



Caractérisation de la qualité physico-chimique et minéralogique de l'eau de consommation de quatre zones de la ville de Marrakech-Maroc (Characterization of physico-chemical and mineralogical quality of drinking water from four areas of the city of Marrakech, Morocco)

Sana El-Fadeli^{1*}, Raschida R. Bouhouch², Hajar Benmazhar¹,
Yassir Barkouch³, Michael B. Zimmermann², Azeddine Sedki¹.

¹Laboratoire d'Hydrobiologie, Ecotoxicologie et Assainissement, Faculté des Sciences Semlalia. Marrakech-Maroc.

²Human Nutrition Laboratory, Institute of Food, Nutrition and Health, ETH Zurich- Switzerland

³Laboratoire régional de diagnostic épidémiologique et d'hygiène du milieu. Marrakech - Maroc.

Received 26 May 2015, Revised 04 Jul 2015, Accepted 10 Jul 2015

*Corresponding author: E-mail: s.elfadeli@yahoo.fr

Abstract

The study concerns the analysis of physical-chemical and mineralogical parameters (pH, conductivity, oxidizability, hardness, chlorides, ammonium, nitrates, nitrites, sulphates, orthophosphate, sodium, potassium, calcium and lead) to establish a diagnosis of pollution in drinking water. Thus, water samples were taken from four areas (Medina, Mrabtine, Azzouzia, Chouiter) that were monitored over an entire annual cycle in wet period and dry period (in four campaigns). For a total of 320 samples, the dosage of the physico-chemical and mineralogical parameters have been performed according to standards for three types of drinking waters namely: treated networks water, treated well water and untreated well water. Application of principal component analysis (PCA) on the physicochemical and mineralogical data gives us two water varieties: a variety characterized by increased levels of conductivity, hardness and ammonium for Azzouzia area and increased levels of chlorides, hardness, ammonium and nitrites for Mrabtine area and a variety of water whose contents are consistent with national and international standards of WHO for the Medina and the Chouiter area. Human activities (wastewater discharges, agricultural and industrial activities) are the main cause of this drinking water pollution of in the Mrabtine and the Azzouzia area.

Keywords: drinking water, pollution, quality of water, Marrakech

Résumé

L'étude porte sur l'analyse des paramètres physico-chimiques et minéralogiques (le pH, la Conductivité, l'oxydabilité, la dureté, les chlorures, l'ammonium, les nitrates, les nitrites, les sulfates, les orthophosphates, le sodium, le potassium, le calcium et le plomb) afin d'établir un diagnostic de l'état de la pollution des eaux de consommation. Ainsi, des prélèvements d'eau ont été effectués au niveau de quatre zones d'étude (z. Médina, z. Mrabtine, z. Azzouzia, z. Chouiter) qui ont été suivies pendant tout un cycle annuel en période humide aussi bien qu'en période sèche (durant quatre campagnes). Pour un total de 320 prélèvements, le dosage des paramètres physico-chimiques et minéralogiques a été réalisé selon les normes en vigueur pour trois types d'eaux de consommation à savoir : l'eau des réseaux traitées, l'eau des puits traitées et l'eau des puits non traitées. L'application de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) sur les résultats nous a donné deux variétés d'eau : une variété caractérisée par une augmentation des teneurs en conductivité, en dureté et en ammonium pour la zone Azzouzia et une augmentation des teneurs en chlorures, en dureté, en ammonium et en nitrites pour la zone Mrabtine et une variété d'eau dont les teneurs sont conformes aux normes nationales et internationales de l'OMS pour la zone Médina et la zone Chouiter. Les actions anthropiques humaines (rejets d'eau usée, activités agricoles et industrielles) sont la cause principale de cette pollution des eaux de consommation au niveau de la zone Mrabtine et la zone Azzouzia.

Mots-clés : eaux de consommation, la pollution, qualité de l'eau, Marrakech

1. Introduction

L'eau représente un élément essentiel et irremplaçable pour assurer la continuité de la vie. C'est l'élément constitutif de l'organisme et sa qualité est considérée comme le principal facteur de contrôle de la santé et de l'état de la maladie chez les êtres vivants. Pour ces raisons, tous les efforts devraient être fournis pour que l'approvisionnement en eau potable atteigne une qualité aussi bien sûre que possible, tout en étant accessible à tous [1].

Le Maroc a plus de 30 millions d'habitants dont plus de 50% vivent dans les zones rurales. Avec la croissance démographique qu'il connaît, et son développement industriel et agricole ; la majorité des habitants n'ont pas accès à un traitement d'eau potable et des eaux usées. Ainsi, les populations consomment de plus en plus des eaux d'origines diverses, y compris, les eaux de surface [2]. Néanmoins, par manque de moyens, le contrôle et le suivi de la qualité des eaux de surface utilisées pour la production des eaux de consommation ne sont pas systématiques [3], malgré les efforts entrepris par le Maroc, imposant la surveillance de la qualité de l'eau de consommation humaine par les services sanitaires de l'état (la loi 10/95 et le décret n° 2-05-1326 du 25 juillet 2006 relatif aux eaux à usage alimentaire) [4]. De plus, le manque de protection de ces eaux face à des rejets anthropiques, contribue à la dégradation de leur qualité et à l'augmentation de certains micropolluants minéraux et organiques dans les eaux destinées à la consommation humaine [5].

