

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة البليدة 1

UNIVERSITE DE BLIDA 1



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département d'Agro-alimentaire

Laboratoire de Recherche en Sciences, Technologies Alimentaires et Développement Durable.

THÈSE

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat D-LMD Spécialité :
Sécurité Agroalimentaire et Assurance Qualité

THÈME

**Impact de l'irrigation aux eaux usées traitées sur certains
produits maraîchers : Étude du potentiel toxique**

Par

CHIRANE Manel Soumia

شيران منال سمية

Présidente	DOUMANDJI Amel	Professeur	U. Blida 1
Directrice de thèse	BELMESKINE Hayet	MCA	U. Blida 1
Co-directeur de thèse	MEGATLI Smain	Professeur	U. Blida 1
Examineurs	AOUABED Ali	Professeur	U. Blida 1
	DEBIB Aicha	Professeur	U. Tipaza
	METAHRI Mohamed Said	MCA	U. Tizi Ouzou

2023/2024

DÉDICACES

Je dédie ce travail ;

*A mon très chers père CHIRANE Said Rabi Yarahmou
qui m'a toujours encouragés d'aller en avant,
A ma chère Maman qui m'a soutenue tout au long de mon parcours
, je ne pourrai jamais les remercier assez.*

*A mes chères sœurs et chers frères :
Nadjla, Amina, Amine, Yasser et Yassine ;
que DIEU les protègent.*

Manel Soumia CHIRANE

REMERCIEMENTS

الحمد لله الذي أعانني على إنهاء هذا العمل وسخر لي القوة لإتمامه
*Louange à dieu seul et unique à qui j'adresse mes amples
remerciements*

*Je tiens à remercier ma Directrice de thèse
Docteur Belmeskine Hayet
pour la disponibilité et la précieuse aide avec laquelle
elle m'a dirigé tout au long de ce travail.
Qu'elle trouve ici l'expression de ma
reconnaissance et mon profond respect.*

*Je tiens à remercier mon Co-directeur de thèse
Professeur Megatli Smain
Je lui exprime mon profond respect.*

*J'exprime mes plus sincères remerciements aux membres de jury
qu'ils ont accepté la lourde tâche de lire l'intégralité de ce
manuscrit et de participer au jury de ma soutenance.
Aussi je leur suis reconnaissante de m'avoir accordé de leurs temps.*

*J'exprime mes reconnaissances à Mm Hamouda Hasna et
Mr Reguieg Liès ; je tiens à les remercier infiniment.*

*Mes remerciements vont également à Mm Amel et Mm Chahrazed
de la STEP de Barakï qui m'ont facilité le travail*

*Mm Haoua Mohamedi, Zina et mohamed
du laboratoire de SEAAAL
Je tiens aussi à remercier Monsieur Tager belkacem
et Dilmi Redha du laboratoire CRAPC
Mr Bouyahiaoui et Semiani de l'INRAA
qui m'ont permis de réaliser la partie expérimentale*

*J'offre aussi un bouquet de remerciements à toutes les personnes
qui m'ont aidé à réaliser les analyses à l'ENSA en particulier
Mr Benchabane H.; Mr Amiali, Mm Ilham et Mr Radouan*

*Sans oublier Madame farida Alane et Monsieur Boudjellaba sofiane
que je remercie infiniment pour leur aide précieuse.*

*Pour toutes les personnes qui m'ont encouragé et soutenu
Berrama Zahra, Dahmani Amina, Saidj Dilia,
Nadia Benali, Bellabas Rafik de l'ENSV.*

*Mes chères amies Sarah, Dallah et Sabrina
qui m'ont toujours encouragé un grand merci.*

*Que tous ceux qui ont, de près ou de loin, participé à la réalisation
de ce travail et qui n'ont pas été cités nommément qu'ils trouvent
ici l'expression de ma profonde gratitude.*

