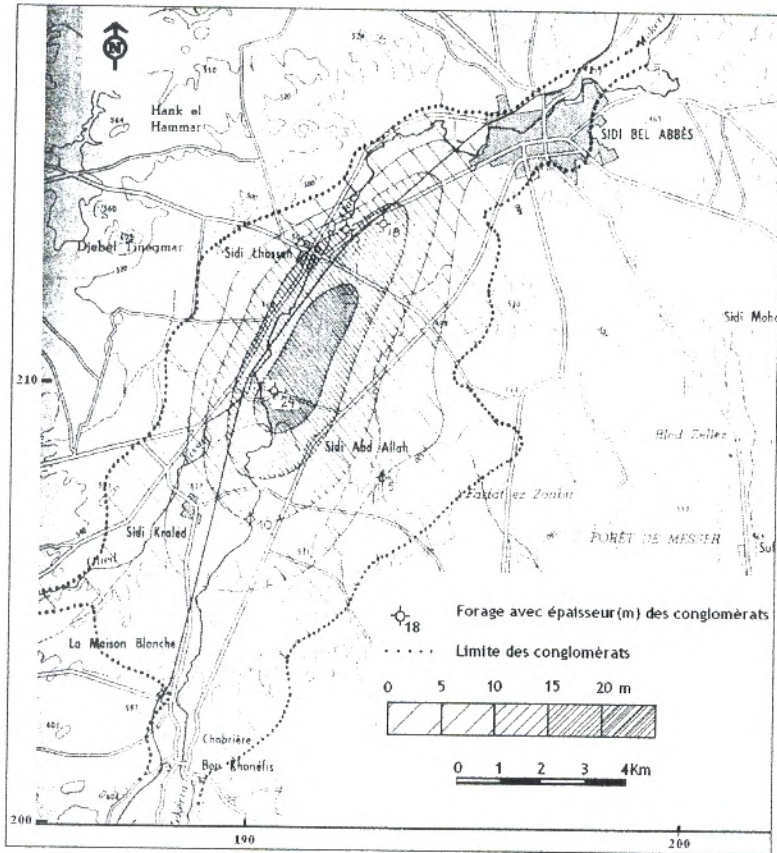
Annexe 1 : Pluviométries moyennes mensuelles à la station de Sidi Bel Abbès de la période 1991/2005 (ONM Oran)

Mois Année	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
92/93	22.6	16.1	12.4	10.1	7.4	8.1	12.1	12.3	18.8	22.1	28.2	28.2
93/94	19.6	16	12.6	9.3	8.4	9.5	12.7	12.3	18.8	22.1	28.2	28.2
94/95	20.8	18	13.5	9.5	8.7	10.9	11.5	12.8	18.5	21.2	24.7	25.5
95/96	19.6	18.8	14.4	11.8	11.5	8.9	11.3	13.1	16	22.1	24.1	24.9
96/97	20.6	16.4	13.6	11.9	11.5	11.6	12.7	16.2	19.3	23.1	24.1	25.6
97/98	23.8	19.9	14.7	11.4	10.3	12	12.5	14.5	17.5	23.8	27.3	27.2
98/99	24	16.8	13.5	9	9.9	8.7	12.7	14.8	20.9	23.5	26.7	27.6
99/00	23.2	20.9	11.6	9.5	7.4	11	12.9	14.8	20.2	24.3	27.6	27.3
00/01	22.8	16.7	13.2	11.8	10.5	10.5	15.2	14.7	18	25.5	27.1	28.1
01/02	24	21.7	12.5	9.8	9.6	10.6	13	14.4	18.6	25.4	25.5	25.6
02/03	22.6	19.1	14.4	12.6	9.1	9.5	13.9	14.6	18.8	26.2	28.8	28.3
03/04	23.4	19.4	14	10.6	10.4	12.5	12.5	14	16.3	23.9	27.6	28.5
04/05	24.8	20.9	11.8	9.4	6.4	12.7	12.7	14.6	20.7	24.2	27.9	26.8

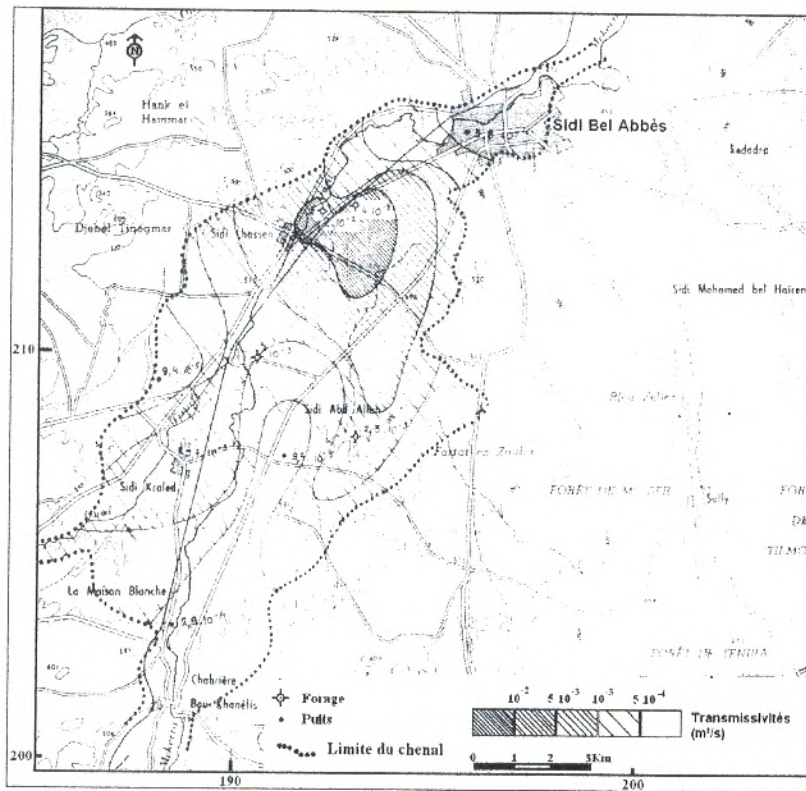
Annexe 2 : Températures moyennes mensuelles à la station de Sidi Bel Abbès de la période 1992/2005 (ONM Oran)



Annexe 3 : Log stratigraphiques des forages SBA1 et SBA2 (résultats de l'étude géophysique C.G.G). (B. OUASSINI et S. BERROUGAT, 2002)



Annexe 4 : Carte des isopaches des conglomérats plio-quatérnaires.
(B. SOURISSEAU, 1973)



Annexe 5 : Carte des transmissivités du chenal conglomératique.
(B. SOURISSEAU, 1973)

