

Étude de l'impact de l'irrigation avec les eaux usées brutes sur le sol dans la région de Sidi-Bennour (Maroc)

El Kbir LHADI¹□, H. GUESSIR¹ & Abderrahim HANDOUFE²

(Reçu le 16/10/1995 ; Révisé le 14/02/1997 ; Accepté le 12/05/1998)

دراسة تأثير السقي بالمياه المستعملة الخامة على التربة في منطقة سيدي بنور (المغرب)

في منطقة سيدي بنور (الجديدة، المغرب)، تتم إعادة استغلال المياه المستعملة الخامة في السقي. لدراسة تأثير هذا الإستعمال على التربة، تم سقي نوعين من المزروعات (الذرة و الشمندر السكري) و وضع جهاز ليسيومتري. تم التركيز على الأملاح و النترات المحمولة بالمياه من خلال التربة، مكنت هذه النتائج من تحديد قوة التصفية التي تمتلكها التربة المدروسة و كذلك من تقييم تدفق التلوث الناتج عن المياه المتسربة من خلال التربة كما وكيفا، بالإضافة إلى دراسة تطور الملوحة في التربة. و هكذا فبالنسبة للذرة، تم تقدير كمية النترات المتسربة من خلال التربة ب 30,9 كلغ/هكتار مع العلم أن كمية السقي هي 40 لتر/متر مكعب، أما بالنسبة للأملاح فهو يوضح الكميات المتبقية في التربة من أملاح الكلورور، الصوديوم والكبريتات وهي على التوالي : 2,34 طن للهكتار، 1,23 طن/هكتار، 919,5 كلغ/هكتار. إن التتبع الكيفي للمياه المتسربة من خلال التربة يبين الدور الذي تلعبه التربة كمصفاة طبيعية وخصوصا بالنسبة للمواد العالقة وكذلك للمواد العضوية.

الكلمات المفتاحية : مياه مستعملة - ليسيومتر - تدفق - تسرب - تربة - أملاح - نترات - سيدي بنور - المغرب

Étude de l'impact de l'irrigation avec les eaux usées brutes sur le sol dans la région de Sidi-Bennour (Maroc)

Dans la région de Sidi-Bennour (Doukkala), les eaux usées sont réutilisées à l'état brut en irrigation. Pour étudier l'impact de cette réutilisation sur le sol, on a réalisé un essai d'irrigation sur deux cultures (maïs et betterave à sucre) avec des eaux usées brutes et installé un dispositif lysimétrique. Lors de cette expérimentation une attention particulière a été attribuée au lessivage des sels et des nitrates. Les résultats ont permis de déterminer le pouvoir épurateur du sol étudié, d'évaluer quantitativement et qualitativement le flux de pollution provenant des eaux percolées et d'étudier l'évolution de la salinité du sol. En effet, les nitrates sont lessivés en grandes quantités, et on a estimé à 30,9 kg de NO₃/ha lessivés pour une dose d'irrigation de 40 l/m², durant le cycle du maïs. Le bilan des sels met en évidence des pertes importantes en chlorures (2,34 t/ha), en sodium (1,23 t/ha) et en sulfates (919,5 kg/ha). Le suivi de la qualité des eaux percolées a montré que le sol joue un rôle d'épurateur en particulier pour les matières en suspension et pour les matières organiques.

Mots clés : Eaux usées - Lysimètre - Flux - Lessivage - Sol - Sels - Nitrates - Sidi Bennour - Maroc

A study of impact of irrigation with crude wastewater on the soil of the region of Sidi Bennour (Morocco)

In the region of Sidi Bennour (Doukkala), waste water is reused in its crude state for irrigation purposes. In order to study the impact of this practice on the soil, we carried out an irrigation trial on two crops (corn and sugar Beet) with crude waste water, and installed a lysimetric device. During this experiment we focused particular attention on the leaching of salts and nitrates. The results allowed to determine the purifying ability of the soil under study, evaluate both quantitatively and qualitatively the pollution flow from the percolated water, and study the evolution of the soil's salinity. Indeed, the nitrates are leached in great quantities. We estimated that during the corn cycle 30,9 kg/hectare of NO₃ were leached per irrigation dose of 40 liters/m². The outcome for salts highlights the significant losses in chlorures (2,34 t/ha), in sodium (1,23 t/ha) and in sulfates (919,5 kg/ha). The investigation of the quality of the percolated water shows that the soil plays a purifying role particularly for suspended and organic matter.

Key words : Wastewater - Lysimeter - Flow - Leaching - Soil - Salts - Nitrates - Sidi Bennour - Morocco

¹ Laboratoire de l'Eau et de l'Environnement, B.P. 20, Faculté des Sciences, El Jadida

² Service des Expérimentations des essais et de la normalisation, Direction du Développement et de la Gestion de l'Irrigation, Ministère de l'Agriculture, Rabat

□ Auteur correspondant

INTRODUCTION

La réutilisation des eaux usées au Maroc est réalisée essentiellement en agriculture (Ben Taleb, 1986 ; Abouzeid, 1990). Dans ce contexte, les eaux usées sont valorisées comme une ressource supplémentaire en eau et comme apport appréciable en fertilisants. Cependant cette réutilisation engendre des risques pour l'environnement et pour les populations en contact permanent avec les eaux usées ou consommant les produits agricoles irrigués avec ces eaux.

Dans la région de Sidi-Bennour (Maroc), l'irrigation avec les eaux usées brutes se pratique depuis 1970. Les agriculteurs irriguent plusieurs types de cultures sans le moindre contrôle. On a évalué, par le biais d'un dispositif lysimétrique installé en plein champ, l'impact de cette réutilisation sur la qualité physico-chimique du sol. L'étude lysimétrique a pour objectifs :

- d'évaluer quantitativement et qualitativement le flux de pollution provenant des eaux usées;
- d'évaluer la performance du sol vis-à-vis de l'épuration des eaux usées;
- de déterminer les quantités de nitrates lixiviées au delà d'un mètre de profondeur à l'aide d'essais de lessivage;

- d'effectuer un suivi de la salinité du sol suite à l'irrigation avec les eaux usées brutes;
- d'étudier l'évolution de l'état physique du sol.

MATÉRIEL & MÉTHODES

L'expérimentation a été réalisée dans une exploitation agricole située dans la région de Sidi-Bennour (Figure 1). C'est une région à vocation agricole, appartenant à la plaine des Doukkala Centrale

Dans son cadre géologique, le site d'étude appartient à une grande unité géologique "la méséta marocaine" où les formations secondaires et tertiaires reposent en discordance sur les massifs primaires plissés par l'orogénèse hercynienne (Ferre & Ruhard, 1975). Dans cette région la majorité des affleurements sont d'âge quaternaire (Gigout, 1951).

Le climat est semi-aride à hiver tempéré (Emberger, 1953), la température maximale moyenne est de 35°C. Les précipitations sont généralement faibles avec une moyenne annuelle, calculée sur plusieurs années (1963-1993) de 281,6 mm. L'évapotranspiration réelle est importante (251,6) et représente 87,5 % des précipitations.