Résumé

Dans cette contribution, les eaux usées traitées de la STEP de Baraki ont été évaluées pour l'irrigation sur la base de la composition chimique et bactériologique comparée aux normes internationales et nationales de la qualité de l'eau d'irrigation. La qualité pour la réutilisation agricole est liée aux paramètres physicochimiques tels que le pH, la conductivité, les MES, la DCO, les ETM et les indicateurs de qualité tels que le SAR, le SSP et le RSC. Les caractéristiques bactériologiques, notamment les coliformes totaux, coliformes fécaux, *E. coli*, entérocoques fécaux, *Salmonelle* et *Staphylocoque* ont également été évaluées. Les résultats ont révélé que les valeurs SAR et SSP étaient excellentes pour l'irrigation. Le diagramme de Wilcox a montré que la plupart des échantillons se situent dans la zone C3-S1, ce qui indique une salinité élevée et une faible teneur en sodium qui peut être utilisée pour l'irrigation sur presque tous les types de sol sans risque de sodium échangeable. Les concentrations moyennes des ETM sont négligeables par rapport aux recommandations de la FAO. Les résultats physicochimiques indiquent que les eaux usées traitées peuvent être classées avec quelques exceptions comme appropriées à l'irrigation. Cependant, les analyses bactériologiques ont indiqué l'existence des germes de contamination fécale dépassant la réglementation de l'OMS mais une absence de germes pathogènes *Salmonelle* et de *staphylocoques*. Par conséquent, la désinfection de cette eau usée traitée est nécessaire avant son utilisation à des fins agricoles. L'impact de l'irrigation de ces eaux usées traitées (EUT) a été évalué sur une culture de tomate industrielle en comparaison avec les eaux conventionnelles (EC) et le système goutte à goutte a été appliqué pour éviter toute contamination. L'évolution des paramètres morphologiques et agronomiques tout au long du cycle de la tomate ont été observés et évalués ainsi que les paramètres de développement et de production. Les résultats obtenus ne montrent aucune différence significative de la hauteur et le diamètre de la tige, le nombre de feuilles et la teneur en chlorophylle. Ces résultats sont encourageants puisque le développement des plantes de tomate est similaire pour les deux traitements ce qui permet d'envisager une possibilité d'une réutilisation des EUT sans que cela conduit à un impact négatif sur les principaux paramètres agronomiques de la plante. Le nombre de fruit produit par les plants de tomate irrigués avec EUT est supérieur à celui produit par EC. Une différence non significative du poids total des fruits de tomate ; de même le poids moyen des fruits obtenus ne présente aucune différence significative entre les deux traitements. Par contre, la largeur et la longueur des fruits obtenus par EUT présentent une différence très hautement significative par rapport à ceux obtenus par EC et ceci montre que la qualité de l'eau d'irrigation a affecté les paramètres morphologiques du fruit de tomate.

Une présence des ETM à savoir le Pd, Ni, Cr, Mn et le Cu est observée au niveau des racines, tiges et feuilles mais les valeurs trouvées sont inférieures aux limites de sécurité des plantes. Les concentrations du Ni, Mn et Cu détecté dans le fruit de tomate irrigué par les EUT et EC sont inférieures aux limites maximales admissibles et ne présentent aucune menace de toxicité. Aucune différence n'est observée entre les fruits des deux traitements pour les valeurs du pH, acidité titrable, matière sèche et matière grasse ; tandis que les valeurs des sucres totaux et de vitamine C sont plus élevées pour les tomates irriguées avec EUT et les valeurs des matières minérales et les protéines sont plus élevées pour les tomates irriguées par EC. Aucune contamination microbienne n'est détectée et les fruits obtenus sont de bonne qualité. Les tomates obtenues ne représentent aucun risque sanitaire et peuvent être destinées à la consommation humaine si d'autres paramètres chimiques seront évalués.

Mots clés : Eaux usées traitées, réutilisation agricole, irrigation, qualité physicochimique et microbiologique, métaux lourds, tomate

