

Calcul De L'indice De Qualité De L'eau (IQE) Pour L'évaluation De La Qualité Physico-Chimique Des Eaux Superficielles De L'Oued Moulouya (NE, Maroc)

Abdelghani Talhaoui, Doctorant

Abdellah El Hmaidi, Professeur

Hajar Jaddi, Doctorante

Habiba Ousmana, Docteur

Université Moulay Ismaïl, Faculté des Sciences, Equipe Sciences de l'Eau et Ingénierie de l'Environnement, Zitoune, Meknès, Maroc

Imad Manssouri, Professeur

Université Moulay Ismaïl, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Laboratoire de Mécanique, Mécatronique et Commande, Meknès, Maroc

Doi:10.19044/esj.2020.v16n2p64

[URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2020.v16n2p64](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2020.v16n2p64)

Résumé

L'indice de qualité de l'eau (IQE) est une expression numérique utilisée pour évaluer la qualité globale de l'eau à partir d'une grande quantité de données et il est facilement compris par les gestionnaires et décideurs. Dans cette étude, l'IQE à neuf paramètres physico-chimiques (pH, T°C, CE, O_{diss}, NH₄, NO₃, SO₄, PO₄ et DBO₅) est utilisé pour évaluer la qualité globale des eaux superficielles de l'Oued Moulouya dans le Nord Est du Maroc pendant la période de mars à aout 2014. Vingt-deux sites ont été étudiés depuis l'amont de l'oued dans le Haut Atlas jusqu'à l'embouchure en Méditerranée sur environ 600 km de long. En amont dans la Haute Moulouya, la qualité des eaux reste excellente sans grande variation saisonnière excepté les sites au niveau des communes urbaines de Boumia et de Zaida où la qualité est respectivement mauvaise (IQE de 65 à 74) et non potable (IQE de 388 à 584). Dans la Moyenne et Basse Moulouya, la qualité des eaux diminue (IQE de 18 à 335) en allant d'excellente à non potable pendant l'hiver et le printemps et de bonne à non potable pendant l'été (IQE de 23 à 451). La dégradation de la qualité des eaux au niveau des communes de Boumia, Zaida, Missouri et Gercif peut être due aux activités agricoles et aux rejets des eaux usées urbaines de ces agglomérations situées le long de l'oued. De façon saisonnière, la qualité de l'eau diminue de l'hiver à l'été en relation avec les variations des débits. De ce fait, la priorité doit être donnée à la réduction de ces sources de pollution

afin de protéger les ressources en eau et d'améliorer la qualité de l'eau dans le bassin versant.

Mots-clés : Oued Moulouya, physico-chimie, IQE, indice de qualité de l'eau, pollution, variation saisonnière

Calculation of the Water Quality Index (WQI) for the Evaluation of the Physico-Chemical Quality of Surface Waters of the Moulouya Wadi (NE, Morocco)

Abdelghani Talhaoui, Doctorant

Abdellah El Hmaidi, Professeur

Hajar Jaddi, Doctorante

Habiba Ousmana, Docteur

Université Moulay Ismaïl, Faculté des Sciences, Equipe Sciences de l'Eau et Ingénierie de l'Environnement, Zitoune, Meknès, Maroc

Imad Manssouri, Professeur

Université Moulay Ismaïl, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Laboratoire de Mécanique, Mécatronique et Commande, Meknès, Maroc

Abstract

The Water Quality Index (WQI) is a numerical expression used to assess the overall water quality from a large amount of data and to be easily understood by managers and decision-makers. In this study, the WQI with nine physicochemical parameters (pH, T °C, CE, O_{diss}, NH₄, NO₃, SO₄, PO₄ and BOD₅) was used to evaluate the overall quality of the surface waters of the Moulouya River in the northeastern of Morocco during the period from March to August 2014. Twenty-two sites were studied from upstream of the wadi in the High Atlas to the mouth in the Mediterranean Sea about 600 km long. Upstream in the Upper Moulouya, water quality remains excellent with little seasonal variation except in the urban communes of Boumia and Zaida where the quality is respectively poor (WQI from 65 to 74) to non-potable (WQI from 388 to 584). In the Middle and Lower Moulouya, the quality of water decreases (WQI from 18 to 335) and varies between excellent, good, bad and not drinkable during the winter and the spring and between good, bad and not drinkable during the summer (WQI from 23 to 451). The deterioration of water quality in the communes of Boumia, Zaida, Missouri and Gercif is due

to agricultural activities and discharges of urban wastewater from these agglomerations located along the wadi. Seasonally, water quality has decreased from winter to summer, probably in relation to flow variations. As such, priority should be given to reducing these sources of pollution in order to protect water resources and improve water quality in the watershed.

Keywords: Oued Moulouya, physico-chemistry, WQI, water quality index, pollution, seasonal variation

Introduction

L'eau est une ressource naturelle indispensable à la vie dans tout écosystème (Tampo et *al.*, 2015). Le maintien de sa qualité est une préoccupation majeure pour une société qui doit subvenir à des besoins en eau de plus en plus importants (Foto et *al.*, 2011). Elle joue un rôle très important dans le développement socio-économique aussi bien au niveau local, régional que national. Ainsi, les ressources en eau constituent une préoccupation majeure dans les pays à climats arides ou semi-arides comme elles sont absolument essentielles pour le développement des activités humaines, économiques et sociales.

Le long du bassin versant étudié, l'oued Moulouya subit de nombreuses pressions environnementales en relation avec l'impact des mines abandonnées (Zaida, Aouli, etc.), des huileries, des rejets urbains domestiques et industriels provenant des communes riveraines de la rivière en plus des apports des restes de pesticides et de fertilisants par lessivages des sols soumis à une agriculture intense et diversifiée. L'oued Moulouya, à l'instar de toutes les rivières, connaît également une croissance rapide de sa population riveraine. Cela entraînera forcément la croissance des activités humaines et par conséquent des risques de dégradation des eaux superficielles de l'oued en quantité et en qualité. Ces risques diminuent la disponibilité de l'eau. Ainsi, pour assurer sa pérennité ainsi que sa bonne gestion, dans le cadre du développement durable, il est judicieux de faire un suivi permanent de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux (Kadjangaba et al., 2018).

Les contrastes orographiques entre l'amont et l'aval et au sein d'une même zone sont étroitement liés aux conditions géologiques et géomorphologiques (la lithologie, structure géologique, types de relief structuraux, etc.). Ce facteur, favorisant l'érosion hydrique, est à tenir en compte pour atténuer les problèmes d'envasement des nombreux barrages situés le long de l'Oued Moulouya (Laabidi et al., 2016).

La qualité de l'eau est un critère important pour répondre à la demande et à l'approvisionnement en eau. Garantir une qualité d'eau douce adaptée aux besoins humains et écologiques est donc un aspect important de la gestion

intégrée de l'environnement et du développement durable. Pour représenter de manière claire la qualité de l'eau, différents indices de la qualité de l'eau sont utilisés pour évaluer la qualité des eaux superficielles.

