



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi

Faculté Des Sciences Exactes et des Sciences de La Nature et de la Vie

Département des Sciences de La Nature et de la Vie

N ° d'ordre.....

N ° de série.....

**THESE PRESENTEE POUR L'OBTENTION DU GRADE DE
DOCTORAT EN SCIENCE**

Spécialité : Ecologie et Environnement

Présentée par : Zidi Anissa

Thème

**Evaluation des impacts de l'irrigation par les eaux
d'Oued Méskiana (Oum El Bouaghi) sur les sols de la
région de Méskiana**

Devant le jury :

Président : Khiari Abdel kader

Pr. Univ Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi

Encadreur : Senoussi Mohammed Mourad

Pr. Univ Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi

Examineur : Dehimat Laid

Pr. Univ.Frères Mentouri, Constantine 1

Examineur : Touati Laid

MCA. Univ.Frères Mentouri, Constantine 1

Année universitaire 2020-2021

REMERCIEMENTS

En tout premier, je remercie Dieu qui m'a donné la santé, et de la volonté pour poursuivre mes études.

*J'exprime mes profonds remerciements à mon promoteur, **Pr. Senoussi Mouhammed Mourad** à l'université d'Oum el Boueghi pour son encadrement et de m'avoir prêté main droite dans ce travail. Comme je remercie également **le professeur Menad Ahmed** mon Ex-encadreur qui n'a pas pu finalisé ce travail pour des problèmes de santé.*

*Mes remerciements à Monsieur le Professeur et directeur du laboratoire de recherche (RNAMS) à l'université d'Oum el Boueghi **Mr. Khiari Abdelkader** pour avoir accepté de présider le jury, et de m'avoir accueillie au niveau de son laboratoire, et mis à ma disponibilité tous les moyens nécessaires à la réalisation de ce travail.*

*Nous remercions également Monsieur le **Pr. Dehimat Laid** de l'université de Constantine, et **Mr. Touati Laid, M.C.A** à l'université de Constantine qui ont fait l'honneur de juger ce travail.*

*Je remercie également **Mme Mansouri Djwhara** ingénieur du laboratoire de recherche (RNAMS) à l'université d'Oum el Boueghi de m'avoir encouragé tout au long de mon parcours universitaire. Je lui dis mille mercis pour sa patience et son aide précieux.*

*Merci aux administrations et établissements qui m'ont aidé et ont accepté de travailler avec moi : la direction de l'hydraulique de la wilaya de Oum El Bouaghi, le personnel des différents laboratoires de l'université de Oum El Boueghi, le centre de recherche en biotechnologie de Constantine (CRBt), le laboratoire de chimie : pollution et traitement des eaux -Université des frères Mentouri, Constantine 1- dirigé par **Mr Ali Khoudja Houcine**.*

Mille mercis à tous les membres de ma grande, petite et belle famille qui m'ont soutenu et aidé tout au long de mon travail.

*Merci à mes très chers parents pour leur confiance, leur soutien et suivi durant tous ces années de recherche, je suis redevable d'une éducation dont je suis fière. Merci **Maman** pour avoir corrigé chaque étape de ce manuscrit avec précisions.*

*Ma reconnaissance va aussi à mon époux **Echafaai Latrache** pour son aide, et à mes enfants : **Adem Abd El Ouadoud** et **Hawa** pour leur patience.*

*Je tiens à remercier profondément mes fidèles amis qui m'ont vivement aidé dans la réalisation de ce travail : **Djwhara, Mme Hafid Hinda, Karima, Hind, Kanza, Nawel, Dalila, Dounia, Wissem**.*

Enfin, j'exprime ma vive et profonde reconnaissance et gratitude à tous ceux que j'ai oublié de citer et qui, de près ou de loin se sont associés pour l'élaboration de ce travail.

A tous mes enseignants, qui m'ont suivie de mes premières années à d'école jusqu'ici.

RESUME

L'écosystème aquatique de la vallée de Méskiana (wilaya d'Oum El Boughi) couvre une superficie importante avec un régime d'écoulement permanent et un climat semi-aride. L'objectif du travail est d'examiner l'état des sols en termes de salinisation, d'accumulation et de migration verticale des éléments métalliques, suite à leur exposition aux eaux de l'oued étudié (exposé au déversement des eaux usées). Une caractérisation qualitative et quantitative à travers divers paramètres fut réalisée sur des échantillons d'eau et de sol (différents sites et profondeurs) prélevés de manière aléatoire et systématique. Les résultats démontrent de fortes concentrations en éléments chimiques polluants pour les eaux échantillonnées. Ce qui a entraîné une pollution accentuée au niveau de la partie aval. Le Taux d'Absorption du Sodium (SAR) et le pourcentage de sodium ont (diagramme de Wilcox et Riverside) révélé une salinité excessive au niveau du site situé à l'aval. Des analyses statistiques réalisées pour déterminer l'effet de l'irrigation sur le sol, ont démontré que les effets sites sont hautement significatifs pour la majorité des éléments dosés. La migration verticale des éléments est moins significative et peut-être dû au lessivage, car les sols deviennent compacts au fil du temps vu l'intensité de l'irrigation avec des eaux chargées en matière organique. Cette pollution affecte l'environnement et constitue une menace majeure pour la santé des habitats biologiques.

Mots clés : Pollution, Métaux lourds, sol, Irrigation, Oued Meskiana, paramètres physico-chimiques.

Abstract

The water ecosystem of the Meskiana Valley (Oum El Boughi wilaya) which has a permanent flow regime and a semi-arid climate covers a significant area. In order to examine the soil condition in terms of salinization, metal accumulation and vertical migration, following the exposure to the water of the oued, a qualitative and quantitative characterization through various parameters was carried out on water and soil samples (different sites and depths) taken in a random and systematic manner. The results show a high concentrations of chemical pollutants which indicate an increased pollution at the level of the downstream, the Sodium Absorption Rate (SAR) and the sodium percentage determined (Wilcox and Riverside diagram) indicate an excessive salinity at the downstream site. Statistical analyzes which realised to determine the effect of irrigation on soil have shown that site effects are highly significant for the majority of the measured elements. Vertical migration of elements is less significant and may be due to leaching, as soils become compact over time due to the intensity of irrigation with water charged with organic matter. This pollution affects the environment and poses a major threat to the health of biological habitats.

Key words: Pollution, Heavy Metals, Ground, Irrigation, Oued Meskiana, physico-chemical parameters.

ملخص

يغطي النظام البيئي المائي لوادي مسكيانة (ولاية أم البواقي) مساحة كبيرة بنظام تدفق دائم و مناخ شبه جاف. بهدف فحص حالة التربة من حيث الملوحة, تراكم و الهجرة العمودية للعناصر المعدنية (المعادن الثقيلة) بعد تعرضها لمياه الوادي المدروسة (معرض للمياه الصرف الصحي). تم اجراء دراسة تحليلية مخبرية نوعية و كمية من خلال معايير مختلفة على عينات من المياه و التربة مأخوذة من منطقة الدراسة بطريقة منهجية عشوائية (مواقع و اعماق مختلفة). النتائج بينة تراكيز عالية للعناصر الكيميائية الملوثة في عينات الماء مما أدى إلى تراكمها على مستوى الجزاء السفلى من الواد. معدل امتصاص الصوديوم (SAR) و نسبة الصوديوم (حسب Wilcox و Riverside) بينة ملوحة جد مرتفعة على مستوى نفس الجزاء من الواد. أظهرت التحليلات الإحصائية التي تم إجراؤها لتحديد تأثير الري على التربة أن تأثيرات الموقع مهمة للغاية بالنسبة لغالبية العناصر التي تم قياسها. تعتبر الهجرة العمودية للعناصر أقل أهمية وقد تكون بسبب النض ، حيث تصبح التربة مضغوطة بمرور الوقت بسبب كثافة الري بالمياه المحملة بالمواد العضوية. يؤثر هذا التلوث على البيئة ويشكل تهديدًا كبيرًا لصحة الموائل البيولوجية

الكلمات المفتاحية: التلوث, المعادن الثقيلة, التربة, الري, وادي مسكيانة, العيارات الفيزيائية والكيميائية.

Sommaire

Remerciements	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	

Introduction	1
---------------------------	---

CHAPITRE 1

Synthèse bibliographique

1.1.	Eaux naturelles de surface.....	4
1.1.1.	Définition	4
1.1.2.	Caractéristiques des eaux de surface	4
1.1.3	La pollution des eaux de surface.....	5
1.1.3.1.	Pollution des eaux selon la forme (type) et la concentration.....	5
1.1.3.1.1.	Pollution physique.....	5
1.1.3.1.2.	Pollution chimique.....	6
1.1.3.1.3.	Pollution biologique.....	6
1.1.3.1.4.	Les principaux polluants des eaux selon la concentration.....	7
1.1.3.2.	Sources des polluants d'eaux de surface.....	8
1.1.3.2.1.	Effluents urbains (eaux usées).....	8
1.1.3.2.2.	Eaux industrielles.....	8
1.1.3.2.3.	Effluents agricoles.....	9
1.1.4.	Conséquences de la contamination des eaux.....	9
1.1.4.1.	Atteintes chimiques	9
1.1.4.2.	Atteintes physiques.....	9
1.1.4.3.	Eutrophisation des eaux	10
1.1.4.4.	Salinisation des eaux de surface.....	10
1.2.	Le sol et ses constituants.....	11
1.2.1.	Composition physique du sol.....	11
1.2.1.1.	Les constituants minéraux.....	11
1.2.1.2.	La matière organique	12
1.2.1.3.	L'eau dans le sol	13
1.2.2.	Pollution des sols	13
1.2.2.1.	Pollution liée aux composés organiques	13
1.2.2.2.	Pollution liée aux composés inorganiques.....	13
1.2.2.2.1.	Définition, Origine et classification des Eléments Trace Métalliques (ETM).....	14
1.3.	Réutilisation des eaux usées en agriculture	15
1.3.1.	Dans le monde.....	15
1.3.2.	En Algérie.....	16

1.3.3.	Aspects juridiques.....	16
1.4.	Impact de l'irrigation des sols par des eaux contaminé.....	17
1.4.1.	Salinisation et sodicité des sols	18
1.4.2.	Sur l'agriculture irriguée (perte de production).....	19
1.4.3.	Accumulation des éléments trace métalliques (ETM) dans le sol.....	20

CHAPITRE 2

Présentation du site d'étude

2.1.	Présentation de la région d'étude.....	22
2.2.	Présentation d'Oued Meskiana.....	24
2.3.	Etude climatique.....	26
2.4.	Synthèse climatique.....	28
2.5.	Cadre biotique.....	30
2.6.	Exploitation de site	31
2.6.1.	L'agriculture et l'irrigation.....	31
2.6.2.	Le pâturage	31
2.6.3.	Le déversement des eaux usées	31

CHAPITRE 3

Matériel et Méthodes

3.1.	Caractéristiques des points de prélèvement	32
3.2.	L'échantillonnage.....	36
3.2.1.	L'eau	36
3.2.2.	Le sol.....	36
3.3.	Méthode et matériel pour la réalisation des analyses.....	37
3.3.1.	Caractérisation physico-chimique des eaux	37
3.3.2.	Caractérisation dessols	39
3.4.	Traitement des données.....	40
3.4.1.	Evaluation de la qualité d'eau et de sol analysés.....	40
3.4.1.1.	Législation, directives et norme nationale et international.....	40
3.4.1.2.	Indices de la qualité de l'eau.....	40
3.4.2.3.	Les diagrammes	41
3.4.2.	Etude statistique.....	42

CHAPITRE 4

Résultats & discussions

4.1.	Conditions d'observation des sites d'étude (eau / sol).....	43
4.2.	Caractérisation des eaux naturelles de surface et leurs aptitudes à l'irrigation.....	43
4.2.1.	Caractéristiques physico-chimiques.....	43
4.2.1.1.	La température	45
4.2.1.2.	Le potentiel d'hydrogène (pH).....	45
4.2.1.3.	La conductivité électrique (CE).....	47
4.2.1.4.	L'oxygène dissous (O ₂)	48

4.2.1.5.	La turbidité.....	49
4.2.1.6.	La dureté	50
4.2.1.6.1.	Le Titre Hydrotimétrique (TH).....	51
4.2.1.6.2.	La dureté carbonatée	53
4.2.1.6.3.	La dureté non carbonatée (dureté permanente).....	54
4.2.1.7.	Sodium (Na ⁺) et potassium (k ⁺).....	56
4.2.1.8.	Les éléments polluants.....	58
4.2.1.8.1.	Les formes d'azote.....	58
4.2.1.8.2.	Le phosphore (Po ₄ ²⁻).....	61
4.2.1.9.	Les éléments traces métalliques (ETM).....	62
4.22.	Indices de qualité, Salinité, et aptitude des eaux d'Oued Meskiana à l'irrigation.....	67
4.2.2.1.	Indices de la qualité de l'eau.....	67
4.2.2.2.	Facies chimiques des eaux.....	68
4.2.2.2.	Salinité et aptitude à l'irrigation.....	69
4.3.	Impact de l'irrigation sur les sols de la région d'études.....	73
4.3.1.	Caractéristique physico-chimique du sol pour la station témoin (S1T).....	73
4.3.2.	Caractérisation des sols des deux sites irrigués par les eaux de l'oued étudié	75
4.3.3.	Effet de l'irrigation sur les paramètres physico-chimiques des sols (sites /profondeurs)	77
4.3.3.1.	Variation du pH dans le sol (pH –eau)	79
4.3.3.2.	Variation de la salinité totale du sol (CE)	79
4.3.3.3.	Variation du Calcaire totale (CaCO ₃) dans le sol	80
4.3.3.4.	Variation des Sulfates (SO ₄ ²⁻) et des Chlorures (Cl ⁻) dans le sol.....	82
4.3.3.5.	Variation de la Matière Organique (MO) dans le sol.....	82
4.3.3.6.	Variation de l'Azote Total (N%) dans le sol.....	84
4.3.3.7.	Calcul du Rapport C/N dans le sol (Carbone /l'azote total).....	85
4.3.3.8.	Variation de la Capacité d'Echange Cationique (CEC) dans le sol.....	85
4.3.3.9.	Variation du phosphore Assimilable P ₂ O ₅	86
4.3.3.10.	Variation des Eléments Trace Métallique ETM (Pb, Zn, Cd).....	87
4.3.4.	Relations inter caractères.....	89
4.3.4.1.	Corrélations.....	89
4.3.4.2.	Analyse en composantes principales (ACP).....	90
Conclusion.....		93
Références bibliographique		
Annexe 1		
Annexe 2		

AP : Après	mm : millimètre
AV : Avant	MO : Matières Organique
C [°] : Degré Celsius	mS : millimohm
C.S.M : Constantinois-Seybousse-Mellegue	MTH : Maladies à transmission hydrique
Ca ²⁺ : calcium	Na% : Pourcentage du sodium
CaCO ₃ : Calcaire total	NH ₄ ⁺ : Ammonium
Cd : Cadmium	NO ₃ ⁻ : Nitrate
CEC : Capacité d'Echange Cationique	NO ₂ ⁻ : Nitrite
Cl ⁻ : Chlorure	ns : non significatif
Cm : centimètre	OMS : Organisation Mondiale de Santé
CNES : Conseil National Economique et Social	ONA : Agence National d'Assainissement
Cond : Conductivité	ONM : Office Nationale de la Météo.
DBO : Demande Biologique en Oxygène.	P ₂ O ₅ : Phosphore assimilable
DHWCNE : Direction de l'Hydraulique de la Wilaya de Constantine	Pb : Plomb
EH : D'Equivalent- Habitant	PNAD : Plan National d'Aménagement et Développement
EM : Eléments Métalliques	PO ₄ ³⁻ : Orthophosphate
FAO : Organisation Agriculture Food	ppb : partie par billion
Fig. : Figure	ppm : partie par million
g/l : Gramme par litre	Prof : profondeur
IP : Indice de perméabilité	Q2 : Quotient pluviométrique d'Emberger
Km ² : Kilomètre carré	S : Station
KR : Ratio de Kelly	SAR : Sodium Absorbable Rapport
M.A.T.E : Ministère d'Aménagement du Territoire de l'Environnement	SAR : Sodium Absorption
Meq : milli équivalent.	T : Température
MES : Matières En Suspension	TA : Titre Alcalimétrique
Mg ²⁺ : magnésium	TAB. : tableaux
mg : milligramme	TAC : Titre Alcalimétrique complet
mg/l : Milligramme par litre	TH : dureté totale
MH : Magnésium Hazard	Vgtx : végétaux
ml : Millilitre	Zn : zinc
	LANO : Laboratoire Agronomiques de la Normandie

Liste des tableaux

<i>Num éro</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
Tab.1	Moyenne des données climatiques de la station météo d'Oum El Bouaghi pour la période de 1990 à 2015.	27
Tab.2	Caractéristiques des sites de prélèvement d'eaux.	32
Tab.3	Caractéristiques des sites de prélèvement des échantillons de sol.	33
Tab.4	Méthodes d'Analyses physico chimiques des eaux.	38
Tab.5	Méthodes d'Analyses chimiques des sols.	39
Tab.6	Conditions et observation de terrine pendant la campagne d'échantillonnage effectué en Avril 2015.	43
Tab.7	Valeurs moyennes des résultats obtenus pour l'analyse physico-chimiques de l'eau analysée et normes en vigueur. (Min, Max, Moyennes \pm Ecart Types (ECT), $n=3, p \leq 0,05$).	44
Tab.8	Quelques Indices de qualité de l'eau appliquée sur les eaux d'oued Meskiana destiné à l'irrigation.	67
Tab.9	Caractéristiques physico-chimiques du sol T énoin non irrigué ($n=15, p \leq 0,05$).	73
Tab.10	Caractéristiques physico-chimiques du sol T énoin selon les profondeurs ($n=5, p \leq 0,05$).	73
Tab.11	Caractéristiques physico-chimiques des sols pour les sites irrigués ($n=5, p \leq 0,05$).	75
Tab.12	Caractéristiques physico-chimiques des sols pour les deux sites irrigués, selon les profondeurs ($n=5, p \leq 0,05$).	75
Tab.13	Carré moyen de l'analyse de variance des paramètres mesurés (ANOVA)	77
Tab. 14	Coefficients de corrélations r de Pearson entre les différents caractères mesurés (Les corrélations marquées sont significatives à $p < 0,05$)	89

Liste des figures

<i>Num éro</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
Fig.1	Processus de dégradation des sols suite à l'irrigation (Lahlou et al, 2003)	18
Fig.2	Localisation des ETM dans les sols (Juste, 1988, modifié par Perrono, 1999)	20
Fig. 3	a. Situation géographique de l'unité hydrographique du Constantinois-Seybousse-Mellegue, b. bassin versant de la Medjerda-Mellegue, c. Dessin à main levée du sous bassin versant oued Meskiana (ABH-CSM, 2009 ; Gouaidia, 2009)	22
Fig. 4	Image satellite de la Vallée de Meskiana. (Source : Google MAP, 2017).	24
Fig.5	Photos de la zone d'étude (photo personnel, Avril 2015).	26
Fig.6	Diagrammes Ombrothermiques selon les données moyennes de la période 1990-2015.	28
Fig.7	Situation de la station météorologique de la wilaya d'Oum El Boueghi dans le climagramme d'Emberger	30
Fig.8	Carte topographique de Meskiana avec les points de prélèvements.	34
Fig.9	Photos des trois stations de prélèvement	35
Fig.10	Illustration pour la méthode d'échantillonnage des sols	37
Fig.11	Variations de la température de l'eau du site d'étude et normes	45

	(n=3, p≤0,05)	
Fig.12	Variations du pH dans l'eau du site d'étude et normes (n=3, p≤0,05).	46
Fig.13	Variations de la conductivité dans l'eau du site d'étude et normes (n=3, p≤0,05).	47
Fig.14	Variations de l'oxygène dissous dans l'eau du site d'étude et normes (n=3, p≤0,05).	49
Fig.15	Variations de la turbidité de l'eau du site d'étude et norme (n=3, p≤0,05).	50
Fig. 16	Variations spatio-temporelle de la dureté totale dans l'eau du site d'étude et norme (n=3, p≤0,05).	51
Fig.17	Variations des teneurs en calcium dans l'eau de l'oued étudié et normes (n=3, p≤0,05).	52
Fig.18	Variations des teneurs en Magnésium dans l'eau du site d'étude et normes (n=3, p≤0,05).	53
Fig.19	Variations des carbonates de l'eau de du site d'étude et norme (n=3, p≤0,05).	54
Fig.20	Teneurs des chlorures dans l'eau du site d'étude et normes (n=3, p≤0,05).	55
Fig.21	Variations des teneurs en sulfate dans l'eau du site d'étude et normes (n=3, p≤0,05).	56
Fig.22	Variations des teneurs en sodium dans l'eau du site d'étude et normes (n=3, p≤0,05).	57
Fig.23	Variations des teneurs en potassium dans l'eau du site d'étude et normes (n=3, p≤0,05).	58
Fig.24	Variations des teneurs en nitrates dans l'eau de l'Oued étudié et normes (n=3, p≤0,05).	59
Fig.25	Variations des teneurs en nitrites pour les stations d'étudié et normes (n=3, p≤0,05).	60
Fig.26	Variations des teneurs en ammonium dans l'eau de l'oued et normes (n=3, p≤0,05).	61
Fig.27	Variations des teneurs en phosphate dans l'eau du site d'étude et normes (n=3, p≤0,05).	62
Fig.28	Variations des teneurs en ETM dans l'eau de l'oued et normes (n=3, p≤0,05).	63
Fig.29	Diagramme de Piper pour les eaux d'Oued Meskiana.	69
Fig.30	Diagramme de Richards (pouvoir alcalinisant) pour les eaux du site d'étude (Oued Meskiana)	70
Fig.31	Diagramme de wilcox pour les eaux du site d'étude (Oued Meskiana).	72
Fig.32	Variations des teneurs en pH eau dans les sols étudiés selon les stations et les profondeurs (n=5, p≤0,05).	79
Fig.33	Variations de la Salinité totale (CE) dans les sols étudiés selon les stations et les profondeurs (n=5, p≤0,05).	80
Fig.34	Variations du calcaire total (CT) dans les sols étudiés selon les stations et les profondeurs (n=5, p≤0,05).	81
Fig.35	Variations des Sulfates (SO ₄ ⁻) et des chlorures (Cl ⁻) dans les sols étudiés selon les stations et les profondeurs (n=5, p≤0,05).	82
Fig.36	Variations de la Matière Organique (MO) dans les sols étudiés selon les stations et les profondeurs (n=5, p≤0,05).	83
Fig. 37	Variations de l'azote total dans les sols étudiées selon les stations et les	84

	profondeurs étudiées (n=5, p≤0,05).	
Fig. 38	Variations du rapport C/N dans les sols étudiés selon les stations et les profondeurs (n=5, p≤0,05).	85
Fig. 39	Variations de la Capacité d'Echange Cationique (CEC) dans les sols étudiés selon les stations et les profondeurs (n=5, p≤0,05).	85
Fig. 40	Variations du phosphore Assimilable P ₂ O ₅ dans les sols étudiés selon les stations et les profondeurs (n=5, p≤0,05).	86
Fig.41	Variations des Eléments Trace Métallique ETM (pb, Zn, Cd) dans les sols étudiés selon les stations et les profondeurs (n=5, p≤0,05).	88
Fig.42	Cercle de corrélations entre les variables et les axes 1 et 2 de l'analyse en composantes principales des paramètres mesurés.	90
Fig.43	Cercle de corrélations entre les variables et les axes 1 et 2 de l'analyse en composantes principales des sites et profondeurs choisies	91

Introduction

Les transformations des paysages, la destruction des habitats et les apports anthropiques excessifs contribuent à l'altération de tous les compartiments de l'environnement et particulièrement les ressources naturelles en eau. L'importance de l'eau pour l'économie et le progrès socio-économique des sociétés ne cesse de croître. Sa demande et son approvisionnement deviennent de plus en plus difficile à acquérir, vu les progrès industriels et agricoles, le confort et l'hygiène des habitants dont les effectifs ne cessent eux-mêmes de s'accroître. Pour cette raison, et depuis quelques décennies, la protection et la conservation des milieux naturels, sont devenues une préoccupation majeure et un objectif principal dans les programmes de développement (Boualla et *al.*, 2018). Aujourd'hui avec les conditions climatiques des régions arides et semi-arides, l'eau est devenue un enjeu incontestable. De ce fait, l'établissement d'un équilibre entre la demande croissante en eau et la disponibilité des ressources en eaux reste un grand défi.

L'une des pollutions la plus redoutable qui menace les eaux de surface et plus particulièrement les eaux de rivières, est celle liée aux eaux usées issues de différentes activités humaines, que ce soit domestiques et/ou industrielles, demeure un problème de santé publique. Le contrôle physico-chimique de ces eaux reste impératif car il peut dans certains cas éviter de grandes catastrophes. Le problème devient plus inquiétant lorsque les eaux usées sont utilisées pour l'irrigation des différentes cultures. L'agriculture consomme un pourcentage important plus de 70 % des ressources en eaux notamment dans les pays en développement tels que les pays arabes (ONU, 2016). Dans une étude réalisée par El Addouli et *al.*, en 2008, les auteurs déclarent que les eaux usées non traitées sont utilisées dans l'irrigation de 10 % des récoltes dans le monde. L'irrigation non conventionnelle peut-être directe avant dilution des eaux usées avec tout autre ressource en eau ou indirectement ce qui implique leur dilution avant d'être utilisées en aval (Chongwang, 2017). La réutilisation des eaux usées en agriculture est une pratique très répandue en aval des centres urbains et essentiellement dans les régions affectées par les pénuries de ressources en eau (Burak, 2002). Quoique proscrite, cette pratique est appréciée par les agriculteurs car les eaux usées constituent une ressource régulièrement disponible et abondante et contiennent des matières fertilisantes nécessaires à l'amélioration des propriétés du sol et du rendement des cultures (Ababsa et *al.*, 2016). Les contaminants introduits par irrigation peuvent perturber les propriétés physico-chimiques et écologiques du sol lorsqu'ils dépassent les teneurs tolérables dans la nature, ou les valeurs indicatives dont s'est doté chaque pays (Gouaidia et *al.*, 2013). En 2015 l'Algérie enregistre, un volume annuel estimé à 927 millions m³ /an d'eaux usées

généérées par la population algérienne, 700 millions m³/an sont traitées par l'ONA et réutilisées par les activités industrielles et l'irrigation agricole (Bouchaala et *al.*, 2017). Le reste est rejeté directement au niveau des milieux naturels en général les rivières (les oueds) d'où leurs réutilisation pour l'irrigation. Cette pratique est utilisée dans plusieurs régions de notre pays, suite à une situation hydrique largement déficitaire et un accroissement de la demande sur les produits agricoles. Malgré que cette pratique est interdite par la réglementation, les agriculteurs la pratiquent, ce qui intensifie le processus de salinisation, au point que plus de 20 % des sols irrigués sont affectés par un problème de salinité, en Algérie (Hartani, 2007; Rouabhia et Djabri, 2010, Tamrabet, 2011).

C'est dans le contexte de valoriser les ressources hydriques que s'inscrit cette étude de recherche. La plaine de Meskiana se caractérise par son climat semi-aride très sévère, avec une forte évapotranspiration, et une sécheresse qui perdure depuis plus de deux décennies. Ce qui a obligé les agriculteurs à utiliser les eaux d'oued Meskiana à des fins agricoles (irrigation).

L'objectif de cette étude est d'examiner l'impact du déversement direct d'une quantité considérable d'eau usée, au niveau de la partie aval de l'oued étudié, sur les eaux naturelles et les sols irrigués à partir de ce dernier. Ainsi une caractérisation qualitative et quantitative à travers divers paramètres va être effectuée sur des échantillons d'eau et de sol, prélevés de manière aléatoire et systématique. La salinisation des eaux et des sols, l'accumulation et la migration verticale des éléments métalliques au niveau des sols, suite à leur exposition aux eaux de l'oued étudié, sont des axes principaux de notre étude. La raison qui a motivé le choix de cette étude c'est le peu de travaux réalisés dans la région, les travaux disponibles sont consacrés à l'hydrogéologie, soit les eaux souterraines (Gouaidia, 2008 ; Gouaidia et *al.*, 2013 ; Gouaidia, 2008 ; Belloula, 2017).

Après notre investigation, nos mesures sur terrain, et nos travaux aux laboratoires, nous avons élaboré un manuscrit, qui s'articule autour de quatre chapitres exceptés l'introduction, conclusion et perspectives :

Le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique : c'est une brève présentation où nous avons mis l'accent sur les principaux axes de notre recherche, eaux nature, sol, pollution, impacts de l'irrigation par les eaux polluées sur la qualité du sol.

Le deuxième chapitre décrit le site d'étude : emplacement, climatologie, géologie, hydrologie.

Le troisième chapitre regroupe les détails sur les matériels et méthodes employés pour la réalisation de cette étude.

Le quatrième chapitre portant sur l'analyse, l'interprétation et la discussion des résultats obtenus est appropriée à chaque partie étudiée.

Chapitre 1

Synthèse

Bibliographique

1.1. Eaux naturelles de surface

1.1.1. Définition

C'est l'eau présente dans les biotopes aquatiques naturels (Ramade, 2002). Forme la plus courante, elle dépasse 97% du volume de cet élément sur le globe (Faurie *et al*, 2003). Sous le terme 'eaux', on rassemble celles qui coulent ou qui stagnent sur les sols, dans la nature, ou encore les eaux souterraines (Bliffer, 2001).

Les eaux de surface ont pour origine, soit des nappes souterraines dont l'émergence constitue une source, soit les eaux de ruissèlement. Ces eaux se rassemblent en cours d'eau, caractérisés par une surface de contact eau-atmosphère toujours en mouvement (Bartout et Touchart, 2013).

Les bassins versants sont des unités géographiques naturelles drainées par un réseau hydrographique en amont d'un point (exutoire) par où transitent les produits des précipitations. Sa limite topographique est appelée ligne de crête (N'guessan, 2008). Ils sont drainés par les eaux de ruissèlement qui se rassemblent en ruisseaux, rivières (oued) et fleuves (Angelier, 2001).

Les rivières sont une section d'un cours d'eau correspondant à la zone rhithron (partie supérieure d'un cours d'eau). De ce fait, elles possèdent une pente moyenne et encore suffisante pour permettre une bonne oxygénation des eaux (Ramade, 1998). La rivière est répartie en deux parties importantes :

Partie amont : le régime d'écoulement est turbulent, turbide, avec une grande quantité de matières en suspension. L'indice de couleur est faible ainsi que la contamination bactérienne. La pollution causée par l'homme ou l'industrialisation y est pratiquement inexistante.

Partie Aval : le régime d'écoulement est lent, les eaux y sont donc de moins bonne qualité et plus difficiles à traiter qu'en amont (Ghiotti, 2006).

1.1.2. Caractéristiques des eaux de surface

Les eaux naturelles contiennent de nombreuses substances minérales et organiques, sous forme particulaire ou dissoute. Les caractéristiques moléculaires de l'eau lui confèrent de grandes capacités de dissolution. En d'autres termes, l'eau originellement pure ne le reste jamais très longtemps (Lacroix, 1991)

La qualité des eaux correspond à un ensemble de critères physico, chimiques et micro-organiques qui définissent leur degré de pureté et, en conséquence, leur aptitude aux divers usages alimentaires, domestiques, agricoles, ou industriels.

Les eaux de surface sont caractérisées par :

- la présence de gaz dissous, en particulier l'oxygène
- la charge importante de matière en suspension, tout au moins pour les eaux courantes.
- la présence de matières organiques d'origine, naturelle.
- la présence de plancton (phytoplancton et zooplancton).
- les variations journalières (température et pluviométrie) (Ramade, 2002).

1.1.3. La pollution des eaux de surface

Le terme de pollution peut être défini comme « une modification défavorable du milieu naturel qui résulte en totalité ou en partie de l'action humaine, au travers d'effets directs ou indirects, altérant les critères de répartition des flux d'énergie, des niveaux de radiation, de la composition physique-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes » (Barbaut, 2003).

La pollution de l'eau est une altération qui rend son utilisation dangereuse et (ou) perturbe l'écosystème aquatique. Elle peut concerner les eaux superficielles (rivières, plans d'eau) et/ou les eaux souterraines. Elle est le fait de divers types de rejets ponctuels ou diffus, qui apportent au milieu soit des calories, des substances minérales ou organiques ou des micro-organismes pathogènes. Elles ont comme principales origines : l'activité humaine, les industries, et l'agriculture (Dégrément, 1998).

1.1.3.1. Pollution des eaux selon la forme (type) et la concentration

1.1.3.1.1. Pollution physique

Elle est liée aux facteurs influents sur l'état physique de l'eau, elle peut être de nature:

- ✓ Mécanique (charge importante des eaux en éléments en suspension),
- ✓ Thermique (rejets d'eaux chaudes) ou
- ✓ Radioactive (Tuffery, 1980).

1.1.3.1.2. Pollution chimique

Notre vie moderne fait appel à beaucoup de produits chimiques : 110 000 substances chimiques existent actuellement sur le marché. Le résultat de cette utilisation massive de produits chimiques est une présence diffuse de traces de ces produits dans tous les compartiments de l'environnement. On peut constater que tout produit utilisé dans notre vie quotidienne, ou pour des usages agricoles ou industriels, termine tôt ou tard, au moins partiellement, sa vie dans le cycle de l'eau (Flammarion, 2016).

Les polluants chimiques peuvent être classés en deux grandes catégories :

- ✓ les micro-polluants : substances qui sont présentes dans les eaux à des concentrations infimes (de l'ordre du millionième, voire du milliardième de gramme par litre). Ils comprennent d'une part les composés chimiques de synthèse, tels les produits phytosanitaires, les biocides et les médicaments, et englobent d'autre part les substances organiques ou inorganiques naturelles, comme les toxines naturelles, les hormones et les métaux lourds. Même en concentrations infimes, ces substances peuvent avoir un effet néfaste sur les organismes aquatiques (Liess et al. 2008)
- ✓ les macro-polluants ou Macronutriments : regroupent des composés ou familles de composés présents dans le milieu aquatique en concentrations significatives (de l'ordre du mg/l ou du g/l), avec des effets négatifs sur le vivant. Autant que sa nature, la substance polluante est caractérisée par les effets qu'elle produit, la cible qu'elle atteint ou sa concentration/dose dans le milieu. La pollution peut être causée par la nature elle-même (éruption volcanique, sols acides...), mais elle résulte le plus souvent d'apports anthropiques (rejets domestiques, agricoles ou industriels...) (Mireille, 2015).

1.1.3.1.3. Pollution biologique

Un grand nombre de micro-organismes peuvent proliférer dans les eaux, grâce aux conditions favorables que leurs crée l'homme. Les eaux polluées peuvent transmettre plusieurs types de maladie dites maladies à transmission hydrique (MTH). La plupart de ces germes pathogènes ont une origine fécale et leur transmission est dite oro-fécale.

Les principaux organismes pathogènes qui se multiplient ou qui sont transportés dans l'eau sont :

Les bactéries : germes pathogènes très répandus dans une eau polluée, on distingue : Les germes banals responsables de gastro-entérites, les bacilles (*shigella*, *salmonelles*, *vibrions cholera*) qui provoquent des foyers épidémiques et les mycobactéries responsables de plusieurs types d'infection comme la tuberculose...etc.

Les virus : responsables de maladies hydriques (les poliovirus sauvages, les virus des hépatites, virus responsable des gastro-entérites...etc.)

Les parasites pathogènes : les plus fréquents dans l'eau sont : l'amibe (responsable de la dysenterie), les helminthes qui sous forme de kyste provoquent de graves anémies.

On trouve aussi les vers parasitaires, les champignons, les algues, les insectes et les larves aquatiques (Bouziane, 2000).

On parle ainsi de pollution : bactérienne, virale, ou parasitaire.

1.1.3.1.4. Les principaux polluants des eaux selon la concentration

On peut classer les polluants, en fonction de leur concentration habituelle dans l'eau:

- ✓ Polluants primaires : dont la concentration dans l'eau dépasse souvent les 5 ppm.
- ✓ Polluants secondaires : ceux dont la concentration dépasse souvent 0.1 ppm.
- ✓ Polluants tertiaires : la concentration dépasse souvent 0.01 ppm.
- ✓ Les traces : ces polluants dont la concentration est généralement inférieure à 0.01 ppm.
- ✓ Composants non permanents : soumis à des changements dus au contact avec l'air, les matériaux de récipients et conduites, ou à l'activité biologique. Il s'agit en particulier de :
 - Acidité et alcalinité;
 - Produits de cycles biologiques (cycle du carbone, cycle de l'oxygène, cycle de l'azote, réactions redox qui donne des Oxydants, Réducteurs) ;
 - Radionucléides : essentiellement le Radon, qui est un problème réel pour la santé humaine (Dib, 2018, Gérard, 2003).

1.1.3.2. Sources des polluants d'eaux de surface

Les principaux polluants de l'eau sont les effluents d'égout, les nutriments, les métaux toxiques rejetés par les industries en activité et surtout les installations minières abandonnées ainsi que les produits chimiques utilisés dans l'industrie et l'agriculture (PNUE, 1991).

1.1.3.2.1. Effluents urbains (Eaux Usées)

✓ **Eau de ruissellement ou pluviales :**

L'eau de pluie se charge d'impuretés au contact de l'air (fumées industrielles), puis, emporte en ruisselant, des résidus déposés sur les toits et les chaussées des villes (huiles de vidange, carburants, résidus de pneus et métaux lourds...).

✓ **Eaux domestiques :**

- Eaux ménagères, qui ont pour origine les salles de bains et les cuisines, et sont généralement chargées de détergents, de graisses, de solvants, de déchets organiques, etc.
- Eaux "vannes", chargées de diverses matières organiques azotées et de germes fécaux, constituant un substrat équilibré pour le développement des bactéries.

La Notion d'Equivalent- Habitant (EH) se définit comme étant la pollution produite par habitant et par jour. Un habitant produit environ 150 à 200 litres d'eaux usées par jour contenant des matières en suspension (M.E.S), des matières organiques (DBO5), des matières azotées (N), des phosphores (P) et plusieurs milliards de micro-organismes par 100 ml (Ladjel, 2010).

1.1.3.2.2. Eaux industrielles

Déchets liquides, très variés en termes de quantité et de qualité. Leurs caractéristiques dépendent du type d'industrie et du niveau de traitement que les eaux usées subissent avant leur rejet (Belaid, 2010). L'industrie rejette bon nombre de substances (minérale, organique) qui vont polluer les rivières, parfois même d'une manière dont on ne connaît pas les effets à long terme. En plus des matières organiques, azotées ou phosphorées, elles peuvent également contenir des produits toxiques, des solvants, des métaux lourds, des micro-polluants organiques, des hydrocarbures dissous émulsionnés ou sous forme de films superficiels, des tensioactifs, des phénols (Baumont et al., 2000).

1.1.3.2.3. Effluents agricoles

L'agriculture intensive tire la meilleure partie de l'eau, en irriguant quand l'apport d'eau a un effet positif, mais lorsque l'eau n'est plus un facteur limitant, en augmentant les rendements par d'autres moyens, le plus souvent par l'emploi de produits chimiques (engrais de synthèse, herbicides, insecticides, fongicides). Dans ces pratiques, et de façon quasi inévitable, une partie des produits utilisés diffusent vers l'atmosphère, les plans d'eau ou les nappes (Dorioz *et al.*, 1998).

1.1.4. Conséquences de la contamination des eaux

En fonction d'un degré croissant de pollution, les pertes d'usage concernent en premier lieu la potabilité puis l'aptitude des eaux de rivières à permettre le développement normal de la faune. Ensuite, on note aussi l'impossibilité d'utilisation pour la baignade, la perte d'usage agricole relative à son utilisation pour l'irrigation, et l'abreuvement des animaux. Enfin, il en résulte une perte d'usage industriel (Ramade, 2002).

1.1.4.1. Atteintes chimiques

Les contaminations chimiques modifient la composition des cours d'eau et peuvent ainsi produire des effets négatifs sur les organismes vivant dans l'eau.

1.1.4.2. Atteintes physiques

Représenté par une modification de l'espace vital des cours d'eau. Aussi, la communauté biologique des cours d'eau subit un stress pouvant conduire, selon l'ampleur, jusqu'à la disparition de certaines espèces. L'atteinte physique est de deux types : atteintes mécaniques-hydrauliques et thermiques.

1.1.4.3. Eutrophisation des eaux

L'eutrophisation est définie, comme l'enrichissement des eaux en nutriments qui vont favoriser la croissance des végétaux pour finalement induire des micro-algues, des algues flottantes à la surface des eaux et des macrophytes notamment des algues sur les rivages ou sur les fonds (Pinay et *al.*, 2018).

