

Author Query Sheet

Manuscript Information	
Journal Acronym	tENT
Volume and issue	
Author name	Boukhoubza et al.
Manuscript No. (if applicable)	313332

AUTHOR: The following queries have arisen during the editing of your manuscript. Please answer the queries by making the necessary corrections on the CATS online corrections form. Once you have added all your corrections, please press the SUBMIT button.

QUERY NO.	QUERY DETAILS
1	Please give publisher and place of publication

IMPACT DES EFFLUENTS DES HUILLERIES D'OLIVE SUR LA QUALITÉ PHYSICO-CHEMIQUE ET BIOLOGIQUE DES EAUX SOUTERRAINES DANS LA PLAINE DU HAOUZ AU SUD DE MARRAKECH (MAROC)

IMPACT OF OLIVE OIL WASTEWATER ON THE PHYSICO-CHEMICAL AND BIOLOGICAL QUALITY OF GROUNDWATER IN THE HAOUZ PLAIN, SOUTH OF MARRAKESH (MOROCCO)

F. BOUKHOUBZA¹, A. AIT BOUGHROUS¹, M. YACOUBI-KHEBIZA¹, A. JAIL², L. HASSANI²,
 L. LOUKILI IDRISSE¹ AND A. NEJMEDDINE^{1*}

¹Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Département de Biologie, Laboratoire d'Hydrobiologie,
 Écotoxicologie & Assainissement, BP 23 90, Boulevard Le Prince Moulay Abdellah, Marrakech, Maroc

²Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Département de Biologie, Laboratoire de Biologie et
 Biotechnologie des microorganismes

(Received; Accepted)

RESUME

Les eaux résiduaires de l'industrie oléicole (margines) sont des eaux acides connues pour leurs effets antibactérien et phytotoxique. Au Maroc, ces effluents sont généralement évacués dans la nature sans aucun traitement ou collectés dans de grands bassins d'évaporation qui représentent localement une source de pollution potentielle des eaux souterraines. Dans la plaine du Haouz, près de la ville de Marrakech, l'analyse de l'eau de quatorze puits, situés dans une zone agricole, proches de quatre bassins de stockage des margines issues de différents types d'huileries a montré que la qualité physico-chimique et biologique de ces eaux souterraines est largement influencée par la proximité de ces bassins. En effet, des valeurs élevées de DCO (400 mg d'O₂ L⁻¹), des polyphénols (180 mg L⁻¹) et de la conductivité électrique (1.89 mS cm⁻¹) ont été enregistrées dans les eaux du puits P5 situé à 5 m du bassin de stockage des margines provenant de l'huilerie H4 qui rejette des margines particulièrement chargées en matières organiques (290 g d'O₂ L⁻¹ de DCO). Or, la conception d'un bassin étanche, creusé au sein d'une autre huilerie plus moderne (H3) qui produit de grands volumes de margines moins chargées en polluants organiques (100 g d'O₂ L⁻¹ de DCO), a réduit considérablement l'effet de l'infiltration des margines ce qui s'est traduit par une amélioration de la qualité physico-chimique des eaux souterraines échantillonnées à proximité de ce bassin (P7 et P8). Les teneurs en matières organiques oxydables exprimées par la DCO varient de 26.7 mg L⁻¹ à 30 mg L⁻¹ d'oxygène et les teneurs en polyphénols sont situées entre 41 mg L⁻¹ et 47.6 mg L⁻¹. L'analyse de la composition globale du peuplement des puits a montré une grande richesse faunistique des eaux souterraines de la région. La biodiversité est très élevée dans les puits situés en amont des huileries et dans ceux situés suffisamment loin en aval. Elle diminue en cas de pollution de la nappe phréatique par les rejets d'huileries, et le peuplement souterrain peut disparaître complètement en cas de contamination importante.

Mots clés: stockage des margines, infiltration, qualité des eaux souterraines, faune aquatique souterraine, biodiversité

ABSTRACT

Olive Oil Waste Water (OOWW) is acidic water known for its antibacterial and phytotoxic effects. In Morocco, these effluents are generally drained into the surrounding environment without any treatment or are collected and retained in large evaporation basins, which can constitute a source of potential pollution of groundwater. The analysis of water from 14 wells, in an agricultural zone, where there are four storage basins of OOWW coming from various types of oil mills, showed that their physicochemical and biological quality is largely influenced by the presence of these basins. Indeed, high values of COD (400 mg O₂ L⁻¹), polyphenols (180 mg L⁻¹) and electrical conductivity (1.89 mS cm⁻¹) were recorded in P5 water. This well is located only 5 m from a storage basin of OOWW coming from the H4 oil mill which rejects OOWW charged with organic matter (more than 290 g of O₂ L⁻¹ of COD, on average). However, the settlement of a basin, dug close to a modern oil mill (H3), which produces large OOWW volumes but is loaded with low organic pollutant concentration (100 g of O₂ L⁻¹ of COD), reduced notably the effect of the OOWW infiltration on groundwater. This resulted in the improvement of the groundwater physicochemical quality near this basin (P7 and P8); the organic matter contents expressed by COD vary from 26.7 mg L⁻¹ to 30 mg L⁻¹ and the polyphenol contents are on average between 41 mg L⁻¹ and 47.6 mg L⁻¹. The analysis of the total well water fauna showed a great taxonomic richness with variations in time and space. The biodiversity decreases in groundwater polluted by the oil mill waste and the underground fauna disappears completely if the degree of contamination of groundwater is high.

Keywords: OOWW storage, infiltration, groundwater quality, aquatic underground fauna, biodiversity

INTRODUCTION

Le Maroc est souvent cité parmi les principaux pays producteurs d'huile d'olive du bassin méditerranéen [1]. La moitié de la superficie arboricole nationale, soit 440,000 ha, est destinée à l'oléiculture [2] et sa production annuelle moyenne est de 35,000 tonnes [3].

Les demandes croissantes, en relation avec la promotion des vertus bénéfiques pour la santé de l'huile d'olive, ont entraîné récemment une croissance de la production de cette matière vitale. Des méthodes modernes d'extraction de l'huile d'olive, basées sur la centrifugation, sont de plus en plus utilisées afin d'accélérer le processus de trituration; or ces techniques, qui permettent l'extraction d'un maximum d'huile, produisent plus de margines (150 kg/100 kg d'olives) que les méthodes traditionnelles (40 kg/100 kg d'olives) [2].

Cette activité oléicole génère potentiellement des problèmes environnementaux majeurs liés à la mauvaise gestion des rejets huiliers. Ces déchets polluants, qui sont fortement chargés en matière organique, affectent particulièrement les eaux souterraines en raison de leur infiltration à travers le sol. Ils entraînent ainsi une augmentation de l'acidité, de la charge organique et minérale de l'eau et engendrent un enrichissement des eaux en substances toxiques notamment en composés phénoliques [4-7] qui ont des effets négatifs sur la qualité de l'eau, sur le peuplement animal et sur les micro-organismes des milieux aquatiques récepteurs [8-10].

Face aux exigences environnementales, une politique de traitement de ces effluents avant leur évacuation dans les milieux naturels devrait être imposée. Toutefois, les procédés de traitement sont souvent limités à cause du manque de moyens et d'équipements adéquats [11]. En fait, la solution généralement adoptée au Maroc est l'accumulation des rejets dans de grands bassins dans lesquels les margines s'évaporent naturellement et plus ou moins vite, du fait de la température. Dans la majorité des cas, ces cuvettes ne sont pas étanches; il en résulte un risque d'infiltration et de contamination des nappes phréatiques.

Les recherches qui traitent de l'impact des effluents oléicoles sur les milieux récepteurs aquatiques ont souvent concerné l'aspect physico-chimique seul. Cependant, on reconnaît actuellement de plus en plus l'insuffisance des analyses physico-chimiques pour l'évaluation de l'état des écosystèmes aquatiques souterrains [12-16]. En effet, la composante biologique du milieu, notamment sa biodiversité, devrait être considérée dans toute étude d'impact,

notamment des écosystèmes aquatiques [17]. Le suivi du peuplement dans son biotope vise à déterminer *in-situ* l'impact des substances toxiques sur les organismes vivants [18], alors que les expérimentations de toxicité *in-vitro* (biotests) peuvent être complémentaires et permettre de déterminer des seuils de toxicité de façon plus précise [12,13,19].

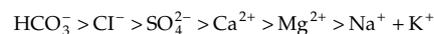
C'est dans ce contexte que nous proposons cette étude. Il s'agit de l'évaluation de l'impact des rejets huiliers sur la qualité physico-chimique et biologique des eaux souterraines, essentiellement sur la faune des nappes phréatiques et de l'eau des puits, dans une zone oléicole, susceptible d'être contaminée par des margines accumulées dans des bassins généralement non étanches (Tableau 1).

MATERIEL ET METHODES

Site d'étude

La zone d'étude se situe à environ 30 km au sud-sud-est de la ville de Marrakech dans les vallées des Oueds Ourika et Issil, sur la bordure méridionale du Haouz central (Figure 1A). Il s'agit d'une zone à vocation oléicole. Les margines résiduaire issues des unités de trituration des olives sont stockées dans des bassins d'évaporation. Au niveau de ce secteur, l'écoulement de la nappe se fait dans un sens sud-sud-est - nord-nord-ouest, depuis le piémont du Haut-Atlas jusqu'au l'Oued Tensift [20], avec une vitesse estimée à $2.10^{-3} \text{m.s}^{-1}$ [21]. Cette nappe est alimentée principalement par les sous-écoulements des oueds atlasiques. La profondeur de la nappe le long du chenal fluvial de l'Oued Ourika est généralement inférieure à 10 m, elle peut atteindre 24 m plus à l'ouest, au niveau de la zone d'étude [22].

