

Incidences de pluies exceptionnelles sur un aquifère libre côtier en zone semi-aride (Chaouia, Maroc)

Influence of extreme rainfall events on an unconfined coastal aquifer (Chaouia, Morocco)

A. YOUNSI^{1*}, J. MANIA^{2*}, E.K. LHADI¹, J. MUDRY^{3*}

Reçu le 25 janvier 1999, accepté le 17 avril 2001**.

SUMMARY

A study of regional pollution in the coastal aquifer system between Oum-er-Rbia River and Bir Jdid (Coastal Moroccan Meseta, Morocco) was based on data gathered from 1995 to 1998. The study improved the hydrogeological and hydrochemical understanding of the aquifers. The study examined the effects of significant rains on the quantity and quality of coastal groundwater. These waters exhibited high sensitivity to the rain input.

Measurements undertaken since 1991 on 179 wells in the study area reveal that the groundwaters are highly mineralized — conductivity reaches more than 10 mS/cm, depending on season and well location. These results also show high chloride concentrations (more than 3.500 mg/l), sodium concentrations frequently in the 500-1.000 mg/l range and nitrates between 150 and 250 mg/l.

In coastal Chaouia, these high concentrations of dissolved mineral salts aggravate the problem of supplying quality water to the rural population for drinking or even market-gardening irrigation purposes. The area is characterized by increased irrigated surfaces (more than 16.000 hectares with 4.125 m³/s) and a demographic rise that has triggered the chaotic boring of more than 2.000 wells into a heterogeneous aquifer sensitive to salinity.

Possible sources of this high salinity include:

– seawater intrusion into coastal aquifer sectors (mainly into a two-kilometers strip of coastline). The degree and the length of the marine intrusion

1 Faculté des Sciences, BP 20, 24000 El Jadida, Maroc.

2 Eudil – Département géotechnique et génie civil, Cité scientifique, avenue Paul Langevin, 59655 Ville-neuve d'Ascq cedex, France.

3 Université de Franche-Comté, Département géosciences, La Bouloie, 25030 Besançon cedex, France.

* Correspondance. E-mail : abyounsi@hotmail.com
E-mail : jacky.Mania@eudil.fr
E-mail : jacques.Mudry@univ-fcomte.fr

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 29 mars 2002.

were exacerbated by intensive pumping for irrigation needs, particularly during the dry season. Other factors such as coastal aquifer permeability, saturation zone thickness and basement depth also affect the degree and length of the marine intrusion. Seawater pollution is more marked in the southwestern coastal area;

- reuse of irrigation saline waters, especially as groundwater circulates in the coastal and eastern sectors deep in the soil (to depths of 10 m).

Several important factors have been highlighted concerning the origin of the chemical elements in solution and the mechanism of hydrochemical distribution: evaporation, lithology of tapped aquifers, water table depth, distance of wells from the coast, type of soil, use of fertilizers, frequency of pumping operations, and rainfall, among others.

A regular network of 179 wells was monitored and surveyed in this study. Spatial and temporal changes in the water table and in the hydrochemistry of the aquifer were monitored between 1991 and 1998, a span which included an exceptionally rainy period (1996). Data are compared with those from 1971, the year groundwater exploitation began.

The studied region is characterized by a semi-arid climate, mean annual rainfall of 391 mm (between 1977 and 1998), mean temperature of 17.8 °C, and mean rainfall input of 142 mm. In the dry season, high temperature combined with low rainfall and intensive pumping operations give rise to salinization of shallow groundwater. Groundwater in the area of study circulates in two principal hydrogeological matrices:

- Sandy-calcareous Plio-Quaternary and paleozoic strata in coastal sectors and the eastern part located between Tnine Chtouka and Bir Jdid. These hydrogeological strata are characterized by significant porosity and permeability and are exploited at a shallow depth, generally less than 14 m, under sandy-clayed soil;
- a Cretaceous aquifer in marly limestone located between Oum-er-Rbia River and Tnine Chtouka. This aquifer is characterized by a low permeability and a water table generally exceeding 24 m in depth.

Monitoring showed that after the heavy rains of 1996 (943 mm, with infiltration of 142 mm), the water table rose markedly in all study wells and a lagged dilution (3 to 6 months) was noted for all mineral salts dissolved in water. In fact, the water table, which had dropped between 1971 and 1995 (10 m in the coastal sectors and 20 m in the others parts of the studied region), rose by an average 4.5 to 12.5 m in the central and up-gradient parts of the plain. Several factors were at work between 1971 and 1995: decreased pumping times (about 15 min) combined with sharp decreases in the thickness of the saturated zone; appearance of a closed piezometric level in the western region between Oum-er-Rbia River and Tnine Chtouka; and desiccation of 59 wells. With the aid of a polynomial model, annual level evolution of the five coastal test piezometers showed correlation factors of 0.76 to 0.93 respectively for years 1996 and 1997. Other quantitative effects of exceptional rains on groundwater identified include: increased pumping time (up from less than 15 min prior to the heavy rains of 1996); increased saturated zone thickness; rises in the water-table surpassing former sea-level heights in certain wells; general advancement of the piezometric levels towards the coastline; and increased aquifer thickness stemming from longer pumping times.

In terms of quality, groundwater showed gradually increasing salinity (by a factor of 2) between 1971 and 1995 and significant improvements after the rains of 1996. Between 1971 and 1995, increased mineralization was observed mainly in coastal and eastern parts of the aquifer between Tnine Chtouka and Bir Jdid. Conductivity of the waters in some coastal wells increased from 5 mS/cm to more than 10 mS/cm. After the exceptional rains of 1996, diffe-

rences ranging from 0.5 to more than 4 mS/cm were observed in 71% of the 179 wells analysed. Over the same period, chloride concentrations decreased by average values ranging from 150 to 500 mg/l (higher decreases surpassed 1.000 mg/l). By contrast, spatial distributions of conductivity and of the main mineral salts remained unchanged and coastal and eastern groundwaters were still the most vulnerable to high salinity.

The quantitative and qualitative effects of heavy rain point to the high sensitivity of these groundwaters to rain input, which is the principal recharge source of the studied aquifer.

Key-words: *coastal aquifer, salinity, piezometric level, pollution, recharge, semi-arid zone, Morocco.*

RÉSUMÉ

Les eaux souterraines qui représentent les seules ressources en eau de la Chaouia côtière, sont très minéralisées : intrusion marine, évaporation et recyclage des eaux d'irrigation chargées en sels. L'évolution spatio-temporelle piézométrique et hydrochimique de cet aquifère a été observée sur 179 puits, de 1991 à 1998 qui inclue une période exceptionnellement pluvieuse. Une comparaison par rapport à l'état de la nappe en 1971, date du début de l'exploitation des eaux souterraines, a été faite. Les suivis ont montré qu'à la suite des pluies importantes de 1996 (943 mm), un rehaussement important du niveau de la nappe et des dilutions plus ou moins retardées de tous les sels en solution dans l'eau, sont mesurés dans tous les puits. En effet, la nappe qui a accusé des baisses de 10 à 20 m entre 1971 et 1995, remonte en 1996 de 4,5 à 12,5 m en moyenne surtout au centre et à l'amont de la plaine. Quant à la qualité des eaux qui s'était dégradée, elle a connu des améliorations importantes avec des variations de 0,5 à plus de 4 ms/cm au niveau de la conductivité électrique. Ces faits montrent une grande sensibilité de la nappe aux apports par les pluies qui constituent sa principale alimentation.

