

EVALUATION DE LA QUALITE DES EAUX DE SURFACE DE LA RIVIERE KADICHA

F. Merhabi, H. Amine, J. Halwani

Laboratoire des sciences de l'eau et de l'environnement (LSEE),
Université libanaise, Tripoli, Liban.

(Received Octobre 2018– Accepted April 2019)

RESUME

F. Merhabi, H. Amine, J. Halwani. 2019. Evaluation de la qualité des eaux de surface de la rivière Kadicha. *Journal Scientifique Libanais*. 20(1): 10-34.

La rivière « Kadicha » au nord du Liban est soumise à des pressions urbaines, agricoles et industrielles. En l'absence de station d'épuration, Les eaux usées sont rejetées directement dans le cours de la rivière. Afin d'évaluer la qualité des eaux de surface de la rivière Kadicha, 12 sites d'échantillonnage, ont été sélectionnés au niveau desquels des prélèvements ponctuels des eaux de surface ont été effectués sur 2 saisons (humide et sèche). Les paramètres physico-chimiques ont été déterminés : pH, température, conductivité électrique, TDS (solides totaux dissous) et les MES (matières en suspension). Des analyses bactériologiques en coliformes thermotolérants (CTT) et en streptocoques fécaux (SF) ont été effectuées par les méthodes classiques de filtration sur membrane. Le suivi des paramètres physico-chimiques indique une variation spatiale influencée par les activités anthropiques exercées. En se basant sur le système d'évaluation de la qualité des eaux littorales (SEQ-Eau), il ressort que les eaux des 2 bras étudiés de la rivière ont une très bonne qualité chimique. Cependant, les résultats de l'analyse bactériologique indiquent l'existence d'une contamination fécale qui dépasse les normes pour une utilisation d'eau à des fins récréatives et pour l'irrigation avec des risques sanitaires pour la santé humaine surtout au niveau de la plaine côtière de la rivière. La comparaison des teneurs en microorganismes de la présente étude avec une étude précédente réalisée en 2006 sur la rivière Kadicha, indique une augmentation en ces teneurs. Ceci pourrait être lié à l'augmentation des activités anthropiques et démographiques durant la dernière décennie.

Mots-clés: Liban, rivière Kadicha, eaux usées, qualité des eaux, paramètres physico-chimiques, contamination bactériologique.

ABSTRACT

Fatmé Merhabi, Helmieh Amine and Jalal Halwani. 2019. Assessment of the surface water quality of the Kadicha river. *Journal Scientifique Libanais*. 20(1): 10-34.

The Kadicha River in northern Lebanon is influenced mainly by urban, agricultural and industrial activities. The wastewaters are discharged directly into the watershed with absence of wastewater treatment plant. Thus 12 sampling sites were selected and surface water samples were collected during 2 seasons (wet and dry). The physico-chemical indicators of pollution were determined: pH, temperature, Electrical Conductivity, TDS (Total Dissolved Solids) and suspended particles. Total and thermotolerant coliforms, and faecal streptococci were analysed using standard methods of membrane filtration. The physico-chemical parameters indicate spatial variation influenced by anthropogenic activities. Based on the system of assessment of the quality of coastal waters (SEQ-Water), it appears that the water of the 2 subcatchments of the river has a very good quality for the studied parameters. However, the results of the bacteriological analysis indicate faecal contamination that exceeds the standards for recreational water use and for irrigation with health risks to human health especially within the coastal plain of the river. An increase in the levels of these microorganisms was observed after the year 2006, probably related to the increase in anthropogenic activities and the demographic growth during the last decade.

Keywords: Lebanon, Kadicha River, wastewater, water quality, Physico-chemical parameters, Bacteriological contamination.

INTRODUCTION

La zone critique terrestre (ZC) est définie par la couche mince de la surface terrestre et de son environnement qui s'étend verticalement entre le haut de la canopée de la végétation (ou interface atmosphère-végétation) et le fond de la zone d'altération (ou interface eau douce-substrat rocheux) (National Research Council, 2001) et englobe horizontalement les bassins imbriqués associés à la structure de surface et de subsurface qui se développent aux échelles de temps géologiques (Brooks et al., 2015). La ZC fournit toutes les ressources vitales sur lesquelles la vie prend naissance, évolue et prospère (National Research Council, 2001). La compréhension du fonctionnement de la zone critique est une question de plus en plus importante soulevée par le grand public et la communauté scientifique (Banwart et al., 2013), surtout à un moment où cette zone est perturbée de manière continue face au développement socio-économique, la

croissance rapide des populations humaines, l'usage intensif des terres, les changements environnementaux globaux et l'expansion des modes de consommation (IPCC, 2013).

L'eau, denrée vitale sur la terre, et composante de cette ZC est une ressource recyclable. Cependant elle doit être gérée et protégée en raison de sa vulnérabilité à la surexploitation et à la pollution (Osuolal et Okoh, 2017). La pollution de l'eau dans les pays en voie de développement est souvent due aux activités anthropiques dues à une urbanisation incontrôlable (Youmbi et al., 2013) avec l'absence souvent de traitements adaptés des eaux usées générées et leur rejet direct dans le milieu naturel.

Le rejet direct des eaux usées dans les cours d'eau sans traitement préalable, conduit à une mauvaise qualité des eaux concernant les matières en suspension, ammonium, phosphates, et à une contamination bactériologique des rivières (Bou Saab et al., 2007) en coliformes totaux, coliformes fécaux et streptocoques fécaux ((Bengherbia et al., 2014), (Singh et al., 2013)). Bien que la présence des coliformes fécaux indique d'habitude une contamination d'origine fécale, plusieurs coliformes fécaux ne sont pas d'origine fécale, provenant plutôt d'eaux enrichies en matière organique (Barthe et al., 1998; OMS, 2000). Pour cela, le terme générique « coliformes thermotolérants » est plus approprié (OMS, 1994; Robertson, 1995). De même, la classification du groupe des streptocoques fécaux a été modifiée et remplacée par le genre Entérocoques intestinaux (Institut National de Santé Publique-Québec (INSPQ), Centre d'expertise et de référence). Dans cet article, ce groupe de microorganismes apparaîtra selon son ancienne désignation « Streptocoques fécaux ».

Le Liban, à l'instar d'autres pays en développement, n'est pas à l'abri des problèmes de non assainissement des eaux usées. En effet, 63 % des bâtiments ne sont pas connectés aux réseaux d'assainissement et rejettent directement les eaux usées domestiques dans des fosses septiques ou dans les cours des rivières (SOER, 2010). Les rejets des eaux usées domestiques dans les cours d'eau constituent le contributeur majeur de la pollution bactériologique des eaux de surface (Massoud et al., 2010). Au nord du Liban les cours d'eau sont soumis à des pressions urbaines et agricoles comme les 3 rivières Kadicha, El Kebir et El Bared (Amine et al., 2012). La rivière Kadicha est influencée aussi par les activités industrielles de la ville de Tripoli avec l'absence de station d'épuration des eaux usées au niveau de ce bassin versant (Massoud et al., 2006). Les activités de ce bassin versant génèrent un taux de rejet de déchets moyen estimé de 350 à 400 tonnes par jour (SOER, 2010).

Tripoli a subi une urbanisation considérable pendant les quatre dernières décennies avec une population estimée à 500000 habitants (UNEP, 2009). Cette population a augmenté après l'arrivée des réfugiés syriens. Le nombre de réfugiés

syriens à Tripoli enregistrés jusqu'au 30 juin 2016, y compris 7% pour les syriens déplacés non enregistrés vivant dans des zones d'habitat informel, atteint 52350 personnes (voire 13644 familles) (AEMS, 2017).

Le bassin versant est caractérisé par un climat méditerranéen avec un été sec, un automne modérément chaud et un hiver venteux et humide, avec près de 80 à 90% des précipitations totales entre novembre et mars (Massoud et al., 2006). Les précipitations annuelles moyennes sont d'environ 1600 mm au niveau des sources du fleuve, diminuant à environ 700 mm au niveau du milieu côtier (Massoud et al., 2006).