L'indice de la qualité de l'eau (IQE) est une méthode simple utilisée comme partie de l'analyse de la qualité générale de l'eau à l'aide d'un groupe de paramètres réduisant les grandes quantités d'informations à un seul nombre, généralement sans dimension, d'une manière simple et reproductible (Abbasi et *al.*, 2012). Cette méthode a été initialement proposée par Horton (1965) et Brown et *al.* (1970). Pour calculer cet indice, Horton (1965) a proposé la première formule qui tient compte de tous les paramètres nécessaires à la détermination de la qualité des eaux de surface et qui reflète l'influence composite de différents paramètres importants pour l'évaluation et la gestion de la qualité de l'eau (Liouet *al.*, 2004 ; Tyagiet *al.*, 2013). Cet indice a été utilisé pour la première fois pour mettre en évidence les changements physico-chimiques susceptibles de se produire au cours de l'année et leur impact sur la qualité de l'eau d'alimentation (House et *al.*, 1987 ; House, 1990).

L'objectif de cette étude est de déterminer la qualité des eaux superficielles de l'Oued Moulouya par le calcul de l'indice de qualité globale de l'eau (IQE) effectué sur les paramètres physico-chimiques pour mettre en évidence l'évolution temporelle saisonnière et spatiale de l'amont vers l'aval du régime de qualité des eaux le long de l'oued.

Présentation de la zone d'étude

Le bassin versant de la Moulouya couvre à peu près la totalité du Maroc oriental avec une superficie de 55500 km². Géographiquement, il se situe entre les latitudes 32° 18' et 35° 8' Nord et les longitudes 1° 11' et 5° 37' Ouest et présente une forme allongée de direction générale ENE-WSW (Fig.1). Il est limité au Nord-Ouest par les bassins côtiers méditerranéens, à l'Ouest par le bassin versant de l'Oued Sebou, au Sud-ouest par le bassin versant de l'Oued Oum Er-Rebia, au Sud par le bassin versant de l'Oued Ziz, au Sud Est par le bassin versant de l'Oued Guir et à l'Est par le territoire Algérien.

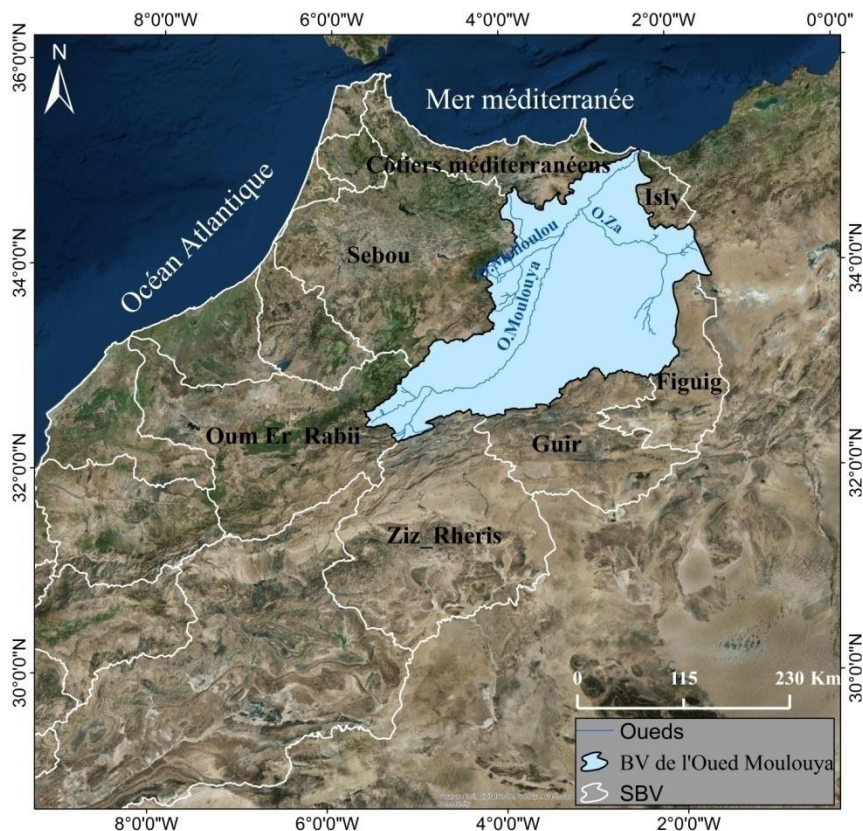


Figure 1. Situation géographique du bassin versant de la Moulouya.

La rivière de la Moulouya, d’une longueur d’environ 600 km, prend sa source à Alemsid à une altitude de 1170 m à la jonction du massif du Moyen Atlas et du Haut Atlas et se jette en Méditerranée à Saidia (Ras El Ma). De l’amont vers l’aval, le bassin versant est subdivisé en trois sous bassins (ABHM, 2008) : la Haute, la Moyenne et la Basse Moulouya (Fig.2). Son cours d’eau reçoit trois affluents importants : l’Ansegrim dans la Haute Moulouya puis successivement, le Melloulou et le Za dans la Basse Moulouya (Fig. 1).

La grande étendue et la diversité des reliefs du bassin versant de la Moulouya font que le climat est très variable d’une région à une autre. Le climat passe d’un type méditerranéen, dans la basse vallée de la Moulouya, à un climat continental relativement froid dans la Haute Moulouya et subaride à tendance saharienne dans les hauts plateaux de la Moyenne Moulouya (Riad, 2003).

D’un point de vue géologique, différentes formations affleurent au niveau du bassin versant de la Moulouya dont l’âge s’étend du Paléozoïque, représentant le socle, au Quaternaire (Fig. 2).

Le Paléozoïque est représenté essentiellement par des schistes et des granites. Il occupe 2,59% de la superficie totale du bassin versant de la Moulouya (Ahamrouni, 1996). Il affleure dans la Haute Moulouya sous des granites formant ainsi des massifs primaires de Boumia et d'Ahouli, et sous forme de schistes formant la plupart des séries métamorphiques de la région.

Le Trias affleure en discordance sur les massifs anciens de la haute Moulouya. Au niveau des chaînes des Horsts et des hauts plateaux, le Trias est formé par des marnes, des argiles et par des basaltes très altérés (Riad, 2003).

Le Jurassique est représenté par des faciès calcaro-dolomitiques et des dépôts terrigènes rouges formant le paléoseuil de la Haute Moulouya. Les formations carbonatées affleurent sur les bordures du Haut et du Moyen Atlas et à l'Ouest des Hauts plateaux (Riad, 2003).