Mots clés : *aquifère côtier, salinité, piézométrie, pollution, recharge, semi-aride, Maroc.*

1 – INTRODUCTION

De manière générale, les problèmes posés par l'exploitation d'un aquifère côtier sont complexes (TSAO, 1983 ; UNESCO, 1987 ; PULIDO-BOSCH *et al.*, 1991 ; RICHTER et KREITLER, 1993 ; BRGM, 1995 ; HSISSOU *et al.*, 1997), et associent la notion de quantité à celle de qualité (MAZOR et GEORGE, 1992 ; MAHESHA et NAGARAJA, 1996 ; SHIVANNA *et al.*, 1991), d'autant plus que dans ces zones (aride et semi-aride), la demande en eau est en général forte pour l'irrigation et pour l'alimentation (PAPY *et al.*, 1981 ; MANIA *et al.*, 1985 ; GRILLOT *et al.*, 1988 a et b ; FAKIR, 1991).

La région étudiée fait partie de ces zones côtières, où les seules ressources en eau sont d'origine souterraine, circulant dans un aquifère hétérogène, dont l'alimentation se fait principalement par les eaux de pluie (BENTAYEB, 1972 ; AMRAOUI, 1988 ; YOUNSI, 1994 ; DPA, 1996 ; DRPE, 1996). Les eaux souterraines se chargent progressivement en sels minéraux et peuvent atteindre par endroit et selon la saison des teneurs anormalement élevées, de 300, 1 800 et de 4 000 mg/l respectivement en nitrates, sodium et en chlorures (LHADI *et al.*,

1996 a et b ; YOUNSI *et al.*, 1997). Ces fortes salinités sont observées sur les deux premiers kilomètres de la frange littorale et dans la partie orientale, surtout pendant la saison sèche où l'on intensifie l'exploitation de l'aquifère pour l'irrigation. Elles seraient dues à plusieurs sources potentielles : l'intrusion marine, l'évaporation favorisée par la faible profondeur de la nappe, l'infiltration et le recyclage des eaux d'irrigation chargées en sels et en nitrates (MANIA *et al.*, 1985 ; CHTAINI, 1987 ; AMRAOUI, 1988 ; YOUNSI, 1994 ; DRPE, 1996).

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement piézométrique et hydrochimique de la nappe phréatique aux pluies exceptionnelles de l'année 1996 et d'identifier les secteurs les plus sensibles aux recharges pluviales.

1 – CADRES GÉOGRAPHIQUE, SOCIO-ÉCONOMIQUE ET CLIMATIQUE

Le site étudié constitue la partie la plus agricole de la plaine de la Chaouia côtière. Il est limité au N par l'océan, au SW par l'oued Oum-er-Rbia et au NE par Bir Jdid (*figure 1*). Il a vu se développer une forte activité de maraîchage et de primeurs (environ 40 % de l'exportation nationale en tomates), accompagnée d'un essor démographique important (130 habitants/km²) (DPA, 1996 ; DRPE, 1996).

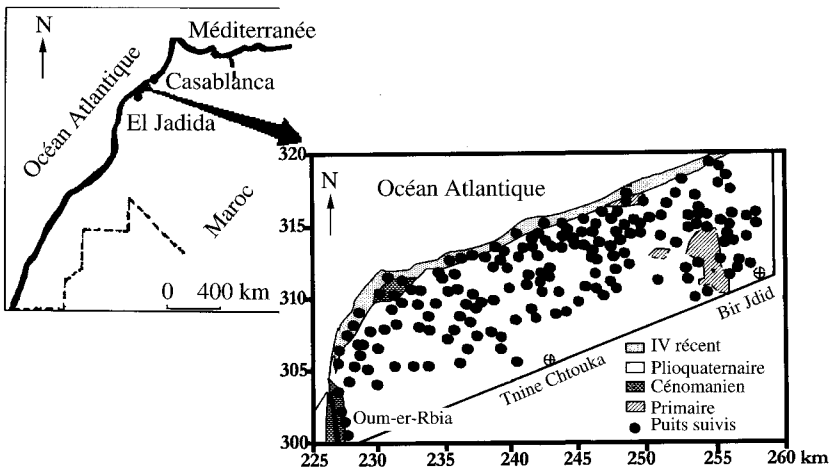


Figure 1 Carte de situation géographique et réseau de mesures.
Geographical situation and Network of the measured wells.

Le climat est de type semi-aride avec une température moyenne de 17,8 °C et une précipitation moyenne annuelle de 391 mm (*figure 2*) calculée sur 22 ans.

La recharge efficace est une donnée difficile à évaluer surtout pour notre cas où l'on note une absence de lysimètres bien répartis sur toute la région étudiée et intéressant les différentes formations géologiques et un manque de données

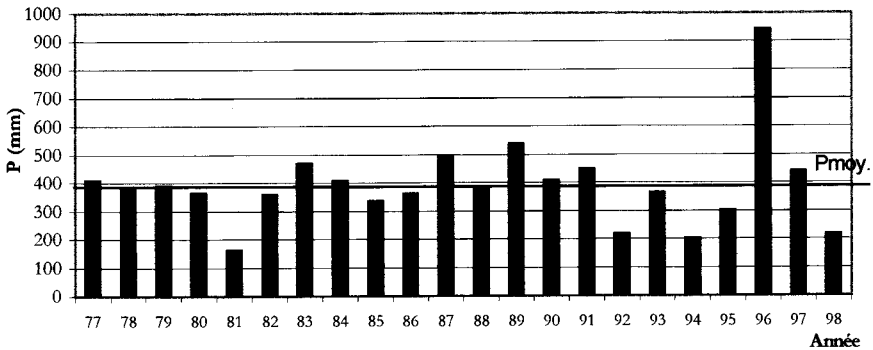


Figure 2 Évolution annuelle de la pluviométrie (1977-1998).
Annual evolution of the rainfall (1977-1998).

climatologiques complètes et à des pas de temps suffisamment courts. En plus, la région ne dispose pas de réseau de piézomètres représentatifs de toute la nappe : seuls quelques puits témoins côtiers sont suivis dans le temps et en plus ils ne sont pas toujours bien nivelés (DRPE, 1996). La recharge efficace a été estimée par la méthode de Thornthwaite, en prenant une réserve facilement utilisable (RFU) de 80 mm vu la nature des sols (sablo-argileux) dans la zone (PAPY *et al.*, 1981). Ce bilan hydrique a permis d'estimer l'évapotranspiration réelle à 331 mm/an et la recharge efficace à 60 mm, soit environ 15 % de la pluviométrie (BOLLELI, 1951 ; BENTAYEB, 1972 ; AMRAOUI, 1988).