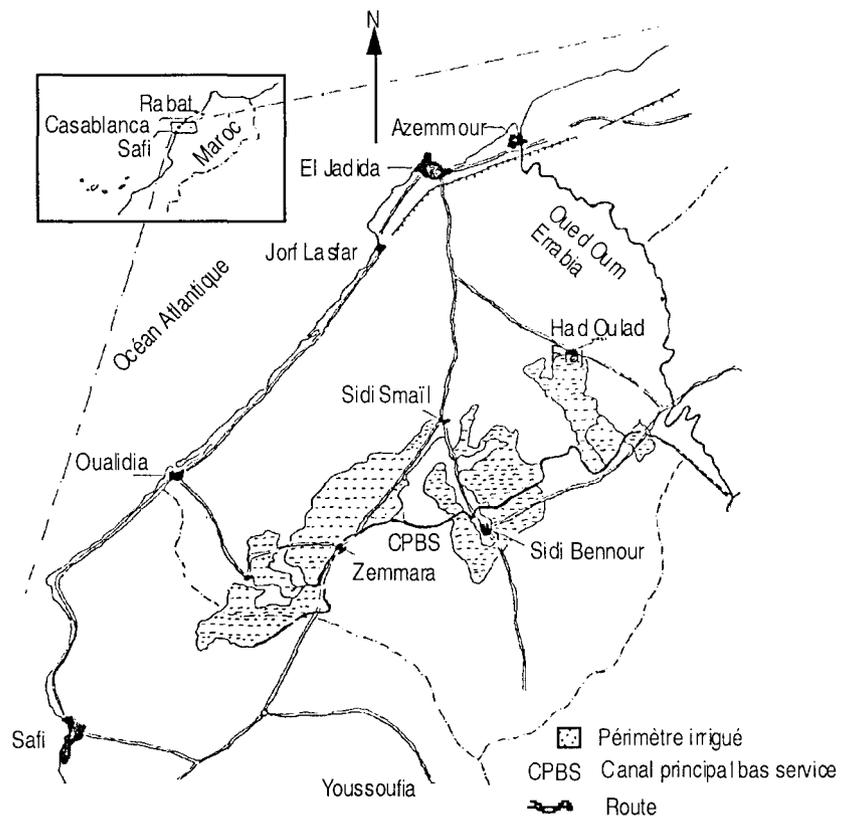


Figure 1. Carte de situation

1. Dispositif lysimétrique

Le lysimètre utilisé est un système à drainage (Figure 2), confectionné à l'aide d'une tôle en acier de 3 mm d'épaisseur, avec un volume utile de 1 m³. Le fond de la cuve a été aménagé de manière à assurer facilement l'évacuation des eaux de percolation en créant une pente de 2 %. La fosse lysimétrique a été soigneusement déblayée à la main par couche de 10 cm du sol, pour essayer de reproduire le profil pédologique initial. Le fond du lysimètre a été rempli de matériaux de drainage (20 cm de galets, graviers et sable de rivière grossier) pour éviter le colmatage de la sortie. Après la reconstitution du profil, le sol est légèrement tassé pour éviter les risques d'affaissement après irrigation.

2. Eau

Deux types d'eau ont été utilisées, les eaux usées provenant des rejets domestiques de la ville de Sidi-Bennour auxquels est mélangé, en proportion plus ou moins importante, l'un des rejets industriels de la sucrerie durant la campagne sucrière (mi-mai à mi-août). Ces eaux sont pompées directement de l'égout pour irriguer le lysimètre et la parcelle d'expérimentation. Le deuxième type est l'eau de barrage utilisée pour irriguer une parcelle témoin. Les doses et fréquences d'irrigation sont précisées dans le tableau 1.

L'évaluation du pouvoir épurateur du sol a été effectuée à l'aide d'un suivi de la qualité physico-chimique des eaux percolées du lysimètre lors de chaque irrigation (Tableau 1) et les résultats ont

permis de calculer le flux et les abattements par le sol de certains éléments.

Les échantillons d'eaux usées et des eaux percolées ont été prélevés et analysés à chaque irrigation. Les paramètres physico-chimiques suivants sont déterminés :

- demande chimique en oxygène (DCO) ; matières en suspension (MES); azote total kjeldhal (NTK); ammonium (NH₄⁺) ; nitrates (NO₃⁻) ; nitrites (NO₂⁻) ; phosphore total ; orthophosphates (PO₄³⁻) ; chlorures (Cl⁻) ; calcium (Ca²⁺) ; magnésium (Mg²⁺) ; sulfates (SO₄²⁻) et carbonates (HCO₃⁻), pour chaque échantillon prélevé, selon les normes AFNOR (1986) en vigueur;
- les éléments sodium (Na⁺) et potassium (K⁺) ont été déterminés à l'aide d'un spectrophotomètre à flamme (type FP 90);
- la conductivité électrique et la température (T°C), ont été mesurées à l'aide d'un conductimètre de type Hach conductivity, TDS-mètre;
- le pH est mesuré à l'aide d'un pH-mètre type Ph90-D812.

Tableau 1. Calendrier des irrigations du lysimètre

N° d'Irrigation	Date	Volume d'eau (litre)	
		Irrigation	Percolée
1	13/05/92	50	-
2	28/05/92	40	-
3	19/06/92	100	18,35
4	02/07/92	40	6,76
5	07/07/92	45	8,55
6	12/07/92	40	8,88
7	17/07/92	40	9,53
8	22/07/92	40	10,12
9	28/07/92	40	9,87
10	03/08/92	40	10,87

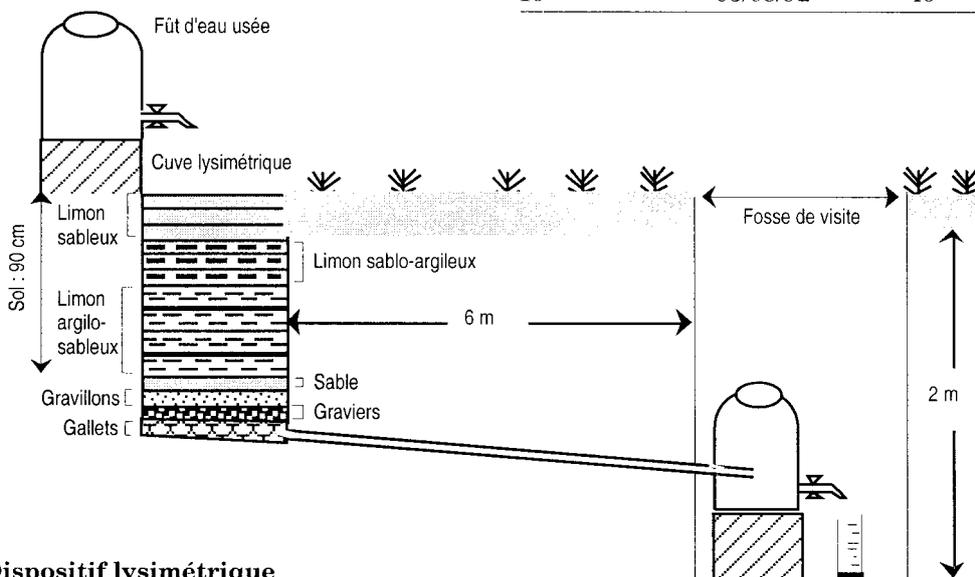


Figure 2. Dispositif lysimétrique

3. Culture

L'expérimentation a été conduite durant deux années sur deux cultures différentes : le maïs-grain (1992) et la betterave sucrière (1993). Le dispositif expérimental est constitué de huit parcelles de 75 m² chacune, dont quatre sont irriguées par les eaux usées brutes, quatre sont irriguées par l'eau de barrage sans fertilisation, considérées comme témoin. Le lysimètre est installé au milieu des quatre parcelles irriguées par les eaux usées brutes. La culture mise en place n'a pas reçue de fumure organique ou minérale.

4. Sol

Le sol du site est d'apport alluvial, profond, développé sur un limon du quaternaire. Le sol a été analysé avant l'installation du dispositif lysimétrique selon les paramètres suivants:

- granulométrie : méthode de la pipette Robinson;
- densité apparente : déterminée à l'aide d'un densitomètre à double cylindre;
- humidité, pH-eau, pH-KCl, conductivité électrique, NTK, phosphore assimilable, matière organique, chlorures, bases échangeables et capacité d'échange cationique, analysés selon les normes Afnor (1987) en vigueur;
- sodium et potassium : déterminés par spectrophotomètre à flamme, type FP 90.