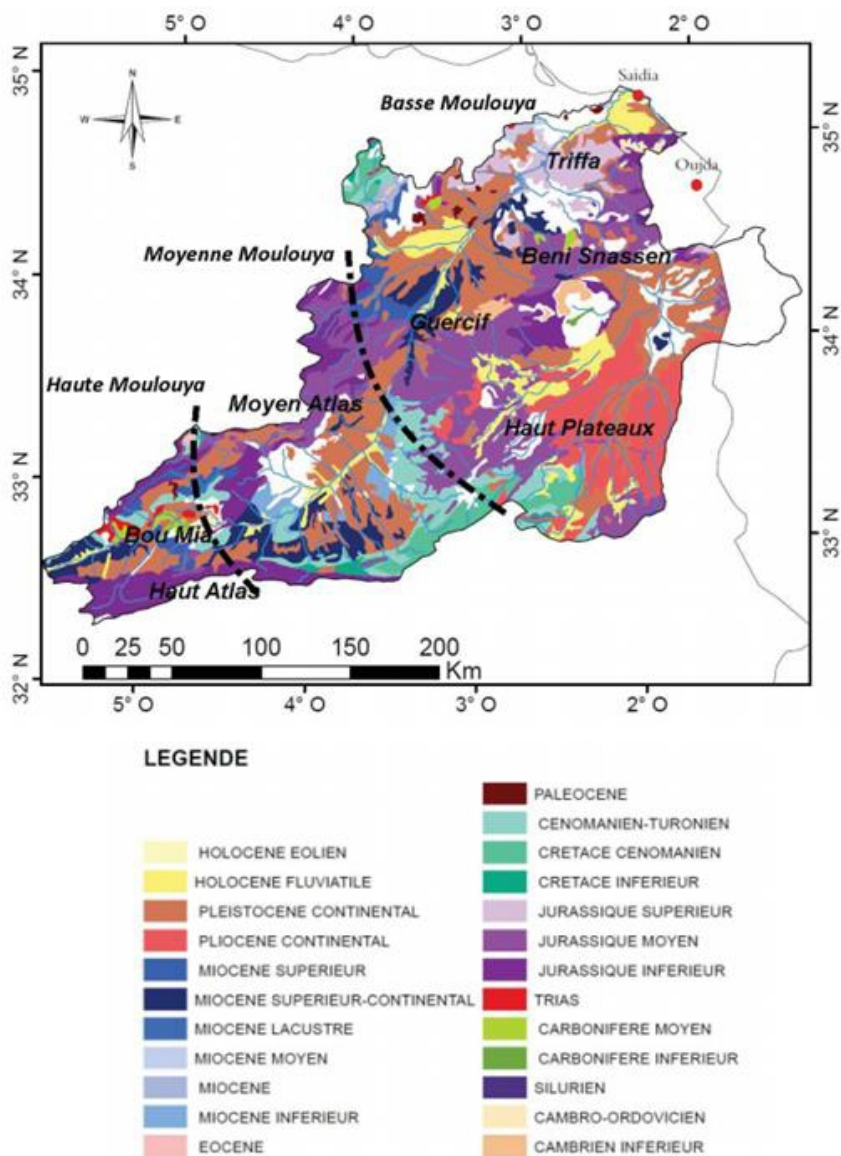


Figure 2. Extrait de la carte géologique du bassin de la Moulouya (Service Géologique du Maroc, 1985, échelle 1/1 000 000).

Le Crétacé est constitué par des marnes, grès rouges et calcaires blancs. Ces formations affleurent essentiellement le long du Haut Atlas entre le massif d'Aouli et le Haut Atlas et à l'Est de Midelt. Il débute par des conglomérats puis des marnes et des calcaires sur lesquels viennent se déposer des séries évaporitiques surtout gypseuses (Nasloubi, 1993).

Le Quaternaire est constitué par des formations les plus récentes qui viennent se déposer au-dessus de toutes les autres formations précédentes. Ce sont des terrasses fluviales qui affleurent sous forme de séries emboîtées et

recouvertes de dépôts essentiellement limoneux et conglomératiques (Amrani, 2007).

Méthodologie et données utilisées

Base de données

Les données utilisées, dans le cadre de cette étude, comprennent les données relatives aux analyses physicochimiques des eaux superficielles de l'Oued Moulouya (Taybi et al., 2016). Les échantillons d'eau ont été prélevés au niveau de 22 stations sur une période de temps s'étalant sur six mois durant trois campagnes de prélèvements réalisées successivement pendant les mois de mars-avril, mai-juin et juillet-août 2014. La base de données comprend en tout 66 échantillons.

Les paramètres physico-chimiques comprennent le pH, l'oxygène dissous O_{diss}, la conductivité électrique CE et la température T°C, mesurés (*in situ*) sur le terrain, et les sulfates (SO₄²⁻), la demande biologique en oxygène après 5 jours (DBO₅), les Orthophosphates (PO₄³⁻), l'Ammonium (N-NH₄) et les Nitrates (N-NO₃) analysés au laboratoire (Taybi et al., 2016). Ces paramètres ont été déterminés selon les méthodes d'analyses préconisées par les normes AFNOR (1997) et par Rodier et al. (1996).

L'évaluation et la visualisation des résultats ont été effectuées à l'aide du logiciel Excel 2010, RStudio et des logiciels destinés au système d'information géographique SIG (ArcGIS, QGIS).

Calcul de l'Indice de qualité de l'eau (IQE)

Neuf paramètres importants (pH, O_{diss}, CE, T°C, SO₄²⁻, DBO₅, PO₄³⁻, N-NH₄ et N-NO₃) ont été sélectionnés pour calculer l'Indice de qualité de l'eau IQE. Cet indice est une technique de classification de la qualité de l'eau qui repose sur la comparaison des paramètres de qualité de l'eau avec les normes internationales ou nationales marocaines dans le cadre de cette étude. L'IQE résume de grandes quantités de données sur la qualité de l'eau en termes simples (Excellente, Bonne, Mauvaise, Très mauvaise, etc.). Dans cette étude l'indice IQE est appliqué pour estimer l'influence des facteurs naturels et anthropiques sur la base de plusieurs paramètres clés du chimisme des eaux de surface de l'Oued Moulouya. Cet indice est calculé en suivant la méthode de l'indice arithmétique pondéré (Brown et al., 1970 ; Brown et al., 1972 ; Chatterji et Raziuddin, 2002 ; Yidana et Yidana, 2010). Dans cette approche, une valeur numérique appelée poids relatif (W_i), spécifique à chaque paramètre physico-chimique, est calculée (Tab.1) selon la formule suivante :

$$W_i = \frac{k}{S_i} \quad (1)$$

Où :

k : constante de proportionnalité et peut également être calculée à l'aide de l'équation suivante:

$$k = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (1/S_i)} \quad (2)$$

n : nombre de paramètres

S_i : valeur maximale de la norme standard marocaine des eaux de surface (Norme Marocaine de qualité des eaux, 2002) de chaque paramètre en mg/l sauf pour le pH, la T°C et la conductivité électrique.

Ensuite, une échelle d'évaluation de la qualité (Q_i) est calculée pour chaque paramètre en divisant la concentration par la norme dudit paramètre et en multipliant l'ensemble par 100 comme dans la formule suivante :

$$Q_i = \left(\frac{C_i}{S_i} \right) \times 100 \quad (3)$$

Q_i : échelle d'évaluation de la qualité de chaque paramètre.

C_i : la concentration de chaque paramètre en mg/l

Finalement l'indice global de la qualité de l'eau est calculé par l'équation suivante :

$$IQE = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \times W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (4)$$

Cinq classes de qualité peuvent être identifiées selon les valeurs de l'indice de qualité de l'eau IQE (Tab.1).

Tableau 1. Classification et usage possible de l'eau selon l'IQE (Brown et al., 1972 ; Chatterji et Raziuddin, 2002 ; Aher et al., 2016).

Classe de IQE	Type d'eau	Usage possible
0 - 25	Excellente qualité	Eau potable, irrigation et industrie
>25 - 50	Bonne qualité	Eau potable, Irrigation et industrie
>50 - 75	Mauvaise qualité	Irrigation et industrie
>75 - 100	Très mauvaise qualité	Irrigation
> 100	Eau non potable	Traitement approprié requis avant utilisation

Résultat et discussion

Les résultats obtenus dans cette étude sont analysés, interprétés et présentés sous forme de cartes thématiques à l'aide des outils du système d'information géographique SIG, afin de donner une idée générale sur la qualité globale des eaux étudiées et leur évolution spatiale et saisonnière.

