

Problématique de la remontée, de la salinité et de la pollution par les nitrates des eaux de la nappe phréatique des Beni-Amir (Tadla, Maroc)

Mohamed Faouzi et Abdelkader Larabi

Le périmètre des Beni-Amir (Tadla) est l'un des plus anciens périmètres irrigués du Maroc. Sa première mise en eau date de 1936. Ses bonnes terres et ses ressources en eau ont incité à la mise en place d'équipements de grande hydraulique (barrages, canaux). Or, la mise en eau de ce périmètre a considérablement modifié l'équilibre de la nappe phréatique située dans la zone irriguée.

L'impact de l'irrigation sur la nappe prend deux formes : un impact sur les quantités d'eau, manifesté par des fluctuations et la remontée du niveau piézométrique de la nappe, parfois jusqu'à l'affleurement ; et un impact sur la qualité qui s'exprime par la salinisation des sols et la pollution par les sels et les nitrates des eaux souterraines, qui constituent la seule ressource en eau potable de la population rurale du périmètre. Les phénomènes de remontée de nappe et de salinisation ne sont pas indépendants. Les remontées du niveau de la nappe au-delà d'un certain niveau, soit 2 m de profondeur par rapport à la surface du sol, engendrent de nombreux problèmes d'ordre environnemental, agricole et sanitaire. On constate notamment l'asphyxie de plantes, l'accumulation de sels dans les sols et l'accumulation de sels et de nitrates dans les eaux souterraines. Afin de maîtriser ce problème, il paraît nécessaire :

– d'effectuer une étude focalisée sur la dynamique de la remontée de la nappe et son fonctionnement, l'évolution de la piézométrie et des remontées de nappe ;

– de délimiter les zones névralgiques sujettes aux quasi-affleurements et à la salinisation ;

– et enfin d'élucider les causes éventuelles du mauvais fonctionnement du système de drainage existant.

Ce travail entre dans le cadre d'une collaboration technique entre le laboratoire LIMEN de l'EMI et l'ORMVA (Office régional de mise en valeur agricole) de Tadla, visant à contribuer à une meilleure gestion des ressources en eau dans les périmètres irrigués.

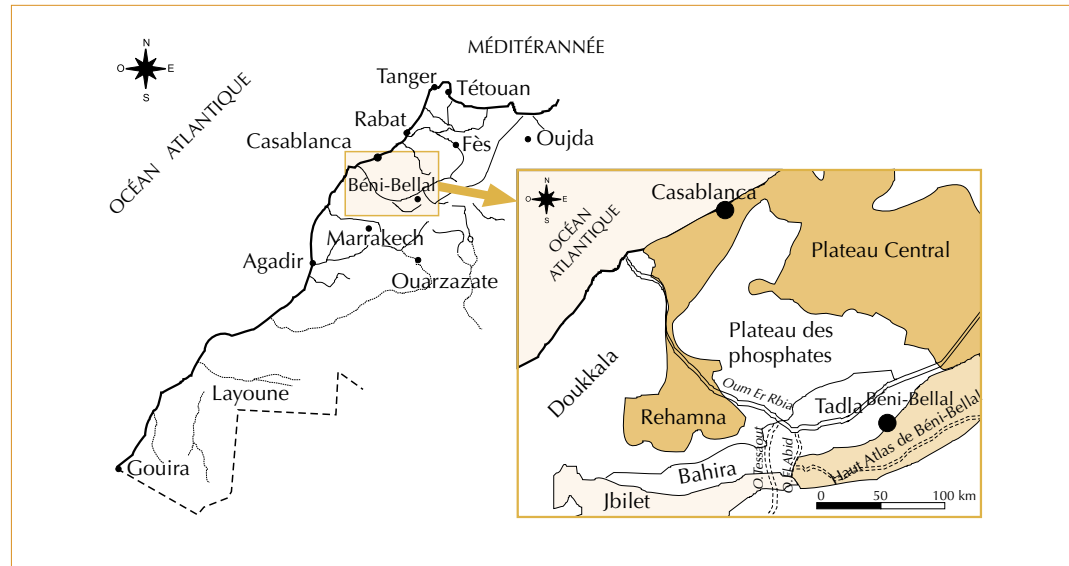
Présentation de la zone d'étude

La plaine du Tadla (figure 1, p. 24) se trouve à 200 km environ au sud-est de Casablanca dans la province de Béni-Mellal. Elle s'étend sur une large portion, estimée à 3 600 km², du bassin moyen de l'Oum-er-Rbia entre le Haut Atlas au sud et le plateau des Phosphates au nord. Le Tadla est traversé sur environ 160 km d'est en ouest par l'oued Oum-er-Rbia qui la partage en deux grands périmètres irrigués hydrauliquement indépendants : le périmètre des Beni-Amir et le périmètre des Beni-Moussa respectivement en rives droite et gauche de l'Oum-er-Rbia. Les Beni-Amir sont irrigués à partir des eaux de l'Oum-er-Rbia (barrage de dérivation de Kasba-Zibania), et les Beni-Moussa à partir des eaux de l'Oued el Abid (barrage de Bin el Ouidane). La superficie totale irriguée est de l'ordre de 124 000 hectares.

La plaine consiste en une vaste dépression remplie par un complexe de dépôts plio-quadernai-

Les contacts

Laboratoire d'identification et de modélisation de l'environnement naturel, Département Génie minéral, École Mohammadia d'ingénieurs, BP 765, Rabat-Agdal, MAROC



► Figure 1 – Carte de situation de la plaine du Tadla.

res emmagasinant la nappe phréatique du Tadla. Le système aquifère se compose de deux nappes, la nappe des Béni-Amir et la nappe des Béni-Moussa, séparées par l'oued Oum-er-Rbia. Le présent travail concerne la nappe des Béni-Amir qui s'étend sur environ 600 km². Cette nappe s'écoule dans le sens NE-SO et circule dans un complexe de séries fluvio-lacustres représenté par un éventail de faciès constitué généralement par une alternance de limons, de marnes, de marno-calcaires, de calcaires lacustres et de conglomérats polygéniques. Ce comblement plio-quaternaire s'épaissit du nord vers le sud avec des épaisseurs généralement comprises entre 40 et 100 m. Les épaisseurs maximales (de l'ordre de 200 à 250 m) sont enregistrées au sud-ouest du périmètre. Le plancher de la nappe est représenté par les argiles dolomitiques localisées au sommet de la formation phosphatée.

Le périmètre irrigué des Béni-Amir (figure 2), compris entre l'Oum-er-Rbia et le canal principal d'irrigation, est subdivisé en structures d'encadrement agricoles appelées Centres de mise en valeur (CMV). Le mode d'irrigation pratiqué est de type gravitaire avec une zone de pompage intensif située à la limite sud-ouest du périmètre (dont 14 000 hectares consacrés à l'aspersion pivot). Dans cette zone, les agriculteurs exploitent la nappe phréatique réalimentée par l'excédent d'irrigation du périmètre. La dotation en eau réservée

au périmètre varie entre 200 et 300 Mm³/an¹ en fonction des assolements et des disponibilités en eau à laquelle s'ajoutent environ 80 Mm³/an prélevés par pompage de la nappe.

Caractéristiques hydrodynamique de la nappe

L'hétérogénéité lithologique de l'aquifère des Béni-Amir entraîne une variabilité des caractéristiques hydrodynamiques : la transmissivité, la perméabilité et le coefficient d'emmagasinement (encadré 1). Les essais de pompage qui ont été réalisés dans le périmètre montrent que les transmissivités mesurées en 90 points oscillent entre 1.10^{-3} et 1.10^{-1} m²/s, voire $1,7.10^{-1}$ m²/s. La quasi-totalité des valeurs se situe entre 5.10^{-3} et 5.10^{-2} m²/s (figure 3, p. 26). Cette variation notable traduit l'hétérogénéité importante de l'aquifère. Les transmissivités sont généralement bonnes, de l'ordre de 10^{-2} m²/s et dépassant parfois 10^{-1} m²/s au sud de Fquih Ben Salah (forage 692/36). Les plus faibles valeurs sont notées au nord et nord-est de Fquih Ben Salah (10^{-4} à 10^{-3} m²/s), avec un minimum de 4.10^{-6} m²/s pour le forage 2061/36. Les transmissivités rencontrées en dehors de ce périmètre au-delà du canal principal d'irrigation (i.e. dans la zone *bour* non irriguée) sont relativement plus faibles (de l'ordre de 10^{-3} m²/s). Cette variation est probablement due à la mise en irrigation du périmètre par accroissement de la zone saturée au droit du périmètre irrigué.