Abstract

In this contribution, the treated wastewater from the Baraki wastewater treatment plant was evaluated for irrigation based on its chemical and bacteriological composition compared to international and national standards for irrigation water quality. The quality for agricultural reuse is related to physicochemical parameters such as pH, conductivity, suspended solids, chemical oxygen demand, heavy metals, and quality indicators such as SAR, SSP, and RSC. The bacteriological characteristics total coliforms, fecal coliforms, E. coli, fecal enterococci, Salmonella and Staphylococcus have also been evaluated. The results revealed that the SAR and SSP values were excellent for irrigation. The Wilcox diagram showed that most samples are located in the C3-S1 zone, indicating high salinity and low sodium content which can be used for irrigation on almost all types of soil without the risk of exchangeable sodium. The average concentrations of heavy metals are very low compared to the recommendations of the FAO. The physicochemical results indicate that the treated wastewater can be classified with a few exceptions as suitable for irrigation. However, the bacteriological analyses indicated the presence of fecal contamination germs exceeding the WHO regulation but an absence of pathogenic germs such as Salmonella and staphylococcus. Consequently, the disinfection of this treated wastewater is necessary before its use for agricultural purposes. The impact of irrigating with treated wastewater (TWW) has been assessed on an industrial tomato crop compared to conventional water (CW), and a drip irrigation system was implemented to prevent any contamination. The evolution of morphological and agronomic parameters

throughout the tomato cycle has been observed and evaluated, along with the parameters of development and production. The results obtained show no significant difference in the height and diameter of the stem, the number of leaves and the chlorophyll content. These results are encouraging since the development of the tomato plants is similar for both treatments, which suggests the possibility of reusing the TWW without leading to a negative impact on the main agronomic parameters of the plant. The number of fruits produced by tomato plants irrigated with TWW is higher than that produced by CW. The total weight of the tomato fruits does not significantly differ likewise, the average weight of the fruits obtained shows no significant difference between the two treatments. On the other hand, the width and length of the fruits obtained by TWW show a highly significant difference compared to those obtained by CW indicating that the quality of the irrigation water has affected the morphological parameters of the tomato fruit. Contamination by heavy metals notably Pd, Ni, Cr, Mn, and Cu is observed in the roots, stems, and leaves but the values found are below the safety limits for plants. The amounts of Ni, Mn, and Cu observed in the tomato fruit irrigated with TWW and CW are under the maximum permissible levels, and no risk of toxicity is posed. No difference is observed between the two treatments for pH values, titratable acidity, dry matter, and fat content; whereas the values of total sugars and vitamin C are higher for tomatoes irrigated with TWW, and the values of mineral matter and proteins are higher for tomatoes irrigated with CW. No microbial contamination is detected and the fruits harvested are good quality. The tomatoes produced provide no health concern and can be meant for human consumption if other chemical parameters will be evaluated.

Keywords: Treated wastewater, agricultural reuse, irrigation, physicochemical and microbiological quality, heavy metals, tomato

ملخص

في هذه المساهمة، تم تقييم مياه الصرف الصحي المعالجة من محطة معالجة مياه الصرف الصحي في براقى للاستخدام في الري، استنادًا إلى التركيب الكيميائي والجرثومي مقارنة بالمعايير الدولية والوطنية لجودة مياه الري. ترتبط جودة إعادة الاستخدام الزراعي بالمعايير الفيزيائية والكيميائية مثل الرقم الهيدروجيني، التوصيل الكهربائي، المواد المعلقة، الطلب الكيميائي والبيوكيميائي للأكسجين، المعادن الثقيلة ومؤشرات الجودة مثل SAR و SSP و RSC. تم تقييم الخصائص البكتريولوجية، بما في ذلك الكوليفورم الإجمالي، الكوليفورم البرازي، الإشريشية القولونية، الإنتيروكوكوس البرازي، السالمونيلا، والسيتافيلوكوكوس أيضًا. أظهرت النتائج أن قيم SAR و SSP كانت ممتازة للري وأظهر مخطط ويلكوكس أن

