

# Essai de bilan des flux azotés percolant vers les eaux souterraines sous climat semi-aride (cas des périmètres irrigués des Doukkala, Maroc)

**A. EL ACHHEB**

Département de géologie  
Faculté des sciences  
BP 20, 24 000 El Jadida  
Maroc  
elachheb@ucd.ac.ma

**J. MANIA**

Laboratoire de Mécanique  
de Lille, EUDIL  
Département  
de géotechnique  
et génie civil  
59655 Villeneuve-d'Ascq

**J. MUDRY, P. CHAUVE**

Laboratoire de géoscience  
Université  
de Franche-Comté  
Besançon

**A. OUAAGA**

Office régional  
de mise en valeur agricole  
de Doukkala  
24 000 El Jadida, Maroc

## Résumé

La présente étude permet de donner, pour la première fois, un aperçu général sur les concentrations en nitrate des eaux souterraines des Doukkala. Malgré un risque élevé d'apports de nitrates dans cette région soumise à une exploitation agricole intense, la pollution azotée des eaux souterraines des Doukkala reste encore modérée. Les concentrations varient entre 1 mg/l et 200 mg/l avec une moyenne située autour de 30 mg/l. Seuls 8 % des points d'eau dépassent les normes de potabilité (50 mg/l). Le bilan d'azote laisse apparaître un excès de 2 350 tonnes par an d'azote potentiellement lessivable sur tous les périmètres irrigués, ce qui correspond à une moyenne de 39 kg-N/ha. On constate que les cultures maraîchères génèrent la plus grande quantité d'azote potentiellement lixiviable (91 kg/ha), alors que les céréales et les betteraves qui couvrent la majorité de l'espace cultivé présentent des valeurs d'excédents relativement modérées (45 et 58 kg/ha). Malgré ces flux entrant dans les périmètres irrigués les teneurs en  $\text{NO}_3^-$  des eaux de la nappe restent relativement stables. Cette stabilité ne peut être expliquée que par l'existence d'une dénitrification naturelle, dans la nappe ou dans la zone non saturée.

**Mots-clés :** nappe plio-quadernaire, irrigation, nitrates, bilan d'azote, dénitrification, Maroc.

## Nitrogen budget under semi-arid climate (case of irrigated perimeters of Doukkala, Morocco)

## Abstract

That groundwaters of Doukkala are little allocated by the nitrogenous pollution due to the agriculture. Concentrations vary between 1 mg/l and 200 mg/l with an average of 30 mg/l. The passing of the norm 50 mg/l is 8 % in 1995.

The nitrogen budget leaves to appear an excess of 2 350 tons per year of nitrogen potentially leached on all irrigated perimeters, what corresponds to an average of 39 kg-N/ha. It is noted and important surpluses by market-gardener cultures (91 kg/ha) cereals and beets that cover the majority of the cultivated space present values of relatively moderated surpluses (45 and 58 kg/ha). The utilization of data concerning the application and extraction of nitrogen as well as the each culture area allow to estimate the quantity of nitrogen potentially leached on all irrigated perimeters. Despite this flow entering perimeters irrigated contents in  $\text{NO}_3^-$  of waters of the water table remain relatively stable. This stability can be explained only by the existence of a natural denitrification, in the water table or in the unsaturated zone.

**Key words :** plio-quadernary water table, irrigation, nitrates, nitrogen budget, denitrification, Maroc.

## Introduction

La plaine des Doukkala connaît depuis les années 60 un développement agricole important surtout au niveau de ses périmètres irrigués. La superficie équipée est actuellement de 61 000 ha (bas service) (Fig. 1) et 64 000 ha (haut service), en cours d'aménagement. L'irrigation est effectuée au moyen d'un très important réseau de canaux alimenté par les eaux de l'Oued Oum Er-Rbia.

La région est soumise à une exploitation agricole intense. Dans une telle situation l'agriculture fait figure d'accusée vis-à-vis de la dégradation de la qualité des eaux souterraines qui est généralement marquée par

une augmentation des concentrations en nitrate. Afin d'évaluer et chiffrer l'impact de la fertilisation sur la pollution, un bilan de masse d'azote s'avère nécessaire.

Dans le cadre de cette étude, environ 110 échantillons d'eau ont été analysés pour les nitrates, en deux années successives en vue d'établir pour la première fois des cartes de concentrations en nitrate.

## Contexte physique et géologique

Le bassin des Doukkala fait partie du Maroc occidental. Il est limité au nord-est par l'oued Oum Er-Rbia, à l'est par le massif des Rehamna, au sud par le plateau des Gantour et à l'ouest par le Sahel (Fig. 1).

