

## 7 IMPACT DES TRAVAUX DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS SUR LA RECHARGE DE LA NAPPE DE ZEUSS- KOUTINE

Yahyaoui H.<sup>1</sup>, Chaieb H.<sup>2\*</sup> and Ouessar M.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Commissariat Régional au Développement Agricole (CRDA) de Médenine. Route de Tataouine, 4100 Médenine, Tunisia*

<sup>2</sup> *Direction Générale des Ressources en Eau. 43, Rue la Manoubia - 1008 Tunis, Tunisia*

<sup>3</sup> *Institut des Régions Arides (IRA), Route de Djorf km 22, 4119 Médenine, Tunisia*

\* *Corresponding author (email: Chai\_hab@yahoo.fr; fax: 216 71 391549)*

---

### Abstract

The Zeuss-Koutine aquifer represents the main water reservoir for water supply (drinking, tourism, irrigation, industry, etc.) of the two provinces Médenine and Tataouine of south-eastern Tunisia. It is a multi aquifer system spreading over an area evaluated at 785 km<sup>2</sup> with a mean annual rainfall of 190 mm. Its potential resources are estimated to 350 l s<sup>-1</sup>.

The exploitation of this reservoir has started in 1962, but effectively only in 1972. Its continuous monitoring has shown that the abstraction rate increased from 102 l s<sup>-1</sup> in 1974 to 420 l s<sup>-1</sup> in 1996. It resulted in a decline of the mean piezometric level (PL) of 11.3 m.

To cope with this problem an ambitious program for surface water mobilisation has been implemented since 1990 in order to ensure the replenishment of this overexploited water table. In fact, more than 300 recharge and flood spreading units have been realised on the drainage watersheds (Oueds Om Zessar, Zeuss and Oum Tamr). It resulted in the stabilisation and even amelioration of the PL since 1997. On the other hand, the pumping of this reservoir induced a vertical homogenisation of the chemical characteristics that resulted then in an increase in the salinity of the surface layers and a decrease in the salinity of the deep aquifers. However, it is expected that the 'artificial' recharge will, in the long term, be able to damp and/or stop the salinity increase phenomenon.

It is important to note that the intensification of the soil and water conservation programs does not only concern the ground water but has multiple impacts such as flooding and erosion control, extension of cultivated farms, range lands use, etc. Especially when addressing this problem at the level of the whole watershed.

The simulations of the impact of the soil and water conservation works on the groundwater aquifer by mathematical models show that the contribution of these works is very significant. The average natural infiltration in the groundwater aquifer, which was approximately 290 l s<sup>-1</sup> before the construction of the conservation works, increased since 1985 to 320 l s<sup>-1</sup>, so the aquifer could profit in spite of the rainfall deficit recorded during the majority of this period. That is a contribution of additional water of about 30 l s<sup>-1</sup>.

**Keywords:** Arid, recharge, groundwater harvesting, Tunisia.

### 7.1 Cadre hydrologique

La nappe de Zeuss-Koutine s'étend sous les bassins versants des oueds Zigzaou, Zeuss, Sidi Makhlouf, Om Zessar et la partie centrale du bassin versant d'oued Om et-Tamar, ainsi qu'une petite étendue du bassin versant d'oued Smar. Elle couvre une superficie évaluée à 785 km<sup>2</sup>.

Quatre pluviomètres assurent l'enregistrement de la pluviométrie sur les bassins versants de Zeuss-Koutine. Dans un climat méditerranéen, saharien supérieur, avec une variante sub-littorale, cette pluviométrie est très irrégulière dans l'espace et dans le temps. Le tableau 7.1 illustre les pluviométries maximales, minimales et moyennes observées au niveau des stations de Medenine, Koutine, Zeuss et Loudyette alors que le tableau 7.2 indique la pluviométrie moyenne mensuelle au niveau de la station de Medenine.

**Tableau 7.1** Pluviométries annuelles, maximales, minimales et moyennes sur les régions de Zeuss Koutine

Pluviométrie (mm an <sup>-1</sup> )	Station			
	Medenine SM	Koutine	Zeuss (St Pomp.)	Loudyette
Maximales	472	591	262	257
Minimales	37	73	177	119
Moyennes	152	211	214	171
Nbre d'an. d'obs.	85	18	5	3

**Tableau 7.2** Pluviométries mensuelles moyennes à la station météorologique de Medenine.

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Obs.
P (mm)	12	24	18	18	20	17	22	13	6	1	0	1	85
P (%)	8	16	12	12	13	11	15	8	4	1	0	1	

La carte des isohyètes interannuelles montre un tracé assez régulier d'orientation approximative nord-ouest sud-est qui sont parallèles à la côte de la Méditerranée et aux reliefs du Dahar. Sur la zone de Zeuss-Koutine, la pluviométrie moyenne varie de 170 mm an<sup>-1</sup> à 190 mm an<sup>-1</sup>.

Le coefficient de ruissellement annuel moyen a été évalué à 7 % de la pluviométrie annuelle moyenne (Fersi, 1985). Ce coefficient a été calculé à partir des données hygrométriques mesurées sur les stations de Koutine et d'oued Om Zessar observées depuis 1973/74. Toutefois, il faut noter que l'intensification des travaux de Conservation des Eaux et des Sols en amont des bassins versants contribuant à la recharge de la nappe de Zeuss-Koutine ont modifié les paramètres des écoulements au niveau de ces bassins.

## 7.2 Cadre hydrogéologique

### 7.2.1 Géométrie des réservoirs

La nappe de Zeuss-koutine est logée dans les niveaux lithostratigraphiques suivants :

- a) les calcaires et les dolomies du Jurassique supérieur (Callovien-Oxfordien),
- b) les calcaires dolomitiques du l'Albo-Aptien,
- c) les dolomies et les calcaires dolomitiques du Turonien,
- d) Les calcaires du Sénonien inférieur qui se subdivisent en deux entités distinctes :
  - L'unité calcaire intermédiaire du Sénonien marno-gypseux (horizon B),
  - L'unité calcaire sommitale (horizon A).

La corrélation lithostratigraphique et hydrogéologique à travers les sondages d'oued Zeuss (Fig 7. 2) matérialise le fonctionnement hydraulique de la nappe de Zeuss-Koutine au niveau de cette zone avec différenciation de divers niveaux aquifères susmentionnés. Il s'agit d'un système aquifère à plusieurs compartiments qui communiquent par l'intermédiaire des failles

et éventuellement par drainance. Les calcaires et dolomies du Jurassique et de l'Albo-Aptien de ce système aquifère sont discordants sur les grès du Trias.