Le présent travail est le premier après une décade à évaluer la qualité des eaux superficielles de la rivière Kadicha. Pour cela, l'analyse a porté sur les paramètres qui participent à la définition de la qualité des eaux, soit les caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques. L'analyse bactériologique a porté sur les germes indicateurs de pollution qui regroupent les coliformes thermotolérants et les streptocoques fécaux.

MATERIEL ET METHODES

Site d'étude

La rivière Kadicha située au nord du Liban a une longueur de 44,5 km et un débit annuel moyen de 262 millions de m³ (SOER, 2010). Son bassin versant, s'étendant sur une superficie estimée à 484 km² dont 97% de zones montagneuses (SOER, 2010), englobe 236 communes et villages répartis entre plusieurs districts administratifs (Massoud et al., 2006). Les eaux de la rivière sont utilisées principalement dans les usages domestiques, la production hydroélectrique, l'irrigation et des activités récréatives (baignade et restaurants sur les rives). L'eau souterraine est la principale source d'eau potable pour les résidents au niveau du bassin versant. La figure 1 construite par le logiciel QGIS représente l'occupation du sol au niveau du bassin versant ainsi que les sites de prélèvement. Le fleuve prend sa source à Becharri à une altitude de 1850 m, dans la vallée de la Kadicha située au pied du Mont Makmel où il parcourt des surfaces boisées. En aval de ces surfaces, le parcours de la rivière se fait sur une surface agricole avec quelques tissus urbains discontinus. Le fleuve se déverse dans la mer Méditerranée après avoir traversé la ville de Tripoli largement urbanisée, sur la plaine côtière (figure 1) où il prend le nom de la rivière Abou Ali.

Le choix des sites de prélèvements a été effectué pour réaliser le meilleur compromis possible entre la représentativité des sources de pollution et la faisabilité opérationnelle. Douze points d'échantillonnage répartis majoritairement en aval du

bassin versant de la rivière Kadicha ont été sélectionnés. Quatre sites se trouvent au niveau du bras Nord de la rivière (bras A) : Meryata (Myt), Ardeh (Ar), Al Mardachyeh (Mr), Zgharta (Zgh), et 3 sites au niveau du bras Sud de la rivière (bras B) : Koussba (Ks), Bchennine (Bs), Bkeftine (Bk). Ces 2 bras sont influencés majoritairement par les activités agricoles. Les autres 5 sites de prélèvement sont à Tripoli : Abou Samra (T-Ab1 et T-Ab2), Al Marjeh (T-Mj) et l'estuaire (EAA-1 et EAA-2). Ces sites sont situés à l'aval du fleuve, au niveau de son passage par la ville de Tripoli (deuxième large ville libanaise) avant de se jeter dans la mer Méditerranée. Chaque site sélectionné est décrit dans le tableau 1 en termes de localisation géographique et de pressions anthropiques.

Les données de précipitations et de températures de l'année 2017 sont obtenues à partir du site <https://fr.tutempo.net/climat/ws-401030.html>.

Tableau 1. Caractéristiques et contexte d'usage des sols des 12 sites d'échantillonnage.

Site	Code	Coordonnées GPS et bras	Activités majeurs	Aval d'un effluent urbain/décharge collective	Pressions urbaines
Meryata	Myt	34°24'43.33" N 35°55'46.31" E Bras A	Zone agricole : présence d'orangers et d'oliviers	Les égouts de la ville de Meryata et les effluents des pressoirs d'olives	Tissu urbain discontinu
Ardeh	Ar	34°24'10.21" N 35°54'32.56" E Bras A	Zone rurale : élevage de bovins et des volailles avec culture des orangers	Les égouts des villages en amont, (Ardeh, Harf Ardeh,, Hewarah et Echech)	Tissu urbain discontinu
Al Merdechyeh	Mr	34°24'2.8''N 35°54'3.28'' E Bras A	Zone récréative: présence de restaurants	Pas de rejets directs	
Zgharta	Zgh	34°24'14.21' 'N 35°53'14.23'	Zone résidentielle et agricole:	Pas de rejets directs	Site plus urbanisé que les 3

Site	Code	Coordonnées GPS et bras	Activités majeurs	Aval d'un effluent urbain/décharge collective	Pressions urbaines
		'E Bras A	présence d'orangers et d'oliviers		sites en amont
Koussba	Ks	34°18'22.72' 'N 35°51'50.09' 'E Bras B	Zone de loisirs et agricole: présence de site archéologique (un monastère et un ancien Moulin) avec des restaurants	En aval d'une centrale hydroélectrique	Faible densité de population
Bshennine	Bs	34°20'25,69' 'N 35°51'18,24' 'E Bras B	Zone agricole (oliviers); ferme de porcs	Déchets de la ferme des porcs sur la rive	Densité de population plus importante
Bkeftine	Bk	34°23'58.03' 'N 35°52'20.57' 'E Bras B	Zone rurale agricole (orangers)	Zone de décharge à ciel ouvert : Collecte des déchets solides quotidiens du village de Bkeftine et d'autres municipalités du district Koura sur la rive	Faible densité de population

Site	Code	Coordonnées GPS et bras	Activités majeurs	Aval d'un effluent urbain/décharge collective	Pressions urbaines
Abou Samra (en amont)	T-Ab1	34°25'22.05' 'N 35°51'13.38' 'E Plaine côtière	Zone agricole et résidentielle: cultures d'orangers et d'oliviers	Déchets solides des résidents sur les rives	Tissu urbain discontinu
Abou Samra (en aval)	T-Ab2	34°25'9.81'' N 35°51'21.25' 'E Plaine côtière		Pas de rejets directs	Absence de population
Tripoli Al Marjeh	T-Mj	34°25'46''N 35°50'55.17' 'E Plaine côtière	Zone résidentielle et avec présence des orangers	Déchets solides des résidents sur les rives	Tissu urbain continu
Estuaire (en amont)	EAA-1	34°27'21.26' 'N 35°50'29.6'' E Plaine côtière	Zone de décharge à ciel ouvert	En aval de la zone de décharge du lixiviats généré par la zone de décharge ouverte	Tissu urbain continu
Estuaire (en aval)	EAA-2	34°27'28'.67'' N 35°50'28.29' 'E Plaine côtière	Zone de décharge à ciel ouvert dernier site de la rivière avant le milieu côtier	En aval de la zone de décharge du lixiviats ; intrusion des eaux salées	Tissu urbain continu