NOM	X	Y	Z	T Déscente	T Remontée	Coefficient d'emmagasinement
02-241	187.8	209.15		$9.4 \cdot 10^{-5}$	$3.4 \cdot 10^{-5}$	0.034
08-240	177.800	210.200	640	$2.9 \cdot 10^{-4}$	$2.8 \cdot 10^{-5}$	0.059
102-241	191.100	207.400		$9.4 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	0.03
11-241	181.000	208.000	580	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$1.9 \cdot 10^{-4}$	0.37 (?)
115-241	186.400	214.300	520	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	0.162
14-241	182.750	201.500	580	$4.6 \cdot 10^{-4}$	$4.1 \cdot 10^{-4}$	0.02
161-241	194.250	168.000	480	$9 \cdot 10^{-4}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	0.03
188-241	198.6	218.425		$5.5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	0.11
199-241	184.8	205.4		$T_1=4.6 \cdot 10^{-4}$ $T_2=8.8 \cdot 10^{-4}$	$2.9 \cdot 10^{-3}$ $1.3 \cdot 10^{-4}$	0.084
22-271	177.900	198.300		$1.4 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$	
23-240	174.000	202.500	640	$1.8 \cdot 10^{-4}$	$9.8 \cdot 10^{-5}$	0.22 (?)
24-272	196.600	196.400		$2.4 \cdot 10^{-4}$	$3.1 \cdot 10^{-4}$	0.01
249-241	198.400	215.600		$7.5 \cdot 10^{-5}$	$3.4 \cdot 10^{-5}$	0.12 (?)
26-241	191.900	213.300		$4.8 \cdot 10^{-3}$	$5.6 \cdot 10^{-3}$	0.31
29-241	188.200	203.350	560	$2.9 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	0.12
29-271	172.700	198.800		$9 \cdot 10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-4}$	0.2
31-240	178.750	203.800		10^{-4}	$1.2 \cdot 10^{-3}$	0.083
31-272	185.100	197.900		$4.8 \cdot 10^{-3}$	$4.3 \cdot 10^{-4}$	0.08
34-241	201.100	214.000		$1.5 \cdot 10^{-3}$	$1.35 \cdot 10^{-3}$	0.012
34-272	181.900	195.300		$1.6 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	0.22
37-272	180.300	198.900		$6.6 \cdot 10^{-5}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	0.03
38-240	174.600	206.000	640	$6 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	0.135
38-272	182.200	199.000		$1.3 \cdot 10^{-3}$	$3.1 \cdot 10^{-3}$	
39-272	182.300	191.700		$5.6 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$	0.03
42-271	170.800	196.000		$3 \cdot 10^{-4}$	$6.5 \cdot 10^{-4}$	0.26
45-241	205.5	212.35		$7.1 \cdot 10^{-5}$	$3.6 \cdot 10^{-5}$	0.25
48-272	190.700	196.65		10^{-3}	$4.6 \cdot 10^{-4}$	0.02
56-241	204.300	213.100		$4.3 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$	0.09
58-241	208.5	210.84		$5.5 \cdot 10^{-3}$	$3.1 \cdot 10^{-4}$	0.019
77-241	202.800	204.000	641	$T_1=6.5 \cdot 10^{-4}$ $T_2=10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-4}$ $8.4 \cdot 10^{-5}$	0.018
96-241	195.700	207.000		$3.5 \cdot 10^{-4}$	$3.5 \cdot 10^{-4}$	0.02
SBA 5	189.975	206.900	534	$2 \text{ à } 3 \cdot 10^{-3}$		0.003
SBA 6	193.000	207.875	517	$2.4 \cdot 10^{-4}$		0.01
SBA 9	192.875	213.575	485	10^{-3}		0.007
SBA 8	191.910	213.300	510	$2 \cdot 10^{-2}$		0.004
SBA 7	190.500	209.800	516	$5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$	

Annexe 6 : Paramètres hydrodynamiques de la plaine de Sidi Bel Abbès
(B. SOURISSEAU, 1973)

Annexe 7 : L'ETAT DE L'ART EN GEOSTATISTIQUE

La géostatistique est une application de la théorie des fonctions aléatoires à des données localisées dans un espace géographique. Les méthodes géostatistiques, telles le krigeage, ont été initialement proposées en exploration minière et pétrolière et elles ont retrouvé leur place en hydrogéologie il y a plus d'une décennie.

La théorie des variables régionalisées

La géostatistique est construite autour du concept de *variable régionalisée*, c'est-à-dire une fonction $z(x)$ dans un domaine D de l'espace géographique (qui inclut éventuellement un intervalle de l'axe temporel), où x est un vecteur de coordonnées spatiales et z est une valeur de la quantité d'intérêt. La géostatistique peut être définie comme une application de méthodes probabilistes à des variables régionalisées (H. WACKENAGAEL, 2004).

Géostatistique linéaire

La géostatistique est classiquement subdivisée en géostatistique linéaire et multivariable, géostatistique non-linéaire, et simulations géostatistiques.

Le variogramme :

En géostatistique linéaire, on explore la structure de la variabilité spatiale à l'aide du *variogramme* $\gamma(h)$, qui est défini à partir de la variance des incréments $Z(x+h)-Z(x)$, où h est le vecteur reliant deux points dans D . Sous l'hypothèse que les incréments sont stationnaires, c'est-à-dire que la variance des incréments est invariante pour toute translation du vecteur h , on a

$$\text{var}(Z(x+h) - Z(x)) = 2 \gamma(h)$$

On suppose habituellement que l'espérance des accroissements est stationnaire et nulle, de sorte que :

$$\gamma(h) = 0.5 E [(Z(x+h) - Z(x))^2]$$

La forme du variogramme :

La forme du variogramme indique les propriétés structurales de la série et l'échelle des changements. (fig. 1)

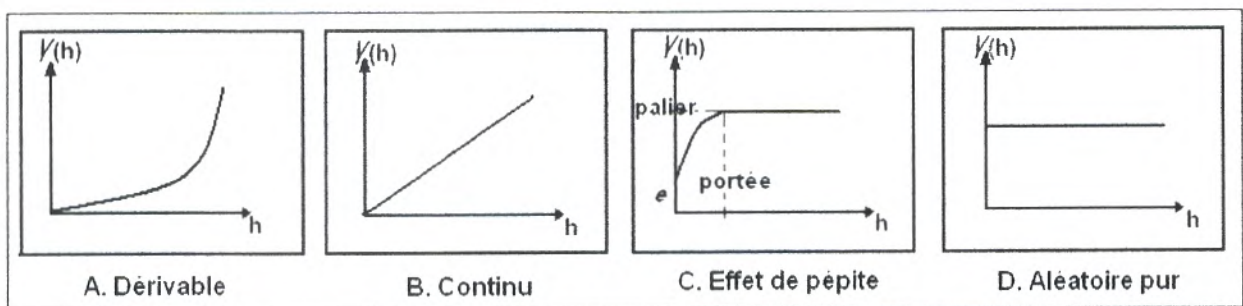


Figure 7-1 : Les différentes formes du variogramme : A et B montrent l'existence d'un gradient.

C et D ont une variance à l'origine, C indique l'intervalle (portée) à partir duquel il y a indépendance entre les observations, D : observations indépendantes. (F. IBANEZ, 2000 :

<http://www.obs-vlfr.fr/Enseignement/anado/series/chap3.htm>)

Le krigeage :

Le modèle théorique de variogramme est ensuite utilisé pour décrire la dépendance spatiale entre les différentes observations de la variable Z . Le principe consiste à déterminer les poids W_{ij} tels que les semi-variances calculées en considérant la nouvelle estimation Z_j se situent sur le modèle théorique de variogramme établi.