### 7.2.2 Recharge et exploitation

L'écoulement souterrain de la nappe de Zeuss-Koutine se fait vers le sud-est en direction de la mer Méditerranée. La carte piézométrique de cette nappe fait apparaître trois principaux axes d'écoulement (Gaubí, 1988) :

- Un écoulement parallèle à l'oued Zigzaou et en provenance essentiellement des formations aquifères du Crétacé inférieur et du Jurassique de Gabès Sud,
- Un écoulement longeant oued Bou Ramli et oued Zeuss. Cet écoulement est dû à l'alimentation à partir des grès du Trias.
- Un écoulement longeant oued Koutine traduisant une alimentation in-situ des calcaires du Jurassique appuyé par une alimentation à partir des grès du Trias.

La carte de recharge de la nappe envisagée a été établie en se basant sur les données géologiques et hydrogéologiques et notamment celles des forages (Figure 7.1). Cette carte montre deux zones d'alimentation préférentielle qui sont :

- Une zone d'affleurement de l'Albo-Aptien au nord-ouest de la région,
- Une zone d'affleurement du Jurassique limitée au nord-est par la faille de Medenine, au nord-ouest par une faille passant au piémont oriental des monts de Touati et de Debâ et au sud-ouest par les grès du Trias inférieur et par le Permien.

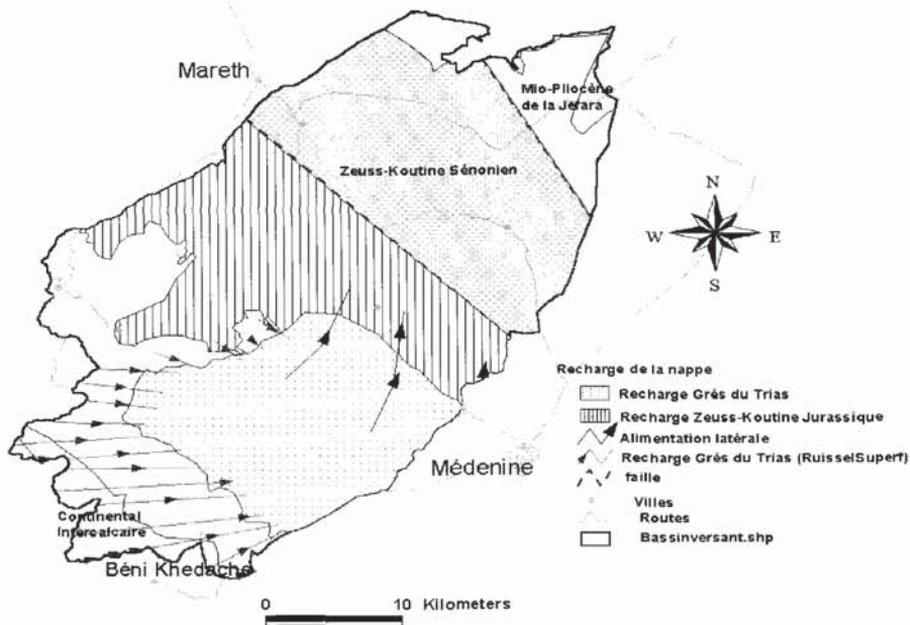


Figure 7.1 Zones de la recharge de la nappe

Cette nappe est exploitée depuis 1962 pour l'alimentation en eau potable des agglomérations et villes du sud-est tunisien. Les ressources renouvelables ont été estimées à  $350 \text{ l s}^{-1}$ . Le débit annuel moyen d'exploitation a dépassé cette valeur depuis 1986 (Figure 7.2). L'exploitation mensuelle est très fluctuante. Par exemple, pour un débit d'exploitation en 1996 de  $420 \text{ l s}^{-1}$  (D.G.R.E.,1996), la pointe estivale a atteint en mois d'août un débit de  $556 \text{ l s}^{-1}$  alors que celle hivernale n'est que de  $278 \text{ l s}^{-1}$ .

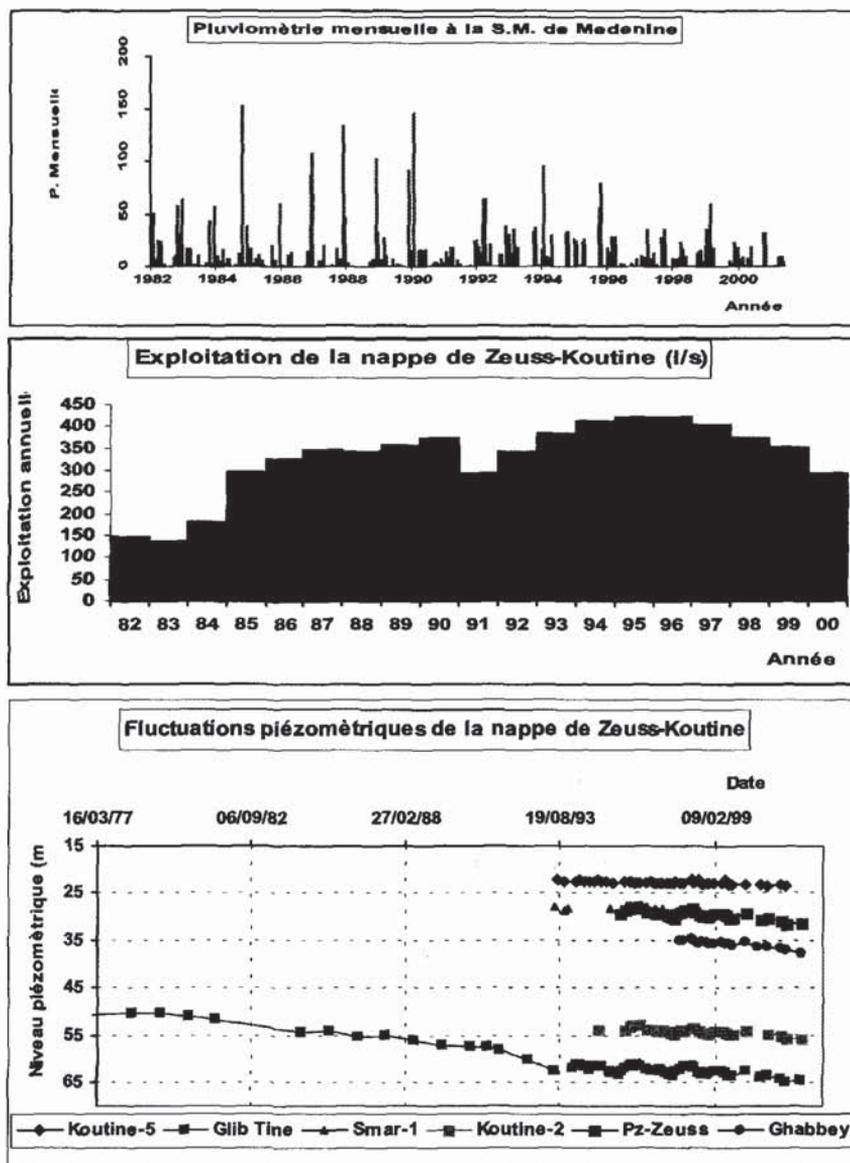
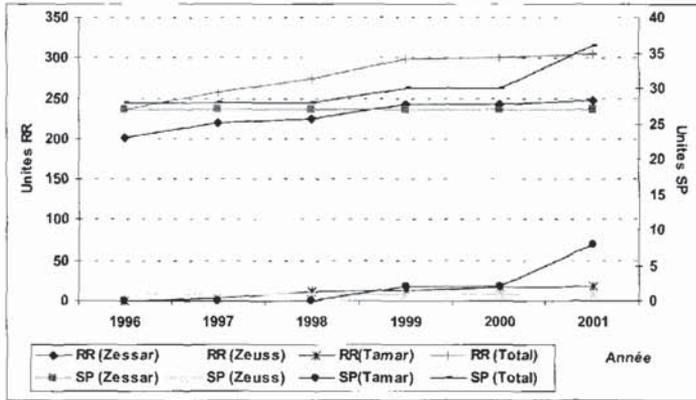


