

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté des Sciences

Département Eau, Environnement et Développement Durable



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Eau et Environnement

Par

AMINA BELDJILALI

Thème :

Irrigation par utilisation des eaux usées traitées, impacts et toxicité sur les aspects nutritionnels, physiologiques et biochimiques de la tomate

« *Solanum lycopersicum* »

Soutenue le 16/12/2021, devant le jury composé de :

Abdelkader BOUTHIBA	Professeur	Université de Chlef	Président
Adda ABABOU	Professeur	Université de Chlef	Rapporteur
Djilali ACHOUR	Professeur	Université de Chlef	Examineur
Houcine Abdelhakim	Professeur	Université de Mostaganem	Examineur
REGUIEG YSSAAD			
Moulay BELKHODJA	Professeur	Université d'Oran	Examineur

Remerciements

Ces quelques expressions vont me permettre de remercier tous ceux qui m'ont beaucoup apporté au niveau scientifique mais aussi personnel.

Cette thèse a été réalisée à l'Université de Hassiba Benbouali de Chlef, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie. Elle s'inscrit dans une dynamique de recherches dans le domaine de la protection des ressources en eau et de l'environnement et aborde particulièrement des thèmes issus de l'Agronomie. Ce travail a été réalisé grâce à l'octroi d'une bourse doctorale PNE de mon pays l'État Algérien. C'est pourquoi je tiens à remercier infiniment les Autorités gouvernementales pour cette opportunité.

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères à Monsieur **Ababou Adda**, professeur à l'université de Chlef, mon directeur de recherche qui m'a accordé sa confiance. Sa contribution hautement distinguée dans la réalisation de ce travail me restera à l'esprit. Son sens d'appréciation scientifique, sa rigueur pour le travail bien fait, ses suggestions pertinentes dans la recherche et surtout sa disponibilité, ont permis de clarifier mes pensées. Je lui remercie pour ses différentes orientations.

J'adresse un grand merci à Madame **Emilia Fernández Ondoño**, professeur à l'université de Grenade (Espagne) pour l'accueil et la place qu'elle m'a réservé dans son laboratoire, avec son groupe de recherche, et toute l'aide fournie pour faire de mon cursus dans son laboratoire une expérience enrichissante et qui grâce à lui mon rêve de finir ce projet est réalisé.

Mes vifs remerciements vont à Monsieur **Bouthiba Abdelkader**, professeur à l'université de Chlef qui était toujours disponible et qui m'a toujours encouragé et m'a trop aidé depuis le début jusqu'à la fin de cette thèse. Je lui remercie également pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury, pour ses précieux conseils. Ses encouragements ont eu un effet positif quant à l'aboutissement de ce travail.

Je remercie Monsieur **Houcine Abdelhakim Reguieg Yssaad**, professeur à l'université de Mostaganem pour avoir accepté d'examiner ce travail et d'apporter ses critiques tant constructives.

Je tiens à remercier vivement Monsieur **Moulay Belkhodja**, professeur à l'Université d'Oran pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail et de contribuer par ces conseils tant souhaités.

Je tiens à exprimer mes remerciements à Monsieur **Achour Djilali**, professeur à l'Université de Chlef pour avoir accepté d'examiner et de juger ce travail, qu'il trouve ici l'expression de ma grande reconnaissance.

Je remercie vivement Monsieur **Aichouni Ahmed**, professeur et directeur de laboratoire de Bio Ressources Naturelles à l'université de Chlef pour la place qu'il m'a réservé au sein de son laboratoire et qui m'a toujours encouragé depuis le début et pour sa disponibilité.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble des enseignants de la faculté SNV de Chlef, en particulier la doyenne Madame **Malika Meziane** et Monsieur **Abdellah Noui**, vice doyen de la faculté qui m'ont été une aide très précieuse.

Un grand merci à Monsieur **Djamel Mebarki**, l'ingénieur de laboratoire pédagogique à l'université de Chlef pour toute aide (matériels ou technique ou tout simplement humaine).

Je remercie la directrice et tous les responsables du **Laboratoire d'analyse microbiologique de l'ADE** de Chlef, pour leurs aide et pour m'avoir permis de réaliser toute la partie des analyses microbiologiques des eaux.

Je remercie également Monsieur **Bekhedda Cherif**, responsable au service de coopération au rectorat de l'université de Chlef pour son aide, sa disponibilité et ses encouragements.

Je remercie également la directrice de la **station d'épuration** de Chlef qui m'a aidé en me fournissant une partie de la documentation nécessaire à la réalisation de la partie bibliographique de mon travail.

J'exprime aussi toute ma reconnaissance envers les responsables de la **station expérimentale agronomique** de l'université de Chlef, pour leurs gentillesse, encouragements, disponibilités et leurs aides sur terrain durant toute la période de l'expérimentation.

Je ne peux oublier mes amis, doctorants, et les techniciens du labo avec qui j'ai partagé une tranche de ma vie, pour avoir apporté de la bonne humeur dans le travail ; merci et bonne chance à tous.

Et enfin, Je tiens à exprimer toute ma gratitude à ma famille et surtout mes chers parents qui ont toujours été des fervents supporteurs de mes travaux sans vraiment savoir ce que c'était. Je leurs remercie pour leurs sacrifices et compréhensions, sans oublier mon mari, je lui remercie pour sa patience et ses encouragements constants qui m'ont permis de terminer ce travail dans les meilleures conditions.

Si par mégarde j'ai oublié quelqu'un, qu'il me pardonne et qu'il soit remercié pour tout

Dédicaces

A ceux qui ont fait de moi ce que je suis et qui sont toujours présents
pour me soutenir à tout moment. A tous ceux qui m'ont toujours porté
dans leurs cœurs.

A mes parents, auxquels je dédie mon mémoire de thèse, pour tout ce qu'ils ont fait pour moi
et l'éducation que j'ai reçue de leur part, mon père pour son orientation et ma mère pour sa
tendresse

A mon mari qui m'a beaucoup soutenu

A mes frères et sœurs, chacun pour leur amour, compréhension et de leurs encouragements
continus.

Toute ma famille

A toutes mes amies

A tous ceux qui m'ont encouragé

Amina Belkhalil

تهدف هذه الدراسة البحثية إلى التحقق من آثار الري بمياه الصرف الصحي المعالجة على المعايير الفسيولوجية والكيميائية الحيوية للطماطم وعلى التربة. ولهذه الغاية، تم ري محصول طماطم بنوعين من المياه. تم سقي النوع الأول بمياه الصرف الصحي المعالجة بجرعات مختلفة من محطة معالجة مياه الصرف الصحي في الشلف ، بينما النوع الثاني تم سقيه بمياه الآبار.

تم إجراء تحليلات للمعايير الفسيولوجية والكيميائية الحيوية المختلفة للنبات (معايير النمو ومعايير الإنتاج ومحتوى العنصر الكيميائي في الثمار) في مراحل مختلفة من تطور النبات. (مرحلة 3 أوراق ، ومرحلة 5 أوراق ، ومرحلة 7 أوراق ، ومرحلة الإزهار ومرحلة الإثمار).

قبل الإنتاج وفي نهايته ، خضعت التربة لتحليلات فيزيائية كيميائية من حيث الأس الهيدروجيني ، والتوصيل الكهربائي ، و كربونات الكالسيوم ، والكربون العضوي ، والنيتروجين ، ومحتوى الكربون ، والقواعد القابلة للتبديل ، والمعادن الثقيلة. أظهرت النتائج ، مقارنة بمياه الآبار ، أن الري بمياه الصرف الصحي المعالجة له تأثير معنوي كبير على طول النبات وقطره وعدد الأوراق ومساحة الأوراق ، خاصة في المراحل اللاحقة من التطور. فيما يتعلق بالإنتاجية، لوحظت فروق ذات دلالة إحصائية بين نوعي الماء وبين الجرعات المختلفة. في هذا السياق، تجدر الإشارة إلى أن التباين الكبير يُفسر بتأثير الجرعة وتأثير جودة المياه.

فيما يتعلق بالمعادن الثقيلة وعلى الرغم من وجودها في الثمار بجرعات ضئيلة ، يمكن ملاحظة أنه باستثناء الكوبالت والرصاص ، أظهر الري بمياه الصرف الصحي تركيزات أعلى بكثير من الكروم والمنغنيز والنيكل والنحاس والزنك والكاديوم مقارنة بمياه الآبار.

على مستوى التربة ، أدى الري بمياه الصرف الصحي المعالجة إلى زيادة ملحوظة في التوصيل الكهربائي ، وثاني أكسيد الكربون ، ونسبة الكربون والنيتروجين ، وتراكبات كبيرة من الكروم والمنغنيز والنحاس والزنك والكاديوم مقارنة بمياه الآبار. من خلال النتائج الملاحظة، يجب توخي الحذر عند الري بمياه الصرف الصحي. لذلك ، فمن المستحسن استخدام مياه الصرف الصحي في تربة جيدة التصريف وري الحدائق والمروج.

الكلمات المفتاحية: مياه الصرف الصحي المعالجة ، الري ، الطماطم ، علم وظائف الأعضاء ، الكيمياء الحيوية ، المعادن الثقيلة.

Résumé

Cette recherche a été conduite, afin de vérifier les effets de l'irrigation par les eaux usées traitées sur les paramètres physiologiques et biochimiques de la tomate et sur le sol. A cet effet, une culture de tomate sous serre a subi de deux types d'eau d'irrigations, l'une par utilisation des eaux usées traitées à différentes doses provenant de la station d'épuration de Chlef, et l'autre, par utilisation des eaux de puits.

Les analyses des différents paramètres physiologiques et biochimiques de la plante (paramètres de croissance, paramètres de production et la teneur en éléments chimiques dans les fruits) ont été effectuées à différents stades de développement de la plante, le stade 3 feuilles, le stade 5 feuilles, le stade 7 feuilles, le stade floraison et le stade fructification, aussi avant et en fin de production le sol a fait l'objet d'analyses physico-chimiques en termes de pH, conductivité électrique, CaCO_3 , carbone organique, taux d'azote, taux du carbone, bases échangeables et métaux lourds.

Les résultats ont montrés, que comparativement à l'eau de puits, l'irrigation avec les eaux usées traitées influe de manière significative ($P < 0.05$) à très significative ($P < 0.01$) sur la hauteur, le diamètre de la plante, le nombre de feuilles et la surface foliaire, surtout dans les derniers stades de développement de la plante. Concernant le rendement, des différences très significatives ($P < 0.01$) ont été observées entre les deux types d'eaux et entre les différentes doses, dans ce contexte il a été noté qu'une forte variabilité s'explique par l'effet de dose et l'effet de qualité des eaux.

En termes de métaux lourds et malgré leurs présence dans le fruits en dose insignifiantes, il a été remarqué qu'à l'exception du cobalt et du plomb, l'irrigation avec les eaux usées traitées a montrée des concentrations significativement élevés en Chrome, Manganèse, Nickel, Cuivre, Zinc et Cadmium par comparaison à l'eau de puits.

Au niveau du sol, l'irrigation avec les eaux usées traité a produit une hausse significative de la conductivité électrique, du CO_2 , du C% et de l'azote, ainsi que des accumulations significatives en Chrome, Manganèse, Cuivre, Zinc et Cadmium par comparaison à l'eau de puits.

Vu les effets observés, il faut être vigilant lors de l'irrigation avec les eaux usées, ainsi il est conseillé d'utiliser ces eaux sur des sols bien drainés et pour l'irrigation des parcs et des pelouses.

Mots clés : Eau usée traitée, irrigation, tomate, physiologie, biochimie, métaux lourds.

Abstract

This research study aims to verify the effects of irrigation with treated wastewater on tomatoes' physiological and biochemical parameters and the soil. To this end, a greenhouse tomato crop was irrigated with two types of water. The first type of irrigation was carried out with treated wastewater at different doses from the Chlef wastewater treatment plant, while the second type was carried out with well water.

The analyses of the plant's different physiological and biochemical parameters (growth parameters, production parameters and chemical element content in the fruits) were carried out at different stages of the plant's development. These were the 3-leaf stage, the 5-leaf stage, the 7-leaf stage, the flowering stage and the fruiting stage. Furthermore, before and at the end of production, the soil was subjected to physico-chemical analyses in terms of pH, electrical conductivity, CaCO₃, organic carbon, nitrogen and carbon content, exchangeable bases and heavy metals.

The results show that, compared to well water, irrigation with treated wastewater significantly ($P < 0.05$) to highly significantly ($P < 0.01$) affects plant height, diameter, number of leaves and leaf area, especially in the later stages of development. With regard to yield, highly significant differences ($P < 0.01$) were observed between the two types of water and between the different doses. In this context, it should be noted that high variability is explained by the dose-effect and the water quality effect.

Concerning heavy metals and despite their presence in the fruits at insignificant doses, it can be noted that, except cobalt and lead, irrigation with treated wastewater showed significantly higher concentrations of Chromium, Manganese, Nickel, Copper, Zinc and Cadmium compared to well water.

At the soil level, irrigation with treated wastewater produced a significant increase in electrical conductivity, CO%, C% and nitrogen, and significant accumulations of Chromium, Manganese, Copper, Zinc and Cadmium compared to well water. Due to the observed effects, caution should be exercised when irrigating with wastewater.

Therefore, it is advisable to use wastewater on well-drained soils and for irrigation of parks and lawns.

Keywords: Treated wastewater, irrigation, tomato, physiology, biochemistry, heavy metals.

Table des matières

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des photos

Liste des abréviations

Introduction générale

CHAPITRE I : REUTILISATION DES EAUX USEES EN AGRICULTURE

01	Pénurie d'eau et réutilisation des eaux usées.....	04
02	Avantages et intérêt de la réutilisation des eaux usées en agriculture.....	07
03	Réutilisation des eaux usées dans l'agriculture à travers le monde.....	09
04	Utilisation des eaux usées en agriculture.....	13
05	Réutilisation des eaux usées traitées en Algérie.....	15
	5.1. La réutilisation indirecte.....	16
	5.2. La réutilisation directe.....	16
06	Effet de l'utilisation des eaux usées sur les eaux souterraines.....	19
07	Effet de l'utilisation des eaux usées sur les propriétés du sol.....	19
	7.1. Effet à long terme de l'utilisation des eaux usées sur le sol.....	20
08	Effet sur les animaux.....	21
09	Effet de l'utilisation des eaux usées sur l'environnement	21

CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE

01	Présentation de la région de Chlef.....	24
	1.1.Situation géographique.....	24
	1.2.Le relief.....	24
	1.3.Le sol.....	25
	1.4.Végétation.....	25
02	Climatologie.....	25
	2.1. Sources des données.....	26
	2.1.1. Précipitations.....	26
	2.1.1.1. Répartition annuelle des précipitations.....	27

2.1.1.2. Régime pluviométrique saisonnier.....	28
2.1.2. La température.....	28
2.2. Synthèse Bioclimatique.....	29
2.2.1. Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausсен.....	29
2.2.2. Quotient pluviométrique d'Emberger.....	30
2.2.3. Indice d'aridité.....	31
2.2.4. Le vent.....	32
2.2.5. L'ensoleillement.....	33
2.2.6. L'évaporation.....	33
2.2.7. L'humidité relative.....	33

CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES

**PARTIE I : ANALYSE PHYSICO CHIMIQUES DES EAUX USEES
TRAITEES**

01	Présentation et localisation du site de prélèvement.....	34
	1.1.Présentation de la STEP.....	34
	1.2.Principe et fonctionnement du système de traitement.....	34
02	Prélèvement des eaux usées traitées.....	36
03	Analyses physicochimiques.....	37
	3.1. Mesure de la température.....	37
	3.2. Mesure du pH, conductivité électrique (CE).....	37
	3.3.Détermination des matières en suspension (MES).....	37
	3.4.Détermination de la demande biologique en oxygène (DBO5).....	38
	3.5.Détermination de la demande chimique en oxygène (DCO).....	38
	3.6.Dosage des nitrates (NO3-).....	38
	3.7.Dosage des nitrites (NO2-).....	38
	3.8.Dosage d'ammonium (NH4+).....	39
	3.9.Analyse des métaux lourds.....	39
04	Analyses microbiologiques.....	39

**PARTIE II : PRESENTATION DE L'EXPERIMENTATION ET
ANALYSES PHYSICOCHIMIQUES DU SOL**

01	Présentation de la station expérimentale.....	40
----	---	----

Table des matières

02	Technique de culture.....	40
	2.1. Préparation du sol.....	40
	2.2. Germination et semis.....	41
	2.3. Repiquage et irrigation.....	41
	2.4. Protocole expérimental.....	43
03	Analyse physicochimique.....	43
	3.1. Mesure du pH du sol.....	44
	3.2. Mesure de la Conductivité électrique (CE).....	44
	3.3. Analyse granulométrique.....	44
	3.4. Calcaire total.....	46
	3.5. Matière organique.....	47
	3.6. Bases échangeables.....	48
04	Analyse des métaux lourds.....	49
PARTIE III : ANALYSE DE LA MORPHOLOGIE ET METAUX LOURDS DANS LES TOMATES IRRIGUEES PAR LES EUT		
01	Paramètres morphologiques.....	50
	1.1. Paramètres de croissance.....	51
	1.2. Paramètres de production.....	52
02	Digestion et analyse chimique.....	53
03	Analyse statistique des données.....	
<u>CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSIONS</u>		
PARTIE I : ANALYSE PHYSICO CHIMIQUES DES EAUX USEES TRAITEES		
01	Caractérisation des effluents de la STEP de Chlef.....	57
	1.1.Evaluation de la qualité physico-chimique des EUT de la STEP de Chlef..	57
	1.1.1.Evolution de la température des EUT.....	57
	1.1.2.Evolution du PH.....	57
	1.1.3.Evolution des matières en suspension (MES).....	58
	1.1.4.Evolution de la conductivité électrique.....	58
	1.1.5.Evolution de la demande biologique en oxygène (DBO5).....	59
	1.1.6.Evolution de la demande chimique en oxygène (DCO).....	59

	1.1.7. <i>Les matières oxydables</i>	59
	1.1.8. <i>Evolution de l'ammonium</i>	60
	1.1.9. <i>Evolution des nitrites</i>	60
	1.1.10. <i>Evolution des nitrates</i>	60
	1.2. Analyse des éléments traces métalliques dans les EUT de la STEP de Chlef.....	62
	1.3. Caractérisation microbiologique des EUT de la STEP de Chlef.....	63
 PARTIE II : PRESENTATION DE L'EXPERIMENTATION ET ANALYSES PHYSICOCHIMIQUES DU SOL 		
01	Impact de l'irrigation par les EUT sur les propriétés physicochimiques des sols.....	65
	1.1. Incidence des eaux usées traitées sur les caractéristiques du sol.....	65
	1.1.1. <i>PH des sols</i>	66
	1.1.2. <i>La conductivité électrique (CE) des sols</i>	66
	1.1.3. <i>Les carbonates de calcium (CaCO₃)</i>	67
	1.1.4. <i>Le Carbone Organique des sols CO(%)</i>	67
	1.1.5. <i>L'azote (N)</i>	68
	1.1.6. <i>Complexe absorbant</i>	69
	1.1.7. <i>Effet de l'irrigation par les EUT sur la teneur du sol en métaux lourds</i>	70
	1.2. Analyse en Composante Principale des paramètres physico-chimiques.....	72
 PARTIE III : ANALYSES MORPHOLOGIQUES ET METAUX LOURDS DANS LA TOMATE « SOLANUM LYCOPERSICUM » 		
01	Impact des EUT sur les caractéristiques morphologiques des plants de tomate « Solanum lycopersicum ».....	73
	1.1. Effet sur la hauteur.....	73
	1.2. Effet sur le diamètre.....	74
	1.3. Effets sur le feuillage.....	75
	a. Effets sur le nombre de feuilles.....	75
	b. Effets sur la surface foliaire de la plante.....	77
02	Impact des EUT sur les paramètres de production.....	78

Table des matières

	a. Effets sur le nombre moyen de fruits.....	78
	b. Effets sur le rendement par traitement.....	79
03	Impacts des EUT sur la composition chimique de la tomate.....	80
	a. Concentrations des cations Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} et K^+ dans les fruits.....	80
	b. Bioaccumulation des métaux lourds dans le fruit de la tomate.....	81
	c. Analyse en composante principale.....	84
	Conclusion générale.....	85
	Références bibliographiques.....	87

Liste des figures

Figure 1:	Carte mondiale des ressources internes en eau renouvelables (IRWR) par pays en 2012, données du Groupe de la Banque mondiale.....	04
Figure 2:	Prélèvements annuels d'eau douce dans l'agriculture par pays (%), par rapport aux prélèvements totaux d'eau en 2012.....	07
Figure 3:	Pays ayant enregistré une utilisation des eaux usées en agriculture.....	10
Figure 4 :	Pays avec les plus grandes surfaces irriguées par des eaux usées non traitées et traitées.....	11
Figure 5:	Réutilisation des eaux usées.....	13
Figure 6:	Evolution du nombre des STEP et stations de lagunage en Algérie.....	16
Figure 7:	Volume d'eau usée épuré par wilaya septembre 2014.....	17
Figure 8 :	Localisation de la région d'étude.....	24
Figure 9:	Relief de la wilaya de Chlef.....	25
Figure 10:	Carte des zones naturelles dans la région de Chlef.....	26
Figure 11 :	Répartition annuelle des précipitations (1984-2013).....	27
Figure 12 :	Répartition saisonnière des précipitations (1984-2013).....	28
Figure 13 :	Variation des températures moyennes mensuelles minimales et maximales.....	29
Figure 14 :	Diagramme ombrothermique de la station de Chlef. Période (2005-2020)..	30
Figure 15 :	Climagramme d'EMBERGER de la région de Chlef.....	31
Figure 16 :	Abaque de l'indice d'aridité annuelle De Martonne.....	32
Figure 17:	Localisation de la station d'épuration de Chlef.....	34
Figure 18 :	Présentation générale des différents ouvrages de la STEP de Chlef.....	35
Figure 19 :	Variations de la température.....	57
Figure 20 :	Évolution du pH des eaux usées traitées.....	61
Figure 21 :	Évolution des matières en suspension des EUT.....	61
Figure 22 :	Variation temporelle de la CE.....	61
Figure 23 :	Variations de la demande biologique en oxygène (DBO5) des EUT.....	61
Figure 24 :	Variations de la demande chimique en oxygène (DCO) des EUT.....	61
Figure 25 :	Variations des matières oxydables des EUT.....	61
Figure 26 :	Variations du NH4 des EUT.....	61

Figure 27 :	Évolution du NO ₂ dans les EUT.....	61
Figure 28 :	Évolution du NO ₃ ⁻ dans les EUT.....	61
Figure 29 :	Bases échangeables.....	70
Figure 30 :	ACP, Projection des paramètres physico-chimiques et traitements sur le plan 1x2.....	72
Figure 31 :	Evolution de la hauteur moyenne des plants de tomate en fonction des doses d'irrigation	74
Figure 32 :	Evolution du diamètre des plants de tomate en fonction des doses d'irrigation	75
Figure 33 :	Evolution du nombre moyen des feuilles / plants de tomate en fonction des doses d'irrigation	76
Figure 34 :	Evolution de la surface foliaire des plants de tomate en fonction des doses d'irrigation	78
Figure 35 :	Variation du nombre moyen de fruits en fonction des doses d'irrigation.....	79
Figure 36 :	Variation du rendement/traitement en fonction des doses d'irrigation.....	79
Figure 37 :	Concentration de Na, Ca, Mg et K dans les fruits (mg/l)	81
Figure 38 :	Concentration en métaux lourds (mg/kg).....	83
Figure 39 :	ACP, Projection des paramètres chimiques et traitements sur le plan 1x2...	84

Liste des tableaux

Tableau 1 :	Typologie des bénéfices associés à la réutilisation des eaux usées.....	09
Tableau 2 :	Dotation annuelle en eau par habitant en Algérie (CNES, 2000).....	15
Tableau 3 :	Statistiques sur la réutilisation des eaux usées épurées à des fins agricoles..	18
Tableau 4 :	Typologie des risques associés à la réutilisation des eaux usées.....	23
Tableau 5 :	Statistiques descriptives des précipitations annuelles.....	27
Tableau 6 :	Moyenne mensuelle de vitesse des vents (1984-2013).....	33
Tableau 7 :	Moyennes mensuelles d'ensoleillement. (1984-2013).....	33
Tableau 8 :	Evaporation moyenne mensuelle en (mm) de la station de Chlef	33
Tableau 9 :	Humidité relative moyenne interannuelle en (%) dans la région de Chlef...	33
Tableau10 :	Réseau gravitaire d'alimentation de la STEP.....	36
Tableau11 :	Caractéristiques pratiques de l'arrosage et besoins en eau d'irrigation de la tomate.....	43
Tableau12 :	Description des traitements expérimentaux utilisés.....	43
Tableau13 :	Concentration des métaux lourds dans les eaux usées traitées (mg/l).....	63
Tableau14 :	Caractérisation microbiologique des EUE à la sortie de la STEP de Chlef.....	64
Tableau15 :	Granulométrie des sols utilisés.....	65
Tableau16 :	Caractérisation physico-chimique des sols.....	67
Tableau17 :	Matières organiques dans les sols.....	68
Tableau18 :	Bases échangeables (mg/l).....	70
Tableau19 :	Dosage des Éléments Traces Métallique dans le sol (mg/Kg).....	71
Tableau20 :	Variation de la hauteur moyenne de la plante (cm) durant les stades végétatifs en fonction des doses d'irrigation.....	74
Tableau21 :	Variation du diamètre moyen de la plante (cm) durant les stades végétatifs en fonction des doses d'irrigation.....	75
Tableau22 :	Variation du nombre moyen de feuilles de la plante (cm) durant les stades floraison et fructification en fonction des doses d'irrigation.....	76
Tableau23 :	Variation de la surface foliaire moyenne de la plante (dm ²) en fonction des stades végétatifs.....	77
Tableau24 :	Effets des EUT sur les fruits.....	80
Tableau25 :	Effet des EUT sur la composition en cations, azote (%N) et carbone (%C).	87
Tableau26 :	Dosage des Eléments Traces Métallique dans le fruit (mg/Kg).....	89

Liste des photos

Photo 01 :	Site de prélèvement : Sortie de la STEP de Chlef.....	36
Photo 02 :	Serre vitrée.....	40
Photo 03 :	Préparation du sol en pots.....	41
Photo 04 :	Semis et repiquage.....	42
Photo 05 :	Tamisage du sol à analyser.....	43
Photo 06 :	Mesure du pH et de la CE du sol.....	44
Photo 07 :	Mesure de la granulométrie du sol.....	46
Photo 08 :	Mesure du calcaire du sol.....	47
Photo 09 :	Mesure du carbone organique du sol.....	48
Photo 10 :	Spectrophotomètre d'absorption atomique SAA et le CN LECO Truspec.....	49
Photo 11 :	Les stades végétatifs de la culture de tomate.....	51
Photo 12 :	Mesure de la surface foliaire des plants de tomate.....	52
Photo 13 :	Echantillon de tomates broyées.....	53

Liste des abréviations

ADE : Algérienne des Eaux

CE : Conductivité électrique

CGER : Commission on Geosciences, Environment and Resources

C/N : Rapport Carbone/ Nitrogène

DBO5: Demande biochimique en oxygène à 5 jours

DCO : Demande chimique en oxygène

EP : Eau de puits

EUT : Eau Usées Traitées

FAO : Food and Agriculture Organisation (Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)

ha : hectare.

Kg : kilogramme

LA : Leaf Area

MADR : Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural

MES : Matière en Suspension

Mg : Milligramme

MO : Matière organique

MOx : Matières Oxydables.

NH₃: Ammoniac (mg/l).

NO⁻²: Nitrites (mg/l).

NO⁻³: Nitrates (mg/l).

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

ONA : Office National de l'Assainissement

ONM : Office National météorologique

ONID : Office National de l'Irrigation et Drainage.

ONID : Office National d'Irrigation Et de Drainage

pH : potentiel d'Hydrogène

REUE : Réutilisation des Eaux Usées Épurées.

SAT : Surface Agricole Totale

SAU : Surface Agricole Utile

Liste des abréviations

STEP: Station d'Épuration

TDS: Total Dissolved Solids

UE : Union Européen

WCED : World commission on Environmental Development

WHO: World Health Organization

3F: Stade 3 feuilles

5F: Stade 5 feuilles

7F : Stade 7 feuilles

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La pénurie d'eau est une préoccupation majeure dans de nombreux pays du monde et plus spécialement les pays à climat aride et semi-aride, où les ressources naturelles en eau sont limitées et fortement exploitées. Cette pénurie est menaçante, le développement économique, la durabilité des moyens de subsistance de l'homme et l'environnement, en particulier dans les pays du tiers monde (Scott et al., 2004).

Les défis causés par la pénurie d'eau deviendront encore plus graves à l'avenir en raison de la croissance démographique intense, de l'urbanisation, des changements climatiques et de la demande alimentaire urbaine croissante ce qui va contribuer de plus en plus à accroître l'écart entre l'offre et la demande en eau (Hussain et al., 2002). Il est estimé qu'au cours des prochaines décennies, environ 40% de la population mondiale vivra dans des pays confrontés au stress hydrique (OMS, 2006).

Au niveau mondial, l'agriculture est le secteur qui consomme le plus d'eau, avec environ 70% de tous les prélèvements d'eau douce (Winpenny et al., 2010). En raison de la concurrence croissante entre le secteur agricole et industriel, et de la valeur économique plus élevée des utilisations urbaines des réserves d'eau douce de bonne qualité, les eaux usées deviennent de plus en plus une alternative prédominante à l'eau d'irrigation conventionnelle dans de nombreux pays, en particulier dans les régions à stress hydrique intense, du fait que cette ressource non conventionnelle est peu coûteuse et fiable en plus de sa disponibilité toute au long de l'année et ses propriétés nutritives très importantes pour la production végétale (Hussain et al., 2002, Jiménez et al., 2010a, Qadir and Scott, 2010).

La réutilisation des eaux usées dans l'agriculture urbaine et périurbaine est déjà une pratique répandue dans différentes parties du monde (Jiménez et al., 2010a, Winpenny et al., 2010), à cet effet, il est estimé qu'au moins 10% de la population mondiale consomme des produits alimentaires issus de l'irrigation avec des eaux usées (WHO, 2006).

Cependant, la réutilisation des eaux usées peut avoir des impacts très négatifs, à cet effet, une gestion inappropriée de l'irrigation par les eaux usées peut conduire à des problèmes environnementaux, en particulier dans les zones où les eaux usées constituent la principale source d'approvisionnement en eau pour l'agriculture (Pescod, 1992, Ayers and Westcot, 1985, WHO, 2006, Simmons et al., 2010), et des effets négatifs sur la santé humaine, les propriétés et la fertilité des sols, le rendement des cultures et la qualité des eaux souterraines et de surface, dont l'ampleur dépend de la concentration des produits chimiques dans les eaux usées, de leur solubilité et de leur toxicité intrinsèque.

Au cours des dernières décennies, l'Algérie a connu une succession de périodes de sécheresse (IPCC, 2007, Al-Mebayedh, 2013), ce phénomène a été particulièrement intense dans la région occidentale du pays, où une baisse de 10 à 20% des précipitations annuelles a été enregistrée (Meddi et al., 2007 ; Elmeddahi et al., 2014). Le problème de pénurie d'eau en Algérie a été accentué par la mauvaise gestion des ressources en eau disponibles, ainsi qu'une augmentation significative de la population qui est passée de 25 millions en 1990 à plus de 40 millions en 2020. L'intensification de l'agriculture et le développement économique ont aussi exercé une pression supplémentaire sur les ressources en eau déjà limitées (R. Ragab, 2002, Al-Mebayedh, 2013, Rimini, 2010). En 2010, l'Algérie a connu un déficit global en eau potable de 0.9 milliards m³, et qui devrait atteindre plus d'un milliard de m³ à l'horizon 2025 (Rimini, 2010), en outre, 55% de la demande en eau est destinée à l'irrigation agricole, d'où le récent recours de l'Algérie à l'utilisation des eaux usées pour satisfaire les besoins en eau de l'agriculture, le volume total d'eaux usées traitées et qui peut servir à l'irrigation agricole est estimée à environ 10 Hm³/an, ce volume d'eau pourrait irriguer 1 285 ha de terres agricoles (NSO, 2013).

La région de Chlef, une région sèche appartenant à l'étage bioclimatique semi-aride inférieur, souffre déjà d'une forte pénurie d'eau et la surexploitation des eaux souterraines à des fins agricoles, a accentué la crise d'eau dans cette wilaya, d'où le besoin accru de faire recours aux eaux usées traitées (Hamoda, 2004 ; Ragab, 2002 ; Elmeddahi et al, 2014). Cette ressource à enjeu politique et socio-économique peut représenter pour la wilaya une alternative en eau de faible coût qui pourrait contribuer à réduire considérablement le stress hydrique de la société.

La question se pose: Ces ressources en eau non conventionnelles peuvent-elles constituer une alternative garantie aux eaux souterraines dans la région Chlef? et Quelle sont les effets de cette eau sur le sol, les cultures et la santé humaine?

Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est d'évaluer l'impact de l'irrigation par les eaux usées traitées, sur les aspects nutritionnels, physiologiques et biochimiques de la tomate un fruit très apprécié et consommé en Algérie.

Pour répondre à la problématique posée nous avons structuré ce travail en quatre parties

- Dans la première partie, il s'agit d'une revue bibliographique sur la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture.
- La deuxième partie a été consacrée à la description du cadre physique et climatique qui règne dans la région d'étude.

- La troisième partie concerne, le matériel et les méthodes utilisées
 - La quatrième partie est réservée aux résultats et discussion elle comporte trois principales parties :
 - ✓ L'analyse physico-chimique et microbiologique des eaux usées traitées ;
 - ✓ L'impact des eaux usées traitées sur le sol
 - ✓ L'impact des eaux usées traitées sur la tomate « *Solanum lycopersicum* »
- Enfin, l'étude se termine par une conclusion générale où sont récapitulés les principaux résultats obtenus.

CHAPITRE I

**REUTILISATION DES
EAUX USEES
EN AGRICULTURE**

CHAPITRE I : REUTILISATION DES EAUX USEES EN AGRICULTURE

1. Pénurie d'eau et réutilisation des eaux usées

L'eau est une ressource fondamentale pour toute forme de vie et pour le maintien de l'environnement et du développement économique. En général, la disponibilité et l'accessibilité de l'eau sont les contraintes les plus importantes pour le développement socio-économique et l'amélioration des niveaux de vie (Winpenny et al., 2010).

La pénurie et l'insuffisance d'approvisionnement en eau et la dégradation de l'environnement sont les principaux défis auxquels sont confrontées de nombreuses régions du monde, en particulier les pays voie de développement. Selon Calzadilla et al., (2011), 40% de la population mondiale subit aujourd'hui un stress hydrique. Actuellement, il est estimé qu'environ 19 pays sont classés comme souffrant de pénurie d'eau, avec une disponibilité inférieure à 500 m³ par habitant (figure 1). Au cours des prochaines années, l'Afrique du Sud, le Pakistan, une grande partie de la Chine et de l'Inde vont connaître une grave pénurie d'eau (Lazarova et Bahri, 2004 ; Mancosu et al., 2015).

La croissance démographique rapide, la demande alimentaire croissante, l'urbanisation et les changements climatiques actuelles vont certainement aggraver la pénurie d'eau dans le monde au cours des prochaines décennies (Winpenny et al., 2010).