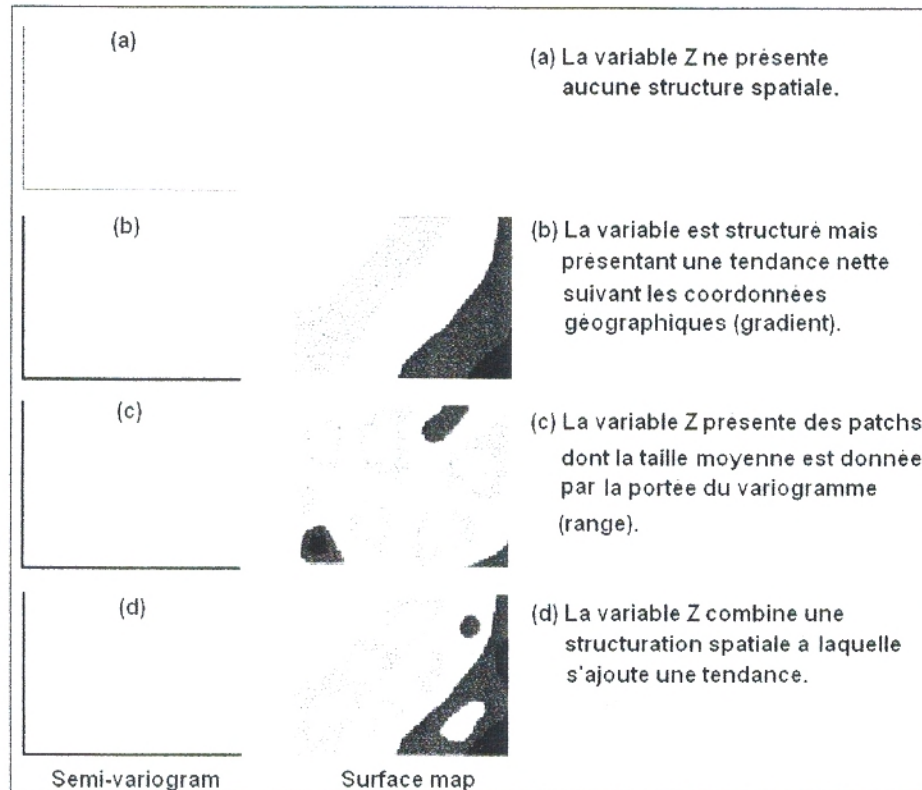


Figure 7-2 : Exemples triés de Ettema et Wardle 2002. (K. SOUDANI, 2007)

Annexe 8 : MODELISATION DES NAPPES

En hydrogéologie, les modèles hydrodynamiques sont les outils utilisés pour reconstituer les circulations d'eau souterraine dans une nappe aquifère. A partir du champ de vitesses ainsi constitué, des modèles hydrodispersifs viennent se coupler pour simuler d'éventuelles propagations de polluants.

I. Formulations mathématiques

Les écoulements souterrains sont décrits par les équations suivantes :

- **principe de conservation du moment ou équation de Darcy**
- **principe de continuité ou de conservation de la masse**
- **équation d'état**

I-1. Equation du mouvement : loi de Darcy

L'équation de Darcy écrite sous forme tensorielle est la suivante :

$$(1) \quad \mathbf{U} = -\mathbf{K} \cdot \text{grad } h \quad \text{où}$$

U : vitesse moyenne de Darcy [$L \cdot T^{-1}$]

K : tenseur de perméabilité [$L \cdot T^{-1}$]

h : potentiel hydraulique [L]

Par ailleurs, si l'on choisit les axes coordonnés colinéaires aux directions principales du tenseur de perméabilité, le tenseur K se diagonalise selon les trois composantes principales du tenseur de perméabilité du milieu.

Dans ces conditions, l'équation (1) se décompose de la manière suivante en utilisant les vitesses moyennes de Darcy U_x , U_y et U_z :

$$U_x = -K_{xx} \cdot \delta h / \delta x$$

$$U_y = -K_{yy} \cdot \delta h / \delta y$$

$$U_z = -K_{zz} \cdot \delta h / \delta z$$

I-2. Equation de continuité ou de conservation de la masse

L'équation de continuité exprime la variation de flux entrant et sortant d'un Volume Expérimental Représentatif (VER) considéré. Elle s'écrit :

$$(2) \quad \text{div}(\rho \cdot \mathbf{U}) + \delta \rho / \delta t + \rho q = 0 \quad \text{avec}$$

ρ : masse volumique de l'eau [$M \cdot L^{-3}$]

ω : porosité du milieu poreux définie comme le rapport entre le volume des vides dans le VER et son volume total (sans dimension)

U : vitesse de filtration de l'écoulement (vitesse de Darcy) [$L \cdot T^{-1}$]

q : débit volumique d'eau prélevé (ou injecté) par unité de volume du VER [T^{-1}]

t : temps [T]

I-3. Equation d'état

En hydrogéologie, nous adoptons un modèle élastique pour expliquer le comportement mécanique de l'eau et de la matrice rocheuse en fonction de la pression (in I.GAUBI 1993, in E.LEDOUX, 1986). Les équations d'état adoptées sont les suivantes :

$$(3) \quad \frac{d\rho}{\rho} = \beta dp \quad \text{pour l'eau} \quad \text{où}$$

$$dV/V = -\alpha \cdot d\sigma = \alpha dp \quad \text{pour la matrice}$$

α : est le coefficient de compressibilité de la matrice poreuse [$M^{-1} \cdot L \cdot T^2$]

β : est le coefficient de compressibilité du fluide (eau) [$M^{-1} \cdot L \cdot T^2$]

σ : représente la contrainte effective au sein du VER de volume V [$M^{-1} \cdot L \cdot T^2$]

p : est la pression interstitielle du fluide [$M^{-1} \cdot L \cdot T^2$]

ρ : est la masse volumique du fluide [$M \cdot L^{-3}$]

En l'absence de contrainte extérieure sur le milieu poreux, il y a égalité entre $d\sigma$ et dp d'après la relation Terzaghi $d\sigma + dp = 0$.

Il en découle l'équation qui relie la variation $d(\rho\omega)$ du stock en eau dans le VER à la variation dh du niveau piézométrique mentionnée par G. MRSILY 1981 (GAUBI 1993) :

$$d(\rho\omega) = \rho \cdot d\omega + \omega \cdot d\rho = \rho \cdot g \cdot (\alpha + \omega \cdot \beta) \cdot dp = \rho^2 \cdot g \cdot (\alpha + \omega \cdot \beta) \cdot dh$$

Si l'on pose $S_s = \rho \cdot g \cdot (\alpha + \omega \cdot \beta)$, on définit le coefficient d'emmagasinement spécifique du milieu poreux sur tout VER [L^{-1}].

