

**Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux
souterraines de la communauté Mzamza (Chaouia, Maroc)**
**The impact of anthropogenic activities on the quality of
groundwater of the Mzamza community (Chaouia, Morocco)**

Jaouad El Asslouj, Sanae Kholtei, Namira El Amrani-Paaza and Abderrauf
Hilali

Volume 20, Number 3, 2007

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/016505ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/016505ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Asslouj, J. E., Kholtei, S., Amrani-Paaza, N. E. & Hilali, A. (2007). Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines de la communauté Mzamza (Chaouia, Maroc). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 20(3), 309–321. <https://doi.org/10.7202/016505ar>

Article abstract

The study of the physical-chemical characteristics of groundwater of the Mzamza community, subjected to domestic and industrial wastes from Settat City (Morocco) via the Boummoussa river, shows that the quality of water of the various wells is variable and depends on a certain number of factors such as the location of the wells in relation to waste water and agricultural activity. The interpretation of analyzed data, the correlation between waste water and well water, and the distribution of groundwater sites into groups was carried out using Normalized Principal Components Analysis. The study revealed several sources of groundwater contamination, namely, the contamination by organic matter due primarily to the infiltration of waste waters used for irrigation, and the return of irrigation water (loaded with nitrate fertilizers), which is regarded as being the principal source of dissolved solids and inorganic nitrogen in the groundwater. Several factors influence the progression of this pollution: the concentrations of the pollutants in the waste waters, the nature of the soil, the lithology, the permeability of the aquifer in use and the depth of the water table. The results achieved in this study also revealed the paramount influence of seasonal variability and the beneficial role of atmospheric precipitation.

IMPACT DES ACTIVITÉS ANTHROPIQUES SUR LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES DE LA COMMUNAUTÉ MZAMZA (CHAOUIA, MAROC)**

*The impact of anthropogenic activities on the quality of groundwater of the Mzamza community (Chaouia, Morocco)***

JAOUAD EL ASSLOUJ¹, SANAE KHOLTEI^{1*}, NAMIRA EL AMRANI-PAAZA² et ABDERRAUF HILALI³

¹Université Hassan I, Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire des Procédés de Valorisation des Ressources Naturelles, des Matériaux et Environnement, Km 3,5 Route de Casablanca, BP 577, Settat, Maroc

²Université Hassan I, Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire des Sciences de l'Environnement et Développement, Km 3,5 Route de Casablanca, BP 577, Settat, Maroc

³Université Hassan I, Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire d'Agro-alimentaire et Santé, Km 3,5 Route de Casablanca, BP 577, Settat, Maroc

Reçu le 2 mars 2006, accepté le 19 décembre 2006

RÉSUMÉ

L'étude des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines de la communauté Mzamza, soumises aux rejets liquides de la ville de Settat à partir de l'oued Boumoussa, montre que la qualité des eaux des différents puits est variable et dépend d'un certain nombre de facteurs tels que l'emplacement des puits par rapport aux eaux usées et l'activité agricole. L'interprétation des données d'analyse, la corrélation existante entre eaux usées et eaux de puits, et la répartition des eaux souterraines en groupes sont réalisées en utilisant l'Analyse en Composante Principale Normée. L'étude a révélé des origines différentes de la contamination des eaux souterraines, à savoir, la contamination par la matière organique due essentiellement à l'utilisation des eaux usées à des fins d'irrigation et à leur infiltration continue, et finalement le retour des eaux d'irrigation (chargées en engrais azotés) qui est considéré comme étant la principale origine de la minéralisation et de la pollution des eaux.

Plusieurs facteurs conditionnent la progression de cette pollution : les concentrations des polluants dans les eaux usées,

la nature des sols, la lithologie, la perméabilité de l'aquifère exploité et la profondeur de la nappe.

Les résultats acquis dans cette étude font ressortir également l'influence primordiale des variations saisonnières, ainsi que le rôle bénéfique des précipitations.

Mots clés : *Eaux usées, Eaux souterraines, Pollution, Mzamza, Maroc, Analyse en Composante Principale Normée.*

ABSTRACT

The study of the physical-chemical characteristics of groundwater of the Mzamza community, subjected to domestic and industrial wastes from Settat City (Morocco) via the Boumoussa river, shows that the quality of water of the various wells is variable and depends on a certain number of factors such as the location of the wells in relation to waste water and agricultural activity. The interpretation of analyzed

**Travail réalisé dans le cadre du projet INRA/CRDI N° 100771-004

data, the correlation between waste water and well water, and the distribution of groundwater sites into groups was carried out using Normalized Principal Components Analysis. The study revealed several sources of groundwater contamination, namely, the contamination by organic matter due primarily to the infiltration of waste waters used for irrigation, and the return of irrigation water (loaded with nitrate fertilizers), which is regarded as being the principal source of dissolved solids and inorganic nitrogen in the groundwater. Several factors influence the progression of this pollution: the concentrations of the pollutants in the waste waters, the nature of the soil, the lithology, the permeability of the aquifer in use and the depth of the water table. The results achieved in this study also revealed the paramount influence of seasonal variability and the beneficial role of atmospheric precipitation.

Keywords: *Waste waters, Groundwater, Pollution, Mzamza, Morocco, Normalized Principal Components Analysis.*

1. INTRODUCTION

Le Maroc connaît actuellement une situation de stress hydrique (moins de 1 000 m³/hab/an) et devrait connaître une pénurie d'eau (moins de 500 m³/hab/an) après 2025 (AGOUMI et NAJI, 1998; TAZI *et al.*, 2001). Les

changements climatiques pourraient exacerber les impacts négatifs de la rareté, de la disparité spatio-temporelle et de la forte dégradation qui caractérisent les ressources en eau dans une région semi-aride.

La ville de Settat située dans la région de la Chaouia-Ouardigha, à vocation essentiellement agricole, se trouve particulièrement touchée par ce problème du fait de sa démographie croissante et du développement continu du secteur industriel. Les rejets liquides d'origines domestiques, agricoles et industrielles sont déversés directement dans l'oued Boumoussa qui traverse la ville du sud vers le nord. Ce dernier, transformé en un égout à ciel ouvert à la sortie de la ville, disparaît en s'infiltrant dans le sol sur une distance d'à peu près huit kilomètres. En période de hautes eaux et à l'occasion des rares crues, ce cours d'eau peut s'étaler sur une distance de 12 km vers le nord à partir du plateau de Settat. Le long de son passage, les agriculteurs riverains de la communauté rurale Mzamza l'utilisent pour l'irrigation de cultures céréalières et fourragères (Figure 1).