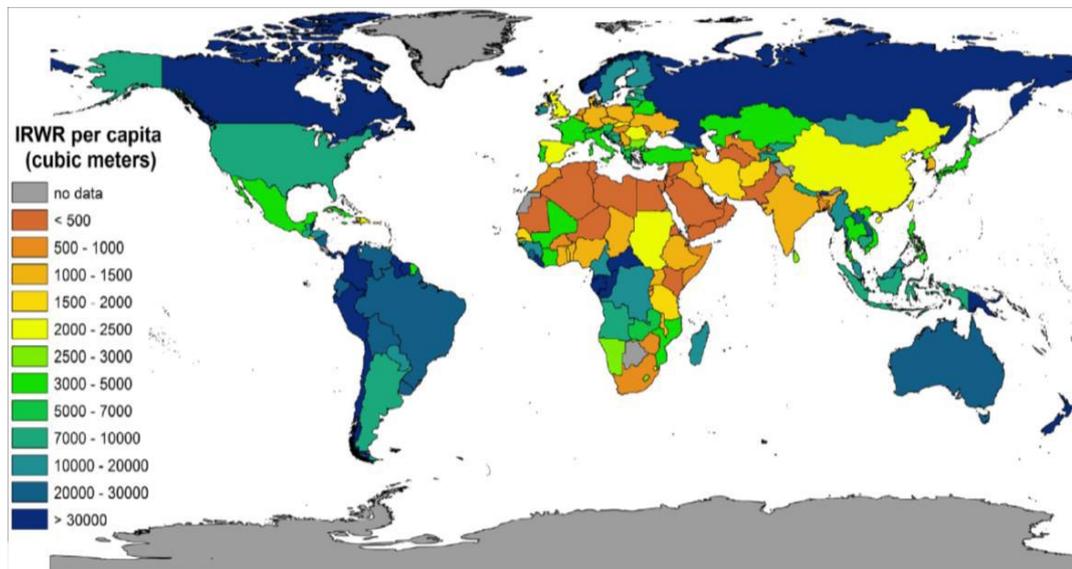


Figure 1 Carte mondiale des ressources internes en eau renouvelables (IRWR) par pays en 2012, Groupe de la Banque mondiale (Mancosu et al., 2015)

En effet, selon, Mancosu et al., (2015), la population mondiale va connaître une augmentation de 2.3 milliards de personnes d'ici jusqu'à 2050, 80% de cette augmentation sera enregistrée dans les pays en développement (Calzadilla et al., 2011, Mancosu et al., 2015).

Il est estimé selon Mancosu et al., (2015) qu'environ 1.8 milliard de personnes vivront dans des régions souffrant d'un manque d'eau, où la disponibilité de l'eau par habitant étant inférieure à 100 m³, aussi jusqu'à deux tiers de la population mondiale pourraient subir un stress hydrique élevé à modéré. Comme conséquences de cette augmentation, il est estimé qu'il faudrait 53 % d'eau supplémentaire pour les cultures et 38 % de terres supplémentaires pour atteindre les objectifs de satisfaction alimentaire en 2050 (Mancosu et al., 2015).

Les changements climatiques sont aussi à l'origine de l'accroissement de la pénurie d'eau, selon le rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, en raison du changement climatique, la disponibilité de l'eau devrait décroître de 10 à 30%. Il est estimé qu'un réchauffement planétaire de 2°C peut conduire 1 à 2 milliards de personnes supplémentaires à ne pas avoir accès à l'eau pour les besoins de consommation, alimentation et hygiène, et menace 400 millions de personnes supplémentaires par la famine (Winpenny et al., 2010).

La satisfaction de la demande continue en eau s'accompagne souvent par un coût environnemental élevé, en effet, selon Gourbesville, (2008) les eaux de surface disponibles sont épuisées, de nombreux fleuves n'atteignent plus les mers, près de la moitié des zones humides du monde ont disparu, et la surexploitation des eaux souterraines a entraîné une baisse des nappes phréatiques de plusieurs mètres et de nombreux aquifères côtiers ont été gravement endommagés par l'intrusion d'eau salée. Toutes ces impacts aggravent la pénurie d'eau et augmentent la pression sur les ressources en eau disponible.

Face à la pénurie de l'eau et pour des options d'approvisionnement plus durables, de nombreux pays ont pris conscience de l'importance de la gestion de la demande et de la conservation de l'eau. Cependant, les stratégies de conservation de l'eau ne garantissent pas le comblement de l'écart entre l'offre et la demande d'eau. En outre, le développement de l'approvisionnement en eau à partir des ressources conventionnelles est devenu de plus en plus difficile en raison des coûts prohibitifs d'extraction, d'énergie et d'infrastructures (Winpenny et al., 2010).

Au niveau mondial, l'agriculture est le domaine le plus consommateur d'eau, avec environ 70% des prélèvements d'eau douce et jusqu'à 90% dans les pays en voie de développement (Winpenny et al., 2010 ; Mancosu et al., 2015 ; Lazarova et Bahri, 2004) (Figure 2). Cependant, ce fort besoin en eau de l'agriculture est confronté à la concurrence d'autres besoins socio-économiques comme les besoins urbains et industriels (Raschid-Sally and Jayakody, 2009).

En raison de la concurrence croissante pour l'eau entre besoins agricoles et besoins socio-économiques, les eaux usées s'avèrent comme une alternative incontournable, moins coûteuse, fiable et très disponible, notamment dans les régions arides et semi-arides. (Kretschmer et al., 2002 ; Winpenny et al., 2010 ; Jimenez et Asano, 2008 ; Scott et al., 2004 ; Lazarova et Bahri, 2004). Dans ce contexte, la réutilisation des eaux usées en agriculture en remplacement de l'eau douce dans les zones arides et semi-arides, pourrait contribuer considérablement à la réduction des besoins en eau et du maintien de la production agricole (Gourbesville, 2008 ; Lazarova et Bahri, 2004 ; Raschid-Sally et Jayakody, 2009).

Au Moyen-Orient, en Afrique du Nord, au Nord de la Méditerranée, aux États-Unis, en Australie et dans certaines régions Chinoise, la réutilisation des eaux usées dans l'agriculture est devenue une pratique courante et un élément clé de la gestion des ressources en eau, elle peut représenter entre 10 et 40% de l'approvisionnement total en eau et environ 30 à 70% de l'approvisionnement en eau pour l'agriculture irriguée (Raschid-Sally et Jayakody, 2009).

La réutilisation des eaux usées n'est pas seulement dictée par le stress hydrique croissant, il s'agit aussi de l'augmentation des flux d'eaux usées urbaines due à l'urbanisation croissante, ainsi que des normes environnementales strictes en matière d'élimination des eaux usées et des boues. En outre, la valeur des ressources des eaux usées et leurs propriétés nutritives sont de plus en plus reconnues (Jiménez et al., 2010a, WHO, 2006).

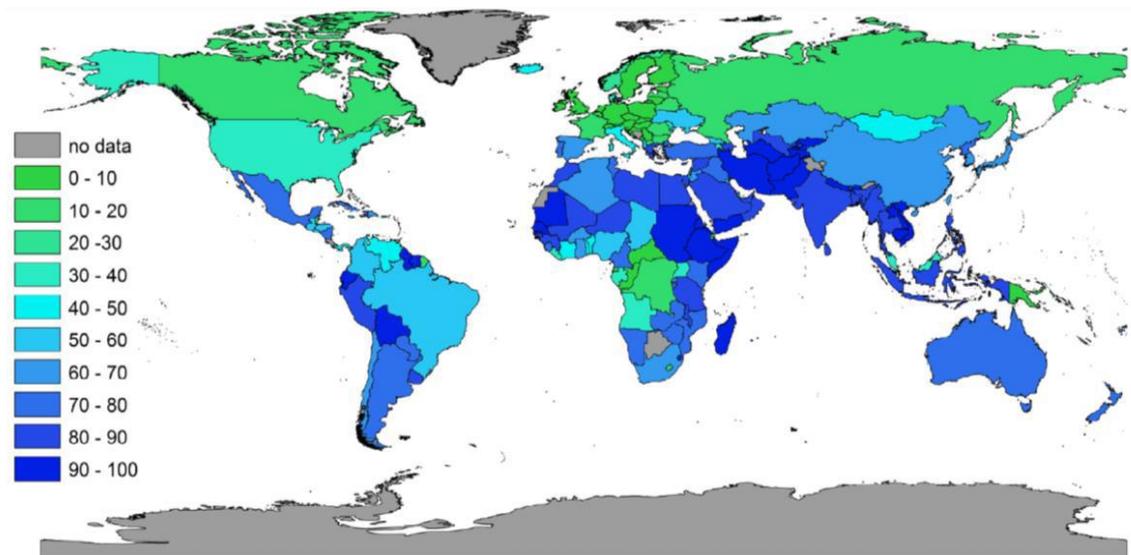


Figure 2 : Prélèvements annuels d'eau douce dans l'agriculture par pays (%), par rapport aux prélèvements totaux d'eau en 2012

2. Avantages et intérêt de la réutilisation des eaux usées en agriculture

Parmi tous les domaines, l'agriculture est le plus grand domaine concerné par la réutilisation des eaux usées au monde (Jiménez et al., 2010a). Ces eaux usées ont un large éventail d'impacts positifs pour les agriculteurs, les communautés concernées et l'environnement (Hussain et al., 2002, Qadir and Scott, 2010). Pour l'agriculteur la disponibilité de l'eau usée et ses propriétés nutritives la rendent extrêmement précieuse, en particulier dans les climats arides et semi-arides, comme permet des rendements plus élevés, de multiples cycles de culture et la diversité des cultures (Qadir and Scott, 2010, Jiménez et al., 2010a). En Inde la réutilisation des eaux usées a permis aux agriculteurs de cultiver pendant la saison sèche et de vendre à des prix trois à cinq fois plus élevés que pour les cultures de mousson (Jiménez et al., 2010a). Au Pakistan et au Ghana les agriculteurs, étaient prêts à payer 2.5 fois plus pour avoir accès aux eaux usées car elle leur permet de récolter davantage de cultures par an (WHO, 2006, Jiménez et al., 2010a Cornish et Lawrence, 2001).

Selon Qadir et al., (2007), Au Pakistan, environ 26 % des légumes sont produits en utilisant l'irrigation par les eaux usées et environ 80 % des légumes issus de l'agriculture urbaine et périurbaine sont produits en utilisant les eaux usées diluées à Hanoi.

En plus de sa fiabilité, l'utilisation du contenu fertilisant des eaux usées permet également d'augmenter les revenus en réduisant l'achat des engrais (WHO, 2006, Jiménez et al., 2010a, Winpenney et al., 2010, Scheierling et al., 2010, Becerra-Castro et al., 2015).

Même après traitement, les eaux usées restent riches en matières organiques, en azote, en phosphore et en potassium, en plus de leur richesse en micronutriments plus que n'importe

quel engrais synthétique comme le fer, le zinc, le manganèse et le cuivre. Il a été estimé que l'utilisation de 1000 m³ par hectare d'eaux usées domestiques pourrait apporter 16-62 kg d'azote, 4-24 kg de phosphore, 2-96 kg de potassium (Qadir et al., 2007), cependant selon WHO (1989), avec un taux d'irrigation annuel de 20000 m³/ha, taux qui correspond aux besoins dans la plus part des régions semi-arides, des concentrations types de 15 mg/litre d'azote total et de 3 ml/litre de phosphore total sont apportées dans des eaux usées convenablement traitées, ce qui est équivalent à des taux d'application annuels d'azote et de phosphore de 300 kg et 60 kg respectivement, de tels apports peuvent réduire ou éliminer totalement les engrais industriels.

Le recyclage de ces composants pourrait non seulement réduire la demande d'engrais chimiques, mais aussi contribuer à améliorer la structure du sol et ses propriétés physiques (WHO, 2006, Jiménez et al., 2010a, Winpenny et al., 2010, Scheierling et al., 2010). Selon Qadir et Scott, (2010), de nombreuses études sur l'effet à long terme des eaux usées sur les propriétés physiques du sol ont révélés que les eaux usées améliorent les propriétés physiques et la matière organique du sol, une étude réalisée en Inde a montré qu'après 15 ans d'application des eaux usées, le carbone organique du sol avait augmenté 80 %.

La bonne utilisation des eaux usées peut contribuer à atténuer les effets de la pollution par les eaux usées qui résulte du rejet d'eau non traitée ou partiellement traitée dans l'environnement aquatique, en particulier dans les pays à revenu faible ou intermédiaire (WHO, 2006, Jiménez et al., 2010a, Winpenny et al., 2010, Scheierling et al., 2010).

Elle représente également une méthode d'élimination peu coûteuse, car la qualité de l'eau pour l'usage agricole peut être atteinte facilement par rapport à la qualité requise pour d'autres applications (Hussain et al., 2002, Winpenny et al., 2010).

Les bénéfices associés à la réutilisation des eaux usées traités sont résumés dans le tableau 1..

Tableau 1: Typologie des bénéfices associés à la réutilisation des eaux usées (Condom et *al.*, 2012).

Secteur	Bénéfices
Ressources En eau	<ul style="list-style-type: none"> • Baisse de la pression sur la ressource en eau potable, meilleure allocation, libération de volumes d'eau conventionnelle pour l'eau potable • Diversification des ressources, intégration de la REUT dans la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) REUT (production et transport) moins coûteuse que d'autres ressources non conventionnelles (ex. eau dessalée). • Maintien des niveaux piézométriques par recharge des aquifères. • Amélioration de la qualité des eaux de nappe. • Adaptation à la densité de population.
Environnement	<ul style="list-style-type: none"> • Filière d'assainissement plus sûre (tampon sol/plante) voire plus économe (énergie). • Réduction des teneurs en nutriments dans les eaux de surface, de mer et de nappe. • Limitation de l'eutrophisation. • Restauration de la vie aquatique. • Lutte contre les intrusions salines. • Maintien des étiages, alimentation récréative (fontaines, lacs...) • Baisse de la consommation d'énergie dans les stations d'épuration et pour l'adduction d'eau. • Réduction des émissions de gaz à effet de serre. • Lutte contre la désertification par l'alimentation en eau de ceintures vertes.
Agriculture et espaces récréatifs	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la fertilité des sols par l'apport de nutriments et productivité accrue. • Réduction de la fertilisation traditionnelle (économie de fertilisants). • Sécurisation de la ressource en eau (notamment en situation de sécheresse). • Diversification vers des cultures à haute valeur ajoutée. • Valeur agronomique des coproduits des installations de traitement. • Sécurité alimentaire, développement, agriculture péri-urbaine.
Social	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration de la qualité de vie (espaces verts) et des conditions sanitaires. • Contribution de l'agriculture à l'assainissement. • Approche concertée entre acteurs du territoire. • Maintien ou création d'emplois (agriculture périurbaine).

3. Réutilisation des eaux usées dans l'agriculture à travers le monde

Actuellement, la réutilisation des eaux usées dans l'agriculture urbaine et périurbaine est déjà une pratique courante dans le monde entier (Winpenny et al., 2010, Jiménez et al., 2010a). Selon Wichelns et al., (2015), il est estimé que 6 à 20 millions d'hectares sont irrigués

avec des eaux usées dans 3 villes sur 4 dans les pays en développement. La figure 3 illustre les 20 pays ayant enregistré les plus grandes superficies agricoles irriguées avec des eaux usées, qu'elles soient traitées ou non.

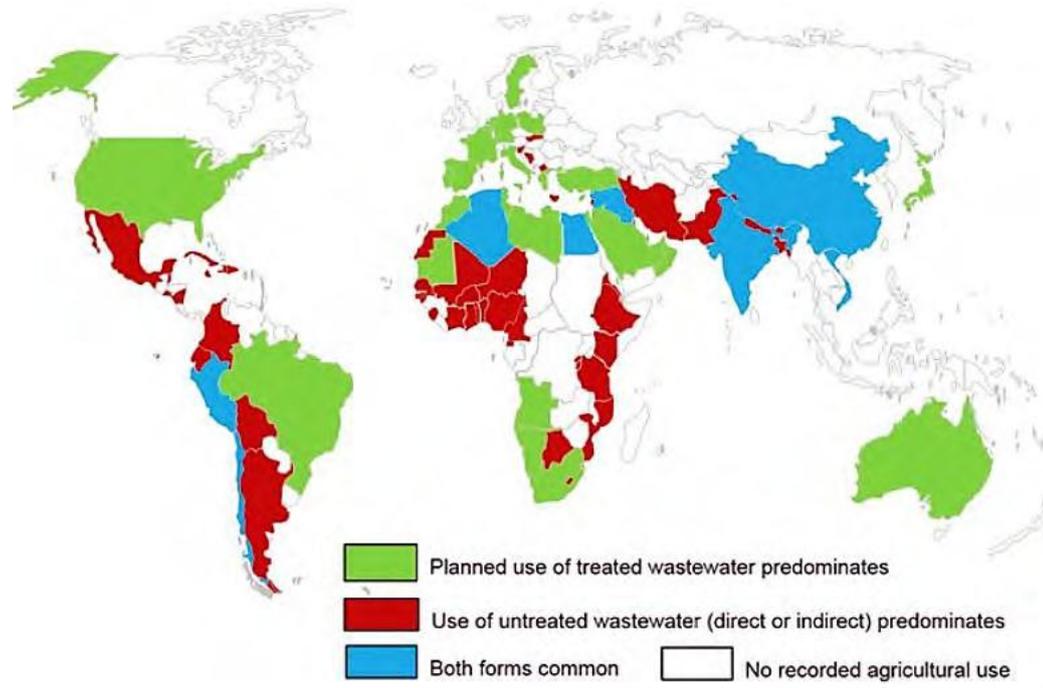
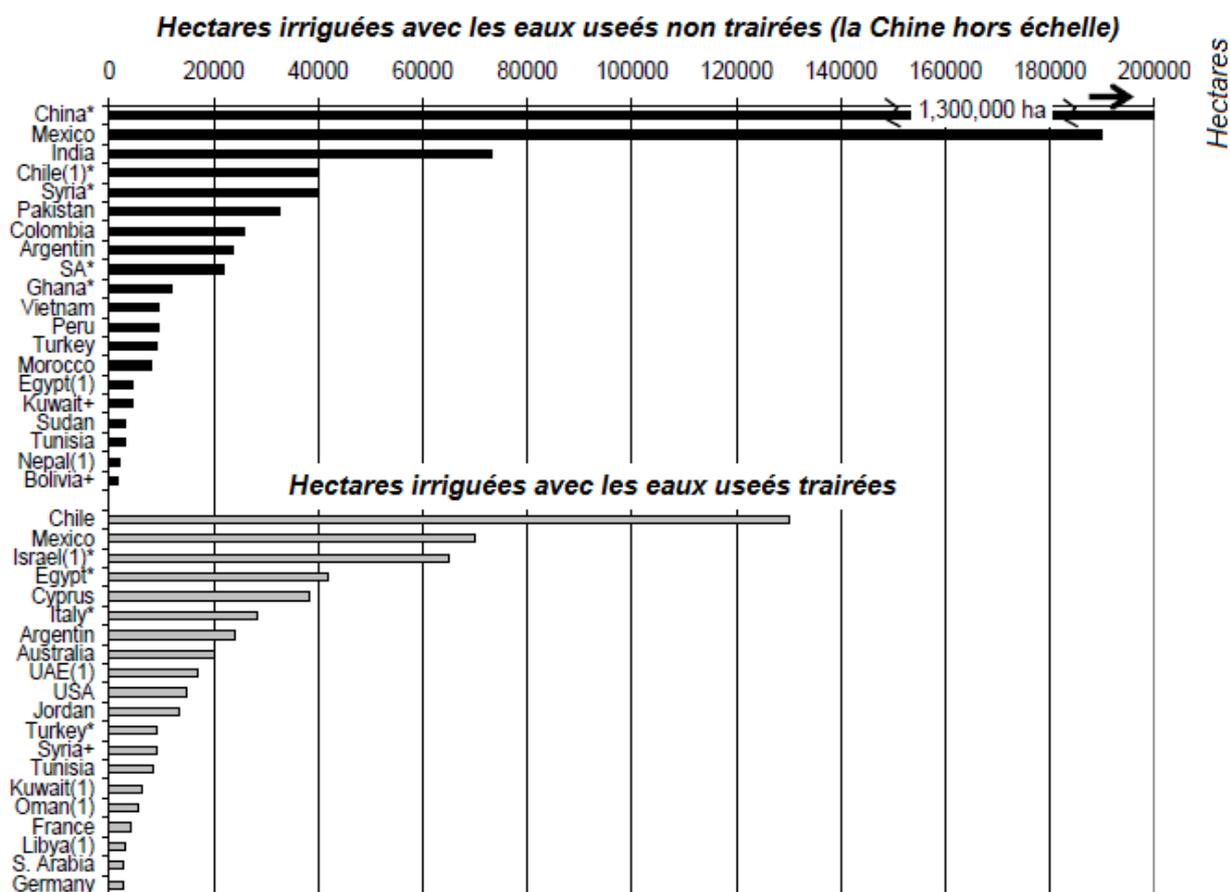


Figure 3 : Pays ayant enregistré une utilisation des eaux usées en agriculture (Wichelns et al, 2015).

Bien que l'utilisation directe des eaux usées non traitées soit interdite dans la plupart des pays, cette pratique est toujours en cours dans les zones urbaines et périurbaines de nombreux pays en développement (Figure 4) soit causée par la rareté, soit par les problèmes de qualité ou de coûts d'accès inabornables

La majorité des agriculteurs recourant à l'utilisation directe d'eaux usées non traitées sont localisés en Asie du Sud, en Amérique latine et en Afrique, dans certains cas les agriculteurs utilisent des eaux usées non traitées car les eaux souterraines et les eaux usées traitées sont trop salines pour être utilisées (Wichelns et al., 2015). A titre d'exemple, au Pakistan, environ 32 500 ha, sont irrigués avec des eaux usées brutes (Van der Hoek, 2004, Jiménez et al., 2010a), en Inde, les agriculteurs utilisent les eaux usées des égouts ouverts ou souterrains pour l'irrigation (Wichelns et al., 2015, Cornish and Kielen, 2004b). en Chili et en Argentine, les zones irriguées avec des eaux usées non traitées sont similaires aux zones irriguées avec des eaux usées traitées (Jimenez and Asano, 2008, Sato et al., 2013). Au Mexique, environ 90 000 ha de cultures diverses sont irriguées avec des eaux usées non traitées (Van der Hoek, 2004, Sato et al., 2013).

En Afrique, l'irrigation avec les eaux usées non traitées est une pratique très courante dans de nombreuses villes, comme Accra, Tamale et Kumasi au Ghana, et Maili Saba et Nairobi au Kenya (Keraita and Drechsel, 2004, Cornish and Kielen, 2004a).



Note: (*) Données avec confusion; (+) Aucune donnée n'est disponible, bien que la pratique soit signalée; (1) La surface peut être plus grande.

Figure 4 : Pays avec les plus grandes surfaces irriguées par des eaux usées non traitées et traitées (Jimenez et Asano, 2008)

En conséquence, les eaux usées non traitées ou partiellement traitées sont déversées dans les masses d'eau douce (ruisseaux, rivières, etc) et sont diluées et utilisées par les agriculteurs en aval (Wichelns et al., 2015, Jiménez et al., 2010a). L'utilisation indirecte d'eaux usées non traitées a été signalée dans de nombreux pays d'Asie du Sud (Inde, Chine et Vietnam), d'Afrique occidentale, du Moyen-Orient (Syrie, Égypte, Jordanie et Liban) et d'Amérique latine (Brésil, Argentine, Colombie et Mexique) (Wichelns et al., 2015, Jiménez et al., 2010a). Par exemple, à Pékin, en Chine, 50 % des eaux usées produites dans la ville sont déversées dans des plans d'eau sans traitement et sont ensuite utilisées par les agriculteurs en aval. À Hanoi, au Viêt Nam, environ 80 % des cultures maraîchères sont produites dans les zones urbaines et périurbaines en utilisant des eaux usées diluées (Jiménez et al., 2010a). De même,

dans les grandes villes d'Afrique de l'Ouest, entre 50 et 90 % des légumes urbains et périurbains sont irrigués avec de l'eau polluée (Jiménez et al., 2010a).

Au Moyen-Orient, en raison du manque d'installations de traitement des eaux usées ayant une capacité suffisante pour traiter les volumes accrus d'eaux usées résultant de l'augmentation de la population urbaine, la plupart des eaux usées collectées par le système d'égouts sont rejetées dans les rivières ou les oueds, soit sans traitement, soit avec un traitement insuffisant, et utilisées par les agriculteurs en aval. En Syrie, on estime qu'environ 40 000 ha sont indirectement irrigués avec des eaux usées non traitées en raison de l'absence de ressources en eau alternatives abordables ou disponibles (Jimenez and Asano, 2008, Sato et al., 2013). En Égypte, il a été estimé que 2 à 3 milliards de m³ d'eaux usées brutes étaient déversées chaque année dans le Nil et utilisées dans la région du delta pour une irrigation sans restriction.

L'utilisation planifiée des eaux usées traitées se produit principalement dans les régions arides et semi-arides des pays à revenu élevé, notamment les États-Unis d'Amérique, l'Australie et les pays d'Europe du Sud (Figure 4).

Aux États-Unis, un volume considérable du total des eaux usées traitées (44 à 46%) disponibles est réutilisé à des fins agricoles et paysagères, en Californie, l'irrigation par les eaux usées remonte à 1890. Actuellement, environ 20 types de cultures différentes sont cultivés à l'aide d'eaux usées récupérées, notamment des légumes crus, des céréales, des fraises et des cultures non alimentaires (Hamilton et al., 2007, Jimenez and Asano, 2008).

En Europe du Sud, l'irrigation agricole représente 44 % des projets de réutilisation des eaux usées (Sato et al., 2013). En Espagne, plus de 150 projets de réutilisation des eaux usées pour la réutilisation agricole (71 %) et pour les services environnementaux (17 %) (Guardiola-Claramonte et al., 2012, Sato et al., 2013). En France plus de 3 000 hectares sont irrigués avec des eaux usées traitées (Hamilton et al., 2007). En Chypre les eaux usées traitées sont la deuxième ressource en eau alternative, avec environ 25 millions de m³ d'eaux usées traitées sont recyclées, principalement pour des activités agricoles, ainsi, 38 200 ha sont irrigués avec des eaux usées traitées (Jimenez and Asano, 2008). En Italie, environ 28 285 ha sont irrigués par les eaux usées. (Jimenez and Asano, 2008).

Israël est le leader mondial de réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation agricole, selon WHO (1989), cet état totalise 250 projets d'irrigation, utilisant 70% du total des effluents urbains.

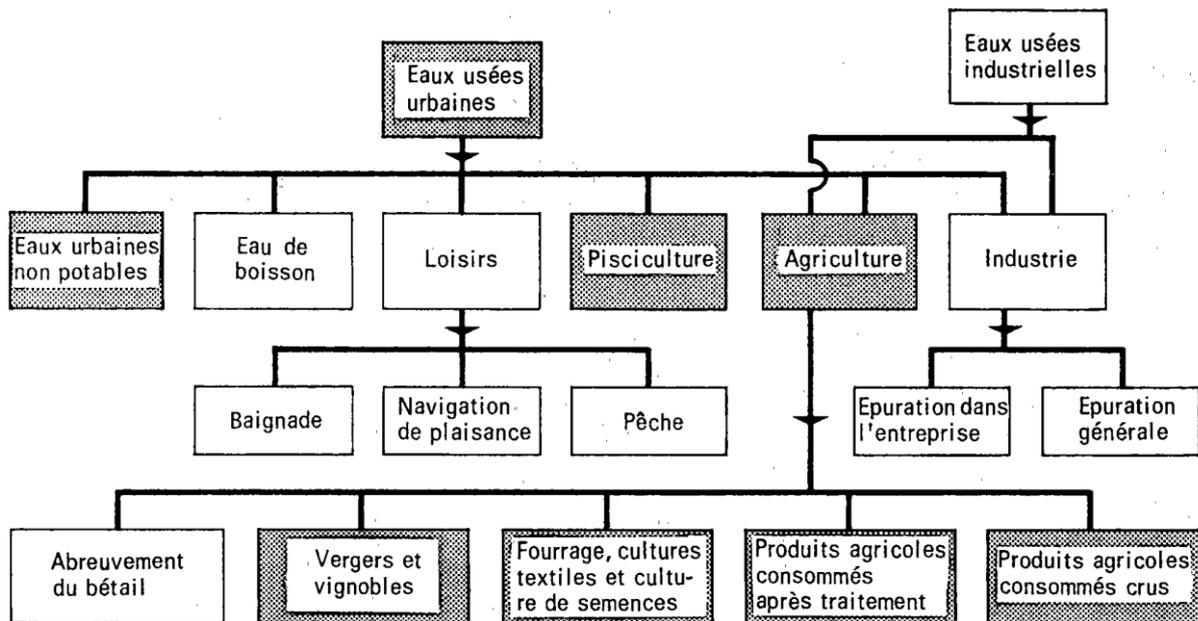


Figure 5: Réutilisation des eaux usées

Dans les pays du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord, l'irrigation avec des eaux usées traitées est devenue une pratique de plus en plus courante. Dans les pays arabes du Golfe, 44 % des eaux usées traitées sont réutilisées pour l'agriculture (Jimenez and Asano, 2008). Au Koweït, la réutilisation des eaux usées pour l'agriculture représente environ 35 % de l'extraction totale d'eau (Winpenney et al., 2010). La Tunisie a été reconnue comme le leader en Afrique du Nord en termes de récupération des eaux usées et utilise environ 78% des eaux usées collectées qui ont été traitées selon des normes biologiques secondaires, ce qui représente environ 5% de l'eau totale disponible dans le pays (Carr et al., 2004, Winpenney et al., 2010, Qadir et al., 2010), environ 30 à 43% de cette eau traitée est réutilisée à des fins d'irrigation, notamment pour l'aménagement paysager, la production de fourrage et de cultures industrielles, la culture de céréales et l'irrigation d'arbres fruitiers tels que les vignobles et les agrumes (Winpenney et al., 2010).

4. Utilisation des eaux usées en agriculture

La récupération des eaux usées municipales pour les réutiliser en agriculture est de plus en plus reconnue comme une stratégie de gestion essentielle dans les régions du monde où l'eau est rare (Khouri et al., 1994). L'irrigation avec des eaux usées permettrait une utilisation plus efficace des ressources en eau et limiterait considérablement les dommages environnementaux dus à l'introduction directe dans les eaux de surface (WCED, 1987).

Selon Khouri et al., (1994), l'irrigation par les eaux usées devrait être envisagée non seulement à des fins agricoles, mais qu'elle pourrait aussi être l'alternative d'élimination préférée parce qu'elle offre des avantages en matière de santé publique et d'environnement qui

ne sont pas réalisables par le seul traitement et la désinfection modernes. La réutilisation peut réduire le coût de l'élimination des eaux usées et de l'approvisionnement en eau d'irrigation, principalement autour des villes et des agglomérations équipées d'égouts (CGER, 1996), l'utilisation des eaux usées pour l'irrigation peut être plus abordable que le traitement extensif des eaux usées (Mancl and Rector, 1997).

Pescod (1992) rapporte que l'utilisation des eaux usées en agriculture pourrait être une considération importante lorsque leur élimination est planifiée dans les régions arides et semi-arides. Singh et al., (2004), considèrent que les eaux usées et les boues ont des effets à la fois positifs et négatifs sur l'agriculture, car elles sont chargées de niveaux élevés de métaux lourds toxiques et de pesticides, mais aussi enrichies de plusieurs ingrédients utiles tels que l'azote, le phosphore et le potassium. Selon la CGER, (1996), la réutilisation des eaux usées dans l'agriculture pourrait aboutir à :

- Fournir des sources supplémentaires d'eau, de nutriments et de matière organique pour le conditionnement du sol.
- Améliorer l'environnement en éliminant ou en réduisant les rejets dans les eaux de surface.
- Conserver les sources d'eau douce.
- Améliorer l'efficacité économique des investissements dans l'évacuation des eaux usées et l'irrigation.

L'aptitude de l'eau à être réutilisée est influencée par la composition chimique de la source d'eau, l'accumulation de minéraux due à l'utilisation de l'eau et l'étendue du traitement des eaux usées. Ces caractéristiques varient selon les saisons et d'une municipalité à l'autre, (Pettygrave et Asano, 1985).

L'adéquation des eaux usées à l'irrigation dépend largement des conditions climatiques, des propriétés physiques et chimiques du sol, de la tolérance au sel des cultures et des pratiques de gestion (Pescod, 1992).

Il n'a pas été démontré que l'utilisation des eaux usées entraîne plus de risques de salinité que l'irrigation à l'eau douce en raison de la combinaison des facteurs suivants (Khouri et al., 1994):

- La salinité des eaux usées est relativement peu supérieure à celle de l'eau douce.
- Les sels sont généralement lessivés de la zone des racines par l'application d'un excès d'eau.

- Les substances organiques présentes dans les eaux usées sont censées neutraliser les effets négatifs du sel,

En dépit de l'augmentation de la production des cultures, l'irrigation des terres agricoles avec des eaux usées est une cause de concentration de métaux lourds (Scott, 2000) et d'infection des agriculteurs par des agents pathogènes (Ramirez et al. 2002). Cependant selon Fasciolo et al. (2002) l'irrigation avec des eaux usées agit comme de l'eau de puits ajoutée avec de l'engrais, en augmentant les rendements de certaines culture 10% et 15% par comparaison à l'irrigation avec de l'eau de puits sans engrais.

La réutilisation des eaux usées en agriculture nécessite de prendre en compte l'impact sur la santé, la productivité agricole, la faisabilité économique et les aspects socio-culturels (Khouri et al., 1994).

La FAO (1985) a considéré que les mesures de protection de la santé qui peuvent être appliquées dans l'utilisation agricole des eaux usées comprennent les mesures suivantes:

- Traitement des eaux usées.
- Restriction des cultures.
- Contrôle de l'épandage des eaux usées.
- Contrôle de l'exposition humaine et promotion de l'hygiène.

5. Réutilisation des eaux usées traitées en Algérie.

L'Algérie est l'un des pays les plus touchés par le stress hydrique, elle est classée dans la catégorie des pays pauvres en eau, avec une disponibilité en dessous du seuil de rareté fixé à 1000 m³/hab/an (WHO, 1989) (Tableau 2). En revanche, les ressources actuelles sont affectées par plusieurs facteurs parmi: les changements climatiques, la demande croissante de la population, le manque des ouvrages d'immobilisation des ressources hydrique ainsi que le phénomène de pollution des eaux souterraines et superficielles (Bouchaala 2017).

Tableau 2: Dotation annuelle en eau par habitant en Algérie (CNES, 2000)

Années	1962	1990	1995	1998	2000	2020	2030
m ³ /habitant/an	1500	720	680	630	500	430	-

Actuellement, l'Algérie se penche de plus en plus vers la technique des eaux usées traitées et sa réutilisation en agriculture.

Le volume d'eaux usées rejetées annuellement par les agglomérations Algériennes dépassant les 20.000 habitants est estimé à 58 300 m³ par an (Medkour, 2002). La réutilisation des eaux usées pour l'irrigation concerne en priorité les zones déficitaires en eau naturelle qui devient de plus en plus rare (Medkour, 2002).

Selon Tamrabet (2011), le potentiel de cette ressource en Algérie a été estimé à 750 millions de m³ en 2011, et atteindra le volume de 1.5 milliards de m³ à l'horizon 2020/2021.

Le nombre de stations d'épuration en exploitation est passé de 36 stations en 1990 à 200 stations en 2015 (Figure 6), avec une capacité d'épuration de 800 hm³/an sur un volume d'eau rejeté estimé à 1.4 milliard de m³/an (Guergueb et Ferhat, 2021).

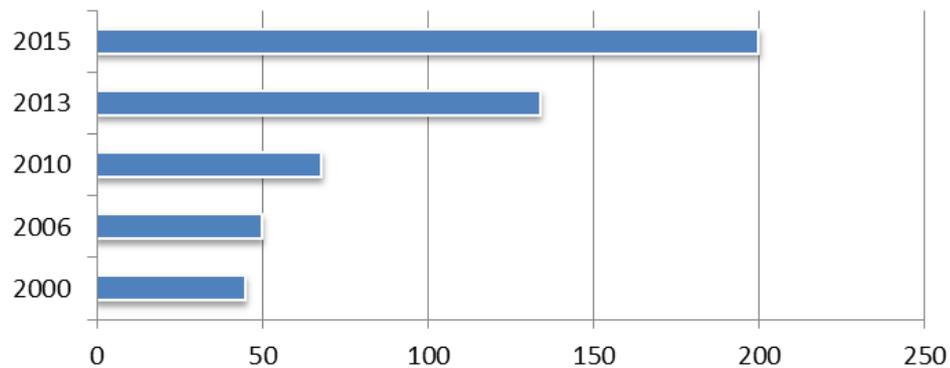


Figure 6: Evolution du nombre des STEP et stations de lagunage en Algérie (Bouchaala et al. 2017)

5.1. La réutilisation indirecte

Elle se fait après passage de l'eau dans le milieu naturel (oued, rivière, lac, barrage... etc.). Sur les 75 stations d'épuration exploitées en Algérie à travers les 43 wilayas, 14 seulement sont concernées par la réutilisation des eaux usées épurées en agriculture.