En combinant les équations (1), (2) et (3), en supposant ρ constant, nous obtenons l'équation de diffusivité en nappe libre :

$$(4) \quad \text{div}(\mathbf{K} \cdot \text{grad } h) = S_s \cdot \frac{\delta h}{\delta t} + q$$

L'équation (4) peut être mise sous une autre forme :

$$(5) \quad \frac{\delta}{\delta x} [K_x \cdot \frac{\delta h}{\delta x}] + \frac{\delta}{\delta y} [K_y \cdot \frac{\delta h}{\delta y}] + \frac{\delta}{\delta z} [K_z \cdot \frac{\delta h}{\delta z}] = S_s \cdot \frac{\delta h}{\delta t} + q$$

En faisant une intégration et en tenant compte de $\frac{\delta h}{\delta z} = 0$ (hypothèse de Dupuit), nous pouvons linéariser cette équation différentielle si l'on considère que z_1 et z_2 varient peu en fonction de x et y et que les quantités

$$T_x = \int_{z_1}^{z_2} K_x \cdot dz, \quad T_y = \int_{z_1}^{z_2} K_y \cdot dz, \quad S = \int_{z_1}^{z_2} S_s \cdot dz \quad \text{et} \quad Q = \int_{z_1}^{z_2} q \cdot dz$$

varient peu avec la charge.

$$(6) \quad \frac{\delta}{\delta x} [T_x \cdot \frac{\delta h}{\delta x}] + \frac{\delta}{\delta y} [T_y \cdot \frac{\delta h}{\delta y}] + \frac{\delta}{\delta z} [T_z \cdot \frac{\delta h}{\delta z}] = S \cdot \frac{\delta h}{\delta t} + Q$$

Où

T_x et T_y sont les transmisivités de l'aquifère selon les directions respectives O_x et O_y [$L^2 \cdot T^{-1}$]

S est le coefficient d'emmagasinement (sans dimension)

Q est le débit prélevé ou injecté par unité de surface [$L \cdot T^{-1}$]

De plus si l'on considère le milieu isotrope ($T_x = T_y$), l'équation (6) devient :

$$(7) \quad \delta^2 h / \delta x^2 + \delta^2 h / \delta y^2 + \delta^2 h / \delta z^2 = S/T \cdot \delta h / \delta t + Q/T$$

II. Méthodes de résolution :

Dès que l'équation différentielle ponctuelle continue (7) est définie avec ses conditions initiales et ses conditions aux limites, deux types de résolution se présentent :

Lorsque l'on choisit des fonctions constantes (polynôme de degré zéro) pour fonction d'approximation, les éléments étant en général rectangulaires ou carrés, la méthode est appelée **méthode des différences finies**.

Lorsque l'on emploie des fonctions d'approximation polynomiales de degré supérieur ou égal à 1, la méthode est dite **méthode des éléments finis** et le maillage est triangulaire.

Dans les deux cas, la méthode aboutit à un ou plusieurs systèmes d'équations linéaires dont les inconnues sont les valeurs approchées de la fonction recherchée (la charge hydraulique en l'occurrence) en un nombre donné de points (le centre de chaque maille en l'occurrence).

Nous exposerons ici la méthode des différences finies présentée par E. LEDOUX (1986) qui est le plus souvent utilisée en hydrogéologie car elle nécessite beaucoup moins d'espace mémoire sur les ordinateurs.

Cette méthode consiste à discrétiser le domaine considéré en mailles carrés de côté a . L'équation (7) va s'appliquer à chaque maille où nous allons choisir pour approximation de la charge, une fonction H_i définie sur chaque maille i . Les calculs sont faits en admettant que la valeur de la charge est attribuée au centre de la maille considérée.

Nous procéderons de la même manière pour tous les autres paramètres (T_i , S_i et Q_i).

En admettant que les fonctions d'approximation satisfont localement (c'est-à-dire au centre de chaque maille) à l'équation de diffusivité, nous obtenons un système d'équations linéaires définissant les valeurs H_i au centre de chaque maille.

Si l'on considère une maille i , elle est entourée de quatre mailles que l'on peut nommer : N (nord), S (sud), E (est) et W (ouest).

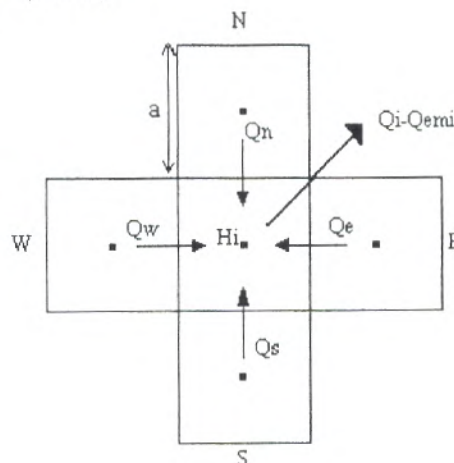


Figure 8-1 : Bilan des flux en eau sur une maille i

D'après le principe de continuité qui implique conservation de débit entrant algébriquement par les quatre limites de la maille i , nous avons :

$$(8) \quad Q_N + Q_S + Q_E + Q_W = Q_i + Q_{emi} \quad \text{où}$$

Q_{emi} désigne le débit emmagasiné dans la maille i .

La loi de Darcy appliquée à la maille i nous donne :

$$(9) \quad Q_N = T_N \cdot a \cdot (H_N - H_i) / a = T_N \cdot (H_N - H_i) \quad \text{où}$$

T_N représente la transmissivité de l'aquifère entre la maille i et la maille située au nord.
 H_i et H_N sont les approximations de charge hydraulique respectivement au centre de la maille i et de la maille N .

Enfin, l'équation d'état fournit l'expression du débit emmagasiné :

$$(10) \quad Q_{emi} = a^2 \cdot S_i \cdot dh/dt$$

S_i est le coefficient d'emmagasinement défini au centre de la maille i .

Tous les calculs précédents nous permettent d'obtenir :

$$(11) \quad T_N \cdot (H_N - H_i) + T_S (H_S - H_i) + T_E \cdot (H_E - H_i) + T_W (H_W - H_i) = Q_i + a^2 \cdot S_i \cdot dH_i / dt$$

En appliquant le même travail à chaque maille du modèle, nous obtenons un système linéaire de n équations à n inconnues que nous pouvons résoudre.

Nous simplifierons la présentation en adoptant l'écriture matricielle suivante :

$$(12) \quad \mathbf{T} \cdot \mathbf{H} = \mathbf{Q} + \mathbf{a}^2 \cdot \mathbf{S} \cdot d\mathbf{H} / dt$$

En définissant les vecteurs :

$$\begin{array}{ccc} & H_1 & Q_1 \\ & H_2 & Q_2 \\ \text{Piézométrie } H & H_3 & \text{et les débits } Q \\ & & Q_3 \\ & H_N & Q_N \end{array}$$

et les matrices T et S .