Les principaux nutriments à l'origine de l'eutrophisation sont :

- ✓ Le phosphore (Principalement sous forme de phosphates)
- ✓ L'azote (sous forme d'ammonium, de nitrates ou organique)
- ✓ La matière organique joue également un rôle important.

Les paramètres physiques du milieu comme l'ensoleillement et la température de l'eau, peuvent eux aussi favoriser le processus d'eutrophisation (Capblancq et *al.*, 2002; Devidal, 2007).

Nous pouvons différencier deux types de causes liées à l'eutrophisation, des causes naturelles et artificielles (dont l'homme est responsable).

Ce phénomène n'est pas sans conséquence pour l'environnement car il provoque l'asphyxie du milieu aquatique (diminution des teneurs en oxygène de l'eau), le déséquilibre écologique (modifiant la flore et la faune) ainsi que l'apparition de composés toxiques, ce qui rend la potabilisation difficile (Ryding et Rast, 1993 ; Devreker et lefebvre, 2016).

1.1.4.4. Salinisation des eaux de surface

La salinité peut être déterminée directement par la somme des concentrations mesurées en éléments dissous ou par le poids du résidu solide après évaporation et indirectement – approximativement- à partir de la conductivité électrique (Kloppmann et *al.*, 2012 ; Bhat et *al.*, 2016).

L'accumulation des sels dans une eau dépend de son origine :

- ✓ **Naturelle (salinité primaire) :**

La salinisation primaire ne représente qu'une faible part de la salinisation observée à l'échelle de la planète (Piscart, 2004). D'origine lithologique, les minéraux naturels de la croûte terrestre constituent la source principale de sel dans le sol, et dans l'eau (Gaucher et

Burdin 1974) ajoutant à cette dernière l'origine éolienne, biologique (activité microbienne), maritime (ras de marée) et lagunaire (Aubert, 1976).

✓ **Anthropique (salinité secondaire) :**

Les pratiques agricoles comme l'irrigation associée à un mauvais système de drainage sont souvent mis en cause car en favorisant l'évaporation de l'eau dans les zones arides, elles engendrent la précipitation de cristaux de sels en surface (Silva et Davies 1997). De nombreuses études ont ainsi montré le rôle de l'irrigation dans la salinisation de différents fleuves aux USA (Leland et Fend 1998) ou en Afrique du Sud (Silva et Davies, 1997). Les eaux usées non traitées sont rejetées dans les oueds qui sont à sec la plupart de l'année d'où la contamination par les nitrates et d'autres sels minéraux (Anctil, 2017).

1.2. Le sol et ses constituants

Le sol provient en général de l'altération de la roche mère sous-jacente, appelé sous-sol. La pédologie décrit les différents types de sols ainsi formés, en distinguant :

La couche arable : travaillée par l'agriculture, elle est riche en matières organiques.

Le sol ou l'horizon sous-jacent : entre la couche arable et la roche mère, contribue aussi à la nutrition de la plante en éléments minéraux et en eau.

L'agronomie s'intéresse à ces deux horizons à travers le profil cultural (Cornu & Clozel, 2000)

1.2.1. Composition physique du sol

Le sol comprend quatre éléments principaux: l'air, l'eau, les constituants minéraux et la matière organique.

1.2.1.1. Les constituants minéraux

Les minéraux primaires : tels que quartz, feldspaths, micas..., sont hérités de la roche mère, grâce aux processus de désagrégation mécanique (Duchauffour, 1997).

Les minéraux secondaires :

Les argiles :

Particules du sol dont le diamètre est inférieur à 2 µm, silicates d'aluminium plus ou moins hydratés, microcristallins, à structure en feuillets (phyllothes), provenant de l'altération géochimique et biochimique progressive des minéraux primaires du sol dépourvus de divers

éléments tels que le fer, le magnésium et le calcium. Les argiles ont une structure formée d'une superposition de feuillets qui leur confère une surface spécifique interne très variée ; et se caractérisent par une surface électrique non neutre, qui détermine leurs capacités d'échanges ioniques (Duchaufour, 1997).

Les oxydes et hydroxydes :

Les (hydr) oxydes de fer et d'aluminium, sous forme amorphe ou cristalline, sont des constituants communs dans les sols naturels. Les (hydr) oxydes de fer sont les plus abondants (Fe_2O_3 : hématite et maghémite; FeOOH : goethite). Les (hydr) oxydes d'aluminium sont relativement moins fréquents. Enfin les (hydr) oxydes de manganèse, sont généralement minoritaires dans les sols naturels (Sposito, 1989).

Les carbonates, phosphates, sulfates, sulfures et les chlorures

La forme prédominante des carbonates, dans la plupart des sols est la calcite (CaCO_3). Assez soluble, cette espèce a une influence majeure sur le pH des sols et par conséquent sur les phénomènes d'absorption de métaux. En outre, les réactions de dissolution / précipitation des carbonates favorisent le piégeage des ions métalliques au sein des cristaux formés (Blanchard, 2002).

Les phosphates (groupement PO_4^{3-}) sont des minéraux peu abondants dans les sols, mais susceptibles, comme les carbonates, de substitution du calcium par des éléments métalliques divalents (Pb, Zn, Cu), en particulier dans des sols à tendance basique (Kabata-Pendias, 2001)

Les sulfates (SO_4^{2-}), les sulfures (SO_2), et les chlorures (Cl^-) sont des espèces présentes en quantité négligeable dans la plupart des sols, mais qui peuvent être abondantes en contexte industriel ou minier (Kabata-Pendias, 2001).

1.2.1.2. La matière organique

Elle se compose de deux fractions:

La fraction vivante : micro-organisme, faune épilithique, rhizosphère des végétaux supérieurs, animaux fouisseurs. Son influence sur la fixation des éléments trace est importante, elle modifie le potentiel redox ou le pH.

La fraction morte : débris végétaux et animaux plus ou moins décomposés en humus, carbone rapporté

La matière organique est donc un facteur clef des échanges ioniques et des cycles géochimiques des éléments métalliques (Kabata-Pendias, 2001).

1.2.1.3. L'eau dans le sol

La réserve en eau assure la quasi-totalité des besoins en eau de la plante. L'eau dissout les éléments nutritifs pour constituer la solution du sol qui est absorbée par les racines. Plus la texture d'un sol est fine, plus sa réserve en eau est élevée. L'eau d'infiltration se charge sur son passage en oxygène, gaz carbonique et sels minéraux. Une partie de l'eau du sol est prélevée par la plante pour son alimentation mais aussi pour compenser les pertes par évapotranspiration au niveau des feuilles. Une autre partie de l'eau du sol peut être perdue par évaporation à la surface du sol (Hillel, 1988).

1.2.2. Pollution des sols

La Pollution des sols est employée lorsque des apports liés à des activités humaines ont des effets négatifs visibles sur l'environnement. Le polluant est défini comme un élément dangereux susceptible de présenter un risque pour les milieux et les organismes vivants du sol (Baize, 1997 ; Ramade 1993).

1.2.2.1. Pollution liée aux composés organiques

Ces composés sont issus de pratique récente liée à l'industrie :

- ✓ Les hydrocarbures ou huiles minérales,
- ✓ Les produits organiques industriels tels que le trichloréthylène,
- ✓ Les pesticides: les phénomènes de ruissellement et d'infiltration de ces substances participent ainsi à la pollution des cours d'eau, eaux souterraines et zones littorales,
- ✓ Les substances militaires.

1.2.2.2. Pollution liée aux composés inorganiques

Cette famille est principalement composée par les métaux lourds, également appelés « éléments traces métallique ». Le problème principal avec les métaux lourds comme le plomb, le cadmium, le cuivre et le mercure est qu'ils ne peuvent pas être biodégradés, et donc persistent pendant de longues périodes dans les sols (Huynh, 2009).

1.2.2.2.1. Définition, Origine et classification des Eléments Trace Métalliques (ETM)

Définition : Le terme métaux lourds ou ETM recouvre des éléments ayant des propriétés métalliques (ductilité, conductivité, densité, stabilité des cations, spécificité de ligand, etc.) et un numéro atomique >20. Les métaux lourds sont définis comme étant des minéraux ayant :

- Une densité supérieure à 6 g.cm^{-3} .
- Un poids atomique entre 63,5 et 200,6.
- Des concentrations individuelles qui ne dépassent pas 1 000 mg/kg (0,1%) de la croûte terrestre, dans les conditions naturelles (Baize, 1997 ; Srivastava et Majumder, 2008 ; Furini, 2012 ; Stankovic et Stankovic, 2013).

Certains métaux lourds tels le fer, le cuivre, le zinc, le cobalt, le nickel, etc., sont des micronutriments essentiels dans les activités fonctionnelles impliquées dans le maintien de la croissance et du développement des organismes vivants. A des concentrations excédentaires, ils peuvent s'accumuler dans les systèmes biologiques et deviennent un danger important pour la santé. Ces organismes peuvent être également exposés à des ions hautement toxiques, n'ayant aucun rôle biologique, comme: le cadmium, le plomb, le mercure, etc. (O'Halloran et Cullota, 2000).

Origines (Source) : Les ETM sont issus de deux origines différentes :

- **Origine Naturelle :**

Ils sont présents dans tous les compartiments de l'environnement de façon naturelle et normale, dans les sols, les eaux, l'air et dans les êtres vivants (Tremel-Shaub et Fiex, 2005). Ils sont issus de l'altération de la roche mère, pour constituer le fond géochimique.

La concentration naturelle de ces métaux lourds dans les sols varie selon la nature de la roche, sa localisation et son âge (Le Goff et Bonnomet, 2004).

- **Origine anthropique (activités humaines) :**

- ✓ **Industrie :** exploitation des gisements, métallurgie, fonderie.
- ✓ **Incinération et mise en décharge** des produits arrivés en fin de vie (plomb et cadmium dans les piles, batteries et accumulateurs, mercure dans les instruments de mesure), rejets urbains (effluents domestiques et municipales) (Burnol et al., 2006 ; Le Goff et Bonnomet, 2004).

- ✓ Combustion des matériaux fossiles et des carburants.
- ✓ Epanchage de produits phytosanitaires en agriculture, comme le sulfate de cuivre (traitement des vignes et des arbres fruitiers); l'arséniate de plomb ou des dérivés mercuriels ont été utilisés dans le passé comme pesticides.
- ✓ Fertilisants en agriculture, engrais (phosphates, peuvent aussi avoir de fortes concentrations en cadmium présent en impureté), boues des stations d'épuration, composts d'ordures ménagères et lisier utilisé pour amender les surfaces agricoles (Le Goff et Bonnomet, 2004 ; Boust *et al.*, 1999 ; Bliefert et Perrot, 2003).

Classification des ETM :

Les métaux sont classés en deux catégories sur la base de leur solubilité dans des conditions physiologiques et leur fonction biologique,

- **Les nutriments essentiels (Oligo-éléments métalliques) :**

Tels que le chlore (Cl), fer (Fe), bore (B), manganèse (Mn), sodium (Na), zinc (Zn), cuivre (Cu), nickel (Ni) et molybdène (Mo) nécessaires en petites quantités (quelques mg ou µg par jour), et Ca, Mg, Na, P et S, sont également requis, mais en plus grande quantité (100 mg), pour un fonctionnement optimal des processus biologiques. L'abondance excessive des éléments (Cu, Ni et Zn) est préjudiciable à la majorité des organismes vivants (Nies, 1999).

- **Les éléments toxiques non nutritifs :**

Les métaux tels que le Cd, Hg, Pb, Cr, As, Ag et Sb sont toxiques pour les plantes sous les formes élémentaires ou chimiquement combinées, même à faible concentration et n'ont aucun rôle biologique connu dans les organismes et exercent leur toxicité en compétition avec les métaux essentiels (Stankovic *et al.*, 2014; Furini, 2012).

1.3. Réutilisation des eaux usées en agriculture

1.3.1. Dans le monde

A l'échelle mondiale, l'agriculture reste le secteur le plus consommateur et exigeant en terme d'utilisation de l'eau et ses besoins ne cessent de croître en quantité. La quantité considérable d'eau usée générée chaque année, ainsi que la pénurie de l'eau fraîche causée par l'irrégularité des précipitations dans le temps et dans l'espace, traduit l'ampleur de la réutilisation de cette source non conventionnelle en agriculture dans ces régions. L'utilisation des eaux usées en agriculture n'est pas une pratique qui appartient à un passé proche. Scott *et al.* (2004); Buechler *et Gayathri.* (2006), indiquent que cette dernière est une pratique

ancienne dans le monde entier. Drechsel *et al.* (2011), indiquent que pendant des siècles, les agriculteurs chinois ont utilisé les excréments humains et animaux comme engrais et que, avant l'introduction des technologies de traitement dans plusieurs villes européennes et nord-américaines, les eaux usées étaient évacuées vers les champs agricoles. Les mêmes auteurs signalent que l'utilisation des eaux usées recyclées a subi une croissance au cours des dernières années dans plusieurs pays en Moyen orient, Afrique du nord, la méditerranée, au Etats Unis, l'Amérique latine et l'Australie.

1.3.2. En Algérie

Les ressources en eau de l'Algérie sont limitées, vulnérables et inégalement réparties. Le secteur de l'agriculture est considéré comme le plus gros demandeur en eau. Vu les conditions déficitaires, les eaux usées deviennent une solution permanente pour couvrir cette rareté de l'eau (ONU, 2016). En Algérie, la production d'eau usée en 2012 s'élevait à 820 Mm³ /an et à l'horizon 2020, devrait représenter un volume très substantiel de près de 2 milliards de m³ si la demande en eau est totalement satisfaite, ce qui, une fois traité, serait très apprécié pour son utilisation par l'agriculture ou l'industrie (Ounoki et Achour, 2014). Le réseau d'assainissement en Algérie est bien développé (85% d'adduction). L'effort de réalisation d'assainissement a permis d'améliorer le cadre de vie à l'intérieur des agglomérations, mais il a entraîné une concentration des rejets d'eaux usées dans les exutoires qui les acheminent vers des oueds déjà étouffés par les charges de pollution. Cependant le traitement ne dépasse pas les 4%.

1.3.3. Aspects juridiques

La santé publique et la protection de l'environnement sont les soucis principaux dans les projets de réutilisation de l'eau usée. A cet égard, des mesures de contrôle strictes à la réutilisation sont imposées (Pettygrove and Asano, 1985; OMS, 2008; FAO, 2003). Les agriculteurs doivent agir dans le cadre des règlements juridiques pour préserver la santé publique et l'environnement. La plupart des pays, réutilisant les eaux usées, possèdent des législations sanitaires et environnementales qui organisent le traitement et la réutilisation des eaux usées. Ces règlements, sous formes de directives ou codes de bonnes pratiques, ont pour objet la protection de la santé des consommateurs et des ouvriers (Bazza, 2002 ; FAO, 2003).

Malgré que l'irrigation avec les eaux usées brutes est strictement interdite par la loi, et malgré les normes de qualité des eaux usées destinées à l'irrigation qui ont été établies par chaque pays, l'utilisation de cette eau usée non traitée reste la plus répandue dans les pays en

développement. Hartani (2004), estime que 8% des terres irriguées reçoivent des eaux non traitées, et que la réutilisation après traitement est quasi inexistante. Sou (2009) et Tamrabet (2011), indiquent que l'irrigation avec les eaux usées brutes est la plus répandue dans les pays en sous-développement et Jiménez et Asano (2004), estiment que plus de 20 millions d'hectares de terre agricoles sont irrigués avec les eaux usées brutes. L'obligation de choisir entre la pénurie de l'eau et la réutilisation des eaux usées peut être allégée par une bonne politique de gestion des eaux usées.

Par exemple en Algérie la réutilisation d'eaux usées brutes ou d'eaux usées traitées est rigoureusement interdite par la législation pour l'irrigation des légumes consommés crus, mais elle est autorisée pour l'irrigation des cultures fourragères des pâturages et des arbres (UNEP, 2003).

1.4. Impact de l'irrigation des sols par des eaux contaminées

La composition des eaux usées est très hétérogène. Elles contiennent différents types et niveaux de concentrations en éléments nutritifs et en composants indésirables, cela influence leur qualité qui est en relation avec l'origine de l'eau et le degré de traitement.

La réutilisation des eaux usées en agriculture présente un certain nombre d'avantages et d'inconvénients bien connus :

Parmi les avantages :

- ✓ Selon l'OMS (2013), elle permet de réduire près de 30% des apports d'engrais ;
- ✓ Augmentation des teneurs en azote et carbone organiques dans les cinq à dix premiers centimètres de sol irrigué ;
- ✓ La quantité élevée de matières organiques permet de conserver une minéralisation importante
- ✓ La réduction de la pollution de l'eau de surface en évitant leur déversement sur les oueds (Pekrun *et al.* 2003).

Parmi les inconvénients :

- ✓ Présence de micro-organismes pathogènes dans les eaux usées en particulier lorsque les eaux ne sont pas traitées ou médiocrement traitées.
- ✓ Les eaux usées surtout industrielles peuvent contenir des substances toxiques et des métaux lourds qui finiront par s'accumuler dans le profil du sol.

- ✓ L'excès en éléments nutritifs présente des incidences négatives sur le sol par accumulation dans la zone racinaire.
- ✓ Le problème le plus répandu est la salinité des sols.

1.4.1. Salinisation et sodicités des sols

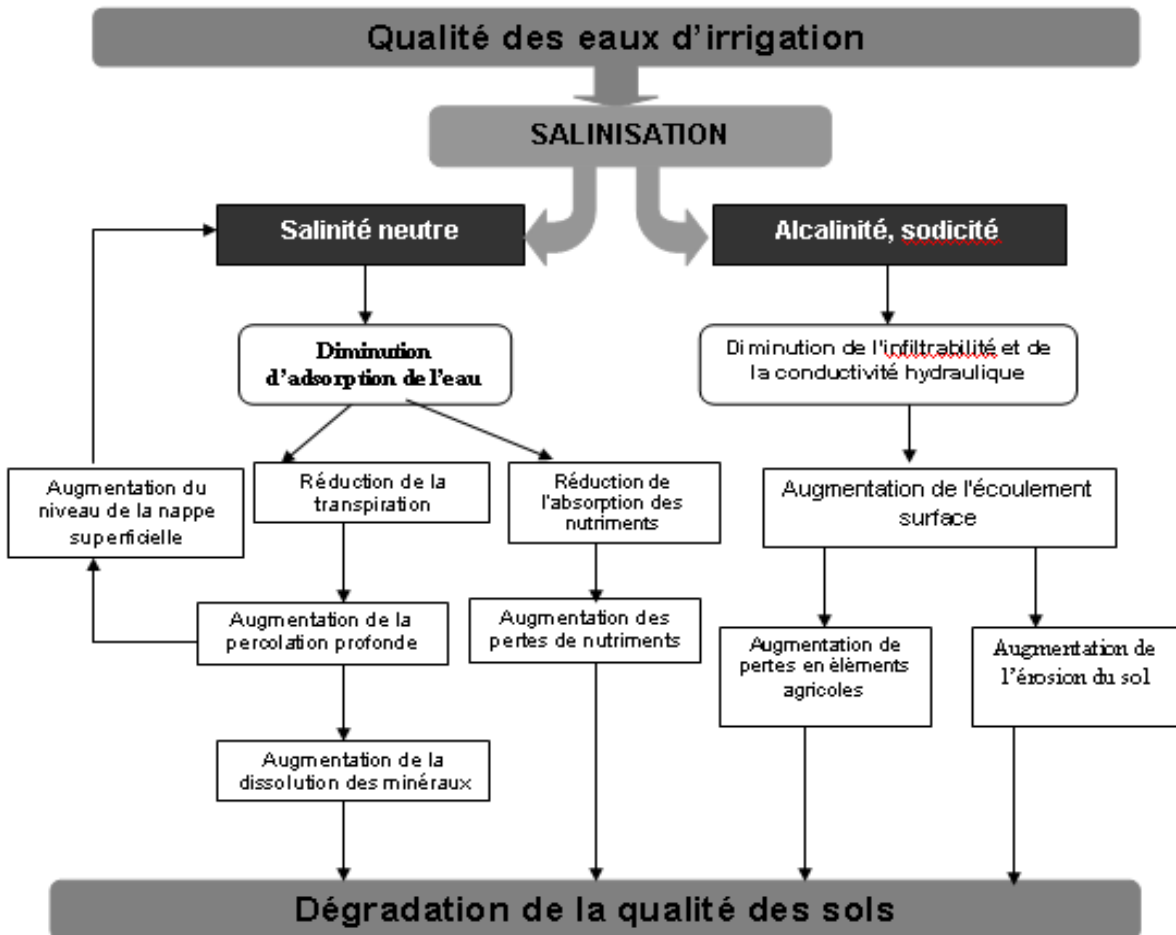


Figure 1 : Processus de dégradation des sols suite à l'irrigation (Lahlou et al, 2003)

La salinisation est le processus majeur de la dégradation des terres. En moyenne, le monde perd 10 hectares de terres cultivables par minute, dont 3 hectares à cause de la salinisation. 10 à 15% des surfaces irriguées souffrent, à des degrés divers, de problèmes de salinisation (Mermoud, 2006). Selon la FAO (2015) au moins 400 millions d'hectares de terre sont touchés par la salinisation et une surface équivalente est gravement menacée à l'échelle du globe. Une bonne partie du phénomène de salinisation se trouve localisé dans les terres arides et semi arides, et cela est dû aux :

- ✓ Températures élevées durant presque toute l'année ;
- ✓ Une forte évaporation d'eau à partir du sol ;
- ✓ La faiblesse des précipitations, qui sont insuffisantes pour lixivier les sels solubles du sol ;

- ✓ La stagnation d'eau en surface dans le cas de sols à mauvais assainissement et drainage ;
- ✓ L'irrigation mal contrôlée (FAO, 2015).

Le degré de salinisation d'une surface irriguée dépend donc de plusieurs facteurs dont :

La qualité de l'eau utilisé en irrigation :

La connaissance de la qualité physico-chimique de ces eaux usées est fondamentale afin de prévoir les éventuels impacts sur le milieu récepteur. Lorsque l'eau est de mauvaise qualité le mode, la dose et la fréquence d'irrigation ont une influence directe sur le processus de salinisation du sol. Ainsi la concentration totale en sels solubles et le rapport de sodium absorbable (SAR) sont dosés systématiquement car une grande quantité d'ions sodium dans l'eau affecte la perméabilité des sols et pose des problèmes d'infiltration (Suarez et al., 2006).

Les caractéristiques du sol :

Ils jouent un rôle primordial dans l'accentuation ou l'atténuation du phénomène.

Les facteurs socio-économiques :

Le savoir-faire des agriculteurs, le capital dont ils disposent et les pratiques culturales influencent largement l'accentuation ou l'atténuation du processus de salinisation selon le niveau de technicité des agriculteurs.

1.4.2. Sur l'agriculture irriguée (perte de production)

Les lieux principaux de la formation de sels solides sont les sols agricoles irrigués et les bassins endoréiques où l'évaporation atteint ou excède l'influx d'eaux continentales (Nordstrom et al., 1989).

L'irrigation avec une eau chargée en sel devrait être pratiquée avec beaucoup de précaution. Toute utilisation de ce type de ressource, qui ne connaît pas un réseau de drainage adéquat et surtout ne prévoit pas un lessivage fréquent des sols irrigués, conduirait à une salinisation progressive et provoquerait une baisse sensible de la productivité agricole et même une perte irréversible de sols fertiles. Il s'agit ici de perte en termes de production, c'est-à-dire que lorsque la salinisation du sol augmente, suite à une irrigation inappropriée avec des eaux chargées, sa productivité baisse. Les divers travaux réalisés par un panel de scientifiques australiens de tout horizon scientifique (pédologues, hydrologistes, hydrogéologues, géophysiciens,) ont permis de constater que le drainage en profondeur de cultures gérées sous irrigation pluviale était considérablement inférieur à celui rencontré dans des cultures irriguées. Mais, le problème réside dans le fait qu'il s'accompagne par un

d déplacement important de masses de sels vers la profondeur du sol qui contaminera à terme les eaux souterraines et superficielles (Foster *et al.*, 2018).

1.4.3. Accumulation des éléments trace métalliques (ETM) dans le sol

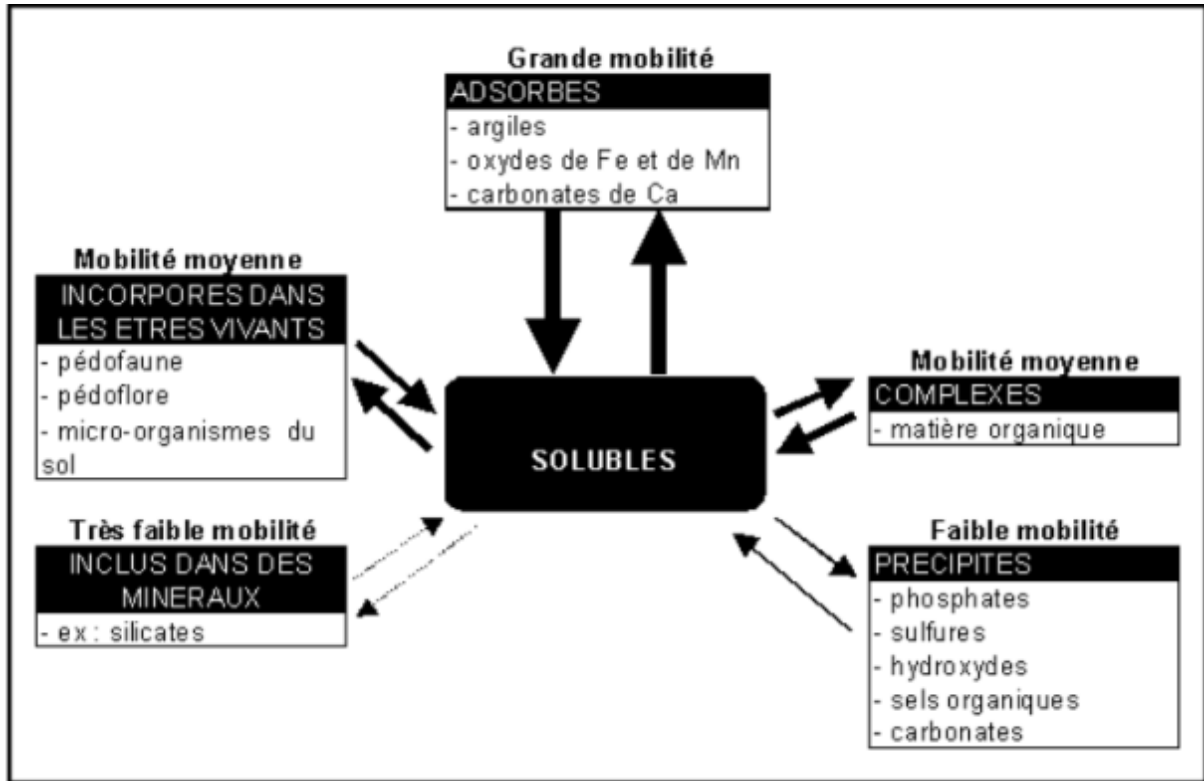


Figure 2. Localisation des ETM dans les sols (Juste, 1988, modifié par Perrono, 1999)

En raison de leur bioaccumulation, leur toxicité et leur nature non biodégradable, les métaux lourds peuvent influencer l'intégrité fonctionnelle et structurelle d'un écosystème (Stankovic et Stankovic, 2013). Les effets toxiques des métaux ainsi que leur comportement au sein d'un milieu (mobilité et biodisponibilité) dépendent en grande partie de leurs concentrations, répartitions (différentes espèces), formes ou phases (solubles et/ou insolubles), capacités à former des complexes et en fonction de leur degré d'oxydation (Boust *et al.*, 1999 ; Stankovic et Stankovic, 2013). Le manque ou excès sont deux formes de toxicité provoquée par les métaux.

Les éléments traces sont plus ou moins prélevés par les plantes et peuvent potentiellement poser des problèmes de sécurité des produits agricoles destinés à l'alimentation humaine et animale (Addad *et al.*, 2017). Les métaux lourds associés à la phase aqueuse des sols peuvent être transportés au travers de la zone non saturée vers la nappe d'eau souterraine.

Bien que la concentration en métaux dans les eaux usées soit faible, l'irrigation à long

terme, entraîné l'accumulation de ces éléments dans le sol (Rattan *et al.*, 2005). En effet, la rétention, par le sol, des éléments métalliques est gouvernée par divers phénomènes d'ordre mécanique, physico-chimique et même biologique. L'accumulation d'éléments métalliques (EM) suite à l'irrigation avec des eaux usées brutes est souvent constatée. Le problème principal avec les métaux lourds comme le plomb, le cadmium, le cuivre et le mercure est qu'ils ne peuvent pas être biodégradés, et donc persistent pendant de longues périodes dans les sols (Mapanda *et al.*, 2005).

Chapitre 2

Présentation du site d'étude

2.1. Présentation de la région d'étude

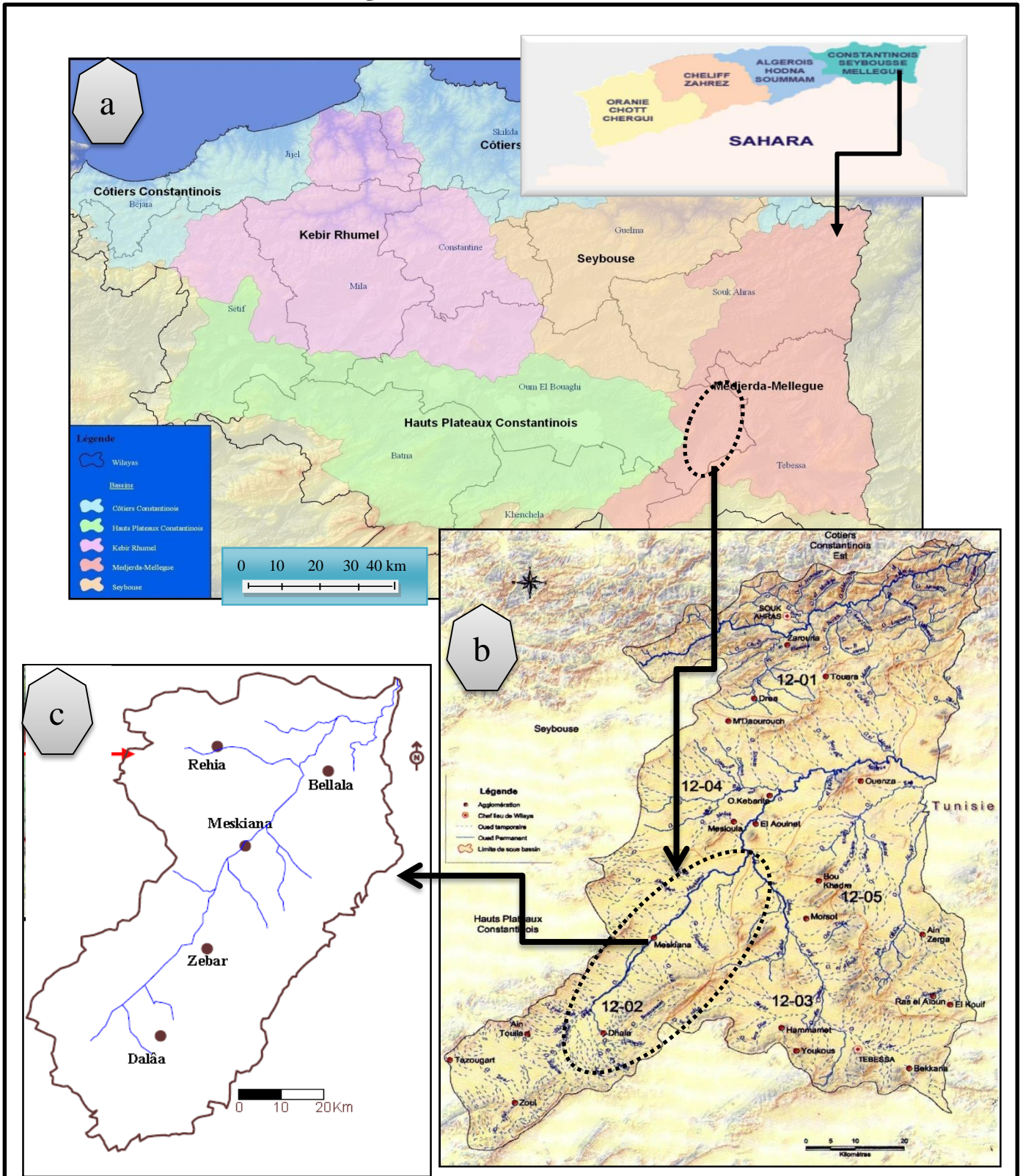


Figure 3. a. Situation géographique de l'unité hydrographique du Constantinois-Seybousse-Mellegue, b. bassin versant de la Medjerda-Mellegue, c. Dessin à main levée du sous bassin versant oued Meskiana (ABH-CSM, 2009 ; Gouaidia, 2009)

Notre étude fut réalisée au niveau de la région ou l'unité hydrographique du **Constantinois-Seybousse-Mellegue (C.S.M)**, qui est située dans la partie Nord-Est algérienne. Limitée au Nord par la mer Méditerranée, à l'Ouest par la région hydrographique de l'Algérois-Hodna-Soumam, à l'Est par la frontière tunisienne, et au Sud par le bassin hydrographique du Sahara.

Cette unité hydrographique, englobe 5 grands bassins versants parmi eux **le bassin versant de la Medjerda-Mellegue** avec 7942 km², concerné par notre étude. Sa partie Algérienne est d'une superficie de 7840 km², il couvre cinq (05) wilayas (Guelma ; Khenchela ; **Oum El Boueghi** ; Souk- Ahras ; Tebessa) et cinquante-deux (52) communes.

Le bassin versant de la Medjerda-Mellegue est reparti en cinq sous bassins versant identifiés par des codes. Il présente un chevelu hydrographique très ramifié dense et hiérarchisé représenté par 47 oueds (ABH-CSM, 2009) (Fig.3).

Sous le code 12 02 **le sous bassin d'Oued Meskiana** s'étend sur une superficie de 1680km², à 80 km de la frontière Algéro-tunisienne, et à 65km du chef-lieu de la wilaya (Oum El Bouaghi). Il se situe à mi-chemin entre la méditerranée et le Sahara algérien.

Plusieurs agglomérations y siègent, à savoir Bellala, Dhalaa, Meskiana, Rehia, zebbar (ABH-CSM, 2005). Il est traversé par un seul cours d'eau principal, qui est Oued Meskiana concerné par notre étude sous le code (12-02) (Fig.3). Il est considéré comme un collecteur des eaux de ruissellement qui affluent sur ses deux rives (Gouaidia et *al.*, 2013).

Les limites géographiques du sous bassin d'Oued Meskiana sont présentées comme suit :

- Limite Nord : Djebel Mesloula, Argoub El Mnachir et Djebel khannaga.
- Limite Nord-est : Djebel belkfif.
- Limite Nord-ouest : Djebel chettaya, Djebel Bou Thokhma, Djebel Ahmar.
- Limite Sud-est : Djebel Gouriguer, Djebel Es Stih, Djebel khemalal.
- Limite Sud-ouest : Djebel Boutoukhma, chott Esbikha.

La délimitation du sous bassin est réalisée à partir des cartes topographiques au 1/50000 (Dhalaa feuille n^o204, Meskiana feuille n^o177, Youkous Les Bains feuille n^o205 et F'kirina feuille n^o176) en plus des images satellite prise par Google MAP (fig.3).

Oued Meskiana fait partie de ce sous bassin sa majorité est sur la carte de Meskiana feuille n°177, il mentionne dans sa partie avale les sites concernés par notre étude.

2.2. Présentation d'Oued Meskiana

Oued Meskiana couvre une superficie de 465.6km², avec une longueur de 53.80Km et les coordonnées suivantes : - Latitude : 35,51' Nord et 35,13' Nord.

- Longitude : 7,50' Est et 7,14' Est. (Fig.4).

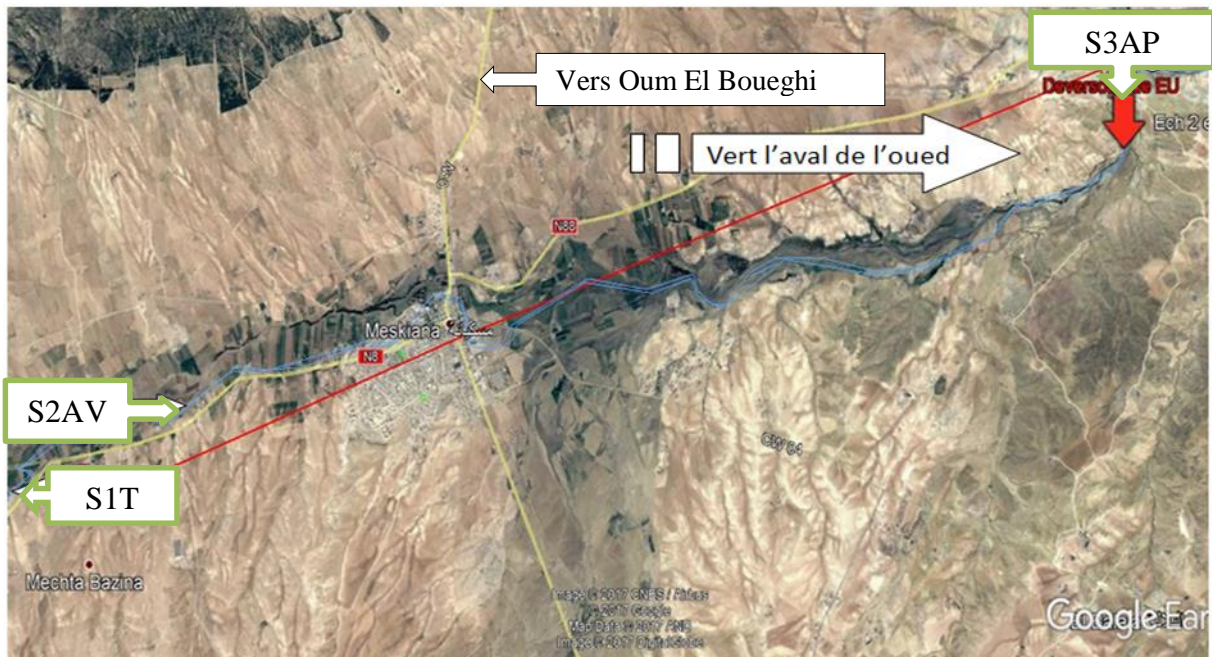


Figure 4. Image satellite d'Oued Meskiana. (Source : Google MAP, 2017).

Ses eaux représentent une source fondamentale de vie dans la région, elles sont utilisées à des fins domestiques, industrielles, et agricoles.

Oued Meskiana, dont la partie la plus large se trouve au niveau de la Daira de Meskiana, cette dernière s'étend sur un territoire de 196 km².

La population totale de la daïra est estimée suivant les dernières mises à jour de 2010 à environ 31 milles habitants dont la plupart se trouve au niveau du chef-lieu avec une densité de 152 Habitants/km².

La vocation de la région est agropastorale où on trouve une superficie agricole utile d'environ 13656 hectares, avec des cultures céréalières, maraichères, fourragères, et l'arboriculture. On trouve aussi l'élevage des vaches, des moutons, et des chèvres. Ces

dernières années, le secteur de l'agriculture et de l'élevage a connu un épanouissement important suite au lancement des programmes de PNAD an 2000 et celui de FNERDA en 2001. Ces programmes ont provoqué l'extension des terres irriguées et multiplié les cycles culturaux (Gouaidia, 2008).

Pour l'industrie Les agglomérations n'ont été dotées d'aucune infrastructure industrielle, à l'exception d'une usine de laine et textile actuellement à l'arrêt.

Pour la géologie du site, les travaux réalisés sur le bassin de Meskiana ont montré qu'il s'agit des terrains sédimentaires autochtones Nord-Auréliens qui se trouvent dans la partie orientale des hautes plaines constantinoises. Ces formations sont constituées selon KUSCER (1985) de:

- Terrains anciens représentés par le trias à faciès lagunaire, apparaissant en diapirs ;
- Très importantes assises d'âge crétacé (Aptien et Maestrichtien) formées de marnes et de calcaires ;
- Des grès et des calcaires gréseux marins formant la base du Miocène ;
- Divers recouvrements continentaux représentant le Mio-Plio-Quaternaire.

Pour décrire la lithologie des formations deux grands ensembles représentent la lithostratigraphie du bassin de Meskiana :

- Le premier est constitué essentiellement par les formations crétacées et tertiaires qui affleurent dans les bordures ;
- Le second est formé, en général, par un recouvrement Mio-Plio-Quaternaire qui se dépose dans la plaine.

Ces deux ensembles constituent une série stratigraphique complète (Gouaidia, 2011).