D'une manière générale, l'accès à une eau de consommation saine influe de manière importante sur la santé et le développement aux niveaux national, régional et local. Pour certaines régions, il a été démontré qu'investir dans l'approvisionnement en eau et l'assainissement pouvait déboucher sur un bénéfice économique net, dans les cas où la réduction des effets sanitaires préjudiciables et des coûts des soins de santé fait plus que compenser ces dépenses [6].

D'une manière générale, l'accès à une eau de consommation saine influe de manière importante sur la santé et le développement aux niveaux national, régional et local. Pour certaines régions, il a été démontré qu'investir dans l'approvisionnement en eau et l'assainissement pourrait déboucher sur un bénéfice économique net, dans les cas où la réduction des effets sanitaires préjudiciables et des coûts des soins de santé font plus que compenser ces dépenses [6].

Le Maroc est parmi les pays d'Afrique les plus menacés par le fléau de la pollution de ses eaux [7-8]. L'OMS estime que plus de 50% des maladies sont d'origine hydrique et des millions de nourrissons et d'enfants meurent chaque année de maladies diarrhéiques dues à la contamination de l'eau [9, 10,4].

Les préoccupations sanitaires associées aux constituants chimiques de l'eau de consommation diffèrent de celles associées à la contamination microbienne. En général, ces constituants chimiques sont à l'origine des effets néfastes pour la santé selon de durées d'exposition prolongées [1,6].

Il y a beaucoup de produits chimiques qui peuvent être présents dans l'eau de consommation; cependant, seulement quelques-uns sont de préoccupation immédiate pour la santé en toute circonstance. D'une part, la présence de nitrate et de nitrite dans l'eau a été associée à une méthémoglobinémie, en particulier chez les nourrissons nourris au biberon. Les nitrates peuvent résulter de l'application excessive d'engrais ou de la lixiviation des eaux usées ou autres déchets organiques dans les eaux de surface et les eaux souterraines. D'autre part, dans les zones où l'on trouve des eaux agressives et acides, en particulier, au niveau des zones minières et avec l'utilisation accrue de tuyauteries et d'accessoires de robinetterie en plomb ou de soudure qui peuvent se traduire par une augmentation des concentrations de plomb dans l'eau de consommation, d'où des effets neurologiques néfastes [1,6].

C'est dans cette optique que s'inscrit ce travail dont l'objectif est d'évaluer la qualité physico-chimique et minéralogique de l'eau de consommation dans quatre zones de la ville de Marrakech. Des paramètres indicateurs de la pollution organique et souvent nocifs et toxiques pour la santé à savoir; les ions orthophosphates, sulfates, nitrites, nitrates et ammonium (PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- et NH_4^+) ainsi que le plomb (Pb).

2. Matériels et Méthodes

2.1. Présentation des zones d'étude

La wilaya de Marrakech Tensift Al Haouz est située au centre du Maroc, limitée au Nord par la chaîne de montagne des Jbilet, au Sud par la ligne de crête du Haut-Atlas, à l'Est et à l'Ouest respectivement par les provinces d'Azilal et d'Essaouira.

Les zones ont été sélectionnées en se basant sur des études antérieures qui ont confirmées l'existence de plusieurs sources de contamination au niveau des différents compartiments (eaux, sols et plantes) [11-17].

2.2. Choix des zones d'étude

2.2.1. Zone Azzouzia

La zone d'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech dite « périmètre d'Azzouzia » est située au Nord de la ville. Elle se trouve essentiellement délimitée par un triangle pointé vers le Sud, d'une superficie globale de 1500 ha. Elle abrite 6000 habitants répartis sur onze douars dont la principale activité est l'agriculture.

2.2.2. Zone Mrabtine

Le site minier de Drâa Lesfar localisé au Nord-Ouest de la zone Mrabtine, situé à 13 km environ à l'Ouest de la ville de Marrakech. La zone correspond à une commune rurale de 5 790 ha, dont plus de 65% du territoire est occupé par des terres agricoles [18]. Elle est bordée par la route n°9 Marrakech-Safi à l'Est, l'Oued Baja-jdid à l'Ouest et au Nord par l'Oued Tensift.

2.2.3. Zone Médina

L'agglomération urbaine de Marrakech (672.000 habitants) fait partie de la Wilaya de Marrakech, elle-même incluse dans la région économique du Tensift.

2.2.4. Zone Chouiter

Cette zone se localise sur la route d'Ouarzazate, à 9 km de Marrakech. C'est une zone d'habitats résidentiels, touristiques et économique, de lotissements de villas, d'écoles, de centre de santé, de mosquées, et de différents équipements de proximité. Cette zone est loin de toute influence de source de contamination.