III. Conditions initiales et conditions aux limites :

Afin de résoudre l'équation de diffusivité, il est nécessaire de définir les conditions aux limites du domaine discrétisé.

III-1. Conditions initiales

Les conditions initiales sont données par la variable h (charge hydraulique) qui est supposée être connue en tout point du domaine modélisé à un temps référence $t = 0$.

III-2. Conditions aux limites

Nous définissons des conditions aux limites (conditions de flux ou de potentiel) en des points qui sont supposés être indépendants des phénomènes internes du domaine qui les entoure.

Les principaux types de conditions aux limites couramment citées dans la bibliographie (G. de MARSILY, 1981) sont les suivants :

- limites à potentiel imposé (condition de Dirichlet)
- limite à flux imposé (condition de Neumann)
- condition de Fourier
- condition de surface libre.

a) Limite à potentiel imposé

Une limite est dite à potentiel imposé, si le long de cette limite, la charge hydraulique est indépendante des conditions de circulation de la nappe. Cette charge peut varier dans l'espace et le temps.

Dans la réalité, ces limites sont matérialisées par des plans d'eau, des lacs, des canaux ou des rivières en communication avec des nappes.

b) Limite à flux imposé

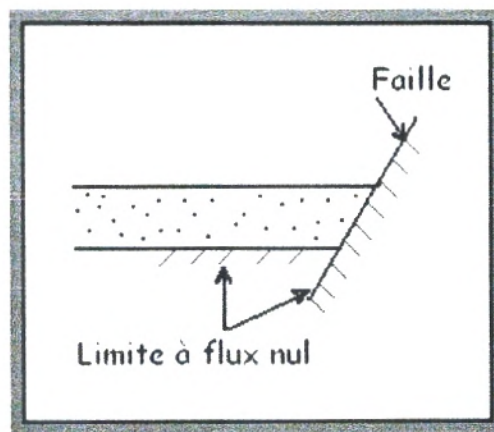
Une limite est dite à flux imposé, si le long de cette limite le débit par unité de surface :

$$q_n = -K \cdot dh / dn \quad \text{est constant et connu.}$$

Cela revient à imposer un gradient de charge perpendiculaire à la limite considérée.

Deux cas se présentent :

- **dh / dn = 0 : limite à flux nul** : ces limites sont représentées lorsqu'un aquifère est en contact avec des formations imperméables



(G. MARSILY, 1981)

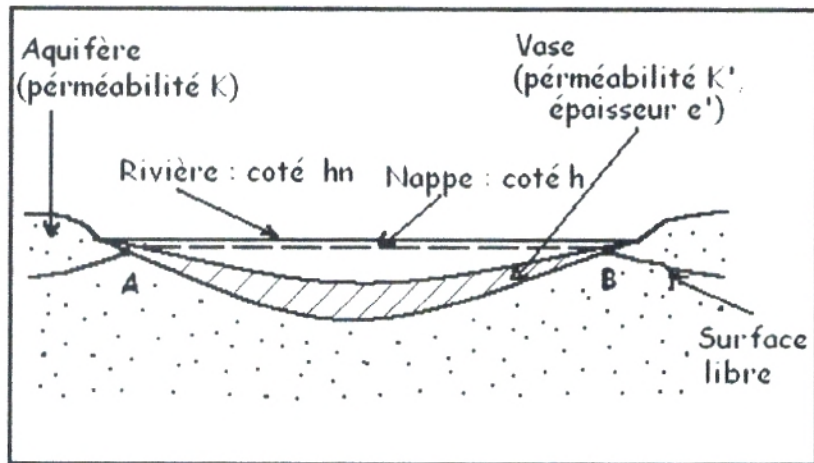
- **dh / dn ≠ 0 : limite à flux imposé non nul** : ces limites sont matérialisées par les limites du domaine ou par les ouvrages de captage.

c) Condition de Fourier

Cette condition se présente lorsqu'une rivière, dont le fond est colmaté, est en communication (drainage ou alimentation) avec une nappe libre.

La condition de Fourier est alors définie par la conservation du flux à la traversée de l'interface AB et s'écrit :

$$-K \delta h / \delta n + (K' / e') h = (K' / e') \cdot h_r$$

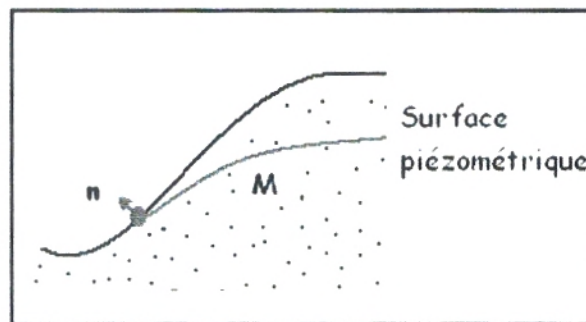


(G. MARSILY, 1981)

d) Condition de surface libre

La condition de surface libre est une double condition imposée sur une surface :

- condition de potentiel : La pression atmosphérique s'exerce sur tous les points M de la surface libre considérée. Exprimée en charge, elle est prise par convention égale à 0 : $h = z$



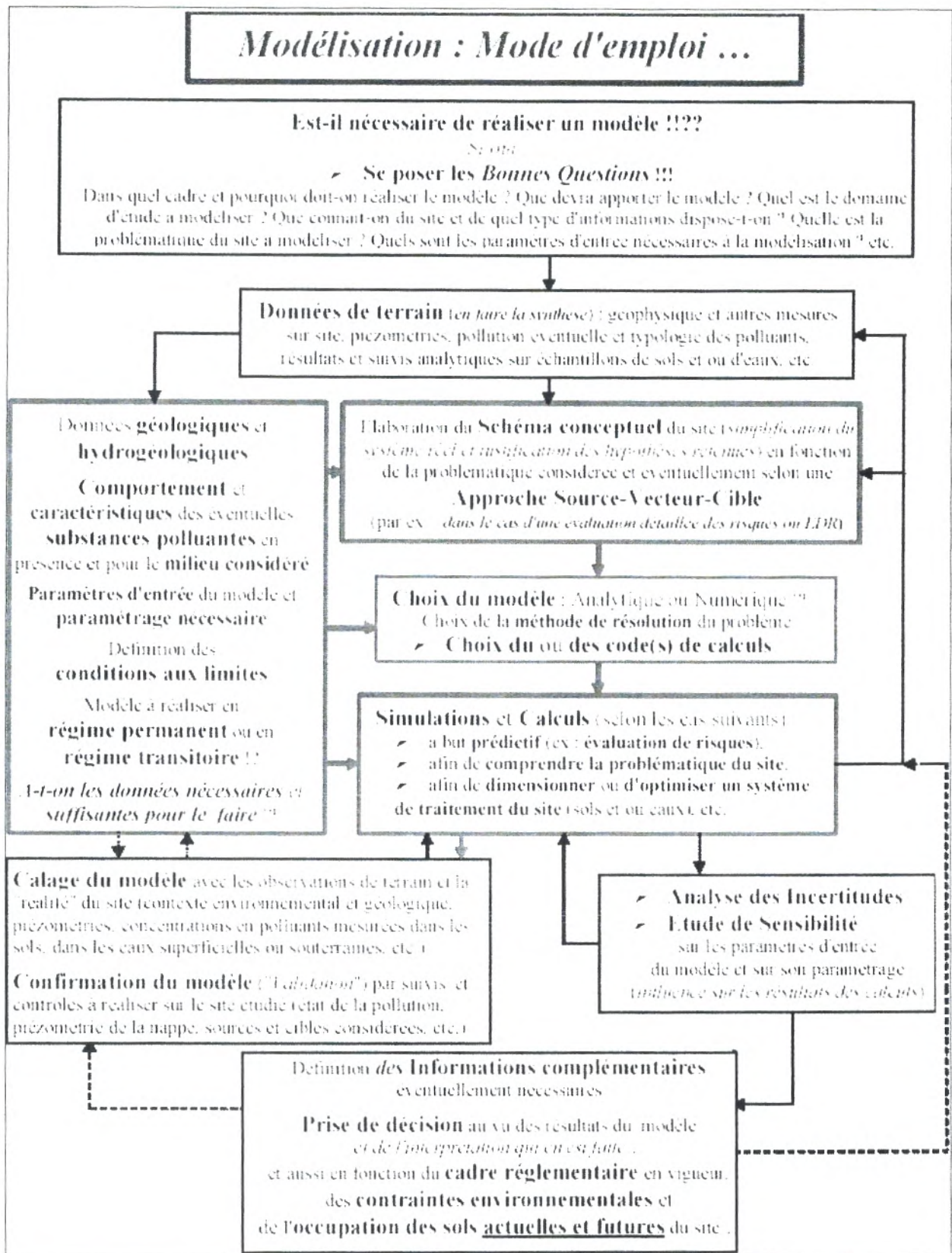
(G. MARSILY, 1981)