L'année 1996 est exceptionnellement pluvieuse avec 943 mm (*figure 2*) et excédentaire de 2,4 fois par rapport à la moyenne pluviométrique calculée sur 22 ans. Les mois de janvier et décembre ont enregistré 359 et 312 mm de pluie totale en 1996 respectivement contre 77 et 74 mm pour les moyennes mensuelles calculées sur 22 ans. Cette situation pluviométrique exceptionnelle se répercute bien évidemment sur la recharge efficace annuelle de 1996 (142 mm) qui dépasse largement la moyenne (60 mm).

La surface irriguée atteint 16 000 ha avec un volume d'eau de 4 125 m³/ha (DPA, 1996). Les retours d'irrigation vers la nappe, estimés à 17 % sur des lysimètres (DRPE, 1996) et chargés en sels issus surtout du lessivage, constituent une source potentielle de dégradation de la qualité des eaux souterraines (BONNET *et al.*, 1979 ; AMRAOUI, 1988 ; LHADI *et al.*, 1993 ; YOUNSI, 1994).

3 – HYDROGÉOLOGIE ET HYDROCHIMIE

3.1 Géologie, hydrogéologie et hydrodynamique (BENTAYEB, 1972 ; DRPE, 1996)

Le schéma hydrogéologique de la nappe de la Chaouia côtière se présente comme suit (*figure 3*) :

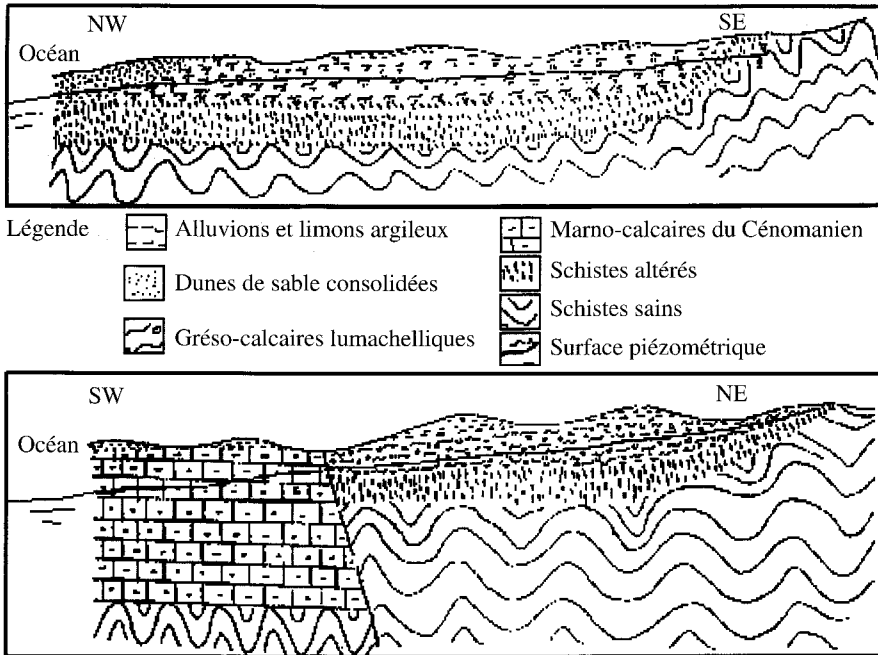


Figure 3 Coupes schématiques de la configuration de l'aquifère.
Hydrogeological configuration of the aquifer.

- le socle primaire sain constitué de schistes et de quartzites, forme le substratum généralisé de toute la nappe. Celui-ci s'enfoncé progressivement en direction de l'océan (une pente moyenne de 1 à 3 %) avec des ondulations d'amplitudes variables ;
- la partie supérieure altérée du Paléozoïque constitue avec les terrains superficiels du Plioquaternaire (de nature grésocalcaire dunaire), le principal aquifère de la région (secteurs côtiers et zone comprise entre Tnine Chtouka et Bir Jdid) ;
- au SW de Tnine Chtouka, la remontée du substratum primaire constitue un seuil hydraulique, se manifestant par une ligne de partage des eaux souterraines perpendiculaire à la côte et passant par Tnine Chtouka. Cette ligne sépare les circulations d'eau dans les niveaux calcaires du Cénomanién au SW de celles du Plioquaternaire et des schistes altérés au NE ;
- l'ensemble des trois niveaux aquifères est en communication hydraulique verticale (*figure 3*), cela s'explique par les faits suivants :
 - en dehors de la bande côtière (*tableau 1*), le Plioquaternaire d'épaisseur très réduite (dénoyé par endroits) et par sa grande perméabilité verticale de fissure, joue plutôt un rôle de drainage des eaux infiltrées, constituant ainsi la source principale d'alimentation des terrains sous-jacents ;
 - les terrains calcaires aquifères du Crétacé reposent en discordance sur les schistes altérés du Primaire, avec absence de niveaux litho-

logiques pouvant jouer le rôle d'écran vis-à-vis des circulations d'eau des formations aquifères supérieures.

Les perméabilités de ces terrains aquifères s'échelonnent entre 10^{-6} et 10^{-3} m/s, cet étalement montre l'hétérogénéité de l'aquifère. La plage de plus grande perméabilité ($> 3,10^{-4}$ m/s) correspond à celle des terrains grésocalcaires du Pliocène. Les autres plages représentent les différents stades d'altération et de fissuration des formations du Cénomaniens et du Primaire.

Les caractéristiques hydrogéologiques de la nappe étudiée sont portées dans le tableau ci-après :

Aquifère/Zone d'exploitation	Alimentation	Substratum	Épaisseur de la nappe	Profondeur de l'eau
Pliocène/secteurs côtiers	eaux de pluies	schistes	- bande côtière : 15 m en moyenne - ailleurs : < 10 m	en moyenne, < 10 m
Cénomaniens/au SW de Tnine Chtouka	eaux de pluies	schistes	en moyenne, 10 à 20 m	en moyenne, 20 à 40 m
Primaire (schistes altérés)/dans le reste de la région	eaux de pluies	schistes	1 à 40 m (zones dénoyées parfois)	en moyenne, 10 m

L'étude géologique a montré l'absence de terrains évaporitiques. Des sols sablo-argileux perméables, prédominent dans la région.