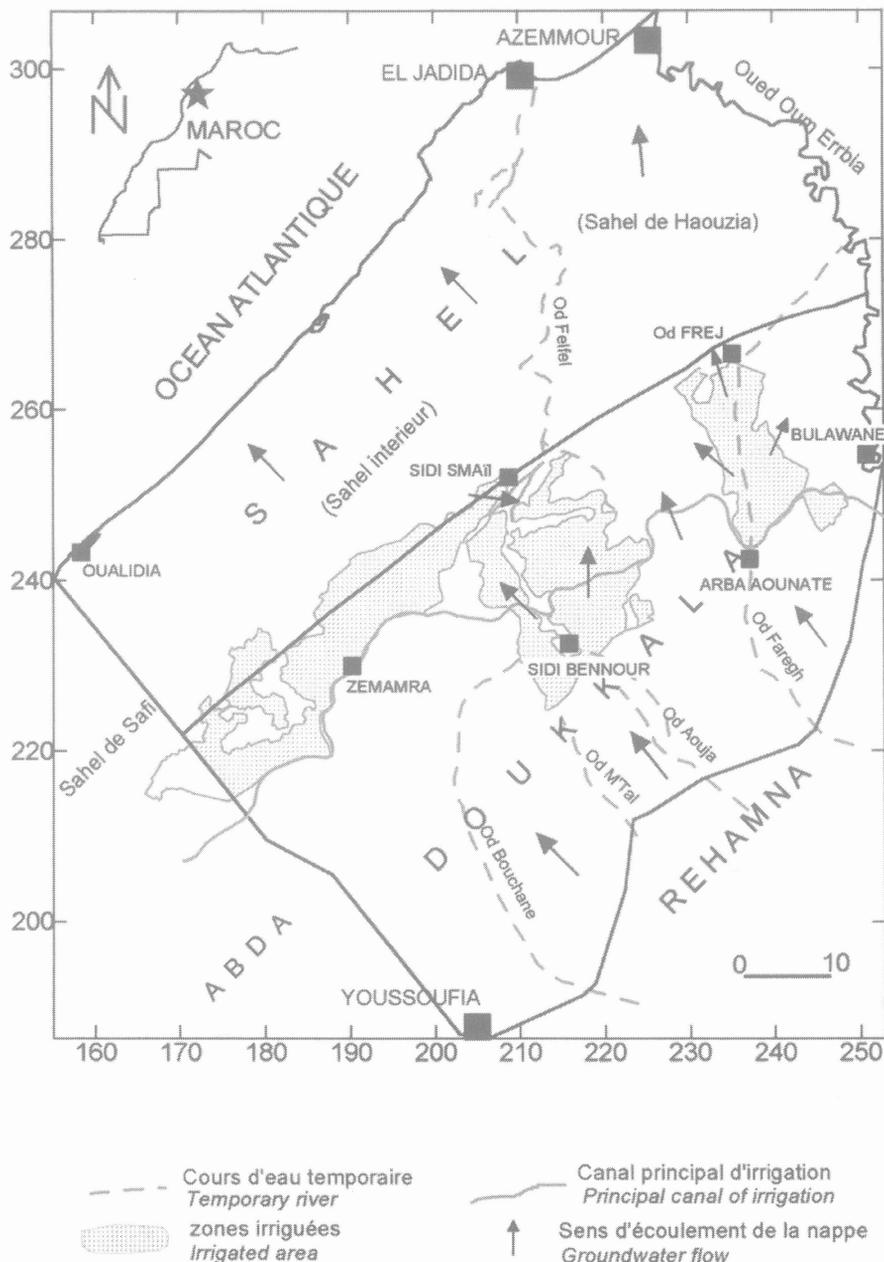


FIG. 1 Situation géographique et schéma hydraulique de la région étudiée.  
Geographic location and hydraulic sketch-map of the investigated area.

C'est une vaste étendue limoneuse d'âge quaternaire. Sa surface, inclinée vers le NW, s'inscrit entre les altitudes 300 m en bordure des Rehamna et 150 m au contact des dunes consolidées du Sahel. Sa limite avec le Sahel ne correspond pas à un trait morphologique marquant mais à la limite d'accumulation des limons quaternaires.

Sur le plan géologique, le bassin des Doukkala fait partie de la Méséta marocaine. Il est constitué de formations sédimentaires à structure subtabulaire d'âges tertiaire, secondaire et quaternaire reposant sur un socle primaire plissé.

Le bassin des Doukkala est caractérisé par un climat littoral avec des influences continentales et maritimes dans l'arrière-pays. La pluviométrie décroît légèrement de la côte vers l'intérieur avec, une moyenne annuelle de 300 mm. Les pluies sont concentrées en automne et en hiver avec un maximum en décembre ; les mois de juin à septembre sont secs. Les températures sont modérées avec des moyennes mensuelles entre 12 et 25 °C et une moyenne annuelle de l'ordre de 18 °C pour le bassin Sahel-Doukkala.

La plaine des Doukkala est mal drainée naturellement. Les principaux exutoires superficiels sont : (a) l'oued Faregh qui draine la partie est des Doukkala et rejoint l'Oum Er-Rbia ; (b) l'oued Fel Fel qui collecte les eaux de ruissellement du versant ouest des Rehamna et de la partie centrale de la plaine des Doukkala.

Sur le plan hydrogéologique, le système aquifère, renferme trois types de nappes :

- les nappes profondes captives circulant dans les différents niveaux crétacés ;
- la nappe supérieure du Plio-Quaternaire qui est la première nappe importante rencontrée à partir de la surface du sol et exploitée par la plupart des puits de la région. Elle est limitée à sa base par les marnes du Cénomaniens ou les argiles du Crétacé inférieur. Lorsque ces derniers sont absents, la nappe passe alors dans les niveaux inférieurs ;

- les nappes perchées dans les limons quaternaires qui forment la couverture générale de la nappe précédente.