Les sols de notre site d'étude et comme tous sols de région à climat semi-aride sont caractérisés en général par :

- la présence d'accumulation calcaire réduisant la profondeur de sol utile ;
- la faible teneur en matière organique et en éléments biogènes ;
- une forte sensibilité à l'érosion (M.A.T.E, 2005).

Parmi les sols les plus rencontrés on y trouve : Le sol squelettique, sol argileux calcaire, sol brun forestier (Conservation des forêts O.E.B).



Figure 5. Photos de la zone d'étude (photo personnel, Avril 2015).

2.3. Etude climatique

Le climat de la région de la plaine de Meskiana qui abrite notre site d'étude est du type continental, froid en hiver, chaud et sec en été. Le climat est sans doute le facteur du milieu le plus important qui influe d'une manière directe sur le développement des micro-organismes (Températures, précipitations), et sur les réactions chimiques entre les éléments se trouvant dans un milieu aquatique.

↳ Les données météorologiques de la région d'étude

Tableau 1. Moyenne des données climatiques de la station météo d'Oum El Bouaghi pour la période de 1990 à 2015.

	T °moyenne (c °)			Précipitation (mm) moyenne mensuelle	Humidité relative (%) Moyenne mensuelle
	Mini	Max	Moy		
Janvier	1.45	11.67	6,56	36.27	78
Février	1.72	12.94	7,33	25.94	70
Mars	3.97	16.10	10,04	31.66	68
Avril	6.66	19.30	12,98	31.38	67
Mai	10.78	24.86	17,82	43.06	61
Juin	14.99	30.89	22,94	22.19	52
Juillet	17.67	34.71	26,19	10.52	45
Août	17.77	33.93	25,85	24.57	49
Septembre	14.59	28.60	21,60	36.47	62
Octobre	10.80	23.70	17,25	23.40	63
Novembre	5.48	16.81	11,15	32.63	72
Décembre	2.78	11.65	7,22	43.36	78

(Source : station météorologique (ONM) d'Oum El Bouaghi)

↳ La température

Le tableau 1 montre que durant la période 1990-2015, le mois le plus froid était Janvier avec une valeur minimale de 1.45, et les températures maximales absolues ont pu atteindre jusqu'à 39°C (enregistré pendant le mois de juillet 2011), donc Juillet est le mois le plus chaud avec une température maximale de 34.71 °C.

↳ La pluviométrie

La précipitation annuelle dans la région d'étude équivaut à 361.45 mm. Ainsi les mois de Décembre et Mai sont les plus pluvieux avec une pluviométrie moyenne de 43.36 mm et 43.06 mm, et le mois de Juillet est le plus sec avec une précipitation moyenne de 10.52 mm.

↳ L'humidité relative de l'air

L'humidité relative compare la quantité d'eau présente dans l'air à la quantité qu'il faudrait pour saturer cet air à une température donnée. D'une façon générale, on considère qu'un air est sec quand son humidité relative est inférieure à 35% et qu'il est humide quand celle-ci est supérieure à 70%. Les moyennes d'humidités relatives mensuelles (1990-2015) varient entre 45% (juillet) et 78% (Décembre et Janvier) (Tab.1)

2.4. Synth èse climatique

↳ Indice ombrothermique de Gaussen et Bagnouls (1952)

Nous permet de mettre en évidence la période sèche de notre zone d'étude. Il est tracé avec deux axes d'ordonnées où les valeurs de la pluviométrie sont portées à une échelle double de celle des températures (Bagnouls et Gaussen, 1957). La saison sèche apparaît lorsque la courbe des précipitations rencontre et passe sous celle des températures.

En se basant sur les données météorologiques de la station d'étude pour la période 1995-2015 (Tab.1.), le diagramme ombrothermique met clairement en évidence la période sèche (PS) qui s'étale sur les mois de Juin- Juillet et Aout. Le mois d'octobre est ainsi considéré comme mois sec au niveau de la station d'étude ce qui élargit sa période sèche (Fig.6).

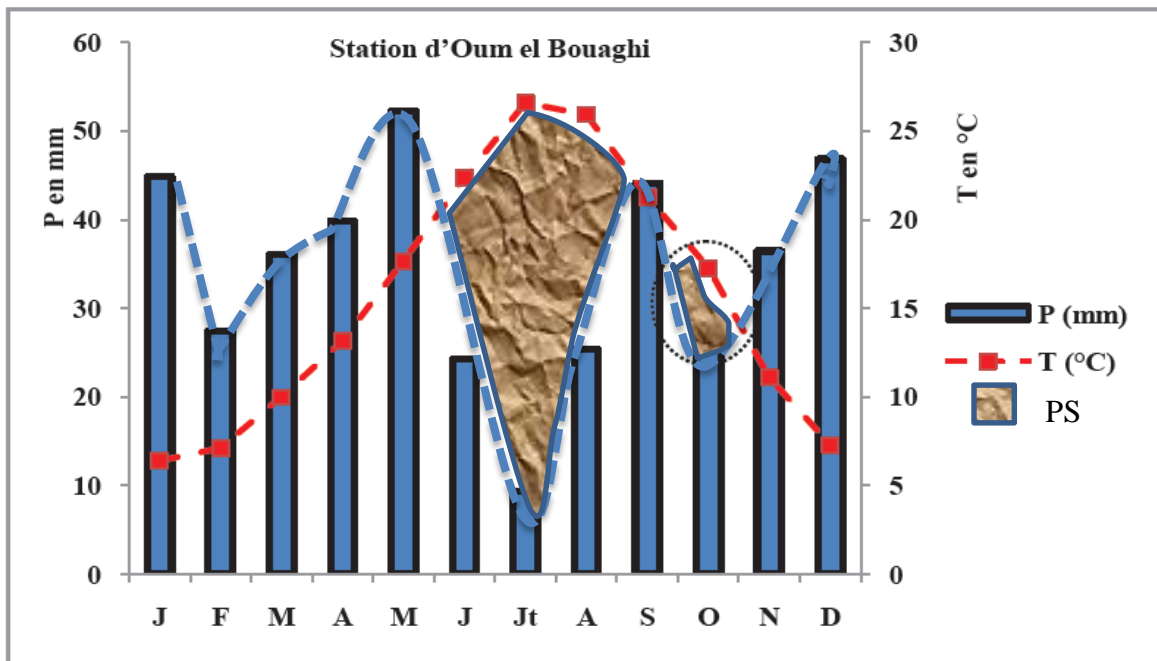


Figure 6. Diagrammes Ombrothermiques selon les données moyennes de la période 1990-2015.

↳ **Indice pluviométrique d'Emberger (Les étages bioclimatiques)**

L'indice pluviométrique d'Emberger nous aide à définir les cinq étages de climat méditerranéen du plus aride jusqu'à celui de haute montagne (Emberger, 1955). Son principe se base sur le régime des précipitations et des températures qui s'exprime selon la formule suivante:

$$Q_2 = \frac{1\,000 \cdot P}{\left[\frac{M + m}{2} \right] (M - m)}$$

Q₂= Quotient pluviométrique d'EMBERGER.

P= Précipitation annuelle moyenne (mm).

M= Température des maxima du mois le plus chaud (°K).

m= Température des minima du mois le plus froid (°K).

Le quotient pluviométrique d'Emberger indique que la Vallée de Meskiana appartient à l'étage bioclimatique de végétation semi-aride à hiver frais car $Q_2 = 37.18$ avec une valeur des minima du mois le plus froid de 1.34 C° (Fig.7).

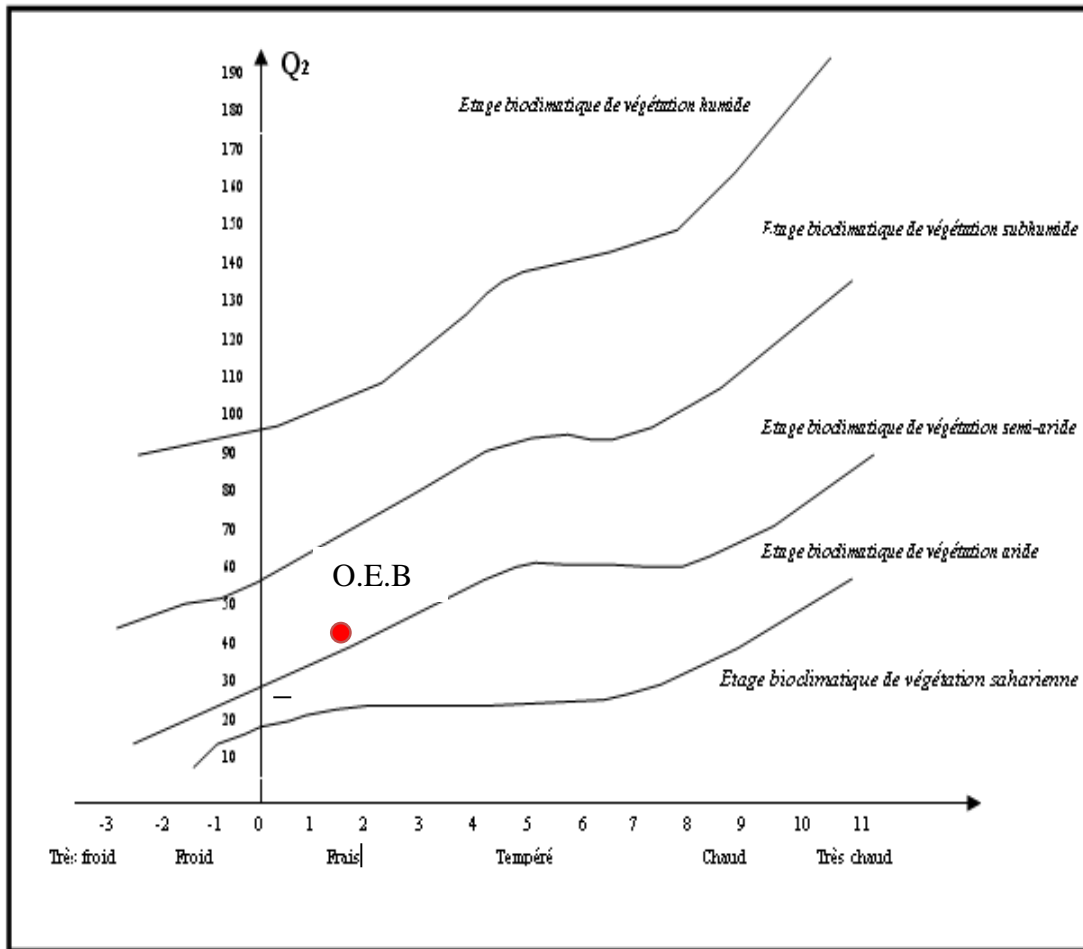


Figure 7. Situation de la station météorologique de la wilaya d'Oum El Boueghi dans le climagramme d'Emberger.

2.5. Cadre biotique

La végétation est un facteur déterminant de la rapidité du ruissellement superficiel, du taux d'évaporation et de la capacité de rétention du bassin. Donc la présence de la végétation va jouer le rôle de régulateur dans le régime d'écoulement. La résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense (Dib et *al.*, 2017). Le paysage végétal du bassin a été largement dégradé et défriché par une agriculture extensive et le surpâturage endémique ce qui a entraîné une perte d'eau par évaporation et une accélération de l'érosion.

Selon la conservation des forêts d'Oum El boughi, il y a eu le recensement de plusieurs espèces animal qui occupe le site d'étude et ses environs comme lieu de reproduction et de croissance (Conservation des forêts d'Oum el Boughi, 2011)

2.6. Exploitation de site

2.6.1. L'agriculture et l'irrigation

Les terres qui entourent l'oued sont exploitées par les agriculteurs pour la culture maraîchère diverse.

L'eau de l'oued est souvent utilisée pour irriguer les cultures.

2.6.2. Le pâturage

Le cheptel (bovins, ovins, et caprins) de la région de oued Meskiana s'abreuvent en partie amont. Ainsi, durant nos sorties, nous avons observé que les bergers ramènent leur cheptel sur les berges de l'oued.

2.6.3. Le déversement des eaux usées

La ville de Meskiana est dotée d'un réseau d'assainissement d'une longueur de 68,074 km avec un collecteur principal d'un diamètre de 1500 mm sur 2 km. 5368 logements qui abritent près de 23641 habitants sont raccordés à ce réseau avec un taux de raccordement de 90 % (ABH-CSM, 2005).

On peut estimer le volume des eaux usées rejetées dans l'oued en se basant sur la dotation domestique moyenne nette fixée par CNES, (2000) de l'ordre de 55 litres par habitant par jour, sur la base des prévisions théoriques de consommation d'eau potable et compte tenu du coefficient de retour à l'égout de 0.8. La ville de Mèskiana présente une dotation domestique de 1300 m³/j et une production de 1040 m³/j d'eaux usées qui se rassemblent dans le réseau d'assainissement, et vu que la région ne dispose pas de station d'épuration, le collecteur principal est dirigé vers la partie aval d'oued Meskiana, où cette quantité d'eaux sale est déversée directement et mélangée à l'eau courante de l'oued.

Chapitre 3

Matériel Et Méthodes

3.1. Caractéristiques des points de prélèvement

Pour contribuer à l'évaluation du degré de pollution des eaux de notre site d'étude, qui est probablement dû aux différentes activités et comportements, ainsi que l'impact de l'irrigation des terres agricoles à partir de cette dernière; nous avons choisis trois points de prélèvements au niveau d'Oued Meskiana (Fig.8). Nous nous sommes intéressés par la détermination de la qualité physico-chimique de l'eau et du sol durant le mois d'avril 2015.

Les tableaux 2 et 3 résument les caractéristiques des points de prélèvement. Ils sont le résumé des fiches techniques réalisées selon (Clément et Pieltain, 1998) et cela auprès des personnes qui exploitent les sites étudiés (Fig. 9).

Tableau 2. Caractéristiques des sites de prélèvement d'eaux.

Point de prélèvement	Site 1(S1T)	Site 2(S2AV)	Site 3 (S3AP)
Cordonne géographique sur carte	N : 36°35'46.0" E : 7°32'31.3" Altitude : 840 m	N : 35°37'04.28" E : 7°39'5.22" Altitude : 838 m	N : 35°38'42.52" E : 7°40'42.41" Altitude : 807 m
Emplacement	Amont de l'oued	Amont de l'oued	Avale de l'oued
Type d'eau	Eau naturelle de surface près d'une retenue collinaire.	Eau naturelle de surface	Eau naturelle de surface + eaux usées (200 m du déversement)
La flore à proximité des points de prélèvement	- Végétations instance (Vgtx rupicoles, herbacées). - <i>Eucalyptus</i> Sp,	-Végétations moyenne (Vgtx rupicoles, herbacées, halfa ...etc.).	Végétation instance (vgtx rupicoles, herbacées halfa...etc.)
Entourage des sites	-Habitation (ferme) -Terrains nus -Zone steppique.	-Terre agricole	-Terre agricole
Activités et usage du site	- pâturage -irrigation des cultures maraichères (légumes) -air de loisir.	- irrigation des cultures maraichères (Persil, carotte, salade...) - pâturage	- irrigation des cultures maraichères (Persil, carotte, salade...) -pâturage
Débit	Eau stagnante	Eau courante	Eau courante
Couleur	Claire	Légèrement trouble (couleur verdâtre)	Très trouble (couleur très foncée)
Odeur	Sans odeur	Sans odeur	Odeur très forte

Tableau 3. Caractéristiques des sites de prélèvement des échantillons de sol.

Point de prélèvement	Site 1(S1T)	Site 2(S2AV)	Site 3 (S3AP)
Cordonnées géographiques sur carte	N : 36°35'46.0" E : 7°32'31.3" Altitude : 840 m	N : 35°37'04.28" E : 7°39'5.22" Altitude : 838 m	N : 35°38'42.52" E : 7°40'42.41" Altitude : 807 m
Superficie	Surface non définie	9000 m ³	4200 m ³
Appellation du site	Retenu collier	Machtat Bazina	Ouled Barouche
Emplacement	A proximité d'une retenue collinaire (Amont de l'oued)	A proximité du coure d'eau (Amant de l'oued)	A proximité du coure d'eau (Aval de l'oued)
Type de sol	Sol non cultivé	Sol agricole	Sol agricole
Type de culture réalisés sur le site	Aucun	Culture maraîcher (Persil, carotte, salade, Menthe...).	Culture maraîcher (Persil, carotte, salade, navée...).
Entourage des sites	- Oued courant - Habitation (ferme) - Terrains nus - Zone steppique.	- Oued courant - Terrains nus - Zone steppique.	- Oued courant - Terrains nus - Zone steppique.
Culture actuelle	Plante sauvage	Persil	Cerfeuil
Parcelle labourée	Non	Oui	Oui
Profondeur de labourage	Aucune	25 à 30 cm	25 à 30 cm
Difficulté à travailler	Non exploité	Difficile (dure)	Facile
Pente de surface	Non	Oui	Oui
Irrigation	Non irrigue	1 fois / semaine	1 fois / semaine
Mode d'irrigation	Aucun	Pompage à partir de l'oued	Pompage à partir de l'oued
Fertilisant utilisé	Aucun	Aucun	Aucun

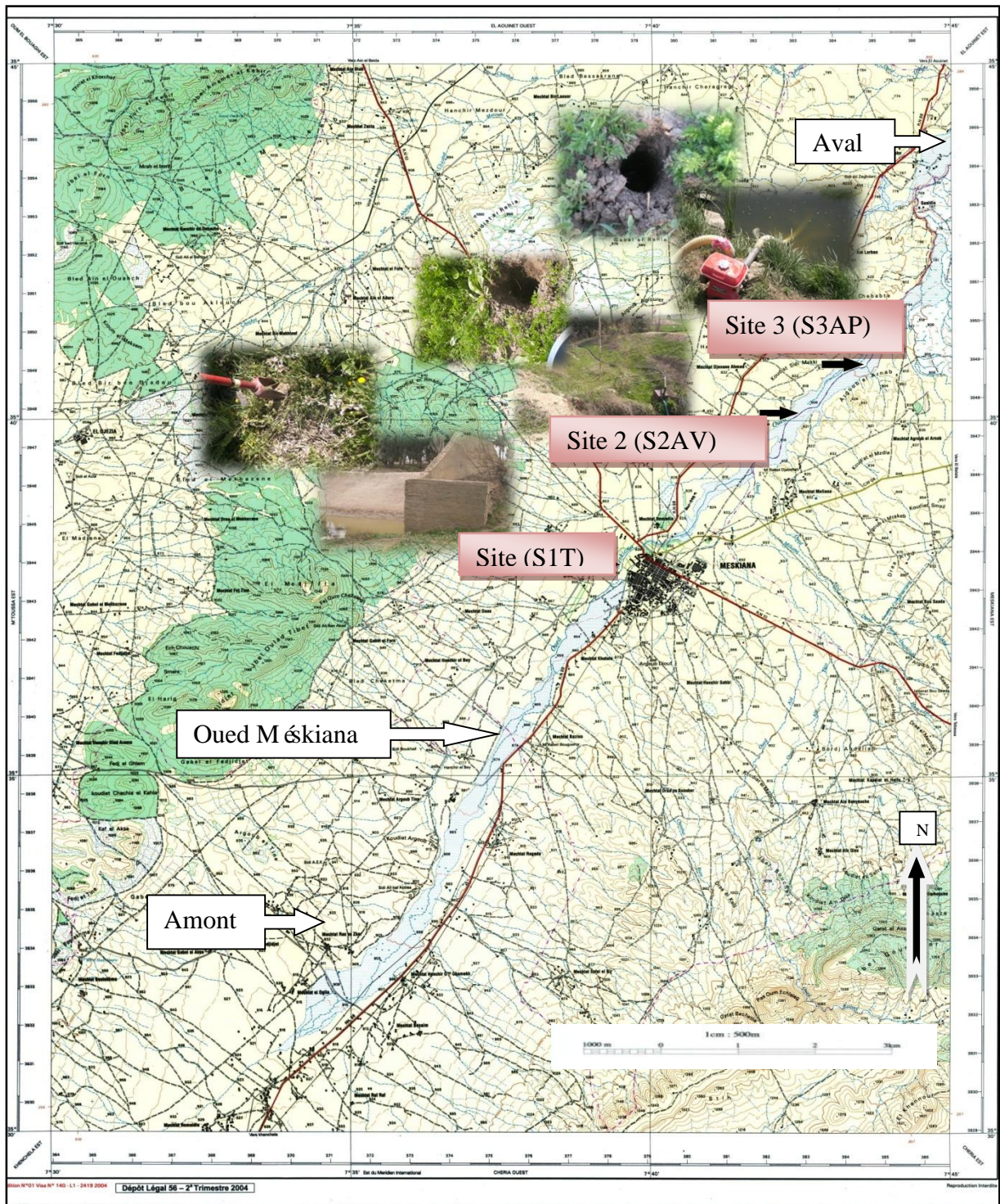


Figure 8. Carte topographique de Meskiana avec les points de prélèvements.

(Source : Institut National De Cartographie Et De Télédétection, 2004)

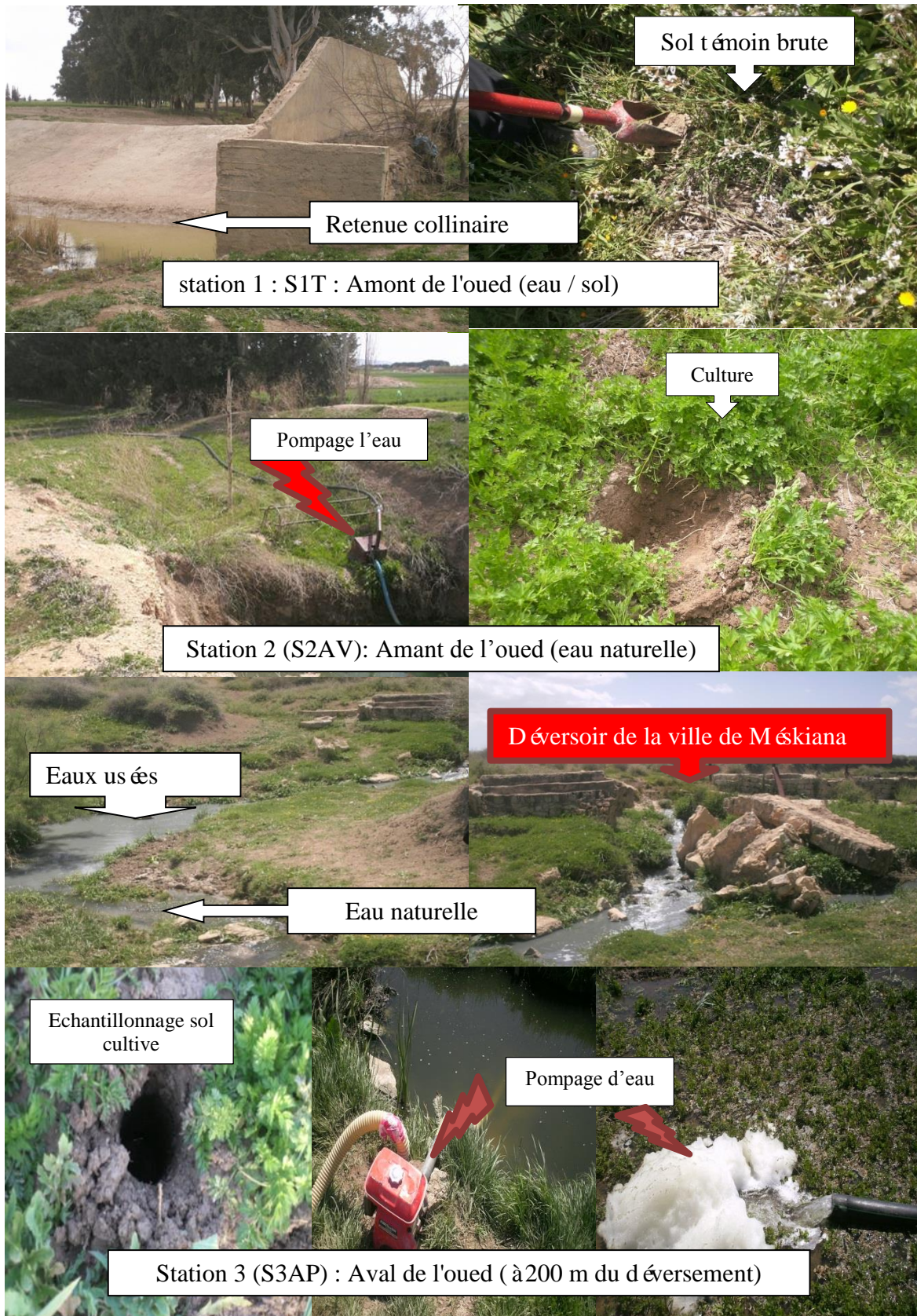


Figure 8. Photos des trois stations de pr é l è v e m e n t (prise pendant la période d'étude par Zidi Anissa).

3.2. L'échantillonnage

La qualité du rapport final rédigé sera influencée par la qualité de l'échantillon prélevé par une méthode systématique aléatoire, et soumis à l'analyse.

3.2.1. L'eau

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté, il conditionne les résultats analytiques et l'interprétation qui en sera donnée. L'objectif est d'obtenir un échantillon aussi représentatif que possible sans contamination, ni modification (Rodier, 2009 ; Rejsek, 2002).

Pour l'analyse physico-chimique des flacons en plastiques clairement étiquetés, et transportés à une température de 4 °C sont suffisants, le mode de prélèvement variera suivant l'origine de l'eau (Rodier, 2009). L'analyse physico-chimique doit être réalisée avant les 24 heures où en prenant des dispositions pour la conservation des prélèvements.

3.2.2. Le sol

Les échantillons sont prélevés sur trois profondeurs différentes, 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm. Cette profondeur représente la profondeur de la majorité des racines des produits cultivés et qui représentent aussi la couche humi-organique dans laquelle, se manifeste généralement une activité biologique élevée à cause de l'effet rhizosphérique important sur le plan édaphique.

Selon Clément Mathieu 1998 les échantillons ont été prélevés comme suit :

- ⇒ Manière systématique à la tarière.
- ⇒ Trois répétitions pour chaque prélèvement.
- ⇒ La zone de prélèvement est identifiée et limitée, elle est ensuite divisée en 5 prélèvements par station, en diagonale.
- ⇒ Chaque unité de prélèvement est de 200 à 300 g de terre.
- ⇒ Les différents prélèvements sont réunis, et étalés pour écarter les éléments grossiers (cailloux, feuilles, racines, coquilles d'escargots, etc).
- ⇒ Séchage effectué à l'air, en couche mince, à la température ambiante et à l'abri de la lumière directe du soleil, tout en remuant journallement la terre (Afnor, 1996).
- ⇒ Le passage de l'échantillon total prélevé, à l'échantillon réduit, est réalisé par quartage (L'échantillon est divisé en quatre parties égales dont on ne retient que la moitié en réunissant deux quarts opposés) (Pauwels et al., 1992).

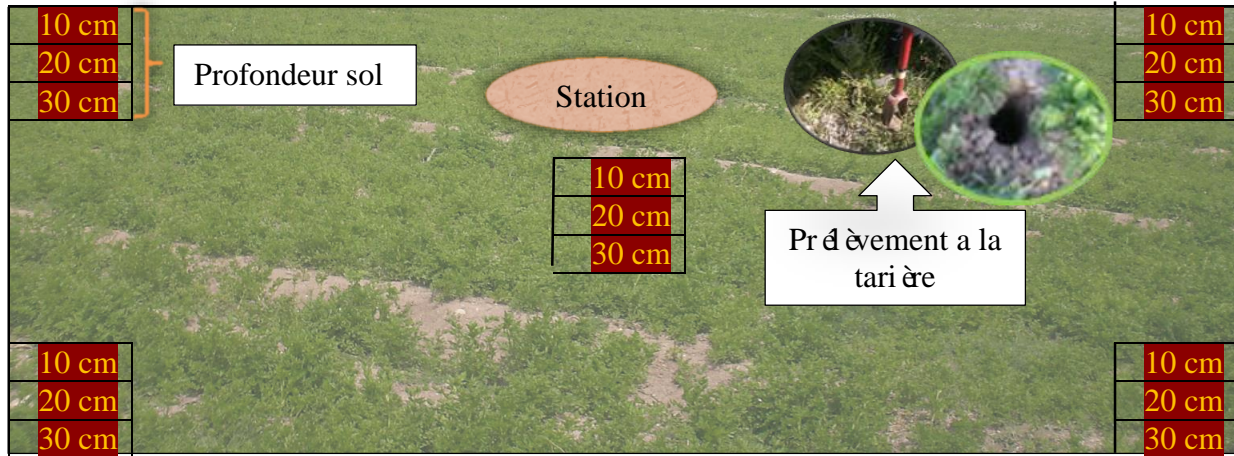


Figure 9. Illustration pour la méthode d'échantillonnage des sols

3.3. Méthode et matériel pour la réalisation des analyses

Les principaux paramètres physico-chimiques et ETM ont été réalisés selon des méthodes standards d'analyse. L'ensemble des expériences de laboratoire a été réalisé à température ambiante: $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Les solutions ont été préparées avec de l'eau distillée. Les réactifs utilisés sont de qualité analytique compatible avec les protocoles. L'ensemble du matériel (verrerie, flacons en polyéthylène...) est systématiquement décontaminé au moyen d'acide nitrique à 10 % pendant 48 h puis rincé à l'eau bi distillée, afin d'éviter toute contamination. De plus, pour chaque expérimentation, l'ajout de blancs (réactifs sans échantillon) a été systématique afin de vérifier l'absence de contamination.

3.3.1. Caractérisation physico-chimique des eaux

D'après leur origine, la composition des eaux naturelles exposées à une source de pollution est très variable. Elles peuvent englober de nombreuses substances, sous forme solide ou dissoute. Pour évaluer la pollution d'une eau usée, une caractérisation d'un certain nombre de paramètres physico-chimique est vivement recommandée. On considère en effet que les caractéristiques de l'eau polluées varient suivant les habitudes alimentaires, le niveau de vie, le mode d'habitat (urbain ou rural) et la densité de population et le climat (Rodier et al, 2009). Les méthodes de mesures effectuées sont représentées dans le tableau 4.

Tableau 4. Méthodes d'Analyses physico chimiques des eaux.

Paramètre	Type de Méthode	Référence	Laboratoire
couleur apparente	examen visuel	(Rejsek, 2002)	Sur terrain
température, pH, CE, Oxygène dissous	consort C: 535	/	sur terrain
Sulfate (SO ₄ ²⁻)	Néphélométrique à 650 nm	Rodier et al. (2009)	Laboratoire : Ressources Naturelles et Aménagement des Milieux Sensibles (RNAMS) à université d'Oum El Bouaghi
Ammonium (NH ₄ ⁺)	Nessler Spectrophotométrie à longueur d'onde 420	(Rejsek, 2002)	
Nitrate (NO ₃ ⁻)	Aux salicylates de sodium Spectrophotométrie à longueur d'onde 415	Rodier et al. (2009)	
Nitrite (NO ₂ ⁻)	Aux diazotation Spectrophotométrie à longueur d'onde 520	Rodier et al. (2009)	
Alcalinité (HCO ₃ ⁻)	Titrimétrie	Rodier et al. (2009)	
Chlorure (Cl ⁻)	Méthode de Mohr	Rodier et al. (2009)	
Dureté (TH) Calcium (Ca ²⁺) Magnésium (Mg ²⁺)	Méthode complexométrique dosage par EDTA en présence d'un indicateur coloré : murexide	Rodier et al. (2009)	
Phosphates (P ₂ O ₅)	Spectrométrie d'absorption moléculaire à 700 nm	Rodier et al. (2009)	
Sodium (Na) et Potassium (K)	Spectrométrie à flamme	Rodier et al. (2009)	
ETM Fer, Cu, Zn, Cd, Pb	Extraction à l'eau régale dosé par spectrophotométrie à absorption atomique	Rodier et al. (2009)	

3.3.2. Caractérisation des sols

Les méthodes de mesures effectuées sont représentées dans le tableau 5.

Tableau 5. Méthodes d'Analyses chimiques des sols.

Paramètre	Type de Méthode	Référence	Laboratoire
La granulométrie	Par sédimentation	(Clément et Pieltain, 1998)	
Calcaire total (CaCO ₃)	Au Calcimètre	(Clément et Pieltain, 2003)	
pH, CE	Pâte saturée*** : Multi paramétré (consort C: 535)	(Clément et Pieltain, 2003)	
Sulfate (SO ₄ ²⁻)	Extrait de pâte*** saturé: Néphélométrique à 650 nm	(Clément et Pieltain, 2003)	
Chlorure (Cl ⁻)	Méthode de Mohr sur extrait de pâte saturée***	(Clément et Pieltain, 2003)	
Alcalinité (HCO ₃)	Titrimétrie sur extrait de pâte saturée***	(Clément et Pieltain, 2003)	
Capacité d'Echange Cationique (CEC)	selon l'équation : CEC = 0.33*argil%+1.6MO(%) + 2.21.	Etabli par INSID**, OEB.	
Phosphore assimilable (P ₂ O ₅)	Méthode OLSEN Spectrométrie à 700 nm	(Soukeur, 2011)	
Matière Organique (MO%)	Méthode Walkey et Black	MO=COT% x 1,724	
Azote total (N% °)	Méthode Kjeldal	Protocole CRBTc	CRBTc
ETM Zn, Cd, Pb	Extraction à l'eau régale (CRBTc)* et dosée par Spectrophotométrie à Absorption Atomique.	(Clément et Pieltain, 2003)	Laboratoire de pollution et traitement des eaux, Université de Constantine 1.

*CRBTc : Centre de Recherche en BioTechnologie Constantine.

**INSID : Laboratoire de l'Institut National des Sols, d'Irrigation et de Drainage, Oum El Bouaghi.

***Une pâte saturée (sol/eau) a été préparée selon la méthode sites par Clément et Pieltain, 2003, un extrait de cette pâte est récupéré par centrifugation et fait l'objet de plusieurs dosages.

3.4. Traitement des données

3.4.1. Evaluation de la qualité de l'eau d'irrigation et des sols analysés

La méthodologie qu'on a suivie est basée sur la comparaison de nos résultats avec une série de directives, valeurs « guides », indices de qualité, diagrammes...ect (ANNEXE 1 et 2), qui a pour objectifs de prévenir et de résoudre les problèmes d'ordre général rencontrés en irrigation en matière de salinité, de perméabilité, de sodicité et de toxicité spécifique par certains ions.

3.4.1.1. Législation, directives et norme nationale et internationale

International :

- ✓ 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., 2013).
- ✓ Directives de la FAO pour l'irrigation avec les eaux usées traitées (FAO, 2003).
- ✓ Directive de la FAO pour normalisées sols agricoles (FAO, 2005, 2015)

National :

- ✓ Journal Officiel De La République Algérienne N° 19 juin 2011. Décret exécutif N° 11-219 du 10 Rajab 1432 correspondant au 12 juin 2011 fixant les objectifs de qualité des eaux superficielles et souterraines (J.O.N° 34, 2011). (ANNEXE 1)

Norme :

- ✓ Plusieurs normes nationales et internationales ont été utilisées afin de comparer nos résultats, et les classer selon l'aspect qualitatif (ANNEXE 1 et 2).

3.4.1.2. Indices de la qualité de l'eau

Plusieurs méthodes sont disponibles pour garantir la qualité de l'eau utilisé pour l'irrigation dont les indices de qualité de l'eau comme :

- Pourcentage du sodium (Na%) :

La concentration élevée de sodium a un effet profond sur la croissance des plantes. Il est calculé à partir de la formule (1) comme indiqué ci-dessous, les résultats sont représentés sur diagramme (Wilcox, 1948):

$$\text{Na\%} = (\text{Na}^+ + \text{K}^+) \times 100 / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K}^+) \quad (1)$$

Ou les concentrations ioniques sont exprimées en milliéquivalents par litre (még/L)

- Sodium adsorption ratio (SAR) :

Il est calculé à partir de la formule (2) ci-dessous, les résultats sont représentés sur diagramme (Richards, 1954) :

$$\text{SAR} = \text{Na}^+ / ((\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}) / 2)^{0.5} \quad (2)$$

Ou les concentrations ioniques sont exprimées en milliéquivalents par litre (még/L).

➤ **Magnésium Hazard (MH) :**

MH est calculé par la formule (3) :

$$MH = [Mg^{+2} / (Ca^{+2} + Mg^{+2})] \times 100 \quad (3)$$

Toutes les concentrations sont en (mg/L).

Si le MH est supérieur à 50 mg/L, l'eau n'est pas recommandée pour l'irrigation (Szabolcs et Darab, 1964).

➤ **Indice de perméabilité (PI) :**

Si les carbonates et les bicarbonates sont en forte concentration, ils forment des précipités avec le calcium et le magnésium réduisant la perméabilité. Par conséquent, les ions calcium, magnésium, sodium et bicarbonate sont utilisés pour calculer le PI (Raju et Janardhana, 2007).

Le PI est calculé par la formule (4) suivante :

$$PI [\%] = \frac{(Na^+ + \sqrt{HCO_3^-})}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+} \times 100 \quad (4)$$

Toutes les concentrations sont en (mg/L).

Si PI est inférieur à 75% (classe I), l'eau est appropriée pour l'irrigation ;

PI est supérieure à 75%, elle ne convient pas à l'irrigation. (Doneen, 1964)

➤ **Ratio de Kelly (KR) :**

Paramètre important pour l'étude de la qualité de l'eau d'irrigation, il est mesuré à la lumière de la concentration en ions sodium et magnésium (Raju et Janardhana, 2007).

KR est calculé en utilisant l'équation (5) suivante :

$$KR = Na^+ / (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \quad (5)$$

Toutes les concentrations sont en (mg/L).

Si $KR > 1$ indique un excès de Na dans l'eau.

$KR < 1$ est considéré comme acceptable pour l'irrigation. (Kelly, 1963).

3.4.1.3. Les diagrammes

Les composantes hydro-chimiques globales de l'eau d'irrigation sont expliquées avec les diagrammes graphiques. Le report des différents paramètres et indices sur les diagrammes permet une interprétation qui conduira à localiser le type d'eau. Le logiciel (Diagramme) a été utilisé pour tracer ces diagrammes.

➤ **Diagramme de Piper**

Le diagramme de Piper est le plus utilisé pour évaluer l'évolution hydro-chimiques de l'eau, dans ce diagramme les concentrations des anions principaux (Cl^- , SO_4^{2-} , et HCO_3^-) et cations (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , et Mg^{2+}) sont tracés en deux triangles, le 1^{er} triangle pour les cations, et

le 2^{ème} pour les anions et un losange découpé en familles d'eaux. Dans le diagramme, la concentration relative de chaque élément calculé permet de placer les points sur les triangles qui sont ensuite projetés sur le losange. Les différentes positions des points dans le losange permettent de définir les faciès géochimiques des eaux analysées (Piper, 1944).

➤ **Diagramme de Richards Riverside**

Dans cette classification de Richards Riverside, deux facteurs sont pris en compte : La CE $\mu\text{S}/\text{cm}$ et le pourcentage du sodium (SAR) qui sont convertis en quatre sections de qualité

➤ **Diagramme de Wilcox**

Dans le diagramme de Wilcox les valeurs du Na% sont reportées par rapport à CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) du diagramme de salinité

Les trois diagrammes sont réalisés à l'aide du logiciel d'hydrochimie multi-langage en distribution libre DIAGRAMMES, version 5.9 - 2013, du Roland SIMLER Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon (LHA).

➤ **Le triangle de texture pour le sol**

Appelé triangle des textures, dont les trois côtés correspondent respectivement aux pourcentages de sable, de limon et d'argile.

3.4.2. Etude statistique

Pour valoriser nos résultats, nous avons mené une analyse statistique :

- Les résultats de l'analyse de l'eau et du sol ont été traités et représentés par Graphique réalisés par le biais du logiciel Excel, 2010.
- Le test d'analyse de la variance (ANOVA) à deux critères ou à deux facteurs de classification à modèle fixe a été utilisé afin de comparer les moyennes de plusieurs éléments à partir de données d'échantillons aléatoires, simples et indépendants, en utilisant le logiciel statistique : IBM SPSS Statistics 23.
- Analyse en composées principales (ACP) est une méthode descriptive dont l'objectif est de présenter sous une forme graphique le maximum d'informations contenues dans une base de données. Cette base est constituée, en lignes par des «individus» (sites, profondeurs) sur lesquels sont mesurés des «variables, quantitatives» (les éléments majeurs et les éléments traces) disposés en colonnes. Elle permet de réduire le nombre de variables afin de projeter le nuage de points dans un sous-espace bidimensionnel engendré par des couples d'axes factoriels ou facteurs. En parallèle, L'analyse de classification hiérarchique consiste à définir un critère d'agrégation des classes qui peut être défini par la mesure du degré de ressemblance ou de dissemblance qui existait entre les échantillons (Templ et al., 2008).