A la fin de 2011, le volume réutilisé était de 17 millions de m³ par an pour ces 14 STEP et plus de 10 000 ha de superficie agricoles étaient irrigués (ONA, 2011).

5.2. La réutilisation directe

Selon Benbraika, (2013), la mobilisation des eaux usées épurées est très faible actuellement, le seul ouvrage existant est celui situé à l'aval de la station d'épuration de Bordj Bou Arreridj d'une capacité de 2 500 m³/jour destinée à l'irrigation d'un périmètre de 100 ha de superficie,

Selon Amine (2008) in Bouchaala 2017, sur les 300 stations d'épuration, seules 36 sont fonctionnelles le tableau 3 résume quelques statistiques sur la réutilisation des eaux usées épurées à des fins agricoles en Algérie, les volumes d'eaux usées épurés par wilaya est présenté dans figure 7

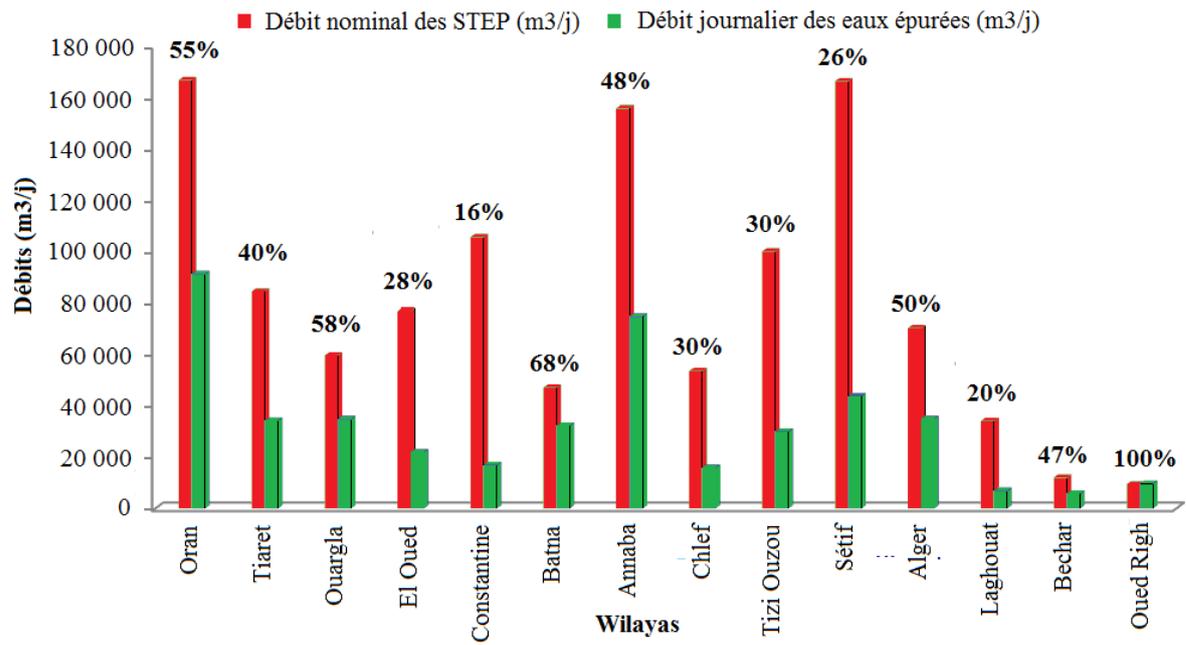


Figure 7 : Volume d'eau usée épuré par wilaya septembre 2014 (Source : Bouchaal et al, 2017)

Tableau 3: Statistiques sur la réutilisation des eaux usées épurées à des fins agricoles (Amine 2008, in Bouchaala et al. 2017)

Désignation	Capacité (Eq/H)	Débit nominal (m ³ /j)	Volume mensuel (m ³)	Volume mensuel réutilisé (m ³)	Domaine Agricole (ha)	Type de culture	Utilisateurs
Station d'épuration à boues activées de Boumerdes	75000	15000	484480	62282.4	Flici : 49	Pépinière d'Olivier, Oranger et Vignes	Flici
				62282.4	Rahmoun: 76		Rahmoun
Station de lagunage aéré d'Ouargla	260102	56997	991950	99195	17	4000 palmiers dattiers et 100 Oliviers	Autorisation DRE
Station de lagunage aéré de kouinine (El Oued)	239134	44335	567600	33600	15	Arbres/(Eucaly ptus et kazarina)	ONA
Station d'épuration à boues activées de Tlemcen	150000	30000	510300	484785	Plaine de Hennaya 912. 22	Arboriculture	ONID
Station d'épuration à boues activées de Guelma	200000	32000	550560	550560	Guelma, Boumahra et Bouchegouf 6980	Les cultures Maraîchères et Les vergers	O.N.I.D Réutilisation indirecte Apport à Oued Seybousse
Station d'épuration à boues activées de Bordj Bou Arreridj	150000	30000	324720	324720	Dhaissa 150	Céréales	/
Station d'épuration à boues activées de Souk Ahras	150000	30000	182460	182460	200	Arboriculture	Réutilisation indirecte Apport à Oued Medjerda
Station d'épuration à boues activées de Mascara	100000	13000	276240	276240	400	Oliviers	Associations agriculteurs Réutilisation indirecte
Station de lagunage aéré de Ghriss	48000	5800	34950	34950	420		
Station de lagunage aéré de Bouhanifia	32500	3900	STEP à l'arrêt		475		
Station de lagunage aéré de Hacine	20000	3200	24630	24630	390		
Station de lagunage naturel d'Oued Taria	21000	2520	19440	19440	196		
Station de lagunage naturel de Hachem	15000	1800	38400	/	220		
Station de lagunage naturel de Schaouria	12600	1513	STEP à l'arrêt		143		
Station de lagunage naturel de Tizi	12000	1440	26490	26490	200		
Station de lagunage naturel de Mohammadia Est	19000	2280	35100	35100	175		
Station d'épuration à boues activées de Ain El Hadjar	30000	4800	101670	22150	58		
Total des 17 STEP	1534336	278585	4168990	2238885		11076	

6. Effet de l'utilisation des eaux usées sur les eaux souterraines

L'application d'effluents d'eaux usées sur les sols peut présenter des risques de contamination des eaux souterraines par des virus et des bactéries. Toutefois, ce risque peut être minimisé par une désinfection adéquate des eaux usées récupérées et par des taux d'infiltration lents (Asano et al., 1992 ; EPA, 1996). Les eaux souterraines seraient particulièrement sensible à la contamination lorsque la nappe phréatique est peu profonde (Bazza, 2002). En plus, selon Jamieson et al., (2002), l'application d'eaux usées pendant deux saisons de croissance consécutives augmente la concentration des eaux souterraines en calcium, fer, chlore, manganèse et sodium. Gallier et al. (1993) constatent que les particules du sol agissant pour séquestrer davantage la plupart des métaux lourds, et par conséquent, les métaux lourds ne sont pas lessivés de la zone de sol non saturée vers les eaux souterraines. Aussi Martens et Westermann (1991), déclarent que les métaux lourds ne sont pas mobiles dans les sols et donc leur transport vers les eaux souterraines à la suite de l'application de boues d'épuration à des taux agronomiques est peu probable.

Les composés organiques toxiques présents dans les eaux usées ne sont pas susceptibles de contaminer les eaux souterraines car leurs concentrations sont faibles (Martens and Westermann, 1991), aussi la lixiviation des constituants organiques toxiques vers les eaux souterraines ne se produit pas lorsque les taux d'application des eaux usées traitées ou des boues sur les sols agricoles sont contrôlés par la demande en eau et en nutriments des cultures (Overcash, 1983). Cependant, la percolation d'eaux riches en nutriments à travers le sol peut conduire à la dégradation de la qualité des eaux souterraines (Scott et al., 2000).

Les eaux usées à forte teneur en azote entraînent la contamination des eaux souterraines lorsqu'elles sont appliquées au sol (Russell and Cooper, 1992).

7. Effet de l'utilisation des eaux usées sur les propriétés du sol

La réutilisation des eaux usées peut améliorer les propriétés physiques et la productivité agricole des sols, et leur utilisation agricole offre une alternative aux options d'élimination, telles que l'incinération et la mise en décharge (Martens and Westermann, 1991), aussi l'épandage d'eaux usées peut contribuer à remédier aux carences en oligo-éléments dans le sol (Logan and Chany, 1983) et augmenter le teneur en azote, en phosphore et en matière organique du sol (Wang et al., 2002).

En plus de de leur valeur nutritive, les eaux usées ont généralement un effet positif sur les propriétés physiques du sol (Chaney, 1983) malgré que certaines propriétés telles que la dispersion des particules, la stabilité des agrégats, la structure du sol et la perméabilité,

deviennent très sensibles à certains types d'ions échangeables présents dans l'eau d'irrigation (Pescod, 1992).

L'addition de matière organique par des applications successives des eaux usées améliore la productivité et les propriétés physiques par augmentation de la porosité du sol en raison d'une meilleure agrégation des particules (Martens et Westemann 1991).

Cependant, l'application des eaux usées peut conduire à l'accumulation des métaux lourds dans le sol (Singh et al., 2004), ainsi McGrath et al. (1994) déclarent que les éléments traces, en raison de leur absorption limitée par les plantes, ont tendance à s'accumuler dans le sol de surface et à faire partie de la matrice du sol, ainsi, Craig-Cogger et Andy (2000) estiment que l'apport de métaux lourds et d'autres éléments traces par les eaux usées est préoccupant car ils ne se dégradent pas et restent indéfiniment dans le sol, à l'inverse de Kretschmer et al. (2003) qui n'ont pas constaté d'accumulation de substances nocives dans le sol suite à l'irrigation avec des eaux usées.

La salinité et la sodicité du sol augmente de manière significative avec une augmentation de la salinité et de la sodicité de l'eau d'irrigation (Hussain et Alsaati, 1999), ainsi, lorsque, le sodium, est présent dans l'eau usée à des concentrations plus élevées par rapport au calcium et au magnésium, peut entraîner la dispersion des agrégats du sol, ce qui réduit l'infiltration et la perméabilité, les eaux à fort SAR mais à faible salinité dispersent le sol et le rendent moins friable, plus difficile à travailler et moins perméable à l'eau (EPA, 1996), aussi la conductivité hydraulique peut diminuer en raison de l'accumulation de sodium dans les sols (Menneer et al., 2001).

7.1. Effet à long terme de l'utilisation des eaux usées sur le sol

D'une manière générale, l'application d'eaux usées, pendant une longue période sur le sol, conduire à :

- Une accumulation de sels dans le profil du sol (EPA, 1996) et une augmentation de la sodicité et de la salinité, et constitue une menace pour l'avenir de la production agricole, (Ramirz et al., 2002).
- Une charge élevée de polluants tels que les sels minéraux dissous, les solides en suspension, les pesticides et d'autres organismes dans le sol (Filip et al., 1999).
- L'accumulation de métaux à la suite d'applications de boues d'épuration à long terme réduit les niveaux de biomasse microbienne (Brookes et al., 1986)
- Des effets négatifs sur la relation symbiotique entre certaines souches de rhizobia (McGrath et al., 1994).

- L'accumulation des métaux lourds dans le sol ce qui rend la dépollution des sols plus difficile dans le cadre des futurs programmes d'assainissement (Mendoza et al. 1996 ; Chang et al. 1997; Hayat et al., 2002 ; Ramirz et al. 2002 ; Poggivorald et Rinerkenceth, 2003 ; Ingwersen et Streck, 2005)
- Augmentation des nutriments du sol et le contenu en carbone organique (Gupta et al., 1998).
- Amélioration de la structure du sol (Mathan 1994).

8. Effet sur les animaux

Tous les éléments minéraux, qu'ils soient essentiels ou non essentiels, peuvent avoir un effet négatif sur l'animal s'ils sont inclus dans le régime alimentaire à des niveaux excessivement élevés (Washington, 1980), selon le même auteur, le niveau maximal tolérable est le niveau alimentaire qui, lorsqu'il est administré pendant une période limitée, n'altère pas les performances de l'animal et ne devrait pas produire de résidus dangereux dans l'alimentation humaine dérivée de l'animal.

Khouri et al. (1994) rapportent que le cadmium même présent dans les eaux usées à des niveaux non toxiques pour les plantes peut s'accumuler à l'intérieur des plantes à des niveaux nocifs pour les humains et les animaux, aussi, le molybdène présent dans les eaux usées peut s'accumuler dans les cultures fourragères à des niveaux toxiques pour le bétail.

Les métaux lourds contenus dans les fourrages s'accumulent dans le lait de vache, ce qui peut conduire à une accumulation dangereuse dans le corps du consommateur (Khouri et al., 1994).

9. Effet de l'utilisation des eaux usées sur l'environnement

Cette ressource qui constitue une valeur hydrique et un potentiel de matières fertilisantes important peut également être une source de pollution. Son contenu en éléments traces et en microorganismes pathogènes et sa teneur élevée en azote peuvent présenter un risque pour l'environnement.

L'irrigation par les eaux usées présente plusieurs menaces pour l'environnement du fait de la contamination par les nutriments, les métaux lourds et les sels.

L'augmentation des charges de nitrates dans les eaux usées peut accroître le risque de contamination des eaux souterraines (Stagnitti et al., 1998).

Khouri, et al. (1994), ont signalé que les principaux risques environnementaux qui peuvent être associés aux eaux usées sont les suivants :

- Propagation des agents pathogènes.

- Appauvrissement de l'oxygène par les contaminants organiques.
- Introduction d'un produit chimique dans un écosystème sensible.

La contamination par le strontium est particulièrement dangereuse en raison de sa similitude avec le calcium, le strontium peut remplacer le calcium dans les structures biologiques telles que les os humains (Haneklaus and Schnug 2001).

Les déchets industriels, en particulier lorsqu'ils contiennent des produits chimiques nocifs, des métaux lourds et d'autres produits chimiques toxiques, peuvent avoir des conséquences bien plus graves. Ces substances dangereuses polluent les eaux de surface, le sol et les eaux souterraines, et se concentrent dans la chaîne alimentaire (Mousa, et al., 2002).

Selon Pescod (1992) et Stagnitti, et al. (2006), la réutilisation des eaux usées a deux objectifs majeurs : elle améliore l'environnement car elle réduit la quantité de déchets déversés dans les cours d'eau, et elle préserve les ressources en eau en diminuant la demande de prélèvement d'eau douce.

Une connaissance scientifique des effets directs et indirects des traitements et des suivis épidémiologiques est indispensable (AFD, 2011).

Le tableau (4) présente les risques associés à la réutilisation des eaux usées traitées.

Tableau 4: Typologie des risques associés à la réutilisation des eaux usées (Condom et al., 2012).

Secteur impacté	Risques	Aléas	Sensibilité (exposition)
Santé	<ul style="list-style-type: none"> • Risques microbiologiques : choléra, infections, diarrhées, allergies. • Risques chimiques : intoxication, cancers. • Dégradation qualité des produits agroalimentaire. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pathogènes. • Composés toxiques • Polluants émergents, perturbateurs endocriniens 	Exposition : public, usagers, consommateurs
Environnement	<ul style="list-style-type: none"> • Eutrophisation, pollution de nappes. • Odeurs. • Impacts des coproduits de traitements. (concentrations membranaires, boues). • Émissions de CO₂ (consommation d'énergie pour le traitement). 	<ul style="list-style-type: none"> • Azote, phosphore, composés toxiques, métaux lourds. 	Profondeur des nappes, sensibilité des milieux (zones côtières).
Sol et plantes	<ul style="list-style-type: none"> • Toxicité des plantes (sels) • Salinisation et dégradation des sols (eau salée) • Accumulation de polluants dans les sols 	<ul style="list-style-type: none"> • Salinité, métaux lourds. 	Sensibilité des cultures, fragilité des sols.
Perception	<ul style="list-style-type: none"> • Impact visuel (stockage). • Odeurs. • Rejet social (méconnaissance, peurs). • Tension si expropriation. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gêne 	Niveau de perception, propension au Changement.
Distribution, équipement	<ul style="list-style-type: none"> • Développement d'algues. • Corrosion, biofilm, bouchage. 	<ul style="list-style-type: none"> • Matière organique, azote, phosphore, matières en suspension. 	Type de système d'irrigation.

CHAPITRE II

PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE

CHAPITRE II: PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE

1. Présentation de la région de Chlef

1.1. Situation géographique

La wilaya de Chlef est située au Nord-Ouest de l'Algérie. Elle se trouve à 200 km d'Alger, au cœur de la vallée du Chélif et 50 km de la Méditerranée. Au Sud, les monts de l'Ouarsenis, la séparent de la wilaya de Tissemsilt. A l'Est, la wilaya de Tipaza et Ain Defla. A l'Ouest, elle est limitée par les wilayas de Mostaganem et Relizane (Figure. 8)

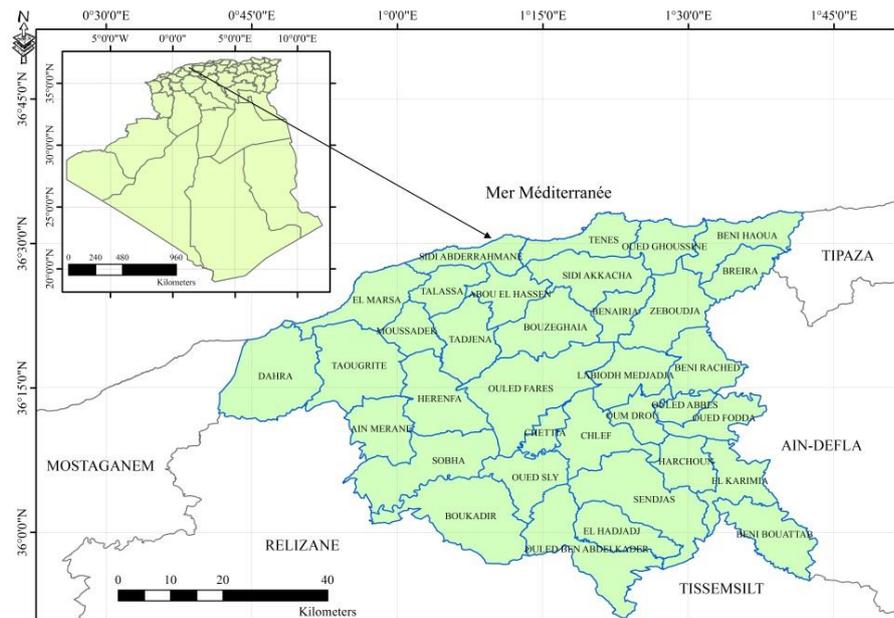


Figure 8: Localisation de la région d'étude

1.2. Le relief

La wilaya est caractérisée par deux types de régions : les régions montagneuses au Nord et au Sud et au centre les plaines de la vallée du Cheliff.

Les monts de Dahra, qui couvre la partie Nord de la wilaya (Figure. 9), présentent des altitudes relativement faibles. Ces monts font partis de la chaîne de l'Atlas Tellien, et qui se déploient entre la méditerranée et le Cheliff, à l'exception de Djebel Bissa, les monts de Dahra dépassent rarement les 1000 mètres (ABH. Cheliff Zahrez, 2003).

Au Sud de la wilaya, on y trouve les collines qui constituent les piémonts du massif de l'Ouarsenis.

Les monts du Dahra et ceux de l'Ouarsenis isolent la plaine du moyen Cheliff avec une altitude maximale de 250 m. Cette plaine est drainée par l'Oued Cheliff et ses affluents. (ABH. Cheliff Zahrez, 2003).

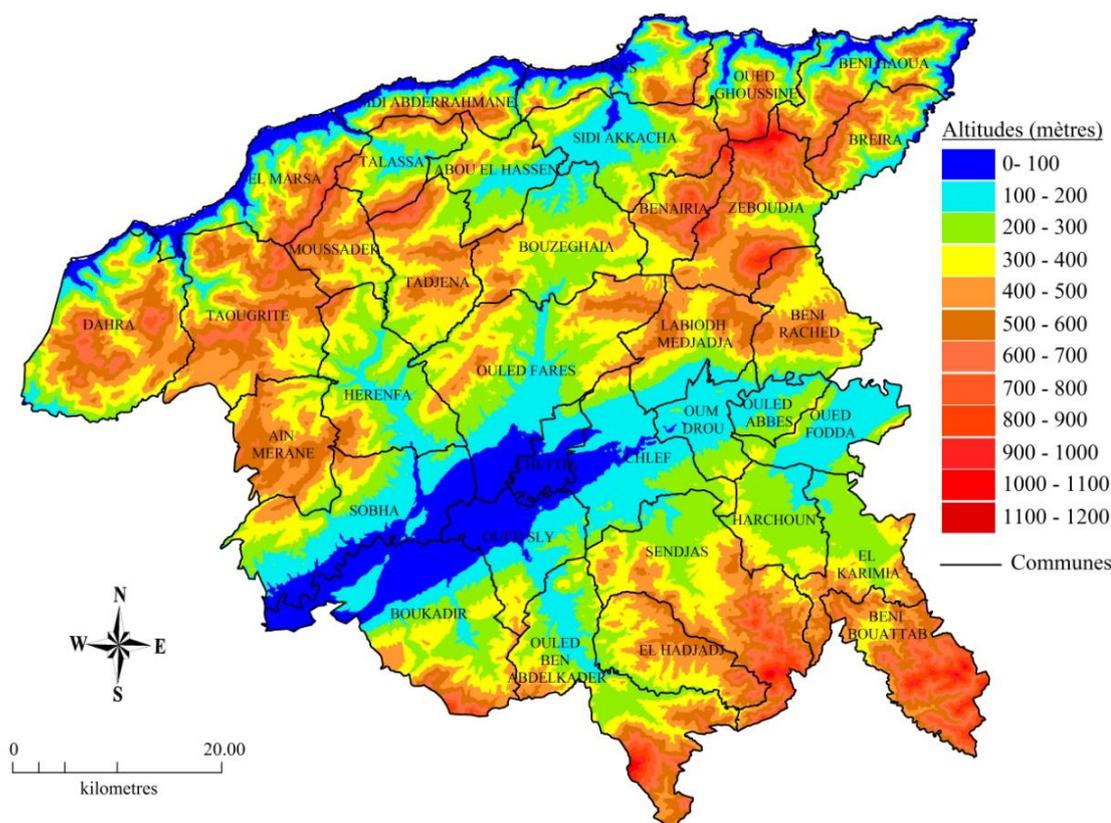


Figure 9 : Relief de la wilaya de Chlef

1.3. Le sol

La région de Chlef est caractérisée par des sols d'apport colluvial et surtout alluvial. La pédogénèse est très marquée par des phénomènes d'hydromorphie, halomorphie, tirsification et la rubéfaction qui sont liés aux propriétés morphologiques.

Au périmètre du Haut- Chélif, on distingue :

- Les sols alluviaux sableux de la terrasse moderne du Chélif, qui sont peu évolués, profonds et perméables.
- Les sols alluviaux de texture limoneuse de la terrasse récente du Chélif, qui sont faiblement argileux.
- Les sols de terrasses anciennes, qui sont rouges sur tuf ou sur croute déclassifiée en surface.

Alors que les sols du périmètre du Moyen- Chélif sont caractérisés par :

- Les sols d'apport colluvial se trouvant à la lisière de la plaine et sont profonds,
- Les sols hydro-morphes se trouvent pour la plupart dans les vallées de la Merdja et de l'Oued Fodda.
- Les sols salés se localisent dans la partie Ouest du périmètre, surtout dans la région de Bled Souala.

Quant au périmètre du Bas-Chéiff, ses sols peuvent être classés en deux principaux types généraux :

- Les sols légers et non salés qui se trouvent sur le plateau de Benziane et les périphéries de la plaine.
- Les sols lourds et salés qui occupent la partie centrale de la plaine.

1.4. Végétation

La plaine du moyen Cheliff est constituée essentiellement de zones cultivées, en cultures maraîchères et arboriculture, les agrumes étant la principale culture (Figure 10).

La rive droite de l'oued Cheliff est caractérisée par des zones cultivées n'excédant pas 30 %, alors que la rive gauche est caractérisée par une couverture forestière plus ou moins dégradée de l'ordre de 40 à 45 % (ABH. Cheliff Zahrez, 2003).

Au Nord de la wilaya, la partie côtière est caractérisée par la prédominance de viticulture. En plus des cultures maraîchères avec l'avènement des serres. Aussi, les maquis sont très présents dans cette partie de la wilaya. Le Sud de la wilaya, est dominé par les forêts qui font partie du massif de l'Ouarsenis (ABH. Cheliff Zahrez, 2003).

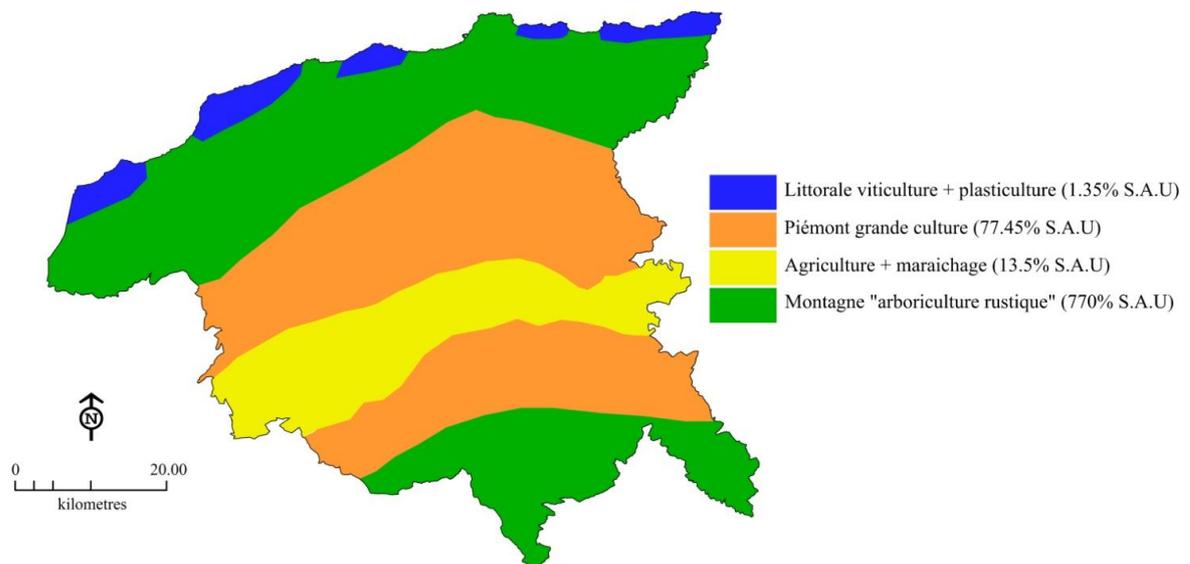


Figure 10: Carte des zones naturelles dans la région de Chlef

2. Climatologie

Le climat de l'Algérie a fait l'objet de nombreuses études analytiques et synthétiques, notamment par Seltzer, 1946 ; Bagnols et Gausson, 1953 ; Emberger, 1955 ; Stewart, 1975 ; Bottner, 1981 ; Le Houerou, 1995. Tous ces auteurs s'accordent à reconnaître l'intégration du climat algérien au climat méditerranéen, caractérisé par une saison sèche et chaude coïncidant avec la saison estivale, et une saison froide et pluvieuse qui coïncide avec la saison hivernale.

En Algérie, la pluviométrie peut être soumise à l'orographie et aux influences maritimes.

Dans ce contexte, la répartition de la pluviométrie en Algérie est sous l'effet de quatre influences à savoir l'altitude, la longitude, la topographie, et l'éloignement de la mer.

2.1. Sources des données

Les données climatiques utilisées dans cette étude ont été fournies par différents secteurs spécialisés dans le relevé, le traitement et le stockage des données.

Les températures et la vitesse des vents sont fournies par la station ONM de Chlef : (Office National de Météorologie).

La pluviométrie fournie au niveau de l'ANRH de Chlef (Agence National des Ressources Hydrauliques). Ces données couvrent une période de 29 ans allant de 1984 à 2013.

2.2.1. Précipitations

La région de Chlef est caractérisée par un régime pluviométrique très irrégulier dans l'espace et dans le temps (ANDI, 2008)

2.2.1.1. Répartition annuelle des précipitations

La pluviosité dans la région de Chlef est marquée par une grande variabilité (figure11), au cours de la période allant de 1984 à 2013, les années les plus pluvieuses étaient 1986, 1996, 1997 et 2013 avec des cumuls annuels de 543 mm, 514 mm et de 508 mm et 618 mm respectivement, alors que les années 1988, 1989, 1998 et 2012 étaient particulièrement sèches avec un cumul inférieur à 300 mm.

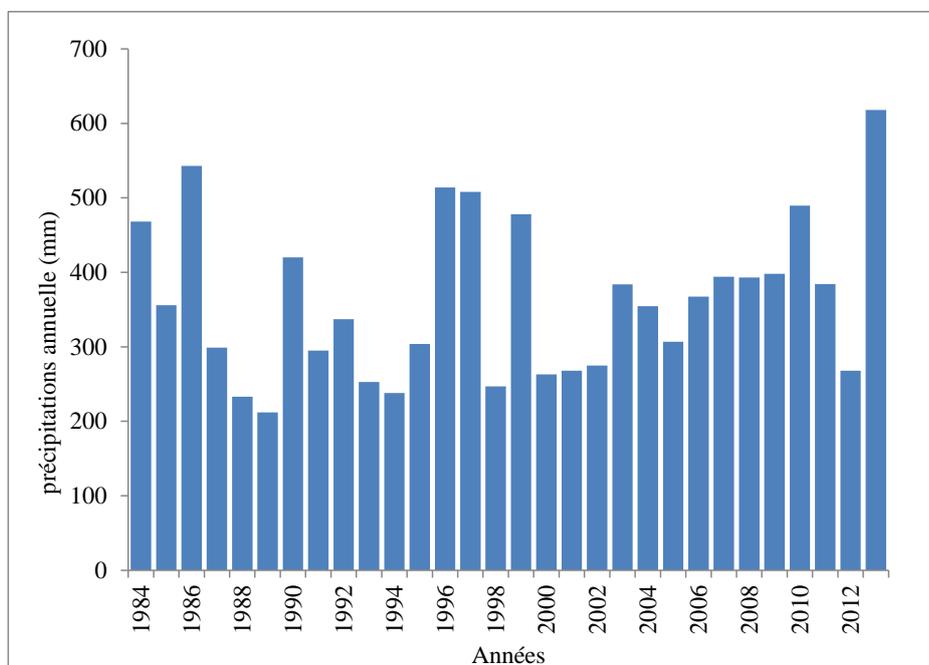


Figure 11: Répartition annuelle des précipitations (1984-2013)

Les statistiques descriptives ont montré que ces années 1986, 1996, 1997 et 2013, 1988, 1989, 1998 et 2012 étaient loin des limites (au-dessus ou en dessous) de confiance allant de 322,96 et 401,61 mm, en effet l'écart type élevé (105,31 mm) témoigne de la grande variabilité causée par ces années, la moyenne pluviométrique annuelle dans la région est de l'ordre de 362.29 mm (Tableau).

Tableau : Statistiques descriptives des précipitations annuelles

Statistiques descriptives	Précipitations annuelles (mm)
Minimum	212.0000
Maximum	618.0000
1er Quartile	269.7500
3ème Quartile	414.5000
Moyenne	362.2850
Ecart-type (n-1)	105.3145
Borne inf. de la moyenne (95%)	322.9599
Borne sup. de la moyenne (95%)	401.6101

2.2.1.3. Régime pluviométrique saisonnier

C'est Musset (1935 in Chaabane, 1993) qui a défini le premier la notion de régime saisonnier. Elle consiste à calculer la somme des précipitations par saison et à effectuer le classement saisonnier par ordre de pluviosité décroissante. L'hiver a été défini comme la période de décembre de l'année n-1 à janvier et février de l'année n (H) ; le printemps intègre les mois de mars à mai (P) ; l'été les mois de juin à août E et l'automne la période de septembre à novembre (A).

Les résultats ont montré que le régime saisonnier de la zone d'étude est de type HAPE, caractérisé par un fort déséquilibre, en effet, il a été constaté que :

Durant la période hivernale, la région d'étude reçoit les plus fortes quantités de pluies (figure13). En effet, 38,14% du total annuel des précipitations dans la région d'étude est enregistrée durant l'hiver. Alors que la saison estivale est particulièrement sèche et ne reçoit que 3.12% du total annuel. Cependant, les saisons automnale et printanière reçoivent des quantités similaires de l'ordre de 29 % (figure12)

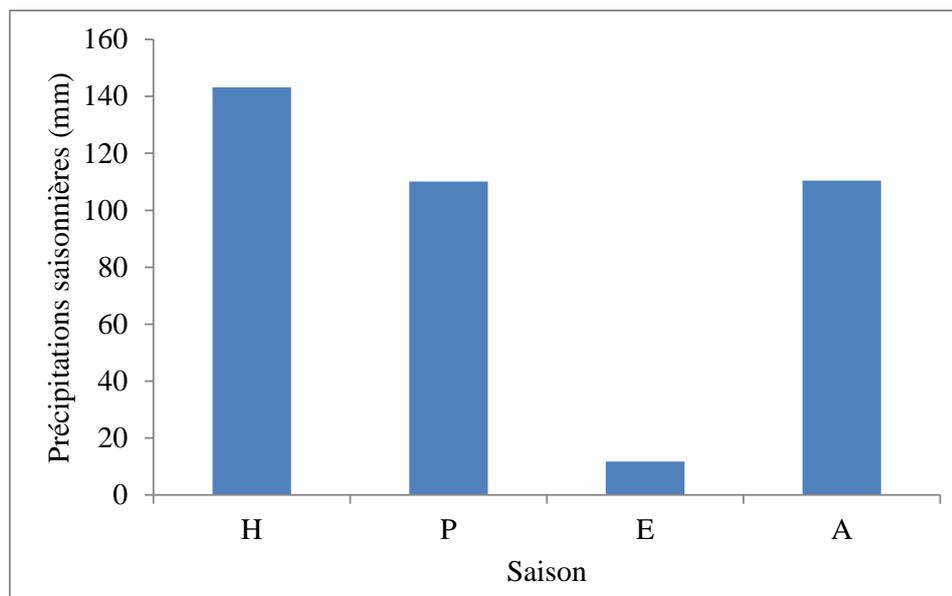


Figure 12 : Répartition saisonnière des précipitations (1984-2013)

2.2.2. La température

La température est un facteur très important en interaction avec les autres facteurs météorologiques tels que la précipitation, l'humidité et l'évapotranspiration, qui interviennent dans tous les stades de développement des plantes.

L'augmentation de la température entraîne une augmentation des besoins en eau d'une culture, elle influe souvent les capacités photosynthétiques des cultures.

Les températures moyennes mensuelles (figure 13) montrent que les mois les plus froids sont Janvier, février et décembre avec une moyenne de 10,9 °C, durant cette période la température minimale atteint 5,82 °C. Alors que les mois les plus chauds sont juin, juillet et août avec une température moyenne de 28,40°C. La température maximale de 37,8°C est atteinte durant le mois de juillet.