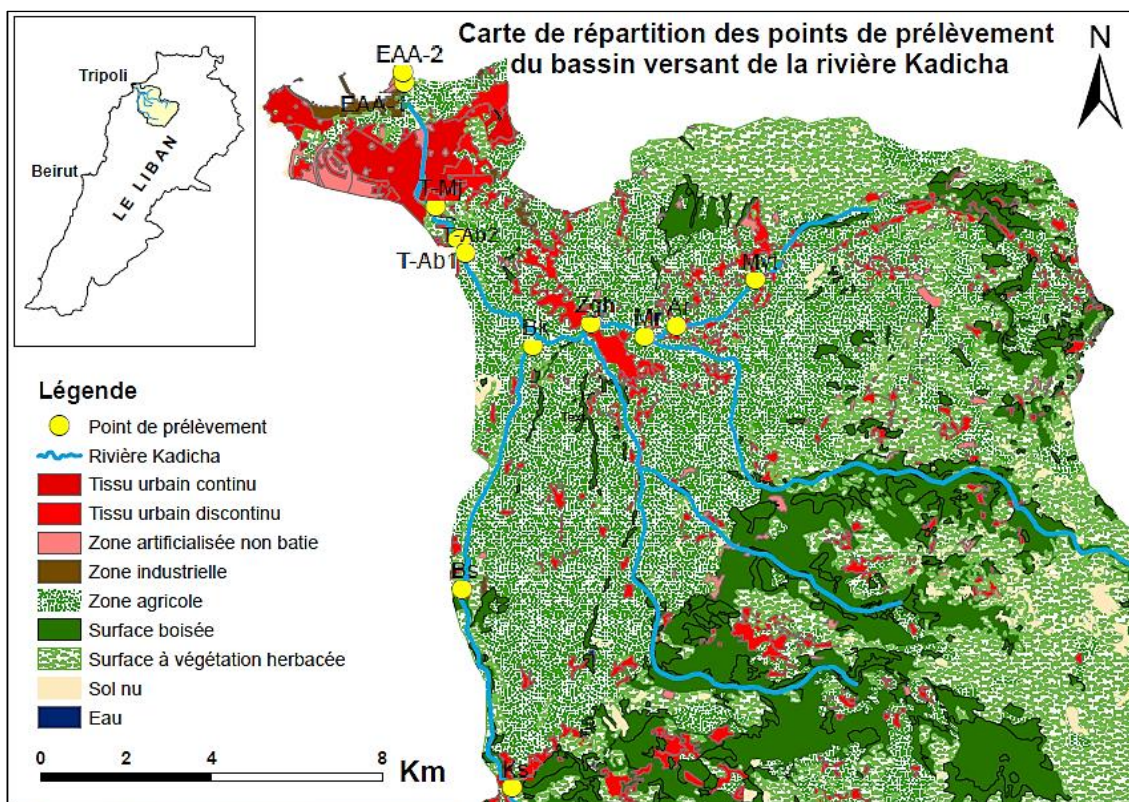


Figure 1. Carte avec les points de prélèvement de la rivière Kadicha (l'usage du sol est fourni par CNRS, 2010). Les points sont présentés par leur code.

Ks pour Koussba, Bs pour Bshennine, Bk pour Bkeftine, Myt pour Meryata, Ar pour Ardeh, Mr pour Al Mardachyeh, Zgh pour Zgharta, T-Ab 1 et 2 pour Abou Samra, T-Mj pour Al Marjeh, EAA-1 et 2 pour l'estuaire.

Prélèvements

Vu le nombre des sites de l'étude, les prélèvements ont été répartis sur 2 ou 3 jours pour chaque campagne d'échantillonnage. Pour chaque point d'échantillonnage un prélèvement ponctuel des eaux de surface a été effectué à un instant t , à des profondeurs de 10 à 50 cm sous la surface de l'eau. Les prélèvements ont été effectués avec des bouteilles en verre, préalablement lavées (acétone et dichlorométhane) et étuvées à 450 °C. La bouteille a été immergée (10-50 cm) dans le sens opposé à celui du courant de l'eau et le prélèvement est homogénéisé. Pour les analyses microbiologiques, au niveau de chaque site, une cupule stérile de 100 mL a été utilisée pour le prélèvement d'eau.

Les échantillons d'eau ont été conservés à 4°C avant leur analyse au laboratoire (maximum 6 heures après les prélèvements destinés à l'analyse microbiologique).

Analyses physico-chimiques

Les caractéristiques physiques de l'eau : pH, température, conductivité électrique et TDS (solides totaux dissouts) ont été mesurées *in-situ* sur chacun des 12 sites à l'aide d'une électrode à membrane d'un pH mètre de terrain (Thermo Scientific, type Orion 3 star).

La teneur des matières en suspension (MES) dans un litre d'eau a été obtenue par différence de masse de filtre de 0,7 µm avant et après filtration effectuée selon la norme européenne (EN 872:1996). Les paramètres température et pH ont été mesurés sur 3 campagnes d'échantillonnage: 25 janvier et 03 février 2017 pour la première campagne correspondant à la saison humide; 05, 06 et 12 septembre 2017 pour la campagne correspondant à la saison sèche et 13, 16 et 20 novembre 2017 pour la deuxième campagne correspondant à la saison humide alors que la conductivité, le TDS et la teneur en MES ont été mesurés sur les campagnes des mois de septembre et novembre.

Analyse microbiologique

Les prélèvements destinés à l'analyse microbiologique ont été faits sur la campagne du mois de novembre. Les analyses microbiologiques, ont été effectuées par filtration de 100 mL sur une membrane de 45 µm selon la méthode AFNOR NFT 90 414. Les filtres ont été déposés sur des boîtes de pétri stériles contenant un milieu de culture renferment l'agent sélectif spécifique à chaque groupe de microorganismes. Pour les coliformes le milieu de culture Drigalski renferme de désoxycholate de sodium alors que pour les streptocoques le milieu de culture BEA (Bile Esculine Azide) renferme l'esculine comme agent sélectif. Les boîtes de pétri ont été placées dans l'étuve pendant 24 heures à 37°C pour les coliformes totaux (CT) et les streptocoques fécaux (SF) et à 45°C pour les coliformes thermotolérants (CTT). Des filtrations ont été testées sans et avec dilution (dilution de facteur 1/10³ et 1/10⁴ réalisées en utilisant une eau physiologique stérilisée (0,9% NaCl)) et ceci pour déterminer le facteur de dilution aboutissant à un nombre de colonies bien dénombrables.

Evaluation de la qualité des eaux de la rivière

La qualité des eaux au niveau des 3 bras de la rivière a été évaluée en se basant sur le système d'évaluation de la qualité des eaux littorales (Système d'évaluation de la

qualité de l'eau des cours d'eau; Grilles d'évaluation SEQ-EAU (Version 2), 2003). Les moyennes des paramètres physico-chimiques et bactériologiques ont été calculées par bras et réparties sur les 5 niveaux de pollution du système SEQ-EAU :

Classe I : Eau de très bonne qualité, représentée graphiquement par la couleur bleue.

Classe II : Eau de bonne qualité, représentée en vert.

Classe III : Eau de qualité moyenne, représentée en jaune.

Classe IV : Eau de mauvaise qualité, représentée en orange.

Classe V : Eau de très mauvaise qualité, représentée en rouge.

Ces critères de classification sont relatifs à l'aptitude de l'eau à la biologie ou autrement son potentiel de permettre des équilibres biologiques au sein du cours d'eau.

Etude statistique

Le logiciel SPSS (Statistical Package for Social Sciences) version 22.0 a été utilisé pour l'analyse statistique. Une Analyse en Composante Principale (ACP) a été effectuée sur l'ensemble des variables. La matrice de corrélation entre les différentes variables a été établie.

RESULTATS

Caractérisation physico-chimique

Les moyennes mensuelles de précipitations et de températures de l'année 2017 sont présentées dans la figure 2. Les moyennes de précipitations varient entre 0 (pendant les mois de juin, juillet, août et septembre) et 280.66 mm (pendant le mois de janvier).

Les caractéristiques physico-chimiques mesurées sont présentées dans la figure 3. Les températures minimales et maximales de l'eau de surface de la rivière Kadicha sont observées pendant les mois de janvier (sur le site Ks) et septembre (sur le site EAA-2) respectivement (figure 3.A). La température de l'eau de la rivière est affectée par le changement de saison et les fluctuations de la température (figure 2).

Les valeurs de pH varient entre 6,35 (site Ar) et 7,39 (site Bk) pendant le mois de janvier et entre 7,38 (site Zgh) et 8,24 (site EAA-1) pendant le mois de septembre et entre 6,98 (site T-Ab1) et 7,41 (site Ks) pendant le mois de novembre (figure 3 B). Les valeurs de pH, légèrement alcalins sur tous les sites, présentent une acidité sur les sites du bras A pendant le mois de janvier. Ceci peut être dû à un apport en acides humiques et fulviques résultant du lessivage des sols par les précipitations.

Les concentrations de MES fluctuent entre 1 et 300 mg/L pendant la saison sèche (septembre) et entre 1 et 5620 mg/L pendant la saison humide (février) (figure 3 E). Les sites du bras B présentent une teneur en MES plus faible que les sites du bras A et ceux de la plaine côtière pendant les 2 saisons. Les valeurs de la conductivité électrique (CE) varient entre 480 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (sur le site Bs) et 1725 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (sur le site EAA-2) pendant la saison sèche et entre 456 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (site Bk) et 1296 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (site EAA-1) pendant la saison humide (novembre). Les valeurs du TDS varient entre 250 mg/L (site Bs) et 850 mg/L (site EAA-1) pendant la saison sèche (septembre) et entre 217 mg/L (site Bk) et 633 mg/L (site EAA-1) pendant la saison humide (novembre). Les valeurs des paramètres conductivité électrique et TDS sont plus élevées au niveau des sites du bras A pendant les 2 saisons de l'année par comparaison avec le bras B. Ceci indique un apport supplémentaire en ions probablement dû aux rejets: des effluents des presses d'olives riches en nutriments (potassium, nitrate, phosphate et autres) (Badr et al., 2014) et des eaux usées non traitées (sites Myt et Ar) directement dans le cours du bras A de la rivière.