معظم العينات تقع في المنطقة C3-S1 ، مما يشير إلى ملوحة عالية وانخفاض في مستوى الصوديوم، مما يسمح باستخدامه للري على معظم أنواع التربة دون خطر الصوديوم القابل للتبادل. تعتبر التركيزات المتوسطة للمعادن الثقيلة ضئيلة مقارنة بتوصيات منظمة الأغذية والزراعة FAO. تشير النتائج الفيزيائية والكيميائية إلى أن المياه المستعملة المعالجة يمكن تصنيفها، مع بعض الاستثناءات، على أنها مناسبة للري. ومع ذلك، أظهرت التحليلات البكتريولوجية وجود جراثيم تلوث بكتيري تفوق المعايير المحددة من قبل منظمة الصحة العالمية OMS ولكن لم تُكتشف جراثيم مرضية من نوع السالمونيلا أو المكورات العنقودية. وبالتالي، فإن تعقيم هذه المياه الصرف الصحي المعالجة ضروري قبل استخدامها لأغراض زراعية. تم تقييم تأثير الري بهذه المياه المستعملة المعالجة (EUT) على زراعة الطماطم الصناعية مقارنة بالمياه التقليدية (EC) وتم تطبيق نظام الري بالتنقيط لتجنب أي تلوث. تمت ملاحظة وتقييم تطور المعايير المورفولوجية والزراعية طوال دورة حياة الطماطم، بالإضافة إلى معايير النمو والإنتاج. النتائج التي تم الحصول عليها لا تظهر أي فرق ذو دلالة إحصائية في ارتفاع وقطر الساق، عدد الأوراق ومحتوى الكلوروفيل. تعتبر هذه النتائج مشجعة حيث إن نمو نباتات الطماطم متشابه مما يتيح إمكانية إعادة استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة دون أن يؤدي ذلك إلى تأثير سلبي على المعايير الزراعية الرئيسية للنبات. عدد الفواكه التي تنتجها نباتات الطماطم المروية باستخدام (EUT) أعلى من تلك المروية باستخدام (EC) ونلاحظ فرق غير دلالي في الوزن الإجمالي لثمار الطماطم؛ كما أن الوزن المتوسط للثمار الناتجة لا يظهر أيضاً أي فرق دلاليين المعالجتين. من ناحية أخرى، فإن عرض وطول الثمار التي تم الحصول عليها من (EUT) يظهر فرقاً ذا دلالة عالية جداً مقارنة بتلك التي تم الحصول عليها من (EC) ، وهذا يدل على أن جودة مياه الري قد أثرت على المعايير الشكلية لثمار الطماطم. تمت ملاحظة التلوث بالمعادن الثقيلة مثل Cu, Mn, Cr, Ni, Pd على مستوى الجذور والسيقان والأوراق، لكن القيم التي تم العثور عليها أقل من حدود الأمان للنباتات. تركيزات Ni, Cu, Mn المكتشفة في ثمار الطماطم المروية بواسطة EUT و EC أقل من الحدود القصوى المسموح بها ولم تشكل أي تهديد للتسمم. لا يُلاحظ أي فرق بين العلاجين من حيث قيم الرقم الهيدروجيني، الحموضة القابلة للتبادل، المادة الجافة والمادة الدهنية؛ بينما قيم السكريات الكلية وفيتامين C أعلى بالنسبة للطماطم المروية باستخدام EUT ، وقيم المواد المعدنية والبروتينات أعلى بالنسبة للطماطم المروية باستخدام EC. لم يتم الكشف عن أي تلوث ميكروبي، والفواكه الناتجة ذات جودة جيدة. الطماطم التي تم الحصول عليها لا تمثل أي خطر صحي ويمكن أن تكون موجهة للاستهلاك البشري وذلك بعد القيام باختبارات فيزيائية أخرى.

الكلمات المفتاحية: المياه العادمة المعالجة، إعادة الاستخدام الزراعي، الري، الجودة الفيزيائية والكيميائية والميكروبيولوجية، المعادن الثقيلة، الطماطم