Le suivi de la salinité du sol est effectué par la mesure de la conductivité électrique de l'extrait saturé de la pâte, toutes les deux irrigations durant le cycle de la culture. Les échantillons sont prélevés dans la zone de garde du lysimètre et dans les parcelles témoin irriguées avec l'eau de barrage. Aussi, un essai de lessivage de l'azote dans la cuve lysimétrique a été conduit. Il consiste à suivre l'évolution des concentrations des nitrates en fonction du débit de percolation au cours de l'irrigation. Il est réalisé avec deux doses différentes d'irrigation (100 et 40 litres/m²) sur le sol avec une culture du maïs. L'eau percolée est prélevée et analysée à des intervalles de temps successifs, tout en mesurant la vitesse de percolation qui permet de déduire le débit de percolation (Berdai, 1992).

RÉSULTATS & DISCUSSIONS

1. Qualité des eaux usées

Les rejets liquides des eaux usées domestiques de la ville de Sidi Bennour (Maroc) (estimées à 3300

m³/j) et une partie des eaux résiduaires (1900 m³/j) d'une sucrerie se trouvant à proximité, sont rejetés dans un canal à ciel ouvert. Le rejet de la sucrerie n'existe que durant la campagne sucrière (de mi-mai à mi-août). À ces eaux peuvent être mélangées, occasionnellement, les eaux pluviales et celles des débordements du réseau d'irrigation (eaux de barrage) en faibles proportions. Les agriculteurs pompent directement ces eaux, le long du canal pour irriguer différents types de cultures.

Dans le cadre d'une étude détaillée de la qualité physico-chimique et biologique de ces eaux et en plus des suivis journaliers (cycles de 24 heures) des rejets de la ville, de la sucrerie et de leur mélange, on a effectué des suivis de la qualité de l'eau pompée le long du canal sur une distance de 15 à 20 km (généralement au delà de cette distance il n'y a plus d'eau). La qualité de l'eau évolue au cours du trajet et le degré d'évolution dépend de la distance parcourue.

Les parcelles d'expérimentation suivies sont situées à 7 km, environ après le point mélange des deux types de rejets (ville + sucrerie). Pour mieux apprécier la qualité de l'eau d'irrigation, le tableau 2 présente, d'une part, les valeurs moyennes obtenues dans trois suivis de 24 heures des rejets de la ville, de la sucrerie et de leur mélange et, d'autre part, les valeurs moyennes des analyses de l'eau usée utilisée pendant 9 irrigations et celle de l'eau de barrage utilisée comme témoin.

On note que les teneurs des différents paramètres physico-chimiques des eaux usées de la ville subissent des variations importantes, provoquées par le rejet de la sucrerie. On obtient ainsi un mélange assez chargé principalement en MES, matières organiques et en sels. Le tableau 2 permet de constater que les eaux usées de la ville deviennent, en moyenne, 3 fois plus chargées en DCO ; 4,5 fois en DBO₅ ; 20 fois en MES ; 5,5 fois en chlorure et 2,6 fois plus conductrices après mélange.

Mais après ce mélange, le rejet parcourt un trajet relativement long pour atteindre les parcelles irriguées et subit une auto-épuration. On note une réduction de la DCO et de la DBO₅ suite à une biodégradation de la matière organique par les micro-organismes. L'azote et le phosphore diminuent parallèlement à la matière organique. Cette réduction est due à la minéralisation de l'azote et à une précipitation des phosphates favorisée par une teneur très élevée en calcium et

un pH basique (Berdai, 1992 ; Akrim, 1995 ; Ziad, 1995 ; Bouwer *et al.*, 1973) de l'effluent industriel.

Les résultats représentent la moyenne des suivis de trois cycles de 24 heures pour les rejets de la ville, de la sucrerie et de leur mélange et la moyenne de neuf irrigations pour les eaux usées d'irrigation et celles du barrage (Tableau 2).

Comparées aux eaux de barrages, les eaux usées utilisées restent très riches en matières en suspension, matière organique et en éléments fertilisants (N, P, K). Le pH de ces eaux est voisin de la neutralité et légèrement basique pour les eaux de barrage. La charge minérale, très élevée de l'eau usée en chlorure, sodium, calcium et en carbonates est essentiellement due aux rejets de la sucrerie durant la campagne sucrière. La salinité des eaux est caractérisée par une conductivité électrique moyenne de l'ordre de 2,33 ms/cm et 1,57 ms/cm respectivement pour les eaux usées et les eaux de barrage.

Les eaux usées brutes présentent une qualité biologique médiocre pour être utilisées en agriculture. En effet, les eaux pompées pour l'irrigation sont plus chargées en coliformes fécaux (CF) et streptocoques fécaux (SF) que les eaux usées de la ville (Akrim, 1995). Les concentrations sont de $8,0 \cdot 10^9$ UFC/100 ml de CF et $4,5 \cdot 10^5$ UFC/100ml de SF pour les eaux usées de la ville et $7,2 \cdot 10^5$ UFC/100 ml de CF et $2,2 \cdot 10^5$ UFC/100 ml de

SF pour les eaux d'irrigation. L'augmentation de cette charge bactérienne peut être expliquée par une multiplication des germes au cours du trajet favorisée par une biodégradation active des matières organiques et par un pH et une température favorables.

Les œufs d'Helminthes retrouvés dans les divers types de rejets d'eaux usées (Ziad, 1995) sont:

- *Ascaris Sp*;
- *Toxocara cati*;
- *Toxocara canis*;
- *Hymenolepis nana*;
- *Hymenolepis diminuta*;
- *Enterobius vermicularis*;
- *Strongyles*.

À la sortie du rejet de la ville, la charge parasitaire moyenne est de l'ordre de 12,5 œufs d'Helminthe par litre ; elle descend à 1 œuf/l à 10 km de cette sortie. L'abattement important de cette charge au cours du trajet est dû essentiellement à une sédimentation des œufs, une adsorption sur les matières en suspension et à l'action des prédateurs et des facteurs physico-chimiques qui peuvent engendrer une destruction des œufs. Quant aux eaux pompées pour irrigation, la charge parasitaire dépend du point de prélèvement et de l'heure. Cette charge varie entre 4 et 56 œufs/l.

Les charges bactérienne et parasitaire dépassent les normes recommandées pour une eau d'irrigation et peuvent avoir des risques sanitaires pour les agriculteurs qui sont en contact avec ces eaux et pour les consommateurs.

Tableau 2. Qualité physico-chimique des eaux

Paramètres	Eaux usées			Eaux de barrage	
	Rejets		Mélange	Eaux d'irrigation	
	Ville	Sucrerie			
MES (mg/l)	224,50	7809,30	3798,50	898,07	5,00
DBO ₅ (mg/l)	171,83	988,50	653	460	-
DCO (mg/l)	324,33	1485,00	868,50	764,07	-
N-NTK (mg/l)	65,16	117,16	81,33	62,46	5,20
NH ₄ ⁺ (mg/l)	60,66	47,83	59	35,59	-
NO ₃ ⁻ (mg/l)	-	-	-	7,27	3,60
PO ₄ ⁻ (mg/l)	6,81	2,60	3,98	3,26	-
Pt (mg/l)	12,50	18,38	22,00	6,19	0,19
CE (ms/cm)	1,95	10,63	4,76	2,33	1,57
pH	7,75	8,95	8,4	7,09	8,60
Cl ⁻ (mg/l)	412,5	4229,30	1747,50	701,05	524,88
Na ⁺ (mg/l)	255	1220	780,60	352,96	252,88
K ⁺ (mg/l)	30,67	189,33	72,83	18,40	3,90
Ca ²⁺ (mg/l)	88	708	528	473,20	90,08
Mg ²⁺ (mg/l)	67,65	62,00	79,33	320,45	57,74
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	-	-	-	488,67	444,21
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	530	683,2	748,27	618,43	183,02
SAR	-	-	-	4,35	7,24

2. Qualité physico-chimique du sol à l'état initial

Les caractéristiques du sol étudié à l'état initial sont résumées dans les tableaux 3, 4 et 5. Il s'agit d'un sol limono-sableux à limono-argilo-sableux vers les profondeurs. Les résultats analytiques montrent que le sol est moyennement pourvu en matière organique et en azote. Ces éléments diminuent vers la profondeur. Il est pauvre en potassium et en phosphore assimilable. L'humidité équivalente et la capacité d'échange cationique sont faibles en surface et moyennement élevées en profondeur, vu la richesse des horizons profonds en argile (32 à 36%). Par contre, ce sol est riche en sels de calcium, magnésium et de sodium. En effet, les valeurs de l'ESP sont élevées, il s'agit d'un sol sodique qui pourrait avoir des problèmes de perméabilité.