La nappe d'eau principale (ou supérieure) circule dans sa majeure partie dans des calcaires détritiques coquilliers plio-quaternaires. Les valeurs de transmissivités déterminées par des essais de débit sont comprises entre  $1,3 \cdot 10^{-3}$  et  $2,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  avec une perméabilité d'environ  $2 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . L'alimentation de cette nappe est régie principalement par les précipitations, l'infiltration des eaux d'irrigation et par alimentation latérale à partir des affleurements des terrains crétacés en bordures S et SE.

L'examen de la piézométrie montre que l'écoulement général de la nappe est dirigé du SE vers le NW, avec un gradient hydraulique fort en amont et en aval et faible au centre, ce qui subdivise la nappe en trois zones : zone amont, zone centrale et zone aval.

### 3

## Qualité et évolution des eaux souterraines

Pour montrer l'évolution spatio-temporelle des nitrates, on a utilisé deux campagnes de prélèvement effectuées sur une centaine de points, en 1995 et 1996, ainsi qu'une campagne réalisée en 1957 sur une vingtaine d'échantillons.

Des deux dernières campagnes de prélèvement il ressort que les concentrations (Fig. 2) varient entre 1 mg/l et 200 mg/l avec une moyenne de 30 mg/l en 1995 et 37 mg/l en 1996. Sur 105 points d'eau souterraine 7,5 % dépassent la norme 50 mg/l soit 8 points en 1995, et 11,5 % soit 12 points en 1996. Ces points sont dispersés sur l'ensemble de la plaine et sont situés généralement dans des secteurs à faibles ressources en eaux

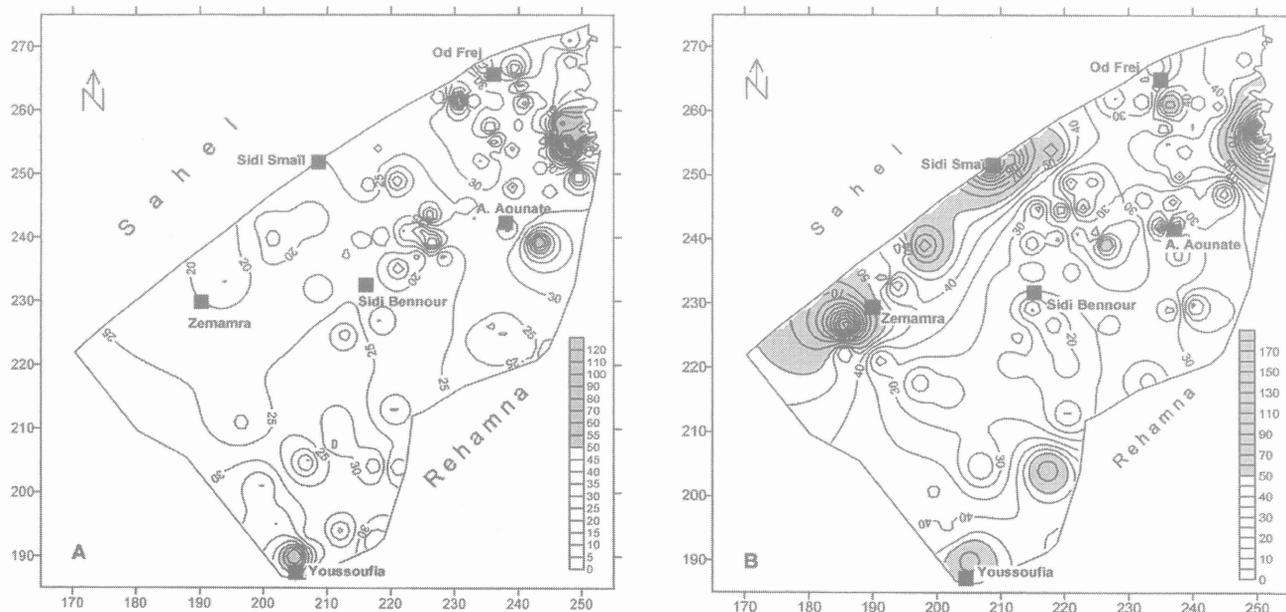


FIG. 2 Distribution de nitrates dans la nappe (mg/l). A : 1995 ; B : 1996. Nitrates occurrence in groundwater (mg/l).

comme dans la région de Boulawane (limite est) ou dans des endroits où la nappe peu profonde est touchée par la pollution anthropique. Sur les autres points d'eau les concentrations en nitrates sont comprises entre 1 mg/l et 50 mg/l avec une fourchette de variation située entre 10 et 25 mg/l.