De nombreuses études y ont été conduites, précisant différents états physico-chimiques des eaux souterraines. Elles ont mis en évidence une importante pollution par les nitrates (KHOLTEI, 2002; KHOLTEI *et al.*, 2003; MOULLARD et HAZAN, 1960). La présente étude, qui s'inscrit dans la suite de ces travaux, se propose, d'une part, de caractériser la qualité des eaux usées brutes de la ville de Settat des eaux de l'oued

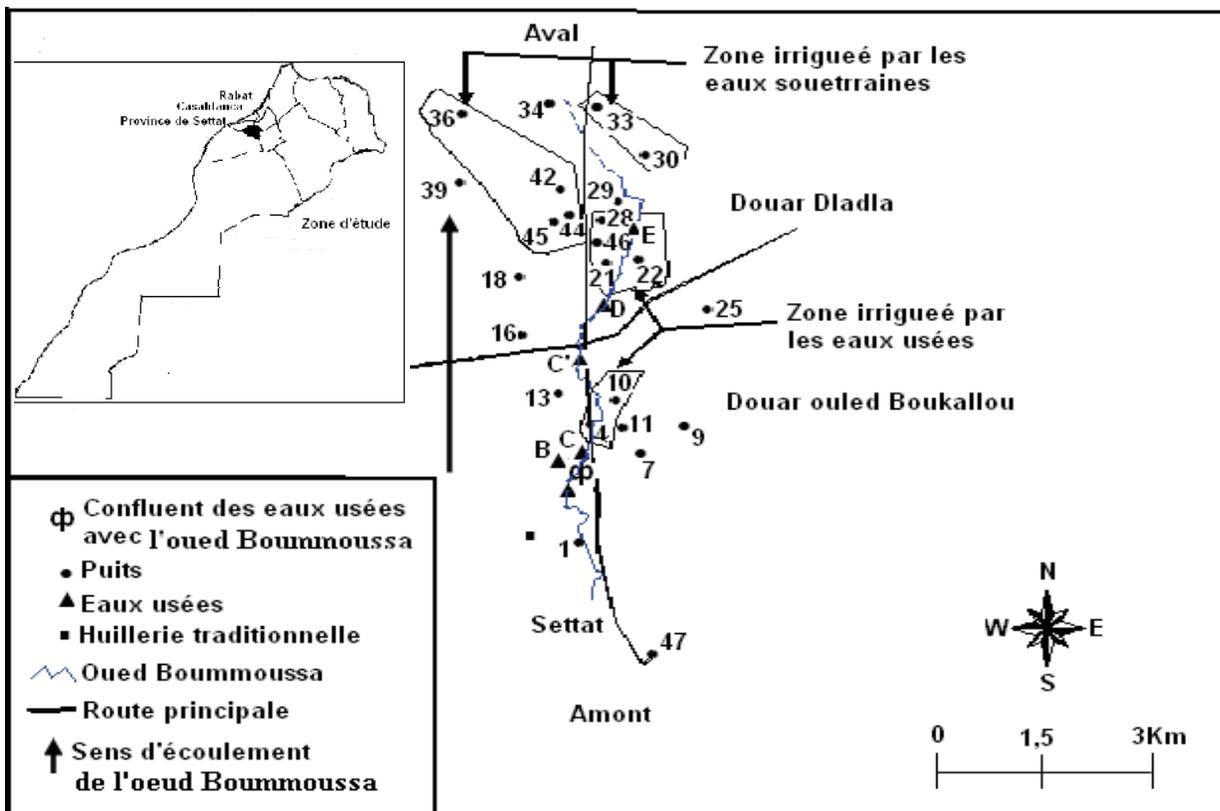


Figure 1. Localisation géographique des sites considérés.
Geographic location of the considered sites.

Boummoussa et des eaux souterraines de la communauté Mzamza, et, d'autre part, de faire l'inventaire des causes de pollution d'origine naturelle et anthropique et d'évaluer l'impact de cette pollution sur la qualité des eaux souterraines de la zone d'étude sur la base des procédés analytiques et statistiques.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Milieu d'étude

La ville de Settat, chef lieu de la région de la Chaouia-Ouardigha, est située à 70 km au sud de Casablanca. Elle est implantée sur un plateau dit « plateau de Settat ». L'agglomération couvre une superficie d'environ un million d'hectares dans la vallée de l'oued Boummoussa à une cote moyenne de 360 m d'altitude. Une série de collines culminantes à la côte 420 m en rive gauche, à la côte 410 m en rive droite, ceinturent la ville (EL BOUQDAOUI, 1995). La zone d'étude, étendue sur une surface de 8 000 hectares, concerne plusieurs douars de la communauté Mzamza (ouled Saad, ouled Boukallou, Dladla, etc.). Les douars ouled Boukallou et Dladla sont situés juste au nord de la ville de Settat et sont traversés par l'oued Boummoussa (Figure 1).

La ville de Settat, ainsi que la région d'étude, sont soumises à un climat semi-aride mésothermique (20 °C en moyenne) avec une moyenne annuelle des précipitations de l'ordre de 400 mm (EL BOUQDAOUI, 1995; EL MANSOURI *et al.*, 1992).

La zone d'étude (communauté Mzamza) est une zone charnière entre le plateau de Settat au sud et la plaine de Berrechid au nord. Cette zone témoigne d'une tectonique plioquaternaire par l'existence de failles importantes. Ces deux ensembles (plateau de Settat et plaine de Berrechid) sont formés de roches sédimentaires sur lesquelles vient se superposer la couverture quaternaire récente. La plaine de Berrechid se caractérise par des affleurements de limons argileux quaternaires ou de grès calcaires pliocènes. Le plateau de Settat se situe dans une cuvette d'âge cénomanien. Les formations marno-calcaires du cénomanien, qui affleurent largement sur le plateau de Settat, disposent d'une nappe de faible extension participant en partie à l'alimentation de la nappe plioquaternaire de Berrechid (EL BOUQDAOUI, 1995; OFFICE NATIONAL DE L'EAU POTABLE, 1997).

Les limons forment la quasi totalité du recouvrement de la région. Leur rôle hydrogéologique est donc très important, du fait qu'ils mettent en charge localement la nappe de formation sablo-gréseuse du plioquaternaire. Cependant, l'existence d'une nappe libre dans une grande partie de la plaine de Berrechid

implique une alimentation de celle-ci à partir des infiltrations du réseau de surface, voire localement une perméabilité verticale non négligeable des limons de recouvrement (EL BOUQDAOUI, 1995; OFFICE NATIONAL DE L'EAU POTABLE, 1997).

Le plioquaternaire constitue le seul niveau aquifère étendu digne d'intérêt dans toute la région de la plaine de Berrechid (EL BOUQDAOUI, 1995; OFFICE NATIONAL DE L'EAU POTABLE, 1997).

2.2 Sites d'études

Dans la communauté Mzamza, pour l'étude de la qualité des eaux souterraines, 24 puits ont été choisis selon des critères multi-paramétriques, dont le niveau piézométrique, la conductivité électrique des eaux de puits et la localisation du puit par rapport aux rejets des eaux usées. Les points de prélèvement sont situés de part et d'autre de l'axe de pollution matérialisé par l'oued Boummoussa et suivant le sens d'écoulement (Figure 1). Les puits témoins retenus sont les plus éloignés de l'oued et sont caractérisés à la fois par des eaux à conductivité faible et une profondeur moyenne (puits 9, 25 et 36). Ils sont situés respectivement à 1,15, 2,025 et 2,525 km de l'oued.

Les stations retenues pour la caractérisation des eaux usées se répartissent comme suit (Figure 1) :

L'affluent A est situé sur l'oued Boummoussa, en amont du confluent avec les rejets des eaux usées, à environ 4 km de la ville de Settat, il sert de témoin;

L'effluent B représente les eaux usées sortant du collecteur principal, il représente à la fois les eaux usées domestiques, les eaux industrielles et les eaux pluviales à des proportions très variables dans le temps et selon les conditions climatiques;

L'affluent C est situé sur l'oued Boummoussa, à environ 100 m du confluent principal, pour qu'on puisse présumer que le mélange des eaux de l'oued et les eaux usées sortant du collecteur y est complet;

L'affluent C' est situé sur l'oued Boummoussa en aval, à 2 km du confluent.

L'affluent D reçoit les eaux drainées par les stations C et C' et se situe à 3 km du confluent.

L'affluent E se trouve à environ 3,5 km du confluent ou l'oued se perd en période estivale par évaporation, infiltration et surtout par pompage par les agriculteurs riverains.

2.3 Méthodes d'analyses

Le long de l'oued Boummoussa et sur toute la région étudiée, les échantillons d'eau ont été prélevés mensuellement, de novembre 2003 à octobre 2004.