Tableau 3. Caractéristiques granulométriques du sol

Horizons (Cm)	Argile %	Limon		Sable	
		fin %	grossier %	fin %	grossier %
0-10	7,8	3,7	2,7	50,6	32,7
1-20	7,2	4	3,1	58,2	27,1
2-40	15,3	4,1	1,8	47,7	28,9
4-60	35,4	4,7	2,5	38,8	18,5
6-100	34,2	1,7	2,9	35,5	24,2

Tableau 4. Caractéristiques physico-chimiques du sol avant le semis du maïs

Horizons (cm)	pH (eau)	pH (KCL)	C g/kg	M.O g/kg	N g/kg	C/N	P ₂ O ₅ %
0-10	7,36	7,01	10,76	18,6	1,30	8,28	0,091
1-20	7,34	7,03	7,46	12,9	0,90	8,29	0,062
2-40	7,28	7,96	3,59	6,2	0,59	6,08	0,001
4-60	6,50	6,20	1,97	3,4	0,23	8,56	0,006
6-100	6,70	6,02	0,87	1,5	0,20	4,35	0,004

Tableau 5. Caractéristiques physico-chimiques du sol avant le semis du maïs

Horizon (cm)	Complexe d'échange meq/100g						HE %	ESP %	CE ms/cm	D.a.
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺ /Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CEC				
0-10	3,6	6,0	1,66	1,6	0,45	7,4	7,0	21,6	1,24	1,51
10-20	2,1	6,3	3,47	3,2	0,35	9,8	7,7	32,5	1,68	1,55
20-40	2,5	8,1	3,24	3,2	0,30	10,1	9,9	31,6	0,70	1,37
40-60	3,1	14,7	4,74	3,6	0,39	19,3	17,5	18,6	0,58	1,19
60-100	3,5	19,1	5,46	3,4	0,34	25,0	21,6	13,5	0,51	1,16

HE: Humidité équivalente ; ESP : Pourcentage de sodium échangeable ; CE : Conductivité électrique à l'extrait de pâte saturée ; D.a. : Densité apparente

3. Pouvoir épurateur du sol

L'utilisation du pouvoir épurateur du sol pour le traitement des eaux usées urbaines est une technique qui se base sur un traitement naturel par le sol (Bouwer *et al.*, 1973 ; Idelovitch & Michail, 1984 ; Bize, 1987 ; Bouwer, 1991). Le sol n'est pas seulement un filtre granulaire mais aussi un réacteur biologique très actif, riche en micro-organismes comparable à un système à biomasse fixée et qui met en contact les eaux usées avec la microflore épuratrice et l'oxygène de l'air (Bechacet *al.*, 1987 ; Bize & Minault, 1989). Les eaux usées brutes subissent une épuration à deux niveaux :

- une épuration par le sol qui favorise à la fois la dégradation des matières organiques, la rétention des MES, la fixation de quelques éléments minéraux et la réorganisation d'autres ;
- une épuration par la culture qui exporte les éléments minéraux dont elle a besoin pour sa

croissance, principalement l'azote, le phosphore et le potassium.

Les résultats des suivis réguliers de la qualité physico-chimique des eaux d'irrigation et de celles percolées à travers le lysimètre permettent l'évaluation du pouvoir épurateur du sol.

3.1. Élimination des matières en suspension

L'élimination des matières en suspension (MES) est le processus essentiel de l'épuration des eaux usées par le sol (Bouwer, 1991 ; Brissaud *et al.*, 1991 ; Carre & Dufils, 1991). La figure 3 montre que les MES sont retenues facilement par le sol et les teneurs résiduelles en MES des eaux percolées sont faibles. Les rendements épuratoires obtenus sont importants et varient de 90 à 98%. Ces MES s'accumulent à la surface et entraînent un colmatage du sol (Valiron, 1983). On a pu constater qu'après plusieurs irrigations et vers la fin du cycle de la culture, le taux d'abattement des MES diminue (Figure 4). Cette augmentation de MES dans les eaux de percolation est favorisée par une formation de fissures observées sur le terrain.

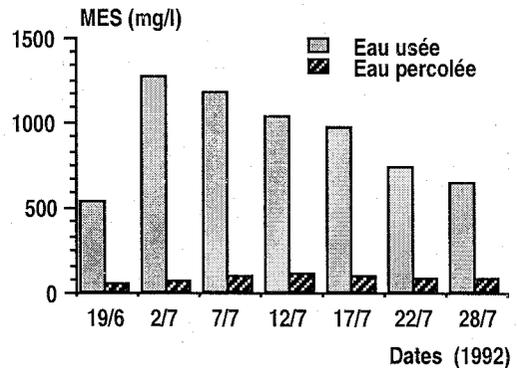


Figure 3. Évolution des matières en suspension dans les eaux usées (EU) et le percolat du lysimètre

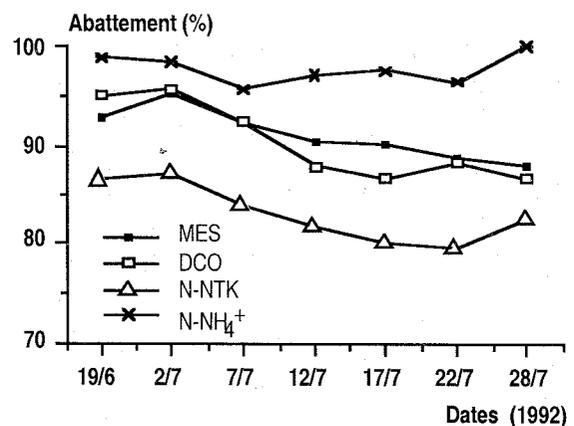


Figure 4. Évolution des abattements en MES, DCO, azote Kjeldahl et ammoniacal dans le sol du lysimètre

3.2. Élimination de la pollution organique

L'élimination de la matière organique (DCO) s'effectue dans la zone non saturée qui est un réacteur aérobie. L'élimination se fait par dégradation, transformation et oxydation bactérienne. La vitesse de décomposition des matières organiques dépend de l'aération et de la température du sol.

La DCO des eaux percolées est faible durant le cycle de l'irrigation (Figure 5). Les fluctuations temporelles des valeurs de la DCO de l'eau de percolation sont liées à celles de la DCO des eaux usées brutes. Les abattements sont de 86 à 95% et diminuent après un mois de fonctionnement du lysimètre (Figure 4). Cette diminution du rendement vers la fin du cycle serait attribuée au temps de séjour qui devient faible. En effet, le temps de percolation est de 15 heures à la première irrigation et de 3 à 5 heures aux dernières irrigations fréquentes et très rapprochées (tous les 5 jours). La formation de fissures à la surface du sol diminue l'élimination de la matière organique. Dans ce cas, l'oxydation des matières organiques dissoutes est limitée non seulement par la disponibilité de l'oxygène mais par le temps de séjour de l'effluent au niveau du massif filtrant (Brissaud, 1989).

3.3. Élimination de la pollution azotée

Les eaux usées brutes contiennent des quantités variables d'azote sous forme organique, d'ammonium, de nitrate et de nitrite. Les figures 6, 7, 8 & 9 illustrent l'évolution de l'azote dans les eaux usées brutes et dans les eaux percolées.

Les eaux percolées ont des teneurs faibles en azote Kjeldahl (NTK) (7 à 10 mg/l) par rapport à celles des eaux usées en cet élément (57 à 80mg/l) et les abattements varient de 80 à 87% (Figure 6). Le stockage et la minéralisation dans le sol sont à l'origine de l'élimination de NTK des eaux d'irrigation (Morlet, 1990).