Les eaux souterraines de la région ont généralement un faciès chimique bicarbonaté calcique-magnésien. Par certains endroits, il est chloruré sodique, en raison de la présence des argiles permo-triasiques salifères. Ce faciès est résumé par la formule suivant:



La texture prédominante du sol est de type limono-sableux, notamment dans les horizons situés entre 50 et 100 m de profondeur [20]. Les roches aquifères sont constituées d'un matériel meuble et grossier, essentiellement du sable et du gravier avec parfois une alternance

Tableau 1. Types d'huileries et caractéristiques des bassins de stockage des margines de chaque huilerie.

Bassins de stockage des margines pour chaque unité	B-H1	B-H2	B-H3	B-H4
Typetype Type d'huileries	semi-moderne	semi-moderne	moderne	semi-moderne
Profondeur des bassins (m)	5.5	6	6	9
Niveau d'étanchéité	aucun	aucun	bassin cimenté	aucun

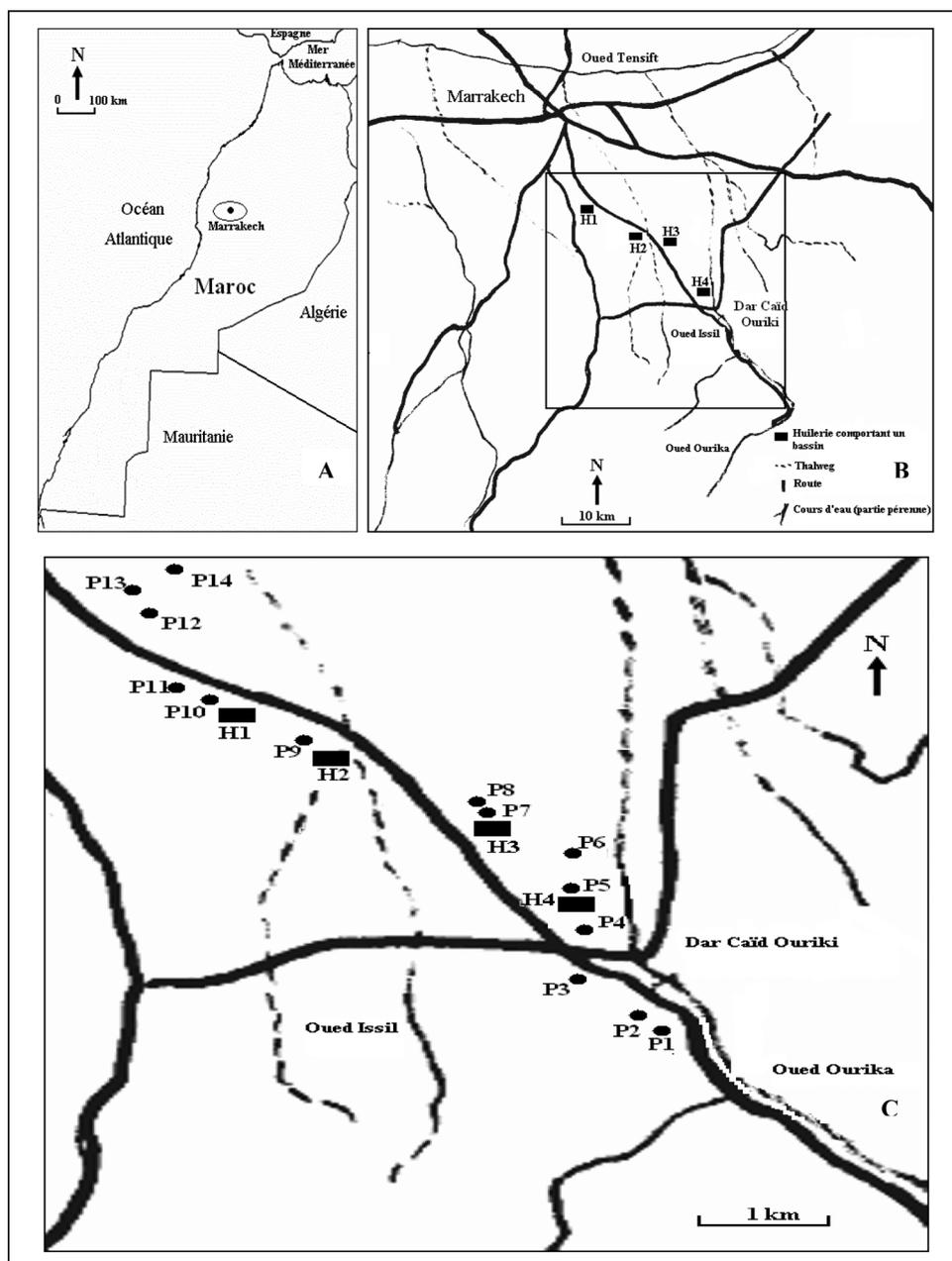


Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude et des stations.

A: Localisation de la zone d'étude au Maroc, B: Emplacement des 4 huileries, H1 à H4, dans les vallées des Oueds Ourika et Issil, C: Localisation des puits, P11 à P14, par rapport aux huileries, H1 à H4. H: huilerie, P: puits.

de sable, de silt et d'argile. Ce qui rend cette nappe très vulnérable [20].

Échantillonnage des margines

L'échantillonnage des margines a été effectué au niveau des quatre huileries (Figures 1B et 1C). Les huileries

H1, H2 et H4 sont des unités 'semi-modernes' utilisant pour le broyage et le pressurage un pressoir électrique alors que la séparation des phases 'huile-margines' se fait par simple décantation. L'unité H3 est une huilerie plus moderne qui extrait l'huile d'olive, d'abord par un broyage et un malaxage électriques et par la suite par une séparation rapide des phases, dans deux types de centrifugeuses. Ce type d'huilerie

à un rendement qualitativement et quantitativement meilleur que les unités semi-modernes ou traditionnelles. Cependant, il génère des volumes énormes de margines, qui sont estimés, au Maroc, à 1.2 m³ de margines par tonne d'olives contre 0.15 m³ produit par les huileries semi modernes [23].

Après chaque prélèvement, les échantillons de margines ont été conservés dans des enceintes en PVC à une température d'environ 4°C. Le mode d'extraction de l'huile et les caractéristiques des bassins de stockage sont résumés dans le Tableau 1.

Échantillonnage des eaux souterraines

Quatorze puits ont été choisis afin de mettre en évidence l'impact des rejets oléicoles sur la qualité physico-chimique et biologique des eaux souterraines (Figure 1C). La situation de ces puits ainsi que leurs caractéristiques morphodynamiques et leur emplacement par rapport aux huileries et aux bassins de stockage des margines sont précisées sur le Tableau 2.

Les trois puits témoins (P1, P2 et P3) se situent à l'amont hydraulique de toutes les huileries de la région. Les puits P4, P5 et P6 sont des puits situés au voisinage de H4. Les puits P7 et P8 se situent à proximité d'un bassin étanche destiné au stockage des margines générées par l'huilerie H3. P10 et P11 ont été creusés à proximité de l'unité H1 et du bassin de stockage de ses margines et à l'aval hydraulique de ce bassin. Le puits P9 se trouve au sein de l'huilerie H2 et également à l'aval de son bassin de stockage. Tous les puits étudiés, à l'exception des puits de l'amont, P1, P2 et P3 et du puits P6, sont protégés par des margelles en maçonnerie fermées par un couvercle soit seulement par un couvercle fixé au sol (voir Tableau 2).

Deux campagnes semestrielles d'échantillonnage ont été réalisées chaque année, en 2004, 2005 et 2006. La première campagne a eu lieu pendant la période oléicole, de septembre à mars, et la deuxième en juin de chaque année.

Méthodes d'analyses des margines et des eaux souterraines

La caractérisation physico-chimique des échantillons de margines et des eaux souterraines a été réalisée suivant des méthodes standardisées. La température, le pH, la conductivité électrique et l'oxygène dissous ont été mesurés sur place à l'aide des appareils portables WTW. Les autres facteurs indicateurs d'une pollution organique et minérale ont été analysés au laboratoire selon les méthodes d'analyses préconisées par AFNOR [24] et Rodier [25]. Le calcium (Ca²⁺), le sodium (Na⁺) et le potassium (K⁺) ont été dosés à l'aide d'un spectrophotomètre d'émission en flamme (type: JENWAY PFP7). Les polyphénols ont été analysés en utilisant la méthode recommandée par Macheix *et al.* [26] et les sucres totaux selon la méthode de Dubois *et al.* [27]. Le carbone organique total et la matière organique ont été analysés en suivant la méthode de Anne telle qu'elle a été rapportée par Aubert [28].

Échantillonnage du peuplement

Le prélèvement du peuplement animal aquatique, souterrain, ou non, a été effectué dans les puits à l'aide d'un filet phréatobiologique, conçu selon le modèle mis au point par Cvetkov [29] et dont l'efficacité pour la capture de la zoocénose a été déjà démontrée, notamment au Maroc [30]. Cette technique a été complétée par l'utilisation des pièges appâtés, plus efficaces pour la récolte de la faune des fonds des puits, notamment les Isopodes souterrains qui ne nagent pas en pleine eau [30].

Analyse bactériologique

Des analyses bactériologiques de l'eau du puits P4, situé à proximité d'une ancienne fosse septique, ont été effectuées.

Coliformes fécaux

Le milieu de culture utilisé est la gélose lactosée au Tergitol 7 au Chlorure de Triphényl Tétrazolium (T.T.C.). Les boîtesensemencées sont ensuite incubées à 44°C. Après 24 heures d'incubation, seules les colonies jaune-oranges sont considérées comme des colonies de coliformes et sont dénombrées.

Streptocoques fécaux

Le milieu de culture utilisé est le milieu gélosé D. Cocosel. Les boîtesensemencées sont incubées à 37°C pendant 24 heures. Les colonies de petite taille, translucides et de coloration noire très nette sont dénombrées.