À chaque prélèvement, la température, la conductivité électrique et le pH ont été mesurés *in situ*. L'oxygène dissous a été dosé par la méthode de Winkler (RODIER et al., 1996).

Les échantillons d'eau ont été conservés à 4 °C pendant le transport et au laboratoire, puis ont été analysés dans les 24 heures qui suivent. Les méthodes d'analyses sont celles préconisées par les normes AFNOR (1997) et par RODIER (1996).

Les nitrates, les nitrites, les ions ammoniums, les sulfates et les ortho phosphates ont été dosés par spectrophotométrie. Le dosage des chlorures, du calcium, du magnésium et des carbonates a été effectué par titrimétrie. La demande chimique en oxygène est déterminée en adoptant la méthode normalisée Afnor (T90-101). La demande biochimique en oxygène pendant cinq jours est effectuée selon Rodier par la méthode instrumentale (RODIER *et al.*, 1996). Le spectrophotomètre à flamme est utilisé pour mesurer les concentrations du potassium et du sodium.

L'étude de la typologie de la pollution des eaux souterraines de la région d'étude a été basée sur l'Analyse en Composantes Principales Normées (A.C.P.N). Les valeurs propres, les cartes factorielles et les cercles de corrélations ont été obtenus avec le logiciel XLSTAT (WYSUFORMS, 2004).

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats obtenus sont représentés sur les figures 2 à 6.

3.1 Aspect qualitatif des eaux usées de la ville de Settat

La station B présente une contamination considérable des eaux avec des teneurs élevées en demande biochimique en oxygène (DBO_5), en demande chimique en oxygène (DCO), en matière en suspension, en ortho phosphates, en ions ammoniums et en nitrites (Figure 2). À ces paramètres s'associent des teneurs faibles en oxygène qui sont presque nulles pendant la période estivale (2 %).

La demande chimique en oxygène est très variable, la valeur minimale est de 228 mg d' O_2 /L, alors que la valeur maximale atteinte est de 956 mg d' O_2 /L. Le rapport DCO/ DBO_5

varie de 0,88 à 2,5, les valeurs minimales sont notées lors des événements pluvieux. La grande variabilité de la fraction de la matière organique biodégradable pourrait être liée, d'une part, à la pluviométrie qui intervient par une dilution des matières dissoutes et en suspension et, d'autre part, à l'origine de la contamination domestique ou industrielle (DEGRÉMONT, 1989).

3.2 Aspect qualitatif des eaux de l'oued Boummoussa.

Au niveau de la station A, située en amont du site de pollution, l'eau est caractérisée par de faibles valeurs des indices de pollution chimique (chlorures, nitrite, nitrates, ions ammoniums et ortho phosphates) et organique (DCO et DBO_5), ainsi que par des valeurs élevées en oxygène (Figure 2). Le pH est légèrement alcalin, sa valeur est de 7,83, et l'ensemble du dioxyde de carbone est, par conséquent, présent dans l'eau essentiellement sous forme de bicarbonates (FEKHAOUI et PATTEE, 1993).

Sur l'oued Boummoussa, au niveau de la station C, la DCO et la DBO_5 sont très élevées (512 mg d' O_2 /L et 267 mg d' O_2 /L en moyenne respectivement) et l'oxygène se trouve en quantité très réduite (14,42 % en moyenne). En relation avec ces conditions, l'ion ammonium atteint des valeurs moyennes de 68,28 mg/L et représente la principale forme de l'azote. Les chlorures, les sulfates et les ortho phosphates sont abondants (890 mg/L, 490,83 mg/L, et 4,38 mg/L en moyenne respectivement); l'alcalinité, la dureté et la conductivité sont à leurs plus hautes valeurs (946 mg/L en bicarbonates, 247 mg/L en magnésium, 249 mg/L en calcium, et 3 002 μ S/cm pour la conductivité). Les valeurs de ces paramètres dépassent largement les normes marocaines de 2002 relatives à la qualité des eaux destinées à l'irrigation qui sont de 2 mS/cm pour la conductivité, 350 mg/L pour les chlorures, 250 mg/L pour les sulfates et 518 mg/L pour les bicarbonates.

En allant vers l'aval (stations C', D et E), la situation moyenne s'améliore pour la plupart des paramètres. Les valeurs moyennes de la DCO et de la DBO_5 diminuent de façon significative jusqu'à la station E, pendant que la teneur en oxygène dissous remonte en décrivant le classique (courbe en sac) et que la teneur en ammonium se réduit progressivement. Ce gradient d'auto-épuration est assez régulier; toutefois, les sulfates, les chlorures et la conductivité n'enregistrent pas une réduction importante, certainement sous l'influence des couches salifères du bassin versant.

On constate donc que la macro-pollution organique, due aux usées de la ville de Settat, est ressentie au moins jusqu'à la station E, sur une distance de 3,5 km du cours de oued Boummoussa.