L'élimination de l'azote ammoniacal se fait d'une façon très importante durant toute la période de fonctionnement du lysimètre (Figure 7). Les rendements varient de 93 à 99% et les teneurs en ammonium dans le percolat ne dépassent pas 2,5 mg N-NH₄⁺/l). L'abattement très important de l'azote ammoniacal est dû essentiellement à une nitrification favorisée par la température (27 à 35°C) et l'humidité (Guiot, 1991 ; Kathleen *et al.*, 1992 ; Soudi & Chiang, 1982 ; Chiang *et al.*, 1982) et à une rétention par le complexe adsorbant du sol.

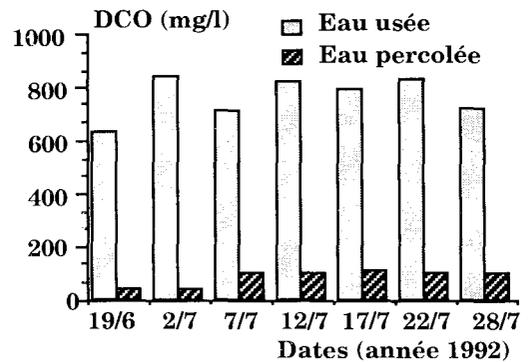


Figure 5. Évolution de la DCO dans les EU et le percolat du lysimètre

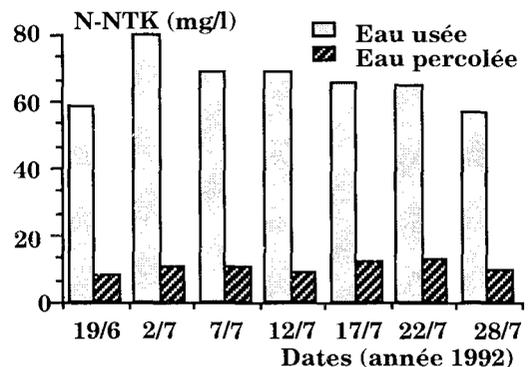


Figure 6. Évolution de l'azote Kjeldahl dans les EU et le percolat du lysimètre

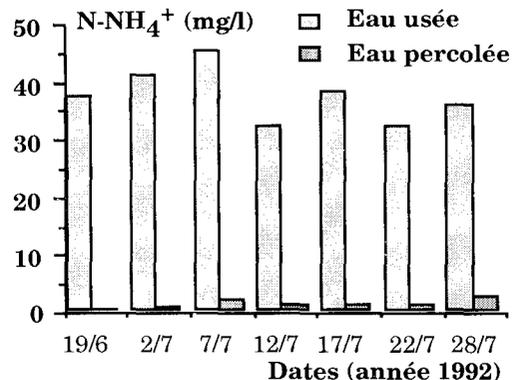


Figure 7. Évolution de l'azote ammoniacal dans les EU et le percolat du lysimètre

En effet, dans une étude effectuée par Suzukiet *al.*, (1992) sur trois cases lysimétriques, les résultats ont montré que l'ion NH₄⁺ contenu dans les eaux usées est immédiatement adsorbé par le sol. Par contre, l'eau percolée contient plus de nitrites que les eaux usées brutes utilisées (Figure 8), ce qui pourrait expliquer également une nitrification de NH₄⁺ en NO₂⁻ puis en NO₃⁻ lors du transit des eaux à travers le sol.

L'azote nitrique est l'élément qui pose le plus de problèmes lors de la réutilisation des eaux usées en agriculture et lors de leur épuration par le sol. Les nitrates très solubles et mobiles dans la solution du sol sont facilement lessivés vers les eaux souterraines et constituent ainsi une source potentielle de pollution de la nappe phréatique par les nitrates (El Yamine, 1985 ; De Becker, 1989 ; Boutin, 1990 ; BRGM, 1991 ; Zoller 1994 ; Landreau, 1990 ; Lhadi *et al.*, 1995).

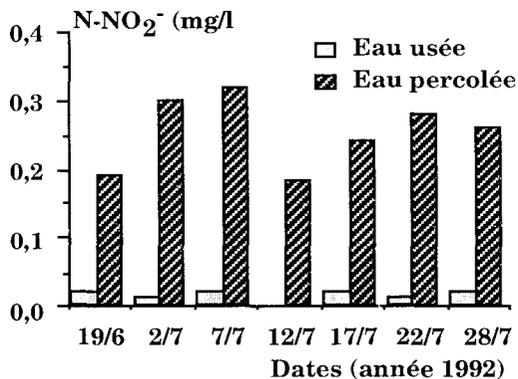


Figure 8. Évolution des nitrites dans EU et le percolat du lysimètre

La figure 9 montre que les eaux percolées du lysimètre sont très chargées en nitrates (24,4 à 44,4 mg/l de NO_3^-) par rapport aux eaux usées brutes (2,1 à 5,7 mg/l). Le pool d'azote nitrique est alimenté en partie par l'azote nitrique apporté par les eaux usées et essentiellement par la minéralisation et la nitrification de l'azote organique et ammoniacal apportés par les eaux usées et ceux du reliquat du sol.

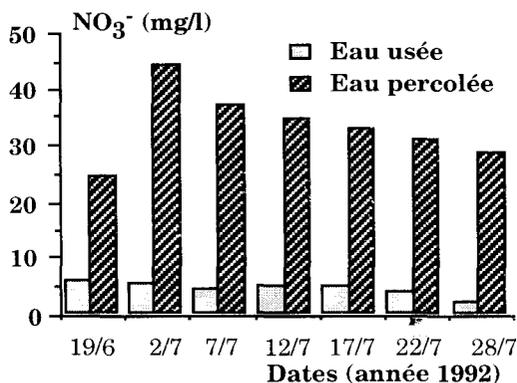


Figure 9. Évolution des nitrates dans les EU et le percolat du lysimètre

Le flux des nitrates (Tableau 5) calculé à partir d'un bilan apparent établi à l'aide du dispositif lysimétrique permet d'évaluer les pertes en nitrates, au-delà d'une profondeur d'un mètre du

sol, à 30,9 kg de O_3 /ha pour un volume d'irrigation de 40 litres/m² durant le cycle du maïs. Ce résultat explique les abattements importants en ammonium et en azote total kjeldahl.

Les résultats de plusieurs études concernant l'épuration des eaux usées par le sol, faites sur cases lysimétriques (Suzuki *et al.*, 1992) ou sur colonnes (Lance *et al.*, 1980 ; Brissaud *et al.*, 1991 ; Rafiq, 1993) ou sur bassin d'infiltration (Carre & Dufils, 1991) confirment l'augmentation du taux de nitrates dans les eaux percolées.

3.4. Élimination des sels

Les eaux usées de la sucrerie sont par moment très minéralisées (régénération des résines) et contiennent essentiellement les ions Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , avec une conductivité électrique qui varie de 1 à 30 ms/cm. Le mélange de ce rejet avec celui de la ville conduit à une eau très minéralisée dont la réutilisation en irrigation peut avoir des effets néfastes sur la culture, le sol (Ayers & Weston, 1988 ; Valiron, 1983 ; FAO, 1987) et sur la nappe.

La salinité des eaux percolées est très élevée par rapport à celle des eaux usées. En effet, on assiste à une augmentation de la conductivité électrique (Figure 10). Contrairement aux ions calcium, magnésium et potassium qui sont relativement retenus par le sol (Figures 11, 12 & 13), les teneurs en chlorure, sodium, carbonates et sulfates sont élevées dans les eaux percolées du lysimètre (Figures 14, 15, 16 & 17). Cette augmentation est due à un lessivage important des sels apportés par les eaux usées, à l'entraînement des sels du sol par des réaction d'échange (Kathleen *et al.*, 1992) et à l'évaporation très importante pendant l'été. Vers la fin du cycle, on a noté une diminution importante de la conductivité électrique des eaux percolées. Ceci peut être expliqué par un lavage du sol suite à des irrigations répétitives. On a remarqué qu'une salinité élevée des eaux usées se répercute sur la salinité des eaux percolées et du sol.