Méthodes de traitement des données numériques

Les résultats des analyses physico-chimiques de l'eau sont présentés sous forme de moyennes calculées à partir des 6 prélèvements, et avec l'indication des écarts-types. Une Analyse en Composante Principale (ACP) a été réalisée sur les données physico-chimiques (sur les valeurs moyennes des mesures). Une autre ACP a été réalisée de la même façon à partir des données biologiques. Le logiciel utilisé est le SPSS 10.0.5 [31]. Cette analyse a été complétée par une classification hiérarchique des stations.

RESULTATS

Caractéristiques physico-chimiques des margines

Les résultats des analyses physico-chimiques des margines présentés dans le Tableau 3 montrent un pH qui varie en moyenne de 4.2 à 5.07. Ces valeurs nettement acides sont en relation avec la présence d'acides organiques dotés d'un pouvoir tampon très important [32,33].

La conductivité électrique est plus variable, elle est voisine de 11 mS cm⁻¹ dans les margines de l'huilerie

Tableau 2. Situation géographique et profondeurs des puits étudiés.

Huilerie la plus proche	Aucune huilerie				H2				H3				H4				H1				Aucune huilerie						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
Altitude (m)	900.4 ± 22.2 31° 22'	900.5 ± 21.3 31° 22'	901.5 ± 20.2 31° 23'	813.2 ± 18.1 31° 24'	824.7 ± 24.1 31° 24'	887.4 ± 14.1 31° 22'	869.9 ± 14.1 31° 22'	866.4 ± 14.6 31° 22'	879.9 ± 16.6 31° 22'	870.9 ± 16.4 31° 22'	880.1 ± 16.4 31° 22'	810.3 ± 18.7 31° 24'	805.4 ± 18.8 31° 26'	786.6 ± 17.6 31° 25'													
Latitude Nord	09.5" 007° 47'	09.5" 007° 46'	09.4" 007° 45'	09.3" 007° 49'	03.4" 007° 49'	34.0" 007° 48'	34.0" 007° 47'	35.2" 007° 47'	37.8" 007° 47'	41.5" 007° 47'	43.5" 007° 47'	09.2" 007° 51'	09.5" 007° 51'	09.2" 007° 51'													
Longitude Ouest	10.1" 2000	10.2" 1800	10.1" 700	31.2" 100	22.9" 5	30.2" 200	47.2" 10	46.4" 15	46.6" 10	47.8" 9	49.8" 20	31.2" 1000	31.4" 1500	31.1" 2000													
Distance (m) ¹	20	19	20	26	26	27	26	27	26	26	25,6	27	26	27													
Profondeur moyenne de la nappe (m)	+	+	+	++	+++	+	+++	+++	++	++	++	+++	+++	+++													
Protection des puits ²	+	+	+	++	+++	+	+++	+++	++	++	++	+++	+++	+++													
Puits/bassins ³	Amont	Amont	Amont	Amont	Aval																						

¹ Distance entre les puits et les bassins de stockage des margines les plus proches. ² État de la protection des puits. (+): Puits protégés par des margelles en maçonnerie ouvertes (++): Puits protégés par un couvercle fixé au niveau du sol (+++): Puits protégés par des margelles en maçonnerie fermées par un couvercle. ³ Situation des puits par rapport aux bassins de stockage des margines.

Tableau 3. Caractérisation physico-chimique des margines prélevées dans les quatre huileries.

CE	MO												
	pH	mS.cm ⁻¹	salinité	MES	DCO	NTK	COT	g L ⁻¹	P. tot.	Na ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Pph
H1	4.3±0.2	30±3.2	18.1±3.2	13.9±1.5	295±12.5	1.4±0.1	194.8±12	335.1±23	26.5±3.5	11.6±1.3	2.8±1.2	94±23.21	2.38±0.02
H2	4.5±1	27.2±2.5	16.2±2.4	15.7±1.2	233.3±12	0.91±0.5	180.4±34	310.3±33	10.3±2.4	7.9±1.2	1.4±0.2	38.7±4.5	2.41±0.3
H3	5.1±1.1	11±1.1	8.88±2	7.13±0.9	100.3±9.8	0.84±0.1	105.8±15	105.8±32	10.3±1.3	0.1±0.9	1.3±0.6	18.7±1.23	0.61±0.008
H4	4.2±0.5	21.1±2	12.4±0.6	20.1±0.8	291.7±14	1.54±0.2	186.6±15	321±35	30±4.6	3.2±2	2.6±1.2	57.3±9.5	3.3±0.6

CE = conductivité électrique, DCO = demande chimique en oxygène, NTK = azote Kjeldahl, COT = carbone organique total, MO = matière organique, P tot = phosphore total, Pph = polyphénols.

moderne H3 et de 30 mS cm⁻¹ dans l'unité semi-moderne H1. La forte minéralisation des margines exprimée par la conductivité électrique est étroitement liée aux teneurs en substances minérales dissoutes (notamment les ions Na⁺, Cl⁻, Ca²⁺, K⁺, N, P, ...), qui eux aussi dépendent des quantités de sel ajoutées pour la conservation des olives avant la trituration.

La richesse en matière organique, exprimée par la Demande Chimique en Oxygène (DCO), est généralement élevée. Elle varie en fonction du mode d'extraction des olives, elle est relativement plus faible dans les margines produites par l'huilerie moderne H3 (100,3 g d'O₂L⁻¹), que dans les margines extraites par le système semi-moderne (295 g d'O₂L⁻¹ dans les effluents de l'huilerie H1 et de 291,7 g d'O₂L⁻¹ dans ceux de l'huilerie H4).

Les polyphénols constituent une composante très importante des margines. Leurs teneurs sont de l'ordre de 2.38 g L⁻¹, 2.41 g L⁻¹ et 3.3 g L⁻¹ respectivement dans les margines de H1, H2 et H4 et de 0.61 g L⁻¹ en moyenne dans les margines issues de H3. Les grands volumes d'eau utilisés pendant la trituration contribuent significativement à la dilution des margines de cette unité (H3), ce qui explique l'écart de concentrations entre les effluents de cette unité et les autres.

Caractéristiques physico-chimiques de l'eau des différents puits

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines étudiées sont présentés dans le Tableau 4. Nous constatons que le pH de l'eau varie de 6.65 dans P5 à 7.75 en moyenne dans le puits P9. Les concentrations en oxygène dissous fluctuent entre 0.5 mg l⁻¹ dans P5 et 5.7 mg l⁻¹ dans P2 et P13. La conductivité électrique des eaux est généralement élevée, avec des conductivités assez élevées dans P5 (1.89 mS cm⁻¹) et dans P9 (1.57 mS cm⁻¹) et des conductivités faibles (entre 0.68 et 0.69 mS cm⁻¹) dans les eaux des puits situés en amont ou nettement plus en aval de la zone des huileries (P1, P2, P13 et P14) ou encore à l'aval de l'huilerie H3 plus moderne au niveau du puits P7. L'analyse de la pollution organique exprimée par la DCO et le taux des polyphénols a montré une pollution organique plus marquée dans les stations voisines des huileries. La DCO des eaux des puits situés en amont des huileries est environ 5 à 10 fois inférieures à celle enregistrée dans les eaux des puits situés au voisinage des huileries (400 mg d'O₂L⁻¹ dans le P5). Ces teneurs diminuent plus au nord, dans les eaux de P13 et P14 (33 et 40 mg d'O₂ L⁻¹). Les teneurs en polyphénols sont très élevées dans les eaux de P5, P6 et P10 situés au voisinage des huileries (180, 136 et 109 mg l⁻¹), alors qu'elles sont relativement faibles dans les puits situés en amont et plus en aval de la zone à activité oléicole (entre 4 mg l⁻¹ et 12 mg l⁻¹).

Une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été réalisée sur une matrice de données composée de 14 lignes représentant les puits et 16 colonnes représentant les variables physico-chimiques mesurées ou analysés. L'examen des résultats numériques de cette ACP montre que l'axe F1, qui cumule 47.31% de l'inertie, oppose les composés phénoliques,

organiques et minéraux (CE, Ca²⁺, Cl⁻, Na⁺, K⁺) à coordonnées positives, au pH et à l'oxygène dissous, ayant une forte contribution du côté négatif. L'axe F2, avec 15.75% de l'inertie, oppose surtout la température, les ions NH₄⁺, PO₄³⁻ et NO₂⁻ aux ions SO₄²⁻ et NO₃⁻, qui contribuent négativement à l'expression de cet axe. La classification hiérarchique des puits sur la base de la qualité physico-chimique de l'eau nous a permis de distinguer cinq groupes de stations (Figures 2 et 3):