Sommaire

Introduction	1
Chapitre I : Synthèse bibliographique	4
I.1. Etat des lieux du climat et de l'eau	4
I.1.1. Le changement climatique	4
I.1.2. Les ressources en eau	5
I.1.3. La situation en l'Algérie	6
I.1.3.1. Le climat de l'Algérie	7
I.1.3.2. Les ressources en eau de l'Algérie	7
I.1.3.3. Organisation des services de l'eau	8
I.1.3.3. Les dépenses d'investissement (barrages, forages, unités de dessalement)	9
I.1.3.4. L'hydraulique agricole	10
I.2. Réutilisation des eaux usées traitées en agriculture	12
I.2.1. Situation Mondiale	12
I.2.2. Réutilisation mondiale des eaux usées traitées en irrigation	12
I.2.3. Les avantages de la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture	15
I.2.4. Les risques liés à la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture	16
I.2.5. Le stockage des eaux usées traitées pour la valorisation agricole	18
I.3. Réutilisation des eaux usées traitées en Algérie	19
I.3.1. État des lieux de l'assainissement urbain	19
I.3.2. Situation de la réutilisation des EUT en Algérie	19
I.3.3. Potentiel de réutilisation des EUT en agriculture	20
I.3.4. Les obstacles de la réutilisation des eaux usées traitées	22
I.4 Traitement des eaux usées	30
I.4.1 Définition des eaux usées	30
I.4.2 Origine des eaux entrant en station d'épuration	30
I.4.2.1. Les eaux domestiques	30
I.4.2.2. Les eaux industrielles	30
I.4.2.3. Les eaux de ruissellement	30
I.4.3. Les niveaux du traitement des eaux usées	30
I.4.3.1. Le pré-traitement	30
I.4.3.2. Le traitement primaire	31
I.4.3.3. Le traitement secondaire ou biologique	31
I.4.3.4. Le traitement tertiaire et/ou avancé	31
I.4.4. Evaluation de la qualité des eaux usées pour l'irrigation	32
I.4.4.1. Le potentiel d'hydrogène (pH)	32
I.4.4.2. La conductivité électrique (EC)	32
I.4.4.3. Les matières en suspension (MES)	32
I.4.4.4. La demande chimique en oxygène (DCO)	32
I.4.4.5. La demande biochimique en oxygène (DBO)	32
I.4.4.6. Indice de biodégradabilité	32
I.4.5. Normes et réglementations en vigueur	36
I.4.5.1. Les directives de la FAO	36
I.4.5.2. Recommandations de l'OMS	37
I.4.5.3. Recommandations de l'USEPA	39
Chapitre II : Matériels et méthodes	41

II.1. Evaluation de la qualité des eaux usées traitées de la STEP de Baraki pour une réutilisation agricole	41
II.1.1. Localisation et présentation de la STEP	41
II.1.2. Principe et fonctionnement de la STEP	41
II.1.3. Prélèvement des échantillons de l'EUT	43
II.1.4. Analyse physico-chimique de l'eau usée traitée	45
II.1.4.1. Mesure du pH et conductivité électrique (CE)	45
II.1.4.2. Mesure des matières en suspension (MES)	45
II.1.4.3. Détermination de la demande biologique en oxygène (DBO5)	45
II.1.4.3. Détermination de la demande chimique en oxygène (DCO)	45
II.1.4.4. Dosage de l'azote et du phosphore	45
II.1.4.5. Mesure des cations et anions	46
II.1.4.6. Analyse des métaux lourds	46
II.1.5. Indicateurs de la qualité de l'eau pour l'irrigation	46
II.1.5.1. Rapport d'Adsorption du Sodium (SAR)	46
II.1.5.2. Pourcentage du Sodium Soluble (SSP)	46
II.1.5.3. Carbonates de sodium résiduels (RSC)	47
II.1.6. Analyse bactériologique	48
II.1.6.1. Les coliformes totaux	48
II.1.6.2. Entérocoques fécaux	49
II.1.6.3. Recherche et dénombrement des Staphylocoques	49
II.1.6.4. Recherche et dénombrement des Salmonelles	50
II.1.7. Analyse statistique	51
II.2. Etude de l'impact de la réutilisation des eaux usées traitées de la STEP de Baraki sur une culture de tomate « <i>Solanum lycopersicum</i> ».	52
II.2.1. Site d'étude	52
II.2.2. Localisation de l'expérimentation	52
II.2.3. Installation de l'essai	52
II.2.4. Evaluation des conditions climatiques au niveau de la serre	54
II.2.4.1. Température de l'air	54
II.2.4.2. Humidité de l'air	54
II.2.5. La protection phytosanitaire de la culture	54
II.2.6. Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation	55
II.2.6.1. Analyse physico-chimique	55
II.2.6.2. Analyse microbiologique	56
II.2.6.3. Analyse parasitologique	56
II.2.7. Impact de la réutilisation des EUT sur le sol	57
II.2.7.1. Analyse physico-chimique du sol	57
II.2.7.2. Analyse des métaux lourds du sol	58
II.2.8. Impact de la réutilisation des EUT sur les paramètres morphologiques et agronomiques de la plante	58
II.2.8.1 Evaluation des paramètres de croissance	58
II.2.8.2. Evaluation des paramètres de développement (Floraison- Nouaison)	59
II.2.8.3. Evaluation des paramètres de production	60
II.2.9. Evaluation de la qualité des fruits de tomate	61
II.2.9.1. Analyse microbiologique des fruits de tomate	61
II.2.9.1.1. Préparation de la suspension mère	62
II.2.9.1.2. Dénombrement des coliformes totaux et fécaux	62
II.2.9.1.3. Recherche et dénombrement des Entérocoques fécaux	62