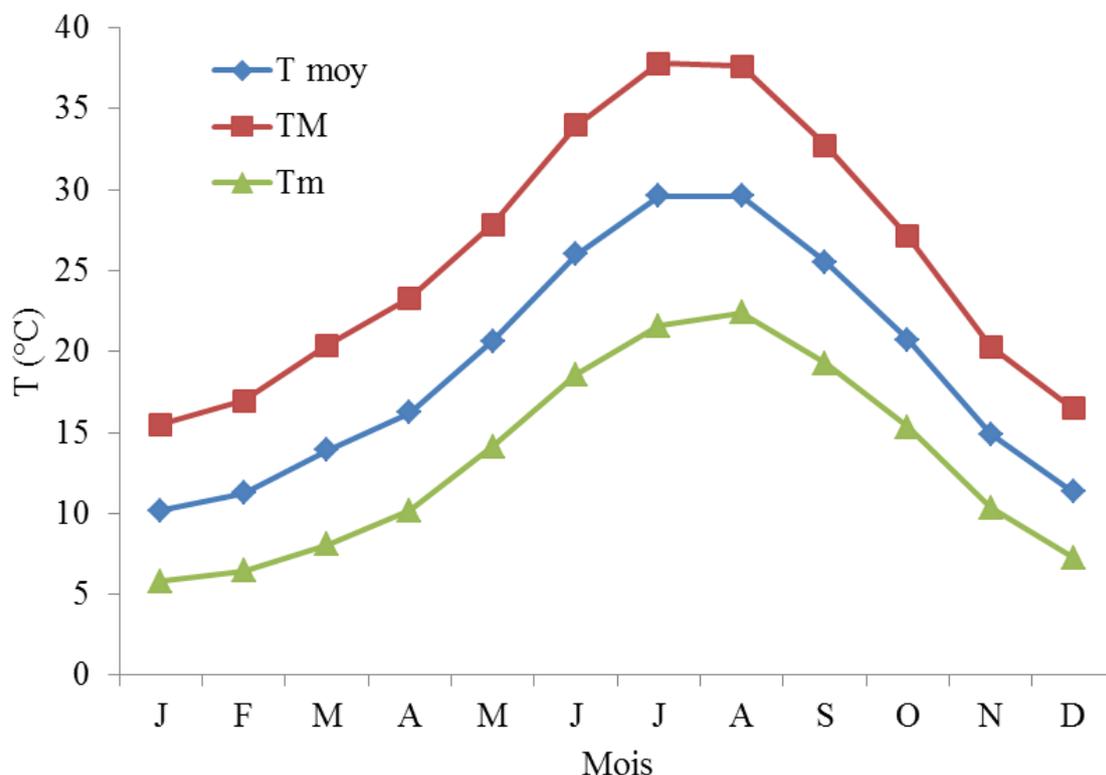


Figure 13: Variations des températures moyennes mensuelles minimales et maximales

2.2. Synthèse Bioclimatique

2.2.1. Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1957)

Le diagramme ombrothermique de Gausson permet de calculer la durée de la saison sèche, en tenant compte des précipitations et des températures moyennes mensuelles qui sont portées sur des axes où l'échelle de la pluviosité est double de la température.

Les variations annuelles des moyennes mensuelles des températures et des précipitations permettent de distinguer les périodes humides et sèches, un mois est considéré comme sec si les précipitations (mm) sont inférieures au double de la température moyenne exprimée en degré centigrade ($P \leq 2T$) causant la souffrance des plantes.

L'analyse du diagramme ombrothermique relatif à la wilaya de Chlef montre deux périodes distinctes de durée égale

- **Une période humide** : qui s'étend sur six mois, à partir du mi-octobre jusqu'au mi-avril; cette période connaît les plus fortes précipitations allant de 40 à 50 mm, la plus forte pluviosité est enregistrée au mois de novembre, aussi les plus faibles températures sont observées durant cette période, avec des températures de l'ordre de 10°C enregistrées durant les mois décembre-janvier (figure 14).
- **Une période sèche** : qui s'étend aussi sur six mois de l'année, allant du mi-avril jusqu'au mi-octobre, les plus fortes sécheresses sont observées durant cette période

de l'année dans la wilaya de Chlef, les mois de juin-juillet et aout sont les mois les plus secs avec une pluviométrie moyenne mensuelle inférieure à 10 mm, cependant les plus fortes températures sont observées durant cette période sèche, avec une température moyenne mensuelle de presque 30°C au cours des mois de juillet et aout (figure 15).

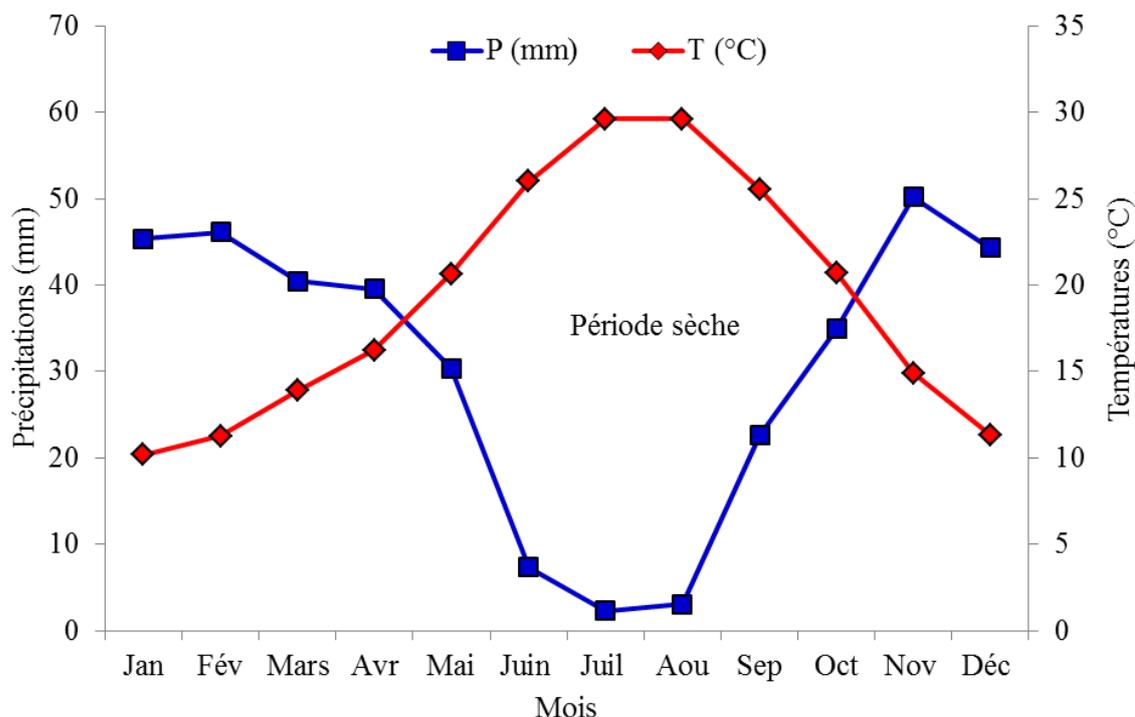


Figure14: Diagramme ombrothermique de Gaussen pour la période 1984-2013 (Bagnouls et Gaussen, 1957)

2.2.2. Quotient pluviométrique d'Emberger

La sécheresse et le froid sont les principaux facteurs limitant la croissance de la végétation méditerranéenne. C'est pourquoi les paramètres climatiques, liées aux précipitations et aux températures fortement dépendant de l'altitude; sont choisis comme bases des principales classifications bioclimatiques des espaces boisés méditerranéens. Dans ce contexte, Emberger (1952) a proposé un indice climatique visant à traduire un écosystème méditerranéen en fonction de la vie végétale:

$$Q = \frac{P}{\frac{(M + m)(M - m)}{2}} \times 1000 = \frac{2000 \times P}{M^2 - m^2}$$

Q : Le quotient d'Emberger.

P : Représente les précipitations annuelles exprimées en mm.

M : La moyenne des températures maximales du mois le plus chaud.

m : La moyenne des températures minimales du moi le plus froid.

M et m sont exprimés en degré kelvin (°K).

Le quotient (Q) d'Emberger calculé pour la région de Chlef été égal à 38.4 avec une température minimale du mois le plus froid égale à 6°C ce qui correspond à l'étage bioclimatique semi-aride inférieur à hiver tempéré (Figure 15).

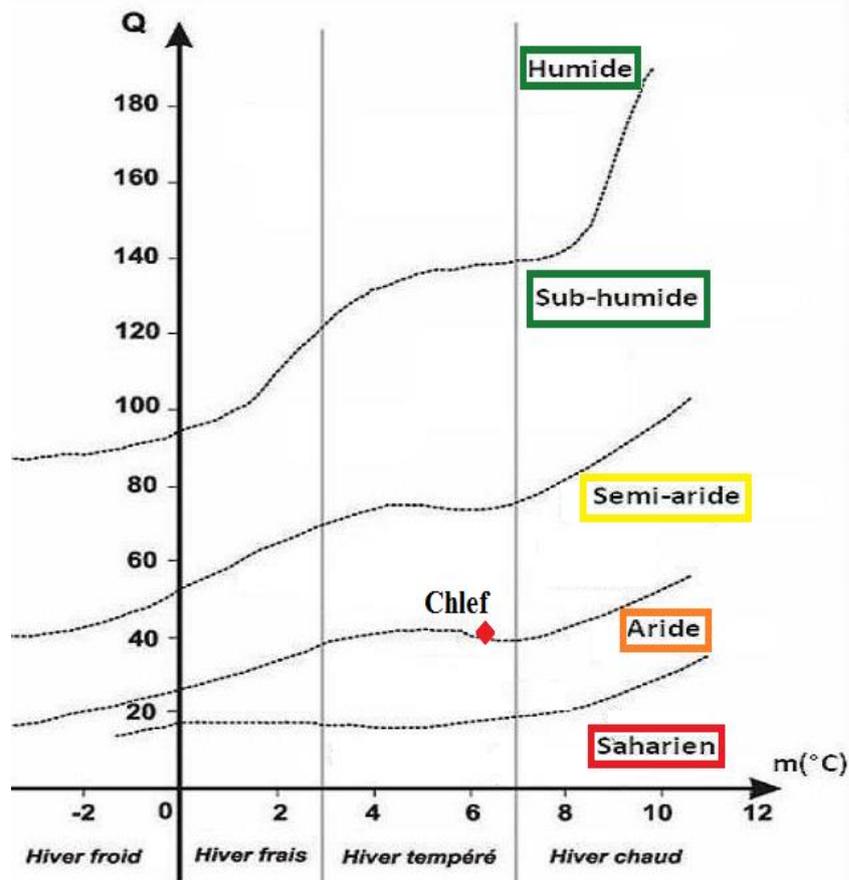


Figure 15: Climagramme d'EMBERGER de la région de Chlef

2.2.3. L'indice d'aridité de De Martonne

L'indice d'aridité de de Martonne (de Martonne 1926) est un indicateur d'aridité exprimant le caractère restrictif pour certaines formations végétales (Ionac et al, 2015), il est donné par

$$I_a = P / (T + 10)$$

$$I_a = P / (T + 10)$$

Où : I_a en mm/°C, P total annuelle des précipitations en mm et T est la température moyenne annuelle de l'air en °C.

Avec un indice d'aridité égal à $I = 12.42$, la région de Chlef est classée dans le climat semi-aride à écoulement temporaire et à formations herbacées (Figure 17)

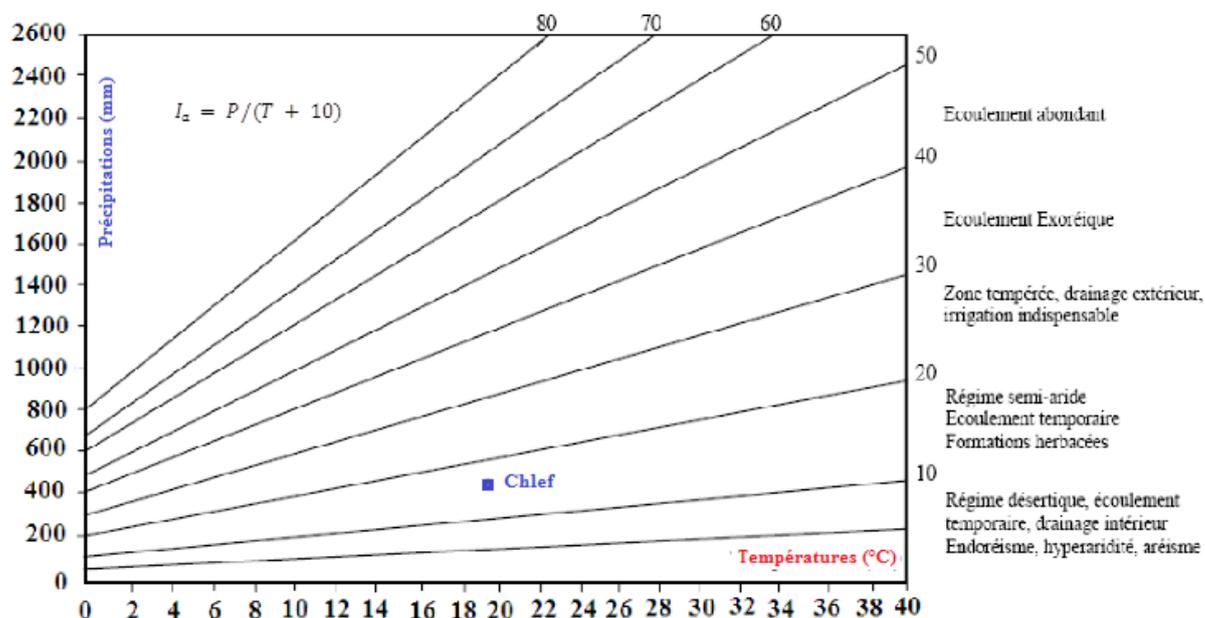


Figure 17: Abaque de l'indice d'aridité annuelle De Martonne.

2.2.4. Le vent

Le vent a un rôle important à l'échelle microclimatique car il influe sur d'autres paramètres telles que la température, l'humidité de l'air et l'évapotranspiration.

Les vents dominants dans la région de Chlef sont les vents ouest, cependant durant la période estivale, la région reçoit le sirocco (vents sud à caractères sec et chauds), qui souffle en été et accélère l'évapotranspiration.

L'analyse de la vitesse moyenne mensuelle du vent sur une période de 29 ans, montre que la région de Chlef se caractérise par des vents faibles ou modérés avec une moyenne annuelle de 2.91 m/s, les vents les plus forts sont observés durant le mois de juillet avec une moyenne mensuelle de 4.21 m/s, alors que le mois de décembre enregistre les plus faibles vents avec une vitesse 2.36 m/s.

Tableau 6 : Moyenne mensuelle de vitesse des vents (1984-2013)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
V (m/s)	2.47	2.69	2.88	3.13	3.23	3.22	4.21	2.81	3.03	2.47	2.44	2.36

2.2.5. L'ensoleillement

Ce facteur est primordial pour le bon fonctionnement des peuplements végétaux et en particulier la vitesse de croissance végétale.

La région de Chlef est sous l'influence du climat méditerranéen, donc bien ensoleillée durant presque 8 mois de l'année.

Tableau 7 : Moyennes mensuelles d'ensoleillement. (1984-2013)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
E (heures)	154	177	222	249	294	311	343	317	260	232	177	163

2.2.5. L'évaporation

La quantité moyenne mensuelle d'eau évaporée dans la wilaya est variables selon les mois (Tableau 8), elle est importante à partir du mois de mars jusqu'à à octobre et atteint son maximum durant la saison estivale.

Tableau 8 : Evaporation moyenne mensuelle en (mm) de la station de Chlef (1984- 2013)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ETP (mm)	57.1	84.4	127.2	148.4	193.7	255.2	320	298.4	197.2	139.7	102.4	59.4

2.2.6. L'humidité relative

L'humidité relative est un paramètre climatique qui dépend essentiellement de la température et la pression atmosphérique. Dans la région de Chlef d'humidité relative est variable en fonction des mois avec une moyenne annuelle de 61%, les mois les plus humides s'étalent entre novembre et février, cependant la moyenne estivale ne dépasse pas les 44% (Tableau .9)

Tableau 9 : Humidité relative moyenne interannuelle en (%) dans la région de Chlef

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Humidité %	75.9	72.6	68.6	61.2	56.2	45.9	41.5	43.2	53.9	61.97	72.5	77.4

CHAPITRE III

MATERIELS ET METHODES

PARTIE I : ANALYSE PHYSICO CHIMIQUES DES EAUX USEES TRAITEES

1. Présentation et localisation du site de prélèvement

1.1.Présentation de la STEP

La station d'épuration des eaux usées de la ville de Chlef est située à l'ouest de la commune de Chlef (Wilaya de Chlef), près de la rivière Cheliff. Elle a été mise en service en 2006. Elle occupe une superficie de 12 ha avec une capacité maximale de traitement de 36 405 m³/jour pour 227 528 Equivalent/Habitant, à l'horizon 2025. Actuellement, elle traite 6 640 m³/j (DWR, 2010).

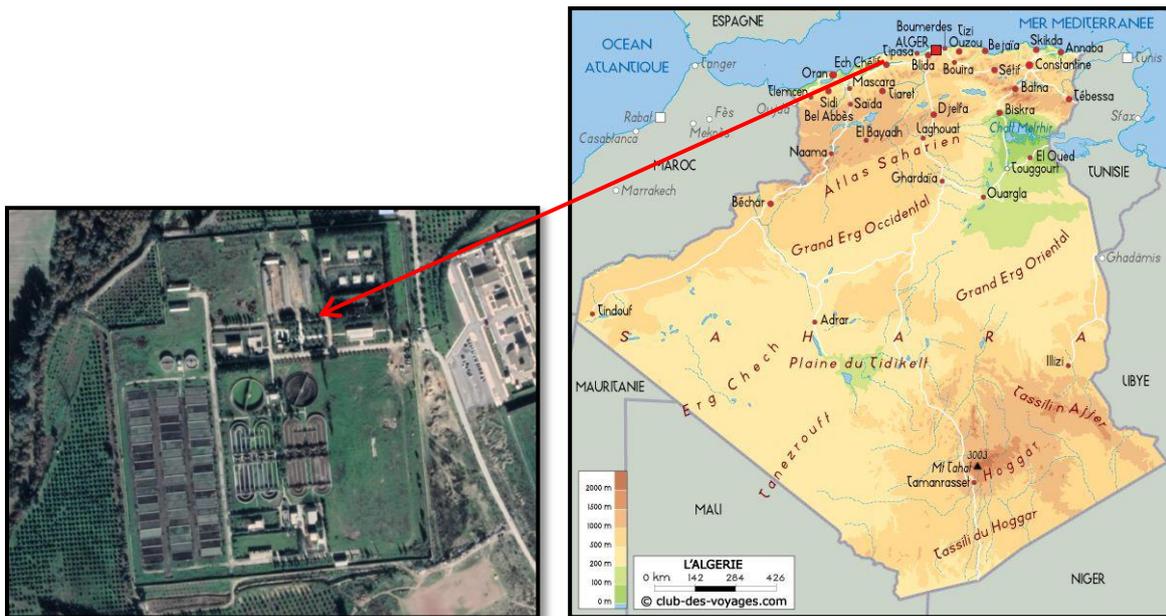


Figure 17: Localisation de la station d'épuration de Chlef. (DWR, 2010).

1.2.Principe et fonctionnement du système de traitement

La station d'épuration des eaux usées (STEP) de Chlef fonctionne selon un procédé à boues activées à faible charge et à aération prolongée.

Après une série de prétraitements (dégrillage, dessablage, déshuilage), les eaux usées sont admises directement dans les bassins d'aération pour un traitement biologique. Le fonctionnement d'un bassin d'aération est anaérobie/aérobie. Après dégradation de la pollution carbonée et azotée, les eaux usées sont dirigées vers un clarificateur pour une séparation solide-liquide. L'eau clarifiée est directement rejetée dans l'Oued Chellif. (STEP, 2017)

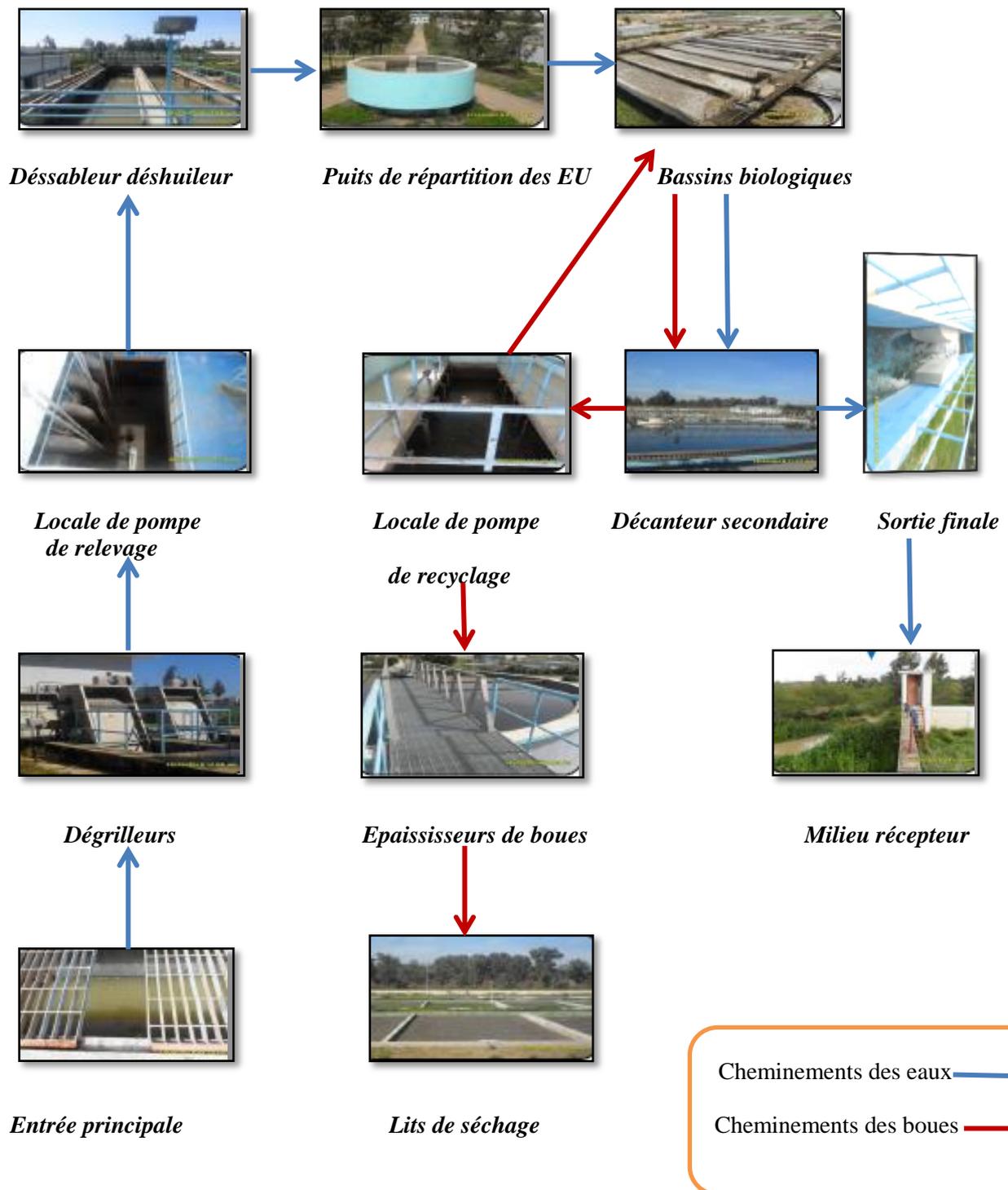


Figure 18: Présentation générale des différents ouvrages au niveau de la STEP de Chlef

La STEP est alimentée par un réseau gravitaire et par quatre stations de relevage comme exprimés dans le tableau suivant :

Tableau 10: réseau gravitaire d'alimentation de la STEP

Station	Diamètre de la conduite des eaux usées	Linière de la conduite
Hay Houria N°01	400 mm.	720 m
Hay Houria N°02	400 mm.	220 m
Chérifi	600 mm	790 m
Karmila	600 mm	130 m

Source : ONA, 2013

2. Prélèvement des eaux usées traitées

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate auquel il faut apporter le plus grand soin. Il conditionne les résultats et l'interprétation des données.

Deux prélèvements par mois ont été effectués par mois durant le matin de 09h-10h. Le site du prélèvement de l'eau traitée se trouve à la sortie de la STEP (Photo 1) et les échantillons ont été pris à partir de la vanne principale de déversement.

Les analyses physicochimiques ont été effectuées au niveau du laboratoire de l'université de Chlef (pendant la période d'irrigation).



Photo 1: Site de prélèvement : Sortie de la STEP de Chlef.

3. Analyses physicochimiques

Les analyses physico-chimiques ont concerné les paramètres suivant : T°C, pH, conductivité électrique, matières en suspension (MES), DBO₅, DCO, matières oxydables, nitrates, nitrites, et ammonium. Les échantillons prélevés ont été mis dans des flacons en verre de 500 ml, préalablement désinfectés et rincés selon les recommandations de (Rodier, 2005).

Le transport des flacons au laboratoire a été réalisé dans une glacière sous 4°C de température.

3.1. Mesure de la température

La température est un facteur écologique important du milieu. Elle influe sur la densité de l'eau et joue un rôle primordial dans les phénomènes de stratification des lacs et des mers, une élévation de la température perturbe fortement le milieu et elle peut être un facteur d'accroissement de la productivité biologique (Gaujous, 1995). La mesure de la température a été faite directement sur terrain en utilisant un thermomètre à mercure.

3.2. Mesure du pH, conductivité électrique (CE)

La mesure de ces paramètres est faite selon la méthode électrochimique. Un pH-mètre multifonctions (Multiline P4) est préalablement étalonné, ses deux électrodes sont plongées dans l'échantillon à analyser. L'appareil affiche directement le pH de la solution, et sa conductivité en (mS/cm)

3.3. Détermination des matières en suspension (MES)

Les matières en suspension (MES) constituent un ensemble de particules minérales et/ou organiques présentes dans une eau naturelle ou polluée (Cornaz, 2004). Elles sont en majeure partie biodégradable (Faby, 2003).

La quantité des matières en suspension contenue dans l'eau épurée a été déterminée par la méthode de filtration sur des disques filtrants en fibres de verre (Whatman). L'eau a été filtrée et le poids de matière retenue par le filtre a été déterminé par pesé différentielle selon le protocole de (Rodier, 2005).

La teneur en MES est exprimée en mg/l est donnée par la relation:

$$\frac{M_1 - M_0}{V} \times 1000$$

M₀ : Masse du disque filtrant avant l'utilisation (mg).

M₁ : Masse du disque filtrant après l'utilisation (mg).

V : Volume d'eau utilise (mg).

3.4. Détermination de la demande biologique en oxygène (DBO₅)

La demande biologique en oxygène exprime la quantité d'oxygène nécessaire à la destruction ou à la dégradation des matières organiques d'une eau par les micro-organismes du milieu. Ce paramètre est un bon indicateur de la teneur en matière organique biodégradable d'une eau au cours des procédés d'autoépuration (Rejsek, 2002).

Le protocole de mesure est effectué selon la norme AFNOR (NF, T90-103). Le principe de cette méthode repose sur une mesure de l'oxygène, avec des germes au bout de cinq jours, placé dans une enceinte à 20°C. Pour déterminer la DBO₅, deux mesures de l'oxygène dissout doivent être effectuées à l'instant: t₀= 0 jour et t₁= 5 jours.

- **Calcul des matières oxydable (MOx):** La matière biodégradable joue un rôle prépondérant de la qualité de l'eau dans les stations d'épurations (Servais, 1995).

Elle est calculée selon l'équation suivante : $MOx = 2/3 DBO + 1/3 DCO$.

3.5.Détermination de la demande chimique en oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène correspond à la quantité d'oxygène (mg/l) qui a été consommée par voie chimique pour oxyder l'ensemble des matières oxydables présentes dans l'eau. La DCO est particulièrement indiquée pour mesurer la pollution d'un effluent industriel (Rodier, 2005).

La méthode appliquée est celle de la norme AFNOR (NF, T90-101) qui consiste à introduire 2 ml d'échantillon dans un milieu acide contenant le réactif approprié (solution commerciale composée de HgSO₄, H₂SO₄, Ag₂SO₄). L'ensemble est chauffé dans un four à DCO à 150°C pendant deux heures, après refroidissement la lecture se fait au spectrophotomètre à une longueur d'onde $\lambda = 620$ nm, la DCO est donnée en mg O₂/l.

3.6.Dosage des nitrates (NO₃-)

Les nitrates (NO₃-) ont été évaluées par une méthode spectrométrique au diméthyl 2,6 phénols selon les normes internationales (ISO 7890-1:1986).

3.7.Dosage des nitrites (NO₂-)

Les concentrations en nitrites ont été déterminées par une méthode de spectrométrie d'absorption moléculaire, normalisée (ISO 6777-1984). Après avoir établi une courbe d'étalonnage, la lecture a été effectuée en utilisant un spectrophotomètre réglé sur une longueur d'onde $\lambda = 435$ nm.

3.8. Dosage d'ammonium (NH_4^+)

Les concentrations d'ammonium sont mesurées par une méthode de normalisation internationale (ISO 715/1-1998). Les ions NH_4^+ ont été dosés par colorimétrie suite à une catalyse en milieu alcalin par une solution de nitroprussiate de sodium.

3.9. Analyse des métaux lourds

Pour l'analyse des métaux lourds, 15 ml de HNO_3 (69%) a été ajouté à un flacon contenant 500 ml d'eau et évaporé à presque siccité sur une plaque chauffante. Ensuite, le contenu est digéré avec 15 mL de HNO_3 (69%) et 20 mL de $HClO_4$ (70%) selon (Brar et al., 2000).

Le résidu est repris dans 15 ml de HCl 6 N et porté au volume (50 ml) et le contenu est filtré. Le filtrat a été analysé pour les teneurs en Pb, Zn, Cu, Co, Cr, Cd, Fe, Mn et Ni au laboratoire

4. Analyses microbiologiques

La détermination du nombre le plus probable des germes (NPP) est une estimation statistique du nombre de ces germes dans un milieu liquide (Joy et al., 2003).

Les prélèvements des échantillons des EUT en vue d'une analyse microbiologiques se fait dans des flacons en verre stérilisés selon un mode de prélèvement précis afin d'éviter toute contamination accidentelle.

Les analyses bactériologiques des EUT ont été effectuées au niveau du laboratoire de l'Algérienne Des Eaux (ADE) pendant la période : Novembre-Avril 2015, ces analyses concernent les paramètres suivants : les coliformes totaux, les coliformes fécaux, les streptocoques et les salmonelles (Figrella et al., 2001).

On a utilisé des flacons en verre borosilicatés de 500 ml préalablement stérilisés à l'aide d'un autoclave à $120^\circ C$ pendant 20 mn. Les bouchons ont été lavés, rincés, séchés et emballés dans du papier kraft en aluminium et stérilisés à l'autoclave. Pour stabiliser les échantillons et ralentir toutes les réactions éventuelles, 5 gouttes d'une solution de tio-sulfate de sodium à 10% sont rajoutées pour éviter certaines transformations au cours du transport ou interférences au moment de l'analyse au laboratoire. Les échantillons sont ensuite transportés dans une glacière au laboratoire où ils ont été conservés au réfrigérateur entre $0^\circ C$ et $4^\circ C$ (Rodier, 2005).

PARTIE II : PRESENTATION DE L'EXPERIMENTATION ET ANALYSES PHYSICOCHEMIQUES DU SOL

1. Présentation de la station expérimentale

L'expérimentation a été réalisée dans une serre vitrée (**photo 2**) au cours des années (2015-2016) à la station expérimentale agronomique de l'Université de Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie), située au nord de l'Algérie, à 10 km de la ville de Chlef, dont la latitude est de 36°N, et la longitude est de 1°E. Cette région est connue pour son climat méditerranéen, semi-aride.



Photo 2 : Serre utilisée pour l'expérimentation

2. Technique de culture

2.1. Préparation du sol

Le sol utilisé est prélevé à partir d'une terre agricole (photo 03) il a subi :

- Un tamisage approprié afin de supprimer les différents débris et déchets.
- Un séchage à une température ambiante durant une semaine.
- Un passage dans un tamis de 2 mm de diamètre.

Les pots en plastiques utilisés ont un diamètre de 25 cm et une hauteur de 22 cm pour assurer la profondeur d'enracinement recommandée par la (FAO, 2003). Dans lesquels on a déposé une couche de gravier de 5 cm afin d'assurer le drainage, puis remplis avec un mélange composé de 1/3 de sable et 2/3 de terre précédemment préparé (**photo03**). Un arrosage avec l'eau est effectué 24 heures avant le semis afin d'obtenir une humidité homogène dans tous les pots (capacité au champ).



Photo 3 : Préparation du sol en pots

2.2. Germination et semis

Les graines de tomate de la variété « Agora » ont été mises à germer sous serre dans des alvéoles en plastiques (photo 04) remplies de tourbe, jusqu'à apparition des premières feuilles, Le semis a été suivi d'une couverture des plaquettes avec du film plastique, permettant ainsi d'emmagasiner l'humidité et augmenter le contact graine-substrat (Tikarrouchine, 2009).

2.3. Repiquage et irrigation

Au bout de 25 jours et après l'apparition des premières feuilles, les plantules ont été repiquées soigneusement et individuellement à raison de 5 plantules par pot puis déposés sous serre. (photo 04).



Photo 4 : Semis et repiquage

L'irrigation a été effectuée de façon régulière selon les besoins de la culture, on a augmenté la fréquence d'irrigation à partir du stade floraison jusqu'à maturité de fruits, vue l'intensité de la température et de l'évapotranspiration et plus spécialement l'activité physiologique de la plante dans cette période.

L'irrigation a été effectuée par utilisation de deux types d'eaux, les eaux usées traitées (EUT) et l'eau de puits (EP) servant comme témoin, les besoins en eau d'irrigation (**tableau 09**) ont été pris sur la base des besoins de la culture selon l'âge de la plante et les conditions climatiques.

Tableau 09 : Caractéristiques pratiques de l’arrosage et besoins en eau d’irrigation de la tomate

Période	6-10	11-20	21-30	31-45	46-70	71-110	111-140	Total
Durée en jours(j)	6	10	10	15	25	40	30	136
Vol d’eau/plant/j (l)	0.4	0.5	0.7	0.9	1.1	1.5	1.4	6.5
Volume d’eau/plant/période (l)	2.5	5	7	13.5	27.5	60	42	157.5

Source : (L. Zella et all, 2009)

2.4. Protocole expérimental

L’essai a été conduit selon un dispositif expérimental complètement aléatoire, comprend 25 blocs à 5 répétitions, et 5 traitements (différentes doses) qui sont regroupés dans le tableau 10

Tableau 10 : Description des traitements expérimentaux utilisés

T1	T2	T3	T4	T5
EP Témoin	100% EUT	75% EUT	50% EUT	25% EUT

3. Analyse physicochimique

Afin d’évaluer l’effet de l’irrigation par les EUT sur la structures et les propriétés physico-chimiques des sols, des échantillons du sol ont été prélevés du site avant de semer la culture et après la récolte (témoins et irriguées), sur une profondeur de 5cm de la surface du sol de chaque pot. Les échantillons ont été séchés à l’air libre, broyé et passé à travers un tamis de 2 mm, la taille des particules a été déterminée à l’aide de la méthode à hydrométrie (Gee et Bauder, 1986) pour faire les analyses physico-chimiques mentionnées ci-après.

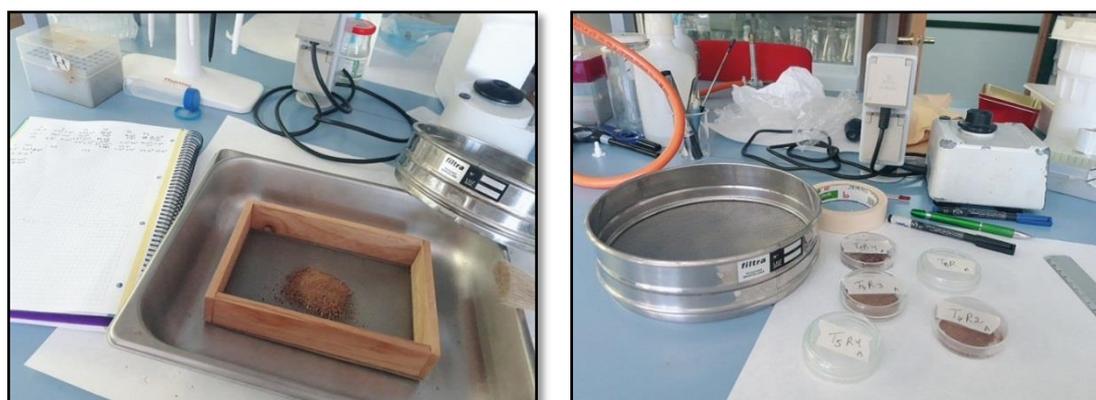


Photo 5: Tamisage du sol

3.1. Mesure du pH du sol

La réaction du sol, acide ou alcaline, est mesurée par son pH. Il est déterminé dans une suspension sol/ eau distillée suivant un rapport 1/2,5 ; après agitation de deux heures, et repos de 18 heures. La mesure est faite à l'aide d'un pH mètre digital (photo 6).