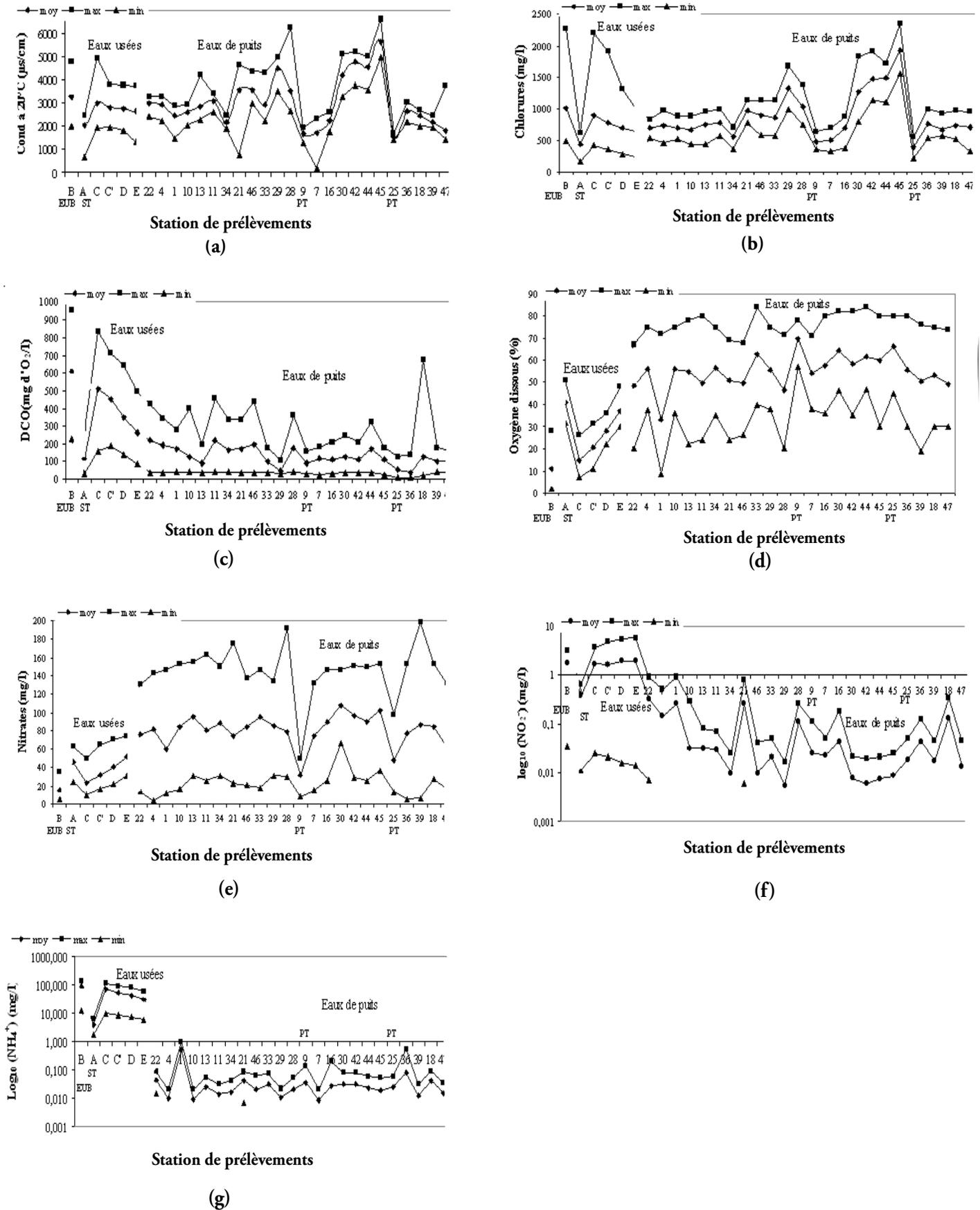


Figure 2. Évolution spatiale des valeurs moyennes, minimales et maximales des principaux paramètres indicateurs de pollution dans les eaux usées et les eaux de puits. EUB : Eaux usées brutes - ST : Station témoin PT : Puits témoin.
 Spatial evolution of the mean, minimal and maximum values of the principal indicator parameters of pollution in waste water and well water. EUB: Raw waste water. ST: Control station. PT: Control well.

L'efficacité de l'auto-épuration de l'eau est variable avec le temps. En fait, ce phénomène est la résultante de plusieurs processus, la dilution des eaux polluées de l'oued Boummoussa, la fixation des polluants dans les sédiments et les organismes, leur évacuation vers l'aval et leur destruction sur place (pour ceux qui sont dégradables). Ces actions se manifestent de façon différente selon les saisons, en fonction de la température, de la lumière, du débit, etc.

3.3 Aspect qualitatif des eaux souterraines de la zone d'étude

Dans la communauté des Mzamza, les eaux souterraines constituent une ressource importante d'eau pour l'approvisionnement de la population et pour l'irrigation. Il est donc impératif dans cette région d'évaluer l'effet des eaux usées sur la qualité physico-chimique des eaux de puits et de comparer la qualité de ces eaux aux normes de potabilité de l'eau de boisson et de l'eau pour l'irrigation de plusieurs cultures.

3.3.1 Paramètres physiques

La température des eaux de puits étudiés montre une stabilité annuelle et spatiale. Elles n'excèdent pas 25 °C, valeur tolérée pour une eau destinée à la consommation humaine par la France (NORMES FRANÇAISES, 1999) et par le Maroc (NORMES MAROCAINES, 2002).

Le pH des eaux souterraines répond aux normes de potabilité, il varie entre 6,65 et 8,62. La conductivité montre une large variation de la composition chimique des eaux, elle varie entre un minimum de 195 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et un maximum de 6 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. De l'amont vers l'aval hydraulique, on constate une minéralisation croissante de l'eau des puits (Figure 2). Ce phénomène apparaît identique à celui signalé par KHOLTEI (2002) dans les eaux de puits de la même région. En se référant aux normes marocaines de potabilité (Tableau 1), seules les eaux de puits témoins (9 et 25) peuvent être considérées comme acceptables (Figure 2).

Par ailleurs, l'étude stratigraphique a montré l'existence d'une couche gypsifère dans l'infracénomien : cette couche

pourrait jouer un rôle dans l'augmentation de la teneur en sels des eaux de puits à l'aval par des remontées des nappes profondes dans la plaine de Berrechid ou bien par les communications souterraines avec la nappe du plateau de Settat où la couche de gypse est moins profonde (EL BOUQDAOUI, 1995).

Le pourcentage moyen de saturation en oxygène dissous dans les eaux de puits témoins est dans les normes de potabilité (Tableau 1). L'effet de la pollution se manifeste principalement dans les eaux de puits 4, 11, 13, 21, 22, 28 et 46 situés à proximité des eaux usées. Leurs valeurs varient respectivement de 37,5, 24, 22, 24, 20, 20 et 26 % à 75, 80, 78, 69, 67, 71,4 et 68 %. La distance à la source de pollution est de 125 m pour le puits 4, 450 m pour le puits 13, 475 m pour le puits 21, 10 m pour le puits 22, 800 m pour le puits 28 et 500 m pour le puits 46.

Le faible pourcentage de saturation en oxygène dissous est dû non seulement à l'absence de végétaux capables de photosynthèse, au faible contact eau atmosphère (AIT ABDELAALI 1990), mais aussi aux infiltrations possibles d'eaux usées. L'oxygène dissous peut se réduire par l'activité des bactéries décomposant la matière organique présente (FEKHAOUI et PATTEE 1993).

3.3.2 Paramètres chimiques

Les valeurs élevées de la DCO dépassent les normes dans toutes les eaux de puits sauf pour les eaux des puits témoins 25 et 36, montrant la charge importante de ces eaux en matières organiques (Figure 2). Les valeurs les plus élevées sont enregistrées au niveau des puits 4, 11, 21, 22, 28 et 46 situés respectivement à 125 m, 475 m, 10 m, 800 m et 500 m de la source de pollution. Dans les eaux des puits 4 et 11 où la nature du milieu aquifère est marno-calcaire perméable, la DCO atteint 342 $\text{mg d'O}_2/\text{L}$ pour le puits 4 de profondeur 17,6 m et 457 $\text{mg d'O}_2/\text{L}$ pour le puits 11 de profondeur 18,6 m. Les eaux des puits 21, 28 et 46, dont la profondeur est 17,4, 9,4 et 11,6 m respectivement, présentent une DCO élevée. Elle est de 336, 360 et 440 $\text{mg d'O}_2/\text{L}$ respectivement. La profondeur faible de la nappe favorise l'infiltration des eaux usées, bien que la géologie de surface argileuse soit moins perméable.

Tableau 1. Normes de potabilité marocaines et françaises.

Table 1. Moroccan and French standards for drinking water.

Paramètres Normes	DCO (mg d'O ₂ /L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	NO ₂ ⁻ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	O ₂ (%)	Cl ⁻ (mg/L)	Conductivité (μS/cm)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)
Maroc (1)	25	50	0,1	0,5	70	750	2700	0,7
France (2)	-	50	0,1	0,5	75	200	400	-

Dans la zone d'étude, même si les points d'eaux situés à proximité des eaux usées présentent une contamination par les ions ammoniums, leurs teneurs ne dépassent pas les normes marocaines (Tableau 1). L'absence de l'azote ammoniacal traduit habituellement un processus de dégradation complète de la matière organique (RODIER *et al.*, 1996).

Les nitrites croissent dans les eaux de puits situés à proximité des eaux usées (Figure 2). Leur présence en quantité importante témoignerait d'une contamination récente résultant de l'infiltration des eaux usées et d'un déficit du milieu en oxygène (HAKKOU, 2001; LYAKHLOUFI *et al.*, 1999) et/ou d'une réduction des nitrates par la matière organique (EL AMRANI-PAAZA *et al.*, 1996).

De même, la qualité de l'eau est médiocre par rapport au paramètre nitrates puisque seuls les puits témoins 9 et 25 respectent les normes marocaine et française de 50 mg/L (Tableau 1). Les valeurs moyennes maximales atteignent 107 mg/L dans le puits 30 et 95 mg/L dans le puits 13. Ces derniers sont situés à des distances différentes des eaux usées : à 1 325 m et à 450 m respectivement. Ces résultats montrent une pollution par les nutriments, dont les origines sont probablement liées aux engrais utilisés dans la région (LHADI *et al.*, 1996), en vue de fertiliser au maximum le sol, d'une part, et, d'autre part, à l'oxydation des nitrites par les bactéries de la nitrification suite à l'infiltration des eaux usées (AGHZAR *et al.*, 2001).