1. Mm³ : mega m³ ou millions de m³.

La perméabilité varie généralement entre 10^{-5} et 10^{-3} m/s avec des valeurs extrêmes qui atteignent 8.10^{-6} (forage 2620/36) et $2,7.10^{-3}$ m/s (forage 692/36). L'hétérogénéité des valeurs de perméabilité est exprimée par un coefficient de variation estimé à 120 % autour d'une valeur moyenne de $4,5.10^{-3}$ m/s environ.

Trois zones peuvent être identifiées :

1. Une zone à fortes valeurs de perméabilités au centre du périmètre (sud-ouest de Fquih Ben

Salah) où les valeurs mesurées sont comprises entre 5.10^{-4} et 3.10^{-3} m/s ;

2. Une zone où les perméabilités varient entre 1.10^{-4} et 5.10^{-4} m/s. Elle s'étend sur la plus grande superficie du périmètre où les limons constituent l'essentiel des affleurements quaternaires ;

3. une zone de faibles perméabilités située aussi bien à l'aval hydraulique qu'à l'est du périmètre et dont les valeurs de perméabilité sont généralement comprises entre 1.10^{-5} et 1.10^{-4} m/s.



▲ Figure 2 – Carte de répartition des Centres de mise en valeur (CMV) et de situation du réseau de drainage artificiel dans le périmètre irrigué des Béni-Amir.

Encadré 1

Explications de certains termes et paramètres employés dans le texte

– **perméabilité** : c'est l'aptitude d'un réservoir à se laisser traverser par l'eau, sous l'effet d'un gradient hydraulique.

Le coefficient de perméabilité K, est défini par la loi de Darcy : c'est le volume d'eau gravitaire en m^3 traversant en une unité de temps (1 seconde), sous l'effet d'une unité d'un gradient hydraulique, une unité de section (en m^2) orthogonale à la direction de l'écoulement dans les conditions de validité de la loi de Darcy.

– **transmissivité T** (en m^2/s) : elle est égale au produit du coefficient de perméabilité K par l'épaisseur de l'aquifère, e ; $T = K.e$. Elle évalue la fonction conductrice de l'aquifère.

– **coefficient d'emmagasinement S** (sans dimension) : c'est le rapport du volume d'eau libéré ou emmagasiné, par unité de surface de l'aquifère ($1 m^2$) à la variation de la charge hydraulique, dh, correspondante. Il est mesuré sur le terrain, principalement par des pompages d'essais.

– **épandage non rationné** : utilisation de quantités d'engrais par les agriculteurs sans avoir d'ordres de grandeur sur les quantités dont les cultures ont réellement besoin.

– **conditions climatiques normales** : précipitations ayant lieu régulièrement en périodes habituelles de l'année hydrologique, allant du mois d'octobre à avril en général.

Les mesures du coefficient d'emménagement de cet aquifère sont peu nombreuses et se concentrent au centre de la plaine. Les valeurs se situent entre 1,4 % et 10 %, avec une valeur moyenne comprise entre 3 % et 5 %. Les fortes valeurs, de l'ordre de 10 %, correspondent aux zones d'affleurement des calcaires lacustres.

Analyse des variations spatio-temporelles de la nappe et détermination des bilans annuels et mensuels

D'une façon générale, l'écoulement se fait dans le sens NE-SO et est quasi-parallèle à l'Oum-er-Rbia (figure 4). Cet écoulement, paraissant dans l'ensemble relativement homogène, est modéré à l'aval du périmètre irrigué. En effet, les forages 2172/36 et 2173/36 ont mis en évidence l'exis-

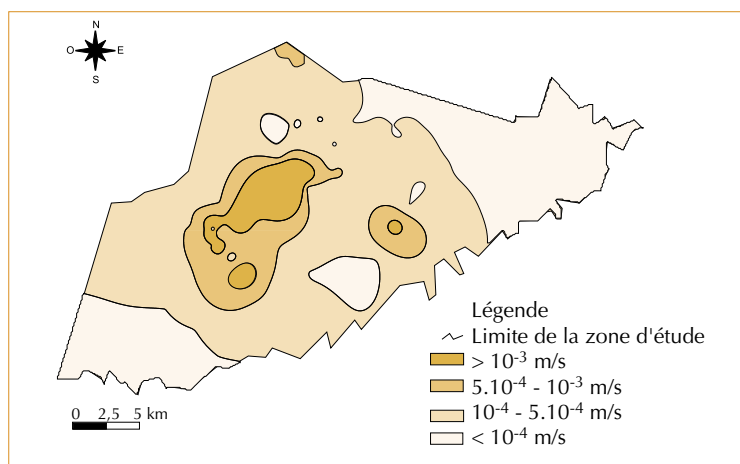
tence d'un seuil argileux franc, imperméable qui serait à l'origine des remontées observées à l'amont hydraulique dans des terrains parfois très transmissifs. Le gradient hydraulique moyen est de $2,5 \cdot 10^{-3}$ à $3,5 \cdot 10^{-3}$, voire $2 \cdot 10^{-3}$ aux environs de Fquih Ben Salah. Ce gradient augmente fortement en raison des faibles transmissivités pour atteindre $6 \cdot 10^{-3}$ en bordure de l'Oum-er-Rbia.

Analyse à l'échelle inter-annuelle

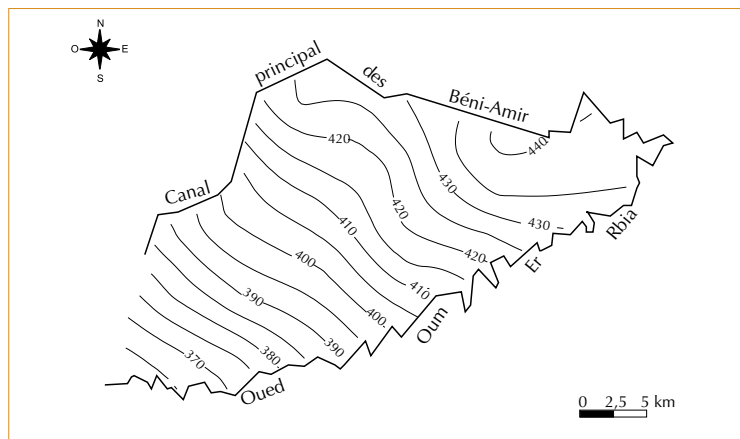
À l'origine, les caractéristiques piézométriques de la nappe phréatique des Béni-Amir étaient le reflet des conditions naturelles d'alimentation ; par précipitations. Avant 1936, date de la mise en eau du périmètre, la nappe se trouvait à une profondeur de 30 à 50 m dans la partie amont et de 15 m environ dans la partie aval du périmètre. Dès la mise en irrigation des premiers secteurs, équipés d'un réseau d'irrigation en terre avec des secondaires non cimentés, l'équilibre naturel de la nappe fut rompu. Le niveau de la surface piézométrique remonta très rapidement pour transformer certaines zones en véritables « dayas ». C'est ainsi que la surface de la nappe qui était aux Ahl-Merbâa (10 km à l'ESE de Fquih Ben Salah) à 8 m de profondeur avant toute irrigation en 1941, est remontée à la surface du sol en août 1944. De même, à Ouled Youb (7 km à l'ESE de Fquih Ben Salah) où la surface de la nappe était à 30-40 m de profondeur et aux Ouled Reguia (9,5 km au SE de Fquih Ben Salah) très peu de temps après. Dans l'ensemble, cette remontée s'est effectuée régulièrement au rythme de 2 à 3 m par an (Archambault, 1971).