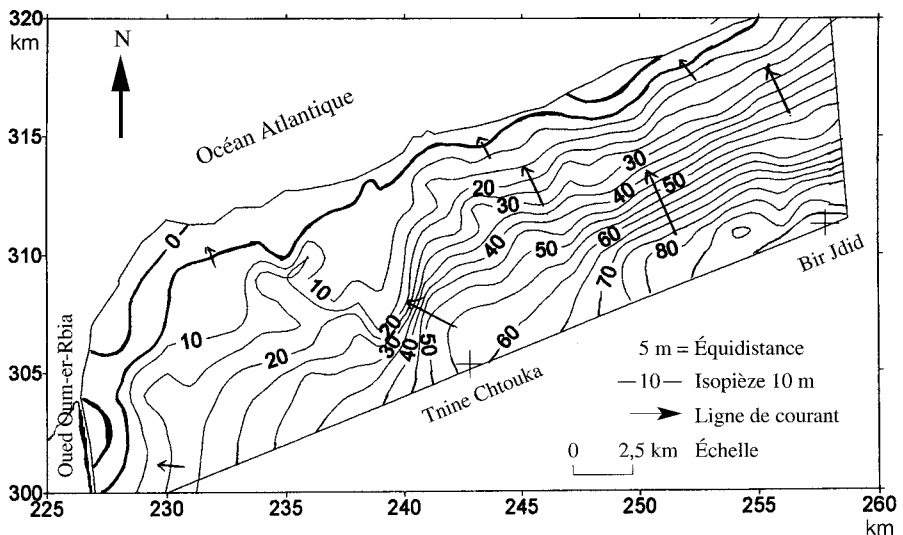


Figure 4 Carte piézométrique (Septembre 1997).
Piezometric map (September 1997).

Sur l'ensemble de la région (figure 1), nous avons utilisé un maillage kilométrique avec au total 179 puits suivis périodiquement de 1991 à 1998. Généralement, les relevés piézométriques sont effectués pendant les périodes de

hautes eaux (fin mars) et de basses eaux (fin août). À ces mesures régulières, s'ajoutent d'autres mesures ponctuelles. La carte de la *figure 4* montre que la nappe s'écoule du SE vers le NW vers l'océan (exutoire principal) sauf au SW où une ligne de partage des eaux sépare les eaux allant vers la mer de celles s'écoulant vers l'oued Oum-er-Rbia, en position de drainage. Les mesures piézométriques ont aussi montré que les faibles profondeurs de la nappe, généralement inférieures à 10 m avec un minimum de 1,5 m, sont observées dans les secteurs côtiers et dans la partie orientale là où la nappe circule dans l'aquifère « Primaire altéré-Plioquaternaire » sous des sols perméables. Ce sont des zones agricoles, considérées a priori comme sources potentielles de pollution des eaux souterraines (GRILLOT, 1986 ; CHTAINI, 1987 ; UNESCO, 1987 ; YOUNSI *et al.*, 1997).

3.2 Étude chimique des eaux souterraines

Des analyses physicochimiques (conductivité électrique CE et ions majeurs) ont été réalisées périodiquement sur les 179 puits, de 1991 à 1998 (YOUNSI, 1994 ; LHADI *et al.*, 1996 a et b). La carte de la *figure 5* montre que la CE des eaux la plus élevée est rencontrée dans les secteurs côtiers (situés à moins de 2 km de la côte) et au NE de Tnine Chtouka : supérieure à 2,5 ms/cm et dépasse 10 ms/cm par endroit et selon la saison. Dans ces secteurs chargés en chlorures (> 750 mg/l), en sodium (> 300 mg/l) et en nitrates (> 100 mg/l), les eaux sont exploitées à de faibles profondeurs (< 10 m) dans l'aquifère « Primaire altéré-Plioquaternaire » très perméable. À proximité de la côte, les courbes des isovaleurs de la conductivité électrique de l'eau accusent un resserrement très marqué et les valeurs oscillent de 3,5 à 10,5 ms/cm sur une bande réduite d'environ 2 km. Ceci indique des intrusions marines (MANIA *et al.*, 1985 ; SHIVANNA *et al.*, 1991 ; BRGM, 1995 ; HSISSOU *et al.*, 1997). Dans le reste de la zone où les eaux sont sollicitées à des profondeurs plus élevées dans les terrains aquifères peu perméables du Crétacé, la CE ne dépasse pas 2,5 ms/cm, avec des teneurs inférieures à 500, 250 et à 150 mg/l respectivement en Cl^- , Na^+ et NO_3^- (AMRAOUI, 1988 ; MARJOUA, 1995 ; YOUNSI *et al.*, 1997).

4 – MISE EN ÉVIDENCE DE L'INFLUENCE DES PLUIES EXCEPTIONNELLES

4.1 D'après l'évolution spatio-temporelle de la piézométrie

4.1.1 État de la nappe avant les pluies exceptionnelles (1971-1995)

L'exploitation de la nappe à des fins agricoles a débuté en 1971. À cette époque, tous les niveaux aquifères étaient caractérisés par des épaisseurs saturées dépassant largement 10 m avec absence de secteurs dénoyés (BENTAYEB, 1972 ; DRPE, 1996). L'examen de la situation en 1995, montre qu'hormis la bande côtière, où l'épaisseur saturée dépasse 10 m, tout le reste de la nappe a connu une baisse généralisée, avec des épaisseurs inférieures à 5 m et des dénoyages observés au NE de Tnine Chtouka (MARJOUA, 1995 ; LHADI *et*

al., 1996 a et b). Ce qui a causé l'abandon d'environ 114 puits sur 641 points inventoriés et cela à partir de 1990 (DRPE, 1996).

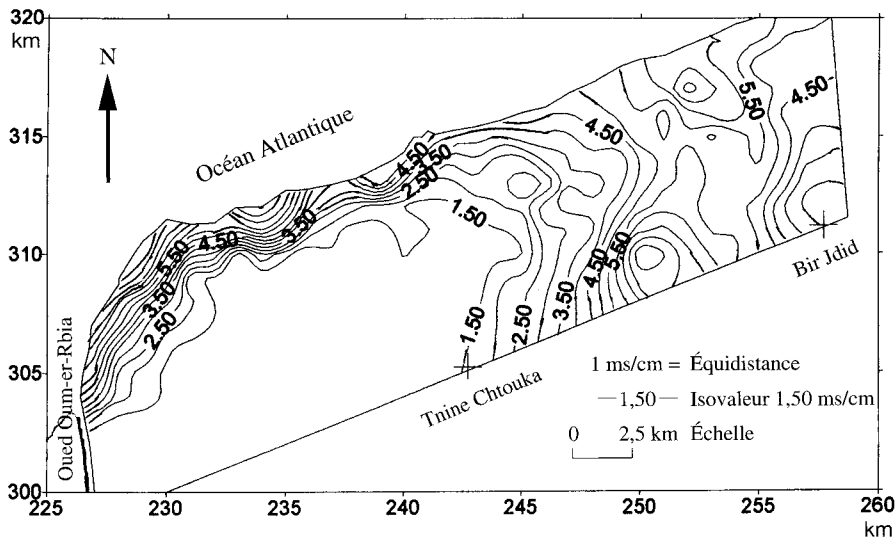


Figure 5 Carte des conductivités électriques (Septembre 1997).
Electric conductivity map (September 1997).