2.3. Méthodes de prélèvement et d'analyse des eaux

Afin d'évaluer la qualité des eaux des quatre zones d'étude, le risque potentiel sur les écosystèmes avoisinants ainsi que sur la santé de la population, nous avons analysé les eaux de consommation (de puits et de robinets).

Des prélèvements d'eau de consommation utilisée par la population ont été effectués :

- L'eau de robinet : distribuée par l'Office National de l'Electricité et de l'Eau potable (ONEE).
- L'eau des puits : au niveau de la zone Mrabtine et de la zone Azzouzia.

Les prélèvements des échantillons d'eau ont été effectués pendant quatre campagnes saisonnières. Avant de procéder aux prélèvements et afin d'éliminer le volume mort non représentatif nous avons laissé écouler une quantité suffisante d'eau du robinet. L'eau a été prélevée dans des flacons en polyéthylène de 500 ml préalablement lavés à l'acide nitrique à 1% puis rincés à l'eau bidistillée. La conservation des échantillons a été faite à 4°C après leur transport dans des glacières portatives. Le mode d'échantillonnage et les prélèvements ont été effectués selon le protocole décrit dans les normes françaises NF EN 25667 (ISO 5667) de décembre 1993 et NF T 90-100 d'août 1972.

Pour les échantillons d'eau de puits, les prélèvements ont été effectués en plongeant à l'horizontale les flacons tout en les redressant jusqu'à ce que le volume d'eau recueilli soit suffisant. Pour les points de prélèvement qui n'ont pas été accessibles (deux puits au niveau de la zone Mrabtine), nous avons utilisé un porte flacon stérilisé au préalable.

2.4. Traitement des échantillons d'eau

Des mesures de pH, O₂ et de conductivité ont été réalisées immédiatement sur le terrain au moment de l'échantillonnage.

Chaque échantillon des eaux prélevées a été divisé en deux. Un volume destiné à la détermination de la concentration en métal total est acidifié par de l'acide nitrique à 1% et conservé dans des tubes en polyéthylène de 10 ml (préalablement lavés à l'acide) et maintenus dans le réfrigérateur. L'autre volume d'eau a été directement filtré sous vide à travers des filtres en nitrocellulose de 0,45 µm de porosité selon la norme AFNOR NF T 90-105 [19], pour effectuer les analyses physico-chimiques (Tableau 1).

2.5. L'analyse statistique

Les données ont été analysées statistiquement en utilisant le logiciel de SPSS12.0.1 pour Windows, version 12.0.1 (2003). Chicago, IL: SPSS Inc.

L'analyse de variance (ANOVA) a été effectuée afin de déterminer la signification statistique. Le niveau de signification a été fixé à P < 0,05.

3. Résultats et discussion

Cette partie présente les résultats de l'analyse physico-chimique et métallique des eaux dans les quatre zones d'étude. Le tableau 2, représente les moyennes de ces résultats pour les échantillons prélevés durant quatre campagnes.

Tableau 1 : Méthodes physico-chimiques d'analyse des eaux de robinet et de puits.

Paramètres	Méthode d'analyse	Appareillage
pH	AFNOR NFT 90-008 [20]	pH-mètre type ORION
Conductivité électrique (CE)	AFNOR NFT 90-031[20]	Conductivimètre type LF 318/set WTW
SO ₄ ²⁻	AFNOR NFT 90-040 [20]	Spectrophotomètre UV type UNICAM 8625
NH ₄ ⁺	AFNOR NFT 90-015 [20]	
NO ₂ ⁻ / NO ₃ ⁻	AFNOR NFT 90-013/ AFNOR NFT 90-012 AFNOR NFT 90-045[20]	
PO ₄ ³⁻	AFNOR NFT 90-023[20]	
Na ⁺ e K ⁺	AFNOR NFT 90-019 AFNOR NFT 90-020[20]	Spectrophotomètre à flamme type JENWAY-PFP7
Ca ²⁺	AFNOR NFT 90-005 AFNOR NFT 90-016[20]	
Éléments traces métalliques (Pb)	Absorption atomique en flamme et en four à graphite	Spectrophotomètre d'absorption atomique (mode flamme ou four)

Tableau 2: Caractéristiques physico-chimiques des eaux de consommation.