- condition de flux : Si la nappe n'est pas alimentée par sa surface, nous avons : $\delta h / \delta n = 0$
Si la surface libre de la nappe est traversée par un flux (alimentation ou évaporation), ce flux est donné par :

$$\delta h / \delta n = a \quad \text{où}$$

n est le vecteur normale orienté vers l'extérieur

a est positif ou négatif selon qu'il y a alimentation ou évaporation.



Annexe 9 : Schéma de la réalisation d'une modélisation en écoulement et en transport de polluants. (T. BLONDEL, 2002)

BIBLIOGRAPHIE

- Agence de bassin Orani-Chott Chergi (1998)** : L'eau et ses usages dans la wilaya de Sidi Bel Abbès. *Document de synthèse*.
- AHLFELD D. P., MULLIGAN A.E. (2000)** : Optimal management of flow in groundwater systems. *Ed. Academic Press*.
- AVERON F. (2006)** : Géostatistique, régression spatiale, interpolation optimale. *Cours*.
<http://web.univ-pau.fr/~avram/geo/geo1.pdf>
- BABA-HAMED K. (2007)** : Hydrodynamique et modélisation d'une nappe alluviale, validation par l'approche géostatistique. Application à la nappe de la plaine de Maghnia (NW Algérien). *Thèse Doctorat*. Univ. Tlemcen.
- BAZZANA L., RUFFO P., RENARD D. (1995)** : Estimation de cartes de profondeur conditionnées par des inégalités. *Cahiers de géostatistique 5*. Ecole des mines Paris, p. 23-43.
http://cg.ensmp.fr/bibliotheque/1995/BAZZANA/Publication/DOC_00566/BAZZANA_Publication_00566.pdf
- BEKHDADI A. (s.d.)*** : Synthèse hydrogéologique de la plaine de Sidi Bel Abbès. (s.l.)
- BERIT A., OLSSON J. (s.d.)** : Integration and coupling of hydrological models with water quality models. Applications in Europe. SMHI, Sweden.
<http://www.wno.ch/pages/prog/hwrp/homs/Components/English/k55102.pdf>
- BERNARD-MICHEL C. (2006)*** : Indicateurs géostatistique de la pollution dans les cours d'eau. *Thèse de doctorat*. Ecoles des mines de Paris.
http://pastel.paristech.org/1878/01/These_C_Bernard_Michel-1.pdf
- BLONDEL T. (2002)*** : Modélisation numérique avec Visuel Modflow v. 3.0. *Rapport Cabinet Conseil Blondel*.
http://transpol.ineris.fr/pdf/cr1/result_ccb_cr1_1.pdf
- BOBEE B. (1978)** : Elément de statistiques. *Cours*. Univ. Québec.
<http://www.cig.ensmp.fr/~hydro/BIB/manuels/Bobee.pdf>
- BOIS Ph., OBLD Ch., ZIN L. (2007)** : Introduction au traitement de données en hydrogéologie. *Cours*. Institut national Polytechnique de Grenoble.
<http://www.cig.ensmp.fr/~hydro/BIB/manuels/Bois-Obled-Zin.pdf>
- BOUANANI A. (2004)*** : Hydrologie, transport solide et modélisation. Etude de quelques bassins de la Tafna (NW- Algérie). *Thèse de doctorat*. Univ. Tlemcen.
- BROCHU Y. (2002)** : Estimation directe des charges hydrauliques d'un aquifère par krigeage. *Mémoire Maîtrise ès sciences appliquées*. Univ. Montréal.
- CASTANY G. (2002)** : Hydrogéologie. Principes et méthodes. *Ed. Dunod*, Paris.