Statistique descriptive

Les caractéristiques statistiques descriptives des variables physico-chimiques utilisées dans cette étude concernent les valeurs minimales et maximales, la moyenne et l'écart-type (Tab.2 et Fig.3). Les résultats montrent que le pH est légèrement alcalin, ne présente pas une large différence entre les trois campagnes de prélèvement et varie entre 6,12 et 8,9 avec une valeur maximale observée durant la campagne mai-juin. La température varie entre 11,1 et 28,6°C, cette dernière est observée pendant la période juillet-août. La minéralisation des eaux est relativement élevée avec une conductivité électrique qui varie entre 413 et 2249µS/cm. La concentration de l'oxygène dissous diminue en fonction de la période de prélèvement, avec une valeur minimale enregistrée pendant juillet-août. En ce qui concerne les concentrations en Ammonium et en Nitrates, les résultats augmentent respectivement de 1,12 à 102,95 et de 0,36 à 4,07mg/l. Les teneurs en Ammonium et en nitrates suivent parfaitement celles de la DBO₅ et indiquent que les fortes concentrations en Ammonium et en Nitrates sont accompagnées par une forte charge polluante (Fig. 3). Les teneurs en sulfates oscillent entre 27 et 495mg/l. Tous les paramètres montrent une augmentation légère mais nette depuis le mois de mars jusqu'au mois de juillet à part l'oxygène dissous qui voit ses teneurs à la baisse (Tab.2 et Fig.3).

Tableau 2. Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques relatives aux trois campagnes de prélèvement de l'année 2014.

		pH	T	CE	O-dis	NH ₄	NO ₃	SO ₄	PO ₄	DBO ₅
			°C	(µS/cm)	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Mars-Avril	min	6.74	11.1	413	3.6	0.008	1.12	27	0.009	0.35
	Moyenne	7.39	17.68	1102.82	7.35	0.26	14.01	169.86	0.59	5.16
	max	8.21	25	2239	9.8	2.65	97.61	455	2.507	25.55
	Écart-type	0.38	4.57	603.78	1.37	0.64	23.22	128.21	0.75	5.73
Mai-juin	Min	6.9	12.3	421	3.15	0.011	1.19	31	0.01	0.43
	Moyenne	7.48	20.29	1201.32	7.21	0.35	14.54	178.55	0.67	5.45
	Max	8.9	26	2249	9.11	3.26	101.21	467	2.555	33.15
	Écart-type	0.48	4.51	626.33	1.28	0.83	24.21	134.18	0.83	6.78
Juillet-Août	min	6.12	15.1	453	1.01	0.011	1.27	33	0.011	0.49
	Moyenne	7.39	23.05	1236.14	6.44	0.48	15.18	198.73	0.76	6.98
	max	7.97	28.6	2240	8.85	4.07	102.95	495	2.79	39.55
	Écart-type	0.43	4.20	622.20	1.78	1.10	25.28	149.53	0.91	8.60

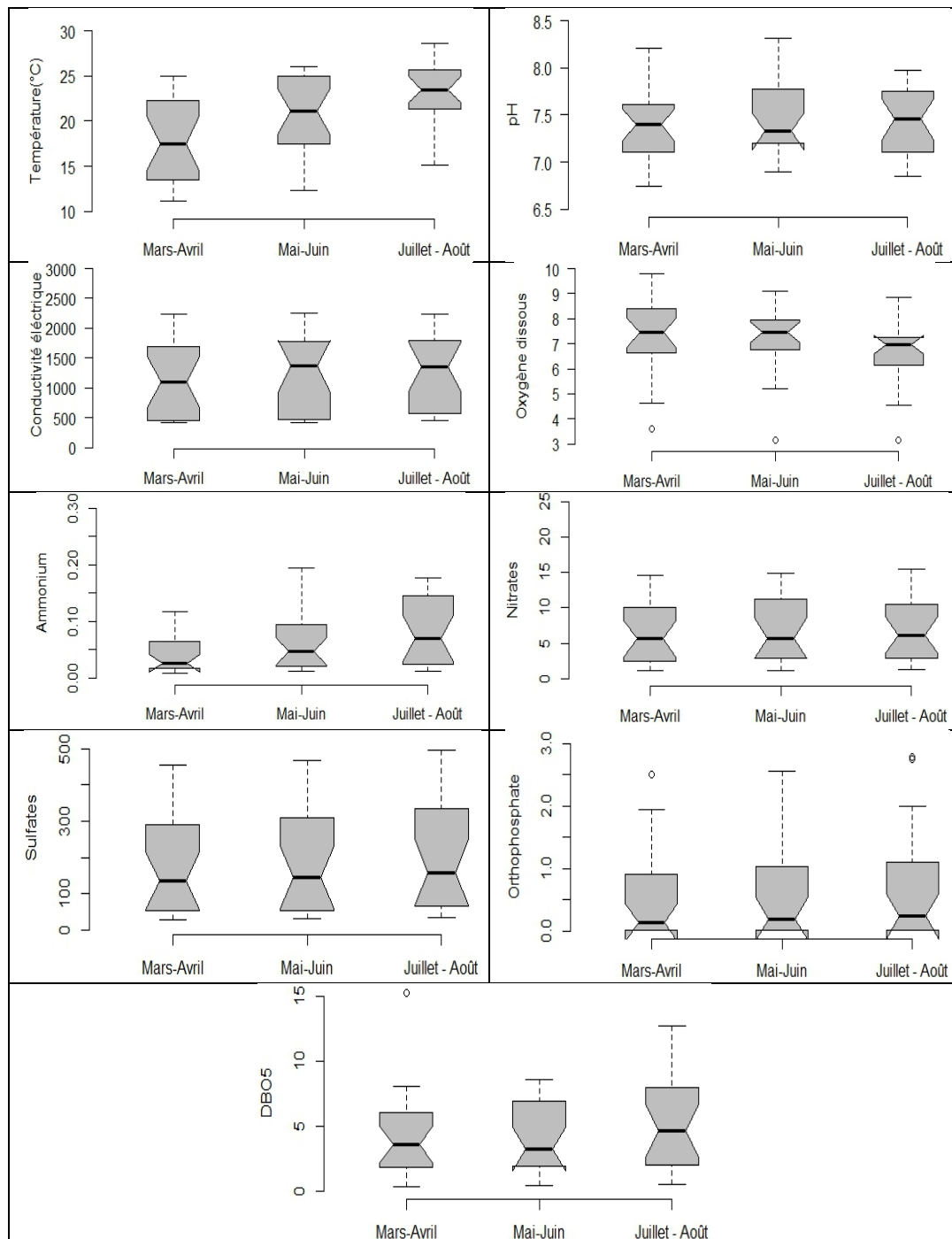


Figure 3. Diagramme en boîte à moustaches des paramètres physico-chimiques des trois campagnes de l'année 2014.

Résultats du calcul de l'indice IQE et évaluation de la qualité des eaux

Le poids relatif (W_i) de chaque paramètre physico-chimique et la constante de proportionnalité k sont calculés en premier lieu en utilisant les valeurs maximales de la norme standard marocaine des eaux de surface (Norme Marocaine de qualité des eaux, 2002) des paramètres physico-chimiques étudiés (Tab.3).