Toutes les eaux de puits montrent des teneurs faibles en orthophosphates. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les orthophosphates sont facilement fixés par le sol (RODIER *et al.*, 1996).

Une situation du même type est constituée par l'huilerie de Settat dont l'effet apparaît réellement au niveau du puits 1 situé à proximité. En effet, le déversement des margines dans la nature réduit considérablement la teneur en oxygène dissous aux mois de novembre et décembre, à 8,5 et à 9 % respectivement. Les teneurs en DCO et en ions ammoniums sont aussi élevées, elles sont de 280 mg d'O₂/L et 1,02 mg/L respectivement au mois de novembre et de 270 mg d'O₂/L et 0,97 mg/L respectivement au mois de décembre.

Sur le plan hydrochimique, les eaux des puits considérées présentent de fortes concentrations des éléments majeurs (Na⁺, Cl⁻, K⁺, Ca²⁺, etc.) que nous avons dosés. Nous ne retiendrons ici que les faits importants qui caractérisent les eaux souterraines de la région étudiée. Les eaux sont fortement minéralisées, très dures (de 80 à 213 mg/L en calcium, de 54 à 191 mg/L en magnésium) et très chlorurées (de 535 à 1 239 mg/L en chlorures). En comparant ces résultats avec les normes préconisées par la France, seules les eaux des puits témoins 9 et 25 montrent des valeurs acceptables.

La présence du calcium et du magnésium reflète la réaction de dissolution des roches et des dépôts calcaires essentiellement, et d'autres minéraux comme la dolomite (CUSTODIO, 1983; PLUMMER *et al.*, 1990).

Les valeurs moyennes en chlorures évoluent de la même manière que la conductivité pour l'ensemble des points de mesure. Les chlorures pourraient provenir des rejets industriels, de la percolation à travers les terrains salés (KHOLTEI *et al.*, 2003) et de l'infiltration des eaux d'irrigation (KHOLTEI, 2002; LHADI *et al.*, 1996).

4. TYPOLOGIE SPATIO-TEMPORELLE ET RYTHME SAISONNIER DU MILIEU

L'analyse hydrochimique a montré la mauvaise qualité des eaux et l'existence d'une pollution anthropique se traduisant par des valeurs importantes en chlorures, en sels azotés et en matières organiques (DCO).

Pour déterminer l'origine des concentrations observées et pour mieux évaluer l'effet des eaux usées sur la qualité des eaux de puits, nous avons utilisé une méthode statistique dite Analyse en Composante Principale Normée (A.C.P.N) qui permet de transformer les variables quantitatives initiales, toutes plus ou moins corrélées entre elles, en nouvelles variables quantitatives, non corrélées, appelées composantes principales (DAVIS, 1984). C'est une méthodologie largement utilisée pour interpréter les données hydrochimiques (DOMENICO et SCHWARTZ 1990; EL AMRANI-PAAZA *et al.*, 1994), sept variables du milieu ont été mesurées (Tableau 2).

4.1 Analyse en composante principale de toutes les eaux

Dans un premier temps nous avons réalisé une analyse en composantes principales touchant à toutes les stations (eaux usées et eaux de puits) et aux différents mois considérés (Figure 3).

Le cercle de corrélation formé par les axes F1 et F2 donnant 76 % de l'information totale montre, selon l'axe F1, une opposition entre les eaux fortement minéralisées particulièrement riches en chlorures et les eaux faiblement minéralisées (Figure 3c). Selon l'axe F2, on note une opposition entre les eaux polluées par les nitrates et les eaux polluées par la matière organique. Il définit ainsi un gradient de pollution croissant de droite à gauche, qui se traduit par une diminution de l'oxygène et une augmentation de la DCO, des ions ammoniums et des nitrites (Figure 3c).

Tableau 2. Codes utilisés pour le traitement de l'A.C.P.N.

Table 2. Codes used for the treatment of the Normalized Principal Components Analysis.

Campagne	Nov-03	Déc-03	Janv-04	Fév-04	Mars-04	Avril-04	Mai-04	Juin-04	Juil-04	Août-04	Sept-04	Oct-04												
Code	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S												
Variables	Conductivité à 20 °C		Nitrates (NO ₃ ⁻)		Nitrites (NO ₂ ⁻)		Ions ammoniums (NH ₄ ⁺)		Oxygène dissout (%)		Demande chimique en oxygène		Chlorures (Cl)											
Code	Cond		NO3		NO2		NH4		O2		DCO		Cl											
Puits	1	4	7	9	10	11	13	16	18	21	22	25	28	29	30	33	34	36	39	42	44	45	46	47
Code	1	4	7	9	10	11	13	16	18	21	22	25	28	29	30	33	34	36	39	42	44	45	46	47
Eaux usées	A		B		C		C'		D		E													
Code	A		B		C		C'		D		E													

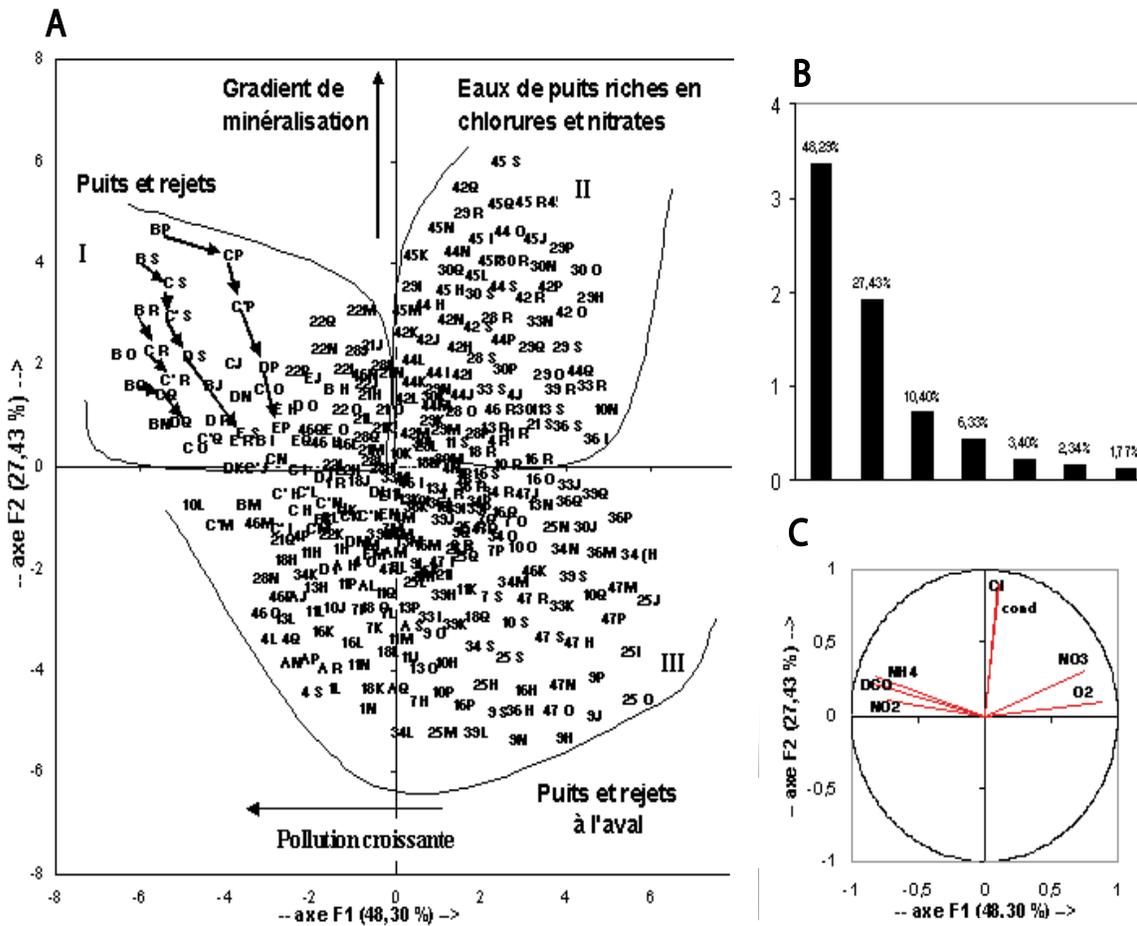


Figure 3. Représentation graphique dans le plan 1 x 2 de la première analyse en composantes principales normées (eaux usées et eaux de puits de la zone d'étude). A- Carte factorielle des stations. B- Pourcentage d'inertie des composantes principales. C- Carte factorielle des variables.