Chapitre 4

Résultats Et Discussion

4.1. Conditions d'observation des sites d'étude (eau / sol)

Dans le tableau 6 nous avons noté les stations d'échantillonnage, les conditions climatiques le jour même de la campagne, et certaines observations visuelles pour les eaux de l'oued et les terres cultivées et irriguées à partir de l'oued concerné par notre étude.

Tableau 6. Conditions et observations de terrain pendant la campagne d'échantillonnage effectué en Avril 2015.

Station / Conditions / Observation	Station 1 (S1T)	Station 2 (S2 AV)	Station 3 (S3 AP)
Type d'échantillons	Eau/Sol	Eau/Sol	Eau/Sol
Heure prélèvement	13.00 h	13.45 h	17.00 h
Température de l'air	18.9 C°	19.4 C°	15.3 C°
Conditions Météorologique	ensoleillé	couvert	Nuage haut
Hydrologie	étiage sévère, moyennes eaux	étiage sévère, moyennes eaux	étiage sévère, hautes eaux
Visibilité du fond de l'oued	Partiellement	Non visible	Non visible
Débit	Stagnante	Courant	courant
Odeur	Sans odeur	sans odeur.	forte odeur désagréable
Couleur de l'eau	Claire	Légèrement trouble (couleur verdâtre),	Très trouble, couleur très foncée
Etat du sol	Très sec	humide	Très mouillé
Culture	Sauvage non irriguée	Maraichère irriguée	Maraichère irriguée

4.2. Caractérisation des eaux naturelles de surface et leurs aptitudes à l'irrigation

4.2.1. Caractéristiques physico-chimiques

Le tableau 7 présente des valeurs moyennes obtenues au cours de la période d'étude. La campagne a fait l'objet d'une détermination des teneurs en cations et anions majeurs ainsi que des éléments caractéristiques de la pollution (macronutriments et micropolluants minéraux).

Tableau 7. Valeurs moyennes des résultats obtenus pour l'analyse physico-chimiques de l'eau analysée et normes en vigueur. (Min, Max, Moyennes \pm Ecart Types (ECT), $n=3, p \leq 0,05$).

Stations	Station 1 (ST1)				Station 2 (S2AV)				Station 3 (S3AP)				Normes	
	Min	Max	Moy	ECT	Min	Max	Moy	ECT	Min	Max	Moy	ECT	OMS	Alg
T C°	11,20	11,30	11,23	0,06	10,50	11,10	10,87	0,32	13,00	14,50	13,67	0,76	25,00	25,00
pH	7,72	7,75	7,73	0,02	7,89	7,95	7,92	0,03	7,25	7,55	7,42	0,15	8,50	8,50
CE μ S/Cm	1695,00	1700,00	1697,00	2,65	1782,00	1790,00	1785,00	4,36	5187,00	5191,00	5188,67	2,08	1500,00	2800,00
O ₂ dissout mg/l	6,10	6,40	6,23	0,15	6,00	6,60	6,27	0,31	5,20	5,80	5,57	0,32	6,00	7,00
HCO ₃ mg/l	186,10	192,20	189,10	3,05	315,20	318,30	317,17	1,71	205,40	209,50	207,27	2,07	30,00	
Cl ⁻ mg/l	335,25	339,25	337,08	2,02	328,50	332,50	330,15	2,09	318,50	321,50	319,50	1,73	250,00	500,00
So ₄ mg/l	312,00	317,00	315,00	2,65	281,00	289,00	285,33	4,04	688,00	693,00	690,00	2,65	250,00	400,00
No ₃ mg/l	5,00	5,40	5,13	0,23	5,50	6,10	5,77	0,31	8,70	9,20	8,90	0,26	50,00	50,00
CaCO ₃ mg/l	446,85	451,86	449,85	2,65	417,01	422,00	420,04	2,66	746,00	755,00	750,00	4,58		200,00
Ca ²⁺ mg/l	177,00	182,50	180,30	2,91	166,54	169,30	168,35	1,57	297,80	302,30	300,53	2,40	100,00	200,00
Mg ²⁺ mg/l	39,54	41,56	40,57	1,01	68,55	70,15	69,35	0,80	179,40	181,60	180,63	1,12	50,00	150,00
Na ²⁺ mg/l	152,60	158,30	155,70	2,88	140,52	147,55	143,52	3,63	181,65	184,18	182,99	1,27	200,00	200,00
K ⁺ mg/l	5,91	6,15	6,02	0,12	5,65	5,89	5,75	0,13	6,30	6,41	6,37	0,06	12,00	20,00
Cu mg/l	3,10	3,40	3,28	0,16	2,46	2,65	2,54	0,10	4,20	4,40	4,30	0,10	2,00	2,00
Zn mg/l	0,21	0,25	0,23	0,02	0,12	0,15	0,13	0,02	0,14	0,18	0,16	0,02	3,00	5,00
Fer mg/l	0,69	0,74	0,72	0,03	0,61	0,69	0,65	0,04	0,51	0,52	0,51	0,00	0,30	1,00
Cd mg/l	0,07	0,07	0,07	0,00	0,05	0,05	0,05	0,00	0,07	0,08	0,07	0,01	0,01	0,01
Pb mg/l	0,20	0,21	0,20	0,01	0,09	0,10	0,10	0,00	0,25	0,31	0,29	0,03	0,01	0,05
Turbidité(NUT)	8,00	8,40	8,23	0,21	28,50	30,10	29,53	0,90	36,00	38,00	37,00	1,00		35,00
NH ₄ ⁺	1,75	1,90	1,84	0,08	8,20	8,90	8,50	0,36	24,00	26,30	25,27	1,17	0,50	4,00
NO ₂ ⁺	0,05	0,06	0,05	0,01	0,05	0,15	0,10	0,05	0,50	0,70	0,63	0,12	0,50	0,50
(PO ₄ ⁻²)	1,25	1,42	1,35	0,09	1,05	1,28	1,14	0,12	4,00	4,80	4,43	0,40	5,00	10,00

4.2.1.1. La température

La température de l'eau joue un rôle important par exemple en ce qui concerne la solubilité des sels et des gaz dont, entre autres, l'oxygène nécessaire à l'équilibre de la vie aquatique. L'activité métabolique des organismes aquatiques est accélérée lorsque la température de l'eau s'accroît. La valeur de ce paramètre est influencée par la température ambiante mais également par d'éventuels rejets. Par exemple, des changements brusques de température de plus de 3° C s'avèrent souvent néfastes, d'autre part les températures élevées facilitent les réactions d'oxydation des dérivés de l'azote (NH_4^+ , NO_2^-) et, par conséquent, entraîne une diminution du taux d'oxygène dissous (Nathaly, 1999).

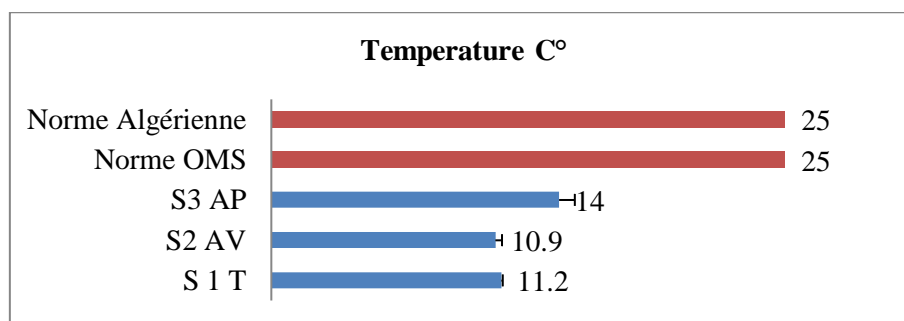


Figure 11. Variations de la température de l'eau du site d'étude et normes ($n=3, p \leq 0,05$).

D'après les résultats (Tab 7, Fig 11.), Les valeurs moyennes de la température mesurée in-situ pour les trois sites de l'Oued Meskiana sont inférieures à 25 °C considérée comme valeur limite Algérienne des eaux superficielles (J.O.N°34, 2011). La température fluctue légèrement en fonction de la situation géographique (altitude) des stations et l'heure du prélèvement. Une légère hausse de la température au niveau du site (S3AP) près du déversement des eaux usées peut favoriser la croissance des micro-organismes, la perte accentuée du goût, de l'odeur et de la couleur (OMS, 2013).

4.2.1.2. Le potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH est une mesure de l'acidité de l'eau c'est -à-dire de la concentration en ions d'hydrogène (H^+). L'échelle des pH s'étend en pratique de 0 (très acide) à 14 (très alcalin), la valeur médiane 7 correspond à une solution neutre à 25°C (De Villers, 2005).

Le pH est un facteur important pour définir le caractère agressif ou incrustant d'une eau, il influence la forme et la disponibilité des éléments nutritifs dans l'eau d'irrigation, il dépend de la diffusion du gaz carbonique à partir de l'atmosphère, du bilan

des métabolismes respiratoires et photosynthétiques, ainsi que de l'origine des eaux, la nature géologique du milieu traversé, et les rejets des eaux usées (Jeong et *al.*, 2016). Il diminue en présence des teneurs élevées en matières organiques et augmente en période d'été, lorsque l'évaporation est assez importante (Reggam et *al.*, 2015). Des pH faibles (eaux acides) augmentent le risque de présence de métaux sous une forme ionique plus toxique. Des pH élevés augmentent les concentrations d'ammoniac, toxique pour les poissons (De Villers, 2005).

L'eau alcaline peut faire monter le pH du sol à des niveaux inacceptables provoquant un appauvrissement continu de fer. Ceci est aggravé par un mauvais drainage et l'accumulation de sel (Plauborg et *al.*, 2010).

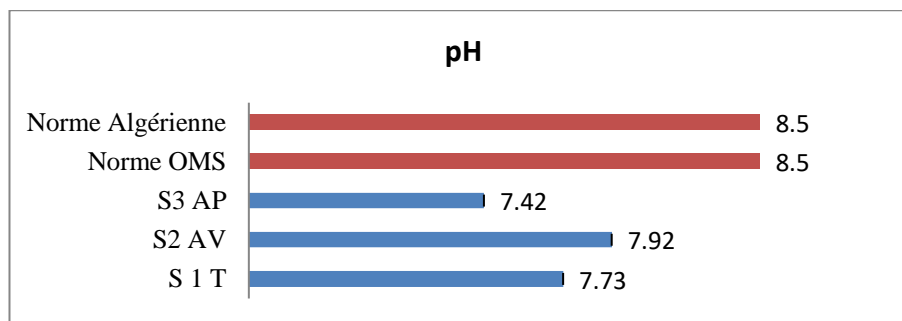


Figure 12. Variations du pH dans l'eau du site d'étude et normes (n=3, p≤0,05).

Selon les résultats des échantillons prélevés dans la région d'étude les eaux sont légèrement basiques avec un pH variant entre 7.42 (S3AP) à 7.73 (S1T). Le pH au niveau de la station (S3AP) enregistre une légère diminution car le pH diminue en présence de teneurs élevées en matière organique et augmente en période d'été. Lorsque l'évaporation est importante (Meybeck, 1996), ces valeurs ne dépassent pas la norme fixée par la FAO et adoptée par plusieurs pays du monde (6,5 à 8,4), ainsi que la norme algérienne des eaux superficielles (J.O.N°34) (entre 6,5 et 9 unités) (Fig. 12). Les résultats sont similaires à ceux trouvés par Bentouati et Bouzidi, (2012) et Aissaoui et *al.*, (2017) qui ont trouvés des valeurs de pH entre 7 et 7,69.

La grille d'appréciation de la qualité de l'eau (Ministère algérien des ressources en eau), et les normes liées à l'OMS nous permettent de classer cette eau dans la classe de pH normale (ANNEXE 1).

4.2.1.3. La conductivité électrique (CE)

Selon Rodier (2009), La conductivité permet d'apprécier le degré de minéralisation de l'eau dans la mesure où la plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. C'est un facteur vital à suivre lorsqu'on est intéressé par une réutilisation des eaux usées en agriculture (Singh *et al.*, 2018). L'aptitude de l'eau à l'irrigation peut être jugée non seulement à partir de la concentration totale en sels, mais aussi par le type de sels et ions qui la constituent. Une conductivité élevée traduit une quantité de sels solubles très importante (Benamar *et al.*, 2002).

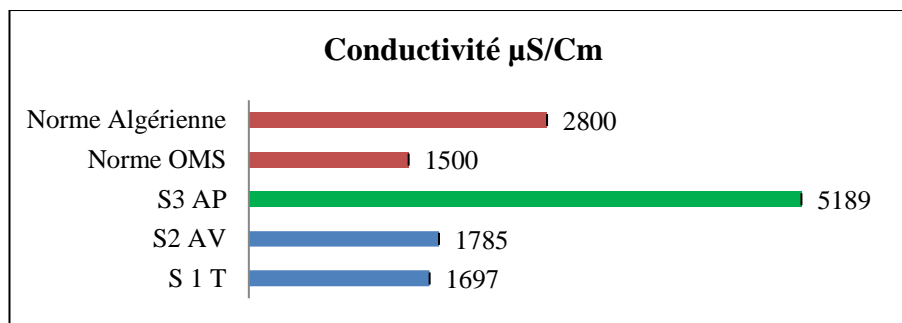


Figure 13. Variations de la conductivité dans l'eau du site d'étude et normes (n=3, $p \leq 0,05$).

La valeur maximale est observée au niveau du point (S3AP) avec une valeur de 5189 µS/Cm à 200 m près du rejet urbain de la ville de Meskiana qui est la cause la plus probable de cette valeur très élevée. Les valeurs enregistrées dans les stations (S1T) et (S2 AV) sont élevées malgré l'absence des rejets, les activités agricoles peuvent en être la cause principale (Tab 7, Fig. 13).

La comparaison des valeurs de CE enregistrées avec la norme limite des directives de la OMS (2013) et de la norme algérienne des eaux superficielle destinées à l'irrigation (J.O.N°34, 2011) montre qu'elles sont inférieures pour (S1T) et (S2AV) à la norme considérée limite de 2800 µS/cm et dépassent cette dernière pour (S3AP). Belghyti *et al.*, 2009 Signalent que des valeurs de CE dépassent 1000µS/Cm et mettent en évidence une forte minéralisation. Ce qui est valable pour nos trois stations. D'après la grille de qualité des eaux de rivières établie par Monod en 1989 et Radoux *et al.* en 1995, les valeurs obtenues sont très élevées, ce qui classe les eaux étudiées comme eau de qualité passable pour les deux premières stations (Classe2) à médiocre pour la troisième station (Classe 3)

(ANNEXE 1). D'autre part Rodier (2009) mentionne que une CE >3000 classe l'eau comme eau de mer.

Une conductivité électrique supérieure à 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ fait considérer l'eau comme inutilisable dans les zones irriguées, ce qui diminue le rendement de la plupart des cultures sensibles au sel (Samake, 2002). L'irrigation continue avec ces eaux peut causer des problèmes de salinité du sol, la même chose est survenue à Oued Righ, en Algérie, en raison de l'irrigation avec de l'eau salée (Koull et *al.*, 2013).

Les résultats de la conductivité électrique des eaux de la zone d'étude sont en accord avec ceux rapportés par Kherief et *al.* (2018) menés sur le barrage de Béni Haroun. Et ceux d'Etteieb et *al.* (2015) en Tunisie.

4.2.1.4. L'oxygène dissous (O_2)

Les organismes aquatiques ont besoin d'une quantité suffisante d'oxygène dissous dans l'eau pour survivre. Les facteurs qui peuvent mener à la réduction de l' O_2 dissous sont l'augmentation de la température de l'eau, la pression partielle, le débit et la décomposition de grandes quantités de la matière organique. L'oxygène dissous est l'un des paramètres particulièrement utile pour l'eau et constitue un excellent indicateur de sa qualité. C'est un des paramètres les plus sensibles à la pollution. Sa valeur nous renseigne sur le degré de pollution et par conséquent sur le degré de l'autoépuration d'un cours d'eau (Abdoulaye et Aboudou, 2016).

Globalement, plus la concentration en oxygène dissous est proche de la saturation, plus l'aptitude de la rivière à absorber la pollution est grande : une valeur inférieure à 1 mg d' O_2 /l indique un état proche de l'anaérobie. Cet état se produit lorsque les processus d'oxydation des déchets minéraux, de la matière organique et des nutriments consomment plus d'oxygène que celui disponible. Une faible teneur en oxygène dissous provoque une augmentation de la solubilité des éléments toxiques qui se libèrent des sédiments (De Villers et *al.*, 2005).

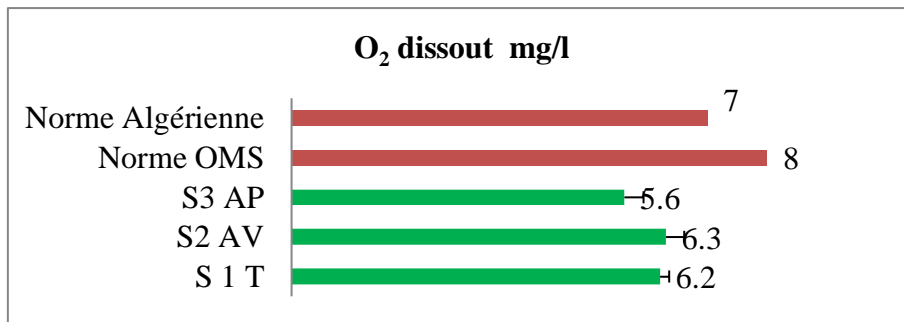


Figure 14. Variations de l'oxygène dissous dans l'eau du site d'étude et normes (n=3, $p \leq 0,05$).

Les valeurs de l'oxygène dissous enregistrent une diminution de l'amont vers l'aval, elles varient de 5.6 mg/l en aval (S3AP) à 6.3 mg/l en amont (S2AV), cette diminution de l'amont vers l'aval peut être expliquée par l'apport des rejets domestiques (déversoir d'eau usée à 200 m) chargés en matières organiques (Tab.7, Fig.14). D'après Hazourli et *al.*, 2007, les eaux domestiques, riches en matières organiques et inorganiques dissoutes causent une chute de l'oxygène dissous. Dans tous les cas, les teneurs en oxygène obtenues peuvent encore diminuer dès que la dégradation de la matière organique et la multiplication des microorganismes aérobies débute (Addad et *al.*, 2017).

D'après la grille de qualité des eaux de rivières établies par Radoux en 1995, les valeurs obtenues sont faibles, ce qui explique la présence d'une grande quantité de matière organique en décomposition surtout pour la station (S3AP), et classe les eaux étudiées comme eau de qualité passable pour les trois stations (ANNEXE 1).

4.2.1.5. La turbidité

La turbidité résulte de la dispersion et de l'absorption de la lumière par les particules de matière en suspension. La différence dans les valeurs de ce paramètre est liée à la nature, la forme, la taille et aux propriétés de dispersion et d'absorption de la lumière des particules en suspension qui composent l'effluent (Foto et *al.*, 2017).

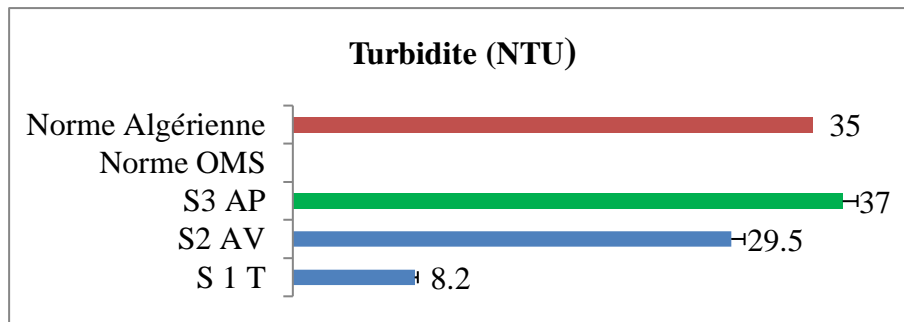


Figure 15. Variations de la turbidité de l'eau du site d'étude et norme (n=3, $p \leq 0,05$).

La turbidité enregistre une valeur maximale de 37 NTU pour la station S3AP et vue sa localisation proche du lieu de déversement des eaux usées « en aval de l'oued », cette valeur peut être due aux ruissèlements et aux matières organiques issues des eaux usées. Des valeurs de 28.5 et 8 NTU pour les deux stations de la partie amont (Tab 7 ; Fig. 15). La variation spatiale des valeurs de la turbidité est influencée par le rapprochement du point de rejet, de la texture du lit de l'oued et de la configuration de son parcours.

Selon la grille de la qualité des eaux de surfaces (FAO, 2003) (ANNEXE 1), les eaux de deux stations situées en amont de l'oued sont bonnes pour notre témoin (S1T) et acceptables pour S2AV, par contre la station S3AP affiche une pollution excessive. Les résultats concordent avec ceux de Ababsa et *al.*, en 2016 et Addade et *al.*, en 2017 pour Oued Boussellam qui est situé à l'ouest de la ville de Sétif.

4.2.1.6. La dureté

Dans l'eau sont déterminés :

4.2.1.6.1. Le Titre Hydrotimétrique (TH)

La dureté d'une eau correspond à la somme des concentrations en cations métalliques, excepté celles des métaux alcalins (Na^+ , K^+) et H^+ . Elle est souvent due aux ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . La présence de ces deux cations dans l'eau tend souvent à réduire la toxicité des métaux. La dureté se mesure en mg de CaCO_3 par litre.

➤ **La dureté totale**

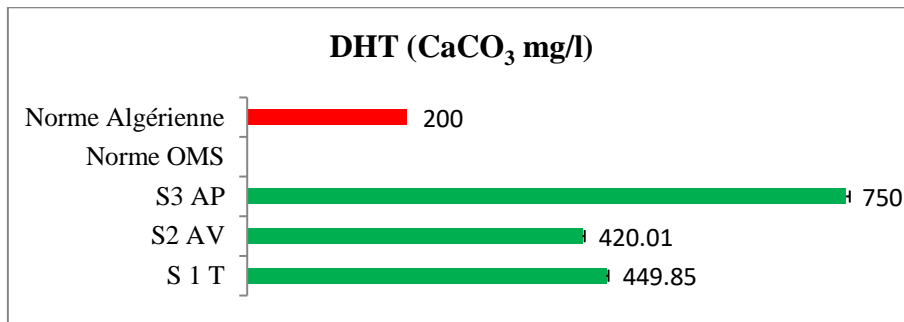


Figure 16. Variations spatio-temporelle de la dureté totale dans l'eau du site d'étude et norme ($n=3$, $p \leq 0,05$).

L'eau a enregistré des fluctuations importantes, avec des valeurs oscillant entre 750 mg/l au niveau de la station (S3AP) et 420.01 mg/l pour la station (S2AV) comme valeur minimale (Fig. 16). La norme algérienne fixe la limite à 200 mg/l. Or toutes les eaux analysées dépassent cette limite, donc les eaux de cette région sont très dures.

Selon la grille de la qualité de Bremond (1973) (ANNEXE 1), les eaux de notre site d'étude sont très dures, ceci est dû à la nature calcaire des terrains géologiques traversés par l'eau, ou à la charge polluante contenue dans les eaux usées déversées.

Une eau très dure présente des inconvénients d'utilisation, tels que la diminution des propriétés détergentes des lessives et des savons et les dépôts de tartre sur les parois des canalisations d'eau. Une eau trop dure est une eau corrosive.

➤ **Le Calcium (Ca²⁺)**

Élément alcalinoterreux, qui se trouve dans les roches calcaires sous forme de carbonate (CaCO₃), comme il peut provenir également des formations gypsifères (CaSO₄, 2H₂O), qui sont facilement solubles. L'ion calcium joue aussi un rôle essentiel dans les écosystèmes aquatiques, composant majeur de la dureté de l'eau et élément dominant des eaux naturelles, il entre dans la constitution des squelettes et coquilles, et dans les phénomènes de perméabilité cellulaire (Louadj et al., 2019).

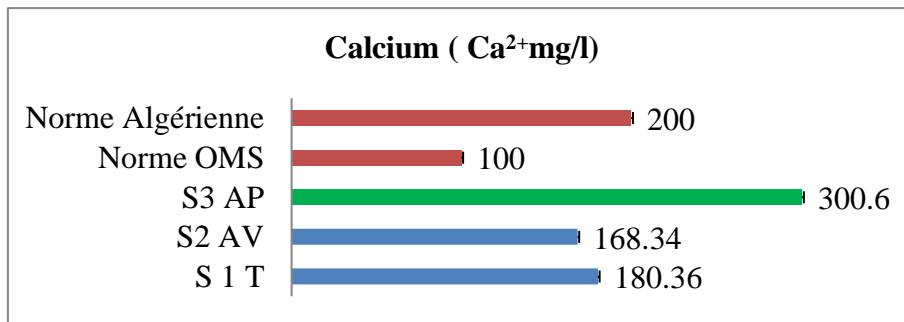


Figure 17. Variations des teneurs en calcium dans l'eau de l'oued étudié et normes (n=3, p≤0,05).

Les valeurs de calcium varient d'une station à une autre, avec une valeur maximale supérieure à 300 mg/l pour la troisième station (S3AP), et une valeur minimale de 168.34 mg/l pour la station de la partie amont (S2AV). (Tab.7, Fig.17). Les valeurs de calcium sont supérieures aux valeurs guidées de 100 mg/l, fixées pour les eaux naturelles de surface par l'OMS en 2004, et celle de l'Algérie (J.O.N°34, 2011) (ANNEXE1) fixé à 200 mg/l pour la station (S3AP).

La teneur en ion calcium est liée directement au déversement d'eaux usées qui est une source très probable de la teneur élevée en Ca²⁺ pour le troisième site localisé près du rejet d'eau usée. La présence du calcium peut être également attribuée aux processus d'échange de cations à l'évaporation, mais aussi aux actions des microorganismes (Garrels, 1976) sans oublier la nature géologique des terrains traversés par l'eau (Bremond et Vuichard, 1973). Cela peut être nocif pour le milieu aquatique. Des résultats semblables, ont été détectés par Dib et *al.*, en 2017 au niveau du bassin de Tarf (Nord de l'Algérie).

➤ Le Magnésium Mg²⁺

Il a comme origine la dissolution des formations carbonatées la giobertite (magnésite), la dolomie, l'olivine, la serpentine, le talc et l'amiante. Il constitue un élément significatif de la dureté, sa teneur dépend du terrain traversé, il dépasse rarement 15 mg/l dans les eaux naturelles, par contre dans les eaux minérales il peut largement dépasser cette valeur. Le magnésium est d'une grande nécessité à la photosynthèse des plantes (Eblin et *al.*, 2014).

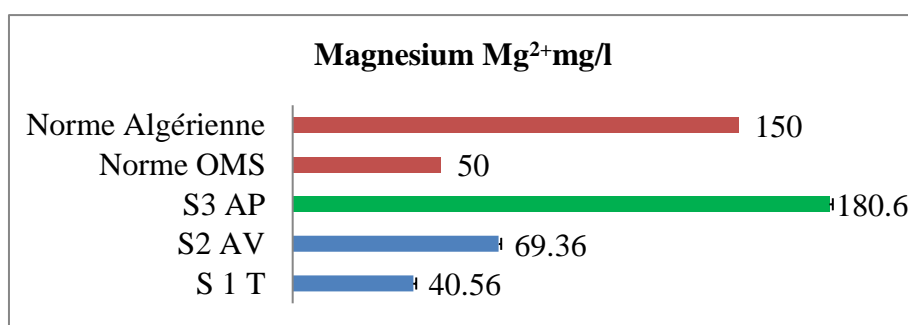


Figure 18. Variations des teneurs en Magnésium dans l'eau du site d'étude et normes (n=3, $p \leq 0,05$).

Les teneurs du magnésium sont assez différentes les unes des autres. Au niveau de l'oued, la valeur extrême est de 180.6 mg/l enregistrée au niveau de la station 3(S3AP), les valeurs diminuées pour les stations de la partie amont (40,56 et 69.36 mg/l) (Fig.18).

Selon la grille d'appréciation de la qualité de l'eau (DHWCNE, 2005) (ANNEXE1), et les valeurs maximales fixées par la loi, les eaux de la vallée sont, de bonnes à acceptables pour la partie amont et médiocre pour la partie avale.

4.2.1.6.2. La dureté carbonatée

Ils permettent de connaître les quantités d'hydroxydes, de carbonates ou d'hydrogencarbonates alcalins ou alcalinoterreux présents dans l'eau (Rodier *et al.*, 2009).

➤ Titre Alcalimétrique (TA)

Le TA permet de déterminer, en bloc, la teneur en hydroxydes et seulement la moitié de celle en carbonate. Le titre alcalimétrique est nul dans toutes les stations d'étude.

➤ Titre Alcalimétrique Complet (TAC)

Il assure la détermination de la teneur en hydrogencarbonates (HCO_3^-). L'alcalinité exprime la capacité de neutralisation des acides présents dans l'eau (Thomas, 1995). La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (cipolin, calcaire, dolomie ...) par des eaux chargées en gaz carbonique. Leurs concentrations dans les eaux naturelles dépendent essentiellement de la température ambiante, du pH de l'eau, de la concentration en gaz carbonique dissous et de la lithologie. (Rodier *et al.*, 2009).

Les bicarbonates peuvent nuire à la fertilité du sol si l'on utilise de l'eau d'irrigation à forte teneur pendant plusieurs décennies (Eaton, 1950). Au fur et à mesure que les bicarbonates se concentrent dans le sol en raison de l'évapotranspiration, le calcium et le magnésium ont de plus en plus tendance à précipiter sous forme de carbonates insolubles et

laisser le sodium dominer, avec le temps, le coefficient d'adsorption du sodium (SAR) augmente (Ashraf et al., 2017).

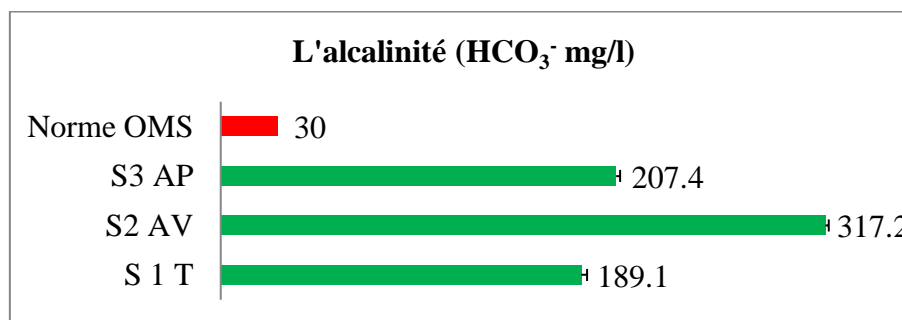


Figure 19. Variations des carbonates de l'eau de du site d'étude et norme (n=3, p≤0,05).

L'alcalinité (bicarbonates) enregistrée dans l'ensemble des stations d'étude est irrégulière. Elle varie entre 317.2 mg/l et 189.1 mg/l dans l'eau de la partie amont (S2AV, S1T) et elle est de 207.4 mg/l pour la partie avale (S3AP) (Fig.19). Les concentrations sont très fortes et dépassent largement les 30 mg/l, admissibles par l'OMS (2013). Ces valeurs élevées pourraient être attribuées aux rejets liquides susceptibles d'être oxydées et ayant pour conséquence, une production élevée de CO₂ pour la station de la partie aval de l'oued, même chose pour les deux autres stations, car les eaux sont enrichies de matières organiques dus aux diverses activités agricoles. Cependant, la présence du CO₂ confère à l'eau une force de dissolution bien plus importante (Thomas, 1995). Mehounou et al., (2016) indique que les bicarbonates sont indicateurs de minéralisation totale. Le ruissèlement et le lessivage des eaux pluviales pendant la période humide, représente une grande partie des valeurs élevées obtenues. Selon El Blidi *et al*, (2006) l'irrégularité de l'alcalinité est à corrélérer avec la croissance des végétaux présents sur le site et par conséquent avec l'activité photosynthétique.

4.2.1.6.3. La dureté non carbonatée (dureté permanente)

➤ Les Chlorures

L'ion chlorure est un paramètre chimique lié à la structure naturelle des eaux. Les chlorures existent dans toutes les eaux naturelles à des concentrations très variables. L'origine peut en être naturelle de la dissolution des roches salées ou autre telle que la percolation à travers des terres salées, rejets humains (en particulier l'urine), industries extractives et dérivées (soudières, salines), ou par des rejets domestiques surtout riches en détergents ou par l'utilisation des pesticides dans l'agriculture (Gouaidia et al., 2013).

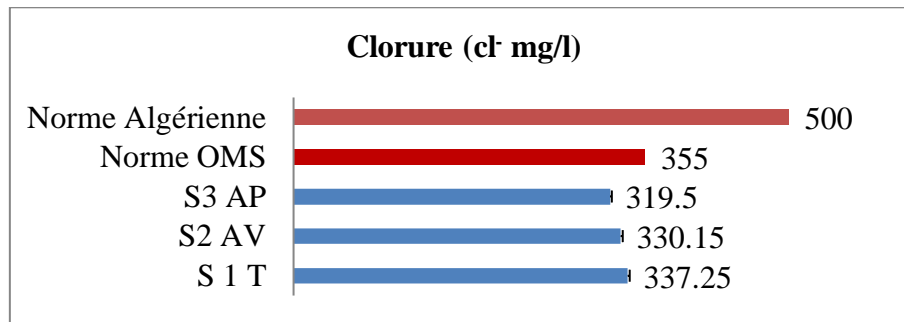


Figure 20. Teneurs des chlorures dans l'eau du site d'étude et normes (n=3, $p \leq 0,05$).

En se référant à la norme algérienne (J.O.N°34) et les normes internationales (OMS, 2013 et FAO, 2003) (ANNEXE1), l'analyse des résultats (Tab.7, Fig.20) montre que les concentrations oscillent entre 337 mg/l et 319.5 mg/l donc le taux de chlorures dans les eaux de l'Oued Meskiana est inférieur à 355.0 mg/l, ce qui est un seuil tolérable pour les modes d'irrigation de surface (OMS, 2013). Ceci suggère la possibilité d'une dilution pendant les périodes de haut débit suite aux apports d'eaux pluviales, car une étude qui fut réalisée en 2009 par Zidi.A pendant la saison sèche au niveau du même site a donné des valeurs arrivant jusqu'à 1810 g/l au niveau de la partie aval de l'oued (P3AP). Cette augmentation peut être expliquée par l'apport des rejets domestiques et la nature des terrains traversés.

➤ Les sulfates (SO_4^{2-})

Le soufre se combine à l'oxygène pour donner l'ion sulfate, composé naturel des eaux, il est lié aux cations majeurs tels que le calcium, le potassium et le sodium. Présent dans certains minéraux comme le gypse et la baryte. Outre son origine naturelle, ses teneurs élevées peuvent être liées aux activités agricoles notamment l'emploi excessif de pesticides et d'engrais à base de sulfate d'ammonium (Meyberk, 1996). Les eaux de surface contiennent des teneurs très variables de sulfates (Derwiche et *al.*, 2010).

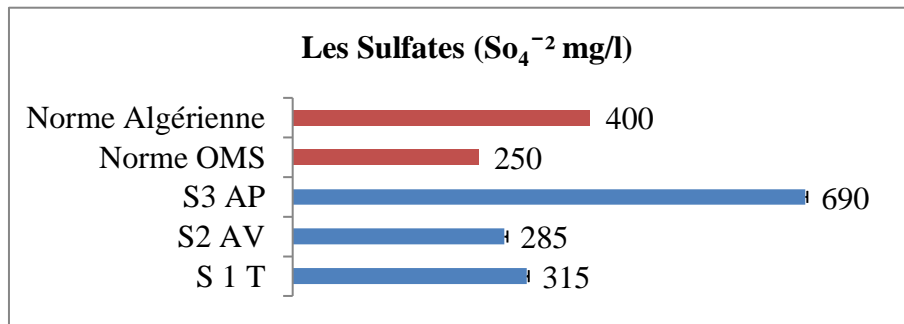


Figure 21. Variations des teneurs en sulfate dans l'eau du site d'étude et normes (n=3, p≤0,05).

Les valeurs de ce paramètre dans les eaux étudiées sont très variables et oscillent entre 285 et 690 mg/l. Les teneurs élevées semblent être liées aux points de prélèvement, la station S3AP affiche les valeurs les plus élevées 690 mg/l. Les minimas ont été enregistrés au niveau de la partie amont (Tab 7, Fig 21.).

Les valeurs élevées de ce paramètre peuvent être observées dans les cours d'eau pollués, au niveau des zones de rejets d'eaux usées déversées directement dans les oueds, (usines de pâtes à papiers, usines de textiles, ...) (Derwichet et *al.*, 2010). Ces fortes teneurs peuvent être aussi dues aux activités agricoles (emploi de manière excessive des insecticides à base de sulfates ou d'acide sulfurique ainsi que des engrais aux sulfates d'ammonium) (Barry, 1989). La nature des terrains et leur lessivage contribue à la hausse des valeurs des sulfates dans les eaux de la partie avale. Pour l'irrigation, des teneurs excessives en sulfates > 200 mg/l peuvent cependant entraîner la précipitation du sulfate de calcium (Ré-Bahuaud et *al.*, 2016). Greenwood et *al.*, (1984), a étudié les sulfates et a constaté que les valeurs élevées de ce paramètre peuvent être observées dans les cours d'eau polluée.

4.2.1.7. Sodium (Na⁺) et potassium (K⁺)

➤ Le Sodium (Na⁺)

Le sodium est le cation dominant. Généralement associé à l'ion chlorure, il est très soluble dans l'eau, et joue un rôle très important dans la salinité des eaux. Il provient de la météorisation des roches, contenant des silicates de sodium et d'aluminium, des urines et des selles des animaux, mais il peut être également apporté par le lessivage des sols après l'utilisation des fertilisants (Haddad et Ghoualem, 2014).

Le sodium contribue directement à la salinité totale de l'eau et peut être toxique pour des cultures sensibles comme : les carottes, les haricots, les fraises, les framboises, les oignons. Si l'eau passe par un système d'aspersion et que le calcium et le magnésium sont bas, des teneurs moyennes à élevées de sodium peuvent défolier les plantes sensibles (Ashraf et *al.*, 2017).

Le problème principal avec une grande quantité de sodium est son effet sur la perméabilité du sol et sur l'infiltration de l'eau (Singh et *al.*, 2018). Le sodium remplace le calcium et le magnésium adsorbés sur les particules d'argile et provoque la dispersion des particules du sol. Il y a donc éclatement des agrégats du sol ce qui provoque un sol dur et compact lorsqu'il est sec et excessivement imperméable à l'eau (Ashraf et *al.*, 2017).

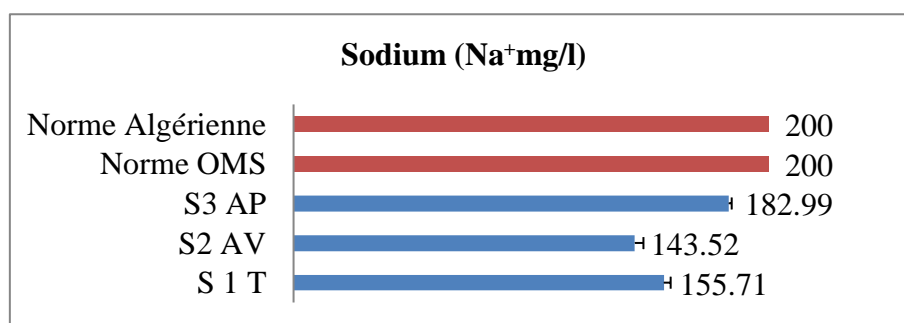


Figure 22. Variations des teneurs en sodium dans l'eau du site d'étude et normes (n=3, $p \leq 0,05$).

Les concentrations du sodium dans les échantillons d'eaux inférieure aux normes recommandées, algérienne et de l'OMS, fixées à ≤ 200 mg/l (ANNEXE1).

➤ Le potassium (K⁺)

Le potassium se trouve, néanmoins, à de faibles concentrations dans les eaux par rapport aux autres éléments ; car il est adsorbé par la matrice argileuse du sol et absorbé par les plantes.

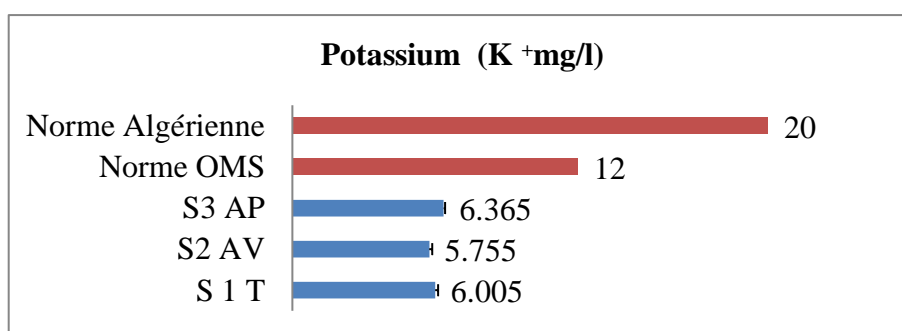


Figure 23. Variations des teneurs en potassium dans l'eau du site d'étude et normes (n=3, $p \leq 0,05$).