- CAUSEUR D. (s.d.)** : Modélisation géostatistique. *Cours*. Laboratoire de mathématiques appliquées. Agrocampus. Rennes.
<http://www.agrocampus-rennes.fr/math/causeur/PDF/PolyGeostatistique.pdf>
- CHAUVET P. (1999)** : Aide-mémoire de géostatistique linéaire. Ecole des Mines Paris.
- CHILES J. P. (2004)** : La modélisation géostatistique de la variabilité spatiale et ses applications. *Habilitation à diriger des recherches*. Univ. Pierre et Marie Curie.
http://cg.ensmp.fr/bibliotheque/2004/CHILES/These/DOC_00401/CHILES_These_00401.pdf
- DARRICAU-BEUCHER H. (1981)** : Approche géostatistique du passage des données de terrain aux paramètres des modèles en hydrogéologie. *Thèse de Docteur-Ingénieur*. Ecole National supérieure des Mines de Paris.
- DASSARGUES A. (1995)*** : Modèles mathématiques en hydrogéologie. E.D.P. Bucarest.
<http://www.cig.ensmp.fr/~hydro/BIB/manuels/Dassargues-HGA.pdf>
- DRAPEAU L. (s.d.)*** : Statistique et interpolation dans le SIG.
<http://www.faocopemed.org/vldocs/0000028/publi10.pdf>
- EL MANSOURI B. (1993)** : Structure et modélisation quantitative de l'aquifère de Berchid (Maroc). Validation par l'approche géostatistique. *Thèse de doctorat de l'université en Géosciences*. Univ. Des Sciences et Techniques Lille, France. p. 96.
- FAVREAU G. (1996)** : Modélisation locale de la recharge de la nappe phréatique sur le site de Wankama (sud-ouest Niger). *Mémoire DEA*. Univ. Paris-sud.
- FLIPO N., POULIN M., EVEN S., LEDOUX E. (s. d.)** : Modélisation intégrée du bassin du Grand Morin, Choix conceptuels. CIG, ENSMP.
- FOUQUET de, C. (2006)** : La modélisation géostatistique des milieux anthropisés. *Habilitation à diriger de recherche*. Univ. Pierre et Marie Curie.
- GAALOUL N., BOULBABA M. et al. (s. d.)** : Caractérisation et modélisation d'une nappe en zone aride à semi-aride dans la région méditerranéenne.
<http://www.labos.upmc.fr/sisyphe/dga/geofcan03/pdf/gaaloul.pdf>
- GAGON F. (1998)*** : solution de problème inverse en hydrogéologie à l'aide de méthodes géostatistiques. *Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées*. Univ. Montréal.
http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk2/tape17/PQDD_0014/MQ37442.pdf
- GASCOIN S. (2005)** : Modélisation hydrogéologique de la mer d'Aral. *Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie*. Univ. Pierre et Marie Curie.
http://www.sisyphe.upmc.fr/~gascoin/docs/memoire_aral.pdf
- GAUBI E. (1993)** : Hydrodynamique, Transport de polluants et modélisation en milieu fluvio-glaciaire (application à la nappe alluviale de la plaine de Pontarlier-Doubs). *Thèse de doctorat*. Univ. Franche-Comté, France. p. 99-126.
- GRATTON Y. (2002)*** : Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale. *Articles*. Institut d'Analyse Géographique.
http://www.iag.asso.fr/pdf/krieage_juillet2002.pdf

- Institut EGID-Bordeaux 3 (2005)** : Modélisation hydrodynamique des nappes tertiaires du Médoc : teste des hypothèses géologiques et impacts potentiels sur la ressources. *Rapport final d'exécution des travaux*. Univ. Michel de Montagne. France.
- KINZELBACH W., RAUSCH R. CHIANG W. H. (1995)*** : Aquifer simulation model help. L'aide du logiciel ASMWIN.
- KITANIDIS P.K. (1997)** : Introduction to géostatistics. Application in Hydrogeology. Camgride University Press.
- KOUNIKOU L.F. (2000)*** : Utilisation de modèles numérique pour simuler les processus d'écoulement et de transport dans les eaux souterraines. *Vol. IV, Environmental isotopes in the hydrogeological cycle*. Principes and applications. UNESCO/IAEA.
- LALLAHEM S. (2002)** : Structure et modélisation hydrodynamique des eaux souterraines : application à l'aquifère crayeux de la bordure nord du bassin de Paris. *Thèse de doctorat*. Univ. des Sciences et Technologies de Lille.
<http://www.cig.ensmp.fr/~hydro/THE/LALLAHAM.pdf>
- LARDIN P. (1999)** : Le diagramme Voronoï généralisé comme support à la simulation des écoulements d'eau souterraine par différences finies intégrées. *Mémoire Maître ès sciences*. Univ. Laval.
http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk2/tape9/PQDD_0017/MQ49033.pdf
- LEBID H. (2001)*** : Modèles de représentation de cartes hydrogéologique et de vulnérabilité à la pollution. Exemple de la carte de Sidi Bel Abbés au 1/50 000. *Mémoire de magister en géologie appliquée*. Univ. D'Oran.
- LEDOUX E. (2003)*** : Modèles mathématiques en hydrogéologie. *Cours*. Centre d'Information Géologique.
<http://www.cig.ensmp.fr/~hydro/BIB/manuels/ledoux.pdf>
- LEFEBVRE R., BOUTIN A., MARTEL R. et al. (2003)** : Caractérisation et modélisation numérique de l'écoulement et de la migration de la contamination en TCE dans l'eau souterraine du secteur Valcartier, Québec, Canada. *Rapport de recherche R-631*. INRS- Eau, Terre et Environnement.
- MANIA J. et DJEDA F. (1990)** : Hydrogéologie de la plaine alluviale de Haut Cheliff de la région de Khemis-Miliana (Algérie). *BULL. Soc. Géol. Fr.*, 1990, n°3 pp. 505-513
- MARSILY de, G. (2004)*** : Cours d'hydrogéologie. Univ. Paris 6.
<http://www.cig.ensmp.fr/~hydro/BIB/manuels/gdm-hydrogeologie.pdf>
- MASSUEL S. (2001)** : Modélisation hydrodynamique de la nappe phréatique quaternaire du bassin du lac Tchad. *Mémoire de DEA*. Univ. Montpellier II.
- MATHERON G. (1963)** : Les principes de la géostatistique. (s.l.)
http://cg.ensmp.fr/bibliotheque/1963/MATHERON/Rapport/DOC_00065/MATHERON_Rapport_00065.pdf

- MATHERON G. (1969)*** : Cours de géostatistique. *Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau*. Ecoles des Mines. Paris.
http://cg.ensmp.fr/bibliotheque/1969/MATHERON/Ouvrage/DOC_00125/MATHERON_Ouvrage_00125.pdf
- MATHERON G., ROTH C., de FOUQUET C. (1993)** : Modélisation et cokrigage de la charge et de la transmissivité avec conditions aux limites à distance finie. *Compte rendu des journées de géostatistique, fontainebleau*, pp. 61-75.
- MÉOT A., LEDERC B. (1997)** : Voisinage a priori et analyses factorielles : illustration dans le cas de proximités géographiques. *Revue de statistique appliquée*, tome 45 n°3 pp 25-44.
- MICHALAK A. M., KITANIDIS P. K. (2004)** : Application of geostatistical inverse modelig to contaminant source identification atDover AFB, Delaware. *Journal of hydrolic research*. Vol 42 pp. 9-18.
- OUASSINI B., BERROUIGAT S., (2002)*** : Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine de Sidi Bel Abbés (Algérie nord occidentale). *Mémoire d'Ingénieur*. Univ. Tlemcen.
- OULD BABA S. (2005)** : Recharge et paléorecharge du système aquifère su Sahara septentrionale. *Thèse de doctorat en géologie*. Univ. El Manar Tunis.
- OULD BABA S., BESBES M. (2006)** : Holocene recharge and present recharge of the saharen afquifers. A study by numirecal modelling. *Colloque international, Gestion des grands aquifères*. Juin 2006, Dijon, France.
- PERRIER E. (s. d.)** : Modélisation mathématique et informatique de structures naturelles complexes en interaction avec des dynamiques de flux. Applications hydrogéologiques. *Habilitation à diriger des recherches*. Univ. Paris.
- QUIOT F. (2004)** : Modélisation de l'impact d'un déversement des composés chlorés sur la qualité des eaux souterraines. *Rapport final, unité déchets et sites pollués*. Direction des risques chroniques. INERIS.
- RASMUSSEN H., ROULEAU A., CHEVALIER S. (2006)** : Outils de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captages d'eau souterraine. CERM, Québec.
- RIVOIRARD J. (1995)** : Concepts et méthodes de la géostatistique. Ecole des Mines de Paris.
- ROCHE P.A. (2005)*** : Hydrologie. *Chap. 6 cours DEA Sciences et techniques de l'environnement*. Ecole nationale des Ponts et Chaussées.
- SOUDANI K. (2007)*** : Quelques notions sur les méthodes de spatialisation et analyse de données. *Cours facultés des sciences d'Orsay*. Univ. Paris.
http://www.es.e.u-psud.fr/bases/upresa/pages/soudani/fichiers/analy_spa.pdf
- SOURISSEAU B. (1973)*** : Etude hydrogéologique de la nappe de Sidi Bel Abbés. *Rapport de la direction des études de milieu et de la recherche hydraulique*.