Les zones paramètres	Z. Médina (Moy ±ET)	Z. Mrabtime (Moy ±ET)	Z. Azzouzia (Moy ±ET)	Z. Chouiter (Moy ±ET)	Valeur P
pH	7.45 ± 0.19	7.41 ± 0.16	7.56 ± 0.12	7.49 ± 0.12	0.548
Conductivité (µS/cm)	804.55± 3.33	217.95 ± 3.9	1059.05± 53	248 ±16.69	0.0001**
O2 (mg/l)	4.02 ± 0.22	4.29± 0.12	3.85 ± 0.07	3.67 ± 0.29	0.005*
Dureté CaCO3 (mg/l)	332± 4.16	772.6 ± 8.56	454.6 ± 1.01	137.45± 5.57	0.0001**
Chlorures (mg/l)	37.63± 7.35	264.12± 0.61	52.54± 1.21	71.85 ± 2.07	0.0001**
NH ₄ ⁺ (mg/l)	0.15± 0.04	0.25 ± 0.05	0.52± 0.06	0.0002± 0.00018	0.0001**
NO ₃ ⁻ (mg/l)	0.02 ± 0.02	9.26± 1.65	8.88± 0.19	0	0.0001**
NO ₂ ⁻ (mg/l)	0.17± 0.03	0.29 ± 0.02	0.19± 0.01	0	0.0001**
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	76.49± 0.75	109.57± 1.08	95.91 ± 0.88	63.05 ± 2.68	0.0001**
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	0.02 ± 0.01	0.28± 0.03	0.56± 0.01	0.005± 0.0038	0.0001**
Na ⁺ (mg/l)	17.4 ± 1.15	24.31± 2.16	20.9 ± 2.6	16.38 ± 0.47	0.0001**
K ⁺ (mg/l)	2.74 ± 0.23	5.63± 0.32	4.95 ± 0.19	3.1 ± 0.37	0.0001**
Ca ²⁺ (mg/l)	116.7± 7.37	237.2± 2.57	165.6 ± 1.8	78.9 ± 0.93	0.0001**

** . La corrélation est significative au niveau 0.001 (bilatéral) * . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Les eaux ont été échantillonnées (20 échantillons pour chaque zone) durant quatre campagnes couvrant trois années incluant des périodes de hautes eaux (novembre et décembre), des périodes de moyennes eaux (février et mars) et des périodes de basses eaux (septembre-novembre et juin-juillet).

Au total, 320 prélèvements d'eau ont été réalisés durant les quatre campagnes. Trois types d'eaux de consommation ont fait l'objet de prélèvements réalisés à savoir : l'eau des réseaux traitées, l'eau des puits traitées et l'eau des puits non traitées.

Les eaux étudiées présentent un pH neutre qui répond aux normes en vigueur fixées par l'OMS (2006) [1] pour les eaux potables. D'une manière générale, les échantillons des eaux analysées dans les zones d'étude, ne présentent pas des différences significatives pour le pH ($p= 0.548$).

Les valeurs de la conductivité électrique dépassent les valeurs fixées par l'OMS (2006) [1] pour les eaux potables, surtout au niveau de la zone Azzouzia (z. d'épandage) avec une teneur de 1059.05 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ce paramètre permet d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau [21-22].

La même constatation a été faite pour la dureté avec une valeur légèrement élevée au niveau de la zone Mrabtine (772.6 mg/l). La dureté totale d'une eau est produite par les sels de calcium et de magnésium qu'elle contient [4].

Les valeurs des chlorures répondent aux normes en vigueur fixées par l'OMS (2006) [1] pour les eaux potables, excepté qu'au niveau de la zone Mrabtine nous avons trouvé une teneur légèrement élevée (264.12 mg/l). Les eaux trop riches en chlorures sont laxatives et corrosives [23,24] de plus, la concentration des chlorures dans l'eau dépend aussi du terrain traversé [24]. Ces paramètres physico-chimiques présentent des différences significatives entre les zones d'étude ($p<0.001$).

Les ions orthophosphates, sulfates, nitrites, nitrates et ammonium (PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- et NH_4^+) sont les paramètres indicateurs de la pollution organique. Les résultats des analyses faites sur les eaux pendant les quatre campagnes montrent que les valeurs obtenues ont été très faibles et inférieures aux valeurs maximales fixées par les normes marocaines relative à la qualité des eaux d'alimentation humaine [25], sauf pour NO_2^- qui représentent des teneurs élevées au niveau de la zone Mrabtine (0.29 mg/l). Ces résultats présentent des différences significatives entre les zones d'étude.

Les nitrites peuvent être rencontrés dans les eaux, mais généralement à des faibles doses, une eau qui renferme des nitrites peut être considérée comme suspecte [4].

Nos résultats sont inférieurs à ceux d'El Ouedghiri [4] à la ville de Fès, et ceux de Ghazali [26] à la région de Meknès et ceux trouvés par Sidibe [27] à la wilaya de Nouakchott.

Les éléments majeurs (Na^+ , K^+ et Ca^{2+}) sont des paramètres indicateurs de la pollution minérale. Les résultats des analyses montrent que les teneurs en Na^+ ont été à peu près égales à celles fixées par l'OMS (2006) [1] tandis que, les teneurs en K^+ ont été très faibles, quant à celles de Ca^{2+} elles dépassent légèrement les valeurs maximales fixées par l'OMS (2006) [1], avec 237.2 mg/l au niveau de la zone Mrabtine. Ces résultats présentent des différences significatives entre les zones d'étude.

Dans cette étude, on s'est limité à la détermination des teneurs moyennes en plomb, les résultats obtenus (Tableau 3) montrent que les teneurs moyennes ont été très faibles au niveau des quatre zones d'étude et n'atteignent pas les valeurs limites fixées par l'OMS (2006) [1]. De plus, les concentrations en Pb restent très inférieures aux valeurs limites préconisées par les normes marocaines [25]. Les teneurs moyennes en plomb ne présentent pas de différences significatives entre les zones d'étude ($p=0.051$). Toutefois, ce métal peut même à de faible concentration avoir un impact écologique et sanitaire important [22].