3.2. Mesure de la Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique est la mesure de la teneur en sel solubles d'une solution à l'aide d'un conductimètre. Elle est mesurée, après agitation dans le surnageant d'une suspension de sol/ eau distillée dans les proportions 1/5 en poids.

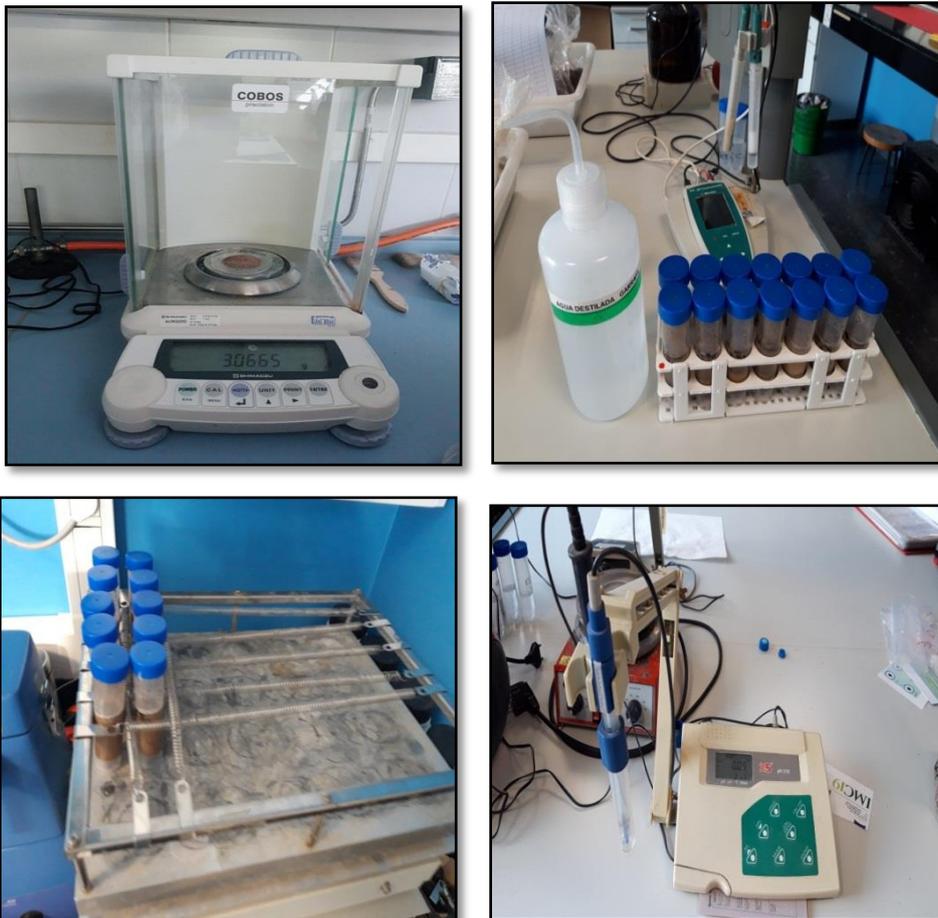


Photo 6: Mesure du pH et de la CE du sol

3.3. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique consiste à séparer la partie minérale du sol en fractions selon les dimensions des particules et à déterminer, en poids, les proportions relatives de ces fractions.

La détermination des différentes fractions granulométriques est faite, selon la méthode AFNOR (1994). Après destruction de la matière organique, par attaque à l'eau oxygénée, on procède à la dispersion des particules minérales par ajout d'un agent défloculant tel que

l'hexamétaphosphate. Néanmoins, elle diffère des autres méthodes internationales, dites à la pipette de Robinson, par le fait que 30g de sol sont d'abord attaqués à l'eau oxygénée puis 20g en sont prélevés (après séchage du sol) et traités à l'hexamétaphosphate, pour subir alors les prélèvements des argiles et des limons. Dans le cas de notre étude la décarbonation à l'acide chlorhydrique n'a pas été faite.

La fraction totale des sables est séparée par tamisage du contenu du flacon suivi par un séchage puis un tamisage pour ainsi obtenir les différentes fractions du sable total (gros et fins), tandis que les limons et les argiles sont séparés par sédimentation.

Le prélèvement des particules fines inférieures à $50\mu\text{m}$ (limons et argile), basé sur la loi de Stocks, a été faite à la pipette Robinson (dans des conditions bien déterminées de température et de temps).

Les trois fractions ainsi déterminées permettent, avec l'utilisation du triangle texturale Américain (FAO, 1968) de classer la texture du sol.

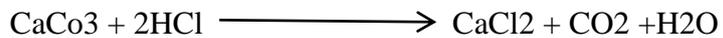




Photo 7 : Mesure de la granulométrie du sol

3.4. Calcaire total

Il a été déterminé, selon la méthode décrite par Duchaufour (1965), à l'aide du calcimètre de Bernard, par dosage du CO_2 provenant de la réaction du calcaire avec l'acide chlorhydrique ;



Le volume de CO_2 est proportionnel à la quantité de carbonates, et donc du calcaire présent. La quantité du carbonate est déduite de la courbe d'étalonnage effectuée avec une série de quantités connues de carbonate de calcium.



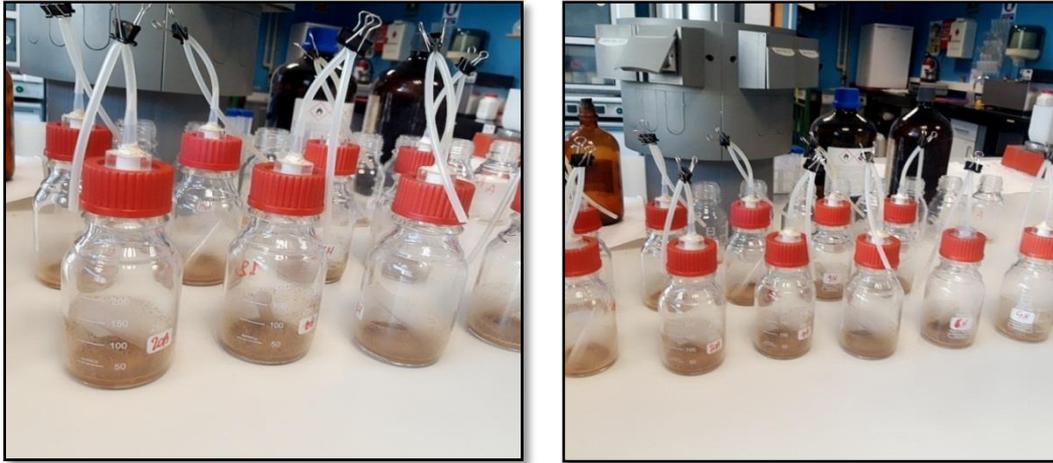


Photo 8: Mesure du calcaire du sol

3.5. Matière organique

Le dosage de la matière organique a été réalisé à partir du dosage de l'un de ses constituants : le carbone.

La méthode de dosage est celle de Walkley et Black, (1934) cité par (Nelson et Sommers, 1982). Elle est basée sur l'oxydation du carbone par le bichromate de potassium en milieu fortement acide (acide sulfurique). Cette oxydation s'accompagne d'une transformation du carbone (C) en gaz carbonique (CO_2) et le $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ est réduit en Cr^{3+} .

La quantité de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ utilisée excède la quantité nécessaire pour l'oxydation du C de la matière organique à doser. Cet excès de dichromate est déterminé par titration avec une solution de sulfate de fer (Fe_2SO_4) en présence de diphénylamine comme indicateur.

La quantité de matière oxydée est calculée à partir de celle du dichromate réduite.

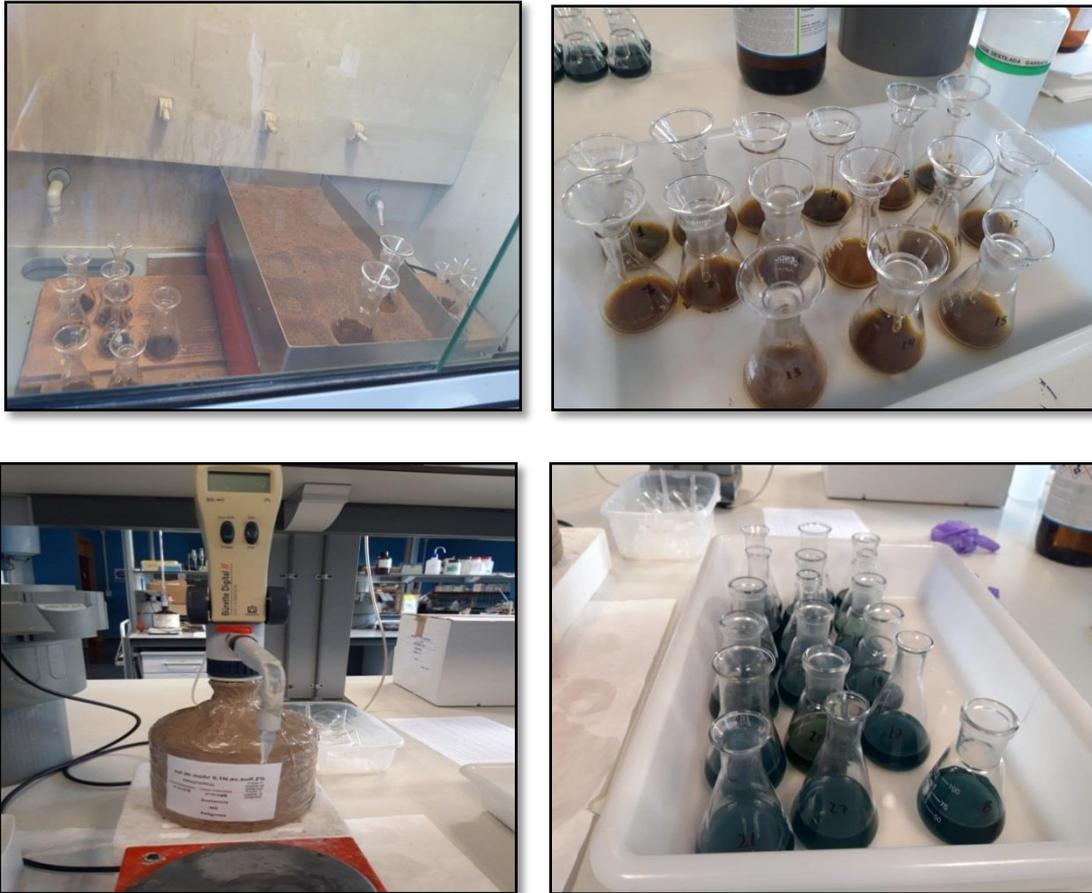


Photo 9 : Mesure du carbone organique du sol

3.6. Bases échangeables

Le filtrat du sol est analysé pour les cations majeurs (Ca, Mg) à l'aide du spectrophotomètre d'absorption atomique SAA et (Na et K) à l'aide du photomètre à flamme et les concentrations de Carbone et d'Azote du sol ont été déterminées à l'aide d'un analyseur élémentaire CN LECO Truspec au laboratoire (**photo 10**).

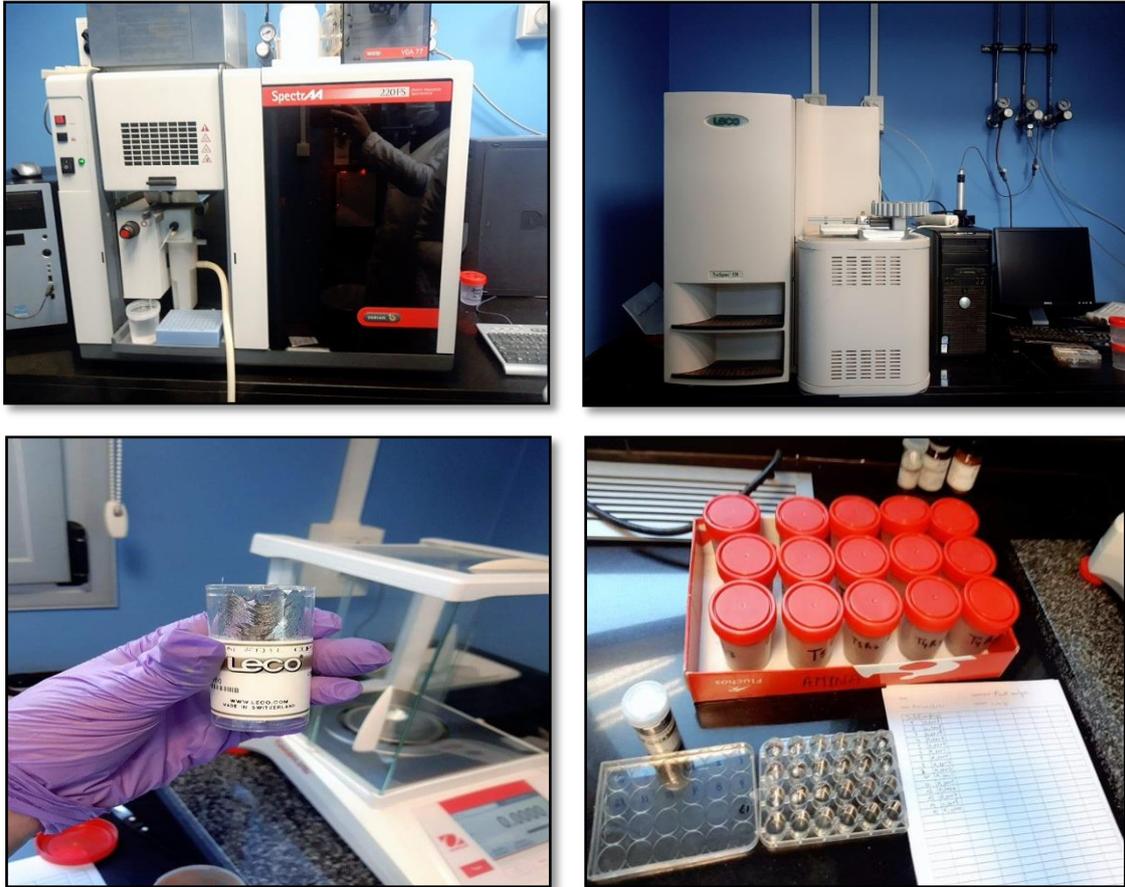


Photo 10 : Spectrophotomètre d'absorption atomique SAA et le CN LECO Truspec

4. Analyse des métaux lourds

Après digestion, la teneur totale en métaux lourds (Mn, Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Ni et Co) dans le sol a été déterminée à l'aide de la méthode Hossner (Hossner et al., 1996). Plus précisément, les échantillons de sol ont été digérés à l'aide de HF – H₂SO₄ – HClO₄. Les concentrations de métaux totaux ont été analysées à l'aide de l'ICP-OES au Centro de Instrumentación Científica de Granada (CIC).

PARTIE III : ANALYSE DE LA MORPHOLOGIE ET METAUX LOURDS DANS LES TOMATES IRRIGUEES PAR LES EUT

1. Généralités sur la culture de tomate

La tomate est originaire du Nord-ouest de l'Amérique du sud, précisément des régions andines couvertes par la Colombie, l'Equateur, le Pérou, la Bolivie, et le Nord de la Chili. C'est dans ces régions qu'on a retrouvé des plantes spontanées (sauvages) de diverses espèces notamment, la tomate cerise (*Solanum lycopersicum cerasiforme*) à partir de laquelle la tomate cultivée a probablement été domestiquée au Mexique (Harlan, 1987). Cependant, l'hypothèse d'une domestication parallèle au Pérou ne peut toutefois être définitivement écartée (Peralta et Spooner, 2002). La plante s'est ensuite répandue dans l'Europe à partir du XVI^{ème} siècle, d'abord en Espagne par les conquistadors espagnol puis, en Italie et en France vers le XVII^{ème} siècle. Ce n'est qu'au milieu du XIX^{ème} siècle et jusqu'au début du XX^{ème} siècle qu'on a vu sa culture se répandre un peu partout dans le monde (Pirat et Foury, 2003).

1.1. Botanique de la plante

1.1.1. Historique et taxonomie

La tomate (*Solanum lycopersicum* L.) est une plante herbacée annuelle, de la famille des Solanacées qui est cultivée pour ses fruits. Cette espèce tire son origine étymologique de l'Espagnol tomate. Mot emprunté au nahuatl (langue aztèque) zictomate ou tomait qui désignait le fruit qui ressemblait à l'actuelle tomate cerise du pays aztèque. La tomate cultivée avait été classée scientifiquement par Linné en 1753 dans le genre *Solanum* avec comme nom binomial *Solanum lycopersicum*. Philip Miller, en 1768 l'avait classée dans le genre *Lycopersicum* et la renomma *Lycopersicum esculentum* (Mill.), car considérant que la tomate différait substantiellement des autres espèces du genre *Solanum*, telle la pomme de terre et l'aubergine (Smith, 2001).

Toutefois, les techniques modernes de la biologie moléculaire ont permis d'établir des arbres phylogénétiques plus précis, montrant que la tomate devrait être rattachée au genre *Solanum* donnant ainsi raison à Linné (Anonyme 2, 2009). Le genre *Solanum* comprend 9 à 15 autres espèces de tomate, dont la seule espèce cultivée est *Solanum lycopersicum* (Anonyme 3, 2006). Toutes ces espèces sont diploïdes avec le même nombre de chromosome ($2n = 24$). Les espèces sauvages constituent une source de variabilité très importante pour l'amélioration et l'adaptation variétale (Philouse et Laterrot, 1992).

1.1.2. Classification botanique

Règne :	Végétal
Embranchement :	Spermaphytes
Sous-embranchement :	Angiospermes
Classe :	Dicotylédones
Ordre :	Solanales
Famille :	Solanacées
Genre :	Solanum
Espèce :	lycopersicum

1.2. Choix de la culture

Cette espèce a été choisie d'une part pour son importance culinaire et nutritionnelle compte tenu de sa forte teneur en phosphore, vitamines A et C (Toor RK., 2006 ; Ouansafi et all., 2019) et d'autre part pour ses besoins en eau élevés estimés à 6000 m³ par hectare avec le système d'irrigation goutte à goutte.

2. Paramètres morphologiques

La détermination des paramètres morphologiques de la tomate « *Solanum lycopersicum* » ont concernées tous les stades de développement de la plante (Stade 3, 5, 7 feuilles, stade floraison et stade fructification). (Photo 11)



Stade 3 feuilles



Stade 5 feuilles



Stade 7 feuilles



Stade floraison



Stade fructification

Photo 11 : Les stades végétatifs de la culture de tomate

2.1. Paramètres de croissance

a) Hauteur de la plante : la hauteur des plantes a été mesurée à l'aide d'une règle graduée du collet jusqu'au bourgeon terminal, la hauteur de la tige renseigne sur l'effet des différents traitements aux EUT sur l'accroissement comparativement au témoin EP.

b) Diamètre de la plante : le diamètre a été mesuré à une distance entre le sommet et le collet de la tige.

c) Le nombre de feuilles : l'estimation du nombre des feuilles est un bon indicateur des capacités assimilatrices de la plante et de sa production en biomasse (Fischesser et Dupuistate, 1996).

d) Surface foliaire : la surface foliaire (Leaf Area) en dm^2 a été mesurée par la méthode du poids du papier (Levine A et Asano T, 2004). Tout d'abord, la feuille détachée est placée sur un papier spécial et le contour de la feuille est dessiné au crayon sur ce papier (Ross J et Ross

V, 1995). Le papier est découpé selon le contour de la feuille puis la surface foliaire est calculée en pesant le papier et en utilisant la formule suivante:

$$LA = \frac{\text{Weight of paper of leaf shape}}{\text{Weight of unit area of paper}}$$

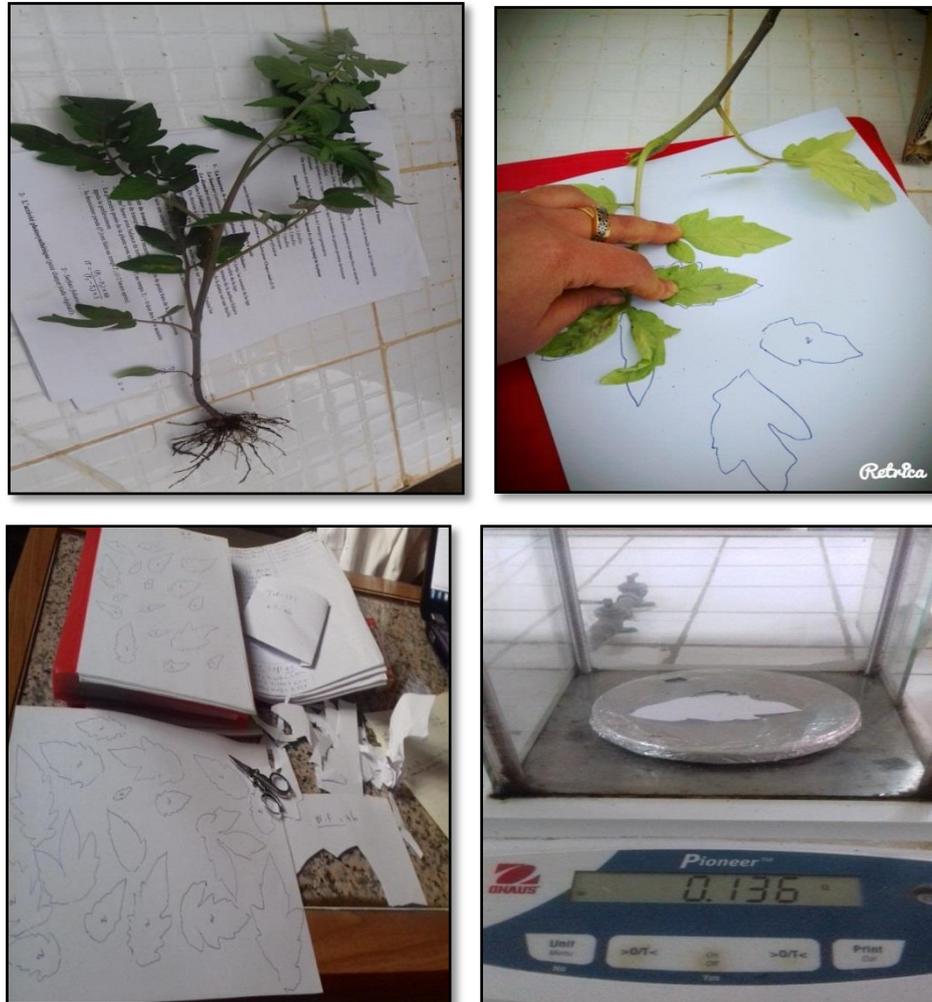


Photo 12 : Mesure de la surface foliaire des plants de tomate

2.2. Paramètres de production

a) **Le nombre de fruit par traitement** : l'étude du nombre de fruit par traitement a été déterminée par comptage à l'œil nu.

b) **Le rendement** : en fin d'expérimentation, le rendement en tomate a été déterminé par la pesée de la récolte obtenue pour chaque traitement.

3. Digestion et analyse chimique

Les fruits des tomates ont été récoltés à la main. Pour éliminer les polluants atmosphériques, tous les échantillons collectés ont été lavés avec de l'eau distillée, ensuite séchés dans un four à air chaud à 70-80°C pendant 24 h pour éliminer l'humidité. Les échantillons séchés ont été

réduits en poudre à l'aide d'un moulin à couteaux (photo13). La méthode de digestion humide a été utilisée pour la digestion des échantillons de tomates, suivie de l'ICP-OES. 0,5 g de l'échantillon a été correctement pesé et digéré avec 5 ml d'acide perchlorique (HClO_4) et 5 ml d'acide nitrique (HNO_3) pour chaque analyse.

Les échantillons ont été laissés refroidir et le contenu a été filtré à l'aide du papier filtre Whatman 42. Le filtrat a été porté à 25 ml avec de l'eau distillée. À l'exception de l'ajout des échantillons végétaux, la solution à blanc a été réalisée selon le même procédé. Le matériel végétal a ensuite été traité de la même manière que les échantillons de sol pour l'analyse des éléments minéraux et métaux lourds.

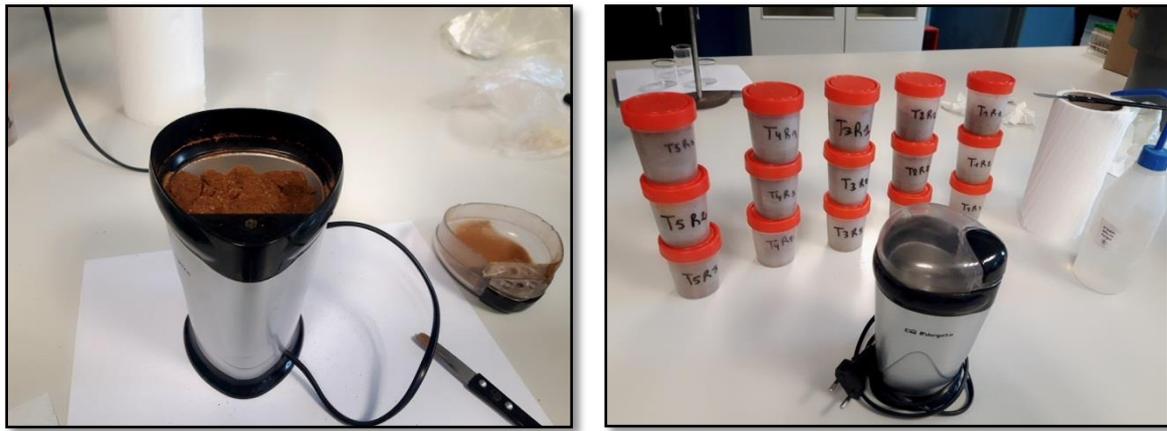


Photo 13 : Echantillon de tomates broyées

4. Analyse statistique des données

Un plan en blocs complètement aléatoire a été utilisé dans cette expérience. Le traitement statistique des données repose principalement sur les statistiques descriptives, l'analyse de la variance (ANOVA) en utilisant le test LSD au seuil de 5% pour la comparaison des moyennes, en plus de l'analyse multivariée (ACP).

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSIONS

PARTIE I : ANALYSE PHYSICO CHIMIQUES DES EAUX USEES TRAITEES**1. Caractérisation des effluents de la STEP de Chlef****1.1. Evaluation de la qualité physico-chimique des EUT de la STEP de Chlef**

La qualité d'une eau est fonction des diverses substances qu'elle contient, de leurs quantités et des effets qu'elles peuvent avoir sur l'écosystème et sur l'être humain.

Le suivi de la qualité des eaux usées traitées au niveau de la station d'épuration de Chlef se fait mensuellement depuis son fonctionnement.

L'examen de l'ensemble de ces résultats permet de distinguer les faits suivants :

1.1.1. Evolution de la température des EUT

Les statistiques descriptives montrent que la température des eaux usées traitées dans la station au cours de la période entre Octobre et Mai varie entre 15°C et 23.10°C, avec une moyenne de 17.49°C et un écart type de 2.3°C. Au cours de cette période les limites de confiance (95%) de la température oscillent entre 16.16 et 18.81°C, les plus faibles températures sont enregistrées entre le mi-novembre et le mi-mars (Figure 19).

Les températures moyennes des eaux usées traitées enregistrées au niveau de la station d'épuration de Chlef au cours de la période Octobre-Mai sont inférieures à 30°C, considérée comme une valeur limite des rejets directs dans le milieu récepteur et aussi une valeur limite indicative pour les eaux usées destinées à l'irrigation des cultures (JORA, 2006).

1.1.2. Evolution du pH

Les valeurs du pH au niveau de la station au cours de la période Octobre-Novembre, varient entre 7.13 et 7.59 avec une moyenne de 7.33 et un écart type relativement faible de 0.13, ce qui témoigne de la faible variation et donc l'homogénéité des pH, la valeur minimale de 7.13 est atteinte au mois de Novembre, au cours des mois suivants le pH connaît un accroissement régulier jusqu'au mois de Mars où il atteint sa valeur maximale de 7.59 (Figure 20). L'homogénéité du pH est confirmée par les limites de confiance (95%) oscillant entre 7.26 et 7.41.

Ces constatations montrent que le pH des eaux usées épurées prélevées au niveau de la station d'épuration est relativement neutre pendant toute la période d'irrigation. Ces valeurs sont conformes aux normes Algériennes de la qualité des eaux usées destinées à la réutilisation agricole (JORA, 2006) et elles se trouvent également dans l'intervalle [6,5-8,4] recommandées par la (FAO, 2003).

1.1.3. Evolution des matières en suspension (MES)

Le dosage des matières en suspension a montré une forte variabilité, avec un minimum de 5.6 et un maximum de 15.88 mg/l, en effet, le suivi de l'évolution temporelle a montré deux périodes bien distinctes : une période hivernale où la teneur moyenne en MES est de l'ordre de 13.22 mg/l et une période printanière où la teneur moyenne est de l'ordre de 6.28 mg/l.

La grande variabilité des teneurs est confirmée par un écart type élevé de l'ordre de 3.6 mg/l, aussi l'intervalle de confiance (95%) est relativement large allant entre une limite inférieure de 9 mg/l et une limite supérieure de 13.33 mg/l.

Les teneurs en matières en suspension enregistrées dans la station (Figure 21) sont en accord avec les normes de la FAO fixées à un maximum de 30 mg/l. Selon les normes algériennes (JORA, 2006), ces eaux peuvent être utilisées en irrigation et ne présentent pas de risque de colmatage du sol.

1.1.4. Evolution de la conductivité électrique

La conductivité électrique enregistrée des EUT au niveau de la station d'épuration de Chlef ont montré une moyenne de 1413.57 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Comme pour la MES, le suivi de l'évolution temporelle de la conductivité électrique montre deux périodes distinctes (Figure 22), une période hivernale avec une CE moyenne de 1502.22 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et une période printanière avec une CE moyenne significativement inférieure de l'ordre de 1245 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ce fort écart entre les deux périodes est bien illustré avec un fort écart type de 343.39 $\mu\text{S}/\text{cm}$, et un large intervalle de confiance (95%) oscillant entre 1215.3 et 1611.84 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

L'étude de la corrélation MES-CE, a montré que 17% de la variation de la CE est expliquée par les variations de la MES.

Ces résultats mettent en évidence une forte minéralisation due principalement à la charge organique (Chafai, 1996). Cependant, les valeurs observées sont situées dans la plage des valeurs admissibles recommandées par la FAO (2003) et Ayers et Westcot (1994) qui sont de l'ordre de 0-3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, et la norme algérienne pour les eaux d'irrigation qui exige une conductivité électrique inférieure à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Selon les classes d'aptitude de l'eau destinée à l'irrigation modifiées par United States Salinity Laboratory (USSLS, 1954), les valeurs qui dépassent 2250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ indiquent une eau de très forte salinité convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels et sur un sol perméable bien drainé, l'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.

1.1.5. Evolution de la demande biologique en oxygène (DBO₅)

La DBO₅ est un paramètre intéressant pour l'appréciation de la qualité des eaux, ce paramètre est utilisé pour dimensionner les ouvrages d'épuration (Xanthoulis, 1993).

Les résultats ont montrés une DBO₅ très variable d'un mois à l'autre avec une moyenne de 14.69 mg O₂/l, et un écart type légèrement élevé de 5.97 mg O₂/l témoignant d'une grande variabilité, en effet une forte amplitude (différence entre minimum et maximum) de l'ordre de 19.4 mg O₂/l a été observée.

Les valeurs enregistrées indiquent que le traitement biologique effectué sur l'eau usée est acceptable selon la norme de la FAO qui exige une DBO₅ inférieure à 25 mg O₂/l.

1.1.6. Evolution de la demande chimique en oxygène (DCO)

La DCO est un indicateur de la teneur en matière organique et en sels minéraux oxydables (Bontoux, 1993). Les résultats montrent que les concentrations de la DCO des eaux usées traitées oscillent entre 10 mg O₂/l et 62 mg O₂/l, avec une valeur moyenne de 37.13 mg O₂/l. les valeurs enregistrées au cours de la période Octobre-Mai sont inférieures aux normes fixées par la FAO pour les eaux destinées à l'irrigation et restent largement inférieurs à la norme fixée à 125 mg O₂/l considérée comme valeur limite de rejet direct pour les stations d'épuration.

Par ailleurs, le rapport moyen DCO/DBO₅ est de l'ordre de 3.20 ce qui signifie selon (Cardot, 1999), que l'effluent possède une mauvaise biodégradabilité, cette valeur correspond à une valeur moyenne de matière oxydable estimée à 21,95 mg/l.

Les eaux usées traitées par la STEP de Chlef sont donc difficilement dégradables, ces résultats sont en accord avec ceux mentionnées par Servais et *al*, (1999) et Bedouh, (2014).

1.1.7. Les matières oxydables

Les matières oxydables constituent l'essentiel de la partie biodégradable de la partie organique rejetée. Pour les éliminer, les bactéries présentes dans le milieu utilisent l'oxygène dissous dans l'eau. Des déversements importants de matière organique peuvent entraîner des déficits notables en oxygène dissous.

L'analyse des eaux usées traitées dans la station d'épuration de Chlef, montre des niveaux variables en matières oxydables d'un mois à l'autre (Figure 25), avec une valeur moyenne de 21.95 mg/l. la variabilité des matières oxydables dans ces eaux est reflété par un grand écart type (4.30 mg/l) et un large intervalle de confiance (95%) allant de 19.46 à 24.43 mg/l.

1.1.8. Evolution de l'ammonium

L'azote joue un rôle primordial dans le métabolisme des plantes (Skiredje, 2005), ainsi l'évaluation de la qualité d'une eau est en rapport avec l'évaluation quantitative de sa charge en matière azotée. Les résultats montrent que la majorité des valeurs mensuelles enregistrées sont inférieures à 2.5 mg/l à l'exception du début de décembre où la valeur enregistrée dépasse largement la norme fixée par la FAO (2003) ($\text{NH}_4 > 3 \text{ mg/l}$) (Figure 26).

Selon la norme exigée par Ayers et Westcot (1985), les teneurs en ammoniacque enregistrées dans la station d'épuration de Chlef appartiennent à la gamme habituelle d'une eau destinée à l'irrigation (0-5 mg/l).

1.1.9. Evolution des nitrites

Les nitrites représentent la forme la moins oxygénée et la moins stable des composés azotés. Leur présence est due, soit à l'oxydation bactérienne de l'ammoniacque, soit à la réduction des nitrates (Rejsek, 2002). Ils sont facilement oxydés en nitrates, leur présence dans l'eau est rare ou en faible quantité (Bengoumi *al.*, 2004).

Les concentrations en nitrites dans les eaux usées traitées dans la station de Chlef sont conformes à la norme des eaux recommandée pour l'irrigation avec une moyenne de 1.56 mg/l, valeur largement inférieure à la norme 3 mg/l, cependant l'analyse mensuelle a montré que deux valeurs enregistrées au début des mois de Mars et Avril sont très proches de la norme, mais généralement nos résultats permettent de déduire que les EUT de la STEP Chlef ne représentent pas un risque de pollution des sols par les nitrites.

1.1.10. Evolution des nitrates

Les nitrates constituent le stade final de l'oxydation de l'azote organique dans l'eau. Les teneurs en nitrates dans les EUT (Figure (28)), varient de 1.4 mg/l à 12.8 mg/l, avec une moyenne de 5.64 mg/l et un écart type légèrement élevé de 3.3 mg/l, ce qui témoigne d'une forte variabilité, en effet il a été remarqué que les valeurs enregistrées au début du mois de Décembre et au mi-février étaient largement supérieures au reste des mois. Les faibles teneurs en NO_3^- sont dues à la réduction des nitrates en nitrites par les anaérobies sulfite-réducteurs. Elles peuvent également être liées à l'oxydation bactérienne de l'ammoniac (Bengoumi et *al.*, 2004). Les valeurs trouvées restent inférieures à celles rapportées par des études similaires des eaux usées traitées dans certaines régions comme les résultats mentionnés par Hassoune 2006 au Maroc.