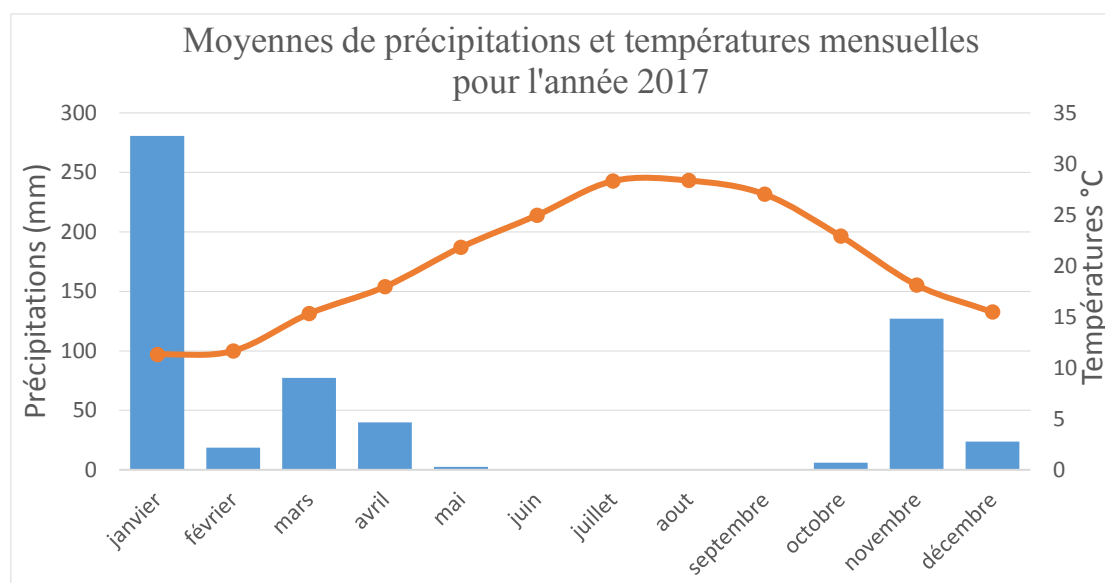


Figure 2. Moyennes de précipitations et températures mensuelles pendant l'année 2017 obtenues du site: <https://fr.tutiempo.net/climat/ws-401030.html>.

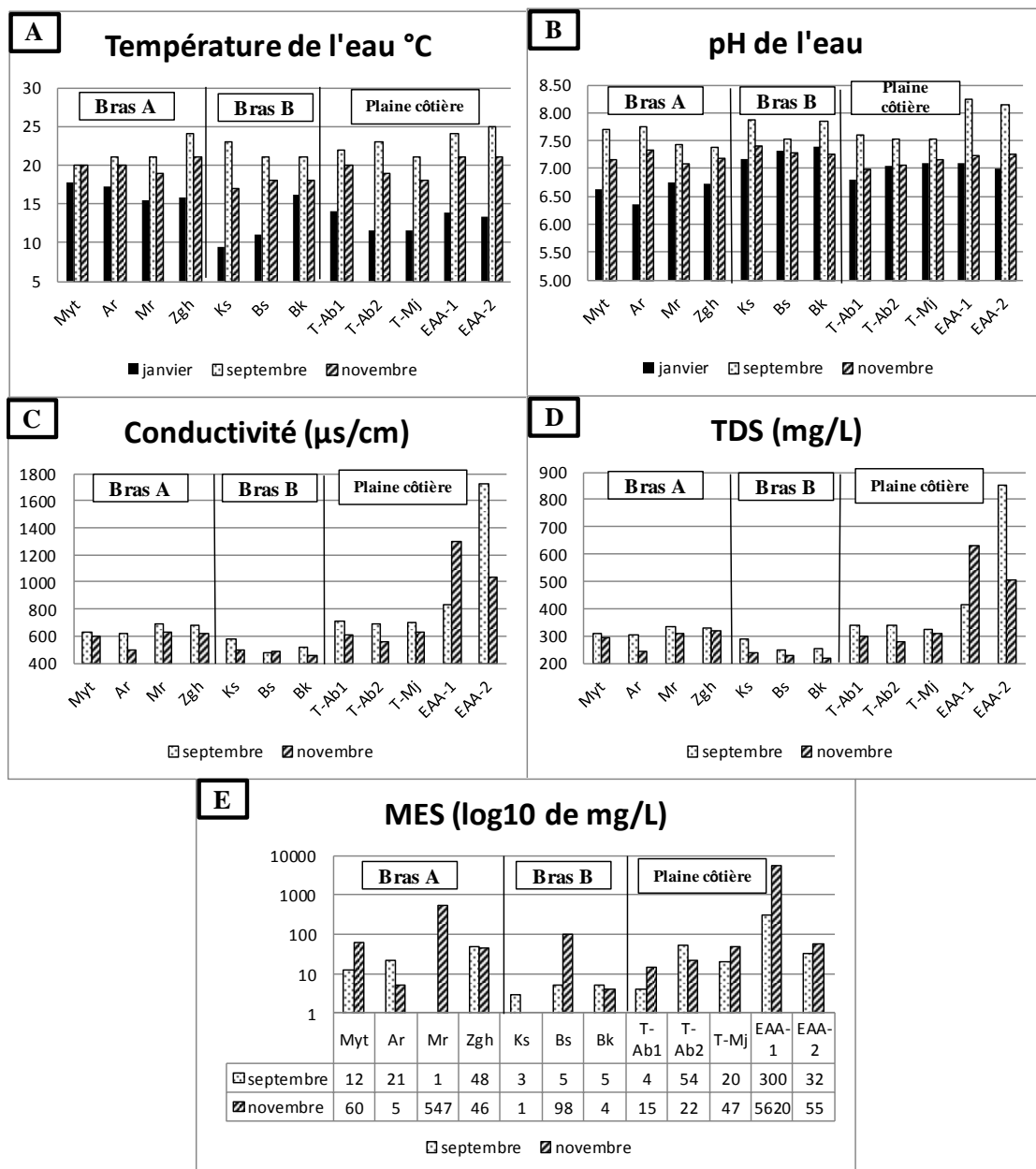


Figure 3. Paramètres physico-chimiques mesurés pendant les trois campagnes de terrain en janvier (en noir), en septembre (représenté en pointillés) et en novembre (représenté en hachuré) 2017 sur les différents sites de la rivière.

A : Température, B : pH, C : conductivité, D : TDS, E : MES.

Caractérisation bactériologique

Le comptage des colonies au niveau des boîtes de pétri des échantillons non dilués donne un résultat négatif pour les SF sur les sites Myt, Zgh, Ks et Bk. Alors que les autres échantillons ont donné un résultat indénombrable de colonies pour les CTT. La dilution de $1/10^4$ a abouti à un nombre de colonies bien dénombrable et a été appliquée sur tous les échantillons.