Tableau 3: Teneurs en Pb des eaux de consommation des zones d'étude.

Paramètre	Les zones	Moyenne	Écart-type	Valeur P
Pb ($\mu\text{g}/\text{l}$)	Zone Médina	3,35	0.69	0.051
	Zone Mrabtine	5,29	3.56	
	Zone Azzouzia	5,03	2.25	
	Zone Chouiter	0,93	0.65	

** . La corrélation est significative au niveau 0.001 (bilatéral) * . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Les variations des concentrations en éléments chimiques dans les quatre campagnes de l'étude présentent certaines tendances mais ne montrent pas de corrélations claires et généralisées entre ces concentrations et les variations saisonnières (Fig. 1).

Les périodes de basses eaux (septembre-octobre et juin-juillet) se caractérisent généralement par des augmentations des teneurs des éléments étudiés. Tandis que les périodes de hautes eaux (novembre- décembre) enregistrent les teneurs les plus faibles. Toutefois, au niveau de cette étude les résultats obtenus ne tiennent pas compte de ces variations saisonnières, sauf au niveau du plomb où la première campagne présente des différences de concentrations en plomb entre les zones d'étude. Ces résultats corroborent avec ceux d'El Adnani [16].

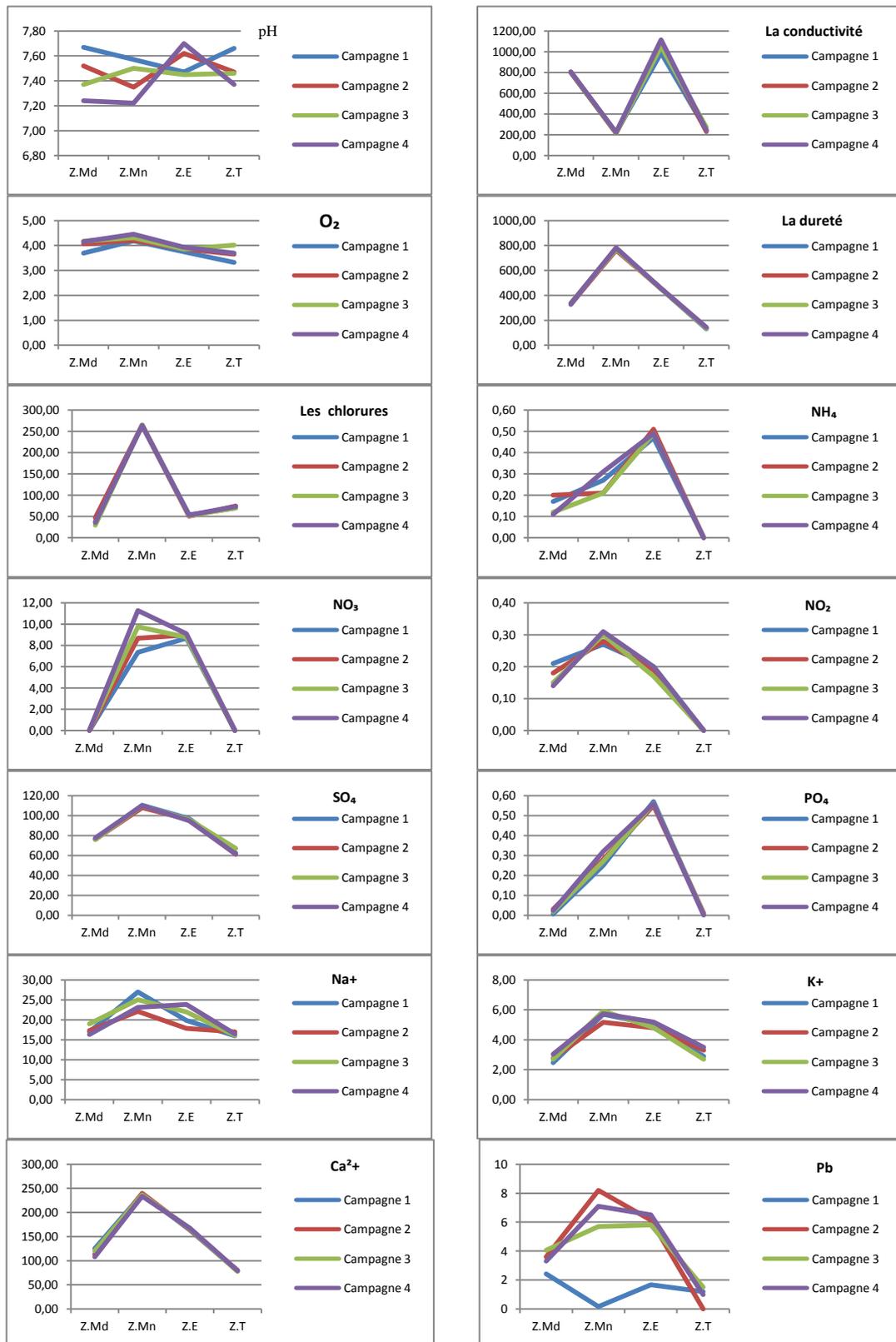


Figure 1: Évolution du pH, Conductivité, O₂, la dureté, les chlorures, NH₄, NO₃, NO₂, SO₄, PO₄, Na⁺, K⁺, Ca²⁺ et Pb, selon les campagnes de prélèvement et les zones d'étude. (Z.Md : zone Médina, Z.Mn : zone Mrabtine, Z.E : zone Azzouzia et Z.T : zone Chouiter).