Sur toute la Chaouia côtière (BENTAYEB, 1972 ; CHTAINI, 1987 ; AMRAOUI, 1988 ; MARJOUA, 1995 ; DRPE, 1996), la comparaison des cartes de profondeur de la nappe de 1971 à 1995, montre des baisses moyennes de 10 m dans les secteurs côtiers et de 20 m dans le reste de la zone. La comparaison entre les piézométries des hautes et basses eaux de 1971 et celles de 1995 a permis de dégager les points suivants : apparition des isopièzes fermées au SW, l'isopièze 10 m a été remplacée par l'isopièze 0 m, disparition d'une zone de recharge venant de l'amont, multiplication des axes de drainage, diminution des gradients hydrauliques, assèchement de plusieurs puits (environ 59 puits des 114 points abandonnés (DRPE, 1996)). Sur une année (par exemple 1992), le battement de la nappe entre la période des hautes eaux et celle des basses eaux, peut dépasser 5 m dans la partie amont et 1 à 2 m dans les secteurs côtiers. Ceci semble montrer la sensibilité de la nappe aux apports pluviaux (YOUNSI, 1994 ; MARJOUA, 1995 ; LHADI *et al.*, 1996 a).

Dans les secteurs côtiers de la région étudiée, cinq puits témoins (*figure 1*) ont été choisis pour tenter d'étudier les fluctuations de la nappe de 1981 à 1997 (*figure 6*) : ces puits sont situés seulement dans les deux premiers kilomètres de la mer où les baisses du niveau de la nappe ne peuvent être importantes à cause du potentiel imposé par l'océan. Les courbes de la *figure 6* montrent un abaissement de la nappe qui varie de 2 à 7 m, entre 1981 et fin 1995.

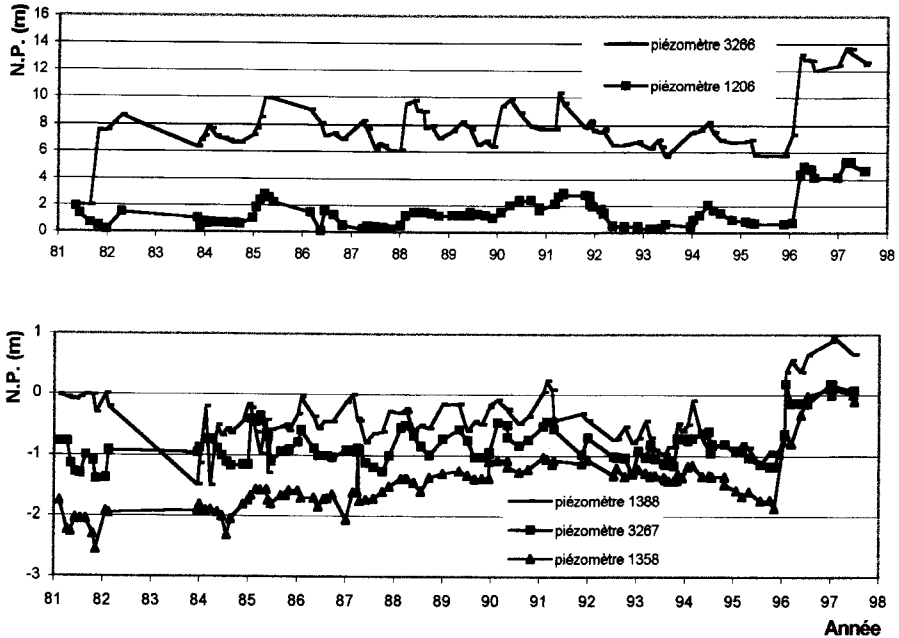


Figure 6 Fluctuations piézométriques sur 5 puits témoins.
Water table fluctuations in 5 coastal test wells.

4.1.2 État après les pluies exceptionnelles de 1996

Entre 1996 et 1997, les différentes lignes isopièzes ont progressé de l'amont (sud-est) vers l'aval (l'océan) par comparaison à leur position avant les pluies exceptionnelles, témoignant d'une remontée généralisée de la surface de la nappe. Cela est dû à des recharges efficaces importantes par les pluies exceptionnelles de l'année 1996 (pour le piézomètre n° 1206, la remontée de la surface de la nappe est de plus de 7 m, entre 1995 et fin 1996, en réponse à une recharge efficace élevée de 142 mm). Ce rehaussement se traduit aussi par des épaisseurs de la zone saturée beaucoup plus importantes et par une disparition par endroits de l'isopièze 0 m qui a été remplacée par des lignes isopièzes de potentiel supérieur à 0 m. Ceci limite l'avancée du biseau salé vers les terres (UNESCO, 1987 ; PULIDO-BOSCH *et al.*, 1991 ; MAHESHA et NAGARAJA, 1996 ; YOUNSI *et al.*, 1997). On note aussi la disparition totale des zones de dénoyage et une augmentation des fréquences de pompage qui étaient parfois de très courte durée (15 min/jour) en 1995, du fait des faibles lames d'eau stockées dans les puits. La *figure 7* montre que les grandes variations des battements de la nappe (généralement supérieures à 4,5 m et pouvant atteindre 12,5 m) sont au centre et à l'amont de la plaine. Les faibles variations (inférieures à 4,5 m) sont en revanche observées dans la partie aval où l'on constate une certaine stabilité des niveaux. Cette réponse différente de la nappe aux pluies de 1996, pourrait être liée au fait que la nappe circule tantôt dans les marno-calcaires peu perméables du Crétacé et tantôt dans le réservoir perméable « Primaire altéré-Plioquaternaire » et aussi à la variation de l'épaisseur de l'aquifère due à la remontée par endroits du socle primaire sain (AMRAOUI, 1988 ; YOUNSI, 1994).