Les résultats de l'analyse bactériologique sur les 12 sites de la rivière sont présentés dans la figure 4. Dans cette étude, les concentrations en coliformes totaux et thermotolérants sont comparables. Les concentrations en CTT sont comprises entre 14.10^4 (sur les 2 sites Ks et T-Ab2) et $25,5.10^5$ UFC/100mL (sur le site Mr). Ces teneurs augmentent de l'amont vers l'aval au niveau du bras A où le site Mr dominé par les activités récréatives présente la concentration la plus importante ($21,4.10^5$ UFC/100mL). Au niveau du bras B, les teneurs sont les plus faibles sur les sites Ks, proche de la source, et Bk qui est le moins peuplé. Cependant, au niveau du site Bs les teneurs sont plus élevées témoin d'une contamination ponctuelle, probablement due aux rejets directs des déchets d'un élevage de porcs sur la rivière au niveau de ce site. Au niveau de la plaine côtière, la concentration en CTT est environ 10 fois plus importante au niveau du site T-Ab1 que du site T-Ab2. Malgré la proximité de ces 2 sites, qui se trouvent dans la région Abou Samra de la ville de Tripoli, cette différence peut être justifiée par l'absence d'activités anthropiques sur le site T-Ab2. Ces concentrations sont plus importantes au niveau des 3 sites en aval (T-Mj, EAA-1 et 2) où elles deviennent comparables. Quant aux SF leurs concentrations varient de 0 à 32.10^4 UFC/100mL. Aucune colonie caractéristique des streptocoques fécaux n'est comptée au niveau des sites Myt, Zgh, Ks et Bk. Par contre, elles sont présentes à des concentrations relativement faibles et proches au niveau des sites plus urbanisés (T-Ab1 et T-Ab2) et ceux dominés par les activités d'élevage (Ar et Bs). Ces concentrations sont les plus élevées au niveau des sites en aval qui sont plus proches de l'exutoire (T-Mj, EAA-1 et EAA-2) et au niveau du site Mr dominé surtout par les activités récréatives. La fréquence d'occurrence et les concentrations en coliformes totaux et thermotolérants sont plus importantes que celles des streptocoques fécaux au niveau de tous les sites.

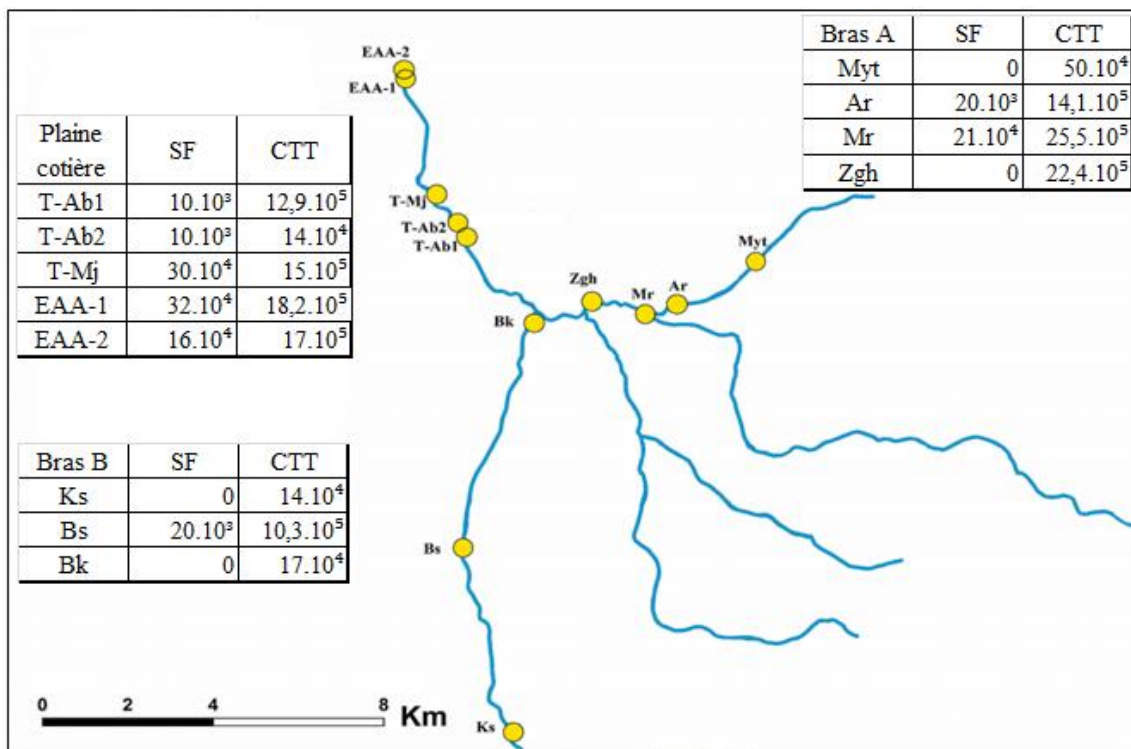


Figure 4. Concentrations en coliformes thermotolérants et en streptocoques fécaux trouvées en UFC/100mL sur les différents bras de la rivière Kadicha pendant le mois de novembre.

DISCUSSION

Le pH acide de l'eau au niveau des sites du bras A, est favorable à la libération des métaux complexés à partir des sédiments (Segbeaya, 2012). De plus Les valeurs de pH de l'eau comprises entre 5 et 9 au niveau de tous les sites, permettent un développement normal de la faune et de la flore sur la rivière Kadicha (M. Blinda, 2007). La minéralisation sur le bassin versant de la rivière augmente de l'amont vers l'aval et devient plus accentuée au niveau de l'estuaire où les valeurs de la CE dépassent 1000 µS/cm et les valeurs de pH sont les plus élevés (8.24 et 8.15) pendant la saison sèche. Ceci indique l'arrivée des eaux salées au niveau de la zone de transition. Quant aux MES, les plus élevées sont au niveau du site EAA-1, en aval de la zone de décharge du lixiviats (300 mg/L en septembre et 5620 mg/L en novembre). Ceci peut être probablement dû aux substances apportées par le lixiviats à ce niveau. En effet la teneur en MES élevée au niveau de l'estuaire peut entraîner le réchauffement des eaux à ce

niveau et détruire ainsi les habitats des organismes des eaux froides (Hébert et Légaré, 2000).

Les résultats de l'analyse bactériologique indiquent une pollution fécale qui domine le bassin versant de la rivière. De plus, les sites impactés par les activités récréatives (Mr), la décharge de lixiviats (EAA-1 et EAA-2), les rejets directs liés aux activités d'élevage (Bs) et les rejets des déchets solides (T-Mj) présentent une pollution fécale plus importante que les sites influencés par les rejets directs des eaux usées domestiques (Myt et Ar).

Les coliformes totaux et thermotolérants sont considérés parmi les indicateurs de contamination fécale de l'eau les plus couramment et fréquemment utilisés dans l'évaluation des risques pour la santé humaine (Collins et al., 2004 ; Jiang, 2006). Ces indicateurs sont considérés comme des «indicateurs pathogènes» en raison des risques accrus de maladie gastro-intestinales et à des maladies respiratoires associées à la contamination fécale dans les eaux récréatives (EPA, 2012). De même, les SF sont corrélés à la maladie gastro-intestinale et la concentration au-dessus de laquelle les baigneurs présentaient des taux de maladie plus élevés que chez les non-baigneurs est de 20 UFC/100mL (EPA, 2012).

Le rapport CTT/SF a été utilisé pendant plusieurs décennies comme un élément informatif de premier ordre pour déterminer si une pollution fécale était d'origine animale ou humaine (Institut National de Santé Publique-Québec (INSPQ), Centre d'expertise et de référence). Un rapport CTT/SF $<0,7$ indique une contamination principalement ou entièrement d'origine animale tandis qu'un rapport CTT/SF >4 indique une source exclusivement humaine (Borrego & Romero, 1982). Dans cette étude, le rapport CTT/SF supérieur à 4 au niveau de tous les sites dénote une contamination fécale exclusivement d'origine humaine sur le bassin versant de la rivière Kadicha.

L'analyse en composantes principales (ACP) de l'ensemble des variables étudiées pendant le mois de novembre est présenté dans la figure 5A. Cette analyse fait apparaître que le premier et le deuxième axe expliquent 57 % et 18 % de la variance respectivement. Ces 2 axes restituent 76% de l'information. La première composante principale (CP1) exprime les variables TDS, conductivité électrique, MES et SF qui le tirent vers le sens positif. Ces variables sont fortement corrélées entre elles deux à deux (les coefficients de corrélation sont présentés dans le tableau 2). La deuxième composante principale (CP2) exprime la variabilité du pH, de la température et des CTT. Les variables température et CTT qui tirent cet axe vers le sens positif sont corrélées entre elles (coefficient de corrélation $r^2=0.555$, tableau 2) alors que le pH qui tire seul l'axe CP2 en sens négatif n'est pas corrélé avec les autres variables.