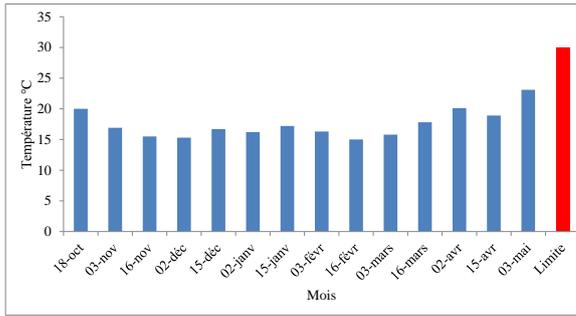


Figure 19: Variations de la température

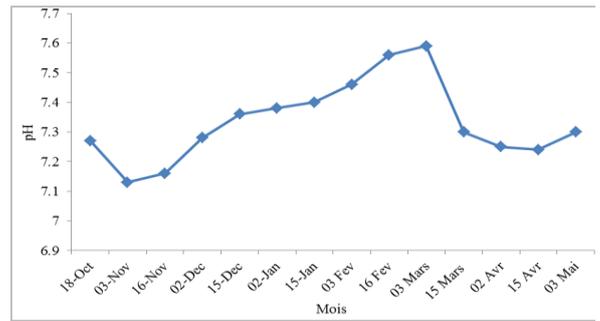


Figure 20: Évolution du pH des EUT

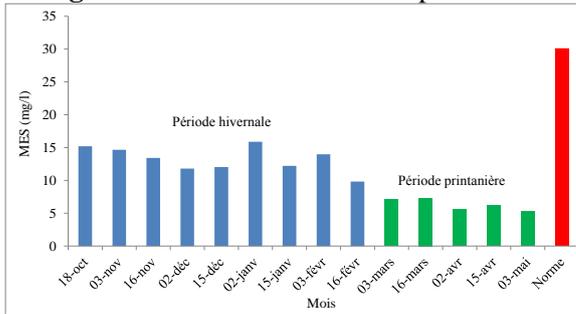


Figure 21: Évolution des MES

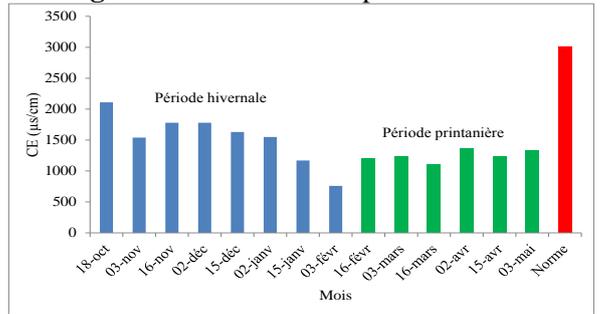


Figure 22: Variation temporelle de la CE.

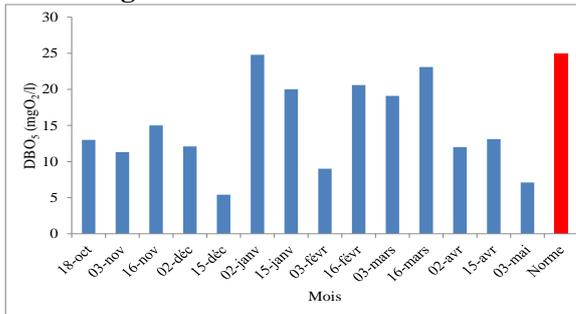


Figure 23: Variations du DBO5 des EUT.

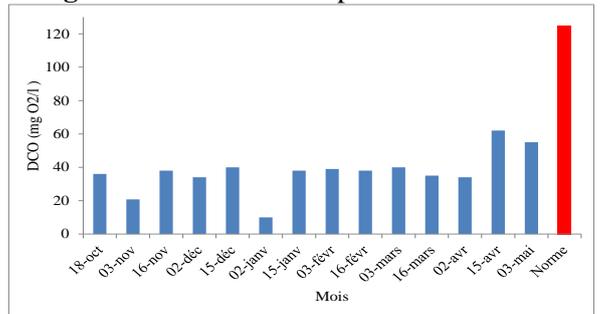


Figure 24: Variations de la DCO des EUT.

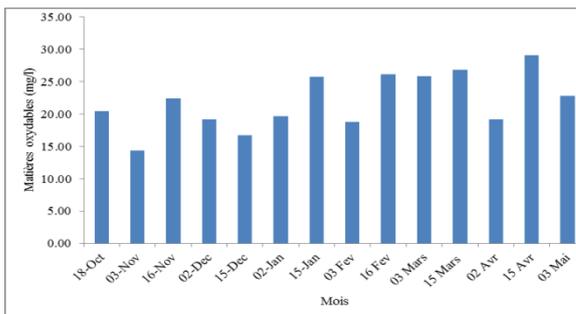


Figure 25: Variations des MO des EUT.

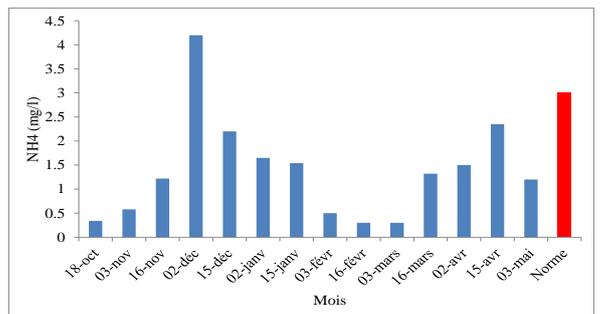


Figure 26: Variations du NH4 des EUT

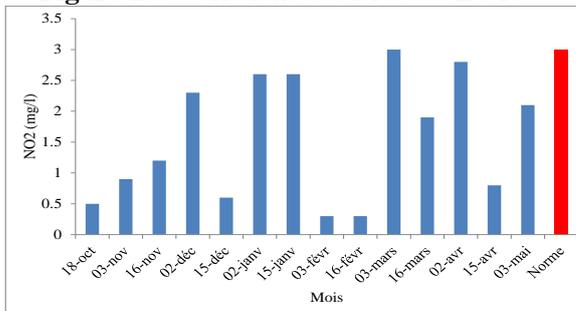


Figure 27: Évolution du NO2 dans les EUT.

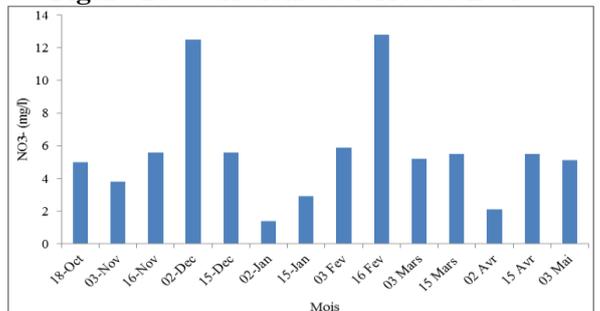


Figure 28: Évolution du NO3- dans les EUT.

1.2. Analyse des Eléments Traces Métalliques dans les EUT de la STEP de Chlef

A l'entrée des stations d'épuration, une large partie des métaux contenue dans les eaux usées se trouve complexée avec la matière organique dissoute (Kunz, et al., 2000) (Giokas, et al., 2002). Les métaux qui peuvent être présents dans les eaux résiduaires tell que le cadmium (Cd), la cuivre (Cu), le molybdène (Mo), le nickel (Ni) et le zinc (Zn), peuvent constituer un risque sanitaire significatif pour les humains et les animaux et peuvent également affecter, à long terme, les cultures irriguées par suite d'accumulation dans le sol (FAO, 2003).

La concentration en métaux lourds dans les EUT de la station d'épuration de Chlef est dans l'ordre suivant : $Cd < Cu < Ni < Mn < Cr < Pb < Co < Zn$, avec des concentrations moyennes (mg/l) de l'ordre de 0.015 pour le Mn, 0.047 pour le Zn, 0.012 pour le Cu, 0.018 pour le Cr, 0.001 pour le Cd, 0.032 pour le Pb, 0.041 pour le Co et 0.015 mg/l pour le Ni. (Tableau 13).

Dans les eaux usées traitées dans la station de Chlef, aucune concentration significativement grande d'un micropolluant toxique (métaux lourds) n'a été trouvée, ce qui suggère l'absence de rejets d'eaux usées industrielles (Elmeddahi et al., 2015).

Le Pb, le Cd et le Cr sont des métaux lourds très toxiques pour l'homme, en effet, la toxicité du plomb est connue depuis longtemps (saturnisme). Ces dernières années, un nombre croissant d'études ont mis en évidence le risque d'ingestion de plomb, même à très faible dose, notamment pour les enfants (Patterson., 1980 ; Chichoune et al., 2020). Aussi le cadmium fait l'objet d'une attention particulière en raison de sa persistance prolongée et de sa forte toxicité pour de nombreux organismes vivants, même à de très faibles concentrations, (Bouziani., 2000 ; Amaraoui et al., 2017). En comparaison avec les normes standards de l'eau d'irrigation (FAO.1992) et les normes algériennes (ONA., 2014), il a été constaté que les concentrations moyennes de Mn, Zn, Cu, Cr, Cd, Pb, Co et Ni étaient dans les limites de sécurité, mais avec l'irrigation continue avec les eaux usées, ces éléments métalliques pourraient s'accumuler dans le sol (Mohammed A et al., 2015).

D'une manière générale, selon les normes de Emongor et al., (2005), les eaux usées traitées dans la station de Chlef, sont de bonne qualité et conviennent à l'irrigation sans restriction des cultures en raison de leur faible concentration en métaux lourds.

Tableau 13: Concentration des métaux lourds dans les eaux usées traitées (mg/l)

Métaux lourds	Mn	Zn	Cu	Cr	Cd	Pb	Co	Ni
EUT	0.015	0.047	0.012	0.018	0.001	0.032	0.041	0.015
Norme FAO (1985, 1992)	0.2	2	0.1	0.1	0.01	2	0.05	5
Normes Algériennes	0.2	2	0.2	0.1	0.01	5	0.05	0.2

1.3. Caractérisation microbiologique des EUT de la STEP de Chlef

Le traitement d'épuration tertiaire (désinfection) permet d'éliminer la majeure partie de germes pathogènes, cependant ce type de traitement n'est pas pratiqué dans la STEP de Chlef.

Les coliformes totaux sont utilisés comme indicateurs de la qualité microbienne de l'eau, ils peuvent être indirectement associés à une pollution d'origine fécale (Archibald, 2000). La valeur enregistrée des coliformes totaux est de 223 UFC/100 ml (Tableau 14), cette valeur est significativement faible par rapport à la valeur limite proposée pour l'irrigation sans restriction même pour les cultures susceptibles d'être consommées sans cuisson, en effet selon les normes Algériennes et celle de l'OMS, les coliformes totaux doivent être < 1000 UFC/100 ml (JORA, 2012 ; OMS, 1989).

Selon Edberg et *al.*, (2000), la présence de coliformes totaux dans l'eau traitée ou leur dépassement par rapport aux normes réglementaires n'implique pas nécessairement un risque pour la santé publique, du fait que, la plupart des espèces de ce groupe se trouvent naturellement dans le sol ou dans la végétation.

Concernant les coliformes fécaux, leur présence témoigne habituellement d'une contamination d'origine fécale ou provenant d'eaux enrichies en matière organique (Barthe et *al.*, 1998). L'analyse bactériologique, a montré que les effluents de la STEP ne contiennent pas de coliformes fécaux (absence).

Les streptocoques sont susceptibles de contaminer les eaux d'approvisionnement, ils sont typiques des déjections animales, comme ils peuvent parfois être présents chez l'homme ou dans les végétaux (Bitton, 1999).

Les résultats de la recherche et du dénombrement des streptocoques dans les EUT ont montré une concentration de 160 UFC/100 ml, cette valeur demeure faible par rapport à celles obtenues par Ait Hamou, (2000) et Beddouh, (2014).

La recherche des Salmonelles a une importance particulière, leurs présences dans l'environnement hydrique est signe d'une contamination fécale. Les résultats obtenus montrent l'absence totale des Salmonelles, cette absence peut être due au traitement secondaire biologique et la chloration effectuée au niveau de la STEP.

En fonction des résultats obtenus, les eaux traitées peuvent être utilisées en irrigation sur des sols bien drainés, pour l'irrigation des parcs et des pelouses et peuvent également être utilisées pour l'irrigation des arbres fruitiers et d'autres cultures du moment que ces eaux respectent la norme de l'OMS et la norme algérienne établies pour l'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation (JORA, 2012 ; OMS, 1989).

Tableau 14 : Caractérisation microbiologique des EUE à la sortie de la STEP de Chlef

Paramètre	Résultat	Unité	Norme OMS
les coliformes totaux	223	UFC/100 ml	<1000/100 ml
les coliformes fécaux	abs	UFC/100 ml	<1000/100 ml
Les streptocoques	160	UFC/100 ml	
Les salmonelles	abs	UFC/5 ml	Absence / 5 ml

Norme OMS : Directives de (OMS, 1989) concernant l'irrigation des cultures destinées à la consommation à l'état cru.

**PARTIE II : PRESENTATION DE L'EXPERIMENTATION ET ANALYSES
PHYSICOCHEMISTIQUES DU SOL**

1. Impact de l'irrigation par les EUT sur les propriétés physicochimiques des sols

L'impact de l'irrigation est étudié sur le sol de la station expérimentale de l'université. Dans ce contexte, 4 doses d'irrigation par les EUT (T2, T3, T4 et T5) ont été utilisées et un sol irrigué par l'eau de puits a été pris comme témoin (T1).

L'étude de l'impact de l'irrigation par les EUT sur la qualité physicochimique du sol focalise surtout sur les paramètres pédologiques influençant la salinité et la fertilité des sols.

L'analyse granulométrique décrit les proportions relatives des diverses tailles des particules solides du sol (argiles limons et sables).

L'analyse du sol avant l'expérimentation a montré la dominance des limons et de l'argile, en effet, selon le triangle texturale USDA, les sols de la station présentent une texture argilo-limoneuse très carbonaté et modérément pourvu en carbone organique.

Les résultats ont montré que l'irrigation par les EUT n'a pas entraîné un changement notable de la composition granulométrique. La même classification texturale (argilo-limoneuse) a été observée après l'application des différents traitements (T2, T3, T4 et T5) avec une teneur moyenne en argile supérieure à 35. Les résultats de l'analyse granulométrique sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 15: Granulométrie des sols utilisés

Traitements	Limon (%)	Argile (%)	Sable(%)
T0 (Avant irrigation)	43.85 ± 12.51	37.67 ± 11.85	18.33 ± 1.53
T1 (Témoin)	37.85 ± 10.34	42.00 ± 8.18	19.67 ± 2.30
T2	28.69 ± 1.63	49.33 ± 1.53	21.67 ± 3.21
T3	34.63 ± 2.35	47.37 ± 1.96	18 ± 1.17
T4	35.71 ± 4.32	44.67 ± 3.52	19.33 ± 1.53
T5	34.57 ± 1.13	46.00 ± 1.73	19.67 ± 1.53

1.1. Incidence des eaux usées traitées sur les caractéristiques du sol

Les propriétés physiques et chimiques du sol ont été déterminées avant et après l'expérience.

1.1.1. PH des sols

L'irrigation avec différentes doses des eaux usées traitées a montré une augmentation significative ($P < 0.05$) selon le test de Fisher, en effet l'ANOVA a montré deux groupes de pH distincts (Tableau 16). Le pH des sols avant expérimentation (T0) ($\text{pH} = 7.26$) été inférieur à celui des sols à la fin de l'expérimentation, la valeur moyenne des différents traitements été de 7.56, la plus forte valeur du pH a été observée au niveau du traitement T1 (7.66).

Au fur et à mesure que le pH augmente, la capacité d'échange cationique du sol est généralement plus grande en raison de l'augmentation du nombre de sites chargés dépendant du pH. Certains minéraux argileux, oxydes métalliques et matières organiques ont des sites d'échange d'anions chargés positivement dans des conditions de sol acide (Carter MR., 1993; Vinod Kumar et al., 2011). Il est important de mentionner que le pH du sol est associé à la solubilité et à la mobilité des oligo-éléments (McBird et al., 2004) et/ou est dû à la forte teneur en bicarbonate des eaux usées (Ayers et Wescot, 1989) et il est important car il affecte la disponibilité et l'absorption des micronutriments, y compris l'accumulation de métaux lourds par les plantes (Kirkham., 2006; Dikinya et al., 2010; Nedelescu et al., 2017, Awoke Guadie et al., 2020).

Cependant, les résultats suggèrent que les valeurs de pH ont restés neutres et que le pH du sol n'a pas été très affecté par l'irrigation avec les EUT, ce qui permet de conclure que l'utilisation des eaux usées traité par la station de Chlef n'a pas eu une action majeure sur le pH du sol.

1.1.2. La conductivité électrique (CE) des sols

Les résultats montre une différence remarquable des 4 traitements par les EUT par rapport au témoin, en effet l'ANOVA a montré deux groupes distincts avec une différence significative ($P < 0.05$) selon le test de Fisher (tableau 16), par comparaison à la CE du sol avant irrigation qui a enregistré une CE de 544 $\mu\text{s}/\text{cm}$, la moyenne de la CE des différents traitements a atteint la valeur de 824.33 $\mu\text{s}/\text{cm}$, la plus faible valeur a été montré par le témoin (T1) eau de puits, alors que l'ensemble des 4 traitements ont montré une CE supérieure à 799 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

Les résultats ont été rapportés par Li et al., (2012); Awoke Guadie et al., (2020), qui ont noté une augmentation de la CE après irrigation avec les EUT, selon les même auteurs l'élévation de la CE améliore la solubilité des métaux lourds dans le sol, ce qui permet d'augmenter la biodisponibilité des métaux lourds du sol vers la plante.

Malgré l'augmentation de la CE dans les 4 traitements, elle est restée toujours inférieure à la valeur seuil indicative (4,00 dS m⁻¹), au-delà de laquelle un sol est décrit comme salin (Qadir et al. 2000).

Cette légère augmentation est attribuée au fait que l'irrigation avec des eaux usées traitées augmente l'accumulation de minéraux comme suggéré par McGrath et al. (1994) et particulièrement en raison de l'augmentation de la concentration de Na comme indiqué par Menneer et al. (2001). Aussi selon Mohammad et Mazahreh (2003) l'augmentation de la conductivité du sol irrigué avec l'eau usée traitée comparée à celle des sols irrigués avec l'eau de puits est attribuée aux matières dissoutes dans l'eau usée.

1.1.3. Les carbonates de calcium (CaCO₃)

Concernant le CaCO₃, à l'inverse de la conductivité électrique, les résultats ont montré une diminution significative selon le test de Fisher, en effet, l'ANOVA (Tableau 16) a montré deux groupes distincts, ainsi la moyenne avant traitement était de 29.8% alors que la moyenne après utilisation des 4 traitements avec l'eau usée traité était de 24.23%, on note cependant que la plus forte diminution du CaCO₃ a été observée après irrigation avec l'eau de puits.

Tableau 16 : Caractérisation physico-chimique des sols

Paramètre	T0	T1	T2	T3	T4	T5
PH	7.26 ^b ± 0.1	7.66 ^a ± 0.17	7.58 ^{ab} ± 0.2	7.56 ^{ab} ± 0.2	7.47 ^{ab} ± 0.3	7.5 ^{ab} ± 0.15
CE (µS/cm)	544.7 ^b ± 10.4	672.0 ^{ab} ± 59	856.3 ^a ± 236.3	799.3 ^{ab} ± 68.3	932 ^a ± 203.5	862 ^a ± 88.5
CaCO ₃ (%)	29.8 ^a ± 0.01	21.63 ^b ± 5.0	24.00 ^{ab} ± 3.8	25.16 ^{ab} ± 4	24.67 ^{ab} ± 4.5	23.1 ^{ab} ± 5.8

Note : T0 = Non irrigué, T1 = Témoin (Eau de puits), T2 = 100% EUT, T3 = 75% EUT, T4 = 50% EUT, T5 = 25% EUT et les lettres a, b, c et d, représentent les groupes identifiés selon le test de Fisher

1.1.4. Le Carbone Organique des sols CO (%)

La teneur en carbone organique était généralement assez faible dans le sol avant irrigation (T0). Selon l'analyse de variance, les sols ont connu une augmentation significative (P < 0.05) du taux de CO après irrigation, l'augmentation du taux de CO était plus apparente dans les sols irrigués à l'eau usée traitée (T2, T3 et T4) par comparaison au sol témoin (T1) et particulièrement les sols soumis au traitement T2 (100% de la quantité d'eau nécessaire) (Tableau 17) où le sol est devenu plus riche en carbone organique et par conséquent en matière organique, qui est une source importante de nutriments pour les plantes, comme il augmente également la capacité de rétention d'eau et la capacité d'échange d'ions du sol, ainsi que la fertilité du sol car il régule l'alimentation en eau et en air du sol.

Concernant, les quatre traitements à l'EUT, il a été constaté que les teneurs en CO diminuent avec la diminution de la dose d'irrigation, dans ce contexte, le traitement T2 était significativement au traitement T5 (25% de la quantité nécessaire).

Cette augmentation du CO peut être expliquée selon Rusan et al., (2007) par la richesse des eaux d'irrigation en minéraux et en composés organiques.

Comparablement a nos résultats, Hillel, (1998), Sparks, (2003) et Mancino et Pepper, (1992) stipulent que les sols soumis à l'irrigation avec les eaux usées traitées ou brutes se distinguent par une augmentation du taux de MO, ce qui affecte l'agrégation du sol, réserve en minéraux et leur disponibilité ainsi que leur activité biologique, a l'inverse de Vazquez-Montiel et al. (1996) qui mentionnent que les apports d'eau usée traitée n'ont pas d'effet positif sur le taux de matière organique du sol.

1.1.5. L'azote (N)

L'azote est l'un des éléments majeurs du sol avec le phosphore (P) et le potassium (K). La carence de ces éléments, affecte négativement la croissance des plantes et les concentrations excédant les limites supérieures aux besoins des plantes peuvent produire des effets négatifs sur la qualité du sol et sur l'environnement.

Les résultats de l'ANOVA (Tableau 17) ont montré que les concentrations de l'azote, étaient significativement supérieures à celle enregistré dans le sol avant irrigation, la plus forte valeur 0.24% a été enregistré lors de l'irrigation par les EUT avec 100% de la quantité d'eau nécessaire, ce qui représente une évolution de 207.69% par rapport à celle du sol avant irrigation. Ceci suggère que les eaux d'irrigations utilisées contiennent de l'azote en excès.

A l'inverse de l'azote, les résultats du rapport C/N (Tableau 17) ont montré une décroissance significative des concentrations. Les concentrations des sols avant irrigation étaient largement supérieures à celles enregistrées après irrigation que ce soit pour l'eau de puits ou les eaux usées traités.

Tableau 17: Matières organiques dans les sols

Paramètre	CO %	N%	C%	C/N
T0 (non irrigué)	2.57 ^b ± 1.28	0.078 ^b ± 0.03	4.42 ^b ± 0.07	64.25 ^a ± 27.25
T1 (Témoin)	3.90 ^{ab} ± 2.07	0.21 ^a ± 0.05	6.74 ^a ± 0.96	32.29 ^b ± 3.07
T2	5.50 ^a ± 0.76	0.24 ^a ± 0.11	7.06 ^a ± 2.07	31.77 ^b ± 7.05
T3	4.10 ^{ab} ± 1.04	0.15 ^{ab} ± 0.05	6.07 ^{ab} ± 0.45	43.15 ^{ab} ± 17.92
T4	5.37 ^a ± 1.52	0.17 ^{ab} ± 0.03	6.03 ^{ab} ± 0.58	35.67 ^b ± 5.16
T5	3.97 ^{ab} ± 0.11	0.15 ^{ab} ± 0.04	6.06 ^{ab} ± 0.51	42.93 ^{ab} ± 13.74

1.1.6. Complexe absorbant

L'irrigation par les EUT sur le complexe absorbant du sol, a montré des résultats variables en fonction des bases échangeables du sol.

Les résultats (Tableau 18) montrent que la concentration en calcium échangeable n'a pas été affectée par l'irrigation aux EUT, en effet une stabilité des concentration de Ca^{2+} dans le sol a été observée avant et après l'expérimentation, la moyenne avant irrigation (3.81 mg/l) était très comparable à celle après irrigation par les EUT (3.89 mg/l), l'évolution entre les moyennes avant et après ne dépasse pas les 2%, dans ce contexte, l'analyse de variance n'a pas montré de différences significatives ($P > 0.05$) malgré que la concentration du traitement T3 (4.81) avec les EUT était légèrement supérieure au reste des traitement.

Les mêmes constatations faites pour le Ca^{2+} , sont valables pour les concentrations en magnésium Mg^{2+} , ainsi, l'ANOVA n'a pas montré de différences significatives ($P > 0.05$) malgré que la concentration moyenne après irrigation avec les EUT était légèrement supérieure (0.31 mg/l) à celle avant irrigation (0.26 mg/l).

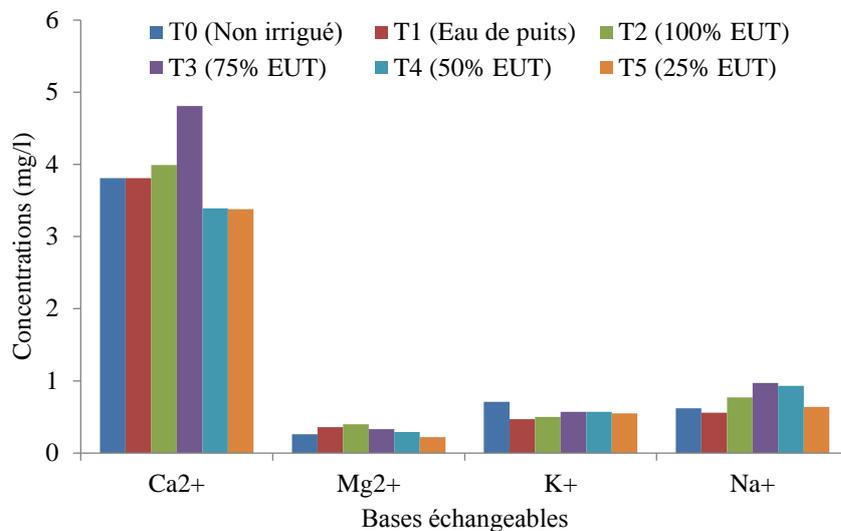
A l'inverse du Ca^{2+} et du Mg^{2+} , les concentrations du potassium K^+ , après irrigation avec l'eau usée traité étaient significativement inférieurs à celles avant irrigation. L'ANOVA a montré l'existence de 2 groupes distincts, avec des moyennes significativement différentes ($P < 0.05$) selon le test de Fisher (Tableau 18). La plus faible valeur de K^+ a été enregistré dans le cas d'irrigation par l'eau de puits (T1), alors que celles des EUT étaient légèrement supérieurs au T1, ce qui signifie un apport de K^+ par les EUT.

Mais globalement, à l'inverse des résultats de Scott (2000), Lucho et al. (2004) et Singh et al. (2004) qui ont déclaré une augmentation de la concentration de K^+ après application des eaux usées traitées, nos résultats ont montré une diminution des concentrations de K^+ par comparaison à la concentration avant irrigation (T0), cette diminution pourrait être le résultat du prélèvement du potassium par la culture.

Finalement, la concentration de Na^+ dans le sol n'a pas tellement évolué après irrigation par les EUT, malgré une légère différence positive non significative ($P > 0.05$) selon l'ANOVA des EUT par rapport à T0 (avant irrigation). Ce léger enrichissement du sol par Na^+ témoigne d'un apport de sodium par les EUT, ce qui signifie que l'irrigation à long terme par les EUT peut favoriser l'accumulation du sodium dans le sol, ce qui représente un facteur de risque pouvant conduire à la dégradation des sols.

Tableau 18 : Bases échangeables (mg/l)

Paramètre	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
T0 (non irrigué)	3.81 ^a	0.26 ^a	0.71 ^a	0.62 ^a
T1 (Témoin)	3.81 ^a	0.36 ^a	0.47 ^b	0.56 ^a
T2	3.99 ^a	0.40 ^a	0.50 ^b	0.77 ^a
T3	4.81 ^a	0.33 ^a	0.57 ^b	0.97 ^a
T4	3.39 ^a	0.29 ^a	0.57 ^b	0.93 ^a
T5	3.38 ^a	0.22 ^a	0.55 ^b	0.64 ^a

**Figure 29:** Bases échangeables

(T0 : Sol non irrigué ; T1 : Sol irrigué avec l'eau de puits : témoin ; T2 : Sol irrigué avec 100% d'EUT ; T3 : Sol irrigué avec 75% d'EUT ; T4 : Sol irrigué avec 50% d'EUT et T5 : Sol irrigué avec 25% d'EUT)

1.1.7. Effet de l'irrigation par les EUT sur la teneur du sol en métaux lourds.

Les résultats du dosage des éléments traces métalliques par l'absorption atomique dans le sol (Tableau 19) montrent les faits suivants :

Malgré avec des concentrations négligeables avant et après irrigation avec les EUT par comparaison à la norme, les concentrations de chrome (Cr) après irrigation avec 100% d'EUT ont connues une augmentation significative ($P < 0.05$) par rapport au traitement à l'eau de puits et avant irrigation, ce qui témoigne de l'apport de Chrome par les EUT, en effet selon l'ANOVA, 3 groupes de concentrations distinctes ont été mis en évidence, le groupe A (T2 : 100% EUT), Le groupe B (T0 : aucun traitement, T3 : 75% EUT, T4 : 50% EUT et T5 : 25% EUT) et le groupe C (T1 : Eau de puits).

Aussi, une augmentation significative selon l'ANOVA ($P < 0.05$), a été détecté pour le Manganèse Mn, en effet le traitement T2 avec 100% d'EUT a fourni une forte augmentation par rapport au traitement à l'eau de puits et avant irrigation, l'évolution du Mn dans le sol après irrigation avec 100% d'EUT par rapport à l'état initial était de 204.87%, encore une fois ce résultat témoigne de l'effet néfaste sur l'irrigation avec 100% d'EUT.

Les concentrations de plomb (Pb) et de Zinc (Zn), malgré très insignifiantes, ont été significativement différentes ($P < 0.05$) selon l'ANOVA, le test de Fisher a montré que les concentrations moyennes zinc (Zn) dans le sol du traitement (T2) était nettement supérieure à celle de l'eau de puits et avant irrigation, alors que pour le plomb (Pb) c'est le traitement T4 (50% EUT) qui a montré les plus fortes concentrations.

Le cobalt (Co) et le nickel (Ni), n'ont pas montré de différences significatives ($P > 0.05$) selon l'ANOVA, malgré que l'irrigation avec 100% d'EUT (T2) été légèrement supérieur aux restes des traitements.

Enfin, le cuivre (Cu) et le cadmium (Cd), ont aussi montré des augmentations significatives dans le sol par rapport au témoin et avant irrigation, surtout pour le cas du traitement T2 (100% EUT)

A l'instar de nos résultats, de nombreux chercheurs, ont signalé l'accumulation de Zn, Pb, Ni, Mn, Cu, Cr, Co dans les sols irrigués par les eaux usées traitées par rapport aux sols irrigués par l'eau de puits Rattan et al. (2001, 2002, 2004).

Malgré que pour les différents métaux lourds, les concentrations étaient négligeables par comparaison aux normes, l'irrigation à long terme par les eaux usées traités peut conduire à l'accumulation des métaux lourds très néfastes pour la santé humaine dans le sol.

Tableau 19: Dosage des Éléments Traces Métallique dans le sol (mg/Kg)

Traitement	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
T0	0.0031 ^b	0.0226 ^{bc}	0.0005 ^a	0.0010 ^a	0.0005 ^{bc}	0.0000 ^b	0.0002 ^b	0.0000 ^b
T1 Témoin	0.0019 ^c	0.0234 ^{bc}	0.0007 ^a	0.0012 ^a	0.0004 ^c	0.0002 ^b	0.0002 ^b	0.0001 ^b
T2	0.0044 ^a	0.0689 ^a	0.0008 ^a	0.0013 ^a	0.0008 ^a	0.0007 ^a	0.0034 ^a	0.0001 ^b
T3	0.0031 ^b	0.0451 ^{abc}	0.0006 ^a	0.0012 ^a	0.0005 ^{bc}	0.0002 ^b	0.0003 ^b	0.0000 ^b
T4	0.0025 ^b	0.0570 ^{ab}	0.0006 ^a	0.0012 ^a	0.0005 ^{bc}	0.0002 ^b	0.0004 ^b	0.0005 ^a
T5	0.0026 ^b	0.0078 ^c	0.0005 ^a	0.0011 ^a	0.0006 ^{ab}	0.0003 ^b	0.0004 ^b	0.0000 ^b
Normes UE	150	-	-	75	140	300	3	300

1.2. Analyse en Composante Principale des paramètres physico-chimiques

Les principaux paramètres chimiques ont été analysés à travers l'analyse en composante principale (Figure 30). L'ACP a permis de constater que les deux premiers axes expliquent 71.72 de l'information, ce qui est largement suffisant pour résumer les relations entre les différents paramètres.

Le premier axe explique à lui seul 55.53% de l'information, cet axe est fortement positivement corrélé avec le Ni, le C organique, le Zn et le Cd et a un degré moindre avec le Co, le sable et l'argile.

En même temps, cet axe est négativement corrélé au Li, C/N et le K⁺. Ceci, permet de distinguer deux groupes de variables opposés l'un à l'autre (le premier groupe composé par le N, C organique, Zn et Cd, Co, sable et l'argile, et le deuxième groupe composé de K⁺, C/N et le Limon).

Le deuxième axe explique 16.19% de l'information, il est positivement corrélé au Cr, CaCo₃, K⁺ et au Cu, et négativement corrélé au PH.

L'ACP, permet de conclure que les sols n'ayant fait l'objet d'aucun traitement (T0) se caractérisent par de fortes teneurs en CaCo₃, K⁺, et un fort rapport C/N, et par une faible teneur en éléments néfastes.

Les sols irrigués par l'eau de puits (traitement T1), se caractérisent par un fort pH.

Alors que les sols ayant subi une irrigation à 100% d'EUT (T2), se caractérisent par des concentrations élevées en Cd, Zn, C organique, Ni, N, Cr, Cu, Mn.

Le reste des traitements T3, T4, T5 ne se caractérisent pas des concentrations spécifiques.

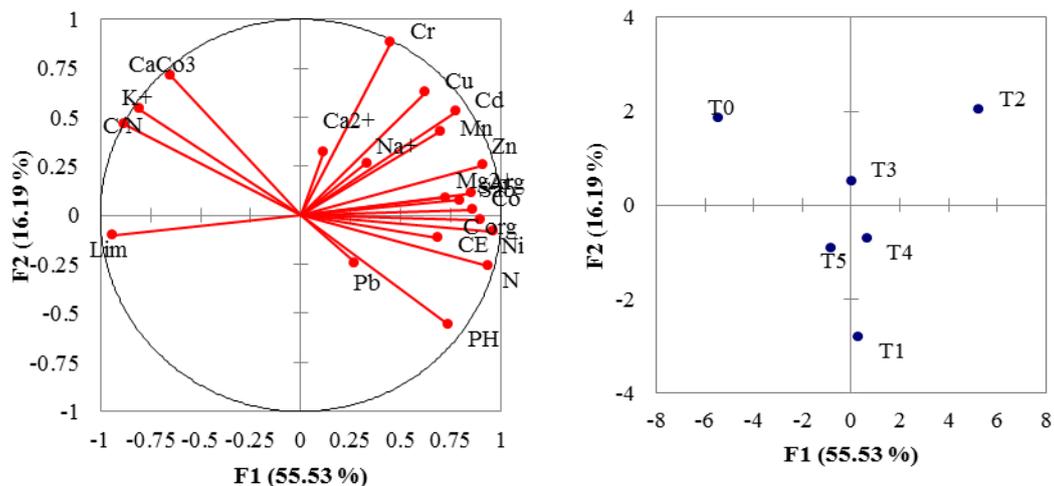


Figure 30: ACP, Projection des paramètres physico-chimiques et traitements sur le plan 1x2.

**PARTIE III : ANALYSES MORPHOLOGIQUES ET METAUX LOURDS DANS
LA TOMATE « *SOLANUM LYCOPERSICUM* »**

**1. Impact des EUT sur les caractéristiques morphologiques des plants de
tomate « *Solanum lycopersicum* »**

La croissance désigne les changements quantitatifs irréversibles dont la plante est le siège au cours de l'écoulement du temps (Hartmann et *al.*, 1998), cette croissance est assuré par un méristème apical, et son développement est caractérisé par une alternance de périodes d'allongement et de repos (Thiebaut et *al.*, 1990).

Les paramètres morphologiques étudiés concernent tous les stades végétatifs de la plante (3 feuilles, 5 feuilles, 7 feuilles, floraison et fructification).