La série d'années 1963-1964 à 1970-1971, bien que relativement pluvieuse, a été marquée dans l'ensemble par une baisse du niveau piézométrique de la nappe des Béni-Amir (CMV 503, 504 et 505) (DRPE, 1985). La bonne pluviométrie a entraîné un épandage moindre d'environ $20 \text{ Mm}^3/\text{an}$ des eaux d'irrigation réduisant ainsi les apports de la nappe. En effet, les précipitations durant décembre 1963 (262,6 mm à Fquih Ben Salah) n'ont eu pour effet immédiat l'apparition de la nappe que sur un peu plus de 1 000 hectares (Étienne et Guessab, 1975).

À partir de 1971, la zone autour de Fquih Ben Salah a connu une baisse notable en réponse à l'exploitation des eaux de la nappe dans le secteur pour la desserte de la ville de Khouribga et des agglomérations avoisinantes en eau potable et des installations de l'Office chérifien des phos-



▲ Figure 3 – Répartition spatiale de la transmissivité de la nappe des Béni-Amir.



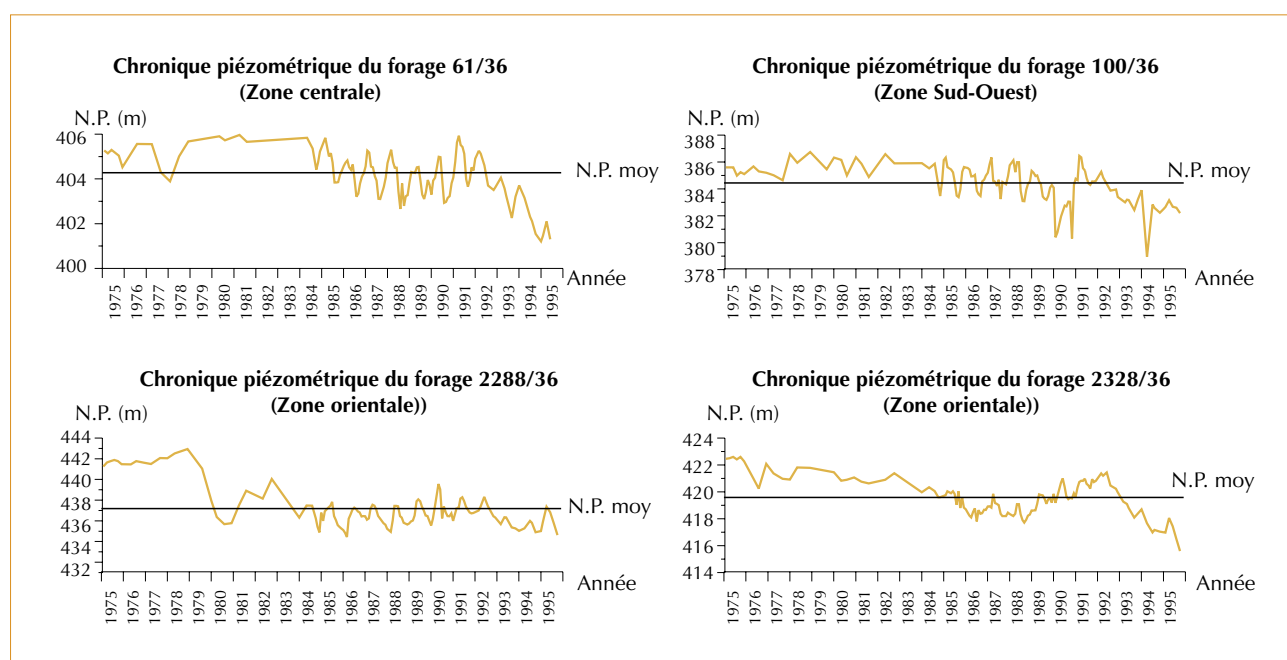
▲ Figure 4 – Carte piézométrique (en m) de la nappe des Béni-Amir (moyenne de 1994-1995).

phates (OCP) en eau industrielle. Cette baisse a été particulièrement importante dans la zone amont des CMV 503 et 504, correspondant à des secteurs modernisés en 1974, et qui s'est manifestée surtout à partir de 1976, ayant atteint jusqu'à 4,5 m par endroit. Elle serait due à une réduction de la recharge naturelle (déficit pluviométrique) et des pertes au niveau du réseau d'irrigation rénové. Pour le reste de la zone amont, la baisse a été non appréciable alors que la nappe est restée stable dans les parties nord et nord-ouest du CMV 505, non modernisé à l'époque, comme par ailleurs dans les zones centrales (forages 61/36 et 2328/36) et avale (forage 100/36) du périmètre (figure 5), à l'exception dans les CMV 508 et 509 lieu de concentration des pompages.

L'analyse de l'évolution piézométrique de la nappe entre 1979 et 1984 (période de sécheresse) montre un rabattement moyen du niveau d'au moins 1 m, voire de plus de 5 m par endroits au début de l'année 1984 (secteur oriental amont, forage 2288/36). Dans la moitié sud-ouest (forage 100/36), l'évolution de la surface piézométrique est marquée par une stabilité n'oscillant que faiblement autour du niveau moyen avec même une remontée locale. Ceci étant dû au fait que cette zone est irriguée uni-

quement par pompage à partir de la nappe. La zone centrale (forage 61/36) est aussi caractérisée par une stabilité de la nappe avec une légère hausse estimée à 1 m suite à la mise en eau de ces secteurs. La modernisation de la majeure partie des centres de mise en valeur (canaux bétonnés et extension du réseau de drainage) a conduit à une baisse généralisée du niveau piézométrique de la nappe. D'autre part, la réduction de la recharge de la nappe conjuguée à un accroissement notable des pompages a entraîné simultanément la diminution des volumes de drainage artificiel et le rabattement de la nappe. Dès 1981, presque la moitié des collecteurs sont pratiquement à sec, les autres voyant leur débit chuter considérablement (Belhacene et Chayat, 1992). Ainsi, les volumes annuellement drainés par réseau ont chuté de 41 Mm³/an (1975-1980) à 33 Mm³/an (1981-1985).

À partir de 1985 et malgré le retour aux conditions climatiques normales, le rabattement de la nappe s'est poursuivi, mais à un rythme faible en raison de la poursuite des pompages agricoles. Cependant, la réapparition de remontée de la nappe persiste dans les secteurs classiquement touchés par ce phénomène (en aval hydraulique). Le tableau 1 (p. 28) illustre l'évolution globale de la réserve de la nappe entre 1975 et 1991.



▲ Figure 5 – Évolution piézométrique de la nappe des Béni-Amir.

PÉRIODE	TERMES DU BILAN (en Mm ³ /an)								VARIATION DU STOCK (en Mm ³ /an)
	ENTRÉES			SORTIES					
	IRRIGATION PAR RÉSEAU	IRRIGATION PAR POMPAGE	APPORTS LATÉRAUX	ÉVAPORA- TION DIRECTE	DRAINAGE NATUREL	DRAINAGE ARTIFICIEL	POMPAGE AGRICOLE	AEPI	
1975-80	112,36	27,69	1,17	9,34	43,12	40,91	30,4	10	7,45
1981-85	144,58	17,63	1,18	6,93	42,67	32,79	82,98	14	-16
1986-91	132,13	23,39	1,17	5,97	41,65	21,66	79,86	12	-4,3

▲ Tableau 1 – Évolution de la réserve de la nappe phréatique des Béni-Amir en Mm³/an (d'après Belhacene et Chayat, 1992).