La projection des sites étudiés sur le plan factoriel des 2 composantes principales est présentée dans la figure 5B. D'après cette analyse il en ressort que l'estuaire et le site T-Mj de la plaine côtière, corrélés positivement à l'axe CP1 présentent la même variabilité quant à la variable SF. De même, ces sites ont la même tendance de variation avec les paramètres physico-chimiques MES, CE et TDS. Alors que les sites Myt, Ar et T-Ab2 corrélés négativement à l'axe CP1 varient dans le sens opposé de ces variables. Les sites T-Ab1, Zgh et Mr corrélés positivement à l'axe CP2 ont une variabilité similaire quant à la variable CTT. Ces sites varient aussi dans le même sens en termes de température. Les sites sur bras B regroupés ensemble sont corrélés négativement à l'axe CP2 et varient de la même manière en termes de pH. L'axe CP1 oppose les sites les plus contaminés en SF (l'estuaire et le site T-Mj) à ceux ayant des teneurs moins importantes en ces microorganismes. Alors que l'axe CP2 oppose les sites avec les concentrations les plus importantes en CTT (sites Mr et Zgh et T-Ab1) aux sites avec des teneurs moins importantes. Les sites sur bras B regroupés ensemble sont corrélés négativement à l'axe CP2 et varient de la même manière en termes de pH. Cependant les sites du bras A ne sont pas présents dans le même groupe : les sites des zones résidentielles avec des rejets des déchets solides sont plus corrélés avec la présence de CTT que les sites qui présentent des rejets des eaux usées. De même, les sites de la plaine côtière ne sont pas regroupés ensemble : les sites avec des rejets de lixiviats paraissent plus corrélés avec la présence de SF que les sites avec des rejets de déchets solides. Ceci permet de déterminer les types des activités et des rejets en corrélation avec chacune des deux familles de microorganismes et de classer les sites étudiés en quatre groupes en fonction des types de rejets et des activités : les sites avec les rejets des déchets solides, les sites avec des rejets des eaux usées résidentielles, les sites avec les rejets des lixiviats et les sites sans rejets directs d'eaux usées et de déchets solides.

Tableau 2. Matrice de corrélation entre les paramètres étudiés.

Paramètres	Température (°C)	pH	Conductivité (µS/cm)	TDS (mg/L)	MES (mg/L)	CTT (UFC/100mL)	SF (UFC/100mL)
Température (°C)	1.000						
pH	-.256	1.000					
Conductivité (µS/cm)	.638	.008	1.000				
TDS (mg/L)	.665	-.012	.999	1.000			
MES (mg/L)	.380	.080	.806	.797	1.000		
CTT (UFC/100mL)	.555	-.204	.451	.469	.286	1.000	
SF (UFC/100mL)	.170	-.088	.700	.691	.621	.560	1.000

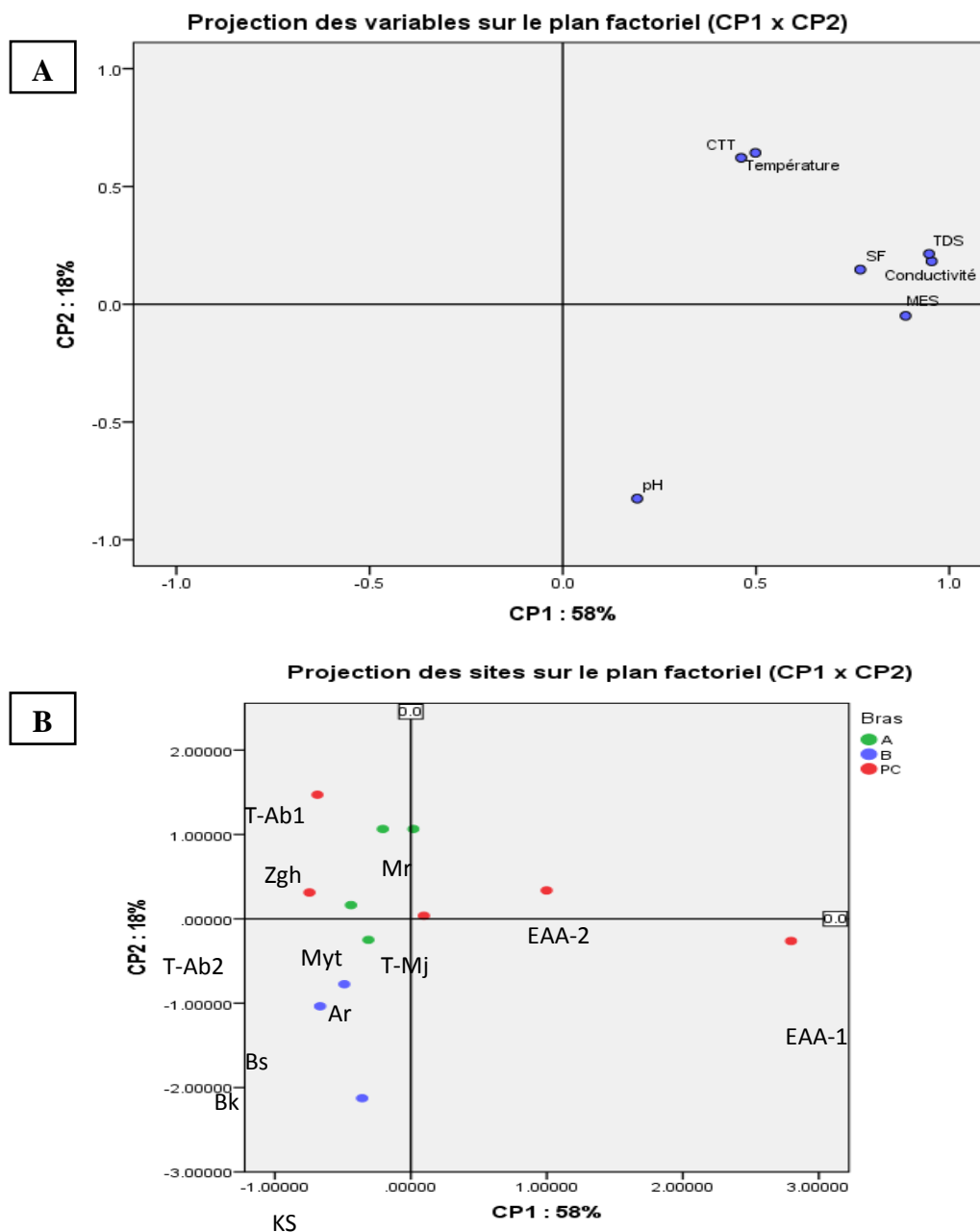


Figure 5. Analyse en composantes principales des paramètres physico-chimiques et bactériologiques au niveau des 12 sites de la rivière Kadicha (A). La projection des 12 sites sur le plan factoriel des 2 composantes principales (B).

La figure est construite par le logiciel SPSS.22.

La comparaison des teneurs en microorganismes avec celles trouvées au niveau des rivières, des eaux côtières et des eaux usées au Liban permet de déterminer la situation de pollution de la rivière Kadicha au niveau national. Pour cela les teneurs en CTT et en SF dans les eaux de rivière, les eaux côtières et les eaux usées au Liban sont reportées dans le tableau 3.

Les teneurs en CTT et en SF dans cette étude dépassent celles trouvées au niveaux des eaux de surface des rivières Ibrahim et Hasbani ((Bou Saab et al., 2007) (Badr et al., 2014)), et celles des eaux côtières à Ramlé Al Bayda, Sidon et Tyr ((Mouawad R et al., 2012). De même leurs concentrations sont plus élevées que celles des eaux usées brutes arrivant aux stations d'épuration à Bchefteen et Mazraat Al-Chouf (Massoud et al., 2010). Les teneurs en CTT et en SF sont du même ordre de celles trouvées au niveau de la rivière El Kabir au nord du Liban (Hamze et al., 2005).