Tableau 3. Poids des paramètres physico-chimiques et norme marocaine de qualité des eaux de surface (Norme Marocaine de qualité des eaux, 2002).

Paramètres	Normes marocaines	S_i (valeur maximale standard, Maroc)	$1/S_i$	W_i
pH	6,5-9,2	9	0,111	0,031
T (°C)	20-30	30	0,033	0,009
Cond ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	750-2700	2700	0,000	0,000
O _{diss} (mg/l)	3-5	5	0,200	0,056
NH ₄ ⁺ (mg/l)	0.1-0.5	0.5	2,000	0,560
NO ₃ ⁻ (mg/l)	<50	50	0,020	0,006
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	100-250	250	0,004	0,001
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	0,2-1	1	1,000	0,280
DBO ₅ (mg/l)	3-5	5	0,200	0,056
			3,569	
			$k=1/\sum(1/S_i)$	0,280

Après le calcul de l'indice global de qualité IQE en utilisant les résultats d'analyses physico-chimiques et les valeurs standards de la norme marocaine (Norme Marocaine de qualité des eaux, 2002), la classe de qualité des eaux est déterminée pour les 66 échantillons relatifs aux 22 stations d'échantillonnage (Tab.4). Ainsi, quatre classes de qualité (Excellente, bonne, mauvaise et non potable) sont identifiées lors des campagnes mars-avril et mai-juin et cinq classes avec l'ajout de la classe très mauvaise lors de la campagne juillet-aout.

Tableau 4. Valeurs de l'indice IQE et classe de qualité des eaux superficielles de l'Oued Moulouya pendant les trois campagnes de l'année 2014.

Stations	IQE Mars-Avril	Classe de qualité	IQE Mai-juin	Classe de qualité	IQE Juillet-Aout	Classe de qualité
M1	17.006	Excellente	16.657	Excellente	16.220	Excellente
M2	16.141	Excellente	16.696	Excellente	16.612	Excellente
M3	15.853	Excellente	16.476	Excellente	15.924	Excellente
M4	21.364	Excellente	22.254	Excellente	22.854	Excellente
M5	65.098	Mauvaise	69.221	Mauvaise	73.641	Mauvaise
M6	388.543	Eau non potable	481.617	Eau non potable	584.016	Eau non potable
M7	16.551	Excellente	16.053	Excellente	17.455	Excellente
M8	15.569	Excellente	15.405	Excellente	16.029	Excellente
M9	14.198	Excellente	13.528	Excellente	13.956	Excellente
M10	15.189	Excellente	15.850	Excellente	16.282	Excellente
M11	46.408	Bonne qualité	50.372	Mauvaise	52.575	Mauvaise
M12	270.277	Eau non potable	334.950	Eau non potable	451.521	Eau non potable
M13	58.652	Mauvaise	55.804	Mauvaise	71.328	Mauvaise
M14	27.832	Bonne	31.858	Bonne	36.803	Bonne
M15	41.870	Bonne	70.765	Mauvaise	77.284	Très mauvaise
M16	162.545	Eau non potable	213.463	Eau non potable	314.424	Eau non potable
M17	18.738	Excellente	21.197	Excellente	28.937	Bonne
M18	42.801	Bonne	47.333	Bonne	54.672	Mauvaise
M19	45.985	Bonne	55.800	Mauvaise	66.889	Mauvaise
M20	24.274	Excellente	25.408	Bonne	26.682	Bonne
M21	38.356	Bonne	47.816	Bonne	54.080	Mauvaise
M22	21.981	Excellente	23.126	Excellente	23.558	Excellente

Les cartes thématiques finales de distribution de l'IQE sont préparées à l'aide du système d'information géographique SIG (Fig. 4, 5 et 6).

Cartes thématiques saisonnières de l'indice de qualité globale IQE des eaux superficielles

Campagne de mars-avril 2014 : fin hiver – début printemps

L'indice de qualité de l'eau IQE montre qu'au passage hiver - printemps mars -avril, 77% des stations (M1, M2, M3, M4, M7, M8, M9, M10, M17, M20 et M22) sont de bonne à excellente qualité ($0 < IQE \leq 50$). Cependant, les stations M5 de Boumia dans la Haute Moulouya et M13 de Outat El Haj dans la Moyenne Moulouya, représentant 9% des stations, sont de mauvaises qualités ($50 < IQE \leq 75$). Aussi, les stations M6 de Zaida dans la Haute Moulouya, M12 de Missour dans la Moyenne Moulouya et M16 à la confluence avec l'Oued Melloulou dans la Basse Moulouya représentent 13,6% des stations et montrent des eaux non potables ($IQE > 100$) (Tab.4 et Fig.4).

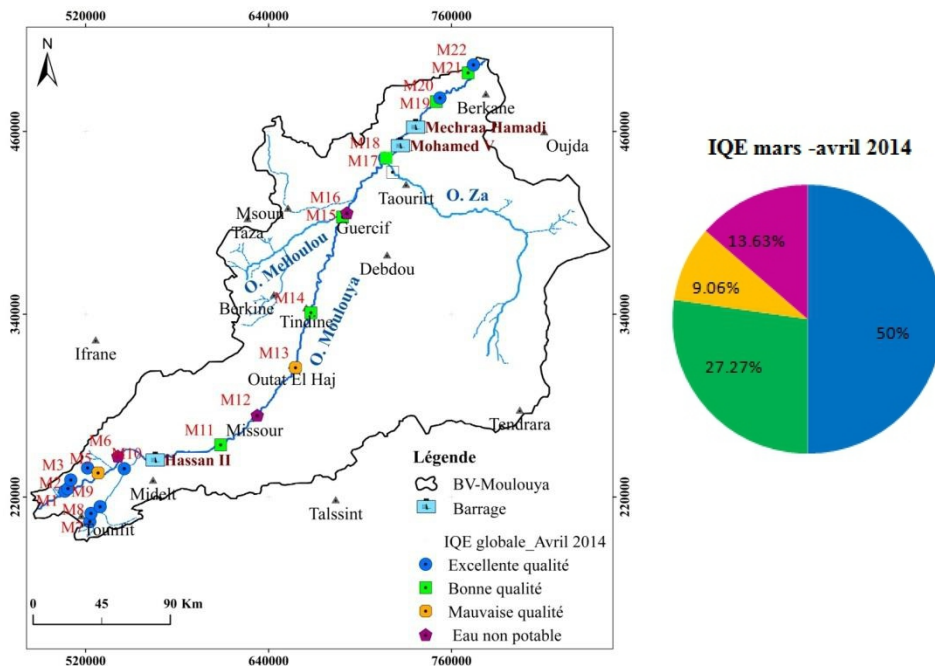


Figure 4. Carte thématique de l'indice de qualité globale IQE des eaux superficielles de l'Oued Moulouya pendant la campagne de mars-avril 2014.

Campagne du printemps de mai - juin 2014

Les résultats montrent qu'en printemps, mai-juin 2014, l'IQE au niveau de l'Oued Moulouya se situe entre la valeur 13,528 relative à une eau d'excellente qualité et 481,617 indiquant une eau non potable (Tab.4 et Fig.5). Ils indiquent que 63,63% des stations conservent leurs classes de bonne à excellente qualité ($0 < IQE \leq 50$). Par ailleurs, les stations M5 de Boumia, M11 de Tamdafelt, M13 de Outat Al Haj, M15 de l'Oued Melloulou et M19 de Sebra sont de mauvaise qualité d'eau ($50 < IQE \leq 75$) et représentent 22,7% (Tab.4 et Fig.5).