En effet, lors des périodes sèches, l'évaporation intense accentuée par le climat semi-aride, cause une concentration des éléments dans les faibles volumes d'eau qui persistent par la suite. Par contre, au moment des hautes eaux, les précipitations augmentent le volume d'eau et induit la dilution de ses charges en éléments [28].

Les différents éléments analysés ne varient pas de la même façon au cours du temps. Les différences de variations temporelles des concentrations suggèrent que le comportement de ces éléments est contrôlé par des processus géochimiques et physiques distincts [29].

Contrairement aux cations et anions étudiés, les pH des zones d'étude ne montrent pas de différences significatives en fonction du temps. Ces résultats corroborent avec ceux d'El Adnani [16].

3.1. Analyse factorielle des paramètres physicochimiques et minéralogiques des eaux

Pour une meilleure analyse des résultats obtenus précédemment, une analyse multifactorielle a été effectuée dans le but de condenser l'information apportée par les divers paramètres et dégager ainsi les principaux facteurs intervenant dans la comparaison des eaux de consommation entre les zones d'étude. Cette méthode d'analyse permet en outre de visualiser sur des graphes les relations existant entre les variables ainsi que la dépendance des paramètres mesurés par rapport aux zones d'étude.

Les 14 variables caractérisant les paramètres examinés (pH, Conductivité, O₂, la dureté, les chlorures, NH₄, NO₃, NO₂, SO₄, PO₄, Na⁺, K⁺, Ca²⁺ et Pb) sont représentés dans ce modèle (Fig.2).

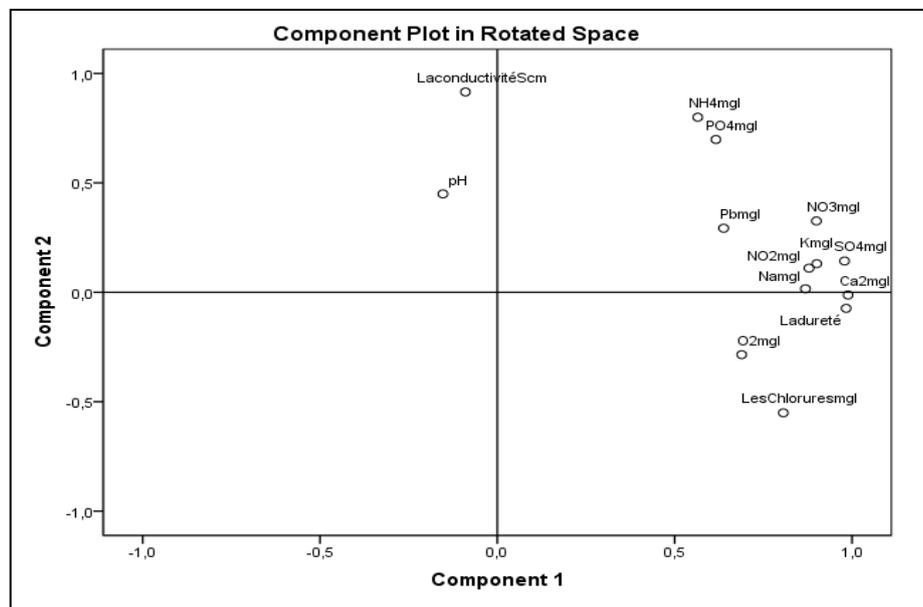


Figure 2: Projection des facteurs physico-chimiques de l'eau sur le plan factoriel axe1-axe2 par rapport aux zones d'étude.

Plusieurs variables ont été corrélées entre elles, l'indice de KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) tend vers 1, il a été en moyenne de l'ordre de 0,829. Tandis que le test de sphéricité de Bartlett, la signification qui tend vers 0.0001 ($p < 0,001$); c'est très significatif. Le but de l'analyse est d'obtenir un petit nombre de combinaisons linéaires des 14 variables qui représentent la majeure partie de la variabilité des données. Les résultats numériques montrent qu'il y a deux composantes, la première cumule 62,169% de la variabilité capturée, oppose l'O₂, la dureté, les chlorures, NH₄⁺, NO₃⁻, NO₂⁻, SO₄²⁻, PO₄³⁻, Na⁺, K⁺, Ca²⁺ et Pb²⁺ avec une contribution du côté positif, à la conductivité et pH ayant une forte contribution du côté négatif. La deuxième composante avec 19,489% de la variabilité capturée, oppose la conductivité et pH avec une contribution du côté positif à l'O₂, la dureté, les chlorures, NH₄⁺, NO₃⁻, NO₂⁻, SO₄²⁻, PO₄³⁻, Na⁺, K⁺, Ca²⁺ et Pb²⁺ ayant une forte contribution du côté négatif.