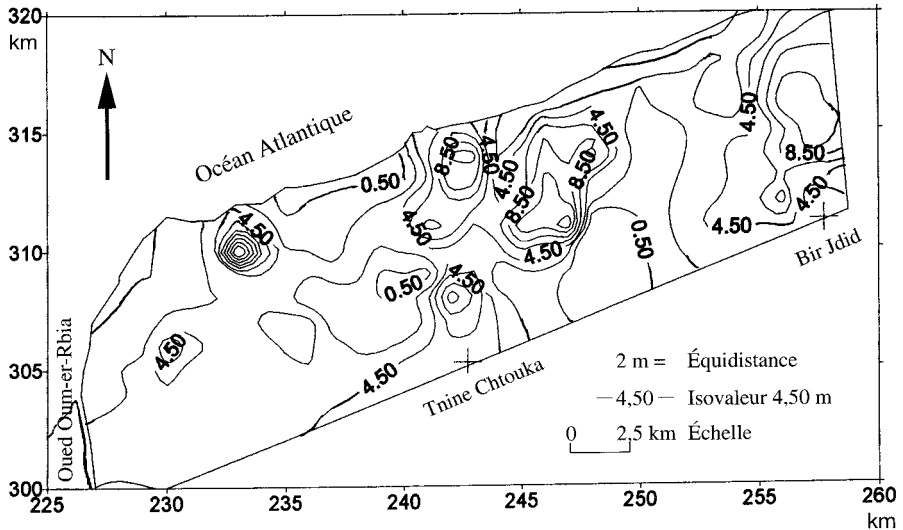


Figure 7 Variations du niveau de la nappe entre 1993 et 1997.
Water table fluctuations between 1993 and 1997.

4.2 Évolution spatio-temporelle de l'hydrochimie

4.2.1 Situation avant les pluies exceptionnelles (1971-1995)

L'analyse des cartes de distribution spatiale des conductivités électriques (en ms/cm à 25 °C) des eaux souterraines de 1971 et 1995, a montré que la minéralisation totale a pratiquement doublé (BENTAYEB, 1972 ; YOUNSI, 1994 ; MARJOUA, 1995). Cette augmentation a été observée surtout dans les secteurs côtiers et au NE de Tnine Chtouka. À titre d'exemple, la conductivité électrique de certains puits de la bande côtière est passée de 5 à 6 ms/cm à plus de 10 ms/cm, entre 1971 et 1995. Ceci est dû à l'intensification des pompages aggravée par la diminution des apports pluviaux à la nappe pendant les sécheresses (DPA, 1996 ; DRPE, 1996 ; LHADI *et al.*, 1996 a et b). Pendant la période sèche de 1991-1995, des conductivités électriques élevées ont été observées (*figure 8*) : une CE de plus de 10 ms/cm sur le puits 11 et des teneurs de 3 500, 1 600 et de 300 mg/l respectivement en Cl^- , Na^+ et NO_3^- au SW à proximité de la mer et des CE variant de 8 à 9 ms/cm dans la partie orientale (YOUNSI, 1994).

Cet état chimique dégradé de la nappe a entraîné un abandon de 55 puits sur les 114 recensés à cause des fortes salinités qui ont dépassé le seuil tolérable pour une utilisation agricole de l'eau (DRPE, 1996). De ce fait, des terres autrefois fertiles, sont actuellement devenues incultes (DPA, 1996).

4.2.2 Situation après les pluies de 1996

Après les pluies de 1996, on a constaté une diminution généralisée de la minéralisation totale des eaux corroborée par des chutes de la conductivité électrique pouvant dépasser 4 ms/cm (*figure 9*) mais l'allure des courbes d'isconductivité après 1996 reste homothétique à celle de la chronique précédente

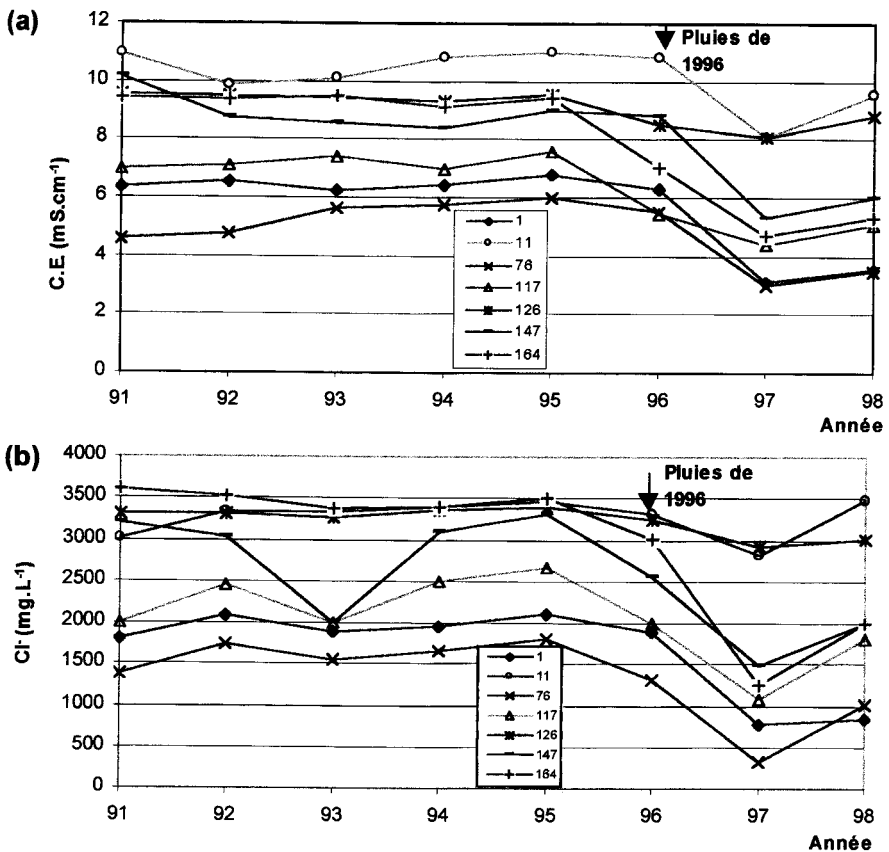


Figure 8 Évolution pluriannuelle des conductivités électriques (a) et des teneurs en chlorures (b).
Multi-year evolution of (a) electrical conductivity and (b) chloride concentrations.

(1971-1995) et les zones à concentrations minérales élevées sont toujours localisées à proximité de la côte et dans le secteur oriental. Les CE et les teneurs en Cl⁻ de 7 puits témoins ont accusé des baisses importantes après les pluies de 1996 (figures 8 et 10) : 71 % des 179 puits suivis depuis 1991, ont enregistré des baisses allant de 0,5 à plus de 4 ms/cm. Cette chute a été observée quelques mois après les pluies de 1996, traduisant ainsi le temps de réponse de la nappe aux pluies efficaces qui s'infiltrent à travers une zone non saturée relativement épaisse (figure 3). Par ailleurs une campagne de mesures ponctuelles des conductivités électriques au mois d'avril 1996 (une fois que l'accessibilité à la nappe soit devenue possible) a montré des valeurs très élevées de CE (YOUNSI *et al.*, 1997), témoignant de l'impact des premières pluies efficaces qui semblent avoir dans ces secteurs un effet négatif sur la qualité des eaux souterraines. En effet, les premières pluies efficaces, transitant vers la nappe à travers des sols agricoles et une zone non saturée plus ou moins épaisse, sont chargées en sels et en nitrates d'origine anthropique. Puis l'inci-