Analyse à l'échelle inter-saisonnière

Les fluctuations saisonnières (entre hautes et basses eaux) de la nappe phréatique des Béni-Amir sont tributaires, outre des apports principaux d'irrigation, du drainage vertical par pompage. Le tableau 2 récapitule la contribution de chaque terme du bilan dans la recharge ou le rabattement de la nappe.

La recharge de la nappe est assurée par les eaux d'irrigation tant au niveau des canaux que des parcelles, les eaux de pluies et les apports latéraux. Les apports d'irrigation constituent la principale composante d'alimentation et sont distribués pratiquement sur toute l'année avec les

maxima pendant la période avril-juillet. Ils sont constitués par les eaux superficielles et en partie par les prélèvements à partir de la nappe qui représente environ 18 % des apports d'irrigation. La recharge naturelle se fait généralement entre novembre-décembre et avril-mai, avec un maximum aux mois de février et mars. L'apport pluviométrique annuel à la nappe est faible, soit 12 % en moyenne et ne dépasse guère 20 %. Mais, cet aspect influence énormément les épandages hivernaux de l'eau d'irrigation. Les volumes apportés latéralement à la nappe sont stables durant toute l'année, de l'ordre de 0,1 Mm³/mois, excepté les mois de juillet et novembre où l'on note une légère diminution.

Composante	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Total	
ENTRÉES	Précipitation	3,21	4,01	3,75	2	1,72	0,18	0,26	0,21	0,66	0,99	1,56	2,22	20,77
	Irrigation (Réseau+ Pompage)	5,33	6,24	11,22	14,73	16,18	15,11	16,29	14,82	12,38	11,76	8,05	5,86	137,97
	Apports latéraux	0,097	0,11	0,095	0,11	0,095	0,099	0,075	0,1	0,096	0,12	0,075	0,1	1,17
	Total	8,64	10,36	15,06	16,84	18	15,39	16,63	15,13	13,14	12,87	9,68	8,18	159,9
SORTIES	Drainage naturel	3,62	3,51	3,4	3,57	3,8	3,4	3,52	3,5	3,46	3,47	3,35	3,52	42,12
	Drainage artificiel	3,07	2,19	2,01	2,22	3,08	2,62	1,84	1,08	2,09	2,1	2,24	2,17	26,71
	Évaporation	0,93	0,21	0,39	0,72	2,52	0,4	0,052	0,56	0,13	0,19	0,019	0,27	6,39
	AEPI ²	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	12,9
	Pompage agricole	3,37	3,22	6,7	7,58	8,96	11,23	13,98	12,05	5,56	2,35	3,27	3,01	81,28
	Total	12,06	10,2	13,57	15,16	19,43	18,72	20,47	18,26	12,31	9,18	9,95	10,04	169,4

▲ Tableau 2 – Bilan mensuel (en Mm³) de la nappe phréatique des Béni-Amir, période 1981/1991.

2. AEPI : aduction d'eau potable et industrielle.

Les sorties de la nappe sont constituées par le drainage naturel et artificiel, l'évaporation directe et les pompages agricoles. Ces derniers se font durant toute l'année avec des débits variables dont les maximums sont enregistrés de juin à août. Les drainages naturel par l'Oum-er-Rbia et artificiel par réseau sont respectivement estimés à 3,5 Mm³/mois et 2,2 Mm³/mois. L'action de l'évaporation directe sur la nappe est limitée à une profondeur de 0 à 2 m par rapport à la surface du sol et varie d'un mois à l'autre. Aux environs de Fquih Ben Salah, la nappe est le siège de pompages pour l'adduction en eau potable et industrielle du complexe phosphatier de la région de Khouribga (environ 12 Mm³/an).

L'analyse des cartes d'isovariation piézométrique (figure 6) a permis, d'une manière générale, l'identification de deux zones à tendances d'évolution différentes :

- la zone correspondant en général aux secteurs irrigués par la grande hydraulique, accusant une remontée d'ensemble durant la saison d'irrigation. L'amplitude de la variation du niveau piézométrique entre saisons est relativement modérée (souvent < 2 m), voire même nulle. Cette relative stabilité serait due à l'effet du système de drainage localement fonctionnel ;
- la zone située à l'aval hydraulique de la nappe le long de l'Oum-er-Rbia et la zone sud-ouest sont caractérisées par une baisse en saison d'irrigation et une remontée durant le reste

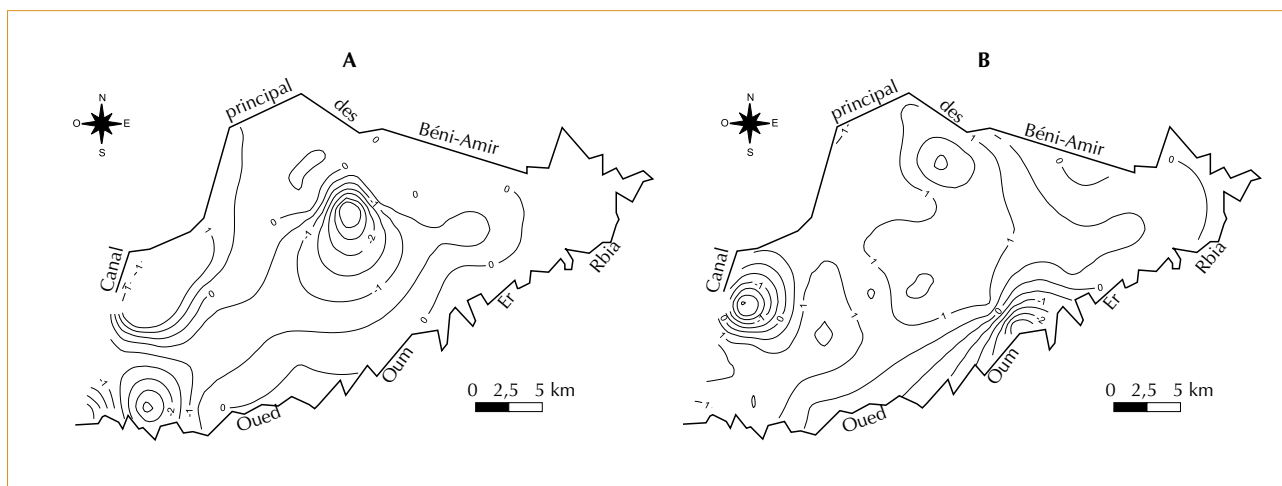
de l'année. Il est à souligner l'importance particulière des oscillations (> 2 m) du niveau piézométrique de la nappe des Béni-Amir dans les secteurs de pompage.

La problématique de la remontée de la nappe

La mise en eau du périmètre des Béni-Amir a donc considérablement modifié l'équilibre de la nappe et a influencé nettement sa bathymétrie à une cadence importante. Les remontées, au-delà d'un certain niveau (< 2 m par rapport à la surface du sol), engendrent des problèmes environnementaux, agricoles et sanitaires. Pour comprendre cette problématique, il est nécessaire de caractériser les variations, de localiser les zones névralgiques et d'identifier les facteurs influents, afin d'élaborer un schéma d'exploitation rationnelle des eaux de surface et des eaux souterraines.

Les faits caractéristiques et les zones névralgiques

Outre la topographie et la géologie de la plaine, la remontée de la nappe serait générée en particulier par les doses et les méthodes d'irrigation appliquées sur le périmètre. Afin de rabattre le niveau piézométrique, un premier réseau de drainage a été construit entre 1948 et 1950, mais il s'est avéré insuffisant par la suite avec l'extension de l'irrigation et il fut étendu entre 1956 et 1960. Cependant, la remontée s'est faite rapide-



▲ Figure 6 – Exemple de l'évolution inter-saisonnière de la nappe des Béni-Amir.
 a) Carte d'isovariation piézométrique septembre 1993-avril 1994 et
 b) Carte d'isovariation piézométrique, avril 1994-octobre 1994.

ment sentir malgré les pompages destinés à l'agriculture et l'eau potable et industrielle (16 420 hectares en 1963 et 16 000 hectares en août 1971 ont été touchés par la résurgence de la nappe). Cette remontée a incité la reprise des travaux de modernisation des réseaux d'assainissement superficiel et l'approfondissement des collecteurs principaux ; depuis 1973 jusqu'à 1983. Cependant, et malgré le revêtement des canaux et le renforcement du réseau de drainage, la remontée reste présente en quelques sites chaque fois que les conditions climatiques redeviennent normales. Les cartes bathymétriques (figure 7a et b) mettent en cause l'efficacité du système de drainage mis en place pour rabattre la nappe. Le tableau 3 récapitule l'envergure de l'engorgement des sols du périmètre par les eaux de la nappe.