Figure 7.2 Evolution piézométrique du complexe carbonaté de la nappe de Zeuss-Koutine en fonction de la pluviométrie et de l'exploitation.

### 7.3 Travaux de conservation des eaux et des sols (C.E.S.)

Dans cadre de la stratégie de mobilisation des eaux de surface et afin de renforcer la recharge de la nappe surexploitée de Zeuss-Koutine, plus des 300 ouvrages, contribuant à la recharge de cette nappe, ont été réalisées sur les bassins versants des oueds Om Zessar, Zeuss et Om et-Tamar.



**Figure 7.3** Ouvrages de recharge de la nappe et ouvrages d'épandage des eaux des crues réalisés sur les bassins versants de Zeuss-Koutine (Situation arrêtée au 31/12/2001).

Les sites de ces différents aménagements ont été choisis à la lumière des données hydrologiques et hydrogéologiques concernant la région de telle façon qu'ils favorisent une infiltration maximale au niveau des ouvrages réalisés (Figure 7.3).

Les aménagements anti-érosifs réalisés assureront, outre la recharge des réservoirs d'eau souterraine, la mise en valeur intégrée sur les bassins versants traités.

### 7.4 Impact des travaux de C.E.S. sur la recharge de la nappe

#### 7.4.1 Ruissellement, fluctuations piézométriques et recharge

##### Ruissellement

En se basant sur les données hydrométriques mesurées au niveau des stations de Koutine et d'oued Om Zessar depuis 1973 et sur les mesures de ruissellement effectuées sur les différents cours d'eau de la zone, l'estimation des volumes d'eau ruisselée durant années pluvieuses sont consignés dans le tableau suivant:

**Tableau 7.3** Estimation des volumes des eaux ruisselées lors de principaux épisodes pluvieux (bassins versants de Zeuss-Koutine. Années: 1995, 1997 et 1998)

Episode pluvieux	P moy 'épisode (mm)	Volume ruisselé ( $10^6 m^3$ )	Observations
Sept et oct. 1995	46 à 148	29,4	Crues dispersées et eau de ruissellement retenue en totalité par les ouvrages CES
Sept. 1997	60 à 80	15,7	Crues dispersées et eau de ruissellement retenue en totalité par les ouvrages CES
Octobre 1998	75 à 90	10,63	Crues en amont des B.V. de Zeuss-Koutine. Ecoulement d'oued Koutine jusqu'à la mer.

### Fluctuations piézométriques

Les fluctuations piézométriques de la nappe de Zeuss-Koutine ont été suivies depuis 1965 par le piézomètre Glib Tine (n° IRH 13984/5). Avec l'apparition des indices de surexploitation, une gestion contrôlée de la recharge et de l'exploitation de cette nappe a exigé une surveillance piézométrique mensuelle assurée par un réseau de six piézomètres.

Le piézomètre de Glib et-Tine (n° IRH 13984) a enregistré, entre le mois de septembre 1972 et celui de mars 2002 (30 ans), une baisse piézométrique de 12,85m. Cette baisse est en rapport avec le débit d'exploitation de la nappe concernée (Figure 7.1). En effet, les observations mensuelles montrent que les remontées piézométriques coïncident avec la diminution de l'exploitation pendant les périodes hivernales. Ces remontées sont plus amplifiées au cours des années pluvieuses.

Un ralentissement de cette baisse piézométrique, est apparu à partir de l'année 1993 bien que le débit d'exploitation soit le plus important dépassant les 400 l s<sup>-1</sup> entre 1994 et 1997. Par la suite, la baisse piézométrique se continue avec la même pente malgré la sécheresse. La vitesse de cette baisse piézométrique s'explique par la diminution de débit d'exploitation et la recharge introduite par les ouvrages de Conservation des Eaux et des Sols suite à certaines crues dispersées qui ont intéressé les bassins concernés durant cette période. La même tendance des fluctuations a été enregistrée par les autres piézomètres. Néanmoins, au niveau du piézomètre Koutine-5 (n° IRH 8736/5), qui est le plus loin de la zone d'exploitation et le plus proche de la nappe des grès du Trias, la piézométrie n'enregistre que des faibles fluctuations saisonnières.

### Estimation de la recharge de la nappe par les eaux des pluies

Pour une surface d'alimentation de la nappe de Zeuss-Koutine de 785 Km<sup>2</sup> (Yahyaoui, 1997) et un coefficient d'emmagasinement de 14,4 10<sup>-4</sup> (Ben Baccar, 1982), les volumes estimés des eaux des pluies qui ont infiltrées jusqu'à la nappe de Zeuss-Koutine suite aux épisodes pluvieux susmentionnés sont consignés dans le tableau suivant.

**Tableau 7.4** Estimation des volumes des eaux infiltrées jusqu'à la nappe de Zeuss-Koutine. (Années 1995, 1997 et 1998)

Période	Remontée piézo. (m)	V remontée piézo. (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	V d'exploitation (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	V entrant à la nappe (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Sep/95 Avril/96	1,60	1,81	5,30	7,11 <sup>1</sup>
Sep/97 Avril/98	0,51	0,57	5,08	5,65 <sup>1</sup>
Sep/98 Nov/98	0,25 <sup>2</sup>	0,28	2,87	3,15 <sup>1</sup>

Note 1 : Une partie de ce volume provient par alimentation latérale à partir des nappes adjacentes.

Note 2 : La remontée se continue

### 7.4.2 Variation du résidu sec de l'eau

Une tendance d'augmentation de la salinité de l'eau au niveau de certains forages de la nappe de Zeuss-Koutine est apparue dès que l'exploitation a dépassé en 1982 un débit de 150 l s<sup>-1</sup>. La variation de la salinité apparaît, depuis 1990, plus nette et significative suite aux prélèvements mensuels.