Entre les campagnes de mesures (1995-1996), on constate de faibles variations sauf en bordure du Sahel et de l'Oued Oum Er-Bia, ceci peut être lié à une faible pluviométrie durant la campagne agricole 1994-1995 (109 mm) et par conséquent à une faible lixiviation des nitrates durant cette période. Cette hypothèse est confirmée par des études expérimentales menées par l'Institut agronomique et vétérinaire Hassan-II dans la station d'expérimentation des Doukkala durant la campagne agricole 1995-1996. Ces études ont montré que la teneur initiale (avant semis) en azote minéral était élevée (de l'ordre de 113 kg-N/ha, Abrihmati, 1996) sur les premiers centimètres de sol. Durant la campagne 1995-1996 caractérisée par une pluviométrie exceptionnelle, on note à partir du 72<sup>e</sup> jour après semis une forte chute d'azote minéral du sol. Le cumul des eaux drainées (mesurées par des lysimètres) a atteint au 60<sup>e</sup> jour après semis 158 et 158,4 mm respectivement pour deux traitements 120 et 180 kg-N/ha, totalisant ainsi une perte de l'azote par lixiviation de 47 et 73 kg-N/ha respectivement. Au cours de la période allant du 72<sup>e</sup> au 111<sup>e</sup> jour après semis, les concentrations en azote minéral diminuaient de manière continue. Cette diminution ne peut être attribuée à la lixiviation puisque les quantités d'eau drainée pendant cette période (47 mm) ont engendré de faibles pertes en azotes (30 et 39 kg-N/ha) pour les deux traitements 120 et 180 kg-N/ha. Cependant d'autres phénomènes peuvent participer à cette diminution notamment les prélèvements par les plantes. Il s'agit en fait d'une phase à grand besoin en éléments fertilisants et pendant laquelle s'obtient le maximum d'absorption en azote (début de montaison).

En comparant les concentrations en nitrate des points analysés avant irrigation (1957) et ceux des campagnes récentes (Fig. 3) on constate que la majorité des points ne présente pas de variation importante et les points pollués se trouvent en dehors des périmètres irrigués. Dans les zones irriguées, les concentrations en nitrate ont chuté, sauf pour le point 404/27 qui montre

une augmentation. Ce dernier est localisé dans une région sableuse où le niveau piézométrique se trouve à faible profondeur (3 m), c'est dans cette zone irriguée depuis 1958 qu'on commence à sentir les premiers symptômes de pollution due à l'irrigation.

4

## Bilan d'azote dans les zones irriguées

L'azote est un élément chimique très répandu dans la nature. Dans le sol, la fraction prédominante de l'azote se trouve sous une forme organique représentant environ 95 % de l'azote total. Le complément est composé par des formes inorganiques, c'est-à-dire l'azote ammoniacal, nitreux et nitrique. Actuellement le cycle de l'azote est sévèrement perturbé par l'activité humaine : agriculture intensive, développement industriel, déchets ménagers liés au développement démographique. Ces perturbations génèrent un excès d'azote qui risque d'être entraîné en profondeur vers les eaux souterraines.

4.1

### Les apports d'azote

Les apports azotés dans le système sol-eau-plante proviennent des eaux météoriques, de la fixation biologique, de la fertilisation azotée, des eaux d'irrigations et de la minéralisation de la matière organique.

Les sources potentielles de la présence de composés azotés dans les eaux météoriques sont les suivants (Mariotti, 1982 ; Stevenson, 1986, *in* Cabon, 1993) : le sol, l'océan, la fixation d'azote atmosphérique et les contaminations provenant des zones urbaines et industrielles. L'estimation des apports atmosphériques (N<sub>Met</sub>) d'azote par différents auteurs donne les valeurs suivantes : 5 à 15 kg-N/ha/an en France (Hémin, 1980), 0,78 à 22 kg-N/ha/an aux États-Unis et en Europe (Stevenson, 1986, *in* Cabon, 1993) ; d'après Addiscott, (1989, *in* Malcolm, 1990) et Benabellah (1997), l'air et les précipitations peuvent constituer une source non négligeable de nitrates estimée à 38 kg-N/ha/an.

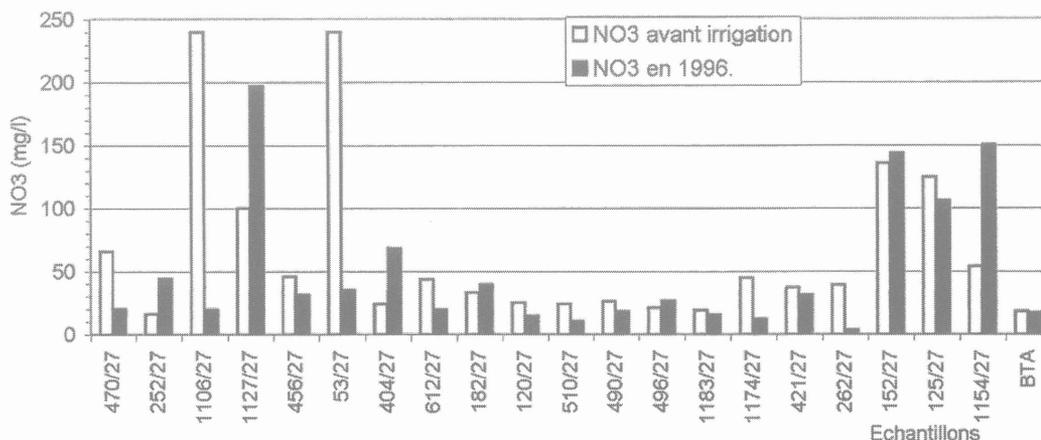


FIG. 3 Comparaison des teneurs en NO<sub>3</sub> entre les périodes avant et après irrigation. Comparison of the contents in NO<sub>3</sub> between the periods before and after irrigation.