Une étude antérieure effectuée en 2006 par Massoud et al., permet de suivre l'évolution de la qualité bactériologique des eaux de la rivière Kadicha entre 2006 et 2017. Les valeurs de coliformes thermotolérants reportées par Massoud et al au niveau des 2 bras de la rivière passant par Koussba (1700 et 150000 MPN/100mL) et Tripoli (entre 1700 et 650000 MPN/100mL) sont inférieures à celles obtenues par la présente étude. Cette augmentation de contamination fécale peut être attribuée aux activités anthropiques plus importantes sur le bassin versant. Ceci pourrait être justifié par l'augmentation récente de la population suite à la crise syrienne (255194 réfugiés au nord du Liban enregistrés en 2016 (AEMS, 2017)) et à l'urbanisation plus importante durant la dernière décade surtout au niveau de la plaine côtière.

Tableau 3. Occurrence des coliformes thermotolérants et des streptocoques fécaux trouvés dans les eaux de rivières, les eaux côtières et les eaux usées au Liban.

Site d'étude	Contexte/rejets	CTT (UFC/10 0ml)	SF (UFC/1 00ml)	Références
Rivières				
Rivière El Kabir	Zone agricole, activités d'élevage-Rejets directs des eaux usées			(Hamze et al., 2005)
Septembre 2001		28.10 ² - 18,9.10 ⁵	20.10 ² - 56.10 ³	

Site d'étude	Contexte/rejets	CTT (UFC/100ml)	SF (UFC/100ml)	Références
Avril 2002		7-22.10 ⁴	0-25.10 ²	
Aout 2002		0-15,2.10 ⁴	0-20.10 ³	
Rivière Kadicha				(Massoud et al., 2006)
3 sites dans le sous bassin versant qui passe par Koussba	Zone agricole, résidentielle, élevage de porc	17.10 ² -15.10 ⁴	n.r	
5 sites de la ville de Tripoli	Zone urbaine, agricole	17.10 ² -65.10 ⁴	n.r	
Rivière Ibrahim	Zone agricole, élevage de bovins-Activités industrielles			(Bou Saab et al., 2007)
Novembre 2004 (valeurs approximatives)		0-15.10 ²	0-45.10 ²	
Décembre 2004 (valeurs approximatives)		10.10-13.10 ²	0-50.10 ²	
Rivière Hasbani	Activités récréatives (baignades)-rejets des effluents des pressoirs d'olives-activités agricoles.			(Badr et al., 2014)
Janvier 2013		18.10-90.10	n.r	
Aout 2013		24.10-90.10	n.r	
Novembre 2013		19.10-89.10	n.r	
Eaux côtières				(Mouwad R et al.,

Site d'étude	Contexte/rejets	CTT (UFC/100ml)	SF (UFC/100ml)	Références
				2012)
Ramlé Al Bayda	Activités récréatives-rejets directs des égouts	15-46.10 ²	26-13.10 ³	
Sidon	Proximité de zone de décharge de déchets	15-25.10 ²	30-15.10 ²	
Tyr	Activités agricoles	<1-35.10	<1-48	
Eaux usées				
Station de traitement d'eaux usées à Bchefteen, Caza Al Chouf				(Massoud et al., 2010)
Eaux usées brutes		27,1.10 ³	n.r	
Effluents de la station d'épuration		26,9.10 ³	n.r	
Station de traitement d'eaux usées à Mazraat Al-Chouf, Caza Al Chouf				(Massoud et al., 2010)
Eaux usées brutes		16.10 ³	n.r	
Effluents de la station d'épuration		74.10 ²	n.r	

n.r : non recherché

Au niveau de tous les sites, les concentrations en coliformes thermotolérants dépassent le seuil fixé par l'OMS pour un rejet direct des eaux usées dans l'environnement (10³ UFC/100mL) (Organisation mondiale de la santé, 2012). De même, ces concentrations dépassent, au niveau de tous les sites, le niveau recommandé par l'EPA (126 UFC/100mL) pour une utilisation récréative de l'eau (EPA 2012) et le niveau recommandé par l'OMS pour une utilisation d'eau destinée à l'irrigation des cultures (10³ UFC/100mL) (Organisation mondiale de la santé, 2012). Au niveau des sites Ar, Mr, Bs, T-Ab1, T-Ab2, T-Mj, EAA-1 et EAA-2, la teneur en SF dépasse le niveau recommandé par la directive cadre eau pour une utilisation récréative de l'eau (Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau; Grilles d'évaluation SEQ-EAU (Version 2), 2003).

Le tableau 4 présente les moyennes des paramètres étudiés sur chaque bras de la rivière répartis sur les 5 catégories de pollution selon la directive cadre eau (Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau; Grilles d'évaluation SEQ-EAU (Version 2), 2003). Ce tableau permet de classer le bassin versant de la rivière en fonction des valeurs obtenues. D'après ce tableau, il ressort que l'eau des bras A et B a une bonne qualité pour la majorité des paramètres étudiés. Cependant il est difficile de déterminer la qualité des eaux de la plaine côtière en se basant sur le système d'évaluation SEQ-EAU en raison du nombre limité de variables.

Tableau 4. Qualité des eaux de la rivière Kadicha évaluée par bras en se basant sur le système d'évaluation de la qualité des eaux littorales ("système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau; Grilles d'évaluation SEQ-EAU (Version 2)," 2003).

Qualité d'eau	Très bonne	Bonne	Moyenne	Mauvaise	Très mauvaise
Température (°C)	<20	20-21,5	21,5-25	25-28	>28
pH	<8	8-8,5	8,5-9	9-9,5	>9,5
Conductivité (µs/cm)	<2500	2500-3000	3000-3500	3500-4000	>4000
MES (mg/L)	<25 (bras B)	25-50	50-100 (bras A)	100-150	>150 (plaine côtière)
CTT (UFC/100mL)	<20	20-200	200-2000	2000-20000	>20000 (tous les bras)
SF (UFC/100mL)	<20	20-200	200-1000	1000-10000 (bras B)	>10000 (bras A et plaine côtière)

CONCLUSION

Le suivi des paramètres physico chimiques au niveau du bassin versant de la rivière Kadicha révèle une variation spatiale entre les différents sites. Cette variation est influencée par les activités anthropiques exercées (rejets directs des eaux usées domestiques, de lixiviats, et des effluents des huileries). L'analyse bactériologique indique la présence des coliformes thermotolérants à des niveaux indiquant une contamination sévère du bassin versant de la rivière. La contamination fécale dépasse les normes pour une utilisation d'eau à des fins récréatives et pour l'irrigation avec des

risques sanitaires pour la santé humaine. Les teneurs en coliformes thermotolérants et en streptocoques fécaux de cette étude sont comparables à celles trouvées au niveau de la rivière El-Kabir au nord du Liban.

Plus d'études sont recommandées sur une période plus longue accompagnée d'enquêtes sur la situation sanitaire auprès des résidents du bassin versant de la rivière afin de suivre l'état de pollution fécale de la rivière et son impact sur la santé publique.

En conclusion, la rivière Kadicha fait face à des activités anthropiques qui résultent en une mauvaise qualité bactériologique des eaux. L'état actuel de la rivière plaide pour le développement d'un plan d'assainissement tout au long du bassin versant pour pallier aux risques écologiques et sanitaires à travers la mise en fonction de stations d'épuration. Celles-ci permettraient de préserver la qualité de l'eau de la rivière utilisée pour l'irrigation et de protéger la zone côtière recevant ces eaux.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Professeur Fouad DABBOUSSI, membre du Laboratoire de Microbiologie Santé et Environnement de la Faculté de Santé Publique de l'Université Libanaise pour ses précieux conseils. Les auteurs remercient également le Conseil National de la Recherche Scientifique Libanais (CNRS-L) pour le financement de ce travail.