Graphical representation in the F1x2 plane of the first analysis in normalized principal components (waste water and well water of the study zone). A- Factorial map of the stations. B- Inertia percentages of the principal components. C- Factorial map of the variables.

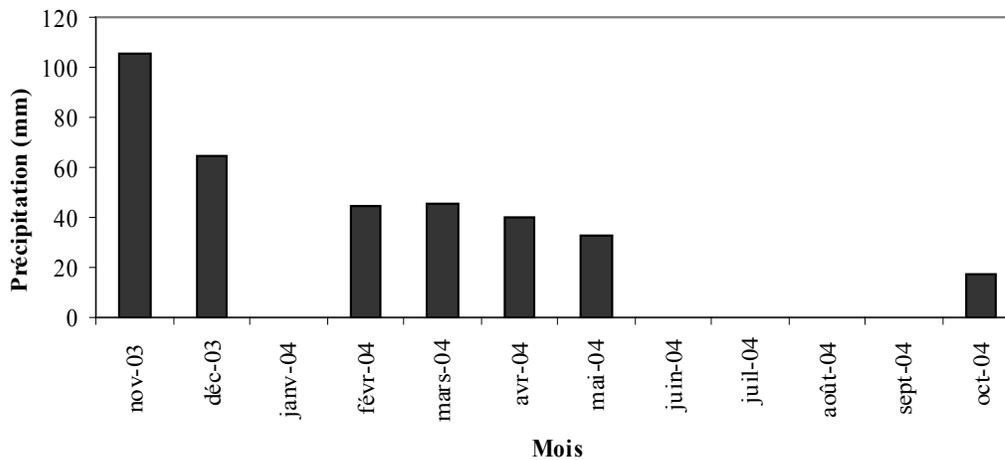


Figure 4. Évolution mensuelle de la pluviométrie pendant la période d'étude.
Monthly evolution of rainfall during the study period.

Le graphe des individus montre que les stations se succèdent, selon une structure en V, en trois groupements (I, II et III).

- **Le groupement I** marque manifestement la zone de pollution intense. Il reproduit les stations d'eaux usées et les stations d'eaux de puits situées à proximité des eaux usées (21, 22, 46 et 28) dénotant ainsi une contamination de ces eaux de puits par les eaux usées.

Pour les eaux de puits, on assiste à une contamination importante surtout pendant la période hivernale (21, 22, 46 et 28 aux mois de mars, novembre et avril) (Figure 3). Cette observation est confirmée par les relevés de précipitations enregistrées pendant cette période (Figure 4). En effet, les polluants déposés en période de sécheresse sur le sol et au niveau de la zone non saturée sont entraînés par les pluies; les terrains de nature marno-calcaire perméable et la pente forte favorisent ainsi leur infiltration vers la nappe (EL BOUQDAOUI, 1995; KHOLTEI *et al.*, 2003).

Au niveau de la zone réceptrice des eaux usées, il y a une baisse sensible de la pollution vers l'aval. Les stations C, C', D et E se succèdent dans la direction du gradient de pollution décroissant, de gauche à droite, qui se traduit par une augmentation de l'oxygène et une diminution de la DCO, d'ions ammoniums et des nitrites. La réduction des teneurs de ces éléments serait tributaire de plusieurs facteurs : 1) la diminution de la charge des eaux en matière en suspension résultant du phénomène d'auto-épuration, 2) la réduction de la contamination par le sol (absorption, bioaccumulation et/ou biodégradation des matières organiques, et 3) la fréquence de la pluie. Cette dernière intervient de façon prépondérante dans cette étude. En effet, pendant la période

sèche, les stations se trouvent plus chargées en polluants organiques (BP, CP, BS, CS, BQ, DQ, etc.) (Figure 3). L'importance du charriage des polluants par ruissellement varie selon les différentes situations : nature du sol, intensité des précipitations, période de mesure, pente du terrain, etc. (KHOLTEI *et al.*, 2003).

- **Le groupement II** fait apparaître les puits riches en chlorures et en nitrates.
- **Le groupement III** peut être considéré comme le pôle de qualité physico-chimique moyenne. Il comprend la plupart des données de la station témoin A et certaines des stations situées à l'aval, soit celles des compagnes de décembre 2003, janvier et avril 2004, ainsi que certaines données des stations d'eaux de puits.

4.2 Analyse en composante principale des eaux de puits seulement

Les résultats de la première analyse ne mettent pas en évidence la variabilité inter-station des eaux de puits étudiées. Ainsi, nous avons été amenés à faire une nouvelle analyse en nous basant seulement sur les données relevées dans les eaux de puits.

Le traitement a été poussé jusqu'à trois axes factoriels qui expriment respectivement 44,82, 23,68 et 11,64 % de la variance totale du nuage de points, soit une inertie cumulée des trois axes (F1, F2 et F3) de 79 et 54 % (Figure 5).

Dans les plans factoriels F1 x F2, on retrouve à peu près la même configuration que celle de la première analyse. Cette