Dans notre région d'étude on a estimé cet apport à 0,7 kg-N/ha/an, calculé sur la base d'une pluviométrie moyenne de 300 mm/an et une concentration en  $\text{NO}_3^-$  de 1 mg/l. Cette valeur est à notre avis logique vu la faible pluviométrie et la faiblesse des activités industrielles de la région.

La fixation biologique (NAt) consiste en la transformation de l'azote atmosphérique ( $\text{N}_2$ ) en azote combiné sous l'action de certains micro-organismes. Elle peut être asymbiotique lorsqu'elle est liée à l'activité des bactéries du sol, ou symbiotique dans le cas des légumineuses. La fixation asymbiotique d'azote reste faible. Elle est en général de l'ordre de 20 à 40 kg-N/ha/an en régime tempéré (Hébert, 1979, *in* Cabon 1993). Par contre, la fixation symbiotique peut être considérable jusqu'à 600 kg-N/ha/an pour la luzerne (Stevenson, 1986, *in* Cabon, 1993). Dans les conditions des Doukkala, on a estimé la fixation biologique à environ 300 kg-N/ha/an pour les légumineuses.

La fertilisation azotée artificielle constitue le plus gros des apports azotés, pour pallier le déficit d'azote et satisfaire les besoins de la plante de façon à obtenir des rendements optimaux en termes de quantité et de qualité. Ces apports s'effectuent sous deux formes : les engrais chimiques (NEg) et le fumier (NFu).

Basé sur de nombreux travaux de l'Institut agronomique et vétérinaire Hassan-II, des enquêtes de l'Office régional de mise en valeur agricole des Doukkala (ORMVAD), des valeurs des besoins pour les principales cultures pratiquées dans la région sont déterminées et représentées dans le tableau I.

**TABLEAU I Apports azotés artificiels chimiques et fumier organique par type de culture et superficies concernées.**

Chemical artificial nitrogenous contributions and organic fertilizer by type of culture and concerned surfaces.

Cultures	Quantité moyenne d'azote apportée kg-N/ha/an	Superficie (ha)
Betterave à sucre	310	18 000
Céréales	120	26 000
Trèfle	50	9 000
Luzerne	50	3 000
Mais	134	7 000
Tabac	100	800
Coton	110	200
Tournesol	120	2 000
Maraîchage	143 + 172,5*	16 000

\* Fumier organique.

L'azote minéral provenant de la minéralisation du fumier est estimé en utilisant la formule suivante (Souidi, 1992; Rahali, 1996) :

$$\text{NFu} = \text{quantité de fumier répandue par hectare} \times \text{teneur de l'azote organique en \% (2,5 \%)} \times \text{taux de minéralisation annuelle (50 \%)}.$$

La majorité des agriculteurs n'utilise pas ou rarement le fumier organique sur les cultures principales, sauf les maraîchers à raison de 15 t.ha<sup>-1</sup>.

Dans certaines régions agricoles les eaux d'irrigation peuvent aussi contenir d'importantes quantités d'azote nitrique (Nir) et constituent ainsi une entrée supplémentaire non négligeable dans le système sol-eau-plante. Le volume moyen d'irrigation au niveau de la parcelle dans les Doukkala est de 5 000 m<sup>3</sup>/ha/an, avec une concentration moyenne en  $\text{NO}_3^-$  de 4 mg/l. Ce qui donne une entrée de 4,5 kg-N/ha/an par les eaux d'irrigation.

L'azote minéral initial dans le sol (NRs), appelé aussi azote résiduel du sol, est la fraction de l'azote apporté retrouvée dans le sol après la récolte des cultures. En Europe, 90 % des cultures reçoivent en moyenne plus de 100 kgN à l'hectare dont 50 % sont prélevés par la culture, 25 % sont immobilisés temporairement dans le sol (azote résiduel), les 25 % restants étant volatilisés, dénitrifiés ou lessivés (Guiraud, 1984 ; Bouwer, 1987, *in* Benabdellah, 1997). Les valeurs d'azote résiduel trouvées dans les Doukkala lors des études menées par l'IAV Hassan-II en 1996 et 1997 sur le blé, sont évaluées entre 34 et 38 kg-N/ha en moyenne pour les doses de 120 et 180 kg-N/ha. Au début du cycle 1995-1996 Abrihmati (1996) a trouvé une quantité d'azote résiduel élevée de l'ordre de 113 kg-N/ha. Ceci est sans doute lié à une faible absorption de cet élément par la betterave à sucre durant la campagne agricole 1994-1995 caractérisée par une faible pluviométrie (109 mm). On ne dispose pas de valeurs pour les autres cultures, mais un pourcentage de 25 % de l'azote apporté par les engrais peut être adopté dans le cas des Doukkala.