1.1. Effet sur la hauteur

L'augmentation moyenne de la hauteur de la tige principale de la tomate (cm) en fonction des doses d'irrigation (Figure 31, tableau 20) n'a pas montré de différences significatives aux stades 3 et 5 feuilles, durant ces deux stades, l'effet de dose et du type d'eau utilisé n'explique respectivement que 15.5% et 22.4% de l'augmentation de la hauteur.

L'analyse de variance a montré que les différences les plus significatives ont été enregistrées à partir du stade 7 feuilles. Dans ce cas, les moyennes enregistrée par le traitement T2 (100% EUT) étaient selon le test de Fisher hautement supérieures aux restes des doses, que ce soit l'eau de puits ou le reste des doses d'EUT. A partir du stade 7 feuilles l'effet de dose et du type d'eau utilisé explique un très fort taux de 66.9% au stade 7 feuilles, 93% au stade floraison et 75.7% au stade fructification de l'augmentation de la hauteur des plantes.

Il a été constaté que la hauteur diminue avec la diminution de la dose d'EUT (T3, T4 et T5 qui représentent 75, 50 et 25% respectivement)

Selon Paliwal et *al.*, (1998), l'augmentation de la croissance lors de l'irrigation avec les EUT peut être attribuée à l'absence d'effets toxiques dans les eaux usées traitées tel que l'absence de métaux lourds, ou bien le fort taux de matière organique en plus des macros et micro nutriments, tel que l'azote total.

Tableau 20: Variation de la hauteur moyenne de la plante (cm) durant les stades végétatifs en fonction des doses d'irrigation

Traitements	3 feuilles	5 feuilles	7 feuilles	Floraison	Fructification
T1	11.46 ^a	23.97 ^a	35.66 ^{ab}	66.40 ^b	123.80 ^b
T2	11.95 ^a	26.58 ^a	38.10 ^a	75.00 ^a	179.60 ^a
T3	10.80 ^a	23.98 ^a	30.09 ^c	57.40 ^c	141.80 ^b
T4	10.99 ^a	23.97 ^a	35.79 ^{ab}	62.70 ^b	131.70 ^b
T5	11.34 ^a	24.70 ^a	33.01 ^b	36.10 ^d	89.10 ^c
R ²	0.1550	0.2244	0.6691	0.9299	0.7572
P-value	0.4734	0.2554	0.0001	< 0.0001	< 0.0001

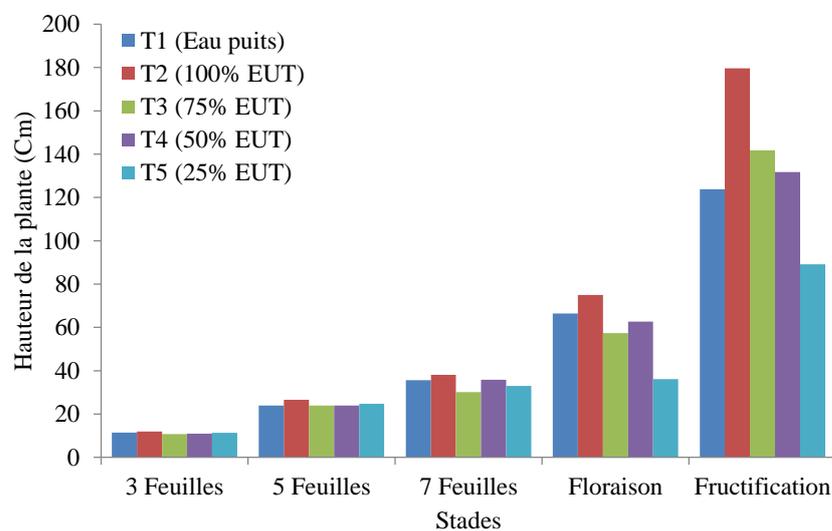


Figure 31: Evolution de la hauteur moyenne des plants de tomate en fonction des doses d'irrigation

1.2. Effet sur le diamètre

De même que la hauteur, le diamètre moyen de la tige principale de la tomate (cm) (Figure 32, tableau 21) n'a pas montré de différences significatives aux stades 3 et 5 feuilles, au cours desquels, l'effet dose et type d'eau n'explique que 20% et 25% de l'évolution du diamètre.

L'ANOVA a montré que les différences hautement significatives ($P < 0.0001$) ont été enregistrées à partir du stade 7 feuilles. Selon le test de Fisher, le diamètre moyen du traitement T2 (100% EUT) était largement supérieur à celui de l'eau de puits (T1), ainsi qu'au restes des doses d'EUT. Au cours des derniers 3 stades, l'effet du type d'eau et de dose explique un fort taux de 70% au stade 7 feuilles, 80% au stade floraison et 75% au stade fructification de l'évolution du diamètre des plantes.

On note aussi que le diamètre diminue avec la diminution de la dose d'EUT.

Tableau 21: Variation du diamètre moyen de la plante (cm) durant les stades végétatifs en fonction des doses d'irrigation

Traitements	3 Feuilles	5 Feuilles	7 Feuilles	Floraison	Fructification
T1	0.84 ^a	1.91 ^a	2.38 ^b	2.49 ^b	2.50 ^{bc}
T2	0.91 ^a	1.69 ^a	2.74 ^a	3.28 ^a	3.48 ^a
T3	0.83 ^a	1.64 ^a	2.51 ^b	2.60 ^b	2.72 ^b
T4	1.03 ^a	1.78 ^a	2.42 ^b	2.29 ^b	2.59 ^b
T5	0.86 ^a	1.71 ^a	2.07 ^c	1.81 ^c	2.15 ^c
R ²	0.20	0.25	0.70	0.80	0.75
P-value	0.31	0.19	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001

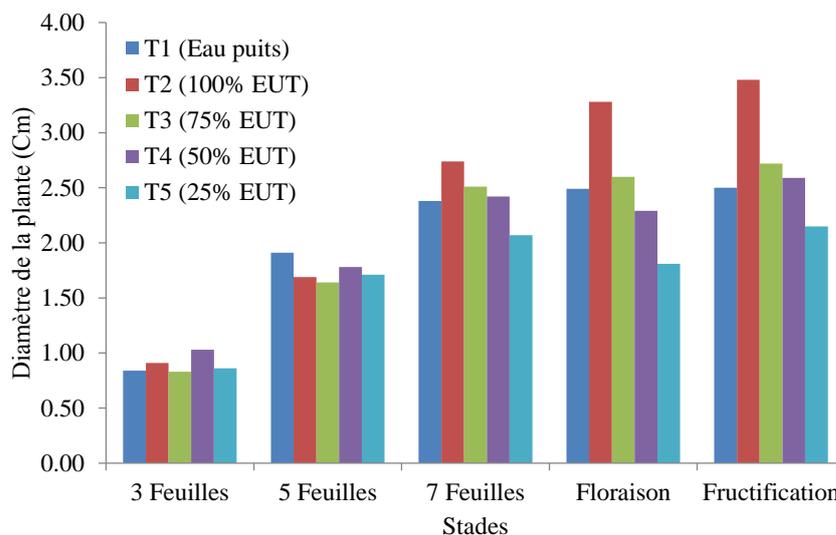


Figure 32 : Evolution du diamètre des plants de tomate en fonction des doses d'irrigation

1.3. Effets sur le feuillage

a. Effets sur le nombre de feuilles

Le nombre de feuilles est un très bon indicateur d'une bonne alimentation en eau et en sels minéraux et une bonne production en biomasse par la plante (Dupuitate, 1996 cité par Roula, 2005).

Les résultats montrent une différence hautement significative ($P < 0.0001$), au stade floraison entre les plants irrigués par 100% d'EUT et le restes des doses (T3 (75%), T4 (50%) et T5 (25%)), par contre le nombre de feuilles du traitement T2 au stade floraison n'est pas significativement différents de celui de l'eau de puits (Tableau 22). Cela permet de dire que le

nombre de feuilles n'est pas lié à la qualité de l'eau mais à la quantité d'eau apporté. L'effet de dose explique un taux 89.4% au stade floraison de l'évolution du nombre de feuilles, alors qu'il n'explique que 31.5% au stade fructification. En effet au stade fructification l'écart entre le nombre de feuilles entre les différentes doses et type d'eau n'est pas tellement grand, malgré que selon le test de Fisher le traitement T2 (100% EUT) a montré un nombre de feuilles significativement différent ($P < 0.05$).

Les travaux de Souguir et al, (2001) sur l'irrigation d'une plante de fève (*Vicia faba* L.) par les eaux usées, confirment nos résultats. L'auteur montre que le nombre de feuilles est beaucoup plus élevé lors de l'utilisation des eaux usées traités.

Tableau 22 : Variation du nombre moyen de feuilles de la plante (cm) durant les stades floraison et fructification en fonction des doses d'irrigation

Traitements	Floraison	Fructification
T1	57.40 ^{ab}	102.40 ^{ab}
T2	60.40 ^a	120.20 ^a
T3	54.40 ^b	99.00 ^{ab}
T4	45.60 ^c	83.80 ^b
T5	28.40 ^d	97.40 ^{ab}
R ²	0.8941	0.3147
P-value	< 0.0001	0.0947

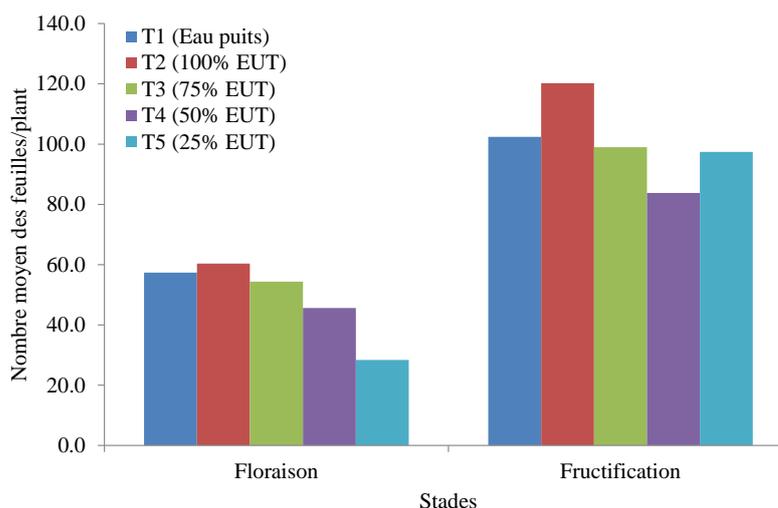


Figure 33: Evolution du nombre moyen des feuilles / plants de tomate en fonction des doses d'irrigation

b. Effets sur la surface foliaire de la plante

L'effet des différents traitements sur la surface foliaire ne sont devenus vraiment apparent, qu'à partir du stade floraison, malgré une légère différence en faveur de l'eau de puits observée au stade 3 feuilles. Selon l'ANOVA, les différences hautement significatives ($P < 0.0001$) ont été observés durant les stades floraison et fructification, au cours de ces deux stades l'effet dose explique 70% du développement foliaire, et les plus fortes couvertures foliaires ont été enregistrées chez les plants irrigués avec 100% EUT, l'évolution de la surface foliaire des tomates irrigués avec les EUT par rapport à l'eau de puits était de 11.4%. Ce développement foliaire marqué causé par les EUT a aussi été rapporté par Paliwal et al, (1998) et Souguir et al, (2001).

La différence significative dans les paramètres de croissance des plantes irriguées avec les eaux usées traitées peut être attribuée selon Pescod (1992), Martens et Westerman (1991) et Elshiekh (2007) au fait que les eaux usées traitées sont riches en nutriments, et donc les besoin de la plante sont satisfaite.

Tableau 23 : Variation de la surface foliaire moyenne de la plante (dm^2) en fonction des stades végétatifs

Traitements	3 Feuilles	5 Feuilles	7 Feuilles	Floraison	Fructification
T1	0.790 ^a	2.683 ^b	4.795 ^a	7.133 ^{ab}	10.387 ^{ab}
T2	0.619 ^{ab}	3.083 ^{ab}	4.964 ^a	7.453 ^a	11.566 ^a
T3	0.612 ^b	2.416 ^b	4.832 ^a	6.168 ^b	8.845 ^{bc}
T4	0.647 ^{ab}	3.141 ^a	5.053 ^a	4.732 ^c	7.627 ^{cd}
T5	0.470 ^b	3.718 ^a	5.838 ^a	4.155 ^c	6.803 ^d
R ²	0.42	0.30	0.22	0.70	0.70
P-value	0.024	0.114	0.278	< 0.0001	< 0.0001

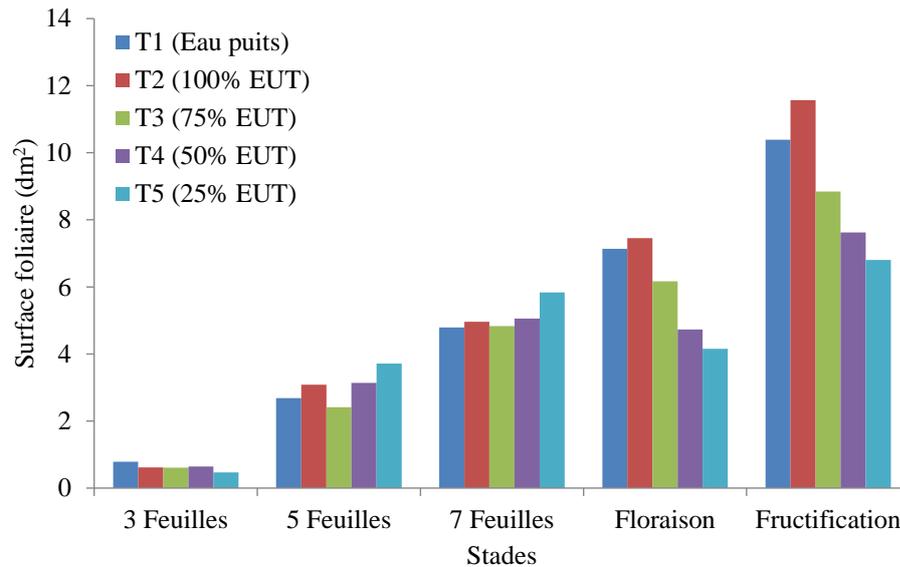


Figure 34 : Evolution de la surface foliaire des plants de tomate en fonction des doses d'irrigation

2. Impact des EUT sur les paramètres de production

a. Effets sur le nombre moyen de fruits

Les résultats ont montré que le nombre moyen de fruits par plante est positivement affecté par la dose et la qualité de l'eau d'irrigation, en effet l'ANOVA a montré différence significative ($P < 0.05$) entre les différents traitements, selon le test de Fisher le nombre moyen de fruits par plante enregistré par le traitement T2 (100% EUT) est largement supérieur aux restes des traitements (Tableau 24, Figure 35).

37.4% des variations du nombre de fruits par plante sont expliqués par l'effet de dose et de qualité d'eau. Aussi il a été observé que le nombre de fruits diminue en fonction de la dose d'EUT, les plants irrigués à 100% d'EUT ont enregistré une évolution en nombre de fruits de 24.5% par rapport à ceux irrigués avec l'eau de puits.

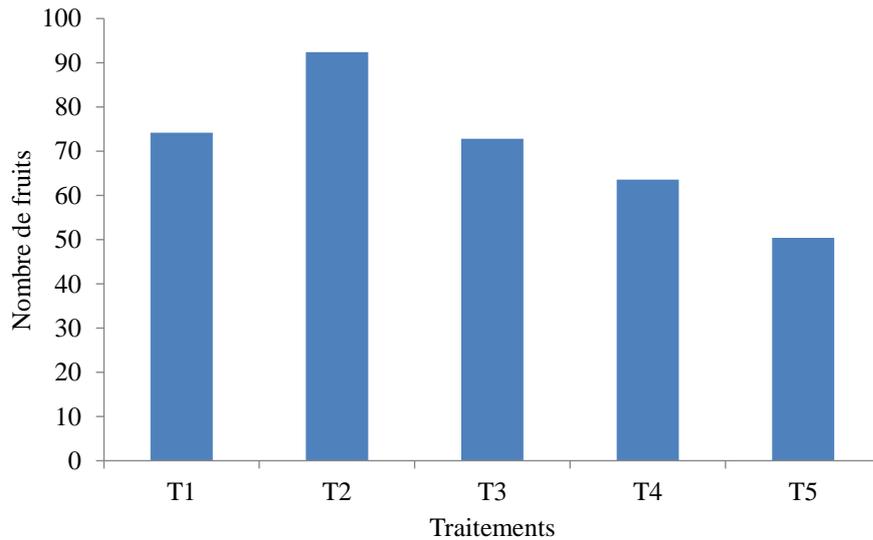


Figure 35: Variation du nombre moyen de fruits en fonction des doses d'irrigation

b. Effets sur le rendement par traitement

Le rendement en fruits a été évalué en fin du cycle en procédant à la pesée par pot et par traitement. Des différences hautement significatives ($P < 0.01$) (Tableau 24) ont été détecté entre les rendements des différents traitements. 50% des variations du rendement s'expliquent par l'effet de dose et de qualité des eaux, le plus fort rendement a été enregistré par utilisation de 100% EUT (1452.19 g/m^2). L'accroissement du rendement par rapport à l'eau de puits était de 4.8%.

Des diminutions très significatives des rendements ont été observés avec la diminution de la dose d'EUT.

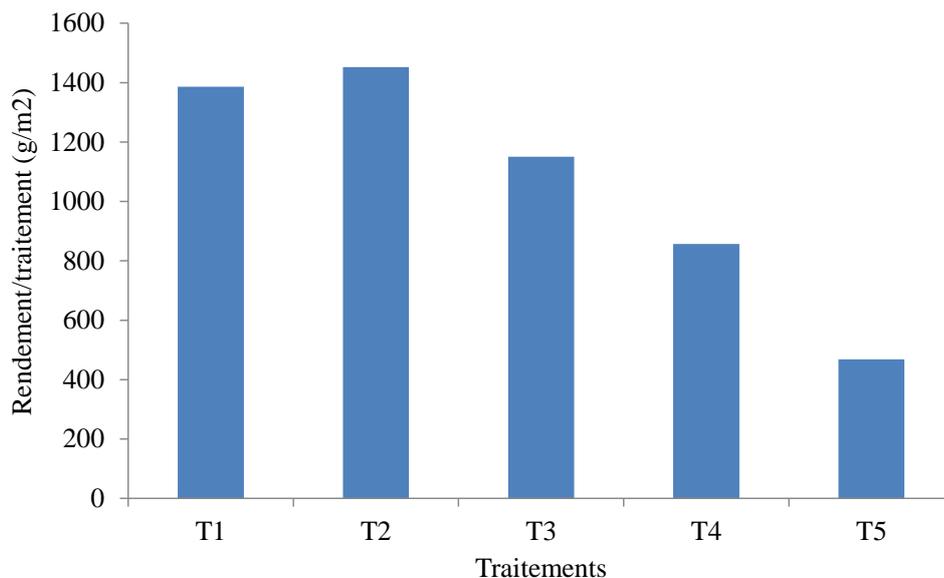


Figure 36: Variation du rendement/traitement en fonction des doses d'irrigation

Tableau 24 : Effets des EUT sur les fruits

Traitements	Nombre de fruits/traitement	Rendement/traitement (g/m ²)
T1	74.20 ^{ab}	1385.69 ^{ab}
T2	92.40 ^a	1452.19 ^a
T3	72.80 ^{ab}	1150.09 ^{ab}
T4	63.60 ^b	856.48 ^{bc}
T5	50.40 ^b	468.50 ^c
R ²	0.3743	0.5022
P-value	0.0436	0.0056

3. Impacts des EUT sur la composition chimique de la tomate

a. Concentrations des cations Na⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ et K⁺ dans les fruits

Les concentrations des cations Na⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ et K⁺ dans le fruit ont été significativement différentes ($P < 0.05$), a cet effet le test de Fisher a révélé différents groupes de concentrations (Tableau 25). A l'exception du Na, les plus faibles concentration en cations (Ca, Mg, K) ont été enregistrés dans les fruits irrigués à l'eau de puits, alors que les plus fortes concentrations ont été observés au niveau des tomates irriguées avec 100% EUT. Pour le Ca²⁺ et le K⁺ même les plus faibles doses d'EUT, ont conduit à des concentrations significativement supérieures a celles de l'eau de puits. Les fortes concentrations en cations dans le fruits traiées au EUT sont cohérente avec les résultats mentionnés par Luo et al. (2004), Hane Klaus et Schung (2001) et Elsheikh (2007). Selon Griffin et Chiar, (1980), ces concentrations élevées en cations dans les fruits sont sans doute le résultat d'un apport par les EUT, en plus de leur disponibilité dans le sol.

Pour le Na les concetrations des fruits irriguées à l'eau de puits étaient similaires à celles des EUT, cette constatation suggère que l'eau de puits utilisée est légèrement saline.

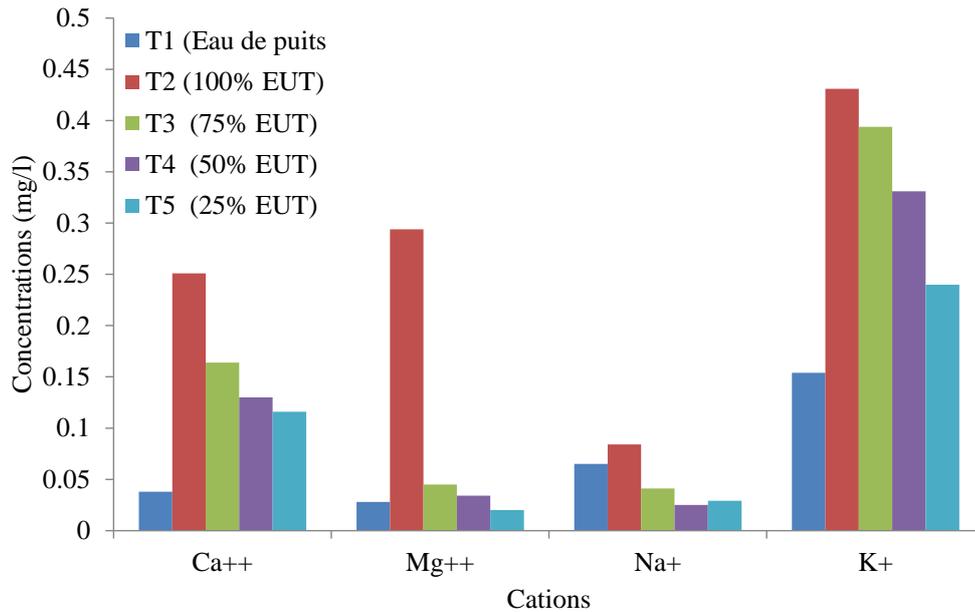


Figure 37 : Concentration de Na, Ca, Mg et K dans les fruits (mg/l)

Concernant l’azote, un fort taux significativement supérieur ($P < 0.05$) aux restes des traitements à été enregistré par le traitement T2, à l’inverse les pourcentages de carbone dans le fruit n’étaient significativement différente entre le traitement T2 et le témoin T1, la même constatation concernant l’azote a été rapportée par Fasciolo et al. (2002)

Tableau 25: Effet des EUT sur la composition en cations, azote (%N) et carbone (%C)

Tritements	Ca	Mg	Na	K	N%	C%
T1	0.038 ^c	0.028 ^b	0.065 ^a	0.154 ^e	0.98 ^b	40.10 ^a
T2	0.251 ^a	0.294 ^a	0.084 ^a	0.431 ^a	1.70 ^a	40.65 ^a
T3	0.164 ^{ab}	0.045 ^b	0.041 ^b	0.394 ^b	0.96 ^b	40.11 ^a
T4	0.130 ^{ab}	0.034 ^b	0.025 ^b	0.331 ^c	0.99 ^b	39.90 ^a
T5	0.116 ^b	0.020 ^b	0.029 ^b	0.240 ^d	1.09 ^b	39.10 ^a
R ²	0.570	0.957	0.827	0.99	0.796	0.604
P-value	0.056	< 0.0001	0.0008	< 0.0001	0.002	0.039

b. Bioaccumulation des métaux lourds dans le fruit de la tomate

Les concentrations élevées de métaux lourds sont très nocives pour la santé humaine. A cet effet, le suivi de leurs présence dans les fruits s’avère très nécessaire.

Suite à l’irrigation avec les eaux usées traités, les résultats ont montré les fait suivants :

Le chrome n’a pas montré de différences significatives ($P > 0.05$), malgré que les résultats (Tableau 26, Figure 38) ont montré que les concentrations de cet éléments dans les fruits des tomates irriguées avec les EUT sont largement supérieures a celles des fruits irriguées à l’eau

de puits. Généralement, quelque soit le traitement considéré, la bioaccumulation du chrome dans les fruits était élevée par comparaison au reste des métaux lourds, avec une concentration supérieure au seuil de toxicité 2.3 mg/kg recommandée par la FAO et l’OMS. Selon, Hooda et al, (1994) et Ma et al, (1997), la biodisponibilité et la facilité de transfert du Chrome est liée entre autre à sa grande mobilité dans le sol par rapport aux autres métaux, sa solubilité et sa forme géochimique.

Les concentrations de manganèse dans le fruits étaient significativement différentes ($P < 0.05$), selon le test de Fisher la moyenne des fruits irriguée à l’eau de puits était significativement inférieure à la moyenne des fruits irrigués à 100% et 50% EUT, la qualité de l’eau utilisée dans l’irrigation explique 65% de la variation des concentrations de manganèse dans le fruit. Cependant, les teneurs en manganèse enregistrées dans les fruits demeurent inférieures à l’intervalle 50-150 mg/kg, teneurs rencontrées chez les végétaux mentionnée par Coïc et al, (1989). Selon Loué et al, (1993), le manganèse intervient dans l’activation de certaines enzymes, la synthèse de la chlorophylle, la photosynthèse, la réduction des nitrates, la synthèse des acides aminés et des protéines. Les feuilles sont normalement les parties les plus riches en manganèse (Schäfer, 2004).

Les concentrations du cobalt étaient insignifiantes et largement inférieures a la norme FAO et OMS (50 mg/kg), l’analyse de variance n’a pas montré de différences significative ($P > 0.05$) quelque soit la dose ou la qualité de l’eau.

Selon l’ANOVA, les concentrations du nickel étaient hautement significativement différentes ($P < 0.01$), les plus fortes concentrations ont été enregistrées par les doses 25% et 50% EUT. La dose et la qualité de l’eau utilisée dans l’irrigation explique 74% de la variation des concentrations de nickel dans le fruit.

Pour le Cuivre, l’analyse n’a pas montré de différences significatives ($P > 0.05$) (Tableau 25, Figure 37), cependant, il faut noter que les concentrations enregistrées au niveau des fruits irrigués avec 100% EUT étaient largement supérieures aux restes des traitements. A cette effet la dose et la qualité de l’eau n’expliquent que 27.6% de la variation des concentrations de Cuivre dans le fruit.

Le zinc a montré des concentrations significativement différentes ($P < 0.05$), selon le test de Fisher, les concentrations de zinc dans les fruits irrigués avec les EUT sont largement supérieures à celles des fruits irrigués à l’eau de puits, 63% des variations des teneurs de zinc dans le fruit sont expliquées par la qualité de l’eau utilisée. Cependant les teneurs enregistrées demeurent largement en dessous des normes FAO et OMS (99.4).

Les concentrations de Cadmium étaient hautement significativement différentes ($P < 0.01$), les plus fortes concentrations ont été enregistrées par les doses 25% et 50% EUT, ce qui conduit à suggérer que les concentrations en cadmium augmentent avec la diminution des doses d'EUT, les concentrations enregistrées par ces deux traitements ont été proches de la norme de toxicité FAO et OMS (0.20 mg/kg).

Enfin pour le plomb, l'analyse n'a pas montré de différences significatives ($P > 0.05$), cependant, encore les concentrations enregistrées par les doses 25% et 50% EUT étaient largement supérieures aux restes des traitements et proches de la norme FAO et OMS (0.3 mg/kg).

Tableau 26: Dosage des Eléments Traces Métallique dans le fruit (mg/Kg)

Traitement	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
T1	6.47 ^a	9.49 ^b	0.22 ^a	4.11 ^b	2.16 ^a	3.60 ^c	0.04 ^c	0.02 ^a
T2	11.66 ^a	11.77 ^a	0.25 ^a	4.18 ^b	7.40 ^a	4.21 ^{bc}	0.06 ^{bc}	0.07 ^a
T3	9.03 ^a	10.667 ^{ab}	0.27 ^a	4.43 ^b	2.26 ^a	4.58 ^{abc}	0.09 ^{ab}	0.02 ^a
T4	9.93 ^a	11.95 ^a	0.35 ^a	5.14 ^{ab}	2.32 ^a	4.67 ^{ab}	0.12 ^a	0.12 ^a
T5	10.12 ^a	10.79 ^{ab}	0.28 ^a	5.39 ^a	2.39 ^a	5.34 ^a	0.13 ^a	0.15 ^a
R ²	0.335	0.646	0.292	0.738	0.276	0.63	0.824	0.478
P-Value	0.348	0.024	0.437	0.006	0.474	0.029	0.0009	0.132
Normes FAO	2.3	-	50	67.9	73.5	99.4	0.200	0.3

Codex Alimentarius Commission (FAO/WHO)

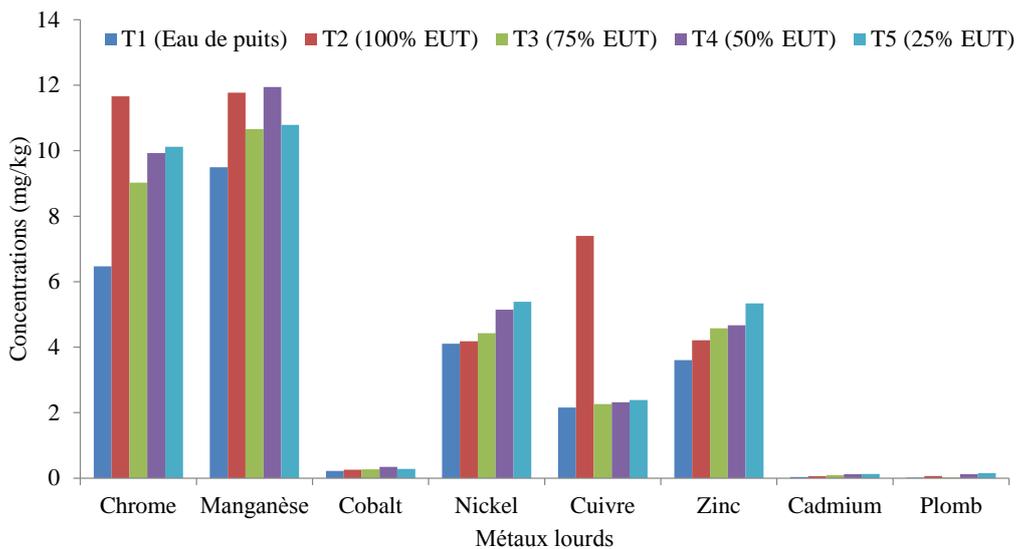


Figure 38 : Concentration en métaux lourds (mg/kg)

c. Analyse en composante principale

L'analyse en composante principale a montrée que les deux premiers axes expliquent une 82.48% de variabilité. Le premier axe avec 56.54% de l'information expliquée, est fortement positivement corrélé au Na, C, Cu, Mg, N, Ca et K, et négativement corrélé au Zn, Ni et Cd.

En termes de fruits, l'analyse montre que les fruits irrigués par le traitement T2 (100% EUT) se caractérisent par de fortes concentrations en Na, Cu, Mg, Ca, K et très riche en C organique et azote N, alors que les fruits irrigués par les traitements T5 (25% EUT) et T4 (50% EUT) se caractérisent par de fortes en Zn, Ni et Cd (Figure 39).

Le deuxième axe avec 25.9% de l'information expliquée est principalement positivement corrélé au Mn et Co et négativement corelé au K, Ca et Cd.

Les fruits ayant subi les traitements T1 se caractérisent par de fortes teneurs en Co et Mn, alors que les fruits exposés au traitement T3 se caractérisent par des concentrations élevées en K et Ca.

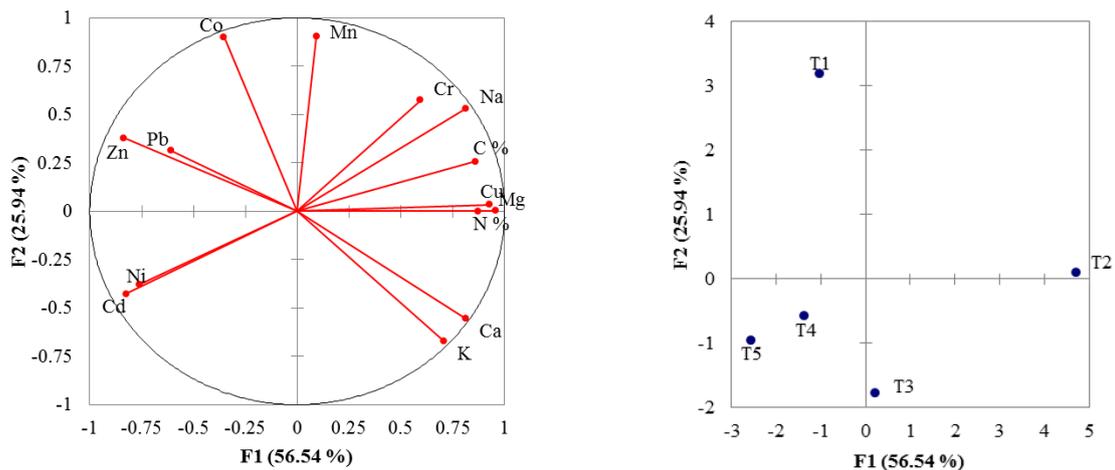


Figure 39 : ACP, Projection des paramètres chimiques et traitements sur le plan 1x2

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'Algérie est classée dans la catégorie des pays pauvres en ressources hydriques au regard du seuil de rareté fixé par la banque mondiale à 1000 m³ /habitant/an. La forte croissance démographique, l'urbanisation massive et le développement des activités industrielles génèrent une production importante d'eaux usées qui peut constituer une ressource en eau non négligeable après son recyclage.

Cette étude qui s'inscrit dans une optique de valorisation et protection des ressources en eau et de l'environnement, avait pour objectifs :

- L'évaluation de l'impact de l'irrigation par les eaux usées traitées issues de la station d'épuration de Chlef sur le sol notamment l'accumulation des éléments métalliques;
- L'impact sur les aspects nutritionnels et biochimiques de la tomate.

Suite à l'évaluation des eaux usées épurées au niveau de la STEP Chlef, il a été possible d'affirmer que ces eaux peuvent être utilisées en production agricole, leurs caractéristiques physico-chimiques leur confèrent un bon potentiel d'utilisation. En effet, l'évaluation continue de ces eaux sur une période de 7 mois a montré une eau de bon qualité et en bonne conformité avec les normes internationales d'une eau d'irrigation, cependant, il faut rester toujours vigilant lors de l'utilisation de ces eaux usées en agriculture, car tout élément trace peut avoir des effets néfastes sur la plante si sa disponibilité dans le sol dépasse certains seuils. De tels seuils dépendent de l'espèce végétale, du sol et des conditions climatiques. Aussi, les règles d'hygiène spécifiques à l'irrigation par les eaux usées traitées doivent être respectées afin d'éviter tout risque de contamination par des germes pathogènes potentielles.

Malgré la qualité acceptable des eaux usées traitées utilisées, il a été remarqué à la fin de l'expérimentation, que les sols ont été affectés à plusieurs niveaux, surtout les sols ayant subi la dose 100% EUT, à cet effet, il a été observé une augmentation significative de la conductivité électrique, du taux de CO et de L'azote total, le complexe absorbant est devenu plus saturé en Na⁺, alors qu'en termes de métaux lourds les sols ont montrés des concentrations plus élevés en Manganèse, Chrome, Cuivre, Zinc et Cadmium, malgré que les concentrations de ces éléments étaient négligeables, l'irrigation à long terme par utilisation de ces eaux usées traitées peut conduire à l'accumulation des métaux lourds très néfastes pour la santé humaine dans le sol.