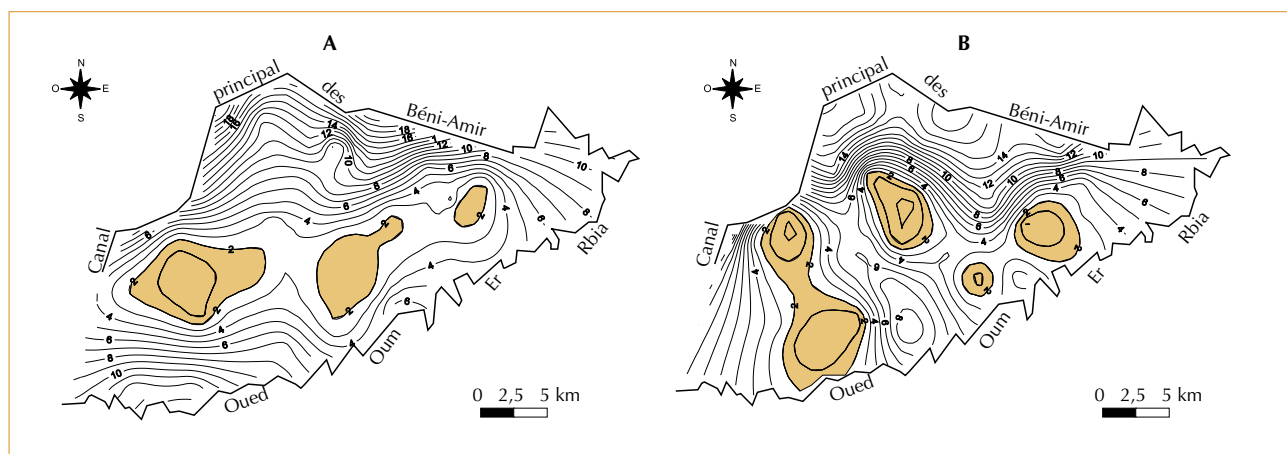
On distingue deux zones névralgiques où la nappe est presque en permanence proche du sol (entre 0 et 2 m). Une première se situe dans la région dénommée SACIMA (secteur CMV 508) tandis que la seconde est située autour du canal médian dont sa partie terminale touchant le secteur CMV 506 où la remontée ait lieu pour la première fois dans la plaine (août 1944). Les fuites au niveau du réseau d'irrigation et des canaux en terre sont responsables de la remontée dans cette zone. Pour la deuxième zone ce sont les fuites au niveau du canal médian d'irrigation qui en sont responsables. Il est important de souligner que dans tout le périmètre des Béni-Amir les systèmes de drainage ont été souvent exécutés en retard par rapport au réseau d'irrigation dans la mesure où la cadence des travaux de drainage étaient conditionnés par la remontée de la

nappe. Ce déphasage expliquerait, en partie, le mauvais choix de l'emplacement des drains, qui souvent sont parallèles à l'écoulement de la nappe (figure 2), et l'inadéquation du système de drainage pratiqué dans le périmètre.

Les facteurs

Du point de vue topographique, la plaine des Béni-Amir présente un relief doux. L'ensemble des terrains pend régulièrement et légèrement (2 à 4°, voire 7° au maximum) vers le sud-ouest. Une forte percolation verticale de l'eau étant favorisée, et ce en absence du ruissellement, contribuant à une remontée de la piézométrie. D'autant plus, le drainage superficiel à l'intérieur du périmètre est tellement négligeable que la lame d'eau excédentaire nette est pratiquement infiltrée dans la nappe. Le drainage profond de la nappe par l'Oum-er-Rbia reste à son tour très limité en raison, d'une part, du sens de l'écoulement de la nappe qui suit le pendage des assises géologiques plio-quadernaires, vers le sud-ouest et de l'existence d'un réseau de failles qui longe l'Oum-er-Rbia. Ce réseau de failles forme avec les horizons marneux, qui jalonnent l'oued, un écran relativement imperméable.

Bien que la proportion de l'infiltration de la pluie par rapport aux apports d'irrigation ne dépasse guère 20 % même pour les années pluviométriques fortement excédentaires, la recharge de la nappe par précipitations semble marquer l'évolution de la bathymétrie de la nappe. En effet, le caractère semi-aride du climat des Béni-Amir fait que les pluies sont souvent sous forme de fortes averses de faible du-



▲ Figure 7 – Bathymétrie de la surface piézométrique et superficies touchées par la remontée, a) avril 1991 et b) août 1996.

rée. Celles-ci, et en l'absence du drainage superficiel, participeraient à la remontée du niveau piézométrique de la nappe qui peut même affleurer en certaines zones.

Au niveau des zones les plus concernées par la remontée, l'existence de dalles friables ou de lentilles d'argiles à une faible profondeur du sol favoriserait des résurgences de la nappe. Dans ces zones, les infiltrations sont freinées et peuvent stagner au niveau des couches superficielles.

La remontée de la nappe des Béni-Amir est essentiellement due à la mise en eau du périmètre. De larges superficies du périmètre sont couvertes d'eau et ce en raison des doses et des méthodes d'irrigation pratiquées ; notamment la pratique d'un mode d'irrigation peu efficace, en particulier la « Robta » (irrigation gravitaire par inondation de petits bassins fermés), conduisant à des pertes d'eau importantes (estimées à 50 %), le défaut de planage dû en grande partie aux façons culturales, le non respect du calendrier d'irrigation établi par l'Office régional de mise en valeur agricole du Tadla et l'insuffisance d'étanchéité des canaux d'irrigation favorisant la percolation de l'eau vers la nappe.

D'autant plus, les drains s'avèrent non adaptés aux conditions du milieu puisqu'ils sont en majeure partie parallèles au sens de l'écoulement de la nappe et leurs profondeurs dépassent rarement 1,5 m et sont d'une densité insuffisante. En plus, certains tronçons de colatures secondaires ont des sorties bouchées ne communiquant pas avec leurs exutoires.

	Avril 1991 Superficie en hectares	Août 1996 Superficie en hectares
Niveau bathymétrique < 1 m	1 483	5 272
Niveau bathymétrique compris entre 1 et 2 m	5 624	4 674
Total	7 107	9 946

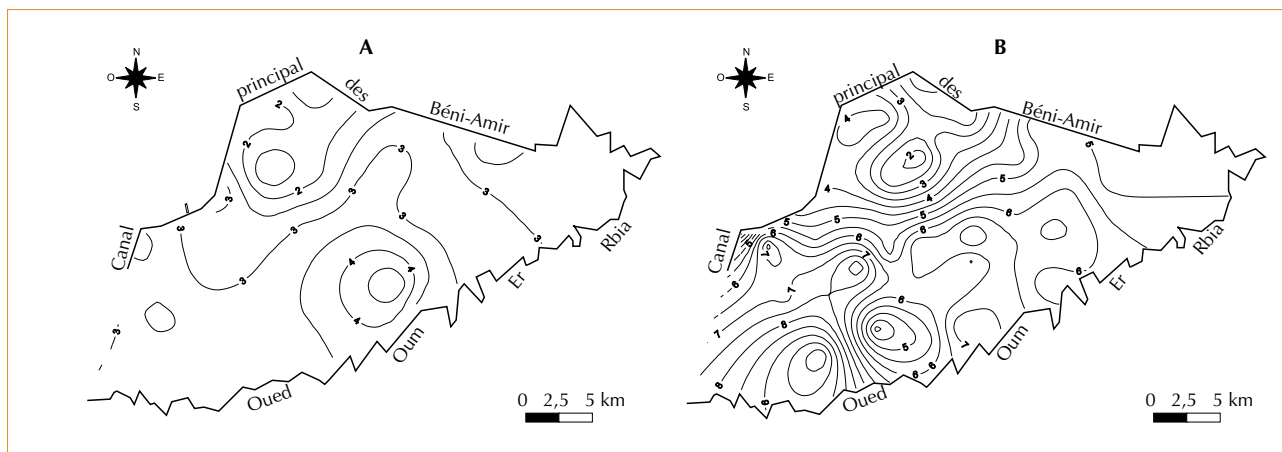
▲ Tableau 3 – Superficies touchées par la remontée de la nappe.