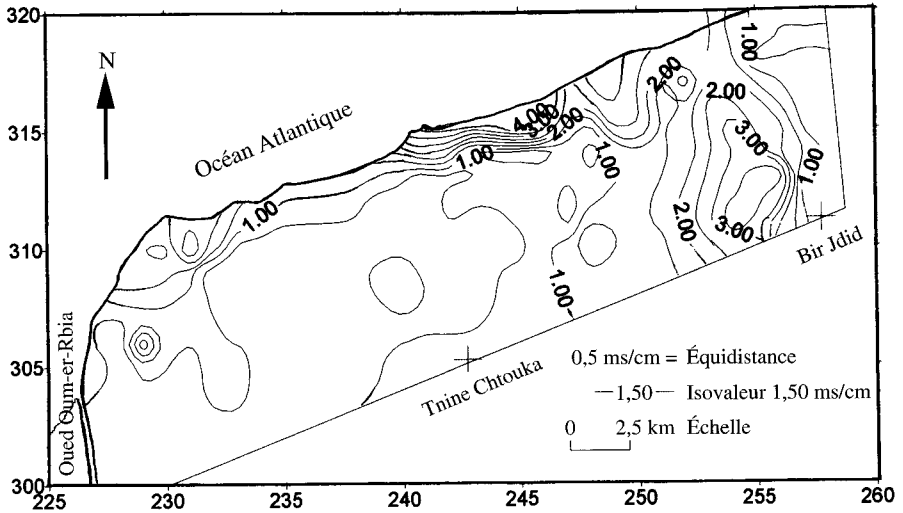


Figure 9 Différences de conductivités électriques entre 1993 et 1997.
Changes in electrical conductivity between 1993 and 1997.

dence des pluies se manifeste par un phénomène de dilution plus ou moins retardé (de 3 à 6 mois environ) de tous les sels entraînés dans la nappe, qui dépend de l'épaisseur de la zone non saturée et de sa perméabilité (BONNET *et al.*, 1979 ; GRILLOT et RAZACK, 1985) et aussi des précédents épisodes pluvieux et des pompages dans la nappe. Ce phénomène de dilution influence rapidement (en moins de 3 mois) les secteurs perméables (côtiers et orientaux) et de manière plus lente la nappe circulant dans les marno-calcaires moins perméables du Crétacé et exploitée au SW.

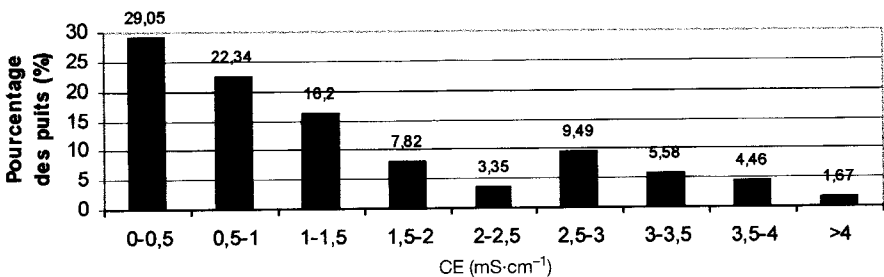


Figure 10 Baisse des conductivités électriques, après 1996.
Electric conductivity decreases after 1996.

Les chlorures, le sodium et les nitrates montrent une évolution similaire à celle de la conductivité électrique (dominance du faciès chloruré-sodique). En effet, les teneurs moyennes en Cl^- et Na^+ ont connu, comme la CE, des variations importantes à la baisse entre 1993 et 1997 : amplitudes de 150 à 500 mg/l pour Cl^- et de 100 à 150 mg/l pour Na^+ . Ceci montre bien l'effet positif des pluies exceptionnelles de 1996 sur la qualité des eaux souterraines.

Les travaux antérieurs (YOUNSI, 1994 ; LHADI *et al.*, 1996 b) ont montré une corrélation nette entre la pluviométrie et l'évolution temporelle des teneurs en nitrates, dont la source principale est l'utilisation excessive des fertilisants azotés en agriculture. Cela est favorisé par la faible profondeur de la nappe dans les zones polluées (secteurs côtiers et au NE de Tnine Chtouka), par la nature sablo-argileuse des sols et la perméabilité importante des niveaux plioquaternaires. Les teneurs moyennes en nitrates ont diminué en moyenne de 50 à 150 mg/l entre 1993 et 1997.

5 – SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

La nappe côtière de la Chaouia est vulnérable aux intrusions marines et aux phénomènes d'évaporation et de recyclage des eaux de drainage. Elle est caractérisée par des conductivités électriques élevées, localisées surtout dans les secteurs côtiers (les deux premiers kilomètres de la mer) et au NE de Tnine Chtouka. Cette situation est liée principalement aux épisodes de sécheresse (1992-95 sur la *figure 2*) qui ont sévi sur la région et à la surexploitation d'un système aquifère côtier à la suite de l'intensification des superficies agricoles irriguées. En effet, entre l'année 1971 du début de l'exploitation des eaux souterraines et 1995, on a pu noter des battements importants d'une nappe dont l'alimentation se fait principalement par les eaux pluviales : baisses de la piézométrie de 10 à 20 m sur toute la Chaouia côtière, diminution de l'épaisseur saturée de l'aquifère inférieure à 5 m, avancée de l'isopièze 0 m à l'intérieur des terres, apparition de secteurs aquifères dénoyés, abandon de 114 puits sur 641 points recensés. Quant à la qualité des eaux, elle a connu une détérioration importante. La conductivité électrique liée principalement aux chlorures et sodium, a dépassé par endroit et selon les saisons des valeurs de plus de 10 ms/cm, avec des variations des teneurs de 1 500 et 3 500 mg/l respectivement en Na^+ et Cl^- . Cet état a été aggravé par l'existence d'un surcreusement du socle primaire sous la cote zéro, la faible profondeur de la nappe (< 10 m) dans les secteurs côtiers et orientaux, la perméabilité des sols et de l'aquifère plioquaternaire, et enfin la fertilisation excessive.

En revanche après les pluies exceptionnelles de l'année 1996 (943 mm soit une recharge efficace de 142 mm), on a pu observer des dilutions plus ou moins retardées (de 3 à 6 mois) et importantes de tous les sels en solution dans la nappe (variation allant de 0,5 à plus 4 ms/cm en conductivité électrique) et un rehaussement piézométrique important (de 5 à 7 m en moyenne). D'autres incidences des pluies sur la nappe peuvent être citées telles que : l'augmentation des épaisseurs saturées se traduisant par une amélioration très nette de la fréquence des pompages dans la nappe, la disparition par endroits de l'isopièze 0 m permettant de limiter la progression du biseau d'eau salée vers l'intérieur les terres.

REMERCIEMENTS

Ce travail entre dans le cadre de la coopération franco-marocaine (AI 95/0893) et d'une collaboration avec la Direction provinciale de l'agriculture d'El Jadida à qui nous exprimons nos vifs remerciements...