- *Groupe G1*: composé du puits P5, situé à 5 m du bassin de stockage des margines de H4. L'eau de ce puits est caractérisée par des teneurs relativement élevées en matière organique (exprimée par la DCO), en chlorures (on y trouve la plus forte chlorosite observée dans la région), en sodium, en potassium et en calcium; ainsi qu'une conductivité électrique relativement élevée (1890 μS cm⁻¹) et des teneurs en polyphénols également assez élevées; qui sont de l'ordre de 180 mg l⁻¹.
- *Groupe G2*: composé du puits P4 situé au voisinage de l'huilerie H4, mais à l'amont hydraulique du bassin de stockage des margines. L'eau de ce puits est très chargée en ions ammonium (0.56 mg l⁻¹), dépassant la valeur fixée par la norme OMS pour l'eau potable qui est de l'ordre de 0.3 mg l⁻¹. Les teneurs en matière organique (DCO = 98.2 mg d'O₂ L⁻¹), en orthophosphates (581.8 μg L⁻¹) et en nitrates (62.7 mg l⁻¹) sont aussi relativement élevées. Cette dernière dépasse la norme fixée par l'OMS pour l'eau potable (50 mg l⁻¹). Les teneurs en composés phénoliques dans l'eau de ce puits sont de l'ordre de 90.2 mg l⁻¹. Enfin le puits P4 contient une eau très chlorurée (près de 250 mg de Cl⁻ par litre) qui le sépare des autres puits, comme le puits P5.
- *Groupe G3*: composé du puits P6, creusé à 500 m en 'aval' du puits P5. Il est chargé en éléments indicateurs d'une pollution par les margines à savoir K⁺ (20.5 mg l⁻¹), la DCO élevé (186.7 mg d'O₂ L⁻¹), les polyphénols (136 mg l⁻¹), Cl⁻ (124.8 mg l⁻¹) et Na⁺ (47 mg l⁻¹). Ce puits est exposé en partie aux infiltrations des margines en provenance de H4, mais de façon nettement moins forte que le puits P5, la pollution se diluant peu à peu sans doute, dans la nappe qui s'écoule de P5 vers P6.
- *Groupe G4*: composé de P9, P10 et P11, projetés près de l'origine des deux premiers axes. Ces trois puits sont situés dans l'enceinte de deux huileries (H1 et H2) qui fonctionnent selon le système d'extraction semi-moderne. Ils sont creusés dans deux oliveraies, en aval des bassins de stockage des margines, à des distances qui ne dépassent pas 20 m. L'impact de l'infiltration est largement ressenti au niveau des puits P9 et P10. Il se traduit par des valeurs élevées de la DCO (entre 50 et 140 mg d'O₂ L⁻¹ en moyenne), des polyphénols (entre 70.7 et 109 mg l⁻¹), des chlorures (entre 105 et 141 mg l⁻¹) et des ions potassium (entre 8 et 13.2 mg l⁻¹). Toutefois, en s'éloignant des bassins de stockage des margines, l'eau du puits (P11) montre déjà une légère

Tableau 4. Résultats des analyses physicochimiques de l'eau des puits prospectés dans la région d'étude (valeurs moyennes et écarts types).

N° du puits	O2		T mg L ⁻¹ °C mS cm ⁻¹	pH	CE	salinité g L ⁻¹	DCO mg O2L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	poly mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹
	4.7	±0.2															
1	17.8	±2.6	7.7	0.69	±0.5	0.14	33.3	0.01	4.2	14.1	16.5	1.7	82.6	0.4	2.64	50	26.72
2	17.8	±0.64	7.8	0.68	±0.7	0.14	40.21	0.04	4.62	15.8	18.9	1.22	73	0.4	3	51	20.2
3	17.9	±4.3	7.38	0.99	±0.7	0.20	56.7	0.05	6.9	38	28.7	7.5	141	2.0	0.25	62.13	35.88
4	18.9	±2.5	7.56	0.71	±0.7	0.14	98.2	0.56	90.2	46.5	10.2	3.5	247	62.7	3.94	581.8	13.36
5	18.9	±3.1	7.56	0.71	±0.8	0.14	12.5	0.03	0.8	42.9	56.9	27	275	29.5	43.24	63.44	29.58
6	19	±4.5	7.32	0.89	±0.1	0.14	186.7	0.02	136.0	44.7	46.9	20.5	125	11.2	5.24	84.42	30.63
7	20.1	±3.5	7.27	0.81	±0.4	0.17	30	0.01	44.4	42	24.6	3.1	110	2.8	3.54	93.61	35.43
8	20.2	±4.4	7.32	0.89	±0.1	0.18	26.7	0.02	41.6	31.8	8.7	3.1	94.8	9.4	3.18	68.69	30.48
9	20.4	±4.2	7.75	1.57	±0.3	0.32	140	0.36	98.0	26	30.2	8	112	4.1	50.4	56.88	23.72
10	20.2	±3.5	7.32	0.93	±0.1	0.19	50	0.01	109.4	34.9	30.9	3.1	141	7.9	0.4	97.54	22.52
11	19	±0.6	7.05	0.70	±0.6	0.14	52.5	0.02	70.7	33.2	30.2	13.2	105	102	5.33	80.6	29.3
12	20.5	±4.2	7.3	0.91	±0.3	0.19	103.5	0.02	63.2	33	32.6	3.42	92.2	8.3	3.6	42.3	22
13	20	±3.6	7.22	0.69	±0.2	0.14	40.5	0.02	49.2	23.6	15.3	7.2	80	15.2	6.38	44.5	25.3
14	20	±3.6	7.56	0.69	±0.6	0.14	33.2	0.02	12.3	11	10.2	5.3	81.2	22.2	4.36	47.3	28.2
	±0.6	±3.6	±0.15	±0.3	±0.3	±0.3	±3.7	±0.0	±0.22	±1.25	±1.23	±0.74	±5.6	±3.04	±0.22	±3.1	±2.8

T° = Température; CE = Conductivité Électrique; O₂ = Oxygène dissous; DCO = Demande Chimique en Oxygène; NO₃⁻ = Nitrate; NO₂⁻ = Nitrite; NH₄⁺ = Ammonium; PO₄³⁻ = Orthophosphates; K⁺ = Potassium; Na⁺ = Sodium; SO₄²⁻ = Sulfates; Ca²⁺ = Calcium; Cl⁻ = Chlorure; Poly = Polyphénols.

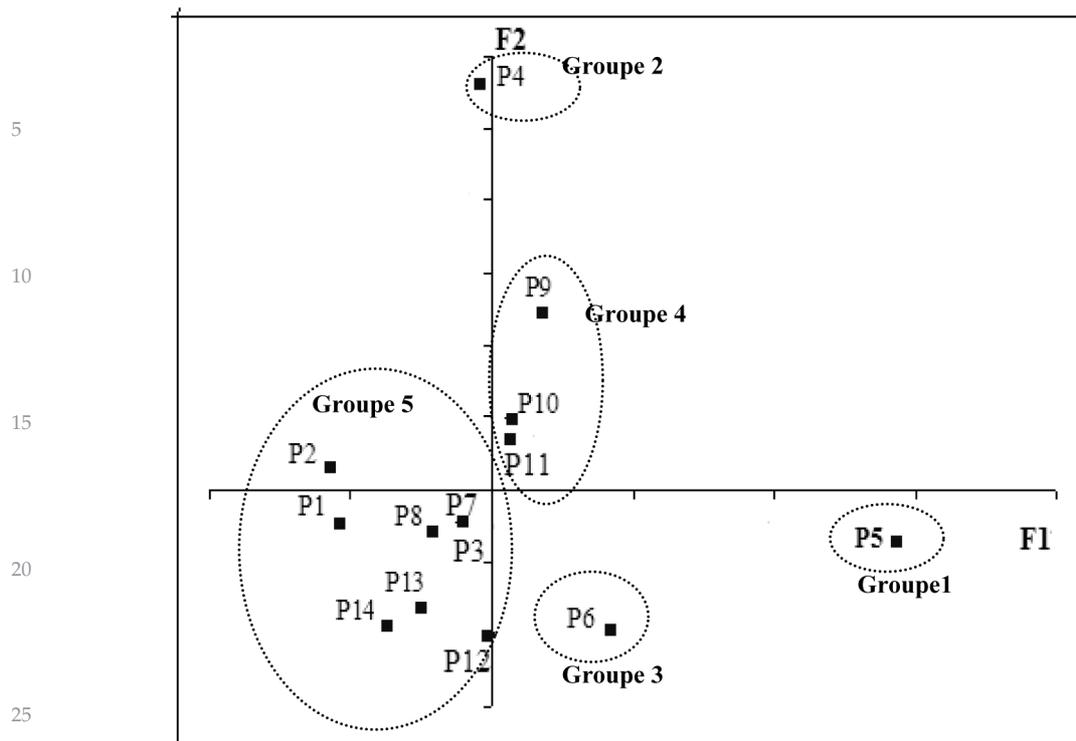


Figure 2. Projection des 14 puits étudiés (P1 à P14) sur le plan des 2 premiers axes factoriels de l'ACP d'une matrice Puits/Caractéristiques physico-chimiques de l'eau.

Les 5 groupes G1 à G5 résultent de la classification hiérarchique réalisée sur les résultats de l'ACP.

amélioration de sa qualité physico-chimique (avec des moyennes de $52 \text{ mg d'O}_2 \text{ L}^{-1}$ de DCO et 70.7 mg L^{-1} de polyphénols).

- **Groupe G5**: composé des puits P1, P2, P3, P7, P8, P12, P13 et P14. Les puits P1, P2 et P3 sont situés en 'amont' hydraulique des huileries loin de toute source de pollution. L'eau est de très bonne qualité. Les puits P12, P13 et P14, situés plus en aval des huileries, présentent une qualité d'eau comparable à celle des eaux des puits témoins exprimée par une DCO qui ne dépasse pas $57 \text{ mg d'O}_2 \text{ L}^{-1}$ et une conductivité électrique moyenne de l'ordre de 0.8 mS cm^{-1} . Les puits P7 et P8 sont situés à l'intérieur d'une huilerie moderne équipée d'un bassin étanche de stockage des margines d'une capacité de 2000 m^3 . L'eau de ces deux puits présente une qualité physico-chimique assez comparable à celle de l'eau des puits témoins de l'amont et des puits situés plus en aval. L'étanchéité du bassin de stockage a donc empêché l'infiltration des margines vers la nappe phréatique et par conséquent une contamination importante des eaux souterraines.

L'ACP sur les variables physicochimiques de l'eau des puits fait apparaître clairement (Figure 3) un premier axe qui oppose, du côté négatif, le taux d'oxygène dissous

et le pH, deux descripteurs qui varient très peu d'une station à l'autre et qui ne peuvent discriminer significativement ces stations à l'ensemble des autres descripteurs qui ont tous des coordonnées positives, le plus contribuant étant la concentration des polyphénols, suivi de peu par la DCO, qui sont les plus forts indicateurs de la pollution et qui présentent des variations importantes dans l'ensemble des stations.