Le bilan des sels (Tableau 6) met en évidence des pertes importantes en chlorures (2,34 tonnes/ha), en sodium (1,23 tonnes/ha), en sulfates (919,5 kg/ha) et en carbonates (176,7 kg/ha) au cours du cycle du maïs pour un volume d'irrigation moyen de 48 litres/m². Cette charge saline évaluée de plus d'un mètre du sol peut atteindre la nappe phréatique et augmenter sa salinité.

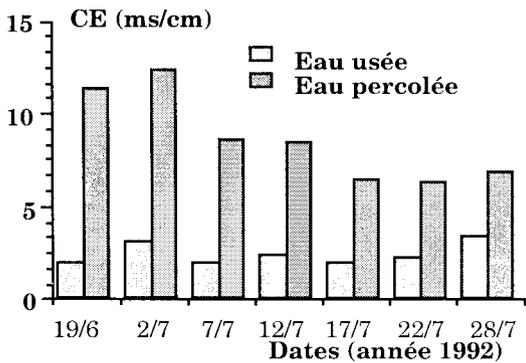


Figure 10. Évolution de la conductivité électrique des EU et du percolat du lysimètre

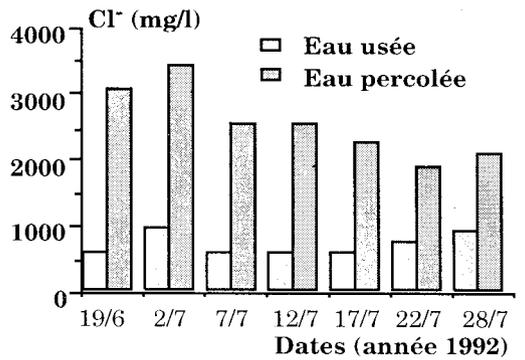


Figure 14. Évolution des chlorures des EU et du percolat lysimètre

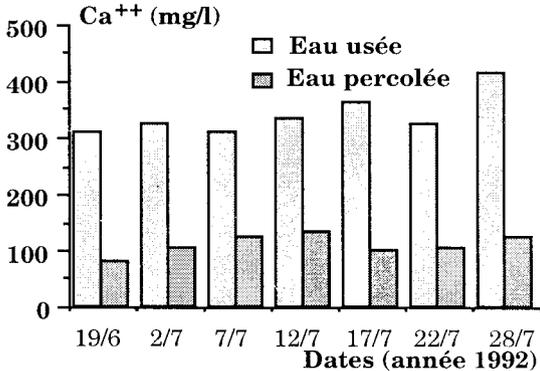


Figure 11. Évolution du calcium des EU et du percolat lysimètre

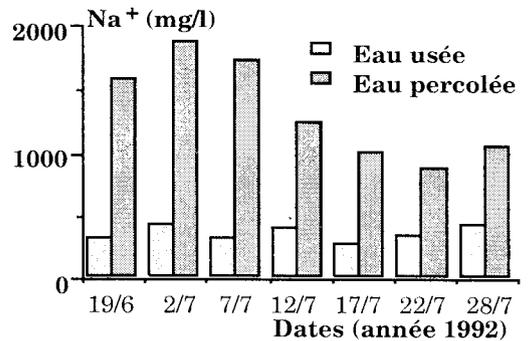


Figure 15. Évolution du sodium des EU et du percolat lysimètre

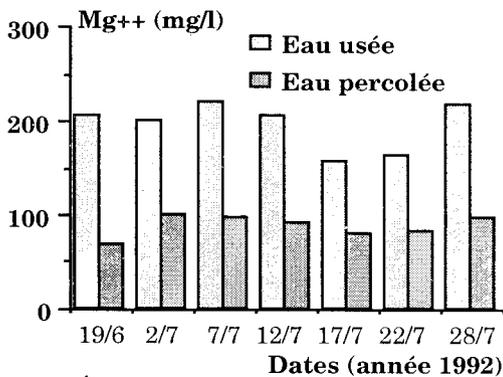


Figure 12. Évolution du magnésium des EU et du percolat lysimètre

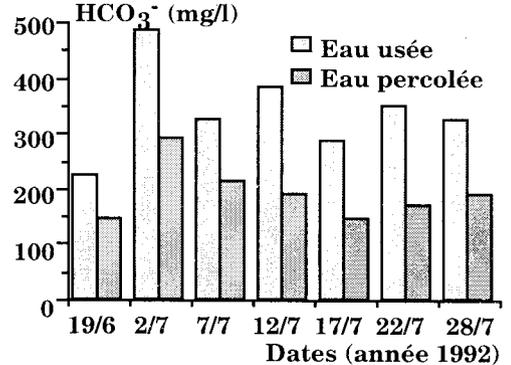


Figure 16. Évolution des carbonates des EU et du percolat lysimètre

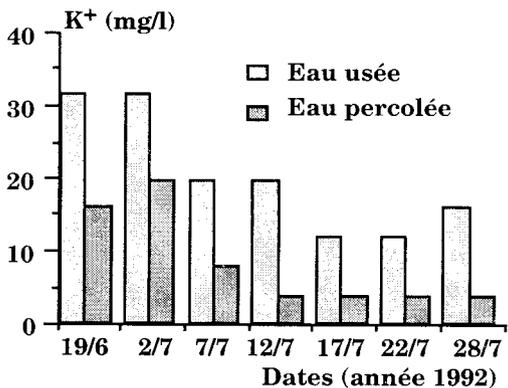


Figure 13. Évolution du potassium des EU et du percolat lysimètre

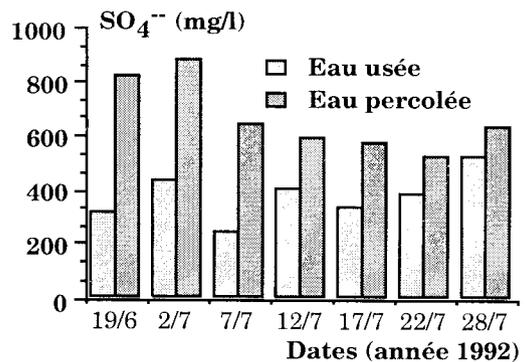


Figure 17. Évolution des sulfates des eaux usées et du percolat lysimètre

Tableau 6. Bilan apparent des sels et des nitrates

Paramètres	Apports (kg/ha) (eaux usées)	Sorties (dg/ha) (eaux percolées)	% Lixivié
NO ₃ ⁻	19,5	30,9	> 100
Cl ⁻	3036,7	234,1	77,2
Na ⁺	1528,2	1230,1	80,5
HCO ₃ ⁻	1455,3	176,7	16,7
SO ₄ ²⁻	1614,4	919,0	57,5

4. Évolution de l'état du sol suite à l'irrigation avec les eaux usées brutes

4.1. Essai de lessivage de l'azote dans la cuve lysimétrique

Les résultats sont illustrés par les figures 18 et 19 pour deux doses différentes : 40 et 100 litres. Elles montrent que le lessivage des nitrates est directement lié au débit de percolation de l'eau dans le sol. Les pertes en nitrates augmentent en fonction du temps et deviennent maximales après 3 heures de percolation. En effet, le débit augmente au début et l'eau entraîne, par vagues successives, les nitrates vers la profondeur. Ces nitrates seraient issues en partie du reliquat d'azote présent dans le sol avant son irrigation par minéralisation et de l'eau d'irrigation percolée en profondeur. Les pertes en nitrates par lessivage de plus d'un mètre de profondeur sont de 3 kg/ha. irrigation pour une dose d'irrigation de 40 l et 5,97 kg/ha. irrigation pour une dose de 100l et correspondent respectivement à 26 kg/ha et 53,73 kg/ha de nitrates perdus durant le cycle de la culture du maïs. Des résultats similaires ont été obtenus dans l'expérimentation conduite à Ouarzazat (Berdai, 1992). La quantité des nitrates percolés dépend de la dose des irrigations, du stock initial du sol en azote minéral et de l'absorption de l'eau et des nitrates par la culture.