D'après les résultats obtenus, les eaux ont une faible teneur en potassium (Tab 7 Fig. 23). Cet apport non négligeable en ions K^+ est probablement le résultat de l'épandage de fertilisants d'origine animale (selon la déclaration des agriculteurs de la région) pour tous les stations en plus des rejets pour la station de la partie amant. Il est à noter que les concentrations du sodium dépassent largement celles du potassium dans l'ensemble. Selon des études semblables à la nôtre l'apport de potassium dans l'eaux d'irrigation n'entraîne pas d'impact négatif sur l'environnement (Mikkelsen *et al.*, 1995 et Adadde *et al.*, 2017).

4.2.1.8. Les éléments polluants

4.2.1.8.1. Les formes d'azote

L'azote est présent dans les eaux de surface sous trois formes principales: nitrates, nitrites et ammonium. Lors du rejet d'azote organique (protéines, acides aminés, urée...), les molécules sont tout d'abord transformées en ammonium (NH_4^+) qui est ensuite oxydé en nitrites, puis en nitrates sous l'action de bactéries nitrifiantes. Ces processus d'oxydation, également appelés « nitrification » sont très sensibles à la présence de matières toxiques (métaux, pesticides) et aux températures basses (De Villers *et al.*, 2005).

➤ Les Nitrates (NO_3^-)

Les Nitrates classés parmi les substances minérales toxiques (polluants chimiques). Ils peuvent être dangereux par effet d'accumulation. Ils proviennent essentiellement d'activités agricoles, la minéralisation de l'azote organique et l'oxydation de l'ammonium. (Féray, 2000). Les Nitrates comme les autres formes azotées évoluent très rapidement dans le milieu naturel selon le cycle d'azote (Belghyti *et al.*, 2009). Des valeurs supérieures à la norme indiquent des rejets d'eaux usées dans le milieu aquatique, et surtout une utilisation excessive de fertilisants en agriculture. Les nitrates constituent le stade final de l'oxydation

de l'azote (Derwich et *al.*, 2010). Leur présence stimule la prolifération de la flore aquatique et peut aussi provoquer un problème de santé publique tel que la méthémoglobinémie (Harrat et Achour, 2010).

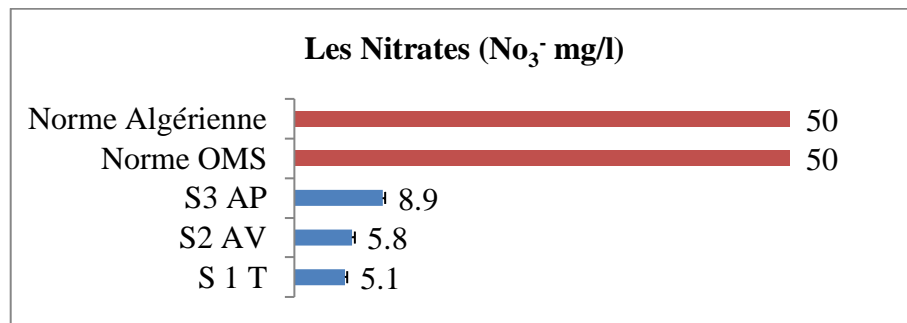


Figure 24. Variations des teneurs en nitrates dans l'eau de l'Oued étudié et normes (n=3, p≤0,05).

En ce qui concerne les teneurs en nitrates nous observons une augmentation de l'amont vers l'aval, elle passe de 5,1 mg/l, valeur enregistrée en amont (S1T) à 8.9 mg/l, valeur notée en aval (S3AP), ces valeurs-là sont inférieures à la norme fixée par les différentes législations (30 mg/l) (Tab.7, Fig.24), d'autre part la grille de qualité des eaux pour les nitrates (ABH-CSM, 2005) (ANNEXE1) classe les eaux du site étudié comme moyennement polluées avec signe de pollution. L'abaissement des teneurs en nitrates témoigne de l'absence de toute activité biologique et d'une utilisation non abusive d'engrais dans les exploitations agricoles. Les teneurs faibles peuvent être expliquées par les épisodes pluvieux qui ont précédé notre campagne d'échantillonnage et par la présence d'algues qui utilisent le NO₃⁻ sur tout pour les stations de la partie amant.

➤ Les Nitrites (NO₂⁻)

Pour les Nitrites, qui constituent une étape importante dans la métabolisation des composés azotés, ils s'insèrent aussi dans le cycle d'azote entre l'ammonium et les nitrates (Belghyti et *al.*, 2009). Les nitrites représentent toujours un stade fugace. Ils ne se maintiennent que lorsque le milieu n'est pas suffisamment oxydant et leur présence indique un état critique de pollution organique à partir de 1 mg/l (Nisbet et Verneaux, 1970).

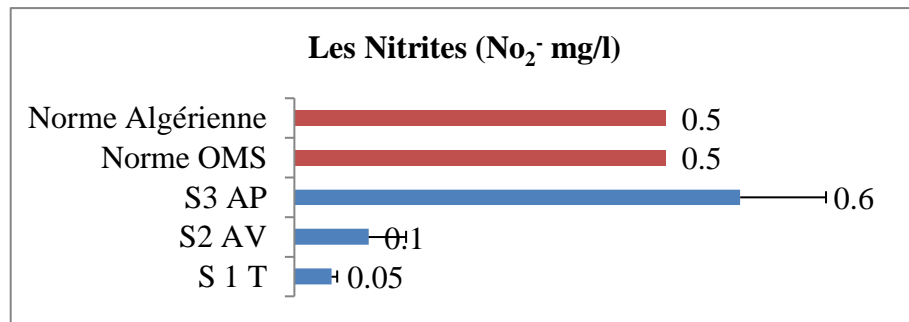


Figure 25. Variations des teneurs en nitrites pour les stations étudiées et normes (n=3, p≤0,05).

Les teneurs en nitrites montrent des variations s'observant d'une station à l'autre. La teneur la plus faible est de 0.05 mg/l mesurée à la station (S1T), et la plus élevée est de 0.6 mg/l, elle est enregistrée pendant la même période mais au niveau de la station (APS3) (Tab7, Fig. 25). Les taux des nitrates sont généralement supérieurs à ceux des nitrites ce qui peut s'expliquer par l'état instable des nitrites dans l'eau. Selon la grille de qualité des eaux naturelles appliquée par l'agence nationale des ressources hydriques (ABH-CSM, 2005) (ANNEXE 1), l'eau de l'oued est de bonne qualité pour la partie amont et passable pour la partie aval.

Des concentrations élevées en nitrites, dans les prélèvements indiquent une pollution organique récente due probablement au libre accès des ovins et bovins pour s'alimenter en eau. Elles témoignent aussi souvent de la présence de matières toxiques. Les nitrites sont surtout nuisibles pour les jeunes poissons.

➤ L'ammonium (NH₄⁺)

L'azote ammoniacal, rencontré dans les eaux et dont la présence est anormale, traduit habituellement un processus de dégradation incomplète de la matière organique lorsque la teneur en oxygène est insuffisante pour assurer sa transformation (Nisbet, 1970). L'ammonium est un indicateur de la contamination des cours d'eau par la matière organique ou par les effluents urbains (Derwich et *al.*, 2010). Il existe en faible proportion dans les eaux naturelles (inférieur à 0,1 mg/l).

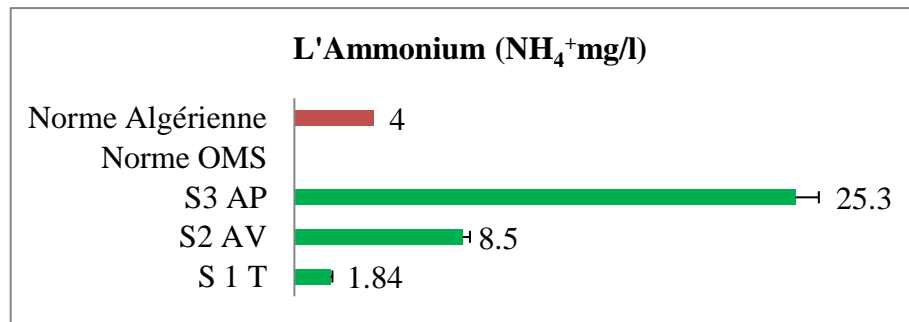


Figure 26. Variations des teneurs en ammonium dans l'eau de l'oued et normes (n=3, $p \leq 0,05$).

Les valeurs de l'azote ammoniacal oscillent entre 1.85 et 25.3 mg/l affichant une variation spatiale entre la station (S1T) à l'amont et la station trois (S3AP) situés en aval. Elles augmentent très rapidement de l'amont vers l'aval (Fig.26.). Selon les normes proposées par la loi algérienne, ces valeurs dépassent largement la valeur maximale fixée à 4 mg/l pour la troisième (S3AP) et deuxième (S2AV) station avec 25.3 mg/l et 8.5 mg/l respectivement, par contre la station (S1T) affiche une valeur inférieure à la norme. l'ABH.CSM (2005) et Radou (1995), (ANNEXE1) classe les eaux de la partie aval comme eau excessivement polluée, même chose pour la station (S2AV), et sont de qualité passable pour la station (S1T). Ceci peut être expliqué par le déversement des eaux usées de toute la commune de Méskiana, et le ruissellement qui amènent des quantités importantes des matières organiques. En général, l'ammonium se transforme assez rapidement en nitrites et en nitrates par oxydation bactérienne, en lui-même il n'est pas nuisible, mais lorsque le pH augmente, on retrouve de l'ammoniaque, un gaz soluble dans l'eau et toxique pour la vie (Chapman et Kimstach, 1996).

4.2.1.8.2. Le phosphore (Po_4^{2-})

Le phosphore est naturellement présent dans les eaux superficielles en faible concentration, compte tenu de son importance dans la constitution des êtres vivants. Il est considéré comme un des éléments nutritifs jouant un rôle essentiel dans les équilibres biologiques des eaux. Seulement, l'excès des phosphates associés aux nitrates, devenir un facteur limite de l'eutrophisation (Rodier et *al.*, 2006).

Les phosphates peuvent être d'origines organique ou minérale. Ils proviennent surtout des égout domestiques (additifs dans les détergents), des rejets industriels (industries agro-alimentaires, textiles, laveries, ateliers de traitement de surface...) (Djeddi et *al.*, 2018).

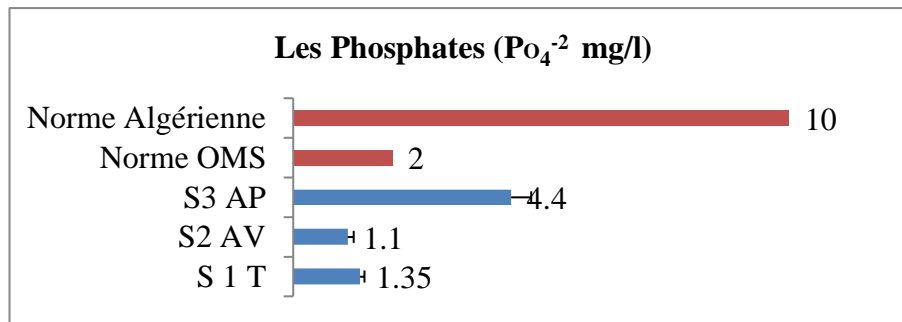


Figure 27. Variations des teneurs en phosphate dans l'eau du site d'étude et normes ($n=3$, $p \leq 0,05$).

Les teneurs en phosphates présentent des variations peu importantes dans l'espace (de l'amont vers l'aval). Les valeurs maximales sont enregistrées au niveau de la station (S3AP) « 4.4 mg/l » près du point de déversement des eaux usées de la ville, les valeurs minimales sont mesurées dans la station (S1T) (Fig.27).

Les eaux de l'oued présentent au niveau de la troisième station, un taux de phosphate supérieur aux limites citées précédemment, ce qui révèle une situation de pollution. Malgré que la loi algérienne fixe la norme à 10mg/l et l'OMS à 2 mg/l, l'ABH-CSM considère la présence des phosphates dans les eaux naturelles à des concentrations supérieures à 0.2mg/l comme indice d'une pollution par des eaux vannes contenant des phosphates organiques, des détergents synthétiques, ou bien des eaux de ruissellement, pour cela les eaux de la partie aval sont excessivement polluées selon la grille de l'ABH-CSM, (2005) (ANNEXE 1), et ceux de la partie amont de qualité médiocre.

Le phosphore a été identifié comme l'élément clé de l'eutrophisation dans les eaux usées par un grand nombre de chercheurs parmi eux (Tamrabat et *al.*, 2005 ; Hutchinson, 1957; Doran, 1979 ; Holmgren, 1985). Il joue un rôle régulateur pour les plantes. Il est assimilé par les plantes sous la forme d'ortho phosphates (Vilain, 1989) ce qui permet de dire que le phosphore apporté par les eaux usées est bio disponible dans de grandes proportions, allant jusqu'à 60 à 70%. (Picot et *al.*, 1991).

4.2.1.9. Les éléments traces métalliques (ETM)

L'apport régulier d'eau usée non décantée au cours d'eau peut conduire à l'accumulation des éléments minéraux comme le fer, le manganèse, le zinc, le cuivre, le bore et le molybdène. Ces éléments sont appelés oligo-éléments ou éléments traces métalliques (ETM). Les eaux usées apportent aussi d'autres métaux toxiques, tel que le plomb, le mercure, le cadmium, l'aluminium et le chrome (Cadillon, 1989). Ces éléments,

bien qu'ils puissent avoir une origine naturelle (roches du sous-sol, minerais), proviennent essentiellement de la contamination des eaux par des rejets diverses. Ils ont la particularité de s'accumuler dans les organismes vivants ainsi que dans la chaîne trophique (Keck et Vernus, 2000). Certains éléments traces, peu nombreux, sont reconnus nécessaires, en très faibles quantités, au développement des végétaux : le bore, le fer, le manganèse, le zinc, le cuivre et le molybdène (Faby et Brissaud, 1997).

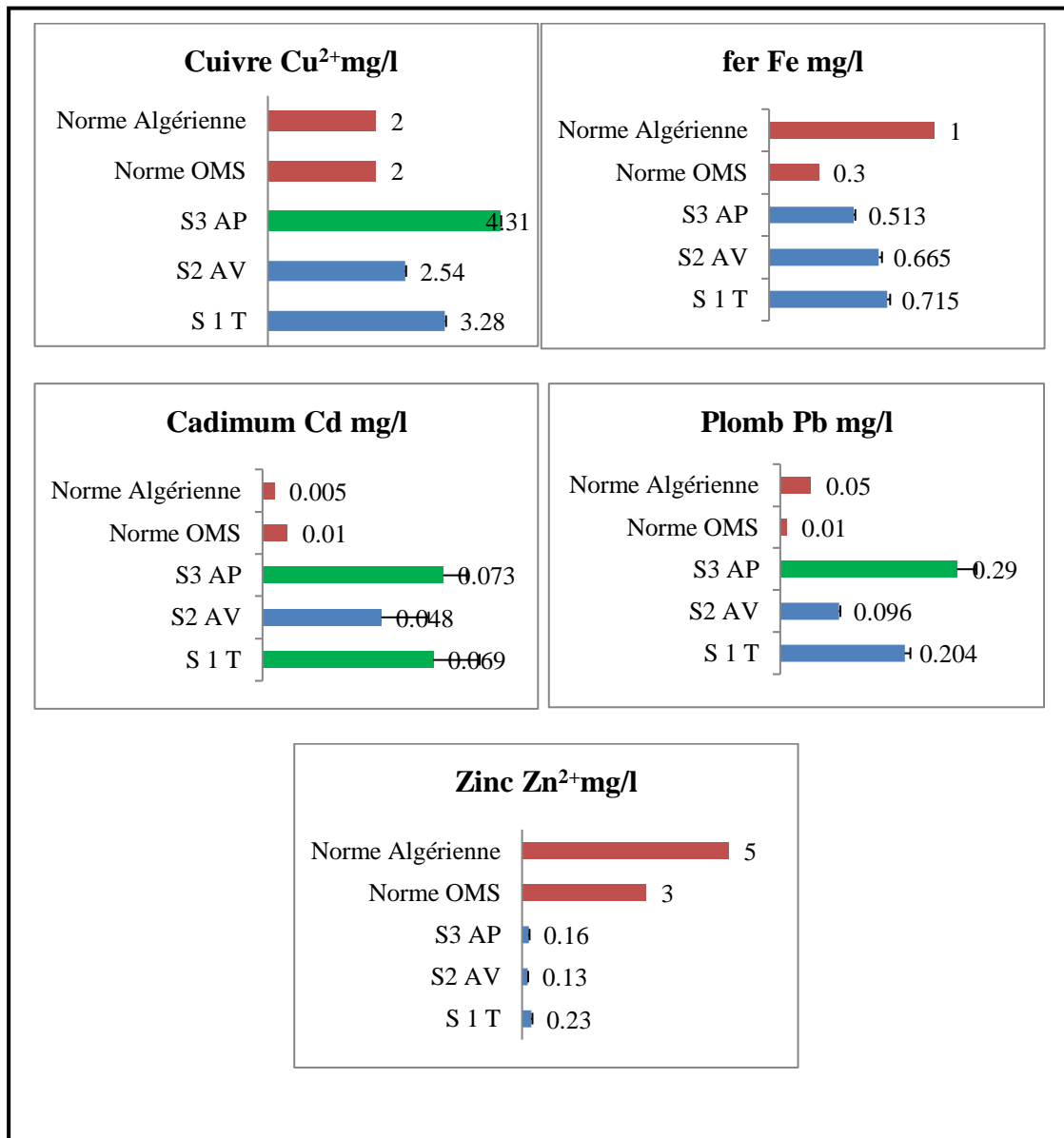


Figure 28. Variations des teneurs en ETM dans l'eau de l'oued et normes (n=3, p<0,05).

➤ Le plomb (Pb)

Le plomb présente un poids atomique de 207,2. Il est l'un des métaux les plus étudiés au monde du fait de sa toxicité et de sa présence durant des décennies dans les essences plombées (N'guessan, 2008). Seulement 1/6 du plomb libéré dans le système aquatique est sous forme dissoute, le reste est associé aux matières en suspension (grande affinité avec la matière organique). De ce fait, la majorité du plomb transporté par les eaux de surface se trouve dans les sédiments (Baize, 1997).

La figure 28, représente les teneurs en plomb des eaux d'Oued meskiana, les valeurs de cet élément oscillent entre 0.096 mg/l, valeur enregistrée pour la station S2AV et 0.29 mg/l, valeur obtenue dans la station S3AP (Aval). Les trois valeurs sont supérieures aux normes.

Selon Krystofova et al. (2009), les niveaux du Pb dans l'environnement ne sont pas stables, ils sont variables selon la production industrielle, l'urbanisation, les changements climatiques et de nombreux autres facteurs. Le Pb n'est pas un oligo-élément il possède un caractère toxique bien connu. Les formes organiques et inorganiques du Pb ont des effets toxiques chez l'homme. Leurs privilégié passage à l'homme ce fait à travers la chaîne alimentaire (Lee, 2012).

➤ Le cadmium (Cd)

Le cadmium est un métal blanc argenté ayant les propriétés physiques suivantes : ductile, malléable et très fusible, il possède un poids atomique de 112,40. Dans la nature, le cadmium est généralement associé au zinc (Rodier et al., 2009). D'une façon générale, les sédiments contiennent une très faible concentration de cadmium, mais il est très toxique (N'guessan, 2008).

Très toxique le cadmium est l'un des rares éléments n'ayant aucune fonction connue dans le corps humain ou chez les plantes. Il faut éviter son contact avec les aliments. Il a été rapporté par Djegbe et al. (2018) que le Cd est un élément mobile qui est facilement absorbé par les plantes racinaires.

Les valeurs de cadmiums enregistrés dans les trois sites étudiés sont supérieures aux normes. Le troisième site S3AP marque la plus forte valeur (0,073 mg/l) alors que la plus basse a été enregistrée dans le deuxième site S2AV (0,048 mg/l) (Tab 7, Fig. 28). Selon Rodier et al., (2009), lorsque des teneurs élevées sont rencontrées dans les eaux

superficielles, l'origine du cadmium doit être recherchée dans les effluents industriels, la fumée industrielle entraînée par les pluies, et même à partir de la dissolution de certaines canalisations galvanisées ou en matière plastique.

➤ Le Cuivre (Cu)

Le cuivre (Cu), de numéro atomique 29, est assez malléable, il possède une conductivité thermique et électrique exceptionnelle, et son usage est très répandu. Les sels de cuivre sont utilisés comme des ingrédients actifs dans les fongicides ou algicides en agriculture, pour le traitement chimique de surface, pour le tannage des peaux, ainsi que pour la fabrication de la peinture. Le cuivre peut provenir également de la corrosion des tuyauteries de distribution (Rodier et *al.*, 2009).

Les valeurs de cuivre dans les zones d'étude dépassent légèrement les normes, et cela pour les trois stations où nous marquons les valeurs 3.28, 2.54 et 4.31 mg/l respectivement (Fig. 28). La teneur en cuivre présente un accroissement de l'aval à l'amont de l'écoulement des eaux de l'oued étudié. Sa présence en teneurs élevées, dans l'environnement, est due essentiellement au déversement des eaux usées (El Makhfouk et *al.*, 2003) . Selon El Hayek (1989), la toxicité du cuivre diminue dans les eaux dures et sa présence dans les eaux usées joue un rôle négatif dans leurs autoépuration.

➤ Le zinc (Zn²⁺)

Le zinc (Zn), de numéro atomique 30, est naturellement, associé avec le Plomb, le Cuivre, l'Or, l'Argent et le Fer (Rodier et *al.*, 2009). Le zinc retrouvé dans les eaux de distribution provient des canalisations de laiton ou de fer galvanisé, attaquées par les eaux agressives ou riches en chlorures et sulfates. Employé aussi dans la fabrication de pigments de teinture, de vernis, comme raticide et dans la fabrication de batteries et de produits phytosanitaires (Baize, 1997). Pour l'agriculture, il est utilisé comme apport d'oligo-éléments, essentiellement pour les sols fortement calcaires (Bird et *al.*, 2005).

Cependant, comme tout oligo-élément, l'incorporation du Zn en quantité trop importante peut entraîner un phénomène de toxicité. En effet, le caractère phytotoxique de Zn a été démontré par de nombreuses études qui ont souligné une diminution de la production de biomasse dans des sols amendés avec des boues riches en Zn (Singh et *al.*, 2005).

Les eaux d'oued Meskiana représentent des teneurs en Zinc inférieures aux normes. Les valeurs de ce métal varient de 0.23 mg/l valeur enregistrée dans le site S1T (amont) à 0.13 mg/l en site S3AP (aval) marquant ainsi une diminution de l'amont vers l'aval (Fig. 28). Les teneurs moyennes en zinc dans les eaux d'Oued Meskiana confirment la dominance domestique des eaux usées du cours d'eau.

➤ Le Fer (Fe)

La présence de fer dans l'eau peut avoir une origine naturelle (lessivage des terrains argileux) ou industrielle (dans les industries métallurgiques ou sidérurgiques). Dans les eaux domestiques, le fer provient le plus souvent de la corrosion des conduites d'eaux (Rodier, 2009). En agriculture, le fer est un élément qui intervient dans la synthèse des éléments organiques indispensables à la vie des plantes. Le manque de fer disponible pour la plante entraîne un symptôme bien connu et fréquent : la chlorose des feuilles, qui prennent alors une teinte jaune plus ou moins prononcée (Naeve, 2006). Le fer (Fe) a pour origine la lixiviation des terrains traversés ou des pollutions industrielles

Les teneurs moyennes en fer, des eaux d'Oued Meskiana, varient de 0.715 à 0.513 mg/l (Fig.28). Les valeurs demeurent inférieures aux normes.

Enfin nous remarquons d'une façon globale qu'il y a une diminution des concentrations de tous les ETM mesurés en allant de l'amont vers l'aval ce qui peut être expliqué par l'effet de précipitation tout le long du cours d'eau. La légère augmentation en aval par rapport au mi trajet est probablement due au déversement des rejets d'eau riche en ETM.

Comparée aux normes pour les eaux de surface, les teneurs dépassent largement les normes pour le Pb, Cu et Cd, par contre les valeurs du Zn et du Fe sont faibles et en dessous des valeurs maximales limites. Selon la grille de qualité de Radoux, 1995 (ANNEXE 1) les eaux étudiées appartiennent à la classe 3 et sont considérées comme inaptes à la plupart des usages pour le Pb, Cu et Cd, et de classe 1A et 1B pour le Zn et le Fe à la suite. Nos résultats concordent avec la majorité des études réalisées dans le même contexte (Tamrabat 2011 ; Ababssa et *al.*, 2016, Addad et *al.*, 2017).

4.2.2. Indices de qualité, Salinité, et aptitude des eaux d'Oued Meskiana à l'irrigation

Le contexte semi-aride de la région de Meskiana fait que le recours à l'irrigation pour la majorité des cultures est inévitable. En Algérie, plus de 20 % des sols irrigués sont concernés par le problème de salinité (Hartani, 2004). Les sels dissous contenus dans l'eau ont un impact sur le sol et les plantes. En effet, les sels peuvent causer des changements dans la structure du sol (sur sa perméabilité et son aération), et affectent directement le développement des plantes (Person, 1978). Dans le but de bien identifier les faciès hydro-chimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des points échantillonnés, la représentation graphique des résultats d'analyse s'avère un outil inévitable. Les faciès hydro-chimiques, sont fréquemment utilisés en hydrogéologie pour décrire grossièrement la composition des eaux naturelles. On les détermine par le calcul des quantités en réaction (conversion des concentrations en méq/l, et en tenant compte de la classification des ions (formule ionique) (Boualla et *al.*, 2018). Pour atteindre cet objectif, des diagrammes ont été effectués par le logiciel Diagrammes d'Hydrochimie.

4.2.2.1 Indices de la qualité de l'eau

Résultats du calcul de quelque indice de qualité de l'eau d'Oued Meskiana destiné à l'irrigation

Tableau 8 : Quelques Indices de qualité de l'eau appliquée sur les eaux d'oued Meskiana destiné à l'irrigation

Stations Indices/ interprétation	S1T	S2AV	S3AP
Na% ⁽¹⁾	36%	31%	21%
Interprétation	Bonne	Bonne	Bonne
SAR ⁽²⁾	2.17 méq/l	1.75 méq/l	1.05 méq/l
Interprétation	Excellente	Excellente	Excellente
MH ⁽³⁾	27.02 méq/l	40.41 méq/l	49.72 méq/l
Interprétation	Recommandée pour l'irrigation	Recommandée pour l'irrigation	Recommandée pour l'irrigation
PI ⁽⁴⁾	44 méq/l	42 méq/l	26 méq/l
Interprétation	Appropriée pour l'irrigation	Appropriée pour l'irrigation	Appropriée pour l'irrigation
KR ⁽⁵⁾	0.54 méq/l	0.44 méq/l	0.26 méq/l
Interprétation	Acceptable pour l'irrigation	Acceptable pour l'irrigation	Acceptable pour l'irrigation

- (1) Pourcentage du sodium $\text{Na\%} = (\text{Na}^+ + \text{K}^+) / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K}^+) \times 100$ (méq/L) (Wilcox, 1984)
- (2) Sodium Absorption $\text{SAR} = \text{Na}^+ / ((\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}) / 2)^{0.5}$ (méq/L) (Richards, 1954)
- (3) Magnésium Hazard $\text{MH} = [\text{Mg}^{+2} / (\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})] \times 100$ (méq/L) (Szabolcs et Darab, 1964)
- (4) Indice de perméabilité $\text{PI} [\%] = \frac{(\text{Na}^+ + \sqrt{\text{HCO}_3^-})}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+} \times 100$ (méq/L) (Doneen, 1964)
- (5) Ratio de Kelly $\text{KR} = \text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ (méq/L) (Kelly, 1963).

Pour les indices calculés les résultats démontrent que les eaux étudiées peuvent être utilisées en irrigation sans aucun risque :

La pertinence de l'eau pour l'irrigation basée sur Na% (Tableau 8) qui montre que les 3 échantillons sont de bonne qualité. On projetant les échantillons de la zone d'études sur le diagramme de Wilcox, pour classer les eaux d'irrigation selon la CE et Na%.

Les eaux du l'oued prélevées dans la zone d'étude sont excellentes fondées sur les valeurs du SAR (Tab 8), les résultats sont projetés sur le diagramme de Riversid en rapporte avec la CE.

Selon le Magnésium Hazard (MH) tableau (8) les 3 échantillons ont été bons pour l'irrigation.

L'indice RSC classe tous les échantillons dans la catégorie sans danger pour l'irrigation (Tab.8).

La perméabilité (IP) du sol est affectée par l'utilisation à long terme de l'eau d'irrigation. Elle est influencée par le sodium, le calcium, le magnésium et bicarbonate contenu de sol (Raju et Janardhana, 2007). Selon le tableau (8) les eaux de surface de la zone d'étude sont dans la classe I (<75%) appropriée à des fins d'irrigation.

Le Ration de Kelle (KR) démontre aussi que les 3 échantillons conviennent pour l'irrigation.

Les résultats concordent avec ceux publiés par Bouaroudj *et al.* (2019) sur le barrage de Ben Haroune.

4.2.2.2. Facies chimiques des eaux

Le diagramme de piper est particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des faciès des eaux lorsque la minéralisation augmente, ou bien pour distinguer des groupes d'échantillons entre eux et indiquer les types de cations et anions dominants, il met en évidence l'incidence de la géologie sur la qualité des eaux.

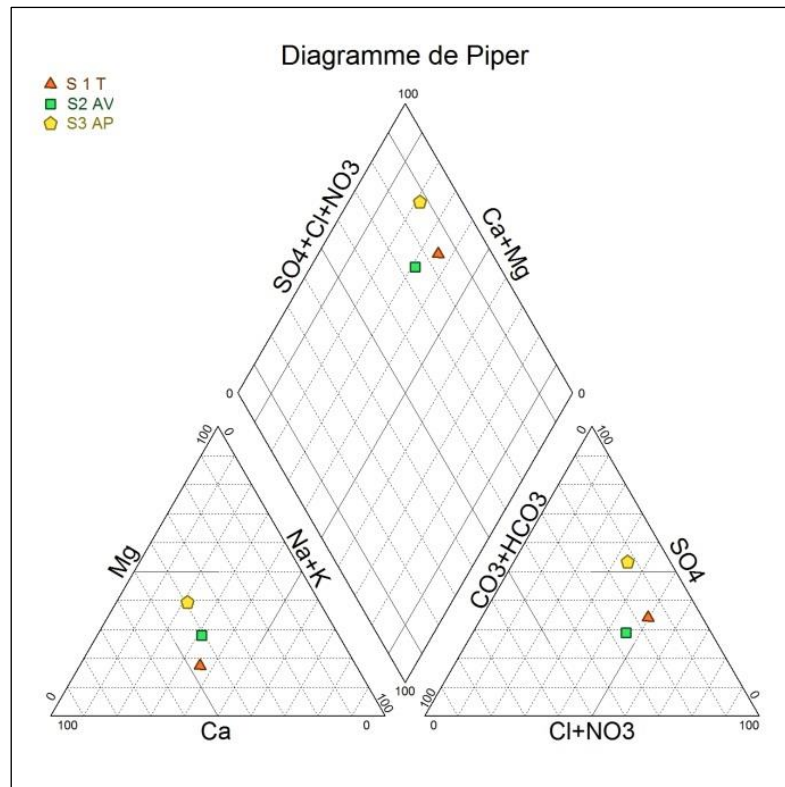


Figure 29. Diagramme de Piper pour les eaux d'Oued Meskiana.

La représentation de la composition chimique des eaux sur le diagramme de Piper définit un groupement de points à faciès chloruré sulfaté et calcique magnésienne. Constituant la majorité des eaux du bassin (fig.29).

4.2.2.3. Salinité et aptitude à l'irrigation

Les sels dissous contenus dans l'eau ont un impact sur les sols irrigués et les plantes cultivées, car le sodium exerce une action néfaste et indirecte, et cela en dégradant les propriétés physiques du sol (Todd, 1980), lorsque les sols sont soumis à l'irrigation avec des eaux riches en Na échangeable, ce dernier peut se substituer aux ions alcalino-terreux des argiles et défloculer ces dernières, entraînant leur imperméabilisation (Maait, 1997). La conductivité électrique et la salinité constituent de bons indicateurs d'appréciation des matières en solution, elles sont fortement liées et peuvent être d'origine naturelle ou anthropique (Rhoades, 1992). Le contrôle de la salinité de l'eau d'irrigation est d'une importance majeure que ce soit pour les eaux naturelles ou pour les eaux usées. (Rouabhia et Djabri, 2010). Ce risque se mesure par le Sodium Adsorption Ratio (SAR) et le pourcentage de sodium (Na%) de l'eau usagée utilisée en irrigation (Rhoades, 1992).

➤ **Diagrammes Richards (Echelle de Riverside)**

Utilisé Pour l'évaluation du risque de salinisation et de sodisation des sols ainsi que l'aptitude des eaux à l'irrigation. Lorsque la concentration des ions Na^+ à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent le plus fréquemment les cations Ca^{2+} (échange de base) dans le complexe adsorbant. Une eau chargée en sels peut provoquer cette action (Richards, 1954). Le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable, « Sodium Absorption Ratio : SAR » (Tab.8):

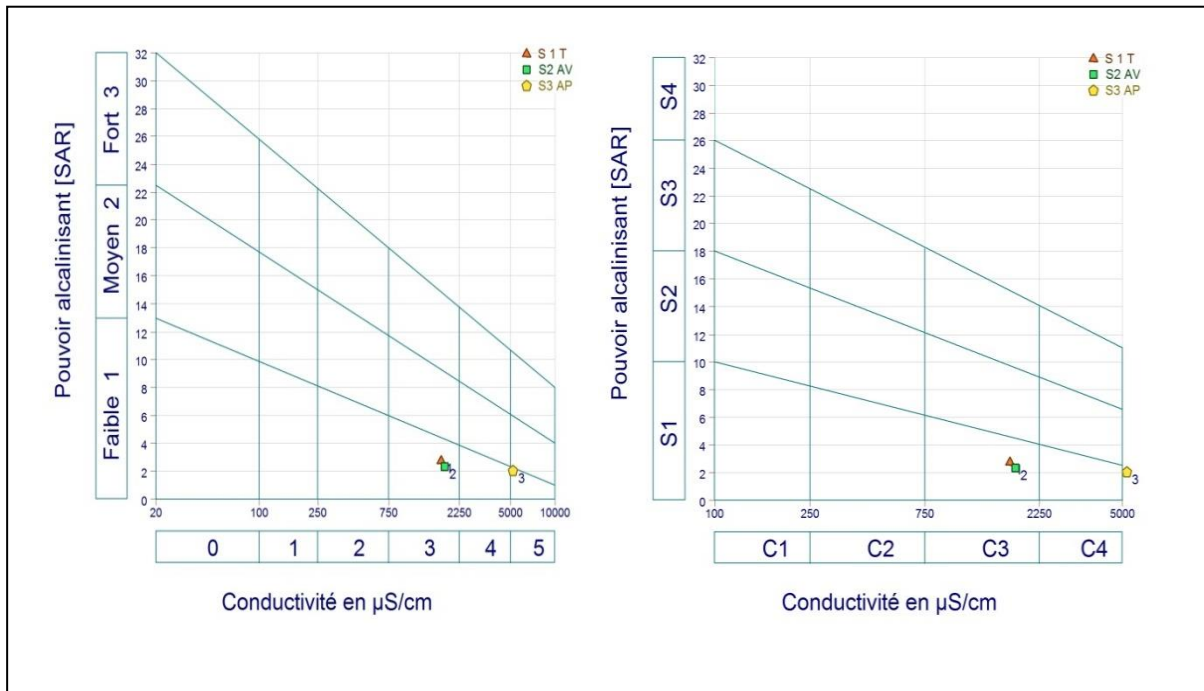


Figure 30. Diagramme de Richards (pouvoir alcalinisant) pour les eaux du site d'étude (Oued Meskiana)

Les valeurs obtenues de SAR sont (2.17, 1.75 et 1.05 méq/l pour les sites S1T, S2AV, et S3AP respectivement) en plus à la conductivité électrique (1.7, 1.79 et 5.19 S/cm pour les sites S1T, S2AV, et S3AP respectivement), ces résultats concordent avec ceux publiés par Zaiz et *al.*, 2017 au niveau d'Oued Douf et Tamrabat 2005 et *al.*, pour Oued El Gourzi.

Pour classer les eaux d'irrigation, on fait appel au diagramme de Richard (Richard, 1954) sur lequel les classes sont définies sur la base du taux d'absorption du sodium (SAR), en fonction de la conductivité électrique. Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé (fig.30), leur interprétation selon l'échelle de Riverside (Annexe) nous permet de classer les eaux des trois stations dans les catégories suivantes:

C3S1 : Eaux de qualité admissible pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés ou de bonne perméabilité dont la salinité doit être contrôlée pour les deux sites de la partie amont (S1T, S2AV).

C4S1 : Indiquent les eaux médiocres fortement minéralisées, susceptibles de convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés, cette classe a été détectée au niveau du site de la partie aval (S3AP) pollué par le déversement des eaux usées. On remarque que la station S3AP n'a pas pu être positionnée (la conductivité est supérieure à 3000 $\mu\text{s}/\text{cm}$) (ANNEXE 1).

➤ **Diagramme de Wilcox**

Vu que les plantes tiennent mal dans les sols saturés en sodium, une classification des échantillons d'eau selon le diagramme de Wilcox propose 5 classes d'eau pour l'agriculture en fonction de 3 éléments : la conductivité, le sodium exprimé en pourcentage et le bore (Wilcox, 1948). Dans notre étude le bore n'ayant pas été dosé, nous nous intéressons qu'à la conductivité et $\%Na^+$ (Tab.8, Fig. 31).

Cette classification, fait ressortir presque les mêmes classe d'eau, une bonne qualité pour les deux sites de la partie amont (témoin et avant déversement) et une eau classée de mauvaise qualité pour le site de l'avale soit après déversement. On constate donc que les eaux de la partie aval subissent une dégradation suite au déversement des eaux usées de la ville.

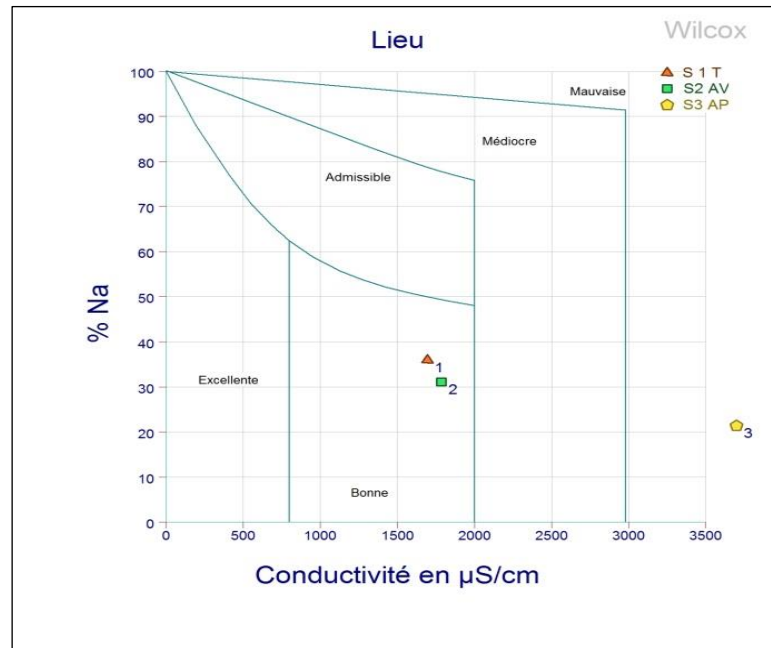


Figure 31. Diagramme de wilcox pour les eaux du site d'étude (Oued Meskiana).

Les résultats de la conductivité électrique et de la salinité des effluents de la zone d'étude est en accord avec ceux rapportés par Gouidia et *al.*, (2013) dans la même zone et par Zaiz et *al.*, (2017) pour Oued Souf et Dib et *al.*, (2017) pour Oued Boulefreis

Dans le cas où une mauvaise perméabilité du sol se produit, elle entrave l'apport d'eau à la culture. Elle rend beaucoup plus difficile les pratiques culturales sur la parcelle en question. Elle gêne la levée suite à l'encroûtement de surface (produit par l'engorgement du sol). Ces phénomènes s'accompagnent de toute une série d'inconvénients dont les maladies, la salinité, les mauvaises herbes et les problèmes d'aération et de nutrition (Maait, 1997).