L'azote minéralisable à partir de l'azote organique du sol (NMO) constitue l'élément majeur de l'azote total (environ 98 %). Il se minéralise par ammonification puis par nitrification. L'ammonification correspond à la transformation de l'azote organique en azote ammoniacal sous l'action de nombreux micro-organismes. Quant à la nitrification c'est l'oxydation biologique de l'azote ammoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) en azote nitrique ( $\text{NO}_3^-$ ) en présence de bactéries aérobies, elle se déroule en deux étapes :

1) la *nitritation*. C'est l'oxydation de l'azote ammoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) en azote nitreux ( $\text{NO}_2^-$ ) sous l'action des bactéries nitreuses du genre *Nitrosomonas* :



2) la *nitratation* correspond à l'oxydation de l'azote nitreux ( $\text{NO}_2^-$ ) en azote nitrique ( $\text{NO}_3^-$ ). Cette étape est réalisée par les bactéries nitriques de genre *Nitrobacter* :



La minéralisation a lieu essentiellement dans la couche arable du sol, où se trouve la quasi-totalité de l'humus et des résidus des précédentes cultures. La quantité d'azote minéralisable à partir de l'azote organique du sol dans les Doukkala a été estimée à 90 kg-N/ha (Souidi *et al.*, 1989 ; Rahali, 1996).

## 4.2

### Les sorties d'azote

Les sorties correspondent aux pertes par voie gazeuse, à l'absorption par la plante et au lessivage par les eaux d'irrigation.

La dénitrification (NDn) constitue le mécanisme principal de restitution de l'azote du sol à l'atmosphère et conduit à la transformation des nitrates en nitrites puis successivement en oxyde nitrique, oxyde nitreux et azote. Ce phénomène est favorisé par l'irrigation lorsqu'elle maintient des conditions anoxiques (sol engorgé), un pH compris entre 7 et 8 et une température supérieure à 10 °C (Catroux et Germon, 1981 ; Benabdellah, 1997). Peu d'estimations de la dénitrification au champ sont disponibles à cause des difficultés méthodologiques liées à la mesure de ce processus, mais une valeur de 10 à 25 % par an d'azote minéral donne une idée des pertes par dénitrification, (Catroux et Germon, 1981 ; Cabon, 1993). Cependant des essais réalisés au champ avec des engrais marqués à l'azote 15 ont suggéré des pertes par dénitrification fréquemment de l'ordre de 20 % (Cabon, 1993). En utilisant la même méthode dans les Doukkala et sous une culture de blé, Benabdellah (1997) a estimé les pertes en azote à 16,5 et 22 % de l'engrais apporté aux doses respectives de 120 et 180 kg-N/ha/an.

La volatilisation (NVI) est la transformation de l'azote ammoniacal du sol en ammoniac gazeux. Cette volatilisation se produit surtout lors de l'épandage d'urée, de nitrate d'ammonium, d'ammoniac anhydre ou d'effluents d'élevages en surface. La volatilisation dépend de l'humidité du sol, du pH et du type d'engrais employé. Des volatilisations croissantes sont constatées quand on passe de l'ammonitrate au sulfate d'ammonium (Cabon, 1993 ; Abrihmati, 1996 ; Benabdellah, 1997). Ces mêmes auteurs ont estimé les pertes en azote au champ par volatilisation entre 0 et 12 % de l'azote appliqué. Boaretto *et al.* (1996), de leur côté, ont évalué les pertes par volatilisation entre 12 et 36 % de l'azote apporté sous forme d'urée.

L'exportation par les cultures (NExp) : les plantes ont besoin pour leur croissance de se nourrir d'azote minéral sous forme nitrique prélevé dans le sol à l'aide de leurs racines. La quantité d'azote consommée par les plantes varie d'une espèce à une autre et selon le stade végétatif. L'utilisation de l'azote de l'engrais par

les plantes dans les Doukkala reste incomplète, environ 55 % en moyenne, ce qui conduit à un résidu d'engrais important. Par ailleurs, la participation du sol peut atteindre 50 % de l'azote exporté par les plantes ayant reçu une dose de 120 kg-N/ha (Benabdellah, 1997).

### 4.3

## Calcul du bilan de masse d'azote des zones irriguées

Le bilan de masse de l'azote peut s'écrire approximativement de la façon suivante :

$$(N_{met} + N_{at} + N_{eg} + N_{fu} + N_{ir} + N_{MO}) = (N_{Dn} + N_{VI} + N_{Exp} + N_{Les}) \quad (1)$$

La seule inconnue dans l'équation du bilan est la quantité d'azote lessivée (NLes) vers la nappe qui peut être tirée de l'équation (1) :

$$N_{Les} = (N_{met} + N_{at} + N_{eg} + N_{fu} + N_{ir} + N_{MO}) - (N_{Dn} + N_{VI} + N_{Exp})$$

Les résultats de ce bilan, basé sur des études qui ont été menées dans la région des Doukkala et des enquêtes de l'Office régional de mise en valeur agricole des Doukkala sont indiqués dans le tableau II.

Le bilan chimique exprimé par une surface d'un hectare indique des consommations fortes par les légumineuses (- 173 kg/ha) et des excédents importants par les cultures maraîchères (91 kg/ha). Les céréales et les betteraves qui couvrent la majorité de l'espace cultivé présentent des valeurs d'excédents relativement modérées (45 et 58 kg/ha).