La figure 3, présente la carte perceptuelle par analyse en composante principale qui illustre les interactions des facteurs 1 et 2 par rapport aux zones d'étude. D'après cette carte, nous avons quatre domaines distincts ; le premier qui présente une partie des résultats de la zone Mrabtime, l'autre domaine présente une partie des résultats de la zone Azzouzia, le troisième domaine représente une partie des résultats de la zone Médina et le quatrième domaine une partie des résultats de la zone Chouiter.

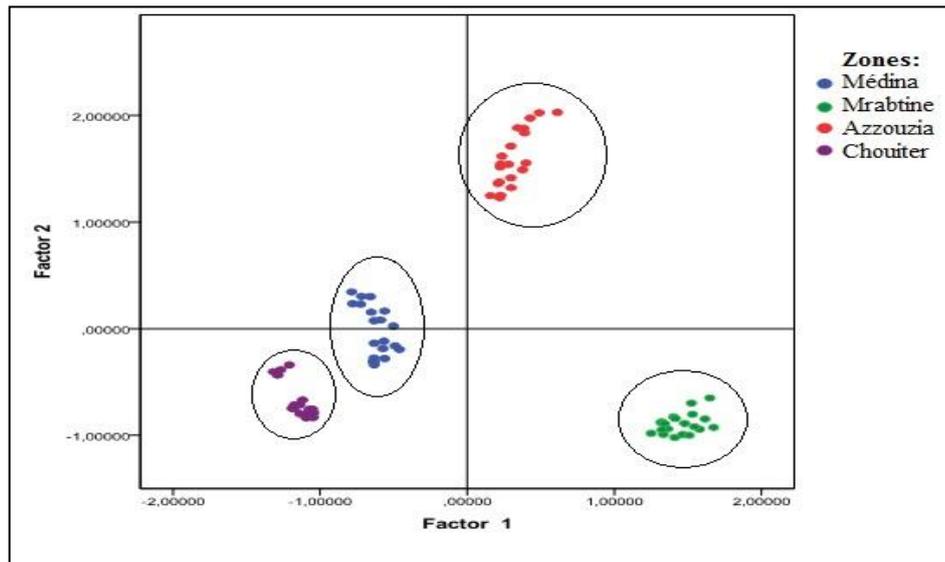


Figure 3: Carte perceptuelle par analyse en composante principale, interactions du facteur 1 et 2 par rapport aux zones d'étude.

La classification hiérarchique des zones sur la base de la qualité physico-chimique et minéralogique de l'eau, nous a permis de distinguer quatre groupes (figures 3)

Groupe 1: en rouge isole la zone Azzouzia, présente des eaux qualifiées comme mauvaises et non conformes aux normes de potabilité, caractérisées par un taux très élevé en conductivité, dureté et en NH_4 . Ceci pourrait être expliqué par l'irrigation par les eaux usées.

Groupe 2: en vert isole la zone Mrabtime, dont les eaux sont de mauvaise qualité aussi. Il représente les eaux très riches en chlorures, dureté, NH_4 et également NO_2 . Ceci pourrait être expliqué par le dépôt intensif et incontrôlé des déchets de la mine et l'irrigation par les eaux usées dans le passé.

Groupe 3: en bleu isole la zone Médina, dont les eaux sont de moyenne qualité, caractérisées par un taux élevé en dureté.

Groupe 4 : en violet isole la zone Chouiter, dont les eaux sont de bonne qualité.

En général, cette carte nous a permis de conclure que les résultats d'analyse des paramètres en question au niveau des quatre zones d'étude sont significativement différents d'où la différence entre les zones par rapport à la qualité des eaux étudiées.

Conclusion

Cette étude nous a permis de conclure que la qualité des eaux de consommation des quatre zones d'étude (zone Médina, zone Mrabtime, zone Azzouzia et zone Chouiter) de la ville de Marrakech varie d'un groupe à l'autre. Les teneurs des polluants métalliques (plomb) trouvées qualifient les eaux de ces quatre zones comme étant conformes aux normes fixées par l'OMS, sauf au niveau de la zone Minière en particulier pour les eaux des puits, avec des valeurs limites légèrement élevées par rapport aux normes.

Les résultats de l'analyse physico-chimique au niveau de la zone Médina et la zone Chouiter peuvent être considérés comme admissibles. Ces eaux ne présentent aucun danger sanitaire, contrairement aux résultats de la zone Mrabtime et la zone Azzouzia qui qualifient les eaux de consommation de mauvaise qualité. De plus, les techniques d'analyses multi variées nous ont permis de qualifier l'eau de ces deux zones comme mauvaise et non conforme aux normes de potabilité.