Diversité du peuplement

La nappe phréatique se caractérise, dans la région étudiée, par une diversité biologique de 26 taxons aquatiques (Tableau 5). Certains taxons sont des espèces stygobies; il s'agit essentiellement de Crustacés Amphipodes: *Metacrangonyx boveei* et *Metacrangonyx spinicaudatus*; d'Isopodes: *Microcharon ourikensis* et *Typhlocirolana* sp. Les autres espèces sont parfois des formes aquatiques stygophiles comme les Copépodes: *Diacyclops bicuspidatus odessinus*, *Eucyclops serrulatus*, *Paracyclops chiltoni*, *Paracyclops fimbriatus* et *Tropocyclops prasinus* et les Ostracodes: *Heterocypris* cf. *reptans* ou encore des formes stygoxènes représentées essentiellement par des larves d'Insectes et de jeunes imagos.

L'analyse des peuplements récoltés dans chacune des stations montre que le puits P1, situé loin de toute source de

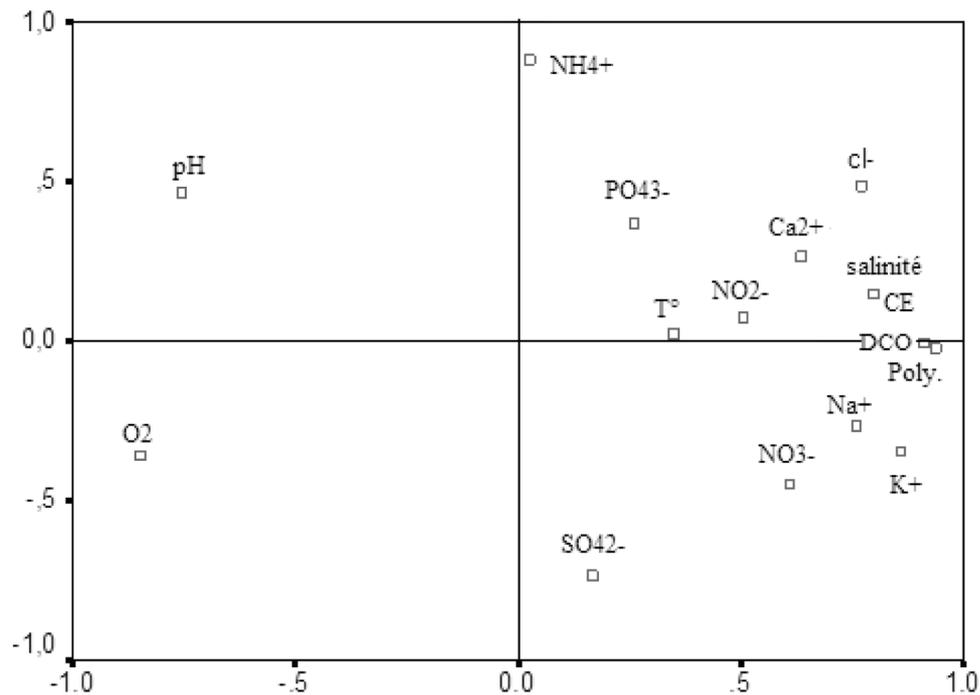


Figure 3. Projection des facteurs physico-chimiques de l'eau sur le plan des deux premiers axes de l'Analyse en Composantes Principales.

T° = Température; CE = Conductivité Électrique; O₂ = Oxygène dissous, DCO = Demande Chimique en Oxygène; NO₃⁻ = Nitrates; NO₂⁻ = Nitrites; NH₄⁺ = Ammonium; PO₄³⁻ = Orthophosphates; K⁺ = Potassium; Na⁺ = Sodium; SO₄²⁻ = Sulfates; Ca²⁺ = Calcium; Cl⁻ = Chlorures; Poly = Polyphénols.

pollution, héberge le peuplement le plus diversifié, avec 12 taxons. Alors que le puits P4, situé à proximité d'une fosse septique et du bassin de stockage des margines de l'unité H4, héberge seulement un seul taxon (un Diptère. Culicinae), il s'agit en effet de la biodiversité la plus faible.

L'Analyse en Composantes Principales réalisée sur une matrice de données composée de 14 lignes représentant les puits échantillonnés et 26 colonnes représentant les taxons récoltés a montré (Figure 4) que les espèces stygobies *Microcharon ourikensis*, *Metacrangonyx spinicaudatus*, *Metacrangonyx boveei* et *Typhlocirolana* sp. contribuent positivement à l'expression de l'axe F2, qui cumule 16.16% de l'inertie, et s'opposent aux autres taxons épigés. L'axe F1, qui cumule presque le même taux d'inertie (16.06%), regroupe de part et d'autres des taxons épigés de différentes larves d'Insectes et des Copépodes. La classification hiérarchique des puits, sur la base de leur peuplement, a permis de distinguer 3 groupes différents (Figure 5):

- **Groupe 1:** composé des puits P1 et P14 qui hébergent le peuplement le plus diversifié, avec 12 taxons dans P1, situé en amont des huileries et loin de toute source de pollution et 8 espèces dans le puits P14, situé loin des bassins de stockage de margines. Les espèces les plus caractéristiques de ces deux stations sont *Microcharon*

ourikensis, *Metacrangonyx spinicaudatus* et *Metacrangonyx boveei*, trois espèces stygobies.

- **Groupe 2:** composé de 7 puits, il s'agit de P2, P3, P6, P7, P8, P12 et P13 relativement loin des bassins de stockage des margines. La diversité biologique est relativement faible, elle est située entre 6 taxons dans P8 et 10 taxons dans P12. Le peuplement est formé essentiellement des formes épigées.
- **Groupe 3:** composé des puits P10, P11, P4, P5 et P9, situés en aval des bassins de stockage des margines. Ces puits sont caractérisés par l'absence totale des espèces stygobies et par une richesse biologique globale assez faible, ne dépassant pas 4 taxons.

Le résultat des analyses microbiologiques réalisées sur l'eau du P4, situé à proximité d'une fosse septique abandonnée, montre la présence persistante des streptocoques fécaux (15.3 10³ UFC mL⁻¹) mais l'absence totale des coliformes fécaux.

DISCUSSION

Qualité physico-chimique des eaux souterraines et impact des effluents d'huileries Les résultats physico-chimiques seront analysés et discutés en se référant aux

Tableau 5. Peuplement des puits de la vallée d'Ourika.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
Gastéropodes														
Gastéropode Sp.1	+											+		+
Gastéropode Sp.2		+										+	+	
<i>Physa acuta</i>			+			+						+		
Limacidae						+				+				
Crustacés														
Copépodes														
<i>Diatrypa bicuspis</i>		+												
<i>Diatrypa odessensis</i>		+												
<i>Eucyclops serrulatus</i>							+						+	
<i>Paracyclops chiltoni</i>							+							+
<i>Paracyclops fimbriatus</i>							+							
<i>Tropocyclops prasinus</i>			+											+
Amphipodes														
<i>Metacrangonyx boveei</i> *		+					+							+
<i>Metacrangonyx spinicaudatus</i> *			+				+							+
Isopodes														
<i>Microclaron ourikensis</i> *													+	
<i>Typhlocirolana</i> sp.*		+						+						
Ostracodes														
<i>Heterocypris cf. reptans</i>			+										+	
Oligochètes														
<i>Trichodrilus</i> sp.										+				
<i>Naididae</i> sp.										+				
<i>Enchytraeus</i> sp.										+				
Classe des Insectes														
<i>Culex</i> sp.														
Tabanidae									+					
Machlonyx sp.										+				+
sF. Culicinae														
sF. Tanyponidae														
sF. Chironominae sp.1														
sF. Chironominae sp.2														
Datiscidae														
Potamonthidae														
Totale 26	12	7	8	1	3	7	7	6	2	4	3	10	9	8

* = espèce stygobie, + = présence.

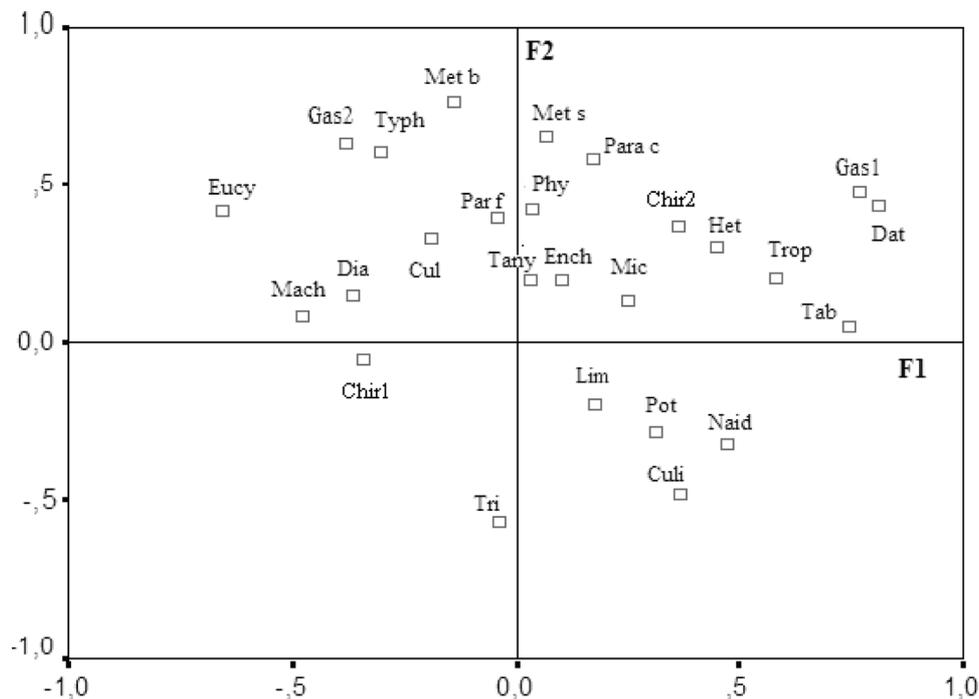


Figure 4. Projection des 26 taxons stygobies et épigés récoltés dans l'eau des 14 stations étudiées, sur le plan des deux premiers axes factoriels de l'ACP d'une matrice stations/taxons.