II.2.9.1.4. Dénombrement des Anaérobies Sulfito-Réducteurs (ASR)	62
II.2.9.1.5. Recherche des levures et moisissures	63
II.2.9.2. Analyse physico-chimique des fruits de tomate	63
II.2.9.2.1. Lyophilisation des fruits de tomate	63
II.2.9.2.2. Détermination du pH	64
II.2.9.2.3. Détermination de l'acidité titrable	64
II.2.9.2.4. Détermination de la matière sèche	65
II.2.9.2.5. Détermination de la matière minérale	65
II.2.9.2.6. Détermination de la matière azotée totale	65
II.2.9.2.6. Détermination de la matière grasse	66
II.2.9.2.6. Analyse des sucres totaux	67
II.2.9.2.7. Dosage de l'acide ascorbique (vitamine C)	68
II.2.10. Analyse des ETM dans la plante et le fruit de tomate	69
II.2.11. Facteur de bioconcentration	70
La principale entrée des métaux lourds dans les aliments est un transfert du sol vers les différentes parties du légume (Sharma et al, 2018).	70
II.2.12. Analyse statistique	70
Chapitre III : Résultats et discussion	71
III.1. Paramètres physico-chimiques et biologiques des eaux usées traitées de la STEP de Baraki	71
III.1.1. Détermination du pH	71
III.1. 2. Conductivité électrique (CE)	71
III.1.3. Matières en suspension (MES)	72
III.1.4. Demande chimique en oxygène (DCO)	73
III.1.5. Demande biochimique en oxygène (DBO5)	74
III.1. 6. Ratios indicatifs de la qualité des effluents	75
III.1.7. Les matières azotées	76
III.1.8. Le phosphore total (PT)	77
III.1.9. Les ETM	78
III.1.10. Indicateurs de la qualité de l'eau pour l'irrigation	79
III.1.10.1. Rapport d'adsorption du sodium (SAR)	80
III.1.10.2 Pourcentage de sodium soluble (SSP)	80
III.1.10.3 Résiduel du Carbonate de sodium (RSC)	81
III.1.11. Paramètres bactériologiques	83
III.1.12. Surveillance saisonnière de la qualité des eaux usées traitées	84
III.1.13. Corrélation des paramètres physico-chimiques des EUT de la STEP de Baraki	85
III.1.14 Analyse en composantes principales (ACP)	86
III.2. Etude de l'impact de la réutilisation des eaux usées traitées de la STEP de Baraki sur une culture de tomate « <i>Solanum lycopersicum</i> ».	90
III.2.1. Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation	90
III.2.1.1. Qualité physico-chimique	90
III.2.1.2. Qualité bactériologique	92
III.2.2. Caractérisation physico-chimique du sol	93
III.2.3. Evaluation des conditions climatiques sous serre	94
III.2.3.1. Température de l'air	95
III.2.3.2. Humidité de l'air	95
III.2.4. Evaluation des paramètres agronomiques de la plante	96
III.2.4.1. Evaluation des paramètres croissance de la plante	96
III.2.4.1.1. Suivi de l'évolution de la hauteur des plantes de tomate	96