4.3. Impact de l'irrigation sur les sols de la région d'études

4.3.1. Caractéristique physico-chimique du sol pour la station témoin (S1T)

Tableau 9. Caractéristiques physico-chimiques du sol Témoin non irrigué (n=15, p≤0,05).

Paramètres	Valeurs			
	Min	Max	Moy	ECT
pH	7,88	8,09	7,98	0,11
CE (ms/cm)	0,85	1,52	1,08	0,38
CaCO ₃ (%)	31,60	33,43	32,63	0,94
Alc (meq/100g)	1,90	2,90	2,43	0,50
Cl ⁻ (meq/100g)	14,00	25,00	19,33	5,51
P ₂ O ₅ (mg/kg)	0,95	1,62	1,18	0,38
SO ₄ (meq/l)	47,10	66,60	58,63	10,23
MO %	2,16	2,56	2,29	0,23
CEC	8,23	9,94	9,31	0,94
N%	0,50	2,55	1,53	1,03
C/N	0,60	2,54	1,32	1,06
Pb (ppm)	0,00	0,00	0,00	0,00
Cd (ppm)	0,00	1,00	0,33	0,58
Zn (ppm)	0,00	0,00	0,00	0,00

Tableau 10. Caractéristiques physico-chimiques du sol Témoin selon les profondeurs (n=5, p≤0,05).

profondeur	Station 1 S1T											
	Prof 1				Prof 2				Prof 3			
	Min	Max	Moy	EcT	min	Max	Moy	ECT	Min	Max	Moy	ECT
pH-eau	7,79	7,99	7,88	0,07	7,95	8,01	7,98	0,02	8,08	8,11	8,09	0,01
CE (mS/cm)	0,87	0,87	0,87	0,00	0,85	0,85	0,85	0,00	1,52	1,52	1,52	0,00
CaCO ₃ (meq/l)	32,00	33,70	32,87	0,60	32,90	33,70	33,43	0,33	30,40	34,00	31,60	1,47
HCO ₃ ⁻ (meq/l)	2,90	2,90	2,90	0,00	1,90	1,90	1,90	0,00	2,50	2,50	2,50	0,00
CL ⁻ (meq/l)	14,00	14,00	14,00	0,00	19,00	19,00	19,00	0,00	25,00	25,00	25,00	0,00
P ₂ O ₅ (mg/kg)	1,61	1,64	1,62	0,01	0,93	1,01	0,97	0,03	0,94	0,96	0,95	0,01
SO ₄ ²⁻ (meq/l)	41,40	52,80	47,10	4,03	49,80	74,60	62,20	8,77	46,40	86,80	66,60	14,28
MO %	0,00	5,17	2,16	1,90	0,00	3,88	2,16	1,40	2,59	2,59	2,59	0,00
CEC	9,80	10,40	9,98	0,25	8,20	8,30	8,25	0,04	9,72	9,81	9,76	0,03
N %	1,25	1,77	1,53	0,20	0,40	0,60	0,50	0,08	2,30	2,80	2,55	0,21
C/N	0,70	1,08	0,83	0,15	2,08	3,00	2,58	0,37	0,44	0,75	0,60	0,12
Pb (ppm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cd (ppm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zn (ppm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Le sol de la station témoin se caractérise selon les Tableaux 9 Et 10 par :

- Une texture argilo- limoneuse selon le Triangle Textural (Clément, 2013).
- Le pH-eau : est faiblement alcalin (basique) avec une moyenne de 7.98 ($\pm 0.07/n=5$), (Clément et al. 2003) (ANNEXE 2)
- La salinité totale représentée par la conductivité électrique avec une moyenne de 1.08 mS/cm indiquant qu'il s'agit d'un sol salé (Clément et al. 2003) (ANNEXE 2).
- Une faible teneur en Matière Organique de 2.29 % Selon Soltner (1981) (ANNEXE 2).
- Le sol de la station SIT est fortement calcaire avec un taux de 32.63 % (Baize, 1988).
- La Capacité d'Echange Cationique (CEC) est égale à 9.31 meq/100g selon le programme interprétation LANO/CA de Basse Normandie, la CEC est moyenne.
- Le phosphore assimilable pour le sol témoin est d'une moyenne de 1.18 mg/kg, il est considéré comme très faible (LANO : Laboratoire Agronomique de la Normandie) (ANNEXE 2).
- Le sol est très riche en Azote total selon le programme interprétation LANO/CA de Basse Normandie.
- Les teneurs en ETM sont presque introuvables pour le Pb, Zn, avec quelque valeur positif pour le Cd.

4.3.2. Caractérisation des sols des deux sites irrigués par les eaux de l'oued étudié

Les tableaux 11 et 12 ci-dessous résument les résultats obtenus pour divers paramètres, réalisés sur des échantillons de sol avec plusieurs répétitions ($n=5$, $p \leq 0,05$).

Tableau 11. Caractéristiques physico-chimiques des sols pour les sites irrigués ($n=5$, $p \leq 0,05$).

Station	S2AV				S3AP			
	Min	Max	Moy	ECT	Min	Max	Moy	ECT
pH	7,95	8,00	7,98	0,03	7,97	8,00	7,99	0,01
CE (ms/cm)	1,26	1,29	1,27	0,01	2,56	2,96	2,80	0,22
CaCO ₃ %	30,73	32,14	31,31	0,74	32,29	32,51	32,40	0,11
Alc (meq/100g)	1,60	2,02	1,87	0,24	1,66	1,98	1,78	0,17
Cl meq/100g	17,20	20,60	19,33	1,86	20,00	24,80	22,67	2,44
P ₂ O ₅ mg/kg	10,96	21,03	14,88	5,39	13,48	18,76	16,53	2,74
So ₄ meq/l	45,20	92,00	73,85	25,11	146,70	173,42	163,96	14,97
MO %	2,67	4,21	3,49	0,77	4,88	5,85	5,32	0,50
CEC	16,49	25,99	19,75	5,41	21,36	23,68	22,54	1,16
N%	0,51	0,90	0,65	0,22	0,72	2,05	1,27	0,69
C/N	2,81	5,61	4,26	1,40	1,40	5,64	3,75	2,16
Pb (ppm)	0,78	5,19	2,46	2,39	0,00	0,89	0,48	0,45
Cd (ppm)	1,21	1,68	1,49	0,25	0,00	2,73	1,63	1,44
Zn (ppm)	16,81	68,81	35,62	28,83	6,92	9,44	8,21	1,26

Tableau 12. Caractéristiques physico-chimiques des sols pour les deux sites irrigués, selon les profondeurs ($n=5$, $p \leq 0,05$).

	Station 2 S2AV											
	Prof 1				Prof 2				Prof 3			
	Min	Max	moy	ECT	Min	Max	moy	ECT	Min	Max	moy	ECT
pH-eau	7,63	8,16	7,95	0,20	7,85	8,15	8,00	0,11	7,84	8,13	8,00	0,11
CE (mS/cm)	0,96	1,60	1,26	0,23	1,00	1,56	1,29	0,21	1,04	1,56	1,26	0,23
CaCO ₃ (meq/l)	29,80	32,47	31,07	1,14	31,33	32,73	32,14	0,56	29,93	32,07	30,73	0,80
HCO ₃ (meq/l)	1,40	3,00	2,02	0,62	1,50	2,50	2,00	0,38	1,40	2,10	1,60	0,29
CL- (meq/l)	7,00	29,00	20,60	8,32	7,00	25,00	17,20	6,72	15,00	28,00	20,20	4,87
P ₂ O ₅ (mg/kg	12,43	30,40	21,03	6,72	8,97	16,10	12,66	3,24	10,36	12,23	10,96	0,76
SO ₄ ²⁻ (meq/l)	28,20	69,40	45,20	17,65	48,60	181,70	92,00	51,79	51,70	122,80	84,36	33,14
MO %	2,36	7,29	4,21	1,84	1,62	3,34	2,67	0,72	2,16	5,79	3,59	1,54
CEC	24,99	26,99	25,98	0,71	16,50	17,01	16,77	0,18	16,29	16,62	16,50	0,13
N %	0,85	1,01	0,90	0,07	0,49	0,61	0,54	0,05	0,41	0,61	0,51	0,07
C/N	1,52	5,46	2,85	1,52	1,68	9,65	4,21	3,15	2,36	14,25	5,90	5,07
Pb (ppm)	0,00	0,65	0,39	0,36	0,00	6,48	2,60	3,14	0,00	1,80	0,70	0,81
Cd (ppm)	0,00	2,23	0,84	0,94	0,00	0,80	0,61	0,34	0,00	1,40	0,79	0,54
Zn (ppm)	4,40	37,40	34,41	57,65	4,00	28,70	10,62	10,40	0,00	14,30	8,41	5,96

Suite tableau 12 :

	Station 3 S3AP											
	Prof 1				Prof 2				Prof 3			
	Min	Max	Moy	ECT	Min	Max	Moy	ECT	Min	Max	Moy	ECT
pH-eau	7,52	8,22	7,98	0,27	7,57	8,16	7,97	0,24	7,76	8,11	8,00	0,14
CE (mS/cm)	2,11	5,00	2,96	1,25	2,24	3,46	2,89	0,57	2,07	2,90	2,56	0,40
CaCO ₃ (meq/l)	31,87	33,47	32,40	0,70	30,67	34,40	32,29	1,57	30,10	35,80	32,51	2,29
HCO ₃ (meq/l)	1,60	2,50	1,98	0,36	1,50	1,90	1,70	0,16	1,40	1,80	1,66	0,17
Cl ⁻ (meq/l)	15,00	32,00	24,80	7,12	17,00	22,00	20,00	1,87	18,00	28,00	23,20	3,83
P ₂ O ₅ (mg/kg	11,83	23,61	18,76	5,01	7,14	23,50	13,48	6,46	9,32	36,49	17,36	11,34
SO ₄ ²⁻ (meq/l)	49,70	280,90	146,70	84,65	142,60	196,50	173,42	26,15	149,80	224,00	171,76	31,33
MO %	3,16	8,11	5,22	2,08	4,02	8,11	5,86	1,71	3,20	7,31	4,87	1,78
CEC	21,30	25,30	23,69	1,73	17,35	24,66	22,11	2,88	20,90	21,97	21,36	0,49
N %	2,01	2,09	2,05	0,04	1,01	1,10	1,04	0,04	0,60	0,85	0,72	0,11
C/N	0,30	2,76	1,39	0,94	3,25	5,78	4,17	1,01	3,69	8,30	5,61	1,70
Pb (ppm)	0,00	1,39	0,28	0,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cd (ppm)	0,00	2,70	1,37	0,96	0,00	0,90	0,45	0,43	0,00	3,40	1,08	1,37
Zn (ppm)	0,00	8,50	4,14	3,38	0,00	13,30	4,71	5,41	0,50	8,10	3,80	2,99

Le sol du site S2AV représente une texture argileuse limoneuse assez lourde. Selon les Tableaux 11 et 12, le pH est faiblement alcalin (Clément et Pieltain, 2003), la teneur moyenne en matière organique (3.49 %), est considérée comme moyenne selon Solner (1981), une conductivité électrique moyenne de 1.27 qui donne selon Clément (2003) un sol salé et une CEC élevée (LANO). Le sol du site est fortement calcaire avec une fertilité moyenne (Baize, 1988), et des teneurs extrêmement élevées en azote total, et moyenne en phosphore assimilable.

Le sol du site S3AP a presque les mêmes caractéristiques que le sol du site S2AV sauf pour la Matière Organique, l'azote total et la salinité (CE, CEC) qui augmentent fortement pour les normes de LANO (Laboratoire Agronomique de la Normandie), ce qui permet d'améliorer la cohérence des éléments structuraux, de favoriser la rétention en eau utile, de participer au stockage réversible des éléments nutritionnels, de limiter le développement de certains parasites et d'augmenter l'aération du sol, Cependant, de hautes teneurs en matière organique peuvent être révélatrices de mauvaises conditions de croissance si elles sont associées à de mauvaises conditions de drainage (Ghislain, 2012).

4.3.3. Effet de l'irrigation sur les paramètres physico-chimiques des sols (sites /profondeurs)

Pour appréhender l'impact potentiel de l'irrigation avec les eaux d'oued Meskiana exposées au déversement d'eaux usées, sur les caractéristiques des sols des terres agricoles, et leur redistribution sur les profondeurs du sol, nous avons soumis les résultats des différents paramètres étudiés à une analyse de la variance (ANOVA), après avoir vérifié les conditions d'application de ce test, notre ANOVA a été effectuée sur une matrice de données constituée de 3 stations et 3 profondeurs, 5 prélèvements pour chaque profondeur (3 stations x 3 profondeurs x 5 répétitions) au cours desquels les 14 variables (pH, conductivité, Alcalinité, Chlorure, Sulfate, Phosphore Assimilable, Azote Total, Matière Organique, Calcaire Total, CEC, Plomb, Zinc et Cadmium) ont été analysées. Le tableau ci-dessous (Tab 13) donne un résumé des carrés moyens de la variance et leurs significations.

Tableau 13. Carré moyen de l'analyse de variance des paramètres mesurés (ANOVA).

Source	Variable dépendante	ddl	Carré moyen	Signification	Interprétation
Site	pH	2	,000	,982	ns
	CE	2	11,721	,000	***
	CaCo ₃	2	7,030	,003	**
	Alc (HCO ₃)	2	1,740	,000	***
	Cl ⁻	2	49,686	,130	ns
	P ₂ O ₅	2	1047,999	,000	***
	SO ₄ ²⁻	2	46064,950	,000	***
	MO	2	27,610	,000	***
	CEC	2	477,605	,000	***
	N%	2	3,000	,000	***
	C/N	2	37,623	,002	**
	Pb	2	6,846	,010	*
	Cd	2	3,552	,001	***
	Zn	2	1261,733	,060	ns
Prof	pH	2	,021	,449	ns
	CE	2	,041	,849	ns
	CaCo ₃	2	4,131	,029	ns
	Alc (HCO ₃)	2	,802	,001	***
	Cl ⁻	2	60,011	,087	ns
	P ₂ O ₅	2	92,417	,053	ns
	SO ₄ ²⁻	2	4574,816	,063	ns
	MO	2	,485	,818	ns
	CEC	2	48,080	,000	***
	N%	2	2,495	,000	***

Suite Tableau 13

	C/N	2	23,815	,015	*
	Pb	2	1,969	,235	ns
	Cd	2	,382	,400	ns
	Zn	2	304,556	,486	ns
site * prof	pH	4	,017	,616	ns
	CE	4	,393	,207	ns
	CaCO ₃	4	1,137	,378	ns
	Alc (HCO ₃)	4	,431	,004	**
	Cl ⁻	4	63,460	,043	*
	P ₂ O ₅	4	44,681	,209	ns
	SO ₄ ²⁻	4	373,161	,910	ns
	MO	4	2,471	,405	ns
	CEC	4	57,166	,000	***
	N%	4	2,491	,000	***
	C/N	4	8,353	,181	ns
	Pb	4	2,606	,116	ns
	Cd	4	1,034	,057	ns
	Zn	4	353,917	,499	ns

ns, *, **, ***= effet non significatif, significatif, hautement significatif, très hautement significatif respectivement

CE: conductivité électrique; CaCO₃ : Calcaire Total, Alc : alcalinité (Hco₃⁻), cl: chlorures, P₂O₅ phosphore assimilable, SO₄²⁻ : sulfate, MO : matière organique, CEC : Capacité d'échange Cationique, N% : Azote total kjeldahl, C/N : rapport Carbone, Pb : plomb, Cd : cadmium, et le Zn : zinc respectivement.

L'erreur est représentée dans un tableau séparé (ANNEXE 2).

Suivant cette synthèse statistique, nous pouvons noter ce qui suit :

L'effet site est significatif à très hautement significatif pour la majorité des paramètres sauf pour le pH, Cl⁻ et le Zn où l'effet est non significatif

L'effet profondeur est significatif à très hautement significatif que pour 4 paramètres l'alcalinité, la CEC, L'azote total et le rapport Carbone, le reste n'est pas significatif.

L'effet interaction (profondeur * site) est non significatif pour la majorité des paramètres, mis à part les chlorures, l'alcalinité, la CEC et l'azote total dont l'effet est de significatif à très hautement significatif (Tab.13).

4.3.3.1. Variation du pH dans le sol (pH –eau)

L'activité du sol, tout comme la disponibilité de la majeure partie des éléments nutritifs dépend du pH.

Le pH-eau (Acidité Effective) correspond à la concentration en ions H^+ libres, existant dans la solution du sol.

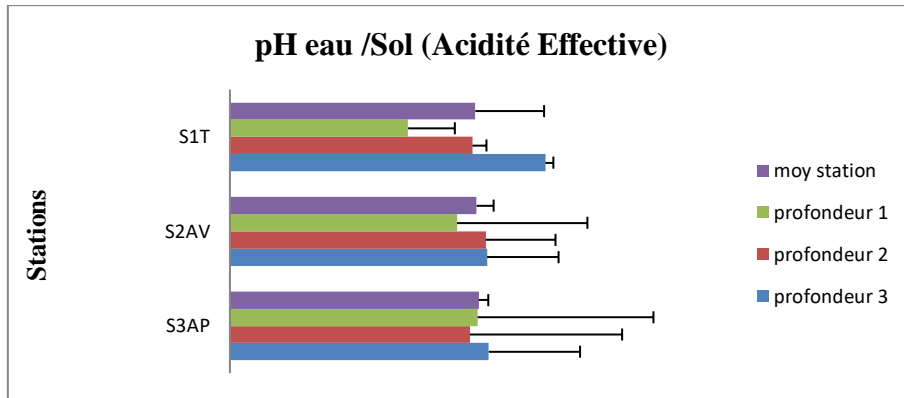


Figure 32. Variations des teneurs en pH eau dans les sols étudiés selon les stations et les profondeurs (n=5, $p \leq 0,05$).

Selon l'échelle d'interprétation du pH-eau signalé par (Clément et Pieltain, 2003, ANNEXE 2), les valeurs des deux stations et des 3 profondeurs, sont faiblement alcalines (basique) avec une moyenne de 7.98 et 7.99 (Tab.11 et 12, Fig. 32). Cet intervalle rentre dans la fourchette des pH courants des sols en région semi-arides. La migration verticale n'est pas observée. Selon Benkhoubi (2016), un pH-eau de sol légèrement basique empêche modérément la minéralisation et la dissolution des nutriments pour les rendre disponibles aux racines des plantes.

4.3.3.2. Variation de la salinité totale du sol (CE)

La conductivité électrique traduit la capacité d'une solution aqueuse à conduire le courant électrique. Elle est directement proportionnelle à la quantité des sels minéraux dissous dans l'eau. L'eau d'irrigation est la principale source d'apport de sels du sol (Hussain et Al-Saati, 1999 ; Nakayama et Bucks, 1986).

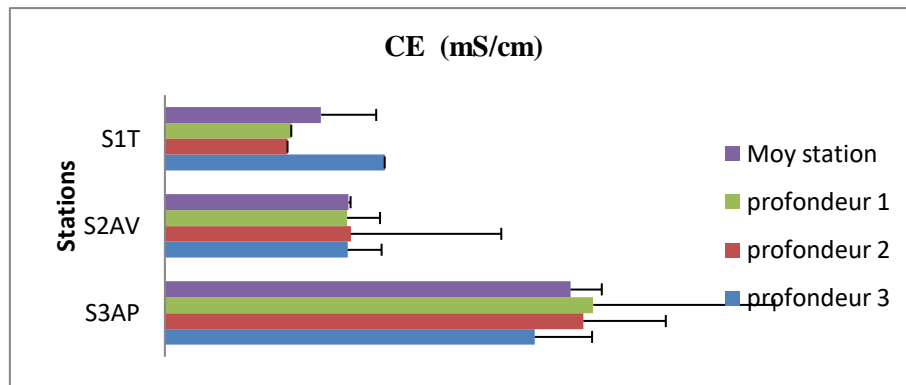


Figure 33. Variations de la Salinité totale (CE) dans les sols étudiés selon les stations et les profondeurs (n=5, p<0,05).

Les valeurs de la salinité se différencient entre la station aval (S3AP) la plus élevée avec 2.80 mS/cm et celle de l'amont (S2AV) avec 1.27 mS/cm. Elles indiquent des variations notables dans les sols à cause du type d'eaux utilisés en irrigation. La conductivité électrique traduit le caractère salin ou non des sols. Ces valeurs obtenues expriment une forte teneur en sel pour les deux stations ce qui signifie selon Clément et Pieltain, 2003, que ces sols sont salés pour la partie amont, et très salés pour la station de la partie aval (S3AP) (ANNEXE2). L'effet site est très hautement significatif, il est dans notre cas influencé par le type d'eaux utilisés en irrigation (Tab.11 et 12, Fig. 33). L'irrigation des cultures, avec les eaux polluées, augmente, donc, la salinité des sols irrigués. Mohammad et Mazahreh (2003) rapportent que l'augmentation de la conductivité du sol irrigué avec l'eau de la partie aval comparée à celle du sol irrigué avec l'eau de la partie amont est attribuée aux matières dissoutes dans l'eau usée. D'autres par Addad et al. (2017) mentionnent que la concentration des sels dissous varie largement sous l'influence de divers facteurs comme les caractéristiques physiques des sols, les remontées d'eau capillaire du sous-sol et le climat. Elle est accélérée, en été, par l'évaporation.

4.3.3.3. Variation du Calcaire totale (CaCO_3) dans le sol

Le constituant essentiel du calcaire est le carbonate de calcium, cristallisé sous forme de calcite à symétrie rhomboédrique (Deoshorta, 1979). Le calcaire est une roche sédimentaire principalement organogène qui peut être détritique (contenant au moins 50% de CaCO_3) (Baize et Girard, 1995). Le calcaire total consiste en des débris de la taille des grains de sable n'ayant aucun lien direct avec la matière organique (Ben Hassine et al, 2008). Le calcaire fournit aux végétaux le calcium nécessaire. Entre autres, le calcaire bloque certains éléments indispensables aux plantes comme le fer et divers oligoéléments (notamment

manganèse, cuivre), il provoque alors des carences (qui se manifestent par exemple par des chloroses chez les végétaux) (Baba Ahmed et Bouhadjera, 2010).

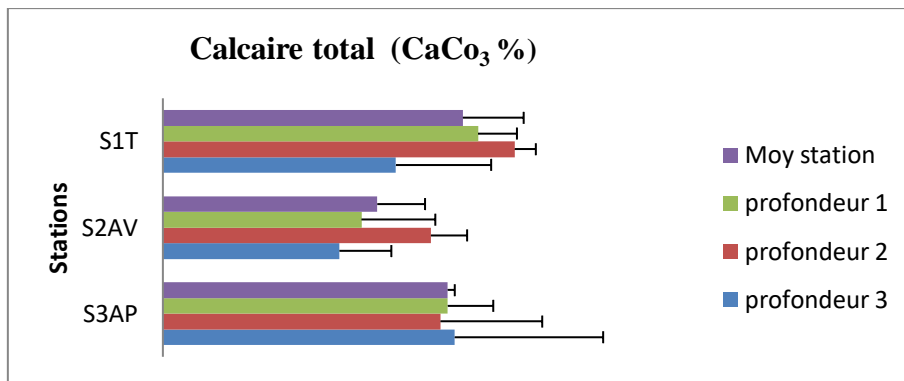


Figure 34. Variations du calcaire total (CT) dans les sols étudiés selon les stations et les profondeurs (n=5, p≤0,05).

Le taux de calcaire total montre une légère variabilité entre les différentes stations et profondeur de prélèvement. Les valeurs moyennes obtenues sont de 32.40% pour les sols de la partie avale et de 31.31% pour l'amont (Tab.11 et 12, Fig. 34). En comparant les valeurs obtenues aux normes signalées par Baize, (1988) (ANNEXE 2), nous constatons que les sols étudiés sont fortement calcaires, idem pour la station témoin, donc la nature géologique joue un rôle important dans les valeurs obtenues.

L'ANOVA révèle une différence hautement significative pour le facteur site donc, il révèle un changement du CT suite à l'irrigation avec les eaux de la partie avale qui sont chargées en calcaire suite probablement au ruissellement.

Au-delà de 5%, les réserves naturelles de calcium et leur libération progressive par dissolution sous l'effet des précipitations et de l'activité chimique et biologique du sol, rend inutile tout recours au chaulage sur le très long terme (Addad et *al.*, 2017).

4.3.3.4. Variation des Sulfates (SO_4^{2-}) et des Chlorures (Cl^-) dans le sol

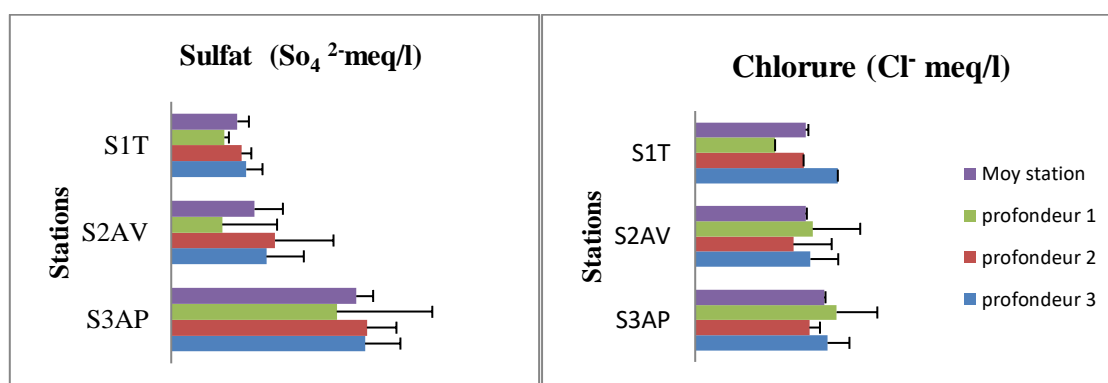


Figure 35. Variations des Sulfates (SO_4^{2-}) et des chlorures dans les sols étudiés selon les stations et les profondeurs ($n=5$, $p \leq 0,05$).

Les concentrations en sulfates sont plus importantes que celles des chlorures. Elles sont très variables du Témoin (S1T) (58.63 méq/l) ce qui donne une très haute signification pour l'effet site, en amont avec une moyenne de 73.85 méq/l, et la valeur maximale enregistrée en aval (171.76 méq/l) (Tab.11 et 12, Fig.35). Ces taux relativement plus élevés sont à rattacher aux apports gypseux triasiques des Tessala.

Les chlorures apparaissent relativement homogènes de 22.67 méq/l (S3AP) à 19.33 méq/l (S2AV) (Tab.11 et 12, Fig.35), mais en faible quantité. Sur l'ensemble des analyses chimiques effectuées, seul l'échantillon prélevé dans la station S3AP qui a montré un taux important, probablement dû au type d'eaux polluées utilisées pour l'irrigation de ces dernières, un effet significatif pour l'interaction sites*profondeurs a été signalé.

4.3.3.5. Variation de la Matière Organique (MO) dans le sol

La matière organique (MO) exerce, au même titre que le pH, une grande influence sur les propriétés physiques et chimiques du sol (Rattan et *al.*, 2005). Elle est un élément de la stabilité du sol. Elle tire son importance du fait qu'elle constitue le milieu d'activité et de nutrition des microorganismes du sol, et c'est aussi une source de minéraux pour les plantes (Daudu, 2008). Un taux de 1,5 % est la limite critique théorique, au-dessous de laquelle la fertilité diminue rapidement et il est souvent souhaitable de viser à maintenir un taux minimal de 2,5 % en général et même de 3,5 à 4 % dans les sols lourds (Ghislain, 2012).

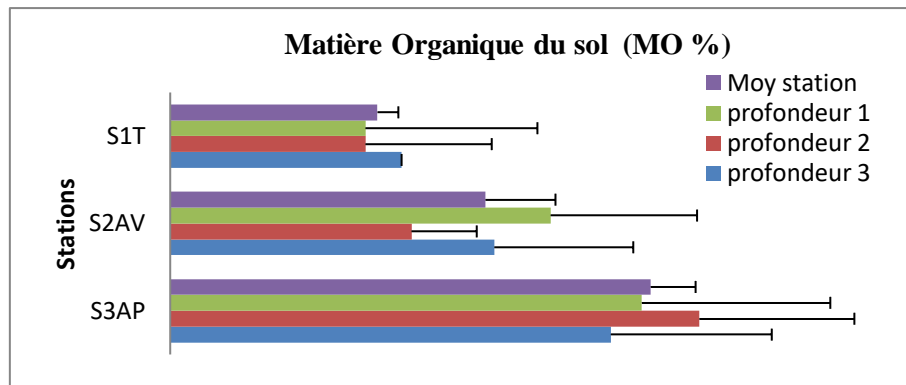


Figure 36. Variations de la Matière Organique (MO) dans les sols étudiés selon les stations et les profondeurs (n=5, $p \leq 0,05$).

Les teneurs moyennes en matière organique (MO) des horizons étudiés varient entre 3.49 et 5.32% pour les sites S2AV et S3AP respectivement (Tab.11 et 12, Fig.36), Les teneurs relativement très élevées au niveau de la partie avale de ce dernier sont dues probablement aux amendements des sols en fertilisants, issue des eaux polluées utilisées illégalement pour l'irrigation des cultures (ANNEXE2). Pour la station amont les valeurs, sont moyennement élevées, et cela est sûrement dû à la végétation naturelle, qui est très dense et à l'élevage bovin et ovin (déjection animal). La Matière Organique est positionnée différemment dans les horizons du sol analysé. La valeur la plus élevée se trouve en surface (0-10 cm) pour les trois stations. Tamrabet (2007) a observé que la MO s'accumule plus dans l'horizon de surface du sol pour toutes les stations analysées. De même une accumulation de la matière organique apportée par les eaux usées, dans l'horizon de surface, est observées aussi par Mohammed et Mazahreh (2003), par Rusan *et al.*, (2007) et par Ablain (2004) après l'apport d'eaux polluées aux eaux usées. Les fluctuations observées au niveau des parcelles irriguées avec les eaux usées sont dues à la distribution non homogène des eaux usées d'irrigation, aux résidus et aux pratiques culturales. Selon Sparks, (2003), la MO dans les sols des régions semi-arides, est inférieure à 1%. Les sols soumis à l'irrigation avec les eaux usées traitées ou brutes se distinguent par une amélioration du taux de MO, ce qui affecte l'agrégation du sol, réserve en minéraux et leur disponibilité ainsi que leur activité biologique (Hillel, 1998). Mancino et Pepper, (1992), added (2017) ont observé une augmentation de la matière organique dans les sols irrigués avec les eaux usées mélangées aux eaux d'Oued ce qui concorde avec nos résultats.

4.3.3.6. Variation de l'Azote Total (N%) dans le sol

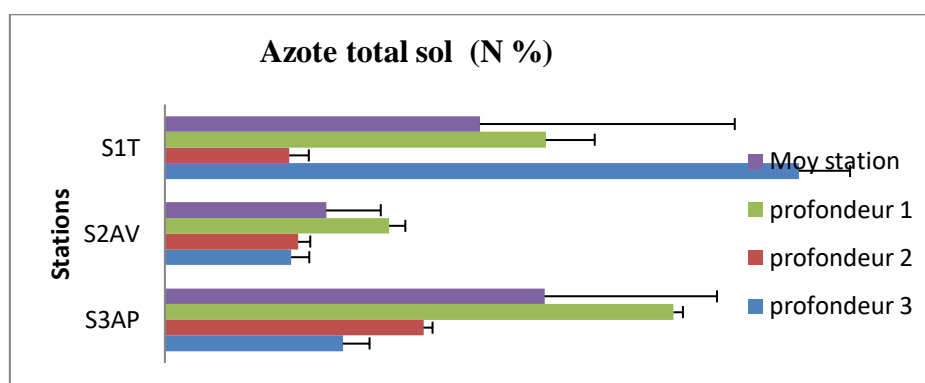


Figure 37. Variations de l'azote total dans les sols étudiés selon les stations et les profondeurs étudiées ($n=5$, $p \leq 0,05$).

Selon Bazri (2015) les teneurs élevées en azote sont liées aux grandes quantités de matière organique qui joue un rôle important dans l'approvisionnement du sol en azote après sa minéralisation.

Les teneurs moyennes en azote kjeldahl total des sols étudiés sont de l'ordre de 1.53% pour la station S3AP en aval et de 0.65 % pour la station amont, avec une diminution en profondeur bien représentée (Tab.11 et 12, Fig.37). Les sols des deux stations sont très riches en azote selon le programme d'interprétation de Basse Normandie (LANO, ANNEXE2). De sa part Belaid (2010) dans une étude portant sur les effets des eaux usées sur la fertilité des sols irrigués, a remarqué que les teneurs les plus élevées d'azote soluble ont été détectées dans les niveaux superficiels du sol ce qui confirme nos résultats.

On suggère que les eaux usées contiennent de l'azote en excès des besoins des cultures. La valorisation de cet élément diffère d'une culture à l'autre, c'est le cas dans la présente étude où l'effet est apparent.

4.3.3.7. Calcul du Rapport C/N dans le sol (Carbone/l'azote total)

Le rapport C/N est un indicateur de l'activité biologique du sol, il renseigne sur le degré moyen d'évolution de la matière organique, l'activité biologique et le potentiel de minéralisation de l'azote. Plus le rapport C/N est élevé (supérieur à 12) plus l'activité biologique est réduite et la minéralisation rencontre des difficultés (acidité excessive, sol insuffisamment oxygéné) (Dibet et *al.*, 2013 ; Bazri, 2015).

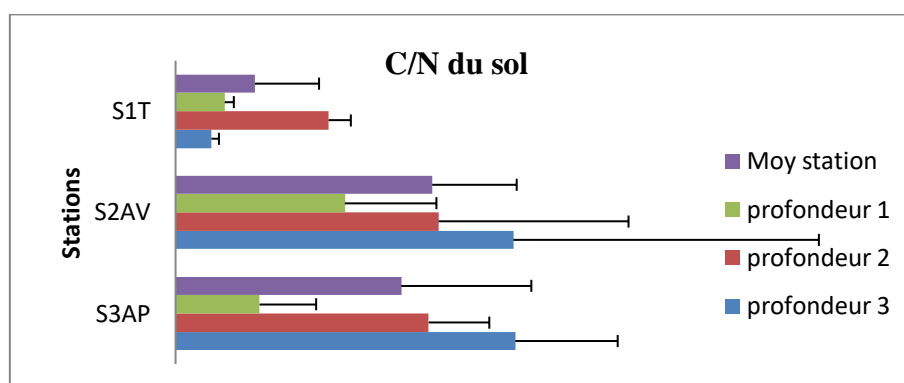


Figure 38. Variations du rapporte C/N dans les sols étudiés selon les stations et les profondeurs (n=5, p≤0,05).

Les résultats de notre étude montrent que le rapport C/N dans les trois stations et les trois profondeurs est inférieur à 12 ce qui reflète la présence d'une bonne activité biologique, donc un taux de minéralisation élevé (Rattan et *al.*, 2005).

4.3.3.8. Variation de la Capacité d'Echange Cationique (CEC) dans le sol

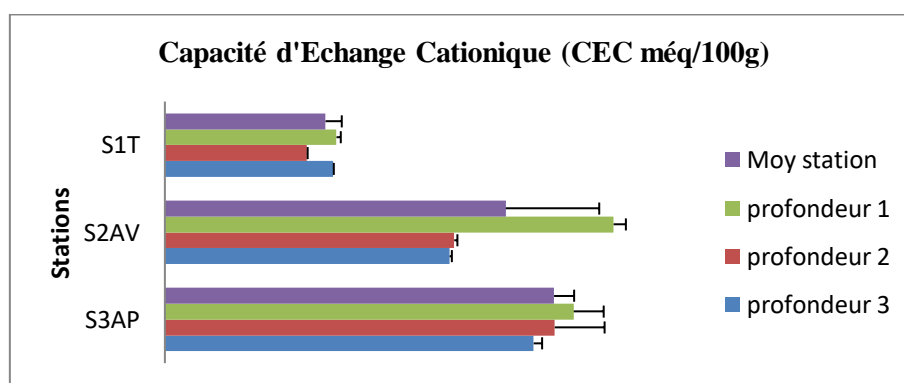


Figure 39. Variations de la Capacité d'Echange Cationique (CEC) dans les sols étudiés selon les stations et les profondeurs (n=5, p≤0,05).

D'après Sparks (2003) 25 % à 95 % de la capacité d'échange cationique est donnée par la matière organique dans les sols, ce qui explique les teneurs élevées de la CEC. La CEC diminue au fur et à mesure que la matière organique est minéralisée et quand le sol devient plus acide ou plus oxydant. Pour les stations étudiées la CEC est élevée selon le

programme d'interprétation de Basse Normandie (LANO) avec une moyenne maximale de 19.75 méq/100g pour la station S2AV, et 18.60 méq/100g pour la station S3AP (Tab. 11, 12 Fig.39) (ANNEXE 2). Ce qui explique le résultat de la variance qui est hautement significatif pour l'effet site.

4.3.3.9. Variation du phosphore Assimilable P_2O_5

Un des éléments majeurs indispensables à la croissance et au développement des végétaux. Il joue en particulier un rôle essentiel dans la mise en place du système racinaire, la photosynthèse et la reproduction du végétal. Leur variation dépend des propriétés physico-chimiques du sol (Clément et Pieltain, 2003). Sous certaines conditions de pH du sol, les phosphates deviennent non bio disponibles pour la plante. Ainsi qu'à des pH basiques, les phosphates se précipitent, en présence d'ions de calcium, formant des complexes plus ou moins stables, polluant le sol (El Halouani, 1993).

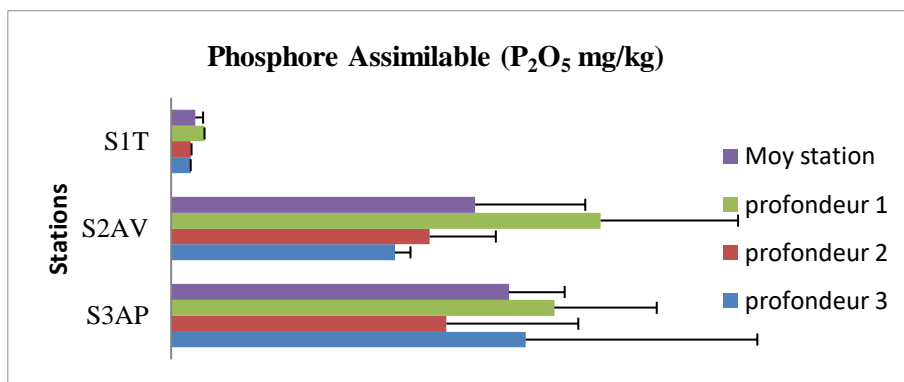


Figure 40. Variations du phosphore Assimilable P_2O_5 dans les sols étudiés selon les stations et les profondeurs ($n=5$, $p \leq 0,05$).

Les résultats des échantillons du sol étudiés présente une concentration moyenne en phosphore assimilable P_2O_5 avec une moyenne de 16.53 mg/kg pour la station de la partie aval (S3AP), et 14.88 mg/kg pour la station amont (S2AV) (fig40) (ANNEXE 2).

4.3.3.10. Variation des Eléments Trace Métallique ETM (Pb, Zn, Cd)

Les ETM sont naturellement présents dans les sols en faibles quantités. Ils sont en partie libérés lors de l'altération de la roche mère et constituent le pool endogène appelé fond pédo-géochimique. Un second pool, plus ou moins important selon la situation géographique, est issu d'apports exogènes (activité humaine, industrie, transport) (Di Benedetto, 1997). Les eaux pluviales peuvent être aussi une source de pollution des sols par le cuivre, le zinc, le nickel et le plomb, et à de très fortes concentrations (Adriano, 1986).

Bien que la concentration en métaux dans les eaux usées surtout traitées ou diluées soit faible, l'irrigation peut, à terme, entraîner l'accumulation de ces éléments dans le sol (Rattan et *al.*, 2005). Les facteurs qui influencent la disponibilité des ETM dans les sols sont le pH, la capacité d'échange de cations (CEC), la teneur en matières organiques, et le potentiel d'oxydoréduction (Adriano, 1986).

Au niveau de la zone d'étude, l'évolution des ETM (Cd, pb, Zn) dans les profondeurs choisies présente une variabilité qui est fonction de la qualité d'eau d'irrigation. Hormis le Zn, présente une concentration peu élevée, au niveau des deux stations irriguées avec les eaux de l'oued, le pb et Cd représentent des teneurs très faibles, et sont absentes au niveau du site (S1T) (Fig. 41). L'importance des concentrations observées à travers toutes les stations est dans l'ordre suivant : $Zn > Cd > pb$.