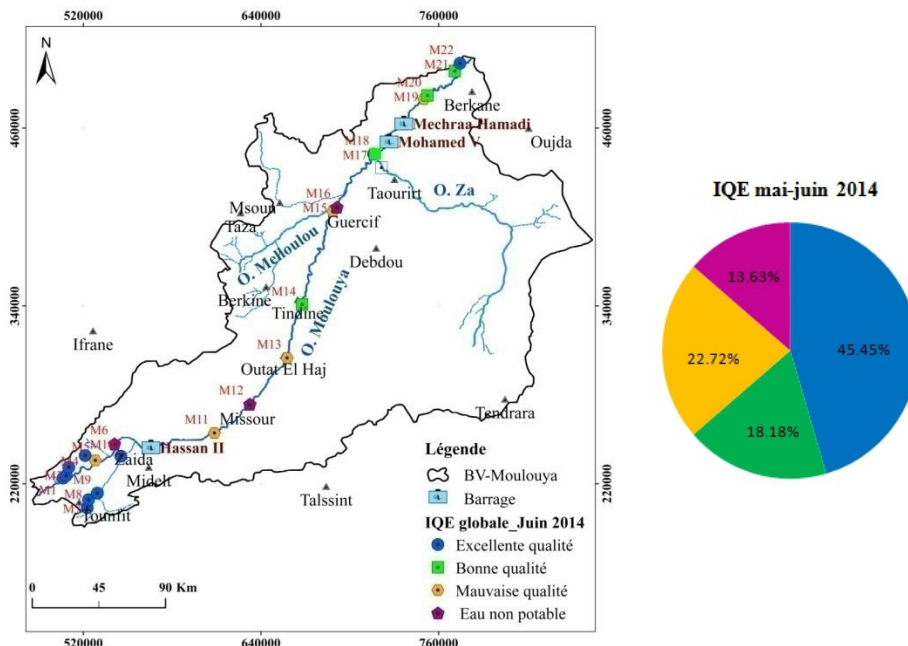


Figure 5. Carte thématique de l'indice de qualité globale IQE des eaux superficielles de l'Oued Moulouya pendant la campagne de mai - juin 2014.

Campagne d'été de juillet-août 2014

Les résultats montrent qu'en été, juillet-août 2014, l'IQE au niveau de l'Oued Moulouya se situe entre la valeur 13,956 relative à une eau d'excellente qualité et 584,016 indiquant une eau non potable (Tab.4 et Fig.6). Ils indiquent que 54,5% des stations ont conservé leurs classes de bonne à excellente qualité ($0 < IQE \leq 50$). Cependant, 27,27% des stations, dont M5 de Boumia, M11 de Tamdafelt, M13 de Outat Al Haj, M15 de Melloulou, M19 de Sebra et M21 du Pont Hassan II, présentent une mauvaise qualité d'eau ($50 < IQE \leq 75$). Aussi, les stations M6 de Zaida, M12 de Missouri et M16 de l'Oued Melloulou indiquent toujours des eaux non potables ($IQE > 100$) (Tab.4 et Fig. 6).

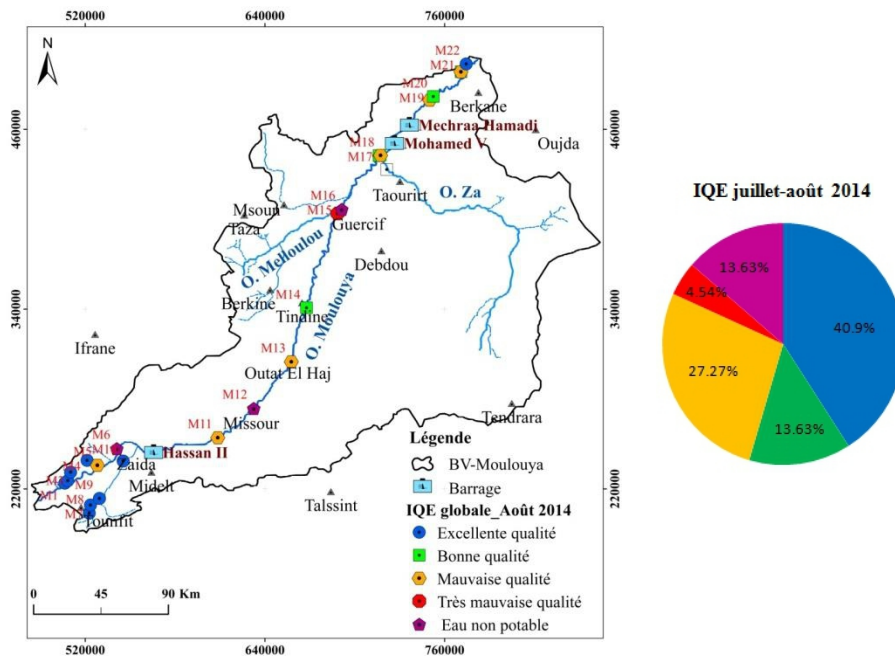


Figure 6. Carte thématique de l’indice de qualité globale IQE des eaux superficielles de l’Oued Moulouya pendant la campagne de juillet-août 2014.

Discussion

Globalement, les résultats obtenus mettent en évidence deux variations significatives avec une tendance claire vers la dégradation ; l’une spatiale de l’amont vers l’aval et l’autre temporelle saisonnière depuis le mois de mars en hiver jusqu’au mois d’août en été (Tab. 4, 5 et 6 et Fig. 7).

La variation longitudinale amont – aval le long du cours d’eau de l’Oued Moulouya est très évidente. Globalement, pendant les trois campagnes étudiées en 2014, la qualité des eaux est excellente en amont de la rivière dans la Haute Moulouya à l’exception de la station 5 de Boumia caractérisée par des eaux de mauvaise qualité et de la station 6 de Zaida par des eaux non potables. Au niveau de la Moyenne et Basse Moulouya (Fig.2), la qualité des eaux diminuent de façon spectaculaire et irrégulière au-delà du barrage Hassan II entre excellente, bonne, mauvaise et non potable pendant l’hiver et le printemps et entre bonne, mauvaise et non potable pendant l’été (Tab.4 et Fig.4, 5 et 6).

La détérioration de la qualité des eaux de l’amont vers l’aval des rivières serait principalement liée aux rejets des eaux usées urbaines et industrielles et / ou à l’impact des activités agricoles (Şener et *al.*, 2017 ; Izougarhane et *al.*, 2016). Au niveau de l’Oued Moulouya, elle se traduit par une importante charge minérale et organique d’origine anthropique en provenance des communes urbaines de Boumia et Zaida dans la Haute

Moulouya et surtout aussi au niveau de la Moyenne et en amont de la Basse Moulouya. Au niveau de ces communes, les eaux sont très polluées à causes des concentrations très élevées des nitrates et de l'ammonium qui dépassent les normes marocaines de potabilité et peuvent être principalement d'origine anthropique avec les activités agricoles par lessivage des sols très chargés en fertilisants et avec les rejets des eaux usées urbaines et industrielles. En effet, la rivière reçoit directement les rejets des eaux usées sans traitement provenant des communes urbaines de Missouri, Outat El Haj et Guercif. Par contre, la qualité des eaux s'améliore grâce au phénomène de dilution des polluants directement par les lâchées des eaux à partir des barrages (Hassan II, Enjil, Mohamed V, Machraa Hammadi, etc.) et suite aux crues que connaît la région pendant la période humide (mars-avril). Dunca(2018) a conclu sur un travail similaire sur une rivière transfrontalière entre la Roumanie et la Serbie que la pollution des rivières augmente généralement de l'amont vers l'aval. Au contraire, Bordalo et *al.* (2006), ont détecté plutôt une amélioration de l'amont vers l'aval de la qualité des eaux au niveau d'une autre rivière transfrontalière Douro entre l'Espagne et le Portugal.