Les eaux usées utilisées semblent avoir un effet très positif sur les paramètres de croissance de la tomate, à cet effet, la bonne valeur nutritive des eaux usées, a causé une meilleure croissance en diamètre et en hauteur de la plante, en nombre de feuilles et en surface foliaire,

en nombre de fruits et en rendement par rapport aux mêmes paramètres lors de l'irrigation à l'eau ordinaire, cependant, les fruits issues de l'irrigation par les eaux usées ont montrés des concentrations significativement plus élevées par rapport à l'eau ordinaire en termes de Ca, Mg, Na, K et N. Concernant les métaux lourds, éléments très nocifs pour la santé humaine et auxquels une attention particulière doit être portée, il a été remarqué que les fruits irrigués à l'eau usée présentaient des concentrations anormalement élevées en Chrome, même au-delà de la norme exigée par la FAO, aussi les concentrations en Manganèse, Cadmium, Cuivre, Zinc et Nickel dans les fruits irrigués avec les eaux usées traitées étaient significativement plus élevées par rapport à celles de l'eau ordinaire, malgré à des concentrations largement inférieures à la norme FAO, ce qui permet de conclure qu'il faut être très prudent quant à la consommation de ces produits.

En fin, notre étude sur l'évaluation de l'impact des EUT sur le sol et la plante reste ponctuelle et le facteur le plus particulièrement discuté est l'effet des doses d'irrigation.

Ainsi, il serait intéressant d'évaluer l'impact de l'application des EUT à long terme sur le sol, sur la microflore du sol et sur d'autres cultures notamment les cultures fourragères et industrielles pour meilleure appréhension des effets des EUT.

Recommandations et suggestions pour la suite des travaux

1. D'autres travaux peuvent être effectués pour valider et consolider les résultats de cette recherche.
2. Les eaux usées doivent être considérées comme une ressource qui doit être récupérée et ajoutée au bilan hydrique.
3. Un traitement plus poussé des eaux usées traitées par la station d'épuration de Chlef est recommandé.
4. Travailler sur une plus large gamme d'espèces.
5. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour étudier l'adaptabilité de l'utilisation des eaux usées pour la production de grandes cultures, de cultures horticoles et pour les paysages
6. Continuer les analyses d'autres nutriments et la détermination de leurs valeurs technologiques et nutritionnelles.
7. L'étude a suggéré que les eaux usées traitées peuvent être utilisées en toute sécurité pour irriguer les cultures avec une surveillance continue de la qualité des effluents.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abd El Sabour, M.F., 2003.** Impact of wastewater reuse on cobalt status in Egyptian environment. *J. of Environmental Sci. (China)*, 15: 95-388.
- AFD, 2011.,** Réutilisation des eaux usées traitées: Perspectives opérationnelles et recommandations pour l'action, Rapport final de l'Agence Française de Développement, France, 72 p.
- Ali Widaa Mohammed Elamin Elshiekh., 2007.** Using Treated Wastewater For Irrigating Forage Sorghum (Sorghum bicolor) In Khartoum State. 10.13140/RG.2.1.1051.6004. Doctorate thesis.
- Al-Mebayedh. H., 2013.** Climate changes and its effects on the Arab area, *APCBEE Procedia* 5 (2013) 1–5.
- Ameraoui S, Boutaleb A, Souiher N, Berdous D., 2017.** Investigation of potential accumulation and spatial distribution of heavy metals in topsoil surrounding the cement plant of Meftah (Southeastern Algiers Region, Algeria). *Arab J Geosci* 10: 464.
- Asano T., 1992.** Artificial recharge of ground water with reclaimed municipal wastewater: current status and proposed criteria. *Water Science Technology*, 25: 87-92.
- Awoke G, Asamin Y, Shetie G, Abebe W ,Wenzong L, Fidelis O.A, Aijie W., 2020.** Evaluating the health risks of heavy metals from vegetables grown on soil irrigated with untreated and treated wastewater in Arba Minch, Ethiopia. *Science of the Total Environment*. 143302.
- Ayers R.S, Westcott D.W., 1989.** Water quality for Agriculture. FAO, Irrigation and Drainage paper 29 rev. 1. FAO, Rome.
- Ayers R.S. Westcot D.W., 1994.** Water quality for agriculture. FAO. Irrigation and drainage paper. N° 29 Rev. 1 FAO, Rome. 174 p.
- Ayers RS, Westcot DW., 1985.** Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 rev. 1, Rome, 174 p.
- Bagnouls F, Gaussen H. 1957.** Les climats biologiques et leur classification. *Annales de Géographie*, 355 : 193-220
- Bazza, M., 2002.** Wastewater reuse in the near east region: experience and issues. FAO, Iraklio, Crete, Greece.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Becera-Castro, C., Lopes, A. R., Vaz-Moreira, I., Silva, E. F., Manaia, C. M., Nunes, O.C., 2015.** Wastewater reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. *Environment International*, 75, 117-135.
- Bedouh Y., 2014.** Evaluation de la toxicité des eaux usées traitées par la station d'épuration de Guelma et son impact sur l'oignon « *Allium cepa* ». Thèse de Doctorat à l'université Badji Mokhtar – Annaba
- Bekhouche-Guendouz N., 2011.** Evaluation de la Durabilité des Exploitations Bovines Laitières des Bassins de la Mitidja et d'Annaba. Thèse de Doctorat à INSTITUT NATIONALE POLYTECHNIQUE DE LORRAINE , Université de Nancy. 15P
- Benbraïka A., Ghedab R., 2013.** La tarification des couts relatifs à l'eau en Algerie. *Revue des Sciences Humaines* 29, 7-21.
- Bengoumi M., Traoure A., Bouchriti N., Bengoumi D El Hraïki A., 2004.** Qualite de l'eau en aviculture. *Revue trimestrielle d'information scientifique et technique* 3(1), 5-25.
- Bontoux J, (1993).** Introduction à l'étude des eaux douces, eaux naturelles, eaux de boisson. Cebedoc édition, Belgique, 169 p.
- Bouchaala L., Charchar N. et Gherib A.E., 2017.** Ressources hydriques: traitement et reutilisation des eaux usees en algerie. *Algerian journal of arid environment*. 7(1) :84-95
- Bouziani M., (2000).** Water: from scarcity to disease. *Iben Khaldoun* 1: 247.
- Brookes, P.C.; McGrath, S.P. and Heijnen C., 1986.** Metal residues in soils previously treated with sewage sludge and their effects on growth and nitrogen fixation by blue-green algae. *Soil Biol. Biochem.*, 18: 345-353.
- Calzadilla, A., Rehdanz, K. and Tol, R.S., 2011.** Water scarcity and the impact of improved irrigation management: a computable general equilibrium analysis. *Agricultural Economics*, 42, 305-323.
- Cajuste, L.J.; Carrillo, G.R.; Cota, G.E. and Laird, J., 1991.** The distribution of metals from wastewater in the Mexican valley of mezquital. *Water Air Soil Pollution*. 57 – 763.
- Cardot C., 1999.** Genie de l'environnement : Les traitements de l'eau. Ellipses, Paris, 247p.
- Carr, R. M., Blumenthal, U. J. and Mara, D.D., 2004.** Health Guidelines for the Use of Wastewater in Agriculture: Developing Realistic Guidelines. *In: SCOTT, C. A., FARUQUI, N. I. & RASCHID-SALLY, L. (eds.) Wastewater Use in Irrigated Agriculture Confronting the Livelihood and Environmental Realities*. UK: CAB International.
- Carter MR., 1993.** *In: Soil sampling and method of analysis*, Lewis Publishers, Boca Raton, FL. 1993.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CGER., 1996.** Use of reclaimed water and sludge in food crop production commission on Geosciences, Environment and resources: 1-175.
- Chafai D., 1996.** Micromycetes des sédiments d'oueds et effluents industriels de l'Est Algérien. Thèse de Doctorat, Université de Joseph Fourier, Grenoble I. France, 211 p.
- Chang, A.C.; Hyun H, and Page A.L., 1997.** Cadmium uptake for swiss chard grown on composted sewage sludge treated field plots. Plateau or time bomb. *Journal of Environmental Quality*, 26: 11-19.
- Chichoune M, Souiher N, Messaid B., 2020.** Risk of Heavy Metals Accumulation in Agricultural Lands by Treated Wastewater as Source of Irrigation in the Province of Batna (East Algeria). *Int J Water Wastewater Treat* 6(1): dx.doi.org/10.16966/2381-5299.165.
- CNES., 2000.** L'eau en Algérie : le grand défi de demain, Projet de rapport, 83p.
- Codex Alimentarius Commission (FAO/WHO), 2001.** Food Additives and Contaminants, ALINORM 01/12A. 2001:1-289.
- Condom N., Lefebvre M., Vandome L., 2012.** La réutilisation des eaux usées traitées en méditerranée : Retour d'expériences et aide à l'élaboration de projets, Les Cahiers du Plan Bleu 11, Centre d'activités régionales du PNUE/PAM, France, 63 p.
- Cork, D.J. and Krugger JP., 1991.** Microbial transformations of herbicides and pesticides. *Advan. Applied microbial*, 36: 1-66.
- Cornaz, S., 2004.** Evaluation du statut trophique d'un canal de drainage sous l'impact des pollutions d'origines diffuses et ponctuelles : cas du Grand Canal de la basse plaine du Rhône. Mémoire de licence. Université de Lausanne, Suisse, 180 p.
- Cornish, G. and Kielen, N., 2004a.** Wastewater irrigation—hazard or lifeline? Empirical results from Nairobi, Kenya and Kumasi, Ghana. *Wastewater use in irrigated agriculture*, 69-79.
- Cornish, G. A. and Kielen, N. C., 2004b.** Wastewater irrigation - hazard or lifeline? Empirical results from Nairobi, Kenya and Kumasi, Ghana. *In: SCOTT, C. A., FARUQUI, N. I. & RASCHID-SALLY, L. (eds.) Wastewater Use in Irrigated Agriculture Coordinating the Livelihood and Environmental Realities.* UK: CAB International.
- Cornish, G. A. and Lawrence, P., 2001.** Informal irrigation in peri-urban areas: A summary of findings and recommendations. Wallingford, UK.
- Davis, C.M.; Long, J.A.H.; Donald, M. and Ashbolt, N.J., 1995.** Survival of fecal microorganisms in marine and freshwater sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, 61(5): 1888-1896.

De Martonne E. 1926. L'indice d'aridité. Bulletin de l'Association de Géographes Français, 9 :3-5

Dikinya.O; Areola. O., 2010. Comparative analysis of heavy metal concentration in secondary treated wastewater irrigated soils cultivated by different crops. Int. J. Environ. Sci. Tech., 7 (2), 337-346, spring 2010.

Drouiche. N, N. Ghaffour, M.W. Naceur, H. Mahmoudi, T. Ouslimane., 2011. Reasons for the fast growing seawater desalination capacity in Algeria, Water Resour. Manage. 25 (2011) 2743–2754.

DWR., 2010. Direction of water resources in the province of Chlef, Note of synthesis, activity in 2010.

Elmeddahi. Y, A. Issaadi, H. Mahmoudi, M. Tahar Abbas, M.F.A. Goossen., 2014. Effect of climate change on water resources of the Algerian Middle Cheliff basin, Desalin. Water Treat. 52 (2014) 2073–2081.

Emberger L., 1955. Une classification biogéographique des climats.Trav. Lab. Bot.Zool. Fac. Sci. Serv. Montpellier 7.PP : 3-43.

Emberger L.1952. Sur le Quotient pluviothermique. C.R. Sci ; n°234 : 2508 –2511, Paris.

Emongor, V. E.; Khonga, E. B.; Ramolemana, G. M.; Marumo, K.; Machacha, S.; Motsamai, T., 2005. Suitability of treated secondary sewage effluent for irrigation of horticultural crops in Botswana. J. Appl Sci. 5 (3), 451-454 (5 pages).

EPB., 2004. Environmental Protection Bureau. Treated Municipal Wastewater Irrigation Guidelines. EPB 235. Saskatchewan Environment- Canada.

Faby, J.A., 2003. L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation. Doc. Tech. FNDAE, Hors-série n° 11, 30 p.

FAO (Food and Agriculture Organisation), 1992. Wastewater treatment and use in agriculture. In: Pescod, M.B. (Ed.), Irrigation and Drainage. Paper 47. FAO, Rome.

FAO., Irrigation and Drainage paper 48. FAO, Rome.

FAO., Irrigation with Treated Wastewater: User Manual, Document FAO Regional Office for the Near East, 2003, p. 73.

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.

Faruqui, N. I. and Raschid-Sally, L. (eds.) *Wastewater use in irrigated agriculture: Confronting the livelihood and environmental realities.* Wallingford, UK: CABI Publishing. UK: CAB International.

- Fasciolo, G.E.; Meca, M.I.; Gabriel, E. and Morabito, J., 2002.** Effects on crops of irrigation with treated municipal wastewaters. *Water Sci. Technol.*, 45(1): 8-133.
- Filip, Z.; Kanazawa, S. and Berhelin, J., 1999.** Characterization of effects of a long-term wastewater irrigation on soil quality by microbiological and biochemical parameters. *Plant Nutr. Soil science*, 162: 409-413.
- Gallier, W.T.; Brobst, R.; Aguilar, R.; Barbarick, K.; Hegeman, P.; Janonis, B.; Salahub, D. and Wilson, S., 1993.** Rx for rangelands. *Water Environ. Technol.*, 5: 56-60.
- Giller, K.E.; McGrath, S.P. and Hirsch, P.R., 1989.** Absence of nitrogen fixation in clover grown on soil subject to long-term contamination with heavy metals is due to survival of only ineffective Rhizobium: *Soil Biol. Biochem.*, 21: 841-848.
- Gonzalez A. P. et Castel J.R., 2000.** Regulated deficit irrigation in 'Clementina de Nules » citrus trees. II- vegetative growth. *Journal of horticultural Science et biotechnology*. 75 (4). Pp: 388-392.
- Gourbesville, P., 2008.** Challenges for integrated water resources management. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33, 284-289.
- Griffin, R.A. and Chiar, E. S.K., 1980.** Attenuation of water-soluble Polychlorinated Biphenyle by Earth materials. EPA600/2-80-027. Cincinnati, Ohio, U.S. Environmental Protection Agency.
- Guardiola-Claramonte, M., Sato, T., Choukr-Allah, R. and Qadir, M., 2012.** Wastewater production, treatment and reuse around the Mediterranean region: current status and main drivers. *Integrated Water Resources Management in the Mediterranean Region*. Springer.
- Guergueb M et Ferhat A., 2021.** La gestion des eaux en Algérie : Vers un nouveau paradigme. *Journal of Advanced Economic Research*, El oued University, Eloued, Algeria, vol 6, Issue 01.
- Gupta, A.P.; Narwal, R.P. and Antil, R.S., 1998.** Sewer water compostion and its effect on soil properties. *Bioresource Technology*, 65(1/2): 171-173.
- Hamilton, A. J., Stagnitti, F., Xiong, X., Kreidl, S. L., Benke, K. K. and Maher, P., 2007.** Wastewater irrigation: The state of play. *Vadose Zone Journal*, 6, 823-840.
- Hamoda. M.F., 2004.** Water strategies and potential of water reuse in the south Mediterranean countries, *Desalination* 165 (2004) 31-41.
- Haneklaus, S. and Schnug, E., 2001.** Impact of Agro-Technical measures on the strontium uptake of Agricultural crops. *Landbauforschung volkenrode*, 3(51): 77-86.
- Harlan J.R., 1987.** Les plantes cultivées et l'homme, édition ACCT/Cil.,F/PUF, pp _299-300.

- Hartmann C., Joseph C., Millet B., 1998.** Biologie et physiologie de la plante. Ed. Nathan. 224p.
- Hassoune EM., Bouzidi A., Koulali Y., Hadarbach D., 2006.** Effets des rejets liquides domestiques et industriels sur la qualité des eaux souterraines au Nord de la ville de Settat (Maroc). Bulletin de l'Institut Scientifique. Sciences de la Vie 28, 61-71.
- Hayat, S.; Ahmad, I.; Azam, Z.M.; Ahmad, A.; Inam, A. and Samiullah., 2002.** Effect of long-term application of oil refinery wastewater on soil health with special reference to microbiological characteristics. Bioresource Technol., 84(2): 63-159.
- Hillel, D., 1998.** Environmental soil physics: fundamentals, applications and environmental considerations. Academic Press, 801 p.
- Hoit, M.S.; Mathijs, E. and Waters, J., 1989.** The concentrations and fate of linear alky lbenzene sulphonate in sludge- amended soils. Water Res., 23: 749-759.
- Hooda (P.S.), Alloway (B.J.), 1994 -** Sorption of Cd and Pb by selected temperate and semi-arid soils: effects of sludge application and ageing of sludge soils. - *Wat., Air, Soil Poll.*, 1994, 74(3-4), 235-250.
- Hussain, G. and Alsaati, A.J., 1999.** Wastewater quality and its reuse in agriculture in Saudi Arabia. Elsevier , Desalination, 123: 241 – 251.
- Hussain, I., Raschid, L., Hanjra, M. A., Marikar, F. and Van Der Hoek, W., 2002.** Wastewater Use in Agriculture: *Review of Impacts and Methodological Issues in Valuing Impacts: with an Extended List of Bibliographical References*, Iwmi.
- Ingwersen, J. And Streck, T., 2005.** A regional scale study on the crop uptake of cadmium from sandy soils: measurement and modeling. J. Environmental Quality, 34 (3): 35-1026.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)., 2007.** IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change (AR4), 2007. Available from:
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml.
- Ionac N, Grigore E, Constantin DM. 2015.** Evaluation des phénomènes de dessèchement et de sécheresse dans la zone continentale du plateau de la Dobroudja du sud. XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège 2015.
- Jamieson, R.C.; Gordon, R.J.; Cochran, L.M.; Madani, A. and Burney, J.R., 2002.** Land application of milking centre wastewater. Canadian Biosystem Engineering, 44: 61- 70.
- Jimenez, B. And Asano, T., 2008.** Water reclamation and reuse around the world. *Water reuse: an international survey of current practice, issues and needs*, 3-26.

- Jiménez, B., Drechsel, P., Koné, D., Bahri, A., Raschid-Sally, L. and Qadir, M., 2010a.** Wastewater, sludge and excreta use in developing countries: an overview. *In: Drechsel, P., Scott, C. A., Raschid-Sally, L., Redwood, M. and Bahri, A. (eds.) Wastewater Irrigation and Health: Assessing and Mitigating Risk in Low-Income Countries.* London, UK: Earthscan.
- JORA., 2006.** Valeurs limites des paramètres de rejets effluents liquides industriels. Journal Officiel de la République Algérienne, 23 Avril 2006, Algérie, 27 p.
- Journal Officiel, 41/2012.** Arrêté interministériel du 2 janvier 2012 Fixant les spécifications des eaux usées propres utilisées pour l'irrigation, Journal officiel de la République algérienne N° 41, 2012, p. 27.
- Keraita, B. and Drechsel, P., 2004.** Agricultural use of untreated urban wastewater in Ghana. *Wastewater use in irrigated agriculture: Confronting the livelihood and environmental realities*, 101-112.
- Khoury, N.; Kalbermatten, J.M. and Bartone, C.R., 1994.** The reuse of wastewater in agriculture: A guide for planner. UNDP-world bank water and sanitation program report No. 6: 1-43.
- Kirkham, M. B., 2006.** Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation and amendments. *Geoderma* 137 (1-2), 19-32 (14 pages).
- Kramer P.J., 1983.** Water relations of plants. New York: Academic Press. 489 P.
- Kretschmer, N.; Ribbe, L. and Gaeses, H., 2003.** Wastewater reuse for Agriculture. *Technology Resource Management and Development, -Scientific Contributions for Sustainable Development 2: 37-64.*
- Lazarova, V. and Bahri, A., 2004.** Water reuse for irrigation: agriculture, landscapes, and turf grass, CRC Press.
- Li, Q.S., Chen, Y., Fu, H.B., Cui, Z.H., Shi, L., Wang, L.L., Liu, Z.F., 2012.** Health risk of heavy metals in food crops grown on reclaimed tidal flat soil in the Pearl River Estuary, China. *J. Hazard. Mater.* 227-228, 148–154.
- Logan, T.J. and Chaney, R.L., 1983.** Utilization of municipal wastewater and sludge on land-metals. University of California: 235-326.
- Loué, A., 1993.** *Oligo-éléments en agriculture.* Paris : Editions Nathan, 1993, 2e éd., viii, 577 p.
- Lucho-constantion, C.A.; Alvarez-Suarez, M.; Beltran-Hernandez, R. Prieto-Garcia,**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

F.and Poggi-Varaldo, H.M., 2004. A multivariate analysis of the accumulation and

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

fractionation of major and trace elements in agricultural soils in Hidalgo Stated, Mexico irrigated with raw wastewater. Elsevier Environ. Int.:1-11.

Lucho-constantion, C.A.; Prieto-Garcia, F.; Del Razo, L.; Rodriguez- Vazquez, R.and Poggi-Varaldo, H.M., 2004. Chemical fractionation of boron and heavy metals in farming soils of central Mexico. Influence of long-term wastewater irrigation. Agric. Ecosystem environ.

Luo, J.; Lindsey, S. and Xue, J., 2004. Irrigation of meat processing wastewater onto land. Agricultural, Ecosystems and Environment, 103: 123-148.

Ma (L.Q.), Rao (G.N.), 1997. Chemical fractionation of cadmium, copper, nickel, and zinc in contaminated soils. *J. Environ. Qual.*, 1997, 26(1), 259-264.
<http://lqma.ifas.ufl.edu/PUBLICATION/Ma-97d.pdf>

Mancl, K. and Rector, D., 1997. Reuse of reclaimed wastewater through irrigation for Ohio communities. Bulletin, 860. The Ohio stated University. TDD No. 800-589-8292.

Mancosu, N., Snyder, R. L., Kyriakakis, G. and Spano, D., 2015. Water Scarcity and Future Challenges for Food Production. *Water*, 7, 975-992.

Mancino, C.F. and Pepper, I.L., 1992. Irrigation of turfgrass with secondary sewage effluent : Soil quality. *Agron. J.* 84(4):650-654.

Martens, D.C. and Westermann, D.T., 1991. Fertilizer applications for correcting micronutrient deficiencies in micronutrients in agriculture. Soil Science society of America, Book series No. 4

Mathan, K.K., 1994. Studies on the influence of long-term municipal sewage effluent irrigation on soil physical properties. *Bioresource Technology*, 48(3): 275-276.

McBirde, M.B.; Richards, B.K. and Steenhuis, T.S., 2004. Bioavailability and crop uptake of trace elements in soil columns amended with sewage sludge products. *Plant and soil*. Available form: www.kluweronline.com/issn/003-079x.

McGrath, S.P; Chaney, R. L. and Witter, E., 1994. Land application of sewage sludge: scientific perspectives of heavy metal loading limits in Europe and the United States. *Environ. Rev.* 2: 108-118.

Meddi. H, M. Meddi., 2007. Spatial and temporal variability of rainfall in North West of Algeria, *Geogr. Tech.* 2 (2007) 49–55.

Medkour M., 2002. Réutilisation des eaux usées épurées. Forum de la gestion de la demande en eau : Réutilisation des eaux usées, 26 et 27 Mars 2002, Rabat, 11 p.

- Meli, S.; Porto, M.; Belligno, .A.; Bufo, S.A.; Mazzatura, A. and Scopa, A., 2002.** Influence of irrigation with lagooned urban wastewater on chemical and microbiological soil parameters in citrus orchard under Mediterranean condition. Elsevier, the science of the total environment, 285: 69-77.
- Mendoza, C.A.; Cortes, G. and Munoz, D., 1996.** Heavy metal pollution in soils and sediments of rural developing district, 063, Mexico, Environmental Toxicology and water Quality, 11(4):327-333.
- Menner, J.C.; Mclay, C.D.A. and Lee, R., 2001.** Effects of sodium – contaminated wastewater on soil permeability of two Nezealand soils. Australian Journal of soil research, 39: 877-891.
- Mills, C.F. and Davis, G.K., 1986.** Trace elements in human and animal nutrition. 5th edition, Academic press, Inc.: 429-463.
- Ministry of Water Resources (MWE),** Note of Synthesis, Activity in 2012.
Available from: www.mre.dz/.
- 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.
- Mohammed A. Alghobar, S. Suresha., 2017.** Evaluation of metal accumulation in soil and tomatoes irrigated with sewage water from Mysore city, Karnataka, India. 2015. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences (2017) 16, 49–59.
- Mousa, S.; Mohsen, J. and Jaber, O., 2002.** Potential of industrial wastewater reuse. Elseveir , Desalination, 152: 281 – 289.
- Nedelescu, M., Baconi, D., Neagoe, A., Iordache, V., Stan, M., Constantinescu, P., Ciobanu, A.-M., Vardavas, A.I., Vinceti, M., Tsatsakis, A.M., 2017.** Environmental metal contamination and health impact assessment in two industrial regions of Romania. Sci. Total Environ. 580, 984–995
- NSO., 2013.** Reuse of Treated Wastewater (REUE) Document the National Office for Sanitation. Available from: <http://www.ona-dz.org/REUE.html> (Accessed on 14 December 2013).
- Office National de l'Assainissement., 2014.** PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT. Réutilisation des eaux usées épurées à des fins agricoles, municipales et industrielles, Spécifications physico-chimiques et biologiques. NA 17683: 2014.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

OMS., 1989. L'utilisation des eaux usées en agriculture et aquaculture : Recommandation avisées sanitaires. Organisation Mondiale de la Santé, Série de rapports techniques N° 778, Genève, 82 p.

ONA., 2011. Descriptif de fonctionnement et d'exploitation de la station d'épuration de Guelma, Ministère des Ressources en Eaux, Office National de l'Assainissement, Algérie, 64

Overcash, M.R., 1983. Land treatment of municipal effluent and sludge: specific organic compounds. Workshop, University of California.

Pagliai, M.; Guidi, G.; La Marea, M.; Giachetti, M. and Lucamante, G., 1981. Effects of sewage sludge and compost on soil porosity and aggregation. *Journal of Environmental Quality*, 10: 556-561.

Paliwal K., Karunaichamy K.S.T.K et Ananthavalli M., 1998. Effect of sewage water irrigation on growth performance, biomass and nutrient accumulation in *Hardwickia binata* under nursery conditions. *Bioresource technology* 66, 105-111.

Patterson C., 1980. An alternative perspective lead pollution on the human environment: Origin, Extent and significance. In: *Lead in the Human Environment: A Report*. National academies, Washington DC.

Peralta L et Spooner D., 2002. History, Origin and Early Cultivation of Tomato (Solanaceae), Agricultural Research Service, USDA, 2 février 2002, Consulté le 15 mai 2009. www.ars.usda.gov

Pescod, M.B., 1992. Wastewater treatment and use in agriculture. FAO irrigation and drainage paper 47, FAO, Rome.

Pettygrove, G.S. and Asano, T., 1985. Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater A guidance Manual. Chelsea, Mich. Lewis publishers.

Philouze J. et Laterrot H., 1992. Amélioration variétale de la tomate : objectifs et critère de sélection. In :Galais A et Bennerot H.,Eds Amélioration variétale des espèces cultivées, Paris, France INRA pp 379-391.

Pitrat M. & Foury C., 2003. Histoires de légumes, des origines à l'orée du XXIe siècle, INRA, Paris, 2003, p. 268.

Poggi-Varaldo, H.M, and Rinderkenceht-Seijas, N.A., 2003. A differential availability enhancement factor for the evaluation of pollutant availability in soil treatments. *Acta Biotechnol.* 23: 80-271.

Pypers, P., Sanginga, J.-M., Kasereka, B., Walangululu, M., Vanlauwe, B., 2011. Increased productivity through integrated soil fertility management in cassava– legume

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

intercropping systems in the highlands of Sud-Kivu, DR Congo. *Field crops research* 120, 76-85.

Qadir, M. and Scott, C. A., 2010. Non-pathogenic trade-offs of wastewater irrigation. *In: Drechsel, P., Scott, C. A., Raschid-Sally, L., Redwood, M. and Bahri, A. (eds.) wastewater irrigation and health: Assessing and Mitigating Risk in Low Income Countries.* London: earthscan.

Ragab, R. C. Prudhomme., 2002. Climate change and water resources management in arid and semi-arid regions: Prospective and challenges for the 21st century, *Biosyst. Eng.* 81 (2002) 3–34.

Ramirez, F.E.; Lucho, C.C.; Escamilla, S.E. and Dendooven, L., 2002. Characteristics and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different length of time. *Bioreso. Technol.* 85(2): 87-179.

Raschid-Sally, L. and Jayakody, P., 2009. *Drivers and characteristics of wastewater agriculture in developing countries: Results from a global assessment*, IWMI.

Rattan, R.K., S.P. Datta, A.K. Singh, P.K. Chhonkar. and K. Suribabu., 2001. Effects of long-term application of sewage effluents on available nutrient and available water status in soils under Keshopur effluent irrigation scheme in Delhi. *J. Water Manage.* 9: 21–26.

Rattan, R.K., S.P Datta, P.K. Chhankar, K. Suribabu and A.K. Singh., 2004. Long term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal contents in soils, crops and groundwater – a case study. *Agric. Ecosystems Environ.* 109: 310–322.

Rattan, R.K., S.P. Datta, S. Chandra and N. Sahran., 2002. Heavy metals and environmental quality: Indian scenario. *Fertile. News*, 47: 21–40.

Rhoades, J.D.; Kandiah, A. and Mashali, A.M., 1992. The use of saline waters for crop production. **Rimini. B., 2010.** The problematic of the water in northern Algeria, *Larhyss J.* 80 (2010) 27–46.

Roula S., 2005. Caractérisation physico-chimiques et valorisation des boues résiduaires urbaines pour la confection de substrats de cultures en pépinière hors-sol. Magister en sciences agronomiques. Université Colonel El Hadj Lakhdar Batna, 115p.

Russell, J.M. and Cooper, R.N., 1992. The use of meat processing effluents for irrigation of pasture: The use of wastewater and by-products as fertilizers and soil amendments for pasture and crops. Report No. 6. Massey University: 208-213.

Sato, T., Qadir, M., Yamamoto, S., Endo, T. and Zahoor, A., 2013. Global, regional, and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use. *Agricultural Water Management*, 130, 1-13.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Schacht, K., Chen, Y., Tarchitzky, J. and Marschner, B., 2016.** The Use of Treated Wastewater for Irrigation as a Component of Integrated Water Resources Management: Reducing Environmental Implications on Soil and Groundwater by Evaluating Site-Specific Soil Sensitivities. *In: Borchardt, D., Bogardi, J. J. and Ibsch, B. R. (eds.) Integrated Water Resources Management: Concept, Research and Implementation.* Cham: Springer International Publishing.
- Scheierling, S. M., Bartone, C., Mara, D. D. and Drechsel, P., 2010.** Improving Wastewater Use in Agriculture An Emerging Priority. *In: The World Bank Water Anchor Energy, T., and Water Department (ed.).*
- Scott, C. A., Faruqui, N. I. and Raschid-Sally, L., 2004.** 1. Wastewater Use in Irrigated Agriculture: Management Challenges in Developing Countries. *In: C. A Scott, Faruqui, N. I., Naser, I. and Raschid-Sally, L. (eds.) Wastewater use in irrigated agriculture: confronting the livelihood and environmental realities.* UK: CABI.
- Scott, C. A., Zarazua, J.A. and Levine, G., 2000.** Urban-wastewater reuse for crop production in the water-short Guanajuato river basin, Mexico. Colombo Srilanka. Research report 41: International Water Management Institute (IWMI).
- Servais P., Garnier J., Demarteau N., Brion N., Billen G., 1999.** Supply of organic matter and bacteria to aquatic ecosystems through waste water effluents. *Water Research* 33, 3521-3531.
- Schäfer (U.) - Manganese. In Merian, E., Anke M., Ihnat M., Stoepler Eds., 2004.** *Elements and their compounds in the environment: occurrence, analysis and biological relevance. 2, Metals and their compounds.* Weinheim: Wiley-VCH, 2004, 2nd ed. completely rev. and enlarged, p. 901-930 (xLii, 479-1247).
- Sheikh, B.; Cort, R.P.; Kirkpatrick, W.R.; Jaques, R.S. and Asano, T., 1990.** Monterey wastewater reclamation study by agriculture. *Research J. Water pollut. Contr.* 62: 216-226.
- Shuval H.I., Yekutieli P. and Fattal B., 1985.** Epidemiological evidence for helminth and cholera transmission by vegetables irrigated with wastewater. Jerusalem - case study. *Water Science and Technology* 17(4/5):433-442.
- Singh, K.P.; Mohan, D.; Sinha, S. and Dalwani, R., 2004.** Impact assessment of treated/untreated wastewater toxicants discharged by sewage treatment plants on health, agricultural and environmental quality in wastewater disposal area. *Chemosphere*, 52(2): 55-227.
- Skiredje, A., 2005.** Besoins des plantes en eau et en éléments nutritifs. Département d'Horticulture, Maroc, 10 p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Smith A.F., 2001. The tomato in America, Early history, culture, and cooking, University of Illinois Press, p. 15.

Snow, V.O.; Dillon, P.J.; Bond, W.J.; Smith, C.J. and Myers, B.J., 1999. Effect of plant production system and climate on risk of ground water contamination from effluent irrigation. *Water* 26: 26-29.

Souguir A., Baouab M.H and Barttegi A., 2001. Traitement et réutilisation des rejets en eaux usées riches en colorant des industries textiles. Institut Supérieur de Biotechnologie de Monastir (ISBM), Laboratoire de Biochimie et Environnement , Tunisie, 10p.

Sparks, L.D., 2003. Environmental soil chemistry. Academic Press, 2nd Edition, 367 p.

Stagnitii, F.; Sherwood, J.; Allinson, G. and Evans, L., 1998. Investigation of localized soil heterogeneities on solute transport using a multisegement percolation system. *NZ J Agric. Res.* 41: 603-612.

Tamrabet L., 2011. Contribution à l'étude de la valorisation des eaux usées en maraichage. Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie, 146 p.

Teibaut B., Comps B., Tessier D.H., 1990. Développement des axes des arbres : pousse annuelle, Syllepsie et probepsie chez le Hêtre (*Fagus sylvatica*) can. *J.Bot.* 68 :202-211.

USSLS., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. US Department of Agriculture, Handbook N° 60, 160 p.

Van de Graaff, R.H.; suter, H.C. and Lawes, S.J., 2002. Long-term effects of municipal sewage on soils and pastures. *Journal of Environ. Science*, 37(4): 57-745.

Van Der Hoek, W., 2004. A framework for a global assessment of the extent of wastewater irrigation: The need for a common wastewater typology. *In: SCOTT, C. A.,*

Vazquez Montiel, O., Horan, N.J. and Mara, D.D., 1996. Management of domestic wastewater for reuse in irrigation. *Water Sci. Technol.*, 33(10-11):355-365.

Vinod Kumar, A. K. Chopra., 2011. Impact on physico-chemical characteristics of soil after irrigation with distillery effluent. *Archives of Applied Science Research*, 2011, 3 (4):63-77.

Wang, X.; Chen, T.; Liang, R. and Zhou, Q., 2002. Effect of land utilization of sewage sludge on crops and soils. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao.*, 13(2): 6-163.

Webber, M.D.; Pietz, R.I.; Granato, T.C. and Swobota, M.L., 1994. Plant uptake of PCBs and other organic contaminations from sludge-treated coal refuse. *Journal of Environmental Quality*, 23: 1019-1026.

WHO., 2006. *Guidelines for the Safe Use of Wasterwater Excreta and Greywater, volume2: wastewater use in agriculture*, World Health Organisation, Geneva.

WHO., 1989. The Use of Wastewater in Agriculture and Aquaculture: Health Guidelines,

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Report of a WHO Scientific Group, Technical Report Series 778, Geneva, 1989, p 17-60-84.

Wichelns, D., Drechsel, P. and Qadir, M., 2015. Wastewater: Economic Asset in an Urbanizing World. *Wastewater*. Springer.

Winpenny, J. T., Heinz, I., Koo-Oshima, S., Winpenny, J. T. and Winpenny, J. T., 2010. *The wealth of waste: The economics of wastewater use in agriculture*, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

World commission on Environmental and Development "WCED"(1987)., Our common future. Oxford, UK. Oxford University press.

Xanthoulis D., 1993. Valorisation agronomique des eaux usées des industries agroalimentaires. Tribune de l'eau. Ed. CEBEDOC 3, 27-32.