### Aquifère du Crétacé inférieur

Au niveau du forage Zeuss-3 (n° I.R.H. 7413/5) captant l'horizon (B) du Sénonien inférieur et du Turonien entre 132 m et 207 m, la nappe est libre et elle est donc alimentée verticalement par les eaux des pluies (Figure 7.4). Le forage Zeuss-1 (n° I.R.H. 7241/5) captant l'horizon (A) du Sénonien inférieur entre 65 m et 344 m montre que la nappe est en charge (NS = + 3,5

m le 14/12/1962). Le toit imperméable de cet aquifère est constitué par les marnes et les argiles du Mio-Plio-Quaternaire (formation Zarzis).

Néanmoins, cet horizon aquifère est alimenté latéralement par l'intermédiaire des failles à partir de l'horizon (B). Les deux forages de Zeuss 1 et 3 captent des niveaux aquifères différents mais communicants par failles. L'horizon (B) se recharge verticalement par les eaux de pluies; l'horizon (A) se situe à 2 Km de cette zone d'alimentation.

Situés à quelques dizaines de mètres du forage Zeuss-1 (n° I.R.H. 7241/5), le forage Zeuss-1 bis (n° I.R.H. 7306/5) capte en trou libre, entre 476 m et 577 m, l'horizon (B) du Sénonien inférieur et un horizon du Turonien. La communication hydraulique de ce niveau aquifère profond, avec les autres niveaux qui lui sont superposés, est assurée par l'intermédiaire des failles et par drainance.

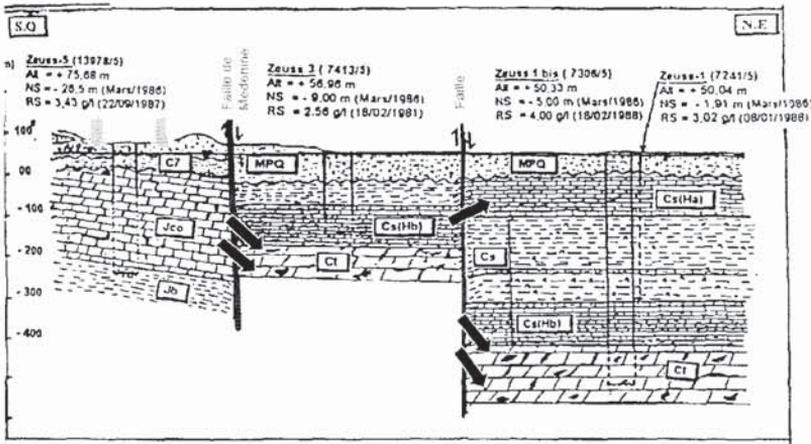


Figure 7.4 Corrélation Lithostratigraphique et hydrogéologique le long d'oued Zeuss.

Le suivi mensuel de la salinité de l'eau depuis 1984 au niveau des forages d'oued Zeuss fortement sollicités, a permis de déceler une tendance franche d'homogénéisation de la salinité de l'eau des différents niveaux aquifères de Zeuss-Koutine (Figure 7.5a).

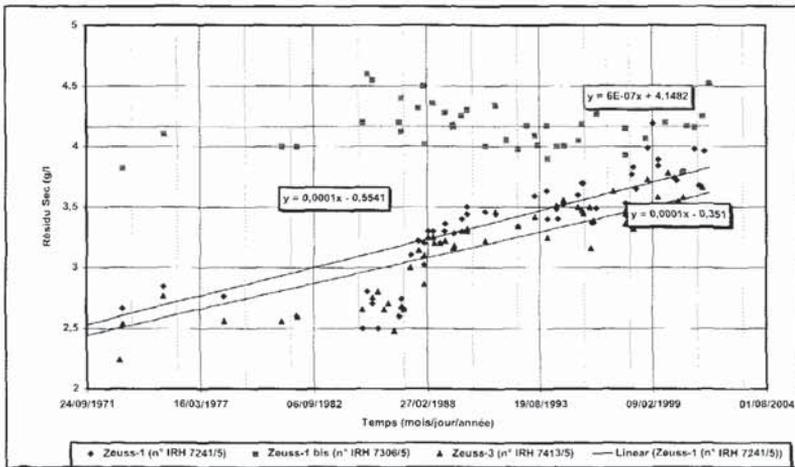


Figure 7.5<sup>a</sup> Suivi mensuel de la salinité: Aquifère du Crétacé Inférieur

En effet, au sein des niveaux aquifères du Sénonien inférieur de l'horizon (B), qui sont les plus profonds, les plus salés et les moins rechargés au niveau du forage Zeuss-1bis (n° IRH 7306/5), la salinité a demeuré quasi-stationnaire dans l'ensemble avec une fluctuation du résidu sec de 500 g l<sup>-1</sup> en rapport avec l'exploitation. Toute fois, on enregistre une tendance de diminution entre 1987 et 1993 dont la valeur moyenne est d'environ 52 mg l<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Cette diminution traduit une alimentation croissante provenant des niveaux aquifères moins profonds et moins salés (horizon A) par l'intermédiaire des failles et par drainance.

Par contre, pour les niveaux les moins chargés en sels et bénéficiant d'une meilleure recharge à partir des eaux des pluies (horizons A et B), la salinité de l'eau augmente d'une année à l'autre (Zeuss-1 n° I.R.H. 7241/5 et Zeuss-3 n° IRH 7413/5). Le taux d'augmentation moyen entre 1971 et 2002 est de 36 mg l<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Ceci permet de conclure qu'au cours de l'exploitation, la salinité des eaux les moins chargées en sels provenant de l'infiltration des eaux ruisselées diminue, alors que celle provenant des niveaux aquifères profonds sous-jacents à salinité élevée, augmente.

Pour ces trois forages, les fluctuations saisonnières de la salinité reflètent la variation de débit de pompage, ainsi que l'influence des épisodes pluvieux qui sont à l'origine de la recharge de la nappe.

#### Aquifère du Jurassique

La géométrie et la nature de l'aquifère, constituent avec le mode d'alimentation et le débit de prélèvement, les principaux facteurs qui conditionnent l'évolution de la salinité. (Figure 7.5<sup>b</sup>) Le forage Zeuss-4 (n° I.R.H. 13100/5) est situé à proximité du forage Zeuss-5 (n° I.R.H. 13978/5) sur la berge de l'oued Zeuss. Ce forage capte, en trou libre et entre 139 m et 165 m, une nappe libre logée dans les calcaires du Jurassique supérieur. Le bassin versant d'oued Zeuss et en particulier aux environs du forage Zeuss 4 est quasi-totalement aménagé par des seuils en gabion et par des banquettes en terre dans les talwegs et les petits cours d'eau.