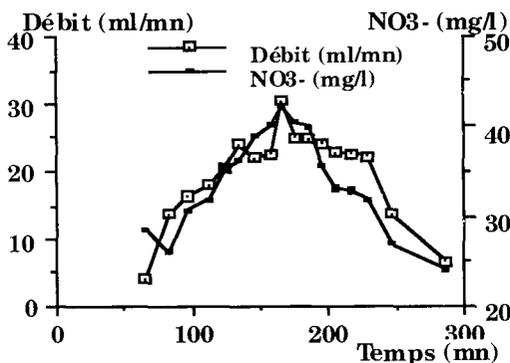


Figure 18. Évolution du débit et concentration en nitrate du percolat lysimètre (volume d'irrigation = 40 litres)

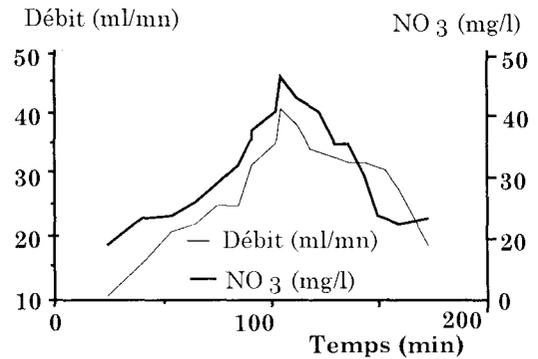


Figure 19. Évolution du débit et concentration en nitrate du percolat lysimètre (volume d'irrigation = 100 litres)

4.2. Salinité du sol

Le suivi de la salinité du sol durant le cycle de la culture du maïs est illustré par les figures 20, 21, 22, 23, et 24. Elles montrent que la conductivité électrique du sol a augmenté à partir de la 3^{ème} irrigation surtout dans les horizons de surface des parcelles irriguées avec les eaux usées brutes. Les horizons profonds voient leur conductivité augmenter suite à un lessivage des sels. Les différences entre les deux types d'eaux d'irrigation sont significatives. En effet, les apports en sels solubles par les eaux usées sont très importants (Tableau 5) et sont engendrés par le rejet industriel très minéralisé. À chaque irrigation, les eaux usées apportent : 337 kg/ha de Cl⁻ ; 169,8 kg/ha de Na⁺ ; 179,4 kg/ha de SO₄²⁻ et 161,7 kg/ha de HCO₃⁻.

Une grande partie de ces sels est lessivée mais le reste s'accumule dans le sol et peut entraîner la dégradation de la structure du sol, la diminution de sa fertilité à long terme (Kathleen *et al.*, 1992) et une réduction des rendements en production agricole (Ayers & Weston, 1988 ; Valiron, 1983 ; Bahri, 1987 ; FAO, 1987).

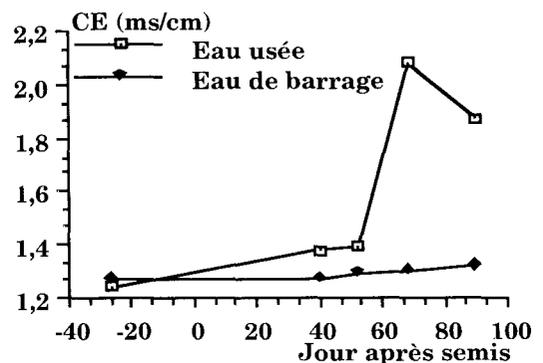


Figure 20. Évolution de la conductivité électrique du sol, horizon 0-10 cm

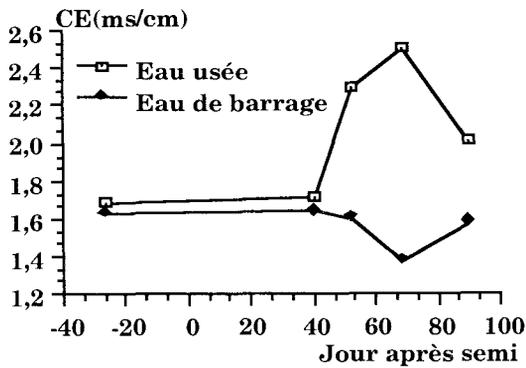


Figure 21. Évolution de la conductivité électrique du sol, horizon 10-20 cm

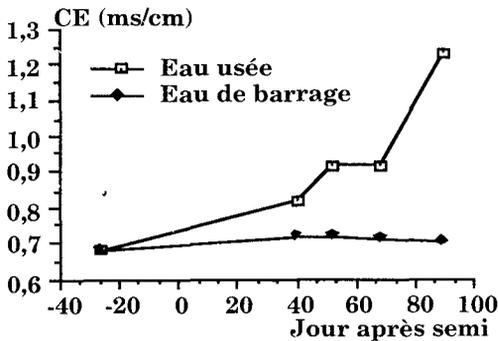


Figure 22. Évolution de la conductivité électrique du sol, horizon 20-40 cm

CONCLUSION

Les résultats de cette étude montrent que les eaux usées utilisées sont très riches en matières en suspension, matière organique et en éléments fertilisants (N, P, K). Le pH de ces eaux est voisin de la neutralité. La charge minérale, très élevée de l'eau usée en chlorure, sodium, calcium et en carbonates, est essentiellement due aux rejets de la sucrerie durant la campagne sucrière. La salinité des eaux est caractérisée par une conductivité électrique moyenne de l'ordre de 2,33 ms/cm pour les eaux usées et de 1,57 ms/cm pour les eaux de barrage. L'irrigation avec les eaux usées brutes très riches en sels a entraîné une augmentation de la salinité du sol suite à un enrichissement en chlorure, sodium et calcium.

Les eaux usées brutes présentent une qualité biologique médiocre pour être utilisées en agriculture. En effet, les charges bactérienne et parasitaire dépassent les normes recommandées pour une eau d'irrigation et peuvent engendrer des risques sanitaires pour les agriculteurs qui sont en contact avec ces eaux et pour les consommateurs des produits agricoles.

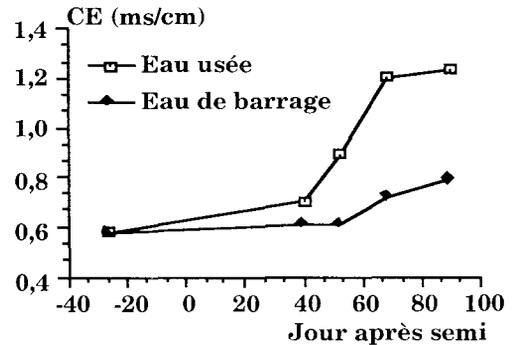


Figure 23. Évolution de la conductivité électrique du sol, horizon 40-60 cm

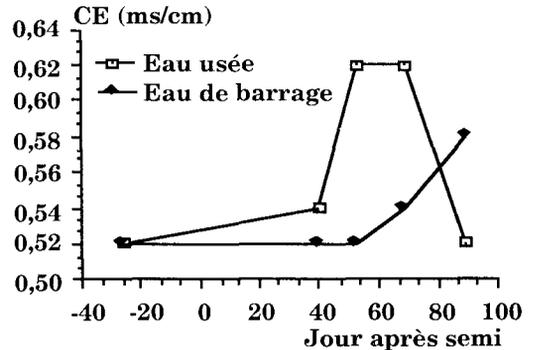


Figure 24. Évolution de la conductivité électrique du sol, horizon 60-80 cm

Le sol étudié présente un pouvoir épurateur efficace pour l'élimination des matières en suspension (90 à 98%), des matières organiques (86 à 95%) et de l'azote total (80 à 87%) et ammoniacal (93 à 99%). Cependant, certaines formes azotées telles que les nitrites et les nitrates ainsi que les sels (Cl^- ; Na^+ ; SO_4^{2-} et HCO_3^-) sont peu retenus par le sol et sont facilement lixivés vers les eaux souterraines. Le rendement de l'épuration par le sol dépend de l'élément en question et du volume d'irrigation.