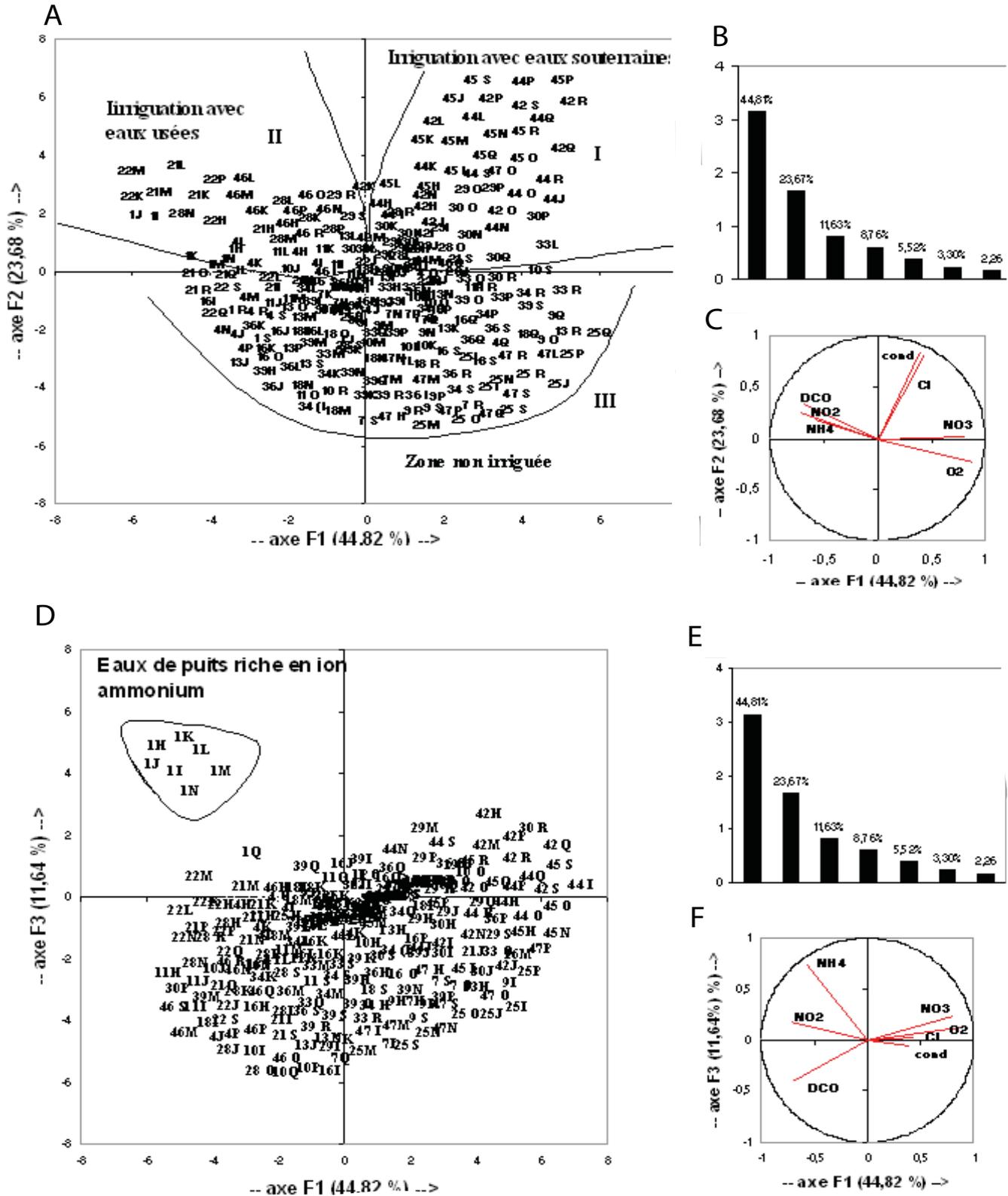


Figure 5 Représentation graphique dans les plans F1 x F2 et F1 x F3 de la deuxième analyse en composantes principales normées (eaux de puits de la zone d'étude). A et D- Cartes factorielles des stations. B et E- Pourcentages d'inertie des composantes principales. C et F- Cartes factorielles des variables.

Graphical representation in the F1x F2 and F1x F3 planes of the second analysis in normalized principal components (well water of the study zone). A and D- Factorial maps of the stations. B and E- Inertia percentages of the principal components. C and F- Factorial maps of the variables.

dernière permet de subdiviser le site en trois groupes de puits, qui diffèrent par leur qualité physico-chimiques (Figure 5A) :

- **Groupe I** (puits dont l'eau est de bonne qualité) : Il s'agit des puits 9, 25, 7, 39, 36, 47, 16, 18, 13 et 34 situés dans la zone non irriguée.
- **Groupe II** : Il s'agit des puits 42, 44, 45, 30, 47O, 30O, 30R, etc. : Ce sont des puits situés dans une zone irriguée avec les eaux souterraines dont l'eau est bien oxygénée (> 60 %), très minéralisée (> 4 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), riche en chlorure (> 1 200 mg/L) et elle présente une teneur en NO_3^- (> 90 mg/L) (Figure 2).
Par ailleurs, le diagramme NO_3^- -Cl (Figure 6) montre que l'augmentation des nitrates s'accompagne d'une augmentation des chlorures, particulièrement pour les échantillons du groupe II, indiquant un enrichissement par suite du retour des eaux d'irrigation (Figure 6). Ce dernier couplé avec l'évapotranspiration facilitent les processus de dissolution des minéraux et mettent en solution des fertilisants et des résidus de l'agriculture, conduisant ainsi à une diminution du calcium, des bicarbonates et des sulfates en faveur du sodium, du potassium, des chlorures et des nitrates (CARDONA *et al.*, 2004; TRABELSI *et al.*, 2005).
- **Groupe III** (puits dont l'eau est de mauvaise qualité) : il s'agit des puits 1, 10, 11, 21, 22, 46, 4 et 28 situés au voisinage des rejets des eaux usées et/ou dans une zone irriguée avec les eaux usées. Ces eaux sont peu oxygénées (< 36 %) et riches en matières organiques (Figure 2).

L'axe F3 est déterminé par les ions ammoniums et semble caractériser le puits 1. Les apports des margines, déversés dans la nature sans traitement préalable, entraînent une dégradation de la qualité des eaux de ce puits qui devient mauvaise en mars et avril (1L, 1M), voire très mauvaise en novembre, décembre et janvier (1H, 1I, 1J) (Figure 5E). L'huilerie, activité saisonnière, représente un foyer de pollution menaçant car ses effluents sont très riches en éléments azotés et en matières organiques (MEBIROUK *et al.*, 2002).

Deux origines de pollution des eaux sont mises en évidence : 1) une pollution engendrée par l'utilisation des engrais et le retour des eaux d'irrigation à la nappe, et 2) une pollution due à l'apport direct des eaux usées.

5. CONCLUSION

Les données recueillies au cours de notre étude ont permis de dresser un portrait de la qualité physico-chimique des eaux de l'oued Boummoussa et des eaux souterraines de la région. Les eaux de l'oued ainsi que les eaux de certains puits échantillonnés sont polluées. Cependant, l'étude que nous venons de mener, confirmée par d'autres études aussi récentes, montrent des signes évidents de pollution.

L'Analyse en Composantes Principales Normées des données chimiques nous a permis de faire ressortir la corrélation existante entre eaux usées et eaux de puits, de distinguer deux

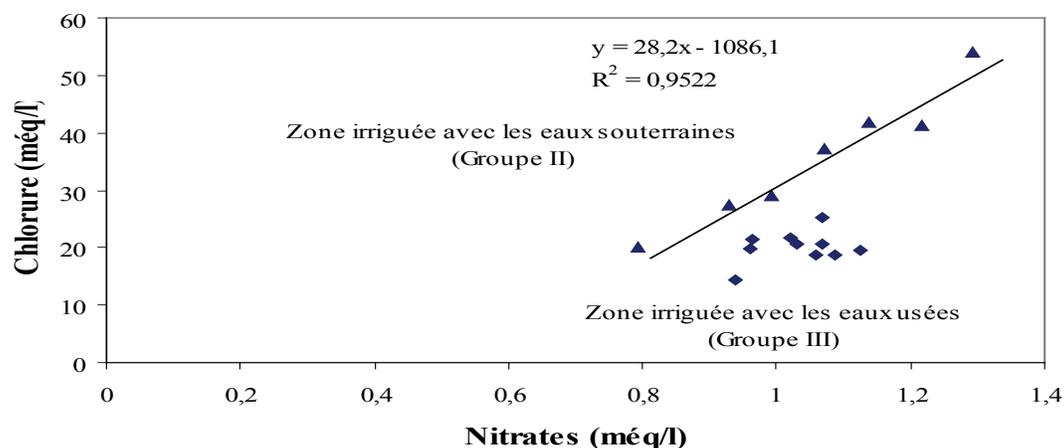


Figure 6. Variation des concentrations des chlorures en fonction des nitrates.
Chloride concentrations as a function of nitrate concentrations.

pollutions d'origine différente et de différencier une zonalité de la qualité de l'eau dans la région étudiée. La qualité physico-chimique de ces eaux de puits varie d'un groupe à l'autre en fonction de la nature des eaux d'irrigation. La dispersion des valeurs témoigne d'un mécanisme ponctuel de la pollution. Ces fluctuations pourraient entre autres être liées aux différents facteurs locaux tels que l'infiltration continue des eaux usées véhiculées par l'oued Boummoussa, l'utilisation des eaux usées à des fins d'irrigation, l'utilisation des engrais et le retour des eaux d'irrigation à la nappe. Très certainement aussi au contextes géologique et hydrogéologique de la nappe et à la perméabilité de l'aquifère exploité. La profondeur de la nappe est aussi un facteur déterminant dans la contamination des eaux, plus la nappe est profonde, plus elle est protégée contre une pollution diffuse par les nitrates.