Cette dégradation environnementale de la qualité des eaux au niveau des communes urbaines est due aux concentrations relativement élevées en Ammonium, en Nitrates et en DBO₅ qui dépassent les normes marocaines de potabilité de 0,5 pour l'Ammonium, 50mg/l pour les Nitrates et 5mg/l pour la DBO₅. La dégradation de la qualité des eaux au niveau des stations M6 de Zaida, M12 de Missouri et M16 de l'Oued Melloulou serait due aux activités agricoles et aux rejets des eaux usées urbaines des communes situées le long de l'oued. Des causes similaires de pollution ont été observées le long de la basse vallée de Sébou au Maroc (Izougarhane et *al.*, 2016) et le long de la basse vallée de l'Ouémé au Bénin (Adjagodo et *al.*, 2017).

La variation saisonnière est également très nette. Elles montrent une augmentation nette depuis le mois de mars en fin d'hiver jusqu'au mois d'août en été au niveau de toutes les caractéristiques statistiques (valeurs minimales et maximales, Quartiles 1 et 3, médiane et moyenne). De ce fait, la qualité de l'eau de l'oued Moulouya se situe dans la plage «excellente» à «non potable ou impropre à la consommation» mais avec une nette évolution vers la dégradation en allant de la fin de l'hiver vers la saison d'été (Tab.5 et Fig.7). Des travaux similaires ont montré que la pollution des rivières est relativement plus élevée pendant la saison estivale que lors de la saison hivernale de pluies (Bordalo et *al.*, 2006 ; Yogendra et *al.*,2008). L'augmentation du degré de pollution en été serait liée à la diminution des débits de l'oued Moulouya alors que les débits des effluents chargés en eaux usées domestiques et industrielles provenant des différents centres urbains (Boumia, Zaida, Missouri, Outat Al Haj, Guercif, etc.) restent importants.

Tableau 5. Statistiques descriptives de l'indice IQE pendant les trois campagnes de l'année 2014.

IQE	Min	Quarile 1	Median	Moyenne	Quartile 3	Max
mars-avril	14.2	16.66	26.05	62.97	46.3	388.54
mai-juin	13.53	16.67	28.63	75.53	55.8	481.62
juillet-aout	13.96	16.82	32.87	93.26	70.22	584.02

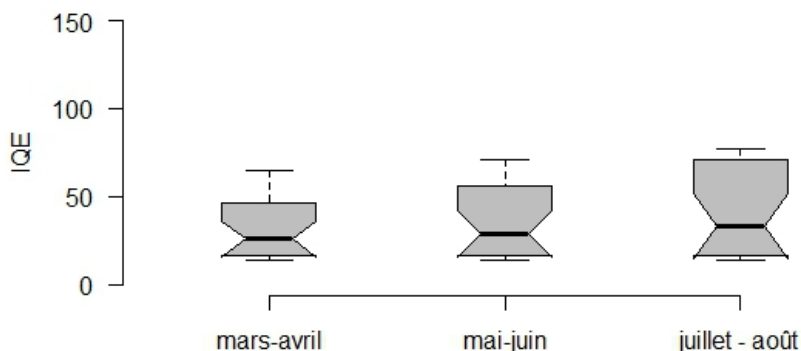


Figure 7. Boîte à moustaches de l'indice de qualité des eaux (IQE) des trois campagnes étudiées.

La tendance à la dégradation s'observe aussi dans la diminution du nombre des stations d'excellente et de bonne qualité d'eau en allant du printemps (mars-avril et mai-juin) à l'été respectivement de 11 à 9 et de 6 à 3. Elle se voit de même dans l'augmentation du nombre des stations de mauvaise et de très mauvaise qualité d'eau respectivement de 2 à 6 et de 0 à 1. Toutefois, les trois stations très polluées, M6 de Zaida, M12 de Missouri et M16 de l'Oued Melloulou, de qualité d'eau non potable sont restées les mêmes pendant les trois campagnes (Tab. 4 et 6). Cette variation saisonnière de l'IQE et par conséquent de la qualité globale des eaux depuis le mois de mars (fin de la saison d'hiver) jusqu'au mois d'août (saison d'été) est aussi démontrée par l'augmentation de la moyenne et des valeurs minimales et maximales des teneurs de tous les paramètres physico-chimiques sauf celles de l'oxygène dissous qui diminuent (Tab.2 et Fig.3).

Tableau 6. Variation du nombre de stations pour chaque classe de qualité des eaux durant les trois campagnes étudiées en 2014.

Qualité des eaux	Nombre de station : Mars -Avril	Nombre de station : Mai-Juin	Nombre de station : Juillet-Aout
Excellente	11	10	9
Bonne	6	4	3
Mauvaise	2	5	6
Très Mauvaise	0	0	1
Eau non potable	3	3	3

Conclusion

La présente étude a porté sur la mesure de la qualité globale des eaux de surface de l'Oued Moulouya situé dans la partie nord orientale du Maroc. L'indice de la qualité globale de l'eau IQE était un outil très utile pour prendre la bonne décision et évaluer de façon comparative la qualité de l'eau dans le temps et dans l'espace.

L'indice IQE au cours de cette étude a montré une différenciation temporelle importante marquant clairement une variation saisonnière et spatiale de l'amont vers l'aval. Ainsi, le niveau de détérioration devient élevé pendant la période sèche estivale et serait lié à la diminution des débits de l'oued Moulouya alors que les débits des effluents chargés en eaux usées domestiques et industrielles provenant des différents centres urbains (Boumia, Zaida, Missouri, Outat El Haj, Guercif, etc.) restent importants. De même, le développement de l'agriculture et la contribution élevée du ruissellement et du lessivage des sols principalement vers l'aval au niveau de la Moyenne et Basse Moulouya accroissent la détérioration de la qualité des eaux aussi bien dans la rivière que dans les retenues de barrages. Par conséquent, la priorité doit être donnée à la réduction de ces sources de pollution afin de protéger les ressources en eau et d'améliorer la qualité de l'eau dans le bassin versant. Pour cela, les décideurs seront amenés à installer des stations d'épuration des eaux usées et à mener des campagnes de sensibilisation auprès des agriculteurs pour l'utilisation rationnée des fertilisants.

En perspective, l'évaluation de la qualité de l'eau de l'Oued Moulouya pourrait intégrer d'autres paramètres complémentaires tels que les paramètres microbiologiques en plus des paramètres physico-chimiques et des métaux lourds dans les calculs de l'IQE et dans la surveillance de la qualité de l'eau.