- THIERY D. (1993)** : Calage automatique des modèles hydrodynamiques maillés. Détermination de zone géographiques homogènes et des paramètres optimaux associés. Application à 5 aquifères. *Hydrogéologie*, n°4, 1993. pp. 281-292.
- TOMA A., HUBERT P. (1994)** : Estimation de la pluie par simulation conditionnelle utilisant des mesures provenant de différents instruments de mesure. *X^{ème} journées hydrogéologique- Ostom*, pp 373-381.
- WACKENAGAEL H. (2004)** : Géostatistique et assimilation séquentielle de données. *Habilitation à diriger des recherches*. Univ. Pierre et Marie Curie.
- YOUSFI S. (2004)** : Essai de modélisation d'une nappe alluviale. Application à la nappe de la plaine d'Hennaya. *Mémoire d'Ingénieur*. Univ. Tlemcen.
- ZAMMOURI M. et BESBES M. (1994)** : Représentativité des modèles des grands aquifères. Cas du continentale intercalaire saharien. *Hydrogéologie*, n°3, 1994. pp. 25-34.
- ZEROUALI A., LAKFIFI L., LARABI A. et al. (2001)** : Modélisation de la nappe de Chaouia Cotière (Maroc). *First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers—Monitoring, Modeling, and Management*. Essaouira, Morocco.
- ZOUHRI L., CARLIER E., COLBEAUX J.P. (2001)** : Géométrie et modélisation hydrodynamique d'un aquifère côtier. Cas de la Mamora (Maroc). *First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers—Monitoring, Modeling, and Management*. Essaouira, Morocco.

SITES INTERNET

http://cg.ensmp.fr/bibliotheque/index_byname.html
<http://www.ento.vt.edu/~sharov/PopEcol/lec3/spatdist.html>
<http://cig.engmp.fr/~hydro/BIB/man.html>
<http://cig.engmp.fr/~hydro/THE/the.html>
<http://www.obs-vlfr.fr/Enseignement/anado/series/chap3.html>
www.unesco.org
www.hydrogéologie.com

Remarque :

* : Des auteurs mentionnés dans le texte.

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité

HYDROGEOLOGIE

Titre de l'ouvrage

HYDRODYNAMIQUE ET MODELISATION DE LA NAPPE ALLUVIALE DE LA PLAINE DE SIDI BEL ABBÈS (NORD-OUEST ALGÉRIEN)

Présenté par

YOUSFI Soumia

Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen

ملخص: ينتمي سهل سيدي بلعباس إلى السهول الداخلية لغرب الجزائر يحوي جيبا مائيا حرا من ترسبات نهريّة بليوكواترنارنية التي ملأت حوض سيدي بلعباس. نظرا للاحتياجات السكانية، الصناعية والفلاحية، تعرض السهل للاستغلال الشديد في السنوات الأخيرة. إذ أصبحت إدارة موارده بالنموذج الرياضي مهمة. سمحت الدراسة الجيوساتيسكية بإجراء توزيع فضائي للخصائص الهيدروديناميكية والهندسية للجيب المائي. بعد التمثيل الوظيفي العام للجيب المائي واستعمال النموذج الرياضي المعتمد على طريقة التباين التام في حالة النظام الدائم، تعرفنا على الخصائص الهيدروليكية لهذا الجيب والموازنة الهيدرولوجية الكاملة. توصلنا بتحسين النموذج في حالة النظام الانتقالي إلى تخمين قيم معامل التخزين. استثمار النموذج سمح لنا بإظهار تأثير المياه المستخرجة والتغير المناخي على تطور مستوى الماء في الجيب.

الكلمات المفتاحية: سهل، سيدي بلعباس، الجزائر، ترسبات نهريّة، الهيدروديناميك، الدراسة الجيوساتيسكية، النموذج الرياضي، النظام الدائم، النظام الانتقالي، المظاهرة.

RESUME : La plaine de Sidi Bel Abbès fait partie des plaines intérieures de l'Algérie occidentale, elle renferme une nappe libre contenue dans un remblaiement alluvial plio-quadernaire qui a comblé la cuvette de Sidi Bel Abbès. Face aux besoins des populations, des industries et de l'agriculture, la nappe a subi une exploitation intensive ces dernières années. Une gestion par modèle mathématique devient nécessaire. Le traitement des paramètres hydrodynamiques et géométriques de l'aquifère par des méthodes géostatistiques nous a permis de réaliser la répartition spatiale de ces paramètres. Après une représentation du fonctionnement global du système aquifère, l'utilisation du modèle mathématique basé sur la méthode des différences finies en régime permanent améliore la connaissance des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère et l'évaluation d'un bilan hydrologique complet. La seconde simulation en régime transitoire conduit à l'estimation des valeurs du coefficient d'emménagement. L'exploitation du modèle a permis de déterminer l'impact des débits prélevés et les tendances climatiques sur l'évolution piézométrique de la nappe.

Mots-clés : Plaine ; Sidi Bel Abbès ; Algérie ; Alluvions ; Hydrodynamiques ; Géostatistique ; Modèle mathématique ; Permanent ; Transitoire ; Simulations.

ABSTRACT: The plain of Sidi Bel Abbes forms part of the interior plains of West Algeria; it contains an unconfined aquifer contained in fill alluvial plio-quadernary which filled the basin of Sidi Bel Abbes. Vis-à-vis with the needs for the populations, industries and agriculture, the groundwater underwent an intensive exploitation these last years. A management by mathematical model becomes necessary. The treatment of the hydrodynamic and geometrical parameters of the aquifer by methods geostatistics made it possible for us to carry out space distribution of these parameters. After a representation of the total functioning of the aquifer's system, the use of mathematical model based on the finite differences in permanent mode improves knowledge of the hydraulic characteristic of aquifer and the evaluation of a complete hydrological balance. The second simulation in transient stat led to the estimate of the values of the coefficient of storage. The exploitation of the model made it possible to determine the impact of the flows taken and the climatic tendencies on the piezometric evolution of the aquifer.

Key words: Plain; Sidi Bel Abbes; Algeria; Depots; Hydrodynamic; Geostatistics; Mathematical model; Permanent; Transient; Simulation.