L'utilisation de ces données concernant l'apport et l'export d'azote ainsi que la superficie de chaque culture permettent d'estimer la quantité d'azote potentiellement lixiviable sur tous les périmètres irrigués (Tableau III).

TABLEAU II

**Le bilan azoté des sols agricoles de la région des Doukkala (en kg/ha/an).**

The nitrogenous balance of the agricultural grounds of the region of Doukkala (kg/ha/an units).

Cultures	Apports					Sorties			Bilan (NLes)
	NMet	NAt	NEg	NMO	NIr	NDn	NVI	NExp	
Betterave	0,7	-	310	90	4,5	62	15,5	270	57,7
Céréales	0,7	-	120	90	4,5	24	6	140	45,2
Trèfle	0,7	300	50	90	4,5	10	2,5	606	- 173,3
Luzerne	0,7	300	50	90	4,5	10	2,5	606	- 173,3
Maïs	0,7	-	134	90	4,5	26,8	6,7	120,6	75,1
Tabac	0,7	-	100	90	4,5	20	5	90	80,2
Coton	0,7	-	110	90	4,5	22	5,5	99	78,7
Tournesol	0,7	-	120	90	4,5	24	6	108	77,2
Maraîchage	0,7	-	315,5	90	4,5	28,6	7,15	283,95	91

Cultures	Excès d'azote en kg-N/ha	Superficie (ha)	Excès de N en t sur tous les périmètres irrigués
Betterave à sucre	57,7	18 000	1 038,6
Céréales	45,2	26 000	1 175,2
Trèfle	- 173,3	9 000	- 1 559,7
Luzerne	- 173,3	3 000	- 519,9
Maïs	75,1	7 000	525,7
Tabac	80,2	800	64,2
Coton	78,7	200	15,74
Tournesol	77,2	2 000	154,4
Maraîchage	91	16 000	1 456

Le résultat de ce bilan laisse apparaître un excès de 2 350 tonnes par an d'azote potentiellement lessivable sur tous les périmètres irrigués, ce qui correspond à une moyenne de 39 kg-N/ha. La lame d'eau d'irrigation moyenne annuelle infiltrée vers la nappe d'eau souterraine a été évaluée à 144 mm/an (El Achheb, 1993) et donc la concentration moyenne estimée en  $\text{NO}_3^-$  de ces eaux est de 120 mg/l pour 61 000 ha.

Durant les cycles agricoles 1995-1996 et 1996-1997 la lame d'eau infiltrée mesurée dans des lysimètres est estimée à 230 mm/an (Abrihmati, Benabdellah, 1997). Cette infiltration est expliquée d'une part par les apports qui étaient supérieurs aux besoins et d'autre part, par les fortes intensités de pluie. La concentration moyenne en azote de ces eaux drainées a varié de 20 à 40 mg/l pour un traitement de 120 kg-N/ha d'azote, sous une culture de blé. Ce résultat est proche de celui de notre bilan chimique.

Ce flux entrant est différent de celui constaté par Rahali en 1996, qui est de 173 kg-N/ha. Cette perte d'azote est expliquée par le fait que la campagne 96/97 a été caractérisée par une importante pluviométrie (551 mm), ayant engendré d'importantes inondations et des dégâts avec notamment un jaunissement du feuillage, ce qui a poussé les agriculteurs à apporter un supplément excessif d'engrais puisque les engrais sont entraînés en profondeur par les eaux d'infiltration.

La stabilité des valeurs en  $\text{NO}_3^-$  des eaux de la nappe malgré un flux entrant de 120 mg/l dans les périmètres irrigués, laisse supposer l'existence d'une dénitrification naturelle des eaux souterraines soit dans la nappe soit dans la zone non saturée selon le processus d'acceptation des électrons suivant :



Les produits finals donnant :  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  et  $\text{N}_2$ .

En effet, le réservoir aquifère qui est de nature calcaire détritique est surmonté par une couche limoneuse dont l'épaisseur varie entre 10 et 80 m, ce qui donne à la nappe un caractère semi-captif surtout dans la partie sud. La mise en captivité de la nappe dans cette zone rend les échanges gazeux avec l'oxygène de l'atmosphère beaucoup plus lents qu'en régime libre d'après Landreau *et al.* (1988). Dans ces conditions, la nappe

acquiert un caractère réducteur avec par conséquent une diminution des teneurs en nitrate. La zone non saturée est constituée de limons argileux et rarement de limons sableux. La profondeur du niveau de la nappe est de 3 à 25 m dans les zones irriguées et de 25 à 70 m dans le reste de notre domaine d'étude. La nature lithologique et l'épaisseur de cette zone non saturée peuvent être à l'origine de la diminution des teneurs en nitrate des eaux percolées (Akhmétiéva, 1992). Cette diminution est alors probablement liée à une baisse du taux d'oxygène dans les limons en profondeur et une partie des nitrates est transformée par dénitrification en  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  et  $\text{N}_2$ .