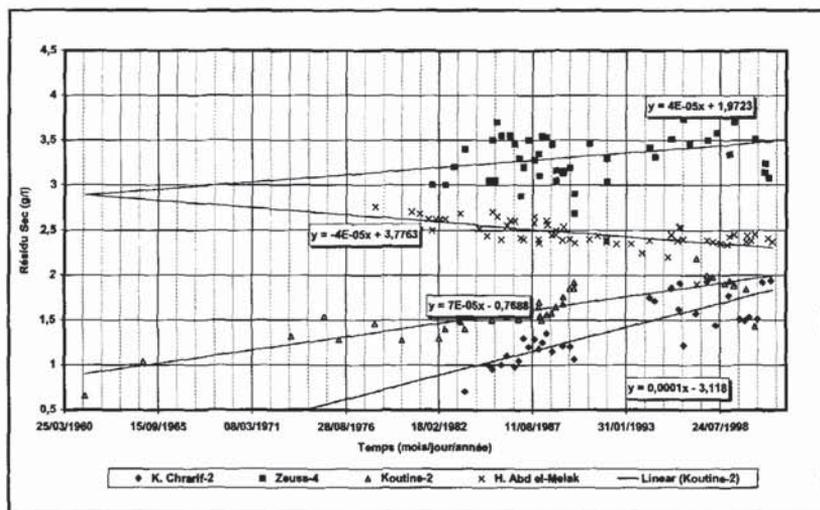


Figure 7.5<sup>b</sup> Suivi mensuel de la salinité: Aquifère du Jurassique

L'évolution de la salinité de l'eau marque à ce niveau des diminutions durant les épisodes pluvieux contribuant à la recharge de la nappe et des augmentations durant les périodes sèches. La marge des fluctuations varie de 0,5 g l<sup>-1</sup> à 1 g l<sup>-1</sup> et la résultante de l'évolution a

marqué une tendance d'augmentation de  $15 \text{ mg l}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . Ce comportement géochimique dépend étroitement de la pluviométrie et de l'exploitation.

Le forage Hessi Abd Malek (n° I.R.H. 13019/5) capte en trou libre entre 10 m et 249 m les calcaires du Jurassique supérieur qui sont discordants sur les grès du Trias inférieur et moyen.

La baisse de la salinité de l'eau en fonction du temps et de l'exploitation au niveau de ce forage montre, d'une manière indéniable, l'alimentation des calcaires du Jurassique à partir de la nappe des grès du Trias, dont la salinité varie dans la région de Tajera entre  $1 \text{ g l}^{-1}$  et  $2 \text{ g l}^{-1}$ . La diminution engendrée est d'environ  $15 \text{ mg l}^{-1} \text{ an}^{-1}$ .

Les forages Kaçar Chararif (n° I.R.H. 16708/5 et Koutine (n° I.R.H. 7193/5): Les bassins versants des oueds Koutine et Zigzaou, au sein desquels se trouvent les deux forages Kaçar Chararif et Koutine sont traités quasi-totalement par les travaux de Conservation des Eaux et des Sols. Ces deux forages captent en trou libre l'aquifère du Jurassique supérieur qui se recharge directement à partir des eaux de ruissellement.

Entre 1982 et 2002, la surveillance de la chimie de l'eau de la nappe a montré une augmentation graduelle de la salinité au niveau de deux forages avec un taux d'augmentation qui varie de  $26 \text{ mg l}^{-1} \text{ an}^{-1}$  à  $37 \text{ mg l}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . Cette évolution géochimique met en évidence un phénomène d'échange vertical de la salinité. En effet, le pompage épuise graduellement les eaux relativement douces résultant de l'infiltration des eaux de surface. Ce pompage fait apparaître un cône de dépression qui favorise la remontée des eaux profondes salées. Ce qui entraîne une augmentation graduelle du débit provenant des réserves géologiques de la nappe.

## **7.5 Simulation numérique de la nappe de Zeuss-Koutine**

Avec une augmentation des besoins en eau pour les divers usagers et étant donnée l'aridité du climat du sud-est Tunisie, la nappe profonde de Zeuss-Koutine est excessivement sollicitée. Le modèle numérique constitue un meilleur outils d'établissement du bilan de cette nappe en fonction des facteurs naturels et provoqués du milieu. C'est aussi un moyen quantitatif privilégié d'une gestion ultérieure rationnelle et contrôlée.

### *7.5.1 Construction du Modèle*

Le Modèle mathématique de cette nappe a été réalisé à l'aide du logiciel Multic (Djebbi 1992). Ce logiciel est conçu pour assurer la simulation numérique des transferts de pression en régime permanent ou/et transitoire dans les aquifères multicouches de forme quelconque en mailles carrées régulières.

La première étape de la construction du modèle consiste à définir la géométrie du réservoir aquifère, les conditions aux limites du modèle à la discrétisation du domaine d'étude en mailles carrées homogènes et à la préparation des données nécessaires aux calages des régimes permanent et transitoire.

#### *Géométrie du réservoir aquifère*

La nappe de Zeuss-Koutine est logée dans un système aquifère comportant plusieurs compartiment communiquant essentiellement par failles (section 7.2). L'ensemble de ce système peut être assimilé à un seul aquifère.

### *Conditions aux limites*

La nappe de Zeuss-Koutine est limitée à l'ouest par les affleurements argileux et dolomitiques du Cénomanien inférieur à moyen au niveau de la falaise de Matmata, au sud et au sud-ouest par la nappe des grès du Trias dont l'écoulement souterrain se fait vers le nord-est et qui communique avec la nappe de Zeuss-Koutine à travers les failles et par l'intermédiaire de la discordance de Sidi Stout. Au sud-est, elle est limitée par la faille de Medenine et à l'est par l'effondrement des formations aquifères du Crétacé et du Jurassique de plusieurs centaines de mètres sous les dépôts tertiaires.

### *Limites à débits imposés*

Il s'agit :

- des limites nord-ouest, ouest et sud-ouest représentés par les affleurements des horizons aquifères du Cénomanien au niveau des reliefs de Matmata,
- de la limite sud-ouest correspondant au contact des grès du Trias avec les calcaires fissurés de l'albo-aptien et du Jurassique supérieur,
- des zones schématisées par les lits d'oueds qui contribuent à l'alimentation de la nappe envisagée par infiltration des eaux surface.

### *Limites à potentiels imposés*

Elle correspond à la zone d'exutoire de la nappe à la limite est de celle-ci.

### *Choix du maillage*

La configuration hydrogéologique de l'aquifère de Zeuss-Koutine (Figure 7.6) montre que le modèle de la nappe peut avoir une représentation schématique à une seule couche. Le domaine d'étude a été subdivisé en 725 mailles carrées régulières de 1km de côté (Derouiche, 1997).