Les valeurs du Zn sont zéro ppm dans le sol témoin non irrigué (S1T), et entre 35.62 et 8.21 ppm dans les parcelles cultivées (Persil, coriandre et carotte) et irriguées avec l'eau polluée. Cette variation des teneurs en Zn dans le sol est due, d'une part, essentiellement à l'effet cumulatif dans le sol pendant plusieurs décennies d'épandage d'eaux usées brutes ainsi qu'à la contribution du pH faiblement basique du sol qui inhibe la mobilité des métaux (FAO, 2005). D'autre part, l'épandage non homogène des eaux usées pendant les périodes d'irrigation, y contribue aussi.

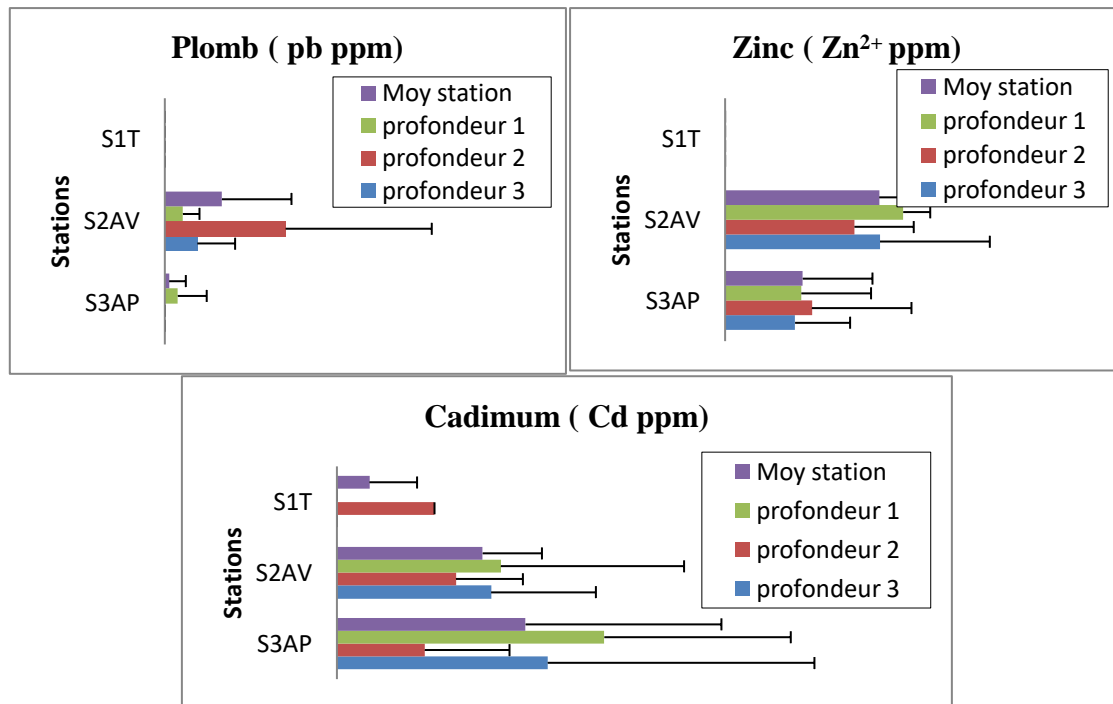


Figure 41. Variations des Eléments Trace Métallique ETM (pb, Zn, Cd) dans les sols étudiés selon les stations et les profondeurs (n=5, p<0,05).

Les teneurs des éléments pb, Cd, Zn dans la couche superficielle du sol sont relativement plus élevées comparées aux autres profondeurs. Kouame et *al.*, (2006) indiquent que ces éléments ont toujours tendance à s'accumuler dans les horizons de surface riches en matières organiques et dans les couches argileuses. Les éléments dosés migrent peu en profondeur, sauf dans des conditions particulières de drainage, ou en milieu très acide (McLaughlin et *al.*, 2000 ; Adriano, 1986).

Mohammad et Mazahreh (2003) rapportent une augmentation des teneurs en ETM dans les sols soumis à l'irrigation avec les eaux usées. D'autre part, Mancino et Pepper (1992) ne trouvent aucun effet des eaux usées sur l'accumulation des ETM du sol. A long terme (80 années). Perrono (1999) a rapporté qu'en sol calcaire, les carbonates de calcium sont les constituants majeurs qui interviennent dans la fixation des ETM, soit par adsorption, par précipitation d'hydroxydes ou de carbonates, ou encore par insertion dans le réseau de CaCO₃. Dans le cas de nos sols calcaires, les teneurs en ETM étudiés demeurent très faibles et sont donc en dessous des valeurs limites de phytotoxicité (Marschner, 1995).

4.3.4. Relations inter caractères

4.3.4.1. Corrélations

L'étude des corrélations entre les différentes paires de caractères est menée pour identifier les caractères qui évoluent dans le même sens et ceux qui s'opposent, Dans le premier cas l'augmentation de l'un induit implicitement l'augmentation de l'autre, alors que dans le second cas l'augmentation de l'un entraîne des changements négatifs chez le caractère lié. Les liaisons qui sont intéressantes de point de vue statistique sont mentionnées dans le tableau ci-dessous en rouge.

Tableau 14. Coefficients de corrélations r de Pearson entre les différents caractères mesurés (Les corrélations marquées sont significatives à $p < 0,05$)

	pH	CE	CaC O ₃	HCO ₃	Cl ⁻	P ₂ O ₅	SO ₄ ²⁻	MO	Pb	Cd	Zn	CEC	N %	C/N
pH e	1													
CE	-0.221	1												
CaCO ₃	-0.258	0.178	1											
HCO ₃	-0.140	-0.279	0.096	1										
Cl ⁻	-0.037	0.510	0.105	-0.202	1									
P ₂ O ₅	-0.062	0.432	-0.188	-0.275	0.201	1								
SO ₄ ²⁻	-0.155	0.831	0.205	-0.269	0.274	0.360	1							
MO	-0.197	0.623	0.046	-0.405	0.24	0.421	0.535	1						
Pb	-0.145	-0.078	-0.016	0.017	-0.094	0.147	0.095	-0.032	1					
Cd	-0.375	0.445	0.076	-0.337	0.157	0.286	0.367	0.366	0.078	1				
Zn	0.163	-0.054	-0.306	0.191	0.123	0.416	-0.126	-0.009	-0.024	-0.059	1			
CEC	-0.032	0.559	-0.206	-0.434	0.221	0.808	0.419	0.586	0.038	0.407	0.340	1		
N %	0.111	0.217	-0.019	0.507	0.284	-0.195	-0.026	-0.024	-0.241	-0.164	-0.15	-0.134	1	
C/N	0.146	0.099	-0.188	-0.547	-0.035	0.182	0.291	0.281	0.097	0.022	0.034	0.271	-0.542	1

D'après le tableau (14), Le pH est négativement corrélé avec le cadmium ($r = -0.375$), la conductivité et positivement corrélée avec les paramètres : chlorure, phosphate, sulfate, matière organique, cadmium et la capacité d'échange cationique (avec les coefficients de corrélation suivants : 0.510, 0.432, 0.831, 0.623, 0.445 et 0.559 respectivement), Les carbonates de calcium sont négativement liés au zinc ($r = -0.306$), HCO₃ est négativement corrélés à la matière organique ($r = -0.405$), au cadmium ($r = -0.337$), à la CEC ($r = -0.434$) et au rapport C/N ($r = -0.547$) et positivement corrélés à l'azote ($r = 0.507$), les sulfates sont positivement corrélés à la matière organique ($r = 0.535$), au cadmium ($r = 0.367$) et à la CEC ($r = 0.419$) et la matière organique est également

positivement corrélée au cadmium ($r= 0.366$) et à la CEC ($r= 0.586$). Cette dernière, et en plus des corrélations déjà citées, elle représente des liaisons significativement positives avec les deux métaux ; le cadmium et le zinc ($r=0.407$ et $r=0.340$ respectivement) et finalement l'azote est négativement lié au rapport C/N ($r=-0.542$).

4.3.4.2. Analyse en composantes principales (ACP)

La recherche de liaisons est étudiée grâce à l'analyse en composantes principales (ACP) qu'est une méthode basée sur des statistiques descriptives multidimensionnelles permettant de traiter simultanément un nombre quelconque de variables quantitatives, dont l'objectif est de visualiser et résumer l'information contenue dans les différentes données afin d'avoir une représentation permettant plus facilement l'interprétation.

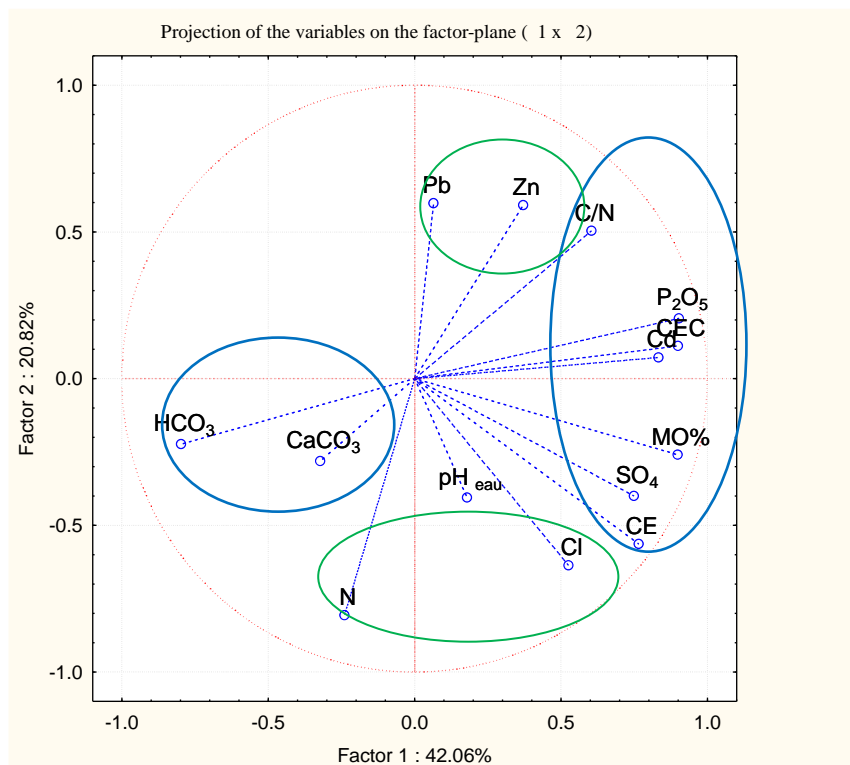


Figure 42. Cercle de corrélations entre les variables et les axes 1 et 2 de l'analyse en composantes principales des paramètres mesurés.

Les deux premiers axes de l'analyse en composantes principales des données mesurées expliquent 62,88% (respectivement 42,06 et 20,82 pour les axes 1 et 2 dans cet ordre).

L'axe 1 intègre l'information apportée par les paramètres ; la conductivité électrique, les sulfates, la matière organique, le cadmium, la capacité d'échange cationique

le phosphore et le rapport C/N d'une part et le calcaire et le bicarbonate, d'autre part. Ces deux ensembles de variables s'opposent le long de l'axe1.

L'axe 2 intègre l'information relative au zinc et plomb, qui lui sont positivement corrélés, d'une part et à l'azote et le chlore, qui lui sont négativement corrélés, d'autre part ces deux groupes s'opposent le long de cet axe (Fi.42).

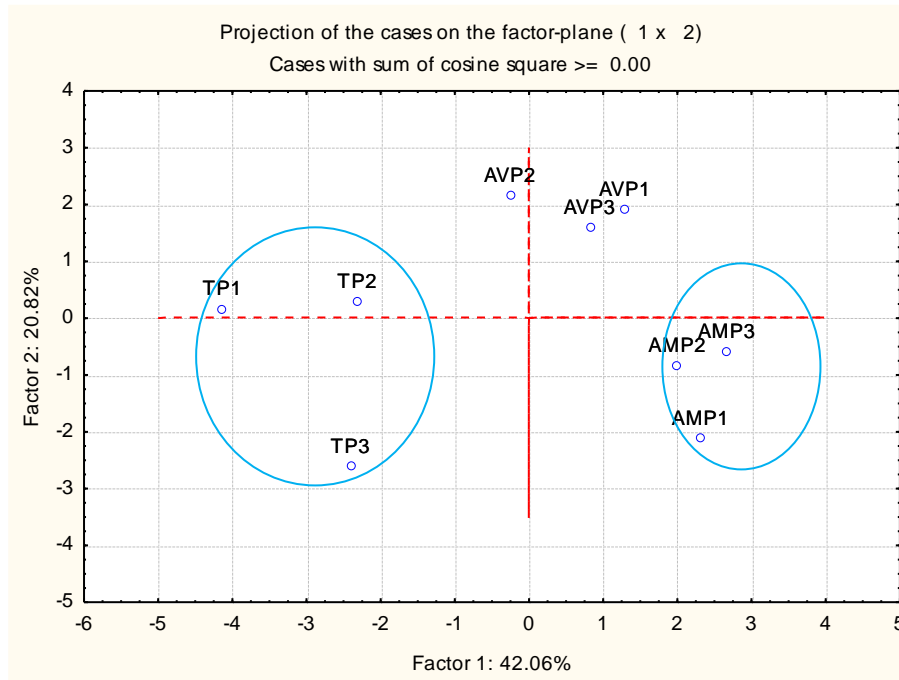


Figure 43. Cercle de corrélations entre les variables et les axes 1 et 2 de l'analyse en composantes principales des sites et profondeurs choisies

La représentation des sites et profondeurs étudiés sur le plan formé par les axes 1 et 2 indique qu'aux extrémités de l'axe 1 s'opposent les trois profondeurs du site amont positivement corrélés à cet axe, aux trois profondeurs du site Témoin qui lui négativement corrélés, alors que le site aval avec ses trois profondeurs semble positivement corrélée à l'axe 2 de ACP (Fig.43).

La superposition des deux ACP indique que le site amont se distingue par des valeurs moyennes élevées pour la conductivité électrique, les sulfates, la matière organique, le cadmium, la capacité d'échange cationique le phosphore et le rapport C/N d'une part et d'autre part par des valeurs moyennes faibles pour le calcaire et le bicarbonate. A l'inverse, le site témoin se caractérise par des valeurs moyennes relativement faibles pour la conductivité électrique, les sulfates, la matière organique, le cadmium, la capacité d'échange cationique le phosphore et le rapport C/N d'une part et par des valeurs moyennes élevées pour le calcaire et le bicarbonate d'autre part.

Alors que le site aval se distingue par des valeurs moyennes élevées pour les deux métaux plomb et zinc d'une part et des valeurs moyennes relativement faible en ce qui concerne l'azote et les chlorures d'autre part.

Conclusion

Pour qu'un écosystème aquatique puisse se développer de façon équilibrée, il faut que la qualité de l'eau soit bonne. Soumise au développement industriel et urbain et à l'utilisation massive, les qualités naturelles de l'eau sont dégradées et l'écosystème aquatique perturbé, on parle de pollution de l'eau. Il existe plusieurs sortes de pollutions. Une pollution organique a été historiquement la plus grave et la plus fréquente. C'est une pollution due au rejet d'eaux d'égouts ou d'eaux riches en déchets provenant des industries. Ces matières organiques sont décomposées par les bactéries présentes dans l'eau et qui, pour cela consomment beaucoup d'oxygène. La réutilisation des eaux usées en agriculture permet d'irriguer des cultures, et de recycler des éléments nutritifs, le tout de manière économique. En plus des éléments nutritifs favorables aux plantes, les eaux usées sont chargées d'éléments nocifs pour l'environnement lorsqu'ils dépassent certaines concentrations indicatives.

Au terme de ce travail, nous avons essayé d'évaluer la qualité des eaux d'oued Meskiana utilisées dans l'irrigation des cultures maraichères. Les résultats des analyses d'eau montrent que les eaux des trois sites de prélèvement sont très chargées en matières organique et particulaire et représentent une contamination par le plomb et le cuivre dont les teneurs dépassent la norme algérienne des eaux destinées à l'irrigation. L'aptitude globale à l'irrigation varie de l'amont à l'aval. Les prélèvements ont révélé une salinité très importante qui laisse classer les eaux de cette partie selon Wilcox et Riverside de qualité médiocre et mauvais pour l'irrigation. Ce qui est mauvais pour la santé de l'écosystème et surtout les sols irrigués. L'origine de la contamination peut être liée à différents apports, naturels tels que les apports en matière organique d'origine animale, et végétal, pour les sites situés en amont de l'oued, et anthropiques tels que les rejets d'eaux usées domestiques pour la partie aval. Suite à l'utilisation du cours d'eau pour rejeter les eaux usées, la qualité physico-chimique de ce système aquatique se dégrade progressivement.

Pour les sols irrigués, la dégradation de leur qualité suite à l'irrigation illégale, constitue un danger sérieux pour la durabilité du système d'exploitation des terres. Les résultats de caractérisation des sols en question, après avoir effectué des analyses statistiques, afin de déterminer l'effet de l'irrigation sur le sol, ont démontré que l'effet sites est hautement significatifs pour la majorité des éléments dosés. La migration verticale des éléments est moins significative et peut être due au lessivage, car les sols deviennent

compacts au fil du temps vu l'intensité de l'irrigation, avec des eaux chargées en matière organique. D'une manière générale, cet écosystème lacustre s'étendait sur plusieurs hectares.

Suite à l'utilisation du cours d'eau pour rejeter les eaux usées, la qualité physico-chimique de ce système aquatique se dégrade progressivement.

La meilleure réponse pour lutter contre la salinisation des sols est le recours à une irrigation raisonné où les apports d'eau sont de bonne qualité et ne dépassent pas les besoins des végétaux.

En perspectives, nous espérons une minimisation de l'utilisation de l'eau de l'oued car cette pratique influence la physionomie et l'écologie de ces habitats, à savoir l'accumulation des éléments chimiques favorisant le développement microbien, et la dégradation des sols. Ce qui nécessite la mise en place d'une station de traitement d'eaux usées avant déversement en milieu naturel. Nous préconisons d'augmenter la fréquence des contrôles de façon à irradier cette pratique informelle, et nuisible pour l'environnement.

Références

Bibliographique



- Ababsa, N., Kribaa, M., Tamrabet, L., Addad, D., Zidi, A. & Mansouri, D. (2016).** Relation entre l'activité biologique et le comportement hydro physique des sols dans le contexte du système prairial naturel irrigué à l'eau usée. *European Scientific Journal* ; édition vol.12. 5 :76-89.
- Abdoulaye, A.R., Aboudou, Y. (2016).** Hydrodynamics survey and evolution of environmental parameters (temperature, pH and the dissolved oxygen) of the liquid waste refining station of Parakou (Benin Republic). *International Journal of Innovation and Applied Studies*; Rabat Vol. 17, N° 4: 1313-1323
- ABH-CSM., (2005).** Les cahiers de l'agence, Bassin du Medjerda-Mellegue. Ministère des ressources en eau. N°9.
- ABH-CSM., (2009).** Les cahiers de l'agence, Qualité des eaux souterraines dans les bassins du Kebir – Rhumel, de la Seybouse et de la Madjerda-Mellegue 2004-2007. N° 13.
- Addad, D., Kribaa, M., Ababsa, N., Tamrabet, L., Hafidi, M., El Fels, L., Benmahammed, A. (2017).** Impact of earthworm activity on the chemical fertility of irrigated soil with urban effluents. *J.Fundam Appl Sci.* 9 (3): 1320-1341.
- Adriano, D.C. (1986).** Trace elements in the terrestrial environment. Springer Verlag, New York. 365 p.
- Afnor. NF X31-100., (1996).** Qualité des sols-Echantillonnage-Méthode de prélèvement d'échantillons de sol. Paris, France.
- Aissaoui, M., Benhamza, M., Guettaf, M., (2017).** Caractéristiques hydro chimiques des eaux de l'oued Seybouse - Cas de la région de Guelma (Nord est Algérien) Hydro chemical characteristics of the Seybouse river – Case study of the Guelma region Northeast of Algeria. *Rev. Sci. Technol., Synthèse* 35: 178-186.
- Anctil F., (2017).** L'eau et ses enjeux. 2^{ème} édition revue et augmentée. Edition Deboeck. 264p. ISBN 9782763723471.
- Angelier, E. (2001).** Ecologie des eaux courantes. Tec & Doc. Paris. P 11.
- ANRH., (2001).** Agence Nationale des Ressources hydrique, rapport de la qualité des eaux superficielle.
- Ashraf, M., M.E. Safdar, S.M. Shahzad, A. Aziz, M.A. Piracaha, M. Suleman and M.B. Ahmad. (2017).** Challenges and opportunities for using wastewater in agriculture: a review. *J. Appl. Agric. Biotechnol.*, 2(2): 1-20.
- Aubert G. (1978).** Annales de l'institut agronomique El Harache. Vol VI n°01. 297p.
- Ayers, R.S. et Westcot, D.W., (1994).** Water quality for agriculture. FAO. Irrigation and drainage paper. N° 29 Rev. 1 FAO, Rome. 174 p.
- Ayers, R.S., Westcot, D.S. (1985).** Water quality for agriculture. Irrigation and Drainage Paper 29. FAO, Rome.
- Ayers, R.S., Westcot, D.W., (1988).** La qualité de l'eau en agriculture. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage. 29 Rév. 1, 165 p.

B

- Baba Ahmed, A., Bouhadjera, K. (2010).** Assessment of metals accumulated in Durum wheat (*Triticum durum* Desf.), pepper (*Capsicum annuum*) and agricultural soils. *African Journal of Agricultural Research*, 5(20), 2795-2800.
- Bagnoules et Gausson H., (1957).** Les climats biologiques et leurs classifications. *Ann. Géogr. Fr.* 355 : 193-220.
- Baize, D. (1997).** Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France), Références et stratégies d'interprétation, INRA Ed., Paris, 410 pp.
- Barbaut, R. (2003).** *Écologie Générale : Structure et Fonctionnement de la Biosphère.* Dunod. P 237.
- Barry, G.S. (1989).** Suivi de la qualité bactériologique des eaux de surface rivière Nahr Ibrahim, Liban. *Revue de science de l'eau.* Volume : 20, 4: 341-352.
- Bartout, P., Touchart, L. (2013).** L'inventaire des plans d'eau français : outil d'une meilleure gestion des eaux de surface, *Annales de géographie*, /3 (n° 691), p. 266-289. DOI : 10.3917/ag.691.0266.
- Baumont, S., Camard, J.P., Lefranc, A., Francon A. (2000).** Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaire et faisabilité en Ile-de France, Paris: 12-13, 27-29.
- Bazri, K. (2015).** Etude de la biodiversité des lombriciens et leurs relations avec les propriétés du sol dans différents étages bioclimatiques, dans l'est Algérien. Thèse Doctorat, Université de Constantine. 169 p.
- Bazza, M. (2002).** Wastewater reuse in the Near East region : Experiences and issues. Regional symposium on recycling in the Mediterranean region, Iraklio, Crete, Greece. 26-29 Sept. 21 p.
- Belaid, N., (2010).** Evaluation des impacts de l'irrigation par les eaux usées traitées sur les plantes et les sols du périmètre irrigué d'El Hajeb-Sfax: salinisation, accumulation et phytoabsorption des éléments métallique. Thèse de doctorat en génie de l'environnement et de l'aménagement. Université de Sfax. 183 p.
- Belghyti, D., El Guamri, Y., Ztit, G., Ouahidi, L., Joti, B., Harchrass, A., Amghar, H., Bouchouata, O., Elkharrim, K et Bounouira, H. (2009).** Caractérisation physico-chimique des eaux usées d'abattoir en vue de la mise en œuvre d'un traitement adéquat : Cas de Kénitra au Maroc. *Afrique Science* 05 : 199 – 216
- Belloula, M., (2018).** Evaluation de l'aptitude aux écoulements et risque d'érosion dans le Haut cours de la Medjerda par Modélisation. Thèse de doctorat. Université Batna 2. Algérie.
- Ben Hassine, H., Aloui, T., Gallali, T., Bouzid, T., El Amri, S., Ben Hassen, R. (2008).** Évaluation quantitative et rôles de la matière organique dans les sols cultivés en zones subhumides et semiarides méditerranéennes de la Tunisie. *AGROSOLUTIONS* Décembre 2008 VOL. 19 N° 2.
- Benamar, D., Fatiha, H., Farouk, A. (2002).** Traitement des eaux du bassin hydrographique de la Tafina(N-W Algeria). *Desalination* 152 : 113-124.
- Benkhoubi, N, Saber, S, Lebkiri, A, Rifi El and Fahime El. (2016).** Evaluation of physicochemical parameters of agricultural soils irrigated by the waters of the hydrolic basin of Sebou river and their influences on the transfer of trace elements into sugar crops (the case of sugar cane). *J.Fundam. Appl. Sci.* 8(2), 438-451. doi.org/10.4314/jfas

- Bentouati, L et Bouzidi, A. (2012).** Etude de l'impact de la pollution sur oued Bousselam (wilaya de Sétif –nord-est de l'Algérie. Science Libre Vol. 4, N ° 120108. 12p.
- Bhat, M A., Grewal, MS., Ramprakash, R.S., Ahmad, W et Dar, E.A. (2016).** Assessment of Groundwater Quality for Irrigation Purposes using Chemical Indices. Indian Journal of Ecology 43 (2): 574-579.
- Bird, G., Brewer, P.A., Macklin, M.G., Serban, M., Balteanu, D., Driga, B., (2005).** Heavy metal contamination in the Aries river catchment, western Romania: implications for development of the Rosia Montana gold deposit. J. Geochem. Explor. 86, 26–48.
- Blanchard, C. (2000).** Caractérisation de la mobilisation potentielle des polluants inorganiques dans les sols pollués. Thèse Chimie, spécialité Sciences et Techniques du Déchet. L .France : INSA de Lyon, p301.
- Bliefert, C., Perrot, R. (2003).** Chimie de l'environnement : Air, Eau, Sol, édition Debeoock, 220 PP.
- Bliefert, P. (2001).** Chimie de l'environnement : Air, Eau, Sol, déchets. De Boect, p 287.
- Boualla, M., Adjdir, M., Benziane, A., Bendraoua, A., (2018).** Estimating generalized of global impacts to water quality on soil characteristics in basin of the Great Sebkhia of Oran. Applied Water Science. 9:4.
- Bouaroudj, Sara., Menad, A., Bounamous, A., Ali-Khodja, H., Gherib, A., Weigel, D., Chenchouni, H. (2019).** Assessment of water quality at the largest dam in Algeria (Beni Haroun Dam) and effects of irrigation on soil characteristics of agricultural Lands. Chemosphere, 219, 76-88.
- Boubelli, S., (2018).** Impact des rejets urbains et domestiques sur la qualité des eaux de l'Oued Saf-Saf: Inventaire et mise en évidence d'une contamination par des polluants organiques et leurs conséquences sur l'environnement. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.
- Bouchaala, L., Charchar, N., Gherib, A. (2017).** Ressources hydriques: traitement et réutilisation des eaux usées en Algérie », Algerian journal of arid environment, 7(1) 84-95.
- Boust, D., Fischer, J.C., Ouddane, B., Petit, F., Wartel, M., Abarnou, A., Ficht, A., Gandon, R., Hebert, D., Hocdé, R., Poulin, M., Rozet, M., Voyer, J.J. (1999).** Fer et manganèse : réactivités et recyclages. Programme scientifique Seine-Aval. Editions Ifremer.
- Bouzian, M. (2000).** L'eau de la pénurie aux maladies. T.B.N – Khaldoun. 247 p.
- Bremond, R et Vuichard, R. (1973).** Paramètres de la qualité des eaux. Ministère de la Protection de la Nature et de l'Environnement, Ed. La documentation française, Paris, 179 p.
- Burnol, A., Duro, L. M., Grive, M. (2006).** Recommandations pour la modélisation des transferts des éléments traces métalliques dans les eaux souterraines. Rapport final, BRGM/RP-52910-FR, 73 pp.
- C**
- C.N.E.S. (2000).** L'eau en Algérie : le grand défi de demain. Avant-projet. Conseil National Economique et Social. p 100.
- Cadillon, M. (1989).** Réutilisation des eaux usées : Contraintes et enjeux. Actes des journées techniques d'assainissement au Maroc. Agadir, Maroc, 6-8 Septembre. pp. 2-26.
- Capblancq, J., Décamps H. (2002).** Towards a sustainable control of eutrophication of continental waters. Nature Sciences Sociétés. Volume 10, Issue 2, Pages 6-17.7

- Chapman, D Et Kimstach, V. (1996).** Selection of water quality variables. Water quality assessments : à guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring. Chapman edition, 2nd ed. E & FN Spon, London. 126 p.
- Chongwang, J. (2017).** Les eaux usées, un atout pour l'irrigation des cultures, rapprocher la science et le développement ». Sci. Dev, Net, vol.17 n° 2.
- Clément, M et Pieltain, F. (1998).** Analyse physique des sols (Méthodes choisies). Editions TEC & DOC. 274 p
- Clément, M et Pieltain, F. (2003).** Analyse chimique des sols (Méthodes choisies).Editions TEC & DOC.
- Cornu, S et Clozel, B. L. (2000).** Extractions séquentielles et spéciation des éléments trace métalliques dans les sols naturels. Analyse critique. Étude et gestion des sols. p189.

D

- Daudu, C. (2008).** Organic Matter Sources, Soil Fertility, and Productivity. Ed. VDM Verlag. 208 p.
- De Villers, J., Squilbin, M., Yourassowsky C. (2005).** Qualité physicochimique et chimique des eaux de surface, les données de l'IBGE : "L'eau à Bruxelles". Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement.
- Dégrément. (1998).** Mémento technique de l'eau. 8^{ème}. édition Tec & Doc. Paris 986 p.
- Deoshorta, J.C. (1979).** Les encroutements calcaires et les encroutements gypseux en géotechnique routière. Bet. Labomécanique des sols, 105 p.
- Derwich, E., Benaabidate, L., Zian, A., Sadki, O., Belghity, D. (2010).** Caractérisation physico-chimique des eaux de la nappe alluviale du haut Sebou en aval de sa confluence avec oued Fes. Larhyss journal 08 : 101-112.
- Devidal, S. (2007).** Solutions curatives pour la restauration de lacs présentant des signes d'eutrophisation. Thèse doctorat en écologie et environnement de l'université de Rouen (France). 4-6, 8-10 P.
- Devreker, D., Lefebvre, A. (2016).** État de développement des indicateurs par critère pour le descripteur 5 de la DCSMM, rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/16.08, 25 p
- DHWCNE. (2005).** Qualité des eaux superficielles dans le bassin hydrographique constantinois-Seybouse-Mallegue. Ministère Algérien des Ressources en Eau.
- Di Benedetto, M. (1997).** Méthodes spectrométriques d'analyse et de caractérisation : Les ETM. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne. 49 p.
- Dib, D. (2018).** Origine et caractérisation de la pollution des eaux dans le bassin de tarf (Ne-Algérien). Thèse de doctorat, université d'Oum El Boueghi. Algerie.
- Dib, D., Khiari, A., Kadi, K., Oualdjaoui, M., Gherraf, N. (2017).** Identification of hydrogeochemical processes in a north eastern endoreic basin under semi-arid conditions (algeria). Journal of fundamental and applied sciences 9 (3), 1685-170
- Dibet, A., Decoومان, B., Hanocq, D. et Heddadj, Dj. (2013).** Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur le sol. Dossier Terra. 13p.

- Djeddi, H., Kherief, N.D., Keddari, D., Afri-Mehennaoui, F. Z. (2018).** Teneurs des éléments traces métalliques Cu, Zn et Pb des sédiments du barrage Béni Haroun (Nord-Est de l'Algérie). *European Scientific Journal*,15, 7431.
- Djegbe, I., Taïra, S.T-T., Nikita, T., Murielle, S. F., Paraiso, A., Djouaka, R., et Nelly Kelome, C. (2018).** Variation Saisonnière de La Qualité Physicochimique et Microbiologique Des Eaux d'irrigation et Des Légumes Du Site Maraîcher de Bawéra et Risques Sanitaires Associés. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 12(2): 781.
- Doneen, L. D. (1964).** Notes on water quality in agriculture. Department of Water Science and Engineering, University of California, Davis.
- Doran, M.D. (1979).** Phosphorus removal by activated algae. *Water Res.* 13 :805-812.
- Dorioz, J. M., Cassel E.A., Orand, A et Etsenman, K. (1998).** Phosphore storage. *Hydro-biological processes* 12: 285-309.
- Doucet, R. (2006).** Le climat et les sols agricoles. ed. Berger, Eastman, Québec. xv, 443 p.4
- Drechsel, P., Scott, C. A., Sally, L. R., Redwood, M. et Bahri, A. (2011).** L'irrigation avec des eaux usées et la santé. Evaluer et atténuer les risques dans les pays à faible revenu. Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 440p. ISBN 978-2-7605-3160-4.
- Duchaufour, P. (1997).** Abrégé de pédologie: Sol, Végétation, Environnement. 5^{ème} Edition. Paris, France : Masson, SA, p291.

E

- Eaton, F. M. (1950).** Significance of carbonates in irrigation waters. *Soil science*, 69(2), 123-134.
- Eblin, S G., Sombo, A P, Soro, G M., Aka, N., Kambiré, O.,Soro, N. (2014).** Hydrochimie des eaux de surface de la région d'Adiake, (sud-est côtier de la Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences* 75:6259– 6271 ISSN 1997–5902.
- El Blidi, S., Fekhaoui, M., Serghini, A., et El Abidi, A. (2006).** Rizières de la plaine du Gharb (Maroc) : qualité des eaux superficielles et profondes. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Vie*. 28 : 55-60.
- El Halouani, H. (2003).** Réutilisation des eaux usées en agriculture et leur impact sur l'environnement cas de la ville d'Oujda. Thèse d'Etat, Fac, Sci, Kénitra, 190 p.
- El Hayek, N. (1989).** Méthodes d'analyse de l'eau. Editions OPU. Alger, Algérie. 179 p.
- El Makhfouk, M., Souissi, A., El Meray, M. (2003).** Analyse de La Fraction Labile Du Zinc, Cadmium, Plomb et Du Cuivre Dissous En Milieu Marin Côtier Par La Redissolution Anodique à Impulsions Différentielles. *Comptes Rendus Chimie*. 6(7). 689–93.
- El, Addouli j., Chahlaoui, A., Chafi, A. (2008).** Follow-up and Analysis of the Risks related to the Use of Waste Water in Agriculture, in the area of Meknes- Morocco. *SS&T N° 16 – 2008-*
- Emberger, L. (1955).** Une classification biogéographique des climats. *Rev. Trac. Bot. Géol. Zool.* Fase. Sci. Montpellier, série botanique: 343p.
- Etteieb, S., Cherif, S., Tarhouni, J. (2015).** Hydrochemical assessment of water quality for irrigation: a case study of the Medjerda River in Tunisia. *Applied Water Science*, 7(1), 469-480.

F

- Faby, J.A. et Brissaud, F. (1997).** L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation. Compte rendu d'étude de l'Office International de l'Eau, mai 1997, 82 p.
- FAO . (2015).** Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2015-2024 (OCDE/Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Editions OCDE, Paris.162 p. http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2015-fr.
- FAO. (2003).** L'irrigation avec les eaux usées traitées. Manuel d'utilisation. Bureau Régional pour le Proche Orient et l'Afrique du Nord. Caire Egypte. 68 p.
- FAO. (2005).** Utilisation des engrais par culture en Algérie. Organisation des nations unis pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Première édition, publiée par la FAO.
- Faruqui, N. (2003).** La gestion de l'eau selon l'Islam. Éditions Karthala, Paris. 144 p.
- Faurie, C et Ferra, C. (2003).** Ecologie approche scientifique et pratique. 5^{eme} édition. TEC & DOC, parie. P 195-303.
- Féray, C. (2000).** Nitrification en sédiment d'eau douce : incidence de rejets de station d'épuration sur la dynamique de communautés nitrifiantes. Th. doctorat, sciences naturelles, Écologie microbienne. Université Claude Bernard-Lyon , Lyon, France, 204 p.
- Flammarion, P. (2016) .** La chimie et la mise en œuvre de la Directive Cadre sur l'Eau. Enjeux liés à la présence de micropolluants dans les écosystèmes aquatiques. EDP Sciences.
- Foster, S., Pulido-Bosch, A., Vallejos, Á., Molina, L., Llop, A., MacDonald, A. (2018).** Impact of irrigated agriculture on groundwater-recharge salinity: a major sustainability concern in semi-arid regions. *Hydrogeology Journal* 26:2781–2791.
- Foto, E., Mobili, O B., Allahdin, O., Poumaye, N., Mabingui, J. (2017).** Sustainable surface water quality monitoring in Bangui (Central African Republic). *European Journal of Biotechnology and Bioscience*. V5, Issue4, P.42-47. ISSN: 2321-9122. www.biosciencejournals.com.
- Furini, A. (2012).** Plants and Heavy Metals, Springer-Briefs in Biometals, DOI: 10.1007/978-94-007-4441-7-1.

G

- Garrels, R.M. (1976).** A survey of low-temperature wter-mineral reactions. In *Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Ground-Water Hydrology*, pp.65-84. Vienna International Atomic Energy Agency.
- Gaucher, G et Burdin, S. (1974).** Géologie, géomorphologie et hydrologie des terrains salés. Techniques vivantes, presses Universitaires de France, Imp. Boudi, Paris, 234p.
- George, C., Harrap, & Coll. (1963).** Day, E.H. The chemical éléments in nature. London, U.K.
- Gérard, M., (2003).** l'OPECST (l'Office parlementaire d'évaluation des choix scient. tech). La qualité de l'eau ET assainissement n° 2152 (2002-2003).
- Ghislain, J. (2012).** Guide pour l'interprétation d'une analyse de sol. Cours « Fertilisation des sols en agriculture bio ». collège d'enseignement général et professionnel (Cégep) de Victoriaville. 6 p.
- Gouaidia L., (2009).** Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico –chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de

Meskiana Nord-est algérien. Thèse de doctorat en sciences. Université Badji Mokhtar Annaba. 199 p.

Gouaidia, L. (2011). Evaluation de la vulnérabilité d'une nappe en milieu semi-aride et comparaison des méthodes appliquées : cas de la nappe de Meskiana (Est algérien). *Sécheresse* 22, 35-42.

Gouaidia, L., Guefaïfia, O., Boudoukha, A., Hemila, M L. (2013). Assessment of the groundwater salinity used for irrigation and risks of soil degradation: Example of the plain of Meskiana, Northeastern Algeria. *Geo-Eco-Trop*, 37(1), 81-92.

Greenwood, N.N., Earnshaw, A. (1984). Chemistry of the elements, Pergamon Press, Oxford, UK.

H

Haddad, H. et ghoualem H. (2014). Caractérisation physico-chimique des eaux du Bassin hydrographique côtier algérois. *Larhyss Journal*, 18.155-167.

Harikumar, P., Nasir, U., and Rahma, M.M. (2009). Distribution of heavy metals in the core sediments of a tropical wetland system. *International Journal. Environmental Science Technology*. 6: p. 225-232.

Harrat, H. et Achour, S. (2010). Pollution physico-chimique des eaux de barrage de la région d'El Tarf, Impact sur la chloration. *Larhyss Journal*. N° 08 : 47-54.

Hartani, T. (2004). La réutilisation des eaux usées en irrigation: cas de la Mitidja en Algérie. In: Actes du séminaire Modernisation de l'agriculture irriguée. Rabat (Maroc), 19-23 Avril, 11 p.

Hazourli, S., Boudiba, L., Ziati, M. (2007). Caractérisation de la pollution des eaux résiduelles de la zone industrielle d'Al-Hadjar, Annaba. *larhyss journal*, 6 : 45-55

Hillel, D. (1988). L'eau et le sol, principes et processus physiques. Edition Academia. p294.

Hillel, D. (1998). Environmental soil physics: fundamentals, applications and environmental considerations. Academic Press, 801 p.

Holmgren, S., (1985). Phytoplankton in a polluted subarctic lake before and after nutrient reduction. *Water Res.* 19(1)63-71.

Hussain, C., & Saati, A.J. (1999). Wastewater quality and its reuse in agriculture in Saudi Arabia. *Desalination*. 123:241-251.

Hutchinson, G.E. (1957). A treatise in limnology. Wiley, NY. Tome 1. 1025 p.

Huynh, T.M.D. (2009). Impacts des métaux lourds sur l'interaction plante/ ver de terre/microflore tellurique. Thèse doctorat Uni. Paris Est. 151p.