III.2.4.1.2. Suivi de l'évolution du diamètre de tige des plantes de tomate	97
III.2.4.1.3. Evolution du nombre de feuilles des plantes de tomate	99
III.2.4.1.4. Distance entre le sol et le premier bouquet floral	100
III.2.4.1.5. Evaluation de la teneur en chlorophylle	101
III.2.4.2. Evaluation des paramètres de développement	103
III.2.4.2.1. Floraison	103
III.2.4.2.2. Nouaison	103
III.2.4.3. Evaluation des paramètres de production	104
III.2.4.3.1. Le nombre et le poids total des fruits de tomate par traitement	104
III.2.4.3.2. Poids et calibre moyen des fruits de tomate (largeur et longueur)	105
III.2.4.3.3. Comparaison entre le poids, largeur et longueur des fruits par bouquet floral	106
III.2.5. Evaluation des taux des ETM au niveau des plantes de tomate	109
III.2.5.1. Analyses des ETM dans les racines, tiges et feuilles de tomate	109
III.2.5.2. Analyses des ETM dans les fruits de tomate	109
III.2.5.3. Facteur de bioconcentration	110
III.2.6. Composition physico-chimique des fruits de tomate	110
III.2.7. Evaluation de la qualité microbiologique des fruits de tomate	112
Conclusion	114
Références	117
Annexes	i

Liste des figures

Figure 1: Stress hydrique dans le monde d'ici 2040 (World Ressources Institute, 2015)	6
Figure 2 : Organisation des services de l'eau en Algérie.	10
Figure 3 : Volume annuel et pourcentage des eaux usées traitées réutilisées directement pour l'irrigation (Christou et al., 2024).	14
Figure 4 : Approche d'analyse multithématique de la REUSE	15
Figure 5 : Les superficies délimitées et réparties selon le type de culture, le mode d'irrigation et l'origine de l'eau (ONA, 2024).	22
Figure 6 : Carte des STEP concernées par la réutilisation des eaux usées traitées en 2023 (ONA, 2024)	28
Figure 7 : Chaines de traitement des eaux usées et sous-produits associés pour différentes réutilisations (Catherinot, 2013)	31
Figure 8 : Exemples d'options pour la réduction des agents pathogènes viraux, bactériens et protozoaires par différentes combinaisons de mesures de protection sanitaire permettant de réaliser l'objectif lié à la santé de $\leq 10^{-6}$ DALY par personne et par an	39
Figure 9 : Localisation géographique de la STEP de Baraki (Alger).	42
Figure 10 : Les différents ouvrages de la STEP de Baraki.	44
Figure 11 : Matériels utilisés pour l'analyse physico-chimique de l'eau usée traitée.	47
Figure 12 : Rampe de filtration pour analyse microbiologique de l'eau.	49
Figure 13 : Localisation géographique de la serre de l'INRA Baraki.	53
Figure 14 : La serre expérimentale de la station INRA de Baraki.	54
Figure 15 : Dispositif expérimental de la culture de tomate irriguée avec EC et EUT.	55
Figure 16 : Matériels utilisés pour l'analyse parasitologique.	57
Figure 17 : Mesure des paramètres de croissance.	59
Figure 18 : Floraison et nouaison des fleurs de tomate	60
Figure 19 : Maturité des fruits de tomate.	61
Figure 20 : Mesure de la longueur et largeur du fruit de tomate par un pied à coulisse.	61
Figure 21 : Analyse microbiologique des fruits de tomate	63
Figure 22 : Lyophilisation des fruits de tomate.	64
Figure 23 : Analyse physico-chimique des fruits de tomate.	69
Figure 24 : Analyse des ETM par SAA Agilent Technologies.	70
Figure 25 : Evolution mensuelle de pH durant la période expérimentale.	72
Figure 26 : Evolution mensuelle de la conductivité électrique durant la période expérimentale.	73
Figure 27 : Evolution mensuelle des MES durant la période expérimentale.	73
Figure 28 : Evolution mensuelle des DCO durant la période expérimentale.	74
Figure 29 : Evolution mensuelle des DBO5 durant la période expérimentale.	75
Figure 30 : Evolution mensuelle de l'ammoniac durant la période expérimentale.	76
Figure 31 : Evolution mensuelle Du nitrate durant la période expérimentale.	77
Figure 32 : Evolution mensuelle du phosphore total durant la période expérimentale	78
Figure 33 : Diagramme de Wilcoxon des EUT prélevées de la STEP de Baraki montrant une salinité (C3) élevée et une faible teneur en sodium (S1).	82