## *7.5.2 Calage du modèle en régime permanent*

Pour faire le calage du modèle en régime permanent, il suffit d'estimer les paramètres régissant l'écoulement permanent (transmissivité, alimentation) tout en essayant de réduire les écarts entre les valeurs observées et calculées de la charge hydraulique à une valeur inférieure à une limite préalablement fixée.

L'état de la piézométrie en 1974, matérialisant la situation d'un écoulement permanent de la nappe, a été fixé comme référence au modèle pour deux raisons suivantes ; i) les premières mesures piézométriques dont on dispose datent de 1974. ii) l'exploitation de la nappe profonde n'a pris d'importance qu'à partir de 1974 avec la mise en service des forages.

La carte des valeurs initiales de transmissivités à introduire dans le modèle a été obtenue par interprétation et comparaison avec les valeurs mesurées à partir d'essais de pompage. Cette carte donne les valeurs moyennes de la transmissivité (en  $m^2 s^{-1}$ ) sur l'ensemble des aquifères captés.

Pour simuler la contribution du réseau hydrographique à l'alimentation de la nappe, les niveaux piézométriques observés ont été imposés ainsi que le débit d'alimentation de la nappe à partir de l'infiltration des eaux de ruissellement qui a été estimé à  $283 l s^{-1}$ . La précision de ces valeurs a été améliorée par ajustements successifs au cours des opérations du calage du modèle.

Concernant la contribution des eaux pluviales dans l'infiltration directe, elle a été estimée à  $4 l s^{-1}$  au niveau des reliefs des Matmatas et pratiquement nulle sur le reste du domaine d'étude. Quant au débit transitant de la nappe du Trias vers la nappe de Zeuss-

Koutine, il a été ajusté à une valeur de  $36 \text{ l s}^{-1}$ . Ainsi, les ressources de la nappe de Zeuss-Koutine ont été évaluées à un débit total de  $323 \text{ l s}^{-1}$ .

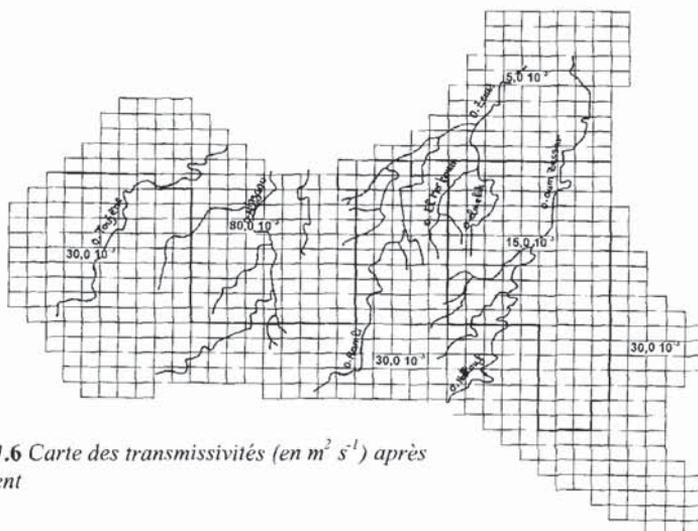


Figure 7.6 Carte des transmissivités (en  $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) après ajustement

Le calage du modèle en régime permanent a porté sur la répartition des transmissivités et le contrôle de la validité de ce calage, s'est fait sur la totalité des mailles.

L'écart de calage maximal entre les charges hydrauliques calculées et celles mesurées atteint en moyenne  $\pm 0,54 \text{ m}$ . Les transmissivités retenues après le calage du modèle en régime permanent sont représentées par la figure 7.6. En concordance avec la nature des séries calcaires caractérisées par une fissuration importante au niveau de l'aquifère du Jurassique, les transmissivités fixées par calage sont élevées dans la partie en amont du bassin versant de l'oued Zigzaou. Aussi on peut observer ces fortes valeurs de transmissivités au niveau du forage Henchir Frej qui capte l'aquifère de l'Apto-Cénomaniens.

Tableau 7.4 Bilan en eau en régime permanent.

Entrées	Infiltration directe aux reliefs des Matmatas	4 $\text{l s}^{-1}$
	Infiltration à partir du réseau hydrographique	283 $\text{l s}^{-1}$
	Contribution de la nappe du Trias	36 $\text{l s}^{-1}$
	Total	323 $\text{l s}^{-1}$
Sorties	Prélèvement par forages	102 $\text{l s}^{-1}$
	Ecoulement souterrain vers l'exutoire	221 $\text{l s}^{-1}$
	Total	323 $\text{l s}^{-1}$

### 7.5.3 Simulation de l'écoulement en régime transitoire

Sur la base de l'historique piézométrique disponible, la simulation en régime transitoire consiste à reproduire le fonctionnement hydrodynamique de la nappe pendant les 25 dernières années (1975/2000). On a fixé 64 phases de calcul avec un pas de temps annuel entre 1975 et 1991 et un pas variable de 1 mois à 6 mois pour le reste de la période. Pour évaluer les débits

d'alimentation de la nappe, on a calculé lors de chaque phase, le coefficient d'alimentation en maintenant la contribution de la nappe du Trias égale à  $36 \text{ l s}^{-1}$  (Derouiche, 1997). Ce coefficient est calculé en ramenant la pluviométrie enregistrée pendant la phase à la pluviométrie interannuelle de la zone qui est de  $196.8 \text{ mm}$ .

Concernant l'exploitation de la nappe en régime transitoire, elle est donnée pour chaque phase tout en essayant de subdiviser l'année en deux périodes : une période estivale s'étendant du mois de mars au mois de septembre où l'exploitation est maximale et une période hivernale s'étendant du mois d'octobre au mois de février où l'exploitation est minimale.

Le calage en régime transitoire consiste à vérifier le fonctionnement hydraulique du modèle par phase en agissant sur les paramètres hydrauliques, notamment le coefficient d'emménagement (Grove and Stollenwerk, 1984). Le coefficient d'emménagement retenu après calage est égal à  $15.10^{-3}$ . En faisant la comparaison entre la piézométrie simulée après le calage et celle observée au niveau des six piézomètres de contrôle (Henchir Frej, Zeuss1, Ksar Chararif1, Ksar Chararif2, Glib-Ettine, et Hassi Abdel Malek), on obtient un écart maximum de 6 m au niveau de Ksar Chararif-2 (Figure 7.7<sup>a</sup>).