J

J.O.N°34. (2011). Journal Officiel De La République Algérienne N° 19 juin 2011. Décret exécutif N°11-219 du 10 Rajab 1432 correspondant au 12 juin 2011 fixant les objectifs de qualité des eaux superficielles et souterraines.

Jeong, H., Kim, H., Jang, T., (2016). Irrigation water quality standards for indirect wastewater reuse in agriculture: a contribution toward sustainable wastewater reuse in South Korea. *Water*, 8(4), 169.

Jiménez, B., and Asano, T. (2004). Acknowledge All Approaches: The Global Outlook on Reuse. *Water* 21 December 2004, 32-37.

Juste, C. (1988). Appréciation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments en traces du sol. Science du sol, 26 : 103-112.

K

Kabata-Pendias, A. (2001). Trace Elements in Soils and Plants, Third Edition . CRC Press, Boca Raton, USA.

Keck, G et Vernus, E. (2000). Déchets et risques pour la santé, Techniques de l'Ingénieur, Paris, 2450 p.

Kelly, W.P. (1963). Use of Saline Irrigation Water. Soil Sci., 95 (4), 355-391.

Kherief, N., Djeddi, H., Benayache, Y., Afri-Mehennaoui, F. Z. (2018). Dynamique des éléments nutritifs et du phytoplancton dans le Barrage BéniHaroun dans l'est algérien. European Scientific Journal 12, 7431.

Kloppmann, W., Bourhane, A., Schomburg, k. Et Asfirane, F. (2012). Salinisation des masses d'eaux en France : du constat au diagnostic. Dix-huitièmes journées techniques du Comité Français d'hydrogéologie de l'association international des hydrogéologues. « Ressources et gestion des aquifères littoraux. Cassis ».

Kouame, I.K., Gone, D.L., Savane, I., Kouassi, E.A., Koffi, K., Goula, B.T., Diallo, M. (2006). Mobilité relative des ETM issus de la décharge d'Akouédo et risque de contamination de la nappe du Continental Terminal (Abidjan-Côte d'Ivoire). Revue Afrique Science 02(1):39-56.

Koull, K., Kherraze, M. H., Lakhdari, K., Benzaoui, T., Helimi, S., Laouissat, M. S., Mezrag, M. (2013). Eaux d'irrigation et salinisation des sols des périmètres irrigués dans la vallée de l'oued righ. J Alg Rég Arid, 12, 97-102.

Krystofova, O., Shestivska, V., Galiova, M., Novotny, K., Kaiser, J., Zehnalek, J., Babula, P., Opatrilova, R., Adam, V., Kizek, R. (2009) Sunflower Plants as Bioindicators of Environmental Pollution with Lead (II) Ions. Sensors.9(7). 5040-5058.

KUSCER, D. (1985). Carte géologique de Meskiana au 1/50 000. (Feuille n° 177). Alger direction des Mines et de la Géologie, sous-direction de la géologie.

L

Lacoste, Y. (2008). L'eau dans le monde .Larousse, 2ème édition.128 p.

Lacroix, G. (1991). Lac et rivières milieux vivants. Eco-guide. Bordas. p 94.

Ladjel, F. (2010). Eaux usées : épuration et valorisation. ONA de Tizi-Ouzou. Séminaire : Les Enjeux de la Qualité dans le Secteur de l'Eau et de l'Assainissement en Algérie, Apport des Techniques Nucléaires (EQSEAATN'2010).Tipaza.

Lahlou, M., Badraoui, M., Soudi, B., Goumari, A., Et Tessier D. (2003). Modélisation de l'impact de l'irrigation sur le devenir salin et sodique des sols. Serge Marlet, Pierre Ruelle. Atelier duPCSI (Programme Commun Systèmes Irrigués), Montpellier, France. Cirad - IRD - Cemagref, 19 p.

Le Goff, F., Bonnet, V. (2004). Devenir et comportement des métaux dans l'eau : biodisponibilité et modèles BLM Rapport technique ; Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Direction de l'Eau, INERIS, 87 p.

Lee, T.S. (2012). water quality, soil and managing irrigation of crops. InTech. 1-254p.

- Leland, H.V et Fend, S.V. (1998).** Benthic invertebrate distributions in the San Joaquin River, California, in relation to physical and chemical factors. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55: 1051-1067.
- Liess, M., Schäfer, R., Schriever, C. (2008).** The footprint of pesticide stress in communities: Species traits reveal community effects of toxicants. *Science of the Total Environment* 406, p. 484–490.
- Lightfoot, N. F. (2002).** *Analyses microbiologiques des aliments et de l'eau.* London, pp. 59-126.
- Louadj, A., Naceur, M., Elfil, H. (2019).** Pollution par précipitation des carbonates de calcium des eaux saumâtres selon les zones de métastabilité. *Academic Journal of Civil Engineering*, 36(1), 615-619.

M

- M.A.T.E. (2005).** Ministère d'Aménagement du Territoire de l'Environnement. Rapport sur l'état de l'avenir de l'environnement.
- Maait, J. (1997).** La réutilisation des eaux usées en irrigation. Synthèse bibliographique. ENGREF de Montpellier.
- Mancino, C.F. and Pepper, I.L. (1992).** Irrigation of turfgrass with secondary sewage effluent: Soil quality. *Agron. J.* 84(4):650-654.
- Mapanda, F., Mangwayana, E.N., Nyamangara, J. Et Giller, K.E. (2005).** The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare, Zimbabwe. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 107 151–165.
- Marschner, H. (1995).** Mineral nutrition of higher plants. 2nd edition. Academic press,
- Martin C., Arnaud B., Marianne M., Emmanuel R., (2014).** L'eau, aujourd'hui, demain. *aqueduc.info – Lettre n°100 –2014 – 7.*
- McLaughlin, M.J., Hamon, R.E., McLaren, R.G., Speir, T.W. & Rogers, S.L. (2000).** Review: a bioavailability-based rationale for controlling metal and metalloid contamination of agricultural land in Australia and New Zealand. *Australian Journal of Soil Research* (38):1037-1086.
- Mehounou, J P., Josse, R G., Dossou-Yovo, J., Jordan, S-B., Chapuis, H., Graillet, D., Lavastre, V., Jolivet, J. (2016).** Caractérisation physico-chimique et microbiologique des eaux souterraines et superficielles dans la zone de production cotonnière d'Aplahoué. *Journal of Applied Biosciences* 103:9841 – 9853 ISSN 1997–5902.
- Mermoud, A. (2006).** Cours de physique du sol : Maîtrise de la salinité des sols. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 23 p.
- Meyberk, M. (1996).** River water quality, global ranged time and space variabilities. *Vehr. Int. Verein. Limnol.*, 26, 81-96.
- Mikkelsen, R., Et Camberato J. (1995).** Potassium, sulfur, lime and micronutrient fertilizers. In: Recheigl J, ed. *Soil amendments and environmental quality.* Chelsea, MI, Lewis Publishers.
- Mireille, M-V., et Vialle, C. (2015).** L'eau a découvert. CNRS Éditions. Paris OpenEdition Books. 365 p. <http://www.openedition.org/6540>

- Mohammad, M.J. and Mazahreh, N. (2003).** Changes in soil fertility parameters in response to irrigation of forage crops with secondary treated wastewater. *Soil Sci. Plant Anal*, 34(9&10):1281-1294.
- Monod, T. (1989).** Méharées géographie. France loisirs. 233 p.
- MRE. (2012).** Ministère des ressources en eau, Arrêté interministériel fixant la liste des cultures pouvant être irriguées avec les eaux usées épurées. 27 p.
- Munns, R., Tester M. (2008).** Mechanisms of salinity Tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, Vol.59; pp: 651–681.

N

- N'guessan, Y.M. (2008).** Dynamique des éléments traces dans les eaux de surface des Bassins versants agricoles de Gascogne. Thèse de Doctorat. Université de Toulouse l'institut national polytechnique.149 p.
- Naeve, S. L. (2006).** Iron deficiency chlorosis in Soybean: Seeding rate and companion crop effects. *Agron J.*, 98:1575-1581.
- Nakayama, F.S. and Bucks, D.A. (1986).** Truckle irrigation for crop production : Design, operation and management. Elsevier, New York, NY.
- Nathaly, M. (1999).** Caractérisations physico-chimique et biologique des cours d'eau de la nouvelle Calédonie, proposition d'un indice biotique fondé sur l'étude des macroinvertébrés benthiques. Thèse de doctorat de l'université française du pacifique. 182p
- Nies, D.H. (1999).** Microbial heavy-metal resistance. *Applied Microbiology Biotechnology*, 51. 730-750.
- Nisbet, M. Et Verneaux, J. (1970).** Composantes chimiques des eaux courantes; discussion et proposition de classe en tant que base d'interprétation des analyses chimique. *Ann de limnologie*. Tome 6. P 161-190.
- Nordstrom, D.K., Lindblon, S. Et Barton, C.C. (1989).** Fluid inclusion in the stripa granite and their possible influence on the ground water chemistry. *Geochim.consmochim. Acta* 53, 1741-1755.

O

- O'Halloran, T.V., Culota, V.C. (2000).** Metallochaperones, an intracellular shuttle service for metal ions. *Journal of Biological chemistry*, 275(33). 25057-25060.
- OMS. (2004).** Guidelines for drinking-water quality. Vol.1. Recommandations, 3rd Ed. World Health Organization. Geneva.
- OMS. (2008)** WHO (World Health Organization), Guidelines for drinking water quality, vol.1,
- OMS. (2013).** Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères. Volume II: Utilisation des eaux usées en agriculture, 121-145.
- ONM. (2010).** Office nationale de la météo. Station météorologique d'Oum El Bouaghi.
- ONU. (2016).** Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et agriculture et données d'AQUASTAT,. Retrais annuels d'eau douce pour l'agriculture (% des retraits totaux d'eau douce)

Ounoki, S et Achour, S. (2014). Evaluation de la qualité physicochimique et bactériologique des eaux usées brutes et épurées de la ville d'Ouargla. Possibilité de leur valorisation en irrigation. Larhyss Journal n°20, 247-258.

P

Pauwels, J.M., Van Ranst, E., Verloo, M. Et Mvondoze, A. (1992). Manuel de laboratoire de pédologie, Publi. Agricoles 28, AGCD, Bruxelles.

Pechère, J. C., Acar, J., Grenier, B. et Nihoul E. (1982). Reconnaître, comprendre et traité les infections. 4ème édition. Edisem ST-Hyacinthe. Québec. 509 p.

Pekrun, C., Kaul, H.P., Claupein, W. (2003). Soil tillage for sustainable nutrient management. In El Titi, A. (ed.), Soil tillage in agroecosystems, CRC Press, New-York (USA), 83-113.

Perrono, P. (1999). Les micropolluants métalliques des boues de stations d'épuration urbaine et l'épandage agricole. Mém. D.U.E.S.S., D.E.P., Univ. Picardie, Amiens.

Person, J. (1978). Irrigation et drainage en Tunisie problème posé par la salinité des sols et des eaux. Bull. BRGM (2^{ème} série) section III, n°2 : 143- 151.

Pettygrove, G.S. Et Asano, T. (1985). Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater: A Guidance Manual. Lewis Publishers, Michigan, USA.

Picot, B., El Halouani, H., Caselles, C., Moersidik, S Et Bontoux, J. (1991). Nutrient removal by high rate pond system in a mediterranean climate (France). Wat. Sci. Tech. 23: 1535-1541.

Pilet, C. Et coll. (1987). Bactériologie médicale et vétérinaire, Systématique bactérienne. Doin. 371p.

Pinay, G., Gascuel, C., Ménesguen, A., Souchon, Y., Le Moal, M., Levain, A., Étrillard, C., Moatar, F., Pannard, A., Souchu, P. (2018). L'eutrophisation Manifestations, causes, conséquences et prédictibilité. Éditions Quæ RD 10 78026. France www.quae.com ISBN : 978-2-7592-2757-0 ISSN : 2115-1229.

Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. Eos, Transactions American Geophysical Union, 25(6), 914-928.

Piscart, C. (2004). Rôle de la salinité dans la dynamique et la régulation de la biodiversité des communautés de macroinvertébrés dulçaquicoles. Thèse doctorat de l'université de METZ.

Plauborg, F., Andersen, M. N., Liu, F., Ensink, J., Ragab, R. (2010). Safe and high-quality food production using low quality waters and improved irrigation systems and management: SAFIR. Agricultural water management, 98(3), 377-384.

PNUE. (1991). Pollution des eaux douces. Bibliothèque de l'environnement PNUE/GEMS. N° 6. Nairobi.

R

Radoux, M., Cadelli, D Et Nemcova, M. (1995). L'optimisation des technologies extensives d'épuration des eaux usées sous climat tempéré (France) et sous climat sahélien (Sénégal). In : Proc. Conf "Pollution in Large Cities", Padova, 1, 461-471.

Raju, N., Janardhana, A. (2007). Hydrogeochemical parameters for assessment of groundwater quality in the upper Gunjanaeru River basin, Cuddapah District, Andhra Pradesh, South India. Environmental Geology, 52(6), 1067-1074.

- Ramade, F. (1993).** Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement. Science Internationale. Paris, p 61- 822 p.
- Ramade, F., (1998).** Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'eau, biochimie et écologie des eaux continentales et littorales. Science international, Parie. p 179.
- Ramade, F., (2002).** Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement. 2eme édition .Dunod. Paris. p 240.
- Rattan, R.K., Datta, S.P., Chhonkar, P.K., Suribabu, K. & Singh, A.K. (2005).** Long-term impact of irrigation with waste water effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater-a case study. *Agr. Ecosyst. Environ.* 109: 310-322.
- Rattan, R.K., Datta, S.P., Chhonkar, P.K., Suribabu, K. Et Singh, A.K. (2005).** Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater case study. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 109, 310–322.
- Ré-Bahuaud, J., Chapuis, H., Graillet, D., Lavastre, V., Jolivet, J. (2016).** Caractérisation hydrogéochimique (ions majeurs et isotopes) des échanges entre karst et rivière. La rivière Cèze et ses émergences karstiques au niveau du plateau de Méjannes-le-Clap (Gard, France). Eurokarst, Neuchâtel, Suisse. {hal-01381174}.
- Rejsek, F. (2002).** Analyse des eaux, Aspects réglementaires et techniques. Scérén TEC & DOC. CRDP Aquitaine. 358 p.
- Rhoades, J.D. (1992).** The use of saline waters for crop production. FAO irrigation and drainage paper n° 48, FAO, Rome.
- Richards, LA. (1954).** Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agric.Handbook* 60, USDA, Washington D.C. 160 p.
- Rodier, J., Bernard, L., Nicole M., et coll. (1996).** Analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires. 8ème édition, Dunod, Paris 1130p.
- Rodier, J., Bernard, L., Nicole, M., et coll. (2009).** L'analyse de l'eau. Eaux naturelles. Résiduaires. Eau de mer. 9ème édition. Dunod. Paris, 1383p.
- Rouabhia, A.E.K., Djabri, L., (2010).** L'irrigation et le risque De pollution saline. Exemple des eaux souterraines de l'aquifère Miocene de la plaine d'El Ma El Abiod. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 08, pp. 55-67.
- Rusan, M.J.M., Hinnawi, S. & Rousan, L. (2007).** Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. *Desalination.* 215 (1):143–152. doi: 10.1016/j.desal.2006.10.032.
- Ryding, S-O Et Rast, W. (1993).** Le contrôle de l'eutrophisation des lacs et des réservoirs. Edition Française (UNESCO). P 33, 34, 46-51.

S

- Samake, H. (2002).** Analyse physico-chimique et bactériologique au L.N.S. des eaux de consommation de la ville de Bamako durant la période 2000 et 2001. Thèse de docteur en pharmacie. Université de Bamako. 77 p.

- Scott, C.A., Faruqui N., Raschid-Sally L. (2004).** Waste water use in irrigated Agriculture: Management challenges in developing Countries in irrigated. Agriculture Coordinating the livelihood and environmental realities. p 10.
- Silburn, D.M., Vervoort, R.W. et Schick N. (2004).** Deep drainage - so what? Part A. Report on the 2nd Northern Murray-Darling Water Balance Workshop, 19-20 November 2003, Narrabri. Cotton Research and Development Corporation: Narrabri. ISBN 1 876354 98 4 (Print).
- Silva, E.I.L et Davies, R.W. (1997).** The effects of irrigation effluent on a Western Canadian prairie river. *Hydrobiologia* p.109.
- Singh, K. P., Malik, A., Sinha, S. (2005).** Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti river (India) using multivariate statistical techniques—A case study. *Analytica Chimica Acta*, 538, 355–374.
- Singh, K.P., Surjeet, N. C., Ghosh., Suman, G., Gopal, K., Sumant, K., Preeti, B. (2018).** Index-Based Assessment of Suitability of Water Quality for Irrigation Purpose under Indian Conditions. *Environmental Monitoring and Assessment* 190(1): 29.
- Sou, Y.M. 2009.** Recyclage des eaux usées en irrigation : potentiel fertilisant, risques sanitaires et impacts sur la qualité des sols. Thèse doctorat. université de Lausanne. 162 p.
- Soukeur, L. (2011).** Methodes d'analyse des sols. Ecole National Supérieure Agronomique – El Harrach.
- Sparks, L.D. (2003).** Environmental soil chemistry. Academic Press, 2nd Edition, 367p.
- Sposito, G. (1989).** The chemistry of soils, Edition Oxford, University Press. p 277.
- Srivastava, N.K., Majumder, C.B. (2008).** Novel biofiltration methods for the treatment of heavy metals from industrial wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 151, 1-8.
- Stankovic, S., Kalaba, P., Stankovic, A. R. (2014).** Biota as toxic metal indicators. *Environmental Chemistry. Letters*, 12(1). 63-84.
- Stankovic, S., Stankovic, A. R. (2013).** Bioindicators of toxic metals, Chapter 5. In Lichtfouse, E.,Schwarzbauer, J. and Robert, D., Eds., *Green Materials for Energy, Products and Depollution*, Series Volume 3, Springer Netherlands, 151-228.
- Suarez, D., James L., Wood, D Et Scott, M. (2006).** Effect of SAR on water infiltration under a sequential rain-irrigation management system. *Agricultural water management* 86,150-164.
- Szabolcs, I., Darab, C., (1964).** The influence of irrigation water of high sodium carbonate content of soils. In: *Proceedings of the 8th international congress of ISSS*, Trans, 2, 803–812.

T

- Tamrabet L., 2011.** Contribution à l'étude de la valorisation des eaux usées en maraichage. Thèse doc. Univ. Batna 146 pages.
- Tamrabet, L., Goléa, D., Bouzerzour, H. (2002).** La réutilisation des eaux usées en agriculture: insuffisances et solutions des méthodes de traitement des effluents en Algérie. *Watmed2002*, Monastir, Tunisie. Pp. 295-302.

- Tamrabet, L. (2007).** Traitement et réutilisation des eaux usées dans les pays du MENA: Cas de l'Algérie. Rapport réalisé pour le compte de la FAO (Office Régional du FAO au Proche Orient, Caire, Egypte).
- Tamrabet, L., Bouzerzour, H., Kribaa, M et Golea, D. (2005).** Caractérisation de la pollution des eaux des Oueds El Kleb et Boumerzoug (Nord Est Algérien). In : Actes du Congrès du Bassin méditerranéen sur l'eau : Watmed2. Université Cadi Ayyadh, Marrakech, Maroc.
- Tamrabet, L., Bouzerzour, H., Kribaa, M. et Golea, D. (2003).** Le devenir des eaux usées traitées: Réponse de deux graminées fourragères, l'orge et l'avoine, aux apports d'eau usée traitée. In: Actes du Colloque international Oasis, Eau et Population. Université Khider, Biskra, Algérie.
- Templ, M., Filzmoser, P., Reimann, C. (2008).** Cluster analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, 23, 2198–2213.
- Thomas, O. (1995).** Métrologie des eaux résiduaires. Ed. Cebedoc. Tec et Doc. Lavoisier, 192p.
- Todd, K. (1980).** Groundwater hydrology, J. Wiley & Sons, 2nd Edition, New York, USA.
- Tomlinson, D.L, Wilson, J.G., Harris, C.R. (1980).** Problems in the assessments of heavy metal levels in estuaries and formation of a pollution index. *Helgol Meeresunters*, 33: p. 566-575. <https://doi.org/10.1007/BF02414780>
- Tremel-Shaub, A., Fiex, I. (2005).** Contamination des sols transfert des sols vers les plantes. Édition EDP, science ADME. 416 pp.
- Tuffery, G. (1980).** Incidences écologiques de la pollution des eaux courantes, révélateurs biologiques de pollution des eaux continentales. Pesson. Paris.

U

- U.N.E.P. (2003).** Récupération et réutilisation des eaux usées dans la région Méditerranéenne. UNEP(DEC)/MED WG.231/Inf.5, 77 p.

V

- Vilain, M. (1989).** La production végétale. Vol. 2: La maîtrise technique de la production. Ed. Lavoisier, Paris (France).

W

- Wilcox, L.V. (1948).** The quality of water for agricultural use. US Dept Agriculture Tech. Bull. 1962, Washington D.C.
- Williams, V.D. (1987).** Salinization of rivers and streams : An important environmental hazard. *Ambio* 16 : 181-185.

Z

- Zaiz, I., Zine, B., Boutoutaou, D Et Khechana, S. (2017).** Contribution to the study of the quality physicochemical of the waters of the water of the complex terminal in the valley of oued souf (south-east algerian). *J. Fundam. Appl. Sci.* 9(3), 1559-1568.

Annexe

- Grille d'appréciation de la qualité de l'eau en fonction de la turbidité (FAO, 2003)

Turbidité NTU	Classe
<25	Bonne
25 à 30	Acceptable
30 à 35	Médiocre
>35	Excessivement polluée

- Grille de qualité des eaux suivant la concentration en nitrates (ABH-CSM, 2005).

Teneurs en nitrate (NO ₃ ⁻) par mg/l	Qualité des eaux
<5	Bonne
5 < NO ₃ ⁻ < 25	Moyenne avec signe de pollution
25 < NO ₃ ⁻ < 50	polluées avec une pollution nette
>50	La pollution est importante

- Qualité des eaux en fonction de la quantité de Magnésium (DHWCNE, 2005).

Magnésium (Mg ²⁺) par mg/l	Qualité
<30	Bonne
50	Acceptable
400	Médiocre
>400	Excessivement polluée

- Grille de la qualité des eaux suivant la concentration en nitrite (ABH-CSM, 2005).

Teneurs en nitrites NO ₂ ⁻ par mg /l	Qualité des eaux	Classe
< 0.1	Excellente	1A
0.1 < NO ₂ < 0.3	Bonne	1B
0.3 < NO ₂ < 1	Passable	2
1 < NO ₂ < 2	Médiocre	3
> 2	Pollution Excessive	4

- Grille de la qualité des eaux suivant la concentration en Ammonium (ABH-CSM, 2005).

Teneurs en Ammonium (NH ₄ ⁺) par mg /l	Qualité des eaux
< 0.1	Excellente
0.1 < NH ₄ ⁺ < 0.5	Bonne
0.5 < NH ₄ ⁺ < 2	Passable
2 < NH ₄ ⁺ < 8	Médiocre
> 8	Pollution Excessive

- Grille de la qualité des eaux suivant la concentration en Phosphates (PO₄⁻²) (ABH-CSM, 2005).

Teneurs en Phosphates (PO ₄ ⁻²) par mg /l	Qualité des eaux
< 0.2	Excellente
0.2 < PO ₄ ⁻² < 0.5	Bonne
0.5 < PO ₄ ⁻² < 1	Passable
1 < PO ₄ ⁻² < 2	Médiocre
> 2	Pollution Excessive

- Qualité de l'eau en fonction de la dureté (Bremond, 1973).

Dureté par mg/l CaCO ₃	Qualification de l'eau
0-30	Très douce
31-60	Douce
61-120	Moyennement douce
121-180	Dure
>180	Très dure

- Grille multi-usage donnant les critères d'appréciation globale de la qualité des eaux (Radou et al., 1995). Cette grille fixe 5 classes de qualité selon les usages que doit satisfaire les rivières. Chaque classe regroupe les valeurs de plusieurs paramètres.

Classes	Caractéristiques
Classe 1A	Elle caractérise les eaux considérées comme exemptes de pollution et aptes à satisfaire les usages les plus exigeants en qualité.
Classe 1B	D'une qualité légèrement moindre, ces eaux peuvent néanmoins satisfaire tous les usages.
Classe 2	Qualité « passable » : suffisante pour l'irrigation, les usages industriels et la production d'eau potable après un traitement poussé. L'abreuvement des animaux est généralement toléré. Le poisson y vit normalement mais sa reproduction peut être aléatoire.
Classe 3	Qualité « médiocre » : juste apte à l'irrigation, au refroidissement et à la navigation. La vie piscicole peut subsister dans ces eaux mais elle y est aléatoire en période de faibles débits ou de fortes températures, par exemple.
Classe > 3	Eaux dépassant la valeur maximale tolérée en classe 3 pour un ou plusieurs paramètres. Elles sont considérées comme inaptes à la plupart des usages, et peuvent constituer une menace pour la santé publique et l'Environnement.

Paramètres	Classe 1A	Classe 1B	Classe 2	Classe 3
Conductivité (µS/cm)	≤ 400	400 à 750	750 à 1500	1500 à 3000
Température (°C)	≤ 20	20 à 22	22 à 25	25 à 30
pH	6,5 à 8,5	6,5 à 8,5	6 à 9	5,5 à 9,5
(mg/l)	≤ 30	≤ 30	≤ 30	30 à 70
O ₂ dissous (mg/l)	≥ 7	5 à 7	3 à 5	Milieu aérobie à maintenir en permanence
O ₂ dissous (en % de saturation)	≥ 90 %	70 à 90	50 à 70	
DBO ₅ (mg/l)	≤ 3	3 à 5	5 à 10	10 à 25
Oxydabilité (mg/l)	≤ 3	3 à 5	5 à 8	-
DCO (mg/l)	≤ 20	20 à 25	25 à 40	40 à 80
NH ₄ ⁺	≤ 0,1	0,1 à 0,5	0,5 à 2	2 à 8
NO ₃ ⁻	-	-	< 44	44 à 100
N total (Kjeldahl)	≥ 1	1 à 2	2 à 3	-
Fe (mg/l)	≤ 0,5	0,5 à 1	1 à 1,5	-
Mn (mg/l)	≤ 0,1	0,1 à 0,25	0,25 à 0,5	-
Cu (mg/l)	≤ 0,02	0,02 à 0,05	0,05 à 1	≥ 1
Ni (mg/l)	≤ 0,02	0,02 à 0,05	0,05 à 1	≥ 1
Zn (mg/l)	≤ 0,5	0,5 à 1	1 à 5	≥ 5
As (mg/l)	≤ 0,01	≥ 0,01	0,01 à 0,05	≥ 0,05
Cd (mg/l)	≤ 0,001	≤ 0,001	≤ 0,001	≥ 0,001
Cr (mg/l)	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≥ 0,05
CN (mg/l)	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≥ 0,05
Pb (mg/l)	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≥ 0,05
Se (mg/l)	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,01	≥ 0,01
Hg (mg/l)	≤ 0,0005	≤ 0,0005	≤ 0,0005	≥ 0,0005
Phénols (mg/l)	-	≤ 0,001	0,001 à 0,05	0,05 à 0,5
Détergents (mg/l)	≤ 0,2	≤ 0,2	0,2 à 0,5	≥ 0,5
Coliformes fécaux	≤ 50	50 à 5.10 ³	5.10 ³ à	-

- 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., 2013).

Paramètre	Unité	Degré de restriction imposé à l'utilisation			
		Aucun	Faible à modéré	Important	
Salinité, EC _w ^a	dS/m	<0.7	0.7–3.0	>3.0	
TDS	mg/l	<450	450–2000	>2000	
TSS	mg/l	<50	50–100	>100	
SAR ^b	0–3	meq/l	>0.7 EC _w	0.7–0.2 EC _w	<0.2 EC _w
SAR	3–6	meq/l	>1.2 EC _w	1.2–0.3 EC _w	<0.3 EC _w
SAR	6–12	meq/l	>1.9 EC _w	1.9–0.5 EC _w	<0.5 EC _w
SAR	12–20	meq/l	>2.9 EC _w	2.9–1.3 EC _w	<1.3 EC _w
SAR	20–40	meq/l	>5.0 EC _w	5.0–2.9 EC _w	<2.9 EC _w
Sodium (Na ⁺)	Irrigation par aspersion	meq/l	<3	>3	
Sodium (Na ⁺)	Irrigation superficielle	meq/l	<3	3–9	>9
Chlorure (Cl ⁻)	Irrigation par aspersion	meq/l	<3	>3	
Chlorure (Cl ⁻)	Irrigation superficielle	meq/l	<4	4–10	>10
Chlore (Cl ₂)	Total résiduel	mg/l	<1	1–5	>5
Bicarbonate (HCO ₃ ⁻)		mg/l	<90	90–500	>500
Bore (B)		mg/l	<0.7	0.7–3.0	>3.0
Sulfure d'hydrogène (H ₂ S)		mg/l	<0.5	0.5–2.0	>2.0
Fer (Fe)	Irrigation par goutte-à-goutte	mg/l	<0.1	0.1–1.5	>1.5
Manganèse (Mn)	Irrigation par goutte-à-goutte	mg/l	<0.1	0.1–1.5	>1.5
Azote total (AT)		mg/l	<5	5–30	>30
pH			Plage normale : 6,5–8		

- Interprétation des diagrammes de Wilcox et Richards.

Richards	Wilcox	Etat
Bonne	C2S1	Caractérise des eaux d'assez bonne qualité, pouvant être utilisées sans contrôle particulier pour l'irrigation de plantes moyennement tolérantes aux sols ayant une bonne perméabilité. Cette classe est à utiliser avec précaution dans les sols lourds, mal drainés et pour les plantes sensibles (fruitiers)
	C2S2	
Admissible	C3S1	Désigne des eaux médiocres, utilisables seulement pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés. La classe C3S2 utilisable avec beaucoup de précautions dans les sols légers et bien drainés avec doses de lessivage et/ou apports de gypse
	C3S2	
Médiocre	C4S2	Indique des eaux de mauvaise qualité fortement minéralisées, qui ne peuvent convenir qu'à des espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés
	C3S3	
	C4S1	
Mauvaise	C4S4	Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certaines conditions.
	C3S4	
	C4S3	

- Directives pour l'évaluation de la qualité d'une eau d'irrigation d'après la FAO (Ayers et Westcot, 1994).

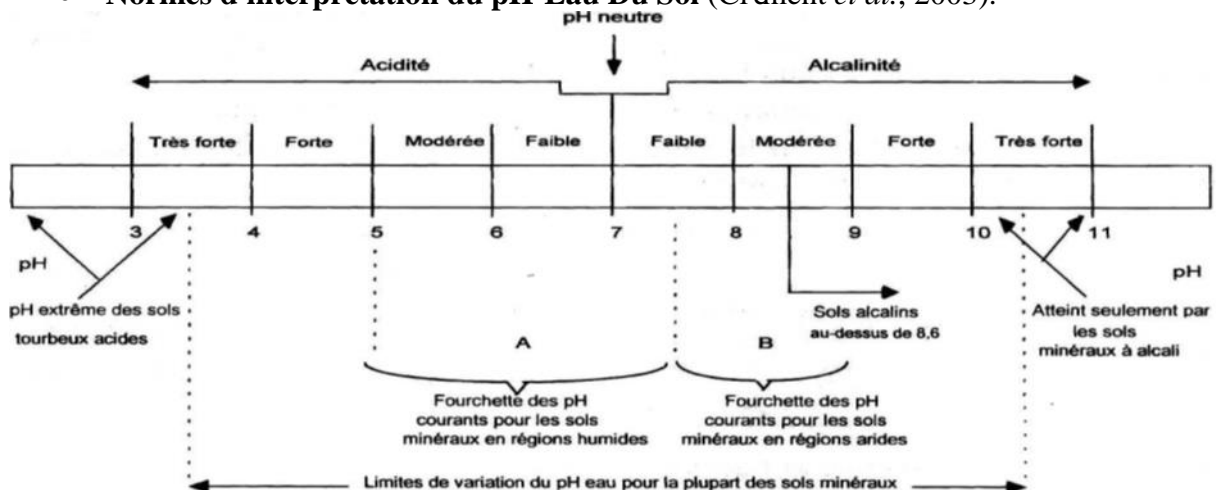
Problèmes potentiels en irrigation	Unités	Restriction pour l'irrigation		
		PP	PC	PG
CE	mS/m	<0.7	0.7-3.0	>3.0
TDS	mg/l	<450	450-2000	>2000
Infiltration : SAR = 0-3 et CE =	mS/m	>0.7	0.7-0.2	<0.2
SAR = 3-6 et CE =		>1.2	1.3-0.3	<0.3
SAR = 6-12 et CE =		>1.9	1.9-0.5	<0.5
SAR = 12-20 et CE =		>2.9	2.9-1.3	<1.3
SAR = 20-40 et CE =		>5.0	5.0-2.9	<2.9
Toxicité de certains ions (affectent les cultures sensibles)				
Sodium : Irrigation de surface	SAR	3	3-9	>9
Sodium : Irrigation par aspersion	m éq/l	<3	>3	
Chlore : Irrigation de surface	m éq/l	<4	4-10	>10
Chlore : Irrigation par aspersion	m éq/l	<3	>3	
Bore	mg/l	<0.7	0.7-3.0	>3.0
Effets divers				
Azote (NO ₃ -N)	mg/l	<5	5-30	>30
Bicarbonate (HCO ₃)	m éq/l	<1.5	1.5-8.5	>8.5
pH		Zone normale : 6.5-8.4		
SAR : ratio d'absorption du sodium				
PP : pas de problèmes ; PC : problèmes croissants ; PG : problèmes grave				

- Normes Algériennes pour les eaux de surface.

17 Rajab 1432 19 juin 2011		JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 34		5	
<p>— ouvrages de dérivation des écoulements de surface ;</p> <p>— retenues d'eaux superficielles.</p> <p>Art. 5. — Les prélèvements d'échantillons aux fins de contrôle de conformité sont effectués selon les périodicités minimales suivantes :</p> <p>— pour les eaux souterraines : deux (2) prélèvements échantillons par an pour chaque point de prélèvement, à raison d'au moins un (1) échantillon par semestre.</p> <p>— pour les eaux superficielles : quatre (4) échantillons par an pour chaque point de prélèvement, à raison d'au moins un (1) échantillon par trimestre.</p> <p>Ces périodicités peuvent être augmentées pour tout ou partie des paramètres faisant l'objet d'analyses et, ce, en fonction de la qualité des ressources en eau.</p> <p>Art. 6. — La liste des points de prélèvement et les modalités de prélèvement d'échantillons sont fixées par arrêté du ministre chargé des ressources en eau.</p>		<p>Art. 7. — Lorsqu' il est constaté un dépassement des valeurs maximales pour tout ou partie des paramètres, l'administration chargée des ressources en eau avise les organismes exploitants concernés aux fins de prendre les mesures adéquates permettant d'assurer la continuité de l'alimentation en eau des populations sans risque pour la santé.</p> <p>Les modalités d'application du présent article sont fixées par arrêté du ministre chargé des ressources en eau.</p> <p>Art. 8. — Le présent décret sera publié au <i>Journal officiel</i> de la République algérienne démocratique et populaire.</p> <p>Fait à Alger, le 10 Rajab 1432 correspondant au 12 juin 2011.</p> <p style="text-align: right;">Ahmed OUYAHIA.</p>			
<p>-----</p> <p>ANNEXE</p> <p>Objectifs de qualité des eaux superficielles et souterraines destinées à l'alimentation en eau potable des populations</p>					
Groupes de paramètres	Paramètres	Unité	Valeur maximale		
			Eaux superficielles	Eaux souterraines	
Paramètres organoleptiques	Couleur	mg/l Echelle Pt	200	20	
	Odeur (taux dilution à 25°)	—	20	3	
Paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux	Chlorures	mg/l Ci	600	500	
	Concentration en ions hydrogène (pH)	Unité pH	≥ 6,5 et ≤ 9	≥ 6,5 et ≤ 9	
	Conductivité	μS/cm à 20°C	2800	2800	
	Demande biochimique en oxygène (DBO 5)	mg/l O2	7	< 3	
	Demande chimique en oxygène (DCO)	mg/l O2	30	—	
	Matières en suspension	mg/l	25	25	
	Sulfates	mg/l SO4	400	400	
	Taux de saturation en oxygène dissous	% O2	30	> 70	
Température	°C	25	25		
	Ammonium	mg/l	4	0,5	

6		JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 34		17 Rajab 1432 19 juin 2011	
ANNEXE (suite)					
Groupes de paramètres	Paramètres	Unité	Valeur maximale		
			Eaux superficielles	Eaux souterraines	
Paramètres chimiques	Baryum	mg/l	1	0,7	
	Bore	mg/l	1	1	
	Fer dissous	mg/l	1	0,3	
	Fluor	mg/l	2	1,5	
	Manganèse	mg/l	1	0,05	
	Nitrates	mg/l NO3	50	50	
	Phosphore	mg/l	10	5	
	Arsenic	µg/l	100	10	
	Cadmium	µg/l	5	5	
	Chrome	µg/l	100	50	
	Cuivre	Mg/l	2	0,05	
	Cyanures	µg/l	100	50	
	Mercure	µg/l	10	6	
	Plomb	µg/l	50	10	
	Sélénium	µg/l	50	10	
	Zinc	mg/l	5	5	
	Hydrocarbures polycycliques aromatiques	µg/l	1	0,2	
	Hydrocarbures dissous	µg/l	1000	10	
	Phénols	µg/l	2	0,5	
	Agents de surface	mg/l	0,5	0,2	
Azote Kjeldhal	mg/l	3	1		
Pesticides	µg/l	1	0,5		
Paramètres microbiologiques	Escherichia coli	n/100ml	20.000	20	
	Entérocoques	n/100ml	10.000	20	
	Salmonelles	—	Absence dans 1000 ml	Absence dans 5000 ml	

- Normes d'interprétation du pH-Eau Du Sol (Clément *et al.*, 2003).



- **Salinité totale** : Classe de salinité en fonction de la conductivité électrique de l'extrait aqueux à 25 °C (Clément *et al.* 2003).

mmhos.cm ⁻¹ dS.m ⁻¹	0,6	1	2	3	4
CE _{1/5}	non salé	légèrement salé	salé	très salé	extrêmement salé

- **Matière Organique** : Normes d'interprétation de la (Soltner, 1981).

Taux de matière organique	Appréciation
< 1	Extrêmement faible
1 – 1,5	Très faible
1,5 – 2,5	Faible
2,5 – 3,5	Moyenne
3,5 – 4,5	Moyennement élevée
4,5 – 5	Elevée
> 5	Très élevée

- **Calcaire total** : Normes d'interprétation du taux du calcaire du sol (Baize, 1988).

Taux du calcaire	< 1 %	1 à 5 %	5 à 25 %	25 à 50 %	50 à 80 %	> 80 %
Appréciation	Non calcaire	Peu calcaire	Modérément calcaire	Fortement calcaire	Très fortement calcaire	Excessivement calcaire

- **Capacité d'échange Cationiques « CEC »** selon le programme d'interprétation LANO/CA de Basse Normandie

VALEUR DE LA CEC EN m éq/100 g	INTERPRETATION
CEC < 9	Petite CEC
$9 \leq \text{CEC} \leq 12$	CEC moyenne
$12 < \text{CEC} \leq 15$	CEC assez élevée
$15 < \text{CEC} \leq 25$	CEC élevée
CEC > 25	CEC très élevée

- **Le phosphore assimilable** : Normes d'interprétation pour le phosphore assimilable Olsen selon le programme d'interprétation LANO/CA de Basse Normandie

	P ₂ O ₅ (mg/kg)
Très faible	0-5
faible	5-10
Moyen	10-22
Elevé	>22

- **Azote total (N%)** : Norme d'interprétation selon le programme d'interprétation LANO/CA de Basse Normandie

Nature du sol	Sol très pauvre	Sol pauvre	Sol moyen	Sol riche	Sol très riche
Azote (%)	<0,05	0,05 à 0,1	0,1 à 0,15	0,15 à 0,25	>0,25

- Erreur carre moyenne de variance pour les résultats sol.

Source de variation	ddl	Erreur	Source de variation	ddl	Erreur
pH	36	0.02	MO%	36	2.47
CE	36	0.24	CEC	36	1.35
CaCO ₃	36	1.46	N%	36	0.01
HCO ₃ ⁻	36	0.0	Pb	36	1.22
Cl ⁻	36	23.01	Cd	36	0.47
P ₂ O ₅	36	27.97	Zn	36	390.7
SO ₄ ²⁻	36	1769.0		36	