Le problème est encore plus sérieux dans le contexte hydro-climatique de la région en raison d'un déficit hydrique prononcé pendant la saison estivale. La pluviométrie, lorsqu'elle est régulière, constitue un apport positif pour la nappe et tend à atténuer la pollution.

Tous ces résultats montrent l'acuité du problème et la nécessité d'en limiter les effets. Il devient également urgent de rationaliser l'irrigation pour lutter efficacement contre cette pollution.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGOUMI A. et A. NAJI (1998). *Changements climatiques et ressources en eau dans les pays du Maghreb*. Rapport établi dans le cadre du projet PNUD-FEM, RAB/94/G31.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (1997). *Qualité de l'eau. Tome 1: Terminologie, échantillonnage et évaluation des méthodes*. 3^e édition. Paris, France.
- AGHZAR N., H. BELLOUTI et B. SOUDI (2001). Pollution nitrique des eaux souterraines au Tadla (Maroc). *Rev. Sci. Eau*, 15, 459-492.
- AIT ABDELALI N. (1990). *Influence du substrat et du courant sur la distribution des invertébrés benthiques de trois cours d'eau du Haut-Atlas Marocain*. Thèse de 3^e cycle, Université Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, Maroc, 189 p.
- CARDONA A., J.J. CARRILLO-RIVERA., R. HUIZAR-ALVAREZ et E. GARNIEL-CASTRO (2004). Salinization in coastal aquifers of arid zones: an example from Santo Domingo, Baja California, Sur Mexico. *Environ. Geol.*, 45, 350-366.
- CUSTODIO E. (1983). *Hidrologia subteranea*, OMEGA (Éditeur), Barcelone, Espagne, 2 tomes, 2 350 p.
- DAVIS J.C. (1984). *Statistics and data analysis in geology*. 2^e édition, WILEY (Éditeur), New-York, États-Unis, 550 p.
- DEGRÉMONT S.A. (1989). *Mémento technique de l'eau, édition du cinquantenaire*, 9^e édition. LAVOISIER (Éditeur), Paris, France, tomes 1 et 2.
- DOMENICO P.A. et F.W. SCHWARTZ (1990). *Physical and chemical hydrogeology*. WILEY INTERNATIONAL (Éditeur), New-York, États-Unis, 824 p.
- EL AMRANI-PAAZA N., J. BENAVENTE et J.J. CRUZ-SANJULIAN (1994). Aplicación del análisis de componentes principales al estudio de las características físico-químicas de las aguas del delta del río Adra (Almería, España). *Bol. Geol. Min.*, 3, 478-484.
- EL AMRANI-PAAZA N., J. BENAVENTE et J.J. CRUZ-SANJULIAN (1996). La réduction des nitrates par la matière organique dans l'aquifère du delta du rio Adra (Andalousie, Espagne). *Colloque internationale ESRA'96 : l'Eau souterraine en région agricole*, Poitiers, France.
- EL BOUQDAOUI K. (1995). *Étude géologique et géotechnique de la ville de Settat. Cartographie géotechnique et substances utiles de la province de Settat*. Thèse de 3^e cycle. Université Mohamed V, Rabat, Maroc, 183 p.
- EL MANSOURI B., M. DZIKOWSKI, F. DELAY, E. CARLIER et N. CRAMPON (1992). Calage d'un modèle mathématique en régime permanent appliqué à la nappe de Berrechid (Maroc). *Ann. Soc. Géol. Nord*, Tome 1, 2^e série, 189-193.
- FEKHAOUI M. et E. PATTEE (1993). Impact de la ville de Fès sur l'oued Sebou : étude physico-chimique. *Bull. Ins. Sci. (Rabat)*, 17, 1-12.
- HAKKOU R. (2001). *La décharge publique de Marrakech : caractérisation des lixiviats, étude de leur impact sur les ressources en eau et essais de traitement*. Thèse de Doctorat d'État, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc, 141p.
- KHOLTEI S. (2002). *Caractérisation physico-chimique des eaux usées de la ville de Settat et de Berrechid et évaluation de leur impact sur la qualité des eaux souterraines*. Thèse de Doctorat d'État, Université Hassan 1^{er}, Settat, Maroc, 162 p.
- KHOLTEI S., A. BOUZIDI, M. BONIN, M. FEKHAOUI, R. ANANE, K. SBAI et E. CREPPYE (2003). Contamination

- des eaux souterraines de la plaine de Berrechid dans la région de la Chaouia au Maroc par les métaux lourds dans les eaux usées : effets de la pluviométrie. *Vecteur Environ.*, 36, 68-80.
- WYSUFORMS (2004). *Logiciel d'enquête et solution intégrée d'EFM* (Entreprise Feedback Management). Site web consulté <http://www.wysuform.com>.
- LHADI E.K., M. MOUNTADAR et A. TOUNSI (1996). Pollution par les nitrates des eaux souterraines de la zone littorale de la province d'El Jadida (Maroc). *Hydrogeol.*, 3, 21-23.
- LYAKHLOUFI S., N. OUAZZANI, S. ER ROUANE, L. HASSANI et A. EL HEBIL (1999). Impact de l'utilisation des eaux usées urbaines brutes sur la qualité de l'eau d'une nappe alluviale près de Marrakech (Maroc). *Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse*, 135, 59-70.
- MEBIROUK M. (2002). Rejets des huileries, développement d'un procédé intégré pour la biodégradation des polyphénols dans la margine. *C.M.P.P News*, 11.
- MOULLARD L. et R. HAZAN (1960). Nappe phréatique de la plaine de Berrechid. *Ass. Gen. Helsinki*, Finlande, 25 juillet au 6 août, 52, 105-142.
- NORMES FRANÇAISES (1999). *Arrêté N°1639CM fixant les normes de potabilité des eaux destinées à la consommation humaine distribuées par les réseaux, fontaines et citernes à usage collectif*.
- NORMES MAROCAINES (2002). *Bulletin officiel N° 5062 du 30 ramadan 1423 fixant les normes de potabilité à la consommation humaine*.
- OFFICE NATIONAL DE L'EAU POTABLE (1997). *Étude du schéma directeur d'assainissement liquide de la ville de Berrechid, Maroc*. Rapport interne, 60 p.
- PLUMMER N L., J.F. BUSBY, R.W. LEE et B.B. HANSHAW (1990). Geochemical modeling of the Madison aquifer in part of Montana, Wyoming and South Dakota. *Water Resour. Res.*, 26, 1981-2014.
- RODIER J., C. BAZIN, J.P. BROUTIN, P. CHAMBON, H. CHAMPSAUR et L. RODI (1996). *L'analyse de l'eau*, 8^e édition. DUNOD (Éditeur), Paris, France.
- TAZI O., F. ABDELILAH et S. EL YOUNOUSSI (2001). Impact de la pollution sur l'unique réseau hydrographique de Casablanca, Maroc. *Sci. Chang. Plan./Sécheresse*, 12, 129-34.
- TRABELSI R., M. ZAÏRI, H. SMIDA et H. BEN DHIA (2005). Salinisation des nappes côtières : cas de la nappe nord du Sahel de Sfax, Tunisie. *Geosci.*, 337, 515-524.