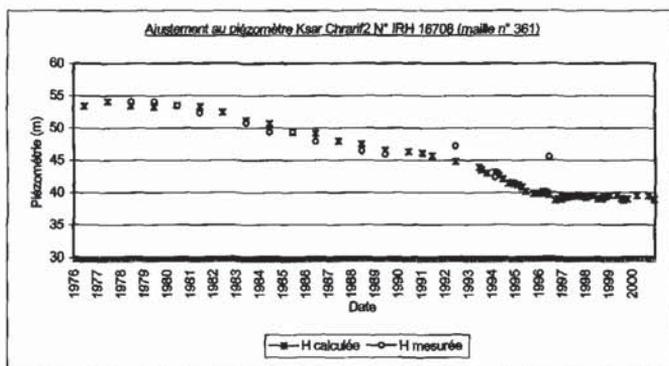


Figure 7.7<sup>a</sup> Ajustement aux piézomètres Ksar Chararif

Concernant le piézomètre de Glib Ettine, il est le seul piézomètre qui présente des mesures piézométriques pendant la période (1974-2000). Son calage durant cette période a donné un faible écart entre la piézométrie mesurée et celle calculée.

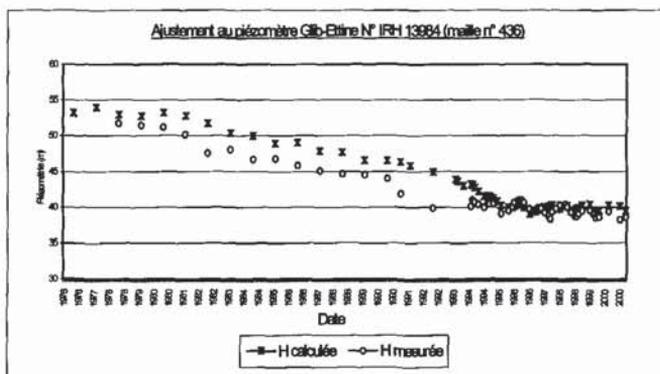


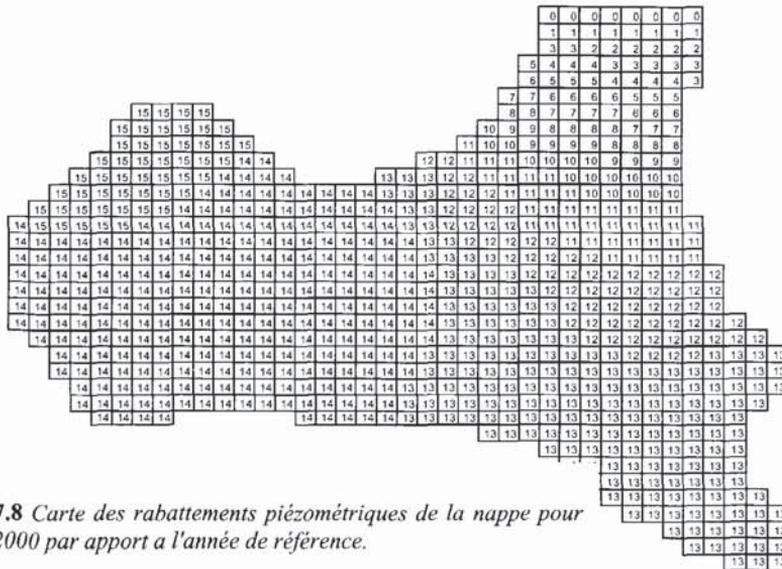
Figure 7.7<sup>b</sup> Ajustement aux piézomètres Glib-Ettine

En comparant les résultats du bilan calculé de la nappe relatifs aux trois années (Tableau 7.5), on constate que : i) en 1975 (Bassins peu traités par des travaux de C.E.S), les entrées ne sont que de 285 l s<sup>-1</sup>, ii) en 1996 (travaux de CES en cours) les entrées deviennent de 301 l s<sup>-1</sup>, iii) en 2000 (après achèvement des travaux des ouvrages de recharge) les entrées de la même nappe arrivent à 447 l s<sup>-1</sup>. Ainsi, il y a une nette augmentation de débit d'alimentation de la nappe en fonction de l'avancement des travaux de CES.

**Tableau 7.5** Bilan en eau en régime transitoire (1975, 1996 et 2000).

Année	1975	1996	2000	
Entrées	Infiltration directe aux reliefs des Matmatas (l s <sup>-1</sup> )	4	4	4
	Infiltration à partir du réseau hydrographique (l s <sup>-1</sup> )	285	302	448
	Contribution de la nappe du Trias (l s <sup>-1</sup> )	36	36	36
	Total (l s <sup>-1</sup> )	325	342	488
Sorties	Prélèvement par forages (l s <sup>-1</sup> )	123	421	345
	Écoulement souterrain vers l'exutoire (l s <sup>-1</sup> )	202	161	154
	Total (l s <sup>-1</sup> )	325	582	499

D'autre part l'exploitation de la nappe a diminué après avoir atteint son maximum en 1996 (421 l s<sup>-1</sup>) pour avoir une valeur de 345 l s<sup>-1</sup> en 2000. La carte des rabattements piézométriques pour l'année 2000 par rapport à l'année de référence (1974) nous illustre un rabattement maximum de 15 m au niveau du bassin versant d'oued Zigmaou (Figure 7.8).



**Figure 7.8** Carte des rabattements piézométriques de la nappe pour l'année 2000 par rapport à l'année de référence.

#### 7.5.4 Calcul des apports infiltrés jusqu'à la nappe des ouvrages C.E.S

Depuis 1985, les bassins versants de la nappe de Zeuss-Koutine ont été aménagés à fin de:

- Assurer un apport supplémentaire à la nappe en favorisant davantage l'infiltration des eaux de ruissellement.
- Amortir l'abaissement continu de la piézométrie de cette nappe
- Augmenter ses ressources dynamiques à fin de satisfaire aux besoins en eau potable de la région.
- Ralentir la dégradation de la qualité chimique des eaux souterraines.
- Lutter contre l'érosion hydrique.

L'étude du projet de recharge de la nappe de Zeuss-Koutine par la maîtrise des eaux de surface a avancé une valeur d'apport théorique supplémentaire induit qui est de l'ordre de  $125 \text{ l s}^{-1}$ , ce qui correspond à  $3,9 \text{ Mm}^3 \text{ an}^{-1}$ . Or, il a été supposé qu'à peu près 40 % de ce débit ( $50 \text{ l s}^{-1}$ ) soit perdu par ruissellement en cas d'apports dépassant la capacité de rétention des ouvrages de C.E.S ou par écoulement hypodermique. Il s'ensuit que seulement 70 % des apports arrivent jusqu'à la nappe, ce qui lui permet de bénéficier d'un apport supplémentaire évalué à  $50 \text{ l s}^{-1}$  (Mansouri, 1985).

Le modèle numérique de la nappe de Zeuss-Koutine a fournit, après son calage en régime transitoire, les apports moyens annuels à la nappe. La figure 7.9 donne les apports annuels à la nappe calculés par le modèle, la pluviométrie annuelle de la région et la moyenne de l'alimentation de la nappe avant et après l'année 1990.