Gas1 = Gastéropode Sp.1, Gas2 = Gastéropode Sp.2, Phy = *Physa acuta*, Lim = Limacidae, Dia = *Diacyclops bicuspidatus odessnus*, Euc = *Eucyclops serrulatus*, Para c = *Paracyclops chiltoni*, Para f = *Paracyclops fimbriatus*, Tro = *Tropocyclops prasinus*, Met b = *Metacrangonyx boveei*, Met s = *Metacrangonyx spinicaudatus*, Mic = *Microcharon ourikensis*, Typ = *Typhlocirolana* sp., Het = *Heterocypris cf reptans*, Tri = *Trichodrilus* sp., Nai = *Naididae* sp., Ench = *Enchytraeus* sp., Pseu = Pseudoscorpion, Cul = *Culex* sp., Tab = Tabanidae, Mach = *Machlonyx* sp., Culi= sF. Culicinae, Tan = sF.Tanyponidae, Chi sF. = Chironominae, Dat = Dat Daticidae; Pot = Potamonthidae.

normes de la qualité des eaux proposées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) [34–36].

La nappe du Haouz près de Marrakech est soumise à une pollution d'origines diverses (engrais, pesticides, fosses septiques, abattoirs, huileries, ...), qui présentent un risque certain pour la qualité des eaux souterraines. Sur le plan général, les résultats des analyses physico-chimiques réalisées au cours de la présente étude montrent que les eaux souterraines de la vallée de l'Ourika sont faiblement minéralisées par comparaison avec les eaux souterraines étudiées au nord de la ville de Marrakech et avec celles des autres oueds de l'Atlas de Marrakech [37,38]. L'activité oléicole dans la région de l'étude entraîne une modification de la qualité physico-chimique des eaux de la nappe dans les régions situées à proximité des huileries. Cependant de nos jours, l'état de la qualité de l'eau de la nappe du Haouz n'est pas critique, au moins dans le secteur sud, en amont des rejets des huileries et des activités anthropiques importantes (voir Tableau 2). Dans ce secteur, le pH et l'oxygénation de l'eau sont au-dessus des limites de potabilité recommandées par l'OMS [34] et nécessaires pour la protection de la vie

aquatique [39]. Les teneurs en nitrates, en nitrites et en orthophosphates sont faibles, elles ne dépassent en aucun cas les limites fixées par l'OMS [35] et celles retenues par les normes marocaines concernant les eaux souterraines [20,37]. Les puits sont situés en amont des principales sources de pollution, et sont considérés pour cette raison comme des stations de référence.

Plus en aval l'eau des puits sont relativement plus pauvres en oxygène, les teneurs moyennes en oxygène dissous pouvant descendre jusqu'à 0.7 mg l⁻¹ dans le puits P5. Cela est dû très vraisemblablement à la forte contribution de la matière organique issue des effluents d'huileries, qui consomme de l'oxygène dans l'eau pour sa décomposition [40]. Les teneurs en orthophosphates, en nitrates et en nitrites dans ces stations (voir Tableau 4) dépassent les limites proposées par l'OMS pour une eau potable [35]. L'ammonium, qui est toxique pour la vie aquatique, même à très faible concentration [41,42], est présent dans ce secteur. Il peut causer ainsi des problèmes d'odeur et du goût à des concentrations supérieures à 1.5 mg l⁻¹ [36]. Toutefois les valeurs observées dans le secteur étudié sont partout inférieures à 0.6 mg l⁻¹. Le rapport entre NO₃⁻ et

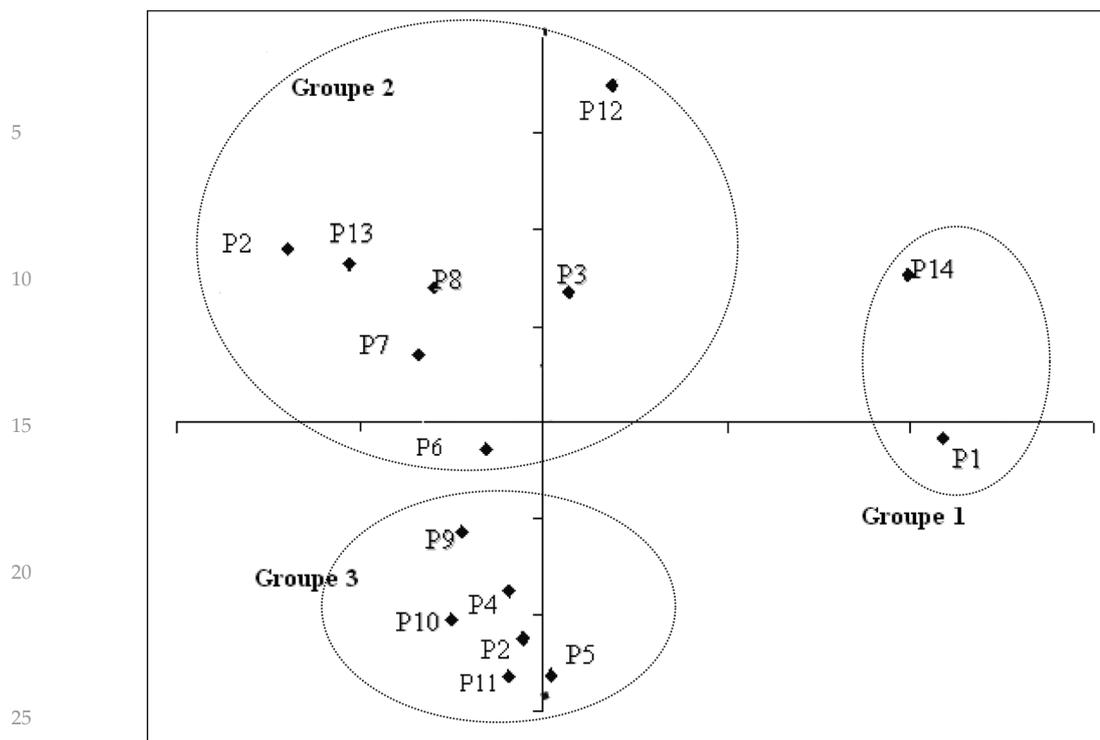


Figure 5. Projection des 14 puits tels qu'ils se répartissent en 3 groupes, à la suite de l'ACP puits/faune récoltée et d'une classification hiérarchique des stations.

NH_4^+ qui est relativement élevé dans la station P5 serait à l'origine de la faible biodiversité au niveau de cette station, où seuls quelques taxons d'oligochètes connus par leur résistance à la pollution sont présents dans ce puits. Des rapports relativement élevés entre ces deux paramètres sont connus comme responsable de l'absence de la vie aquatique dans d'autres milieux aquatiques [43].

La mauvaise qualité de l'eau dans ce puits est due certes à une contamination par les margines stockées dans le bassin voisin, mais aussi, très probablement, aux eaux usées en provenance des fosses septiques très nombreuses dans les environs. La faible distance entre ce puits et le bassin de stockage (5 m) ainsi que sa situation à proximité des fosses septiques favorisent l'arrivée des margines et des eaux usées dans la nappe phréatique, qui est relativement profonde dans cette région à partir du puits P4 (voir Tableau 2). Cette constatation confirme d'autres travaux [10] qui ont signalé des infiltrations des margines stockées jusqu'à des profondeurs qui peuvent atteindre jusqu'à 20 m. Ils ont même relevé des teneurs en composés phénoliques très élevées (400 mg l^{-1}), contrairement aux teneurs en matières organiques, qui sont partiellement retenues par la colonne du sol, et qui montrent un abattement progressif résultant probablement d'une dégradation chimique et biologique qui pourrait s'ajouter à la dilution dans l'eau de la nappe constamment renouvelée.

Le puits P4 est situé au voisinage d'une fosse septique abandonnée au voisinage de l'huilerie H4; il présente des eaux chargées en matières organiques ($\text{DCO} = 98.2 \text{ mg d'O}_2 \text{ l}^{-1}$ en moyenne), en polyphénols (90.2 mg l^{-1}) et en Cl^- (247 mg l^{-1}), mais aussi en ions ammonium (0.56 mg l^{-1}) et orthophosphates (581.8 mg l^{-1}) étant des éléments indicateurs de la contamination des eaux par des eaux usées domestiques.

La caractérisation microbiologique des eaux de ce puits montre une absence totale des coliformes fécaux dans ces eaux, en relation avec les taux élevés de la matière organique. Ce résultat reflète la sensibilité de ce type de bactérie à une forte charge organique, alors que les streptocoques, plus résistants, sont encore présents dans les eaux de ce puits; ils caractérisent une ancienne contamination.

Les valeurs relativement élevées de la conductivité électrique au niveau de ce secteur ainsi que la chute des teneurs en oxygène (0.7 mg l^{-1} dans P5) et les fortes valeurs des variables PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , Cl^- et SO_4^{2-} , principalement pendant la période d'activité oléicole, soulignent l'importance des huileries comme source principale de pollution de la nappe du Haouz. Ces constatations se trouvent encore une fois confirmées par les concentrations élevées en composés phénoliques, observées dans les stations P4, P5 et P6. Ces concentrations passent de 6.9 mg l^{-1} dans P3, à 90.2 mg l^{-1} dans P4 ou encore 180 mg l^{-1} dans P5, et encore les valeurs considérées ici ne sont que les valeurs moyennes,

auxquelles il convient d'ajouter l'écart type et même un peu plus pour arriver aux valeurs maximales relevées au cours de la période d'activité des huileries. Le facteur d'enrichissement est de plus de 15. L'ensemble de ces données témoigne de l'insalubrité de l'eau au niveau de cette zone, constat qui a été fait par Zenjari *et al.* [4] qui ont estimé le volume moyen des margines rejeté annuellement par les unités de trituration modernes à près de 900 m³ dans la région du Haouz.