References:

1. Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2012). Water quality indices. 1st ed., Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, (384p), Paperback ISBN: 9780444638366.
2. Adjagodo, A., Agassounon Djikpo Tchibozo, M., Kelomè, N.C., Vissin, E.W., Agbossou, E. (2017). Pollution Physique Et Bactériologique De L'eau Du fleuve Dans La Basse Vallée De L'ouémé Pendant Les Périodes De Basses Et Hautes Eaux Au Bénin. *European Scientific Journal*, 13(33), (pp.167-186). ISSN: 1857-7881 (Print) e - ISSN 1857-7431. Doi: 10.19044/esj.2017.v13n33p167.
3. Ahamrouni, J. (1996). Erosion hydrique dans le bassin versant de la Moulouya (Maroc Oriental): Recherche des zones sources d'engorgement de la retenue du barrage Mohamed V. Thèse de 3^{ème} cycle, Université Cheikh Anta Diop, Faculté des Sciences et Techniques, Dakar, Sénégal, 147 p.

4. AFNOR(1997). Qualité de l'eau. Recueil des normes françaises environnement. Tomes 1, 2, 3 et 4, (1372 p).
5. Aher, D. N., Kele, V. D., Malwade, K. D., & Shelke, M. D. (2016). Lake Water Quality Indexing To Identify Suitable Sites For Household Utility: A Case Study Jambhulwadi Lake; Pune (MS). *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 6(5), (pp.16-21).
6. Amrani, A. (2007). Apport des données couplées d'imagerie satellitaire Etm+ de landsat 7 et modèle numérique de terrain appliquées à l'étude morphogénétique de la haute et moyenne Moulouya (Maroc). Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences Agdal de Rabat (559), (217p).
7. Bordalo, A., Teixeira R., Wiebe, W. J. (2006). A Water Quality Index Applied to an International Shared River Basin: The Case of the Douro River. *Environ Manage*, 38 (pp. 910–920). DOI 10.1007/s00267-004-0037-6.
8. Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., Tozer, R. G. (1970). A Water Quality Index- Do We Dare? *Water and Sewage Works*, 117, (pp. 339–343).
9. Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & O'Connor, M. F. (1972). A water quality index-crashing the psychological barrier. In *Indicators of environmental quality* (pp. 173-182). Springer, Boston, MA.
10. Chatterji, C., Raziuddin, M. (2002). Determination of water quality index of a degraded river in Asanol Industrial area, Raniganj, Burdwan, West Bengal. *Nature, Environment and Pollution Technology*, 1 (2) (pp. 181-189).
11. Dunca, A. M. (2018). Water pollution and water quality assessment of major transboundary rivers from Banat (Romania). *Journal of Chemistry*, 2018, (pp. 1-8). <https://doi.org/10.1155/2018/9073763>.
12. Foto, M. S., Zebaze, T. S. H., Nyamsi T. N. L., Ajeegah, G. A. et Njiné, T. (2011). Évolution Spatiale de la Diversité des Peuplements de Macro invertébrés benthiques dans un cours d'eau anthropisé en milieu Tropical (Cameroun). *European Journal of Scientific Research*, 55(2), (pp. 291-300).
13. House, M. A. (1990). Water quality indices as indicators of ecosystem change. *Environmental Modeling & Assessment*, 15(3), (pp. 255–263).
14. House, M. A., Ellis, J. B. (1987). The development of water quality indices for operational management, *Water Science and Technology*, 19(9), (pp. 145–154).
15. Horton, R. K. (1965). An index number system for rating water quality. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 37(3), (pp. 300-306).

16. Izougarhane, M., Mansouri, D., El Ibaoui, H., Chakiri, S. & Fadli, M. (2016). Physico-Chimie Et Teneurs Metalliques Des Eaux De L'estuaire De L'oued Sebou Durant Des Années De Dragage Du Sable/ 2007, 2014, 2015, 2016. *European Scientific Journal*, 12(30), (pp. 127-151). doi: 10.19044/esj.2016.v12n30p127.
17. Kadjangaba, E., Djoret, D., Doumnang Mbaigane J. C., Ndoutamia Guelmbaye, A., Mahmoud, Y. (2018). Impact des Processus Hydrochimique sur la Qualité des Eaux souterraines de la Ville de N'Djaména-Tchad. *European Scientific Journal*, 14 (18), (pp. 161-177). ISSN: 1857 – 7881 (Print) e-ISSN 1857- 7431. Doi: 10.19044/esj.2018.v14n18p162.
18. Laabidi A., El Hmaidi A., Gourari L. et El Abassi M. (2016). Apports du modèle numérique de terrain MNT à la modélisation du relief et des caractéristiques physiques du bassin versant du Moyen Beht en amont du barrage El Kansera (Sillon Sud Rifain, Maroc). *European Scientific Journal*, 12 (29), (pp. 258-288). doi: 10.19044/esj.2016.v12n29p258.
19. Liou, S.M., Lo, S.L., Wang, S.H. (2004). A generalized water quality index for Taiwan, *Environmental Modeling & Assessment*, 96(1–3), (pp. 35–52).
20. Nasloubi, M. (1993). Genèse et modélisation des minéralisations plombifère de la haute Moulouya (Maroc). Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, (107p).
21. Norme Marocaine de qualité des eaux (2002). Arrêté conjoint du Ministre de l'équipement et du Ministre chargé de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme, de l'habitat et de l'environnement n°1275 - 01 du 10 Chaabane 1423, (17- 10-2002) définissant la grille de qualité des eaux de surface. Rabat, Bulletin Officiel Maroc, N°5062.
22. Riad, S. (2003). Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. Thèse en cotutelle. Université des Sciences et Techniques de Lille (France), Université Ibnou Zohr d'Agadir (Maroc), (147p).
23. Rodier, J., Bazin, C., Broutin, J.P., Chambon, P., Champsaur, H., Rodi, L. (1996). L'analyse de l'eau naturelle, eaux résiduaires, eau de mer, 8^{ème} édition, Dunod, Paris, France, (1383p).
24. Sahu, P. & Sikdar, P. K. (2008). Hydrochemical framework of the aquifer in and around East Kolkata Wetlands, West Bengal, India. *Environmental Geology*, 55(4), (pp. 823-835). DOI 10.1007/s00254-007-1034-x.
25. Şener, Ş., Şener, E., Davraz, A. (2017). Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). *Science of the Total Environment*, 584, (pp. 131-144).

26. Tampo, L., Gnazou, M., Akpataku, V., Bawa, L. et Djaneyé-Boundjou, G. (2015). Application des méthodes statistiques à l'étude hydrochimique des eaux d'un hydrosystème tropical : Cas du bassin versant de la rivière Zio (Togo). *European Scientific Journal*, 11(14), (pp. 204-225).
27. Taybi, A.F., Mabrouki, Y., Berrahou, A., Chaabane, K. (2016). Évolution spatiotemporelle des paramètres physico-chimiques de la Moulouya. *Journal of Materials and Environmental Science*, 7 (1) (pp. 272-284).
28. Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P., Dobhal, R., (2013). Water quality assessment in terms of water quality index. *American Journal of Water Resources*, 1(3), (pp. 34–38).
29. Yidana, S. M. & Yidana, A. (2010). Assessing water quality using water quality index and multivariate analysis. *Environmental Earth Sciences*, 59(7) (pp. 1461-1473). <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0132-3>.
30. Yogendra, K., & Puttaiah, E. T. (2008). Determination of water quality index and suitability of an urban waterbody in Shimoga Town, Karnataka. In *Proceedings of Taal2007: The 12th world lake conference*, 342, (346p).