L'impact de l'irrigation sur la qualité des eaux de la nappe

La mise en irrigation du périmètre des Béni-Amir s'est répercutée sur la chimie des eaux de la nappe phréatique située dans le périmètre. Le faciès de type chloruré-sodique de l'eau de la nappe est dû à la composition chimique des eaux de l'Oum-er-Rbia conduites pour l'irrigation du périmètre. L'étude de l'évolution spatio-temporelle de la qualité des eaux de la nappe a mis en évidence leur état de dégradation par contaminations diffuses, par salinisation et par pollution nitrique.

La salinité de la nappe

La qualité minéralogique des eaux de la nappe est globalement très dégradée. La comparaison des conductivités électriques relatives aux campagnes d'août 1978 et de novembre 1995 montre une augmentation spectaculaire de la minéralisation qui pose un sérieux risque en raison de l'étendue du problème (figures 8a et b). Les



▲ Figure 8 – Cartes d'isovaleurs de la conductivité électrique (en mmhos/cm) des eaux de la nappe, a) août 1976 et b) novembre 1995.

valeurs de la conductivité mesurées en 41 points par les services de l'Office régional de mise en valeur du Tadla montrent que 63 % des puits présentent des valeurs de conductivités comprises entre 4 et 7 mmhos/cm, avec des valeurs maximales de 10,5 mmhos/cm. L'examen de la carte d'isovaleurs de la conductivité électrique (figure 8a) montre que la salure des eaux se manifeste d'autant plus dans les secteurs classiquement touchés par la remontée de la nappe et au niveau des zones de pompage. La remontée du niveau piézométrique à moins de 2 m par rapport au sol provoque une intense évaporation dont l'influence est particulièrement visible au nord du périmètre où la profondeur de la nappe est généralement comprise entre 5 et 20 m.

Outre le recyclage des eaux par pompage et l'efficacité du drainage conjuguée à la mauvaise gestion de l'irrigation (irrigation par submersion), il ne faut pas négliger la qualité des eaux d'irrigation de surface. Le bilan ionique de l'eau de l'Oum-er-Rbia, prélevé au niveau du canal principal d'irrigation, montre que cette eau est très salée (1,37 mmhos/cm), et compte tenu de son taux d'adsorption du sodium (SAR) de 9,66, leur usage pour irrigation ne doit pas se faire sans certaines précautions. D'un autre côté, la composition chimique des eaux de l'Oum-er-Rbia est caractérisée par la prédominance du chlore et du sodium, ce qui laisse présumer que l'irrigation du périmètre par ces eaux a influencé le faciès et la qualité chimique des eaux de la nappe.

En terme de qualité d'eau d'irrigation, la limite de 5 mmhos/cm ne doit pas être dépassée. De ce fait, les eaux de la nappe phréatique sont considérées moyennement à fortement salées. Leur action directe ne se limite pas à la réduction du potentiel agricole des cultures sensibles, mais ils peuvent engendrer la dégradation de la structure du sol par salinisation des profils pédologiques. La gravité de l'état réside dans le fait que le phénomène de salinisation des sols dans les Béni-Amir présente une double origine ; interne et externe. Si la salinisation interne des sols dans le périmètre est provoqué par un contact prolongé du sol avec les eaux d'irrigation salées, de surface et souterraines, la salinisation interne a pour origine la remontée des solutions salines par capillarité à partir de la nappe phréatique minéralisée située à faible profondeur.

La pollution par les nitrates

Les nitrates employés dans les pratiques agricoles peuvent être lessivés et entraînés vers les nappes d'eau souterraine par infiltration des eaux de pluies et/ou d'irrigation.

Dans les Béni-Amir, la mise en évidence de la contamination de la nappe par les nitrates remonte à une vingtaine d'années. Cependant, la réelle prise de conscience des pouvoirs publics est plus récente. En conséquence, les eaux souterraines n'ont pas été surveillées assez régulièrement ou assez en détail pour qu'on puisse dresser un tableau exhaustif de l'historique et dégager les tendances d'évolution inter-annuelle relatives à leur contamination. L'information disponible nous donne toutefois une idée générale sur l'étendue et le degré de la contamination diffuse de la nappe par les nitrates.

L'examen de la carte d'isoconcentration des nitrates établie sur la base des mesures réalisées en 41 puits en février 1997 montre trois zones à fortes concentrations (figure 9) :

- à l'amont hydraulique, dans le secteur du CMV 501, les teneurs en nitrates sont de 30 à 50 mg/l. Cette situation est induite par l'activité agricole conjuguée aux fuites des eaux de surface au niveau du canal médian d'irrigation ;

- au centre, à proximité du drain de Fquih Ben Salah, où la concentration en nitrates est comprise entre 35 et 80 mg/l avec une valeur maximale de 95 mg/l. Dans cette zone, les eaux du drain sont sollicitées pour l'irrigation des parcelles situées à proximité. Ce drain constitue le collecteur des rejets domestiques de la ville de Fquih Ben Salah ;

- à l'aval hydraulique, les concentrations en nitrates se situent entre 35 et 70 mg/l et sont dues d'une part au recyclage des eaux de la nappe par pompage agricole et d'autre part à la concentration des solutés à l'aval hydraulique de la nappe. En outre, dans cette zone la nappe est peu profonde rendant la zone non saturée peu épaisse pour retarder le lessivage des nitrates.

Dans le reste du périmètre, les teneurs en nitrates de la nappe restent en deçà des 30 mg/l. Ces faibles valeurs sont enregistrées d'une part à l'est, en bordure de l'Oum-er-Rbia, et au nord du périmètre. Les secteurs situés en bordure de l'Oum-er-Rbia sont qualifiés de périmètres diffus, ce qui permet de mettre en évidence l'étroite relation entre la contamination par les nitrates des eaux

souterraines et le type et l'intensité de l'activité agricole. Parallèlement, au nord du périmètre, la contamination diffuse de la nappe par les nitrates est peu manifeste voire même absente au nord-ouest. Dans cette zone, la nappe est relativement profonde (5 à 20 m), donc moins accusée par la pollution agricole.