Les essais de lessivage de l'azote dans la cuve lysimétrique ont montré que les quantités de nitrates lessivés sont importantes (6 kg/ha. irrigation). Elles sont liées au débit de percolation et dépendent de la dose des irrigations, du stock initial du sol en azote minéral et de l'absorption de l'eau et des nitrates par la culture.

Les eaux usées constituent une ressource importante, mais leur valorisation doit être réalisée en tenant compte des effets sur le sol, la nappe et sur la santé humaine. Ainsi, il est nécessaire de prendre certaines mesures afin de minimiser les risques d'entraînement de l'azote et

des sels vers la nappe et de la salinisation du sol. Le prétraitement des eaux usées avant rejet et usage, le raisonnement et la rationalisation de l'irrigation pourraient atténuer la dégradation du sol et des eaux souterraines due à l'utilisation d'une eau de qualité médiocre.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement le Service des Expérimentations des essais et de la normalisation, Direction du Développement et de la Gestion de l'Irrigation pour son aide précieuse et sa collaboration.

RÉFÉRENCES CITÉES

- Abouzeid H. (1990) L'état de l'expérimentation et de la recherche en matière de réutilisation des eaux usées au Maroc. *Rev. Eau & Développement* (10) : 6-11
- AFNOR (1986) Eau, Méthodes d'essais *Recueil de normes Françaises*
- AFNOR (1987) Qualité des sols et méthodes d'analyses. *Recueil de normes Françaises*, 1ère édition : 133 pp
- Akrim A. (1995) Qualité microbiologique des eaux usées réutilisées en irrigation dans la région de Sidi Bennour. Thèse de 3ème cycle en cours
- Ayers R.S. & Weston D.W. (1988) La qualité de l'eau en agriculture. *Bulletin F.A.O. d'irrigation et de drainage* n° 29
- B.R.G.M (1991) Comment gérer la qualité des eaux souterraines. *Industrie minière-mines et carrières*, Janvier :80-85
- Bahri A. (1987) L'utilisation des eaux usées traitées et des boues résiduaires en agriculture. *Colloque international "Eaux usées et milieux récepteurs"*, Casablanca, 9, 10 et 11 Avril
- Bechac J.P., Boutin P., Merlier B. & Nuer P. (1987) Traitement des eaux usées. 3ème édition : 204 pp
- Ben Taleb A. (1986) Réutilisation des eaux usées brutes en irrigation au Maroc. Thèse de 3ème cycle, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat
- Berdai H. (1992) Réutilisation des eaux usées à des fins agricoles. Projet M.O.R. (86/018). Rapport scientifique intermédiaire R4 et R5 consultant national en physico-chimie
- Bize J. & Minault N. (1989) Epuration des eaux usées par le sol. Journées Techniques, Assainissement Urbain au Maroc, Agadir, 6-7 et 8 septembre, 16 pp
- Bize J. (1987) Epuration des eaux usées par infiltration contrôlée dans le sol. *Séminaire "Eaux usées et milieux récepteurs"*, Casablanca, 9-10 Avril, 15 pp
- Boutin C. (1990) L'eau des nappes phréatiques superficielles : une richesse naturelle vitale mais vulnérable, l'exemple des zones rurales du Maroc. *Sciences de l'Eau* 6 (13) :357-363
- Bouwer H. (1991) Role of groundwater recharge intreatment and storage of wastewater for reuse. *Wat. Sci. Tech.*, : 9(24) : 295-302
- Bouwer H., Rice R. C. & Escarcega E. D. (1973) Renovating secondary sewage by ground water recharge with infiltration basins. US EPA report
- Brissaud F. (1989) Réutilisation des eaux usées pour l'irrigation : méthodologie, réalisation en France. *Séminaire International "réutilisation des eaux usées"*. Les 18-22 septembre, Sophia antipolis, France
- Brissaud F., Restrepo - Bardon M., Soulie M. & Joseph C. (1991) Infiltration percolation for reclaiming stabilization ponds effluents. *Wat. Sci. Tech.* 9 (24) : 185-193
- Carre J. & Dufils J. (1991) Wastewater treatment by infiltration basins : use fulness and limits-sewage plant in creances (France). *Wat. Sci. Tech.*, 9 (24) : 287-293
- Chiang C., Soudi B. & Moreno (1983) Soil nitrogen minieralization and nitrification under morrocan conditions. *Proc. 17th Coll. Int. Potash Institue* Bern: 129-139
- De Becker E. (1989) Impact de l'activité humaine sur la contamination azotée des eaux souterraines, exemple du bassin versant de la dyle en amont de wavre. *Tribune de l'Eau*, 6 (41), n° 536 : 24-29
- El Yamine N. (1985) Contribution à l'étude qualitative des eaux d'alimentation des principales agglomérations marocaines : problème du maintient, de l'alimentation et de la protection de cette qualité. Thèse Doctorat ès Sciences. Université Sciences et Techniques Languedoc. Montpellier : 209-397
- Emberger L. (1953) Une classification biogéographique des climats. *Rech. Trav. Labo. Zool. Fac Sci. Montpellier. Série Bot*, 7 : 3-43
- F.A.O. (1987) La qualité de l'eau en agriculture. *Bull. F.A.O. d'irrigation*, 29 : 3-148
- Ferre M. & Ruhard J. (1975) Ressources en eau du Maroc notes et mémoires. *Serv. Géolo. Maroc. T2* (231) : 261-298

- Gigout M. (1951) Études géologiques sur la méséta marocaine occidentale (arrière pays de Casablanca, Mazagan et Safi). *Notes et mémoires serv. Géolo. Maroc* (T1) n° 86
- Guiot J. (1991) Les pertes de nitrates par lessivage dans la rotation beterrave-forment-escourgeon. *Actes du Séminaire "gestion de l'azote agricole et qualité des eaux"*, 23-24 mai
- Idelovitch E. & Michail M. (1984) Soil aquifer treatment. A new approach to an old method of wastewater reuse. *Jour. Water. Poll. Control Fed* 8 (56) : 936-943
- Kathleen H., Bowmer & Peter Laut (1992) Wastewater management and resource recovery in intensive rural industries in Australia. *Wat. Res.*, 2 (26) : 201-208
- Lance J.L., Rice R.C. & Gilbert R.G. (1980) Renovation of wastewater by soil columns flooded with primary effluent. *J. Water pollut. Contrôl Fed.* 52 : 381
- Landreau A. (1990) La pollution des eaux par les nitrates. *Rev. Eau & Développement*, 10 : 49-58
- Lhadi E.K., Mountadar M., Younsi A., Martin G. & Morvan J. (1995) Pollution par les nitrates des eaux souterraines de la zone littorale de la province d'El Jadida (Maroc). Article accepté pour publication dans *Revue d'Hydrogéologie de B.R.G.M-France*
- Morlet G. (1990) Nitrates : Comment limiter leur lessivage. publication mensuelle des groupements agricoles "horizon", F.D.G.E.D.A de la marne.
- Rafiq F. (1993) Experimentations sur le traitement des eaux usées par le lagunage anaérobie et infiltration percolation (Marrakech). Aspects physico-chimique. Thèse de 3ème cycle Faculté des Sciences, Semlalia Marrakech
- Soudi B. & Chiang C. (1982) Minéralisation de l'azote dans les sols céréaliers des zones semi-aride du Maroc. *Séminaire sur les sols céréaliers*, 3-5 octobre, Tiaret, Algérie
- Suzuki T., Takao K. & Gentaro Y. (1992) Land application of wastewater using three types of trenches set in lysimètres and its Mass Balance of nitrogen. *Wat. Res.*, 11 (26) : 1433-1444
- Valiron F. (1983) La réutilisation des eaux usées. Lavoisier ed : 207 pp
- Ziad H. (1995) Étude parasitologique des eaux usées de la région de Sidi Bennour. Thèse de 3ème cycle.
- Zoller I. (1994) Non-ionic surfactants in reused water: are activated sludge/soil aquifer treatments sufficient. *Wat. Res.* 28 (7) : 1625-1629