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMRAOUI F., 1988. Apport de l'analyse hydrogéologique comparative : exemple des nappes côtières de Temara et Chaouia. *Thèse Univ.* Montpellier, 185 p.
- BENTAYEB A., 1972. Étude hydrogéologique de la chaouia côtière ; essais de simulation mathématique en régime permanent. *Thèse Univ.* Montpellier, 380 p.
- BOLLELI ED., 1951. Coefficient d'évaporation, coefficient d'infiltration : étude d'un cas précis dans les calcaires gréseux (Pliocène et Quaternaire de la côte marocaine). *Union Géol. Géoph. Internat. Assemb. Scient.*, 35, C.R. Assemb. Génér. Bruxelles 1951, IV, 12-14.
- BONNET M., LANDREAU A., 1979. Mécanismes d'acquisition de la qualité chimique d'une eau souterraine. Orléans, rapp. inédit n° 79SGN661HYD, 40 p.
- BRGM, 1995. Méthodes et moyens de contrôle des biseaux salés. Orléans, rapp. inédit n° R 38847, 74 p.
- CHTAINI A., 1987. Étude hydrogéologique du Sahel des Doukkala (Maroc). *Thèse DES Univ. Sci. Techn. Médecine*, Grenoble, France, 224 p.
- DPA, 1996. Rapports bilans et d'activités. El Jadida, Maroc, rapp. inédit 3, 84 p.
- DRPE, 1996. Étude hydrogéologique de la nappe de la Chaouia côtière. *Direction Rech. Planif. Eau*, Rabat, Maroc, rapp. inédit 2, 17 p.
- FAKIR Y., 1991. Caractérisation hydrogéologique et hydrochimique des aquifères côtiers du Sahel de Safi à Oualidia (Méséta côtière, Maroc). *Thèse Univ.*, Semlalia, Marrakech, Maroc, 188 p.
- GRILLOT J.C., RAZACK M., 1985. Évolution spatio-temporelle d'un aquifère alluvial sous l'effet d'une sécheresse pluriannuelle exceptionnelle (littoral médit., Hérault, France), *J. Hydrol.*, 82, 155-173.
- GRILLOT J.C., 1986. À propos de la vulnérabilité des nappes alluviales à l'environnement agroclimatique. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, t. 302, Série II, 8, 605-608.
- GRILLOT J.C., CHAFFAUT I., MOUMTAZ R., 1988 a. Effect of the environment on the hydrochemical characteristics of an alluvial aquifer following an exceptional multiyear drought (Mediterranean seashore, Hérault, France): Part I - Recharge of the aquifer. *Environ. Geol. Water Sci.*, 11(2), 163-173.
- GRILLOT J.C., CHAFFAUT I., MOUMTAZ R., 1988 b. Effect of the environment on the hydrochemical characteristics of an alluvial aquifer following an exceptional multiyear drought (Mediterranean seashore, Hérault, France): Part II - Climatology and Agronomy. *Environ. Geol. Water Sci.*, 11(2), 175-181.
- HSISSOU Y., MUDRY J., MANIA J., BOUCHAOU L., CHAUVE P., 1997. Dynamique et salinité de la nappe côtière d'Agadir (Maroc), influence du biseau salé et des faciès évaporitiques. *Fifth Scien. Ass. of IAHS*, Rabat, Maroc, IAHS publi. 244, 73-82.
- LHADI E.K., MOUNTADAR M., YOUNSI A., 1993. Contamination des eaux souterraines par les sels et les nitrates dans la zone comprise entre Azemmour et Bir Jdid (Maroc). *Séminaire Rech. Nation. Eau et Envir.*, LPEE, Casablanca, Maroc.
- LHADI E.K., MOUNTADAR M., YOUNSI A., MARTIN G., MORVAN J., 1996 a. Contamination par les sels du système aquifère côtier de la province d'El Jadida (Maroc). *Hydrog.*, 3, 35-49.

- LHADI E.K., MOUNTADAR M., YOUNSI A., MARTIN G., MORVAN J., 1996 b. Pollution par les nitrates des eaux souterraines de la zone littorale de la province d'El Jadida (Maroc). *Hydrog.*, 3, 21-33.
- MALOU R., MUDRY J., SAOS J.L., 1991. Recharge pluviale de l'aquifère superficiel de la vallée Baïla (Basse Casamance, Sénégal). *Hydrog.*, 2, 107-116.
- MANIA J., IMERZOUKENE S., BRAILLON J.M., 1985. Pollution saline de la nappe côtière à l'est d'Alger, *J. Hydrol.*, 3, 213-226.
- MARJOUA A., 1995. Approche géochimique et modélisation hydrodynamique de la Chaouia côtière (Maroc) : origines de la salinisation des eaux. *Thèse Univ.*, Paris 6, 179 p.
- MAHESHA A., NAGARAJA S.H., 1996. Effect of natural recharge on sea water intrusion in coastal aquifers. *J. Hydrol.*, 174, 211-220.
- MAZOR E., GEORGE R., 1992. Marine airborne salts applied to trace evapotranspiration, local recharge and lateral groundwater flow in Western Australia. *J. Hydrol.*, 139, 63-77.
- PAPY F., OUSSIBLE M., JOUVE P., 1981. Les contraintes pédoclimatiques à l'exploitation agricole des zones semi-arides et arides du Maroc Occidental. *RGM*, 5, Nouvelle série, Rabat, Maroc.
- PULIDO-BOSCH A., NAVARRETE F., MOLINA L., 1991. Quantity and quality of groundwater in the Campo De Dalias (Almeria, S.E. Spain). *Water Sci. Techn.*, 24(11), 57-69.
- RICHTER B.C., KREITLER C.W., 1993. Geochemical techniques for identifying sources of groundwater salinization. Ed. Boca Raton & C.K. Smoley, FL, 258 p.
- SHIVANNA K., NAVADA S.V., NAIR A.R., RAO S.M., 1991. Isotope and geochemical evidence of past seawater salinity in Midnpore groundwaters. IAEA-SM-329/30, 199-212.
- TSAO Y.S., 1983. Relation of groundwater quantity and quality. XVII Ass. Gén. Union Géody. Géoph. Intern. Hambourg, RFA. IAHS publ. 146, 33-43.
- UNESCO, 1987. Groundwater problems in coastal areas, Paris, 582 p.
- YOUNSI A., 1994. Étude des mécanismes des intrusions marines vers le système aquifère compris entre oued Oum-er-Rbia et Bir Jdid. *Thèse Univ.*, El Jadida, Maroc, 147 p.
- YOUNSI A., LHADI E.K., MANIA J., 1997. Mise en évidence de l'intrusion marine de la nappe d'El Jadida, Maroc. Fifth Scien. Ass. of IAHS, Rabat, Maroc, IAHS publi., 244, 115-122.