Dans le secteur aval, au niveau des stations P12, P13 et P14, situés à quelques km de la zone des huileries (voir Figure 1C), les résultats des analyses montrent une nette amélioration de la qualité physico-chimique de la nappe. La plupart des paramètres tel que l'oxygène dissous, DCO, PO₄³⁻, NH₄⁺, NO₃⁻, ... reviennent à des valeurs similaires à celles des sites de référence, à l'exception de la conductivité et des sulfates, qui sont en partie liées à la nature de la roche mère. Cette amélioration de la qualité de l'eau est due à la fois, très certainement, à la dilution de l'eau de la nappe et à sa capacité autoépuratrice.

D'une façon générale, l'étude de l'eau des puits de la vallée de l'Ourika montre donc une relation très étroite entre le mode de fonctionnement des huileries, la conception des bassins de stockage des margines et le degré de contamination des eaux souterraines. En plus, la pollution de la nappe est fortement accentuée par l'infiltration des eaux usées et surtout des eaux-vannes provenant des fosses septiques, très abondantes dans la région et enfin des eaux d'irrigation, qui s'infiltrèrent à travers le sol jusqu'à la nappe phréatique et enrichissent les eaux souterraines en nitrates et en pesticides.

Biodiversité aquatique souterraine et sa relation avec les effluents d'huileries

Le milieu aquatique souterrain, au sens de Gibert *et al.* [44], et tout particulièrement l'eau des puits, constitue un écotone, dans lequel cohabitent deux communautés. La première, strictement souterraine qui présente des adaptations morphologiques (aplatissement dorso-ventral ou latéral de l'organisme, anophtalmie, dépigmentation, réduction de la taille) et physiologiques (métabolisme réduit) à la vie dans le milieu souterrain; il s'agit essentiellement des crustacés pécararides Amphipodes (*Metacrangonyx spinicaudatus* et *Metacrangonyx boveei*) et Isopodes (*Typhlocirolana sp.* et *Microcharon ourikensis*). Les autres espèces ont une origine épigée, elles renferment des formes aquatiques stygophiles, qui présentent des affinités avec le milieu souterraine, et pour lesquelles ce milieu constitue un refuge pour leur reproduction et leur développement, c'est le cas de Copépodes: *Diacyclops bicuspidatus odessnus*, *Eucyclops serrulatus*, *Paracyclops chiltoni*, *Paracyclops fimbriatus* et *Tropocyclops prasinus* et des Ostracodes: *Heterocypris cf. reptans* ou encore des formes stygoxènes qui ne présentent aucune adaptation à la vie souterraine, leur présence dans les eaux souterraines est accidentelle, elle reflète le degré d'ouverture du puits, ces espèces sont représentées essentiellement par des larves d'Insectes ou des imagos immatures.

La biodiversité aquatique souterraine dans le secteur d'étude est comparable à celle des autres vallées du Haut-Atlas [37] avec comme particularité la présence d'espèces endémiques caractéristiques comme l'Isopode *Microcharon ourikensis*.

L'analyse de la liste faunistique présentée au Tableau 5 montre que la composition du peuplement est très variable d'un puits à un autre et que la richesse spécifique semble être liée à la qualité générale des eaux de la nappe ainsi qu'à l'état de la protection des puits. Elle varie de 2 à 3 dans les puits P5, P9 et P11, qui sont soumis directement aux infiltrations des margines alors qu'elle est de l'ordre de 12 dans les eaux du puits P1, situé en amont des huileries. Le peuplement de cette zone paraît très abondant et diversifié, ce qui témoigne de conditions de vie adéquates pour la majorité des espèces rencontrées, qui sont vraisemblablement sensibles aux diverses sources de pollution, en particulier aux infiltrations des rejets oléicoles à partir des bassins de stockage des margines [45,46].

Cette relation entre la qualité des eaux et la richesse de la faune stygobie a été déjà démontrée dans le cas d'une pollution organique [38] ou minérale [47,48]. Ces études ont souvent mis en évidence une relation entre l'effet des pollutions provenant de l'épandage des eaux usées [38,49] ou de l'infiltration des lixiviats des résidus miniers [48] et la sensibilité de la faune souterraine. Des expérimentations réalisées au laboratoire sur les crustacés pécararides stygobies confirment ces constatations [50,51]. Des teneurs élevées en nitrites paraissent être limitantes pour les Amphipodes *Metacrangonyx spinicaudatus*, *Metacrangonyx paurosexualis* et pour l'Isopode *Typhlocirolana haouzensis* [12]. Il ressort de toutes ces études que la faune aquatique souterraine recherche, voire exige une eau de bonne qualité. Les espèces stygobies sont en effet sensibles à une dégradation de la qualité des eaux souterraines mais leur degré de sensibilité varie d'une espèce à une autre [12,13].

Ce travail vient donc compléter ces résultats, puisqu'il traite un nouvel aspect de contamination des eaux souterraines, liée cette fois à l'infiltration des margines, surtout connues pour leur effet toxique vis-à-vis des plantes et de la flore bactérienne en général. Cette toxicité apparaît toujours liée à la composition phénolique de ces effluents [2,52]. Nous avons constaté, lors de cette étude, que l'infiltration des margines a provoqué la disparition presque totale des espèces stygobies dans les eaux des puits creusés à proximité des bassins de stockage des margines (P5, P9, P11). Seules quelques espèces d'Oligochètes connues pour leur polluo-résistance (*Trichodrilus sp.*, *Naididae sp.*, *Enchytraeus sp.*) ont persisté dans le puits P5 fortement chargé en matière organique (DCO: 291 g d'O₂ L⁻¹) et en phénols totaux (3.3 g L⁻¹). D'autres études récentes confirment nos résultats et montrent que ces composés phénoliques peuvent être à l'origine de la mortalité rapide de plus de 50% du Crustacé *Daphnia magna* à une concentration létale CL50 de 1.54 mg L⁻¹ [52].

Les puits P7 et P8, localisés à proximité d'un bassin de stockage de margines très étanche, hébergent eux aussi un

peuplement diversifié et similaire à celui enregistré dans les eaux des puits témoins, situés en amont hydraulique de la zone d'étude et dont l'eau est de très bonne qualité. Les mesures de protection des puits et l'étanchéité efficace des bassins de stockage des margines ont entraîné une réduction considérable de l'infiltration des effluents vers les eaux souterraines et une limitation des risques de contamination d'une nappe phréatique déjà très vulnérable. Toutefois, cet impact diminue en aval, où un peuplement stygobie abondant et diversifié réapparaît.

CONCLUSION

Dans la plaine du Haouz, la production d'huile d'olive représente un secteur économique important et promoteur. Actuellement la production oléicole est en nette croissance et elle se fait en partie aux dépens de l'environnement. Dans le processus de fabrication de l'huile d'olive, le devenir des margines pose des problèmes surtout lors de leur évacuation sans aucun traitement préalable ou avec un traitement insuffisant vers des milieux naturels récepteurs. La grande perméabilité du sol dans la région, associée à la faible profondeur de la

nappe, accentue la vulnérabilité des eaux souterraines. Les procédés d'extraction et le mode de traitement des olives (traditionnelles, semi modernes ou modernes) ainsi que l'exposition des margines à l'évaporation dans des bassins non étanches favorisent l'infiltration des rejets polluants à travers le sol et leur arrivée dans la nappe phréatique. Ces effluents très chargés en acides organiques induisent une augmentation de l'acidité de la nappe, une réduction considérable de la teneur de l'eau en oxygène dissous et un enrichissement du milieu en composés organiques dont les polyphénols. Des modifications toucheront aussi le compartiment biologique de l'écosystème aquatique souterrain. Les espèces stygobies réagissent les premières. Lors d'une contamination de la nappe, elles peuvent disparaître complètement en cas d'une pollution majeure. Pour cette raison et en relation avec leur sensibilité vis-à-vis des polluants minéraux et organiques, le peuplement animal stygobie pourrait être utilisé, dès que la faune stygobie de la région est connue, comme un indicateur des pollutions oléicoles. Il constituerait ainsi un outil complémentaire des analyses physico-chimiques, utile pour apprécier la qualité des eaux souterraines voire d'un outil alternatif et moins onéreux.