Les deux hypothèses émises pour expliquer la stabilité des concentrations en nitrates restent encore à vérifier par des mesures sur le terrain à différentes profondeurs.

## 5

## Conclusion

Cette étude a permis de donner, pour la première fois, un aperçu général sur les teneurs en nitrate des eaux souterraines des Doukkala. Il ressort de cette étude que les eaux souterraines des Doukkala sont peu atteintes par la pollution azotée due à l'agriculture. Les concentrations varient entre 1 mg/l et 200 mg/l, avec une moyenne située autour de 30 mg/l et 8 % des points d'eau dépassent la norme 50 mg/l. En comparant les teneurs en nitrate entre la période avant irrigation (1957) et la période actuelle, on a constaté que la majorité des points ne présente pas de variation importante et que les premiers symptômes de pollution due à l'irrigation sont localisés dans la zone de Faregh (premier périmètre irrigué).

La stabilité des teneurs en  $\text{NO}_3^-$  des eaux de la nappe malgré les flux entrants dans les périmètres irrigués, ne peut être expliquée que par l'existence d'une dénitrification naturelle des eaux souterraines soit dans la nappe soit dans la zone non saturée.

La présence d'une épaisse couverture limoneuse, les cultures fourragères et de betterave sucrière (qui mobi-

lisent une quantité importante d'azote) ainsi que les conditions climatiques contribuent à maintenir des teneurs en nitrates relativement basses malgré une agriculture intense.

Le bilan chimique de l'azote montre que les légumineuses jouent un rôle important pour écarter le risque

de lixiviation des nitrates par l'effet d'absorption de l'azote (-173 kg/ha). Les cultures maraîchères génèrent un excès d'azote important (91 kg/ha) alors que les céréales et les betteraves qui couvrent la majorité de l'espace cultivée présentent des valeurs d'excédents azotés relativement modérées (45 et 58 kg-N/ha).

#### REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du soutien financier des projets suivants : Coopération franco-marocaine (AI 58/STU/97), Bourse d'excellence de l'AUFPEL-UREF et Programme d'appui à la recherche scientifique (PARS SDU/53).

## Bibliographie

- Abrihmati S. – *Optimisation de l'efficacité d'utilisation de l'eau et de l'azote par le blé en irrigué dans la région des Doukkala*. Mémoire de troisième cycle, IAV Hassan-II, Rabat, Maroc, 1996, 149 p.
- Akhmétiqueva N. – « Pollution des eaux phréatiques par les engrais ». *Hydrogéologie*, n° 3, 1992, p. 145-151.
- Benabellah S. – *Étude de l'efficacité d'utilisation de l'eau et de l'azote par le blé en irrigué*. Mémoire de troisième cycle, IAV Hassan-II, Rabat, Maroc, 1997, 124 p.
- Bouwer H. – « Effect of irrigated agriculture on groundwater ». *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 113, n° 1, 1987.
- Cabon F. – *Modélisation du cycle de l'azote dans le système sol-eau-plante du lysimètre au bassin hydrologique*. Thèse, université Paris VI, 1993, 193 p.
- Catroux G., Germon J.C. – « Les pertes d'azote par voie gazeuse. Fertilisation azotée et qualité des eaux ». *Comptes rendus des séances de l'Académie d'agriculture de France*, tome 67, n° 10, 1981.
- El Achheb A. (1993) – *Étude hydrogéologique et hydrochimique de la plaine des Doukkala*. Thèse de troisième cycle, Faculté des sciences Semlalia, Marrakech.
- Guiraud G. – *Contribution du marquage isotopique à l'évolution des transferts d'azote entre les compartiments organiques et minéraux dans les systèmes sol-plante*. Thèse doctorat d'État, Paris VI, 1984, 335 p.
- Hénin S. – « Le cycle de l'azote, les problèmes de fertilisation et de pollution. Fertilisation azotée et qualité des eaux ». *Comptes rendus des séances de l'Académie d'agriculture de France*, tome 67, n° 10, 1981.
- Landreau A., Mariotti A., Simon B. – « La dénitrification naturelle dans les eaux souterraines ». *Hydrogéologie*, n° 1, 1988, p. 35-43.
- Malcolm J. – « Nitrates in water ». In Calvet R., ed. *Nitrates-Agriculture-Eau*, Symposium international INAP-G, Paris, 1990.
- Mariotti A. – *Apports de la chimie isotopique à la connaissance du cycle de l'azote*. Thèse doctorat d'État, Paris VI, 1982, 476 p.
- Rahali M. – *Analyse de la pratique de la fertilisation minérale des principales cultures dans le périmètre des Doukkala : impact sur la production et conséquences sur l'environnement*. Mémoire de troisième cycle, IAV Hassan-II, Rabat, Maroc, 1996, 119 p.
- Soudi B. – « Évaluation de la valeur fertilisante azotée des fumiers de fermes et des composts industriels ». *Actes Inst. Agro. Vet.*, 1992, p. 5-15.
- Soudi B., Chiang C., Zeraoui ?. – « Variation saisonnière de l'azote minéral et effet combiné de la température et de l'humidité du sol sur la minéralisation ». *Actes Inst. Agro. Vet.*, vol. 10 (1), 1989, p. 29-38.