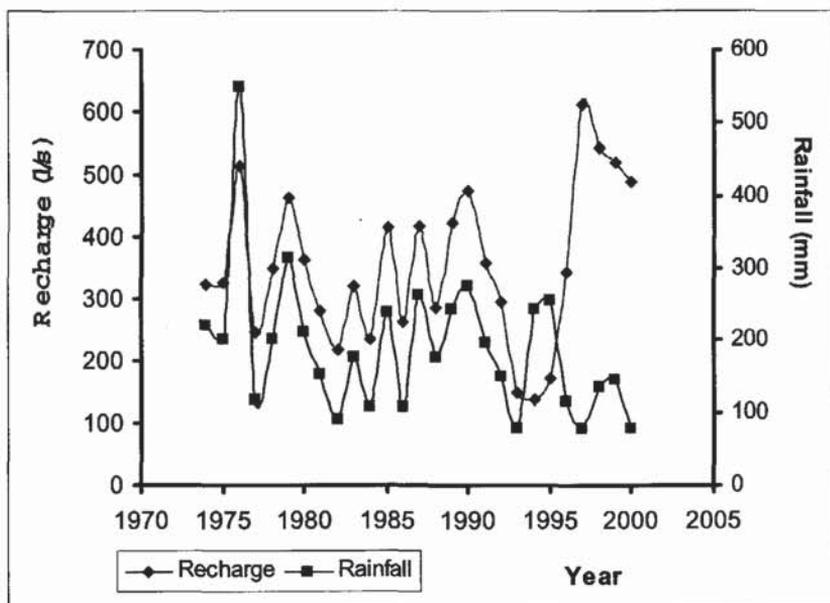


Figure 7.9 Apports annuels à la nappe de Zeuss-Koutine

L'examen de la figure 7.9 montre que l'apport moyen à la nappe pendant la seconde période (après 1990) est nettement inférieur à la moyenne annuelle des apports. Ceci ne nous permet pas d'en tirer une conclusion quant à la quantification de la contribution des aménagements de C.E.S à l'alimentation de la nappe.

Il faut donc comparer les apports des années à événements pluviométriques comparables. En effet, pendant les deux années hydrologiques 1983/84 et 1991/92, durant

lesquelles l'apport pluviométrique était respectivement de 146.8 mm et 151.5 mm, on a enregistré durant 3 jours un cumul pluviométrique de 52.9 mm pour l'année 83/84 et 45 mm pendant 2 jours pour l'année 91/92. Si on compare les apports de la nappe pour ces deux années, on trouve que la nappe a pu bénéficier d'un apport supplémentaire de  $60 \text{ l s}^{-1}$  retenu par les travaux d'aménagement des bassins versants. La contribution de ces ouvrages de recharge se fait sentir surtout pendant les épisodes à pluies torrentielles.

En outre, pour les deux années 1992 (début de la stratégie de C.E.S) et 1999 (achèvement des travaux de C.E.S) durant lesquelles la pluviométrie était respectivement, de 150 mm et 143.8 mm, l'apport annuel à la nappe a augmenté de 76.5%. Ce qui montre, encore une fois, l'importance des apports supplémentaires introduite à la nappe au moyen des ouvrages de C.E.S.

## 7.6 Conclusion

La nappe de Zeuss-Koutine est logée au sein de plusieurs compartiments aquifères recelant des eaux des salinités différentes. La surexploitation de cette nappe pour l'alimentation en eau potable des principales agglomérations du sud-est Tunisie depuis 1974 a entraîné une baisse piézométrique de 12,85 m et une homogénéisation de la salinité de différents niveaux aquifères tendant vers une augmentation et notamment au niveau des aquifères superficiels rechargés par les eaux de ruissellement.

Cet état de surexploitation a été soulagé par le dessalement et l'exploitation des eaux saumâtres de la nappe du Mio-Plicène de la Jefara à partir de l'année 1998.

La recharge provoquée par les travaux de Conservation des Eaux et Sols de la nappe envisagée constitue une expérience encourageante d'amélioration de potentiel en eau souterraine des nappes rechargeables dans un climat aride comme celui du sud-est Tunisie. Les réseaux d'observation d'évolution de l'exploitation, de la chimie et de la piézométrie ont constitué un outil fondamental d'évaluation de cette évolution. Le modèle numérique représente un moyen avancé de quantification et de prévision d'une gestion rationnelle et contrôlée de cette nappe.

Sachant que la nappe de Zeuss-Koutine fait partie d'un système plus important rassemblant la totalité des nappes de la Jefara tunisienne et libyenne, il est important d'introduire l'étude hydrogéologique et la modélisation de cette nappe dans le cadre du projet d'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS) qui construit actuellement un modèle hydrogéologique du Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS), groupant la Tunisie, l'Algérie et la Libye. Ceci permettra au mieux de réajuster le bilan de la nappe concernée.

## Références

- Ben Bacchar, B. 1982. *Contribution à l'étude hydrogéologique de l'aquifère multicouche de Gabès-Sud*.  
Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle soutenue à l'université de Paris Sud.
- D.C.E.S. (Direction de la conservation des eaux et des sols) 1990. *Stratégie décennale de la Conservation des Eaux et des Sols*.
- D.G.R.E. (Direction générale des ressources en eau) 1996. *Annuaire d'exploitation des nappes profondes*.
- Derouiche, R. 1997. *Contribution à l'étude par modèle numérique de l'impact des aménagements de CES sur la recharge de la nappe de Zeuss-Koutine*. Projet de fin d'études, INAT, Tunis.
- Djebbi, M. 1992. *Logiciel de simulation des aquifères multicouches en mailles carrées régulières*.  
ENIT, Tunis.
- Fersi, M. 1985. *Etude hydrologique d'oued Om Zessar à Koutine*. Ministère de l'Agriculture, Tunis.

- Gaubi E.B. 1988. *Evolution de la piézométrie et de la géochimie de la nappe de Zeuss-Koutine, région de Médenine*. Mémoire de fin d'étude de cycle de spécialisation, Université de Tunis. Tunis.
- Maati, M. 2001. *Impact des aménagements de CES sur le bilan hydrique des BV en zones arides (Cas de Zeuss-Koutine)*. Projet de fin d'étude de cycle d'ingénieur, ESIER, Tunis.
- Mansouri, R. 1985. *Projet de la recharge de la nappe de Zeuss-Koutine et de Haoureb*. SONEDE, Tunis.
- Smaoui, A., Yahyaoui, H., Boufalgha, M. 1997. *Nappe de Zeuss-Koutine - Situation actuelle et plan quinquennal de recharge*. Ministère de l'Agriculture, Tunis.
- Yahyaoui, H. 1997. *Note sur l'évolution verticale de l'hydrochimie de la nappe de Zeuss-Koutine*. Ministère de l'Agriculture, Tunis.