REFERENCES

1. Sansoucy, R., Utilisation des sous-produits de l'olivier en alimentation animale dans le bassin Méditerranéen. FAO, Rome (1984).
2. Le Conseil Oléicole International. Disponible à <http://www.internationaloliveoil.org>. Mise à jour en Novembre 2007.
3. Kistner, T., Margine Project. Dipl. Biol. Disponible à http://www.wzw.tum.de/gb/people/kistner/lfg_engl.html.
4. Zenjari, B., Nejmeddine, A., Impact of spreading olive mill wastewater on soil characteristics: laboratory experiments, *Agronomie*, **21**, 749-755 (2001).
5. Mebirouk, M., Rejets des huileries, Développement d'un procédé intégré pour la biodégradation des polyphénols dans la margine, *CMPP News*, n°11 (2002).
6. Perez, J., De La Rubia, T., Ben Hamman, O., Martinez, J., Phanerochaete flavido-alba laccase induction and modification of manganese isoenzyme pattern in decolorized olive oil mill wastewaters. *J Appl Environ Microbiol*, 2726-9 (1998).
7. Paixo, S.M., Mendonça, E., Picado, A., Anselmo, A.M., Acute toxicity evaluation of olive oil wastewaters: a comparative study of three aquatic organisms, *Environ Toxicol* **14**, 260-269 (1999).
8. Parades, M.J., Monteoliva-Sanchez, M., Moreno, E., Perez, J., Ramos-Cormenzana, A., Martinez, J., Effect of wastewaters from olive oil extraction plants on the bacterial population of soil, *Chem.*, **15**, 655-659 (1986).
9. Ben Sassi, A., Boularbah, A., Jaouad, A., Walker, G., Boussaid, A., A comparison of olive oil mill wastewaters (OWM) from three different processes in Morocco, *Bioprocess Biochem*, **41**, 74-78 (2006).
10. S'habou, R., Zairi, M., Ben Dhia, H., Characterization and environmental impacts of olive oil wastewater disposal, *Env Technol*, **26**, 34-45 (2005).
11. Francesco, G.L. Évaluations économiques sur l'innovation technologique. Les problèmes de l'environnement dans le secteur oléicole en Italie, *Olivae*, **47**, 15-20 (1993).
12. Fakher El Abiari, A., Oulbaz, Z., Yacoubi Khebiza, M., Coineau, N., Boutin, C. Étude expérimentale de la sensibilité comparée de trois crustacés stygobies vis-à-vis de diverses substances toxiques pouvant se rencontrer dans les eaux souterraines. *Mém Biospéol*, **XXV**, 167-181 (1998).
13. Boutin, C., Boulanouar, M., Yacoubi-khebiza, M. Un test biologique simple pour apprécier la toxicité de l'eau et des sédiments d'un puits. Toxicité comparée, in vitro, de quelques métaux lourds et de l'ammonium, vis à vis de trois genres de crustacés de la zoocénose des puits. *Hydroécologie appliquée* **7**(1-2), 91-109 (1996).
14. Boutin, C., Sensibilité à la pollution et répartition de quelques espèces phréatobies à Marrakech (Maroc occidental), *Mem Biospéol*, **11**(38), 55-64 (1984).

15. Boutin, C., L'eau des nappes phréatiques superficielles, une richesse naturelle vitale mais vulnérable. L'exemple des zones rurales du Maroc, *Sciences de l'eau*, **6**(3), 357–365 (1995).
16. Boutin, C., Dias, N., Impact de l'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech sur la nappe phréatique. *Bull Fac Sc Marrakech – ser Bio*,(3) 5–27 (1995).
17. Stewart, P.M., Butcher, J.T., Swinford, T.O., Landuse, habitat and water quality effects on macroinvertebrate communities in three watersheds of Lake Michigan associated marsh system, *Aquatic Ecosystem Health and Management*, **3**, 179–189 (2000). 5
18. Malmqvist, B., Hoffsten, P.O., Influence of drainage from old mine deposits on benthic macroinvertebrate communities in central Swedish streams, *Water Res.*, **33**, 2415–2423 (1999).
19. Bouallam, S., Nejmeddine, A., Effet des métaux lourds – Cu, Hg, Cd – sur les larves de trois espèces de moustiques (Diptera, Culicidae), *Ann Limnol*, **37**, 49–57 (2001). 10
20. Lyakhloufi, S. 2001. Vulnérabilité et risque de pollution de la nappe phréatique du Haouz de Marrakech [thèse de doctorat de l'université]. Cadi Ayyad de Marrakech.
21. Moukhchane, M. 1983. Contribution à l'étude des réservoirs aquifères profonds de la bordure Nord de l'Atlas, entre Demnate et Imin'Tanout (Maroc) [thèse Doctorat 3ème Cycle]. Université De Franche-Comté, Fac. Scie., Tech.
22. Bernert, G., Prost, G.P., Le Haouz de Marrakech et le Bassin de Mejjate. In: *Ressources en eau du Maroc atlantique*. Ed Serv Géol Maroc, Rabat, **2**, pp. 399–432 (1975). 15
23. Rapport d'activité du Secrétariat d'état chargé de l'environnement, Maroc (2003–2004).
24. FNOR., *Association française de normalisation: Eaux, méthodes d'essai*. 2^{ème} édition. Paris (1983).
25. Rodier, J., *L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires et eau de mer*. 7^{ème} édition. Dunod, 1365p (1984).
26. Macheix, J.J., Fleuriet, A., Billot, J.A., *Fruit phenolics*. CRC Press Inc, Boca Raton, Florida, 378p (1990). 20
27. Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A., Smith, F., Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal Chem.*, **28**, 350–356 (1956).
28. Aubert, G., *Méthodes d'analyse des sols*. C.R.D.P, Marseille (1978).
29. Cvetkov, L., Un filet phréatobiologique. *Bull Inst Zool Mus Sofia*, **XXII**, 215–219 (1968).
30. Boutin, C., Boulanouar, M., Méthodes de capture de la faune stygobie: expérimentation de différents types de pièges appâtés dans les puits de Marrakech (Maroc occidental). *Bull Fac Sc Marrakech, Section Sc. de la Vie*, 5–21 (1983). 25
31. SPSS, *SPSS version 10.1 for Windows update*. SPSS Inc., Chicago, IL (1999).
32. Boukhoubza, F., Jail, A., Hassani, L., Nejmeddine, A., Caractérisation et prétraitement des margines par la chaux. *Acte Editions IAV*, 259–264 (2004).
33. Hamdi, M., Garcia, J.L., Ellouz, R., Integrated biological process for olive mill wastewater treatment. *Bioprocess Eng.*, **8**, 79–84 (1992). 30
34. WHO., *World Health Organization guidelines for drinking water quality*. WHO, Geneva, Switzerland **V: I, II** (1984).
35. WHO., *World Health Organization guidelines for drinking water quality*. WHO, Geneva, Switzerland (1993).
36. WHO., *World Health Organization health criteria and other supporting information*. Second edition. *Guidelines for drinking water quality*. WHO, Geneva, Switzerland, **V: II** (1996). 35
37. Yacoubi Khebiza, M., Biocénoses aquatiques interstitielles des vallées du Haut-Atlas de Marrakech: Microdistribution, Dynamique de répartition, Écologie et Biogéographie [thèse de doctorat d'État, Mém. Dactyl. Fac. Sc.]. Semlalia, Marrakech (1996).
38. Ait Boughrou, A., Yacoubi Khebiza, M., Boulanouar, M., Boutin, C., Messana, G., Qualité des eaux souterraines dans deux régions arides du Maroc: impact des pollutions sur la biodiversité et implications paléogéographiques, *Environ Technol.*, **28**, 1299–1315 (2007). 40
39. DeZuane, P.E.J., Chemical parameters – inorganics. In: *Handbook of drinking water quality*. DeZuane, P.E.J., editor. Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 49–148 (1997).
40. Dunne, T., Leopold, L.B., Chemical characteristics of water. In: *Water in environmental planning*. Dunne, T., Leopold, L.B., editors. W.H. Freeman, and Company, New York, pp. 727–766 (1978). 45
41. McNeely, R.N., Neimanis, V.P., Dwyer, L., *Water quality source-book: a guide to water quality parameters*. Environment Canada, Inland Waters Directorate, Water Quality Branch, Ottawa, Canada (1979).
42. Bowie, G.L., Mills, W.B., Porcella, D.B., Campbell, C.L., Pagenkopf, J.R., Rupp, G.L., Johnson, K.M., Chan, P.W.H., Gherini, S.A., Chamberlin, C.E., *Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modelling* (1985).
43. EPA., US Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, Athens, GA 600/3–85/040 (1985). 50
44. Gibert, J., Danielopol, D., Stanford, J., *Groundwater ecology*. Academic Press, New York (1994).
45. Gibert, J., Mathieu, J., Fournier, F., *Groundwater/surface water ecotones: biological and hydrological interactions and management options*. International Hydrology Series, Cambridge University Press (1997).
46. Malard, F., Turquin, M. J., Magniez, J., Filter effect of karstic spring ecotones on the population structure of the hypogean amphipods *Niphargus virei*. In: *Groundwater/surface water ecotones: biological and hydrological interactions and management options*. International Hydrology Series, Cambridge University Press, pp. 42–50 (1997). 56

47. El Adnani, M., Ait Boughrous, A., Nejmeddine, A., Yacoubi Khebiza, M., El Gharmali, A. Impact des rejets miniers sur la physico-chimie de l'eau et sur la structure des zoocénoses des puits environnants la région de Marrakech, Maroc, *Environ Technol.*, **28**(1), 71–82 (12) (2007).
48. El Adnani, M., it Boughrous, A. A, Yacoubi Khebiza, M., Sbai, M.L., Nejmeddine, A., *Mines tailing impact on the physico-chemical and biological characteristics of groundwater in Marrakech mining area (Morocco)*, 1-4244-0232, IEEE (2006).
49. Capasso, R., Evidente, A., Schivo, L., Orru, G., Marcialis, M.A., Cristinzio, G., Antibacterial polyphenols from olive oil, *Phytochem*, **40**(6) 1637–1641 (1995).
50. Boulanouar, M. Faune aquatique des puits et qualité de l'eau dans les régions de Marrakech et des Jbilet. Statut et dynamique d'une population de *Proasellus coxalis africanus* (Crustacés Isopodes Asellidae) des Jbilet [thèse de doctorat d'État, Mém. Dactyl. Fac. Sc.]. Semlalia, Marrakech (1995).
51. Plenet, S., Sensibilité et rôle des invertébrés vis à vis d'un stress métallique à l'interface eau superficielle/eau souterraine [diplôme de doctorat]. Univ. Claude Bernard, Lyon I (1993).
52. Boukhoubza, F., Nejmeddine, A., Zenjari, B., Hassani, L., Évaluation de la toxicité des composés phénoliques des effluents d'huileries, *Phys Chem News*, **37**, 133–140 (2007).