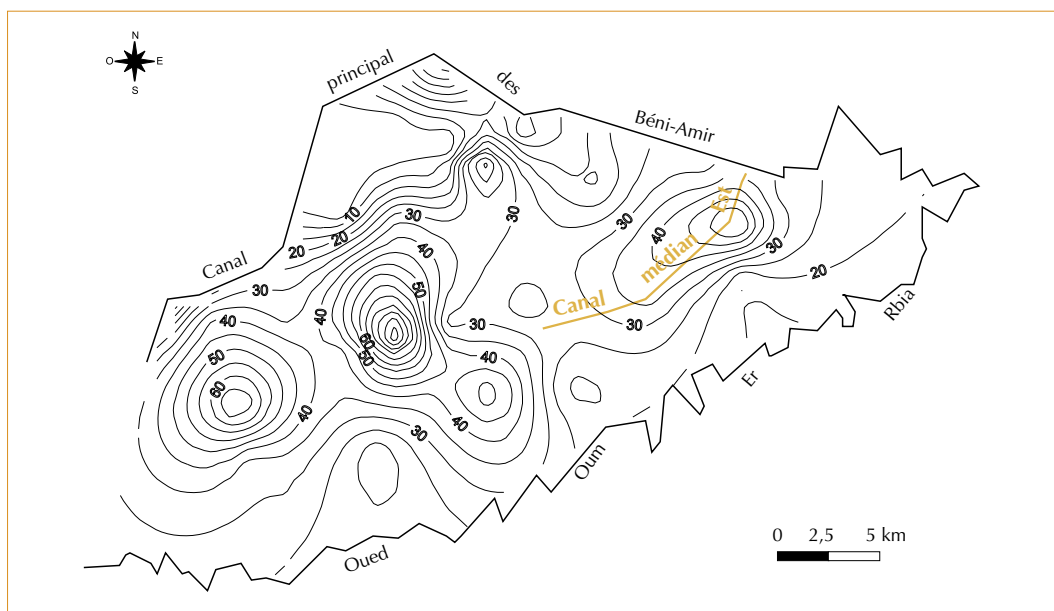
L'analyse de l'évolution inter-annuelle de la concentration en nitrates de la nappe sur la période janvier 1991-juin 1997 (figure 10, p. 34) montre que les pics de fortes teneurs correspondent généralement aux périodes d'utilisation d'engrais, notamment entre octobre et avril. Les épandages non rationnés (en quantités supérieures aux besoins des cultures) et inappropriés (en dehors des périodes du besoin optimal des cultures) d'engrais conjugués aux mauvaises pratiques de gestion de l'irrigation engendrent un lessivage rapide des nitrates dans le sous-sol. Les figures 10 et 11 (p. 34) montrent la corrélation entre les épisodes d'irrigation et l'évolution temporelle des teneurs en nitrates de la nappe mais avec un certain retard. Ce phénomène a été évoqué par Guillem (1991) après utilisation des engrais de synthèse dans les aquifères hétérogènes tels que les calcaires de la Beauce et les alluvions de la plaine du Rhin. Ce retard est dû au temps de transfert en milieux poreux non saturés des solutés, qui, pour les nitrates, peut s'effectuer à l'échelle de l'année.

Conclusions et perspectives

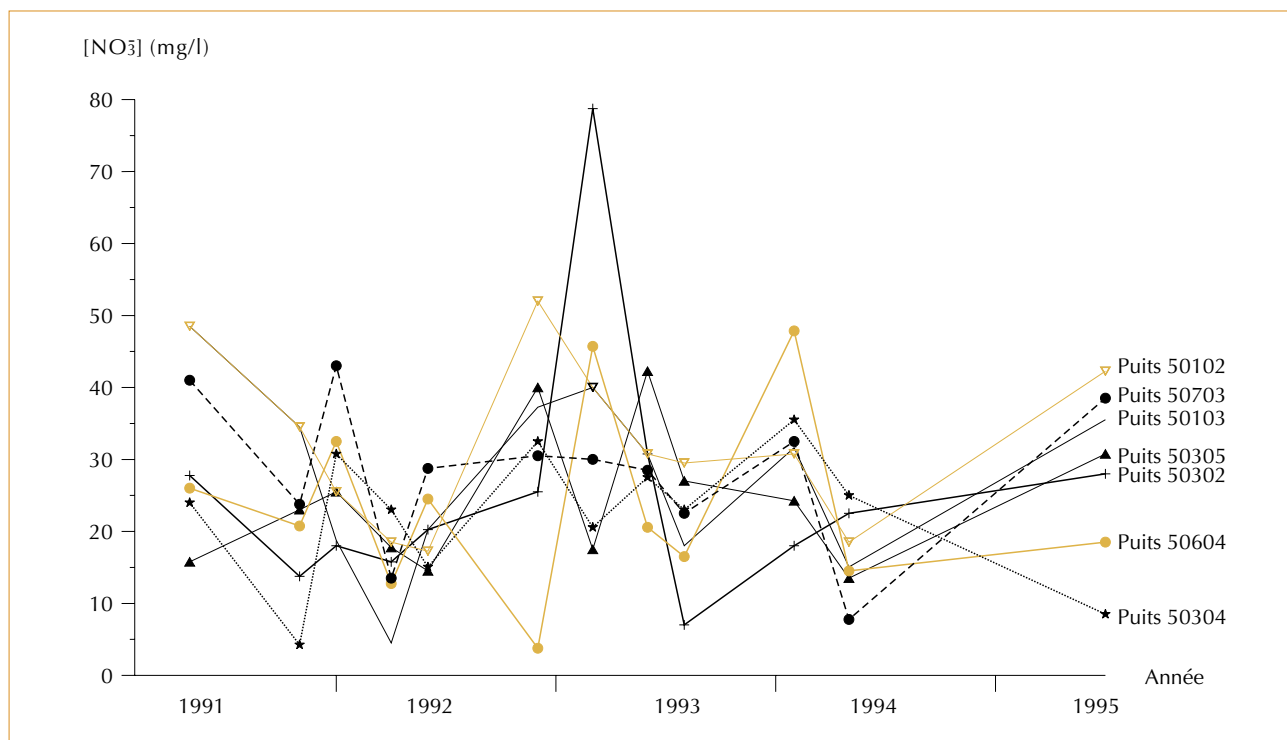
Les résultats de cette étude montrent que la remontée du niveau piézométrique de la nappe des Béni-Amir au-delà d'une certaine profondeur (< 2 m par rapport à la surface du sol) serait l'impact manifeste des doses et des méthodes d'irrigation pratiquées, conjuguées au mauvais fonctionnement du système de drainage artificiel préexistant. Toutefois, d'autres facteurs interviennent et contribuent à cet état : à savoir géomorphologiques, hydrologiques, climatologiques et géologiques. Cette remontée atteint le système racinaire des plantes et conduit à leur asphyxie et par conséquent à une chute des rendements des cultures.

L'examen des cartes bathymétriques de la nappe nous a permis d'identifier deux zones névralgiques où la nappe est presque en permanence proche du sol : l'une située dans le secteur CMV 506 et l'autre dans le secteur CMV 508.

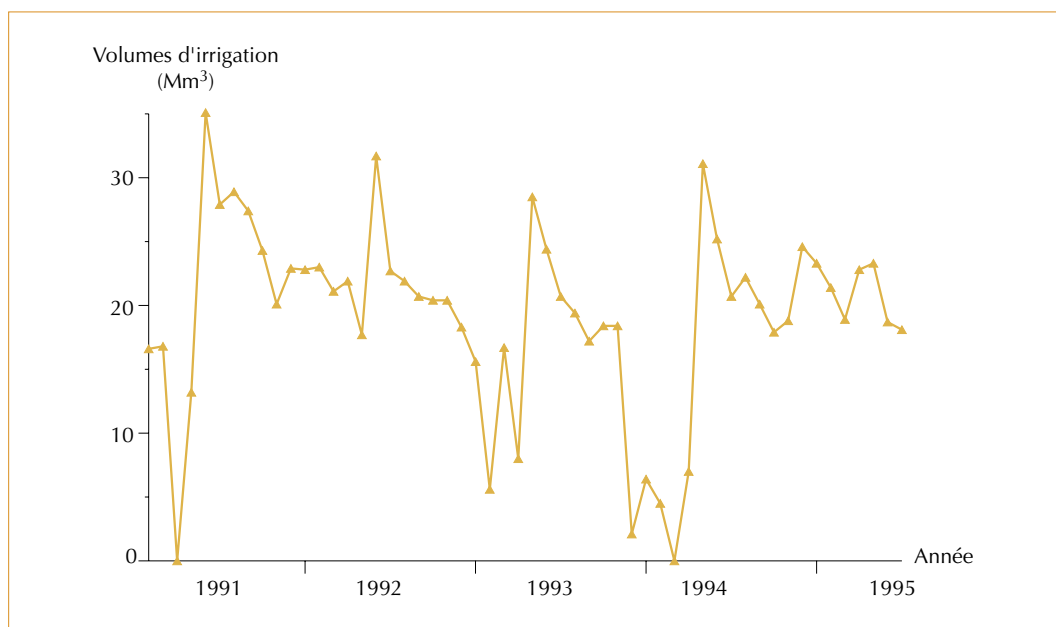
En plus de problèmes de la remontée de la nappe et de l'hydromorphie des sols, le périmètre est affecté par la salinité des eaux souterraines. L'examen de l'évolution temporelle de la salinité révèle que la minéralisation des eaux de la nappe est induite principalement par les eaux très salées de l'Oum-er-Rbia apportées pour l'irrigation. Cet état de salure est occasionné par le drai-



▲ Figure 9 – Répartition spatiale des concentrations en nitrates dans la nappe des Béni-Amir (février, 1997) en mg/l d'eau.