RÉFÉRENCES

- AEMS., 2017. The Impact of the Syrian Crisis on the Lebanese Power Sector and Priority Recommendations. FINAL REPORT February 2017. <http://www.aems-lb.com>
- AFNOR NF 90-414. Essais des eaux - Recherche et dénombrement des coliformes et des coliformes thermo tolérants. Méthode générale par filtration sur membrane, 1985. AFNOR, Paris.
- AFNOR EN 872:1996. Qualité de l'eau - Dosage des matières en suspension - Méthode par filtration sur filtre en fibres de verre, <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-872/qualite-de-l-eau-dosage-des-matieres-en-suspension-methode-par-filtration-sur-filtre-en-fibres-de-verre/article/722523/fa135090>
- Amine, H., Gomez, E., Halwani, J., Casellas, C., Fenet, H., 2012. UV filters, ethylhexyl methoxycinnamate, octocrylene and ethylhexyl dimethyl PABA from untreated wastewater in sediment from eastern Mediterranean river transition and coastal zones. *Marine Pollution Bulletin*. 64: 2435–2442.

- <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.07.051>
- Badr, R., Holail, H., Olama, Z., 2014. Water Quality Assessment of Hasbani River in South Lebanon : Microbiological and Chemical Characteristics and Their Impact on the Ecosystem. *Journal of Global Biosciences*. 3: 536–551.
- Banwart, S.A., Chorover, J., Gaillardet, J., Sparks, D., White, T., Anderson, S., Aufdenkampe, A., Bernasconi, S., Brantley, S.L, Chadwick, O., Dietrich, W.E., Duffy, C., Goldhaber, M., Lehnert, K., Nikolaidis, N.P, and Ragnarsdottir, K., 2013. Sustaining Earth's Critical Zone Basic Science and Interdisciplinary Solutions for Global Challenges. The University of Sheffield, United Kingdom.
- Barthe, C., Perron, J. et Perron, J.M.R. 1998. Guide d'interprétation des paramètres microbiologiques d'intérêt dans le domaine de l'eau potable. Document de travail (version préliminaire), ministère de l'Environnement du Québec, 155 p.
- Bengherbia A., Hamaidi F., Zahraoui R., Hamaidi M.S., Megateli S., 2014. Impact des rejets des eaux usées sur la qualité physico-chimique et bactériologique de l'Oued Beni Aza (Blida, Algérie). *Lebanese Science Journal*. 15: 39–51.
- Bou Saab, H., Nassif, N., El Samrani, A.G., Daoud, R., Medawar, S., Ouâini, N., 2007. Suivi de la qualité bactériologique des eaux de surface (rivière Nahr Ibrahim, Liban). *Revue des sciences de l'eau*. 20: 341–352. <https://doi.org/10.7202/016909ar>
- Borrego, AF., Romero P. 1982. Study of the microbiological pollution of a Malaga littoral area II. Relationship between fecal coliforms and fecal streptococci. VI^{ème} Journée Étude Pollutions, Cannes, France, Pp 561-569.
- Brooks P.D., Chorover J., Fan Y., Godsey S.E., Maxwell R.M., Mc Namara J.P., T.C., 2015. Hydrological partitioning in the critical zone: Recent advances and opportunities for developing transferable understanding of water cycle dynamics. *Water Resources Research*. 6973–6987. <https://doi.org/10.1002/2015WR017039>.Received
- Collins, R., Rutherford, K., 2004. Modelling bacterial water quality in streams draining pastoral land. *Water Research*. 38: 700–712. <https://doi.org/10.1016/j.waters.2003.10.045>
- EPA, 2012. Recreational Water Quality Criteria. U. S. *Environmental Protection Agency*. 1–69. <https://doi.org/820-F-12-058>
- Hamze, M., Hassan, S., Thomas, R.L., Khawlie, M., Kawass, I., 2005. Bacterial indicators of faecal pollution in the waters of the El-Kabir River and Akkar watershed in Syria and Lebanon. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2005.00265.x>
- Hébert, S., Légaré, S., 2000. Référence à citer. Suivi de la qualité des rivières et petits cours d'eau, Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ministère de l'Environnement, envirodoq no ENV-2001-0141, rapport n° QE-123, 24 p. et 3 annexes.

- INSPQ (Institut National de Santé Publique Québec). Centre d'expertise et de référence en santé publique <https://www.inspq.qc.ca/eau-potable/enterocoques>
- IPCC, 2013. Climate Change 2013 The Physical Science Basis. Working Group 1, contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- Jiang, S.C., 2006. Human Adenoviruses in Water : Occurrence and Health Implications : A Critical Review. *Environmental Science & Technology* 40, 7132–7140.
- M. Blinda, 2007. Pollution tellurique du littoral nord-ouest du Maroc entre Tanger et Tétouan: Caractérisation, Impact sur l'Environnement et Proposition de Solutions. Thèse de doctorat 162.
- Massoud, M.A., El-Fadel, M., Scrimshaw, M.D., Lester, J.N., 2006. Factors influencing development of management strategies for the Abou Ali River in Lebanon. I: Spatial variation and land use. *Science of the Total Environment*. 362: 15–30. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.09.079>
- Massoud, M.A., Tareen, J., Tarhini, A., Nasr, J., Jurdi, M., 2010. Effectiveness of wastewater management in rural areas of developing countries: a case of Al-Chouf Caza in Lebanon. *Environmental Monitoring and Assessment* 161, 61–69. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0727-2>
- MEDD & Agences de l'eau 2003. Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau; Grilles d'évaluation SEQ-EAU (Version 2), Paris, 40p.
- Mouawad R, Daou C, Khalaf G, Hage K, Lteif M, 2012. The study of meiofaunal communities on Lebanese sandy beaches and evaluation of water quality. *INOC-CNRS Land-Sea Interactions in the Coastal Zone, Jounieh-Lebanon*, 06-08 November – 2012, 107-116.
- National Research Council, 2001. Basic Research Opportunities in Earth Science. National Academy Press Washington, D.C. <https://doi.org/10.17226/9981>
- Organisation mondiale de la santé, 1994. Directives de qualité pour l'eau de boisson; volume 1 – recommandations. OMS, Genève, 2e édition, 202 p
- Organisation mondiale de la santé, 2000. Directives de qualité pour l'eau de boisson; volume 2 – critères d'hygiène et documentation à l'appui. OMS, Genève, 2e édition, 1050 p
- Organisation Mondiale de la Santé, 2012. Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères. Volume II, Utilisation des eaux usées en agriculture. OMS, Genève.
- Osuolale, O., Okoh, A., 2017. Human enteric bacteria and viruses in five wastewater treatment plants in the Eastern Cape, South Africa. *Journal of Infection and Public Health* 10, 541–547. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2016.11.012>
- Robertson, W. 1995. Utilités et limites des indicateurs microbiologiques de la qualité de l'eau potable. Dans : Air intérieur et Eau potable, sous la direction de Pierre Lajoie et Patrick Levallois, Presses de l'Université Laval, p. 179-193

- Segbeaya, K.N., 2012. Évaluation de l'impact des déchets ménagers de la ville de Kara (Togo) sur la qualité de la rivière Kara. Thèse de doctorat, Université de Lomé & Université de Limoges, 226p.
- Singh, C., Singh, J.S., Kumar, V., Chandra, R., Kumar, N., 2013. Screening out of coliform bacteria from different location of Gomti river in Lucknow. *African Journal of Microbiology Research* 7, 3762–3771. <https://doi.org/10.5897/AJMR12.1994>
- SOER (State of the Environment Report). The State and Trends of the Lebanese Environment, Ministry of Environment, Beirut. MoE/UNDP/ECODIT; 2010. 240 p
- UNEP, Rapid Environmental Assessment of The Urban Community of Al-Fayha', Lebanon, (2009). 74 pp.
- Youmbi, J.G.T., Feumba, R., Njitat, V.T., De Marsily, G., Ekodeck, G.E., 2013. Pollution de l'eau souterraine et risques sanitaires à Yaoundé au Cameroun. *Comptes Rendus - Biologies* 336: 310–316. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2013.04.013>