Cette étude préliminaire, nous permet ainsi de conclure que les zones les plus affectées par la contamination physico-chimique et minéralogique sont la zone Mrabtime et la zone Azzouzia. La principale cause de cette pollution est les activités anthropiques qui continuent à présenter un risque majeur pour l'Homme et son environnement, notamment pour les ressources en eaux.

Remerciements - Les auteurs tiennent à remercier Pr. M. Ait Babram de FSTG-Marrakech pour son aide précieuse en analyse statistique ainsi que le Fonds National Suisse (# 404740 à 117325), Berne et de l'ETH Zürich, Suisse, pour le soutien financier.

Référence

1. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality [electronic resource]: incorporating first addendum. Vol. 1, Recommendations. –3 ed. (2006).
2. Zidane F., Lekhlif B., Boulanger A., Chenguiti S., Hachim R., *Cahiers de l'Association Scientifique Européenne pour l'Eau et la Santé.* 9 (2004) 47.
3. N'diaye A.D., Salem K.M.M., El Kory M.B., Ould Kankou M.O.S.A., Baudu M., *J. Mater. Environ. Sci.* 5 (2014) 320.
4. El Ouedghiri K., El Oualti A., El Ouchy M., Zerrouq F., Ouazzani C.F., El Ouali Lalami A., *J. Mater. Environ. Sci.* 5 (2014) 2284.
5. Guergazi S., Achour S., *Courrier du Savoir.* 6 (2005) 53.
6. Organisation Mondiale de la Santé. Directives de qualité pour l'eau de boisson. Vol. 1:3^{ème} éd. Genève, (2004).
7. Azzaoui S., El Hanbali M., Leblanc M., *Water Qual. Res. J. Canada.* 37 (2002) 773.
8. Santé en chiffres. Direction de la planification et des ressources financières, service des études et de l'information sanitaire (2011). Édition 2012.
9. Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Directives de qualité pour les eaux de boisson, Volume Recommandation. 2^{ème} éd. (1994).
10. Nimri L., El Nasser Z., Batchoun R., *FEMS Immuno. Med. Microbiol.*42 (2004) 255.
11. Mazlani S., Maarouf A., Rada A., El Meray M., Pihan J. C., *Rv. Sc. Eau.*7 (1994)55.
12. Sedki A., Lekouch N., Gamon S., Pineau A. *Sci. Total Environ.*, 317 (2003) 201.
13. Lekouch N., Sedki A., Bouhouch S., Nejmeddine A., Pineau A., Pihan J.C., *Sci. Total Environ.* 243 (1999) 323.
14. El Gharmali A., Rada A., El Adnani M., Tahlil N., El Meray M., Nejmeddine A., *Environ. Technol.* 25 (2004) 1431.
15. Barkouch Y., El Fadeli S., Khadiri M.E., Pineau A., *Afr. J. Agric. Res.* 10 (2015) 3246.
16. El Adnani M., Ait Boughrouss A., Yacoubi Khebiza M., El Gharmali A., Sbai M.L., Errouane A. S., Loukili Idrissi L., Nejmeddine A., *Environ. Technol.* 28(2007)71.
17. El Fadeli S., Bouhouch R., El Abbassi A., Chaik M., Aboussad A., Chabaa L., Lekouch N., Hurrell R.F., Zimmermann M.B., Sedki A., *J. Mater. Environ. Sci.* (2014) 225.
18. ORMVAH (Office Régional de Mise en Valeur Agricole d'Al Haouz), Cartographie détaillée des sols au 1/5000^o dans le Haouz central, MARA-DER, Marrakech (1980).
19. Afnor, AFNOR NF T 90-105, Essais des eaux. Détermination des matières en suspension, par filtration. NF EN 872 (1993).
20. Qualité de l'eau .Arrêté du 20/02/90 relatif aux méthodes de référence pour l'analyse des eaux destinées à la consommation humaine (1990).
21. Rodier J., Bazin C., Broutin J.P., Chambon P., Champsaur H., Rodier L., L'Analyse de l'Eau. 8^{ème} éd. Dunod : Paris. (1996) 1384.
22. Abboudi A., Tabyaoui H., El Hamichi F., Benaabidate L., Lahrach A., *Eur. Sci. J.* 10 (2014) 84.
23. Tarik A., Thèse de doctorat, IAV Hassan II, Rabat, Maroc. (2005).
24. Belghiti M.L.,Chahlaoui A., Bengoumi D.,El Moustaine R., *Larhyss J.* 14 (2013) 21.
25. NM 03.7.001. Norme marocaine relative à la qualité des eaux d'alimentation humaine. Bulletin Officiel N° 5404, 16 Mars 2006.
26. Ghazali D., Zaid A., *Science Lib.* 4 (2012) 2111.
27. Sidibe M., Bocar K., Baidy L.Ô., *Science Lib.* 3 (2011) 2111.
28. Lee C.H., Lee H.K., Lee J.C., *Environ Geol.* 40 (2001) 482.
29. Brunel C., Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Toulouse, France. (2005).

(2015) ; <http://www.jmaterenvironsci.com>