▲ Figure 10 – Évolution temporelle des teneurs en nitrates dans la nappe des Béni-Amir (janvier 1991-juin 1995).



► Figure 11 – Variation mensuelle de la dotation en eau de surface pour l'irrigation des Béni-Amir (janvier 1991-juin 1995).

nage limité de la nappe, le non respect des pratiques de lessivage, les pratiques culturales, le recyclage des eaux par pompage et l'évaporation. L'examen de l'évolution spatiale de la conductivité électrique montre que la salure

des eaux se manifeste d'autant plus au niveau des secteurs classiquement touchés par la remontée de la nappe. Elle affecte la fertilité des sols et contribue à la chute de la production agricole.

Pour ce qui est de la pollution par les nitrates, l'examen de la répartition spatiale des teneurs en nitrates révèle que celle-ci est très hétérogène avec des foyers quasi permanents de concentrations élevées. Ces teneurs élevées sont liées aux mauvaises pratiques agricoles et aux épandages d'engrais conjugués à une mauvaise gestion de l'irrigation.

Dans l'optique de fixer des objectifs de rendement des récoltes qui soient viables à la fois sur le plan économique et sur le plan environnemental, plusieurs mesures peuvent être prises concernant d'une part la gestion de l'irrigation et d'autre part les calendriers, les doses et les méthodes d'épandages des engrais chimiques. Elles consistent à :

- s'appuyer sur les mesures de la quantité d'eau du sol encore disponible dans la couche d'enracinement pour déterminer la quantité d'eau et à quels moments propices il faut irriguer afin d'éviter une irrigation trop forte ;
- éviter d'inonder le sol ou de l'irriguer abondamment ;
- prendre en compte toutes les principales sources d'azote, y compris l'azote naturel du sol et les quantités libérées par l'engrais vert, les résidus de cultures qui sont enfouis dans le sol et le fumier de bétail qu'on y a épandu ;

– mieux évaluer les besoins de chaque culture et n'appliquer que les quantités assimilables par la récolte, c'est-à-dire baser le dosage des engrais azotés en se référant à une analyse du sol et des tissus végétaux, plutôt que sur les caractéristiques générales des cultures et des sols ;

– faire concorder les applications avec les périodes de besoin optimal des récoltes tout en évitant les phases où le risque de lessivage est aigu ;

– élaborer des stratégies et des directives pour réglementer la manipulation des engrais et du fumier. Toutes ces mesures ne peuvent être effectives qu'avec la contribution des agriculteurs, moyennant des campagnes de sensibilisation quant aux risques liés à diverses pratiques et attitudes vis-à-vis de l'eau et plus généralement de l'environnement, voire même la mise en place d'un code des pratiques agricoles pour suivre des cours et des formations pour apprendre comment doser correctement ces produits comme l'a démontré l'expérience colombienne ;

– mettre en place des stations d'épuration pour le traitement des eaux résiduaires domestiques et industrielles avant leur rejets dans le milieu naturel.



Bibliographie

ARCHAMBAULT, C., 1971, *Rapport de présentation de documents de synthèse relatifs à la nappe phréatique du Tadla*, Rapp. inéd., MTPC/DH/DRE, 20 p., 11 pl.

BELHACENE, H., et CHAYAT, M., 1992, *Évaluation des problèmes d'engorgement des sols, de drainage et de la qualité des eaux dans le périmètre du Tadla*, Volume I et II, Mém. 3^{ème} cycle, IAV HASSAN II, Option Génie rural, Rabat, Maroc.

BOLELLI, E., 1948. Problèmes d'irrigation et du drainage dans la plaine du Tadla, Béni-Amir (Rive droite). *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, Rabat*, t. 1, n° 71, p. 147-160, une carte géologique et hydrogéologique des Béni-Amir au 1/50000.

COLMY, H. H., 1945, *J. Amer. Med. Ass.*, 129, p. 112-116.

DRPE, 1985, *Étude du Plan directeur intégré d'aménagement des eaux des bassins Sébou, Bou Regreg et Oum Er Rbia*, Sous mission IB3-IB4 : Études hydrogéologiques de la nappe des Béni-Amir (Unité 16 a), Ministère des Travaux publics et de la Formation des cadres, Administration de l'hydraulique, Direction de recherche, Rabat, Maroc.

ÉTIENNE, H., et GUESSAB, D., 1975. Ressources du Maroc, t. 2 : Plaines et bassins du Maroc atlantique. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, Rabat*, n° 231, p. 299-365.

GUILLEMIN, C., 1991, *Pollution des eaux souterraines en France*, Acad. Sci., edit. BRGM, Rapport n° 28, 183 p.

OMS, 1980, *Critères de l'hygiène de l'environnement : nitrates, nitrites et composés N-nitroso*.

Résumé

La nappe phréatique du périmètre irrigué des Béni-Amir (Tadla, Maroc) est emmagasinée dans un complexe plio-quaternaire très hétérogène. Les activités anthropiques et les variabilités hydrométéorologiques engendrent des fluctuations temporelles du niveau de la nappe. Ainsi, la mise en irrigation des Béni-Amir a suscité des problèmes liés à la remontée de la surface piézométrique. Plusieurs milliers d'hectares se sont ainsi engorgés d'eau entraînant aussi des problèmes de salinisation (des sols, des eaux, etc.). Ce travail présente une analyse de l'hydrogéologie de la zone d'étude, des paramètres hydrodynamiques de la nappe et des variations spatio-temporelles de la piézométrie pour mieux caractériser le fonctionnement hydrogéologique du système. Les résultats obtenus montrent que le problème de la remontée de la nappe est la conséquence directe des doses et des techniques d'irrigation pratiquées, conjuguées au mauvais fonctionnement du système de drainage existant. Un diagnostic de l'état de pollution de la nappe par les sels et les nitrates a mis en évidence la dégradation de la qualité des eaux souterraines induite par les pratiques de gestion de l'irrigation et de la fertilisation, au non respect des pratiques du lessivage et du drainage et au recyclage des eaux par pompage.

Abstract

The phreatic aquifer of the Beni-Amir irrigated area (Tadla, Morocco) is a plio-quaternary heterogeneous reservoir. Human activities and natural recharge variations have direct effects on temporal groundwater level fluctuations. Indeed the irrigation process of the Beni-Amir area, has led to groundwater table rise problems. Hence, several thousands of hectares of this area have been flooded from groundwater table rise ; afterwards groundwater and soil quality become deteriorated due to their salinisation. In this work, we present a hydrogeological analysis and characterisation of the study area: hydrodynamic parameters, space and temporal piezometric variation in order to characterise the hydrogeological behavior of the aquifer system. The results show that the groundwater table rise is directly due to the recharge from irrigated water and irrigation practices, in addition to a no suitable water drainage system. The piezometric maps show that two zones are permanently affected by the groundwater table rise problem. A diagnosis of groundwater pollution by salt and nitrate accumulation has shown a net deterioration of groundwater quality due to the practices of the irrigation management and fertilizers, in addition to groundwater recycling from pumping wells.