Figure 34 : Diagramme de la Riverside indiquant la bonne qualité des eaux usées. _____	82
Figure 35 : Corrélation des paramètres physico-chimiques des EUT de baraki. _____	88
Figure 36 : Projection des paramètres de l'analyse physico-chimique de l'eau dans le plan principal (Dimension 1 et Dimension 2) par l'ACP. _____	89
Figure 37 : Evolution de la température de l'air durant la période d'essai _____	95
Figure 38 : Evolution de l'hygrométrie relative durant la période d'essai. _____	96
Figure 39 : Evolution de la hauteur moyenne des plantes de tomate en fonction de la qualité l'eau d'irrigation _____	97
Figure 40 : Evolution du diamètre moyen de la tige des plantes de tomate en fonction de la qualité l'eau d'irrigation. _____	98
Figure 41 : Evolution du nombre moyen des feuilles en fonction de la qualité de l'eau. ____	99
Figure 42 : Hauteur moyenne du premier bouquet floral du sol. _____	101
Figure 43 : Graphe en boîte représentant la hauteur moyenne du premier bouquet floral au sol. _____	101
Figure 44 : Evolution de la teneur en chlorophylle en fonction de la qualité de l'eau d'irrigation. _____	102
Figure 45 : Graphe en boîte représentant Evolution de la teneur en chlorophylle en fonction de la qualité de l'eau d'irrigation. _____	102
Figure 46 : Evolution de la Floraison-Nouaison des plantes en fonction de la qualité de l'eau d'irrigation _____	103
Figure 47 : Comparaison entre le poids, largeur et longueur du fruit par traitement. _____	105
Figure 48 : Comparaison entre le poids, largeur et longueur des fruits par bouquet floral. _	108

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Les bassins hydrographiques de l'Algérie (FAO, 2015)	7
Tableau 2 : Exploitation des eaux souterraines pour l'irrigation (Kuper et al., 2023)	11
Tableau 3 : Volume annuelle et pourcentage des eaux usées traitées réutilisées directement en irrigation	13
Tableau 4 : Volume mondiale des eaux usées traitées et réutilisation en irrigation (Hashem & Qi, 2021)	13
Tableau 5 : Le potentiel de la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture d'après les enquêtes réalisées entre 2018 et 2020.	21
Tableau 6 : recommandations physico-chimiques pour la réutilisation des eaux usées épurées en agriculture pour l'Algérie (JORA N°41, 2012).	24
Tableau 7 : Spécifications microbiologiques des eaux usées épurées destinées à l'irrigation agricole (JORA N°41, 2012).	25
Tableau 8 : Liste des cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées traitées.	26
Tableau 9 : Bilan annuel de l'ONA sur les STEP destinés à la réutilisation agricole (ONA 2021)	29
Tableau 10 : Indice de biodégradabilité des effluents (Rodier 2009).	33
Tableau 11 : Classe de qualité de salure de l'eau d'irrigation (Faby & Brissaud, 1997)	33
Tableau 12 : Risque lié au sodium dans l'eau sur la base des valeurs SAR (Fipps, 1996)	34
Tableau 13 : Directives pour l'interprétation de la qualité de l'eau pour l'irrigation.	36
Tableau 14 : Limites recommandées en éléments trace dans les eaux usées épurées destinées à l'irrigation ^a .	37
Tableau 15 : Recommandations microbiologiques révisées de l'OMS pour le traitement des eaux usées avant utilisation en agriculture.	40
Tableau 16 : Résumé statistique des données analytiques de janvier 2022 à décembre 2022.	79
Tableau 17 : Indices de qualité de l'eau d'irrigation.	81
Tableau 18 : Qualité microbiologique des EUT de la STEP de Baraki	84
Tableau 19 : Variation saisonnière des paramètres de l'EUT.	85
Tableau 20 : Variations saisonnières de la température et des précipitations.	85
Tableau 21 : Coefficient de corrélation de Spearman des paramètres physico-chimiques des EUT de la STEP de Baraki.	15
Tableau 22 : Paramètres physico-chimiques de l'eau d'irrigation	91
Tableau 23 : Paramètres microbiologiques de l'eau d'irrigation.	93
Tableau 24 : Les analyses physico-chimiques du sol avant et après irrigation avec EC et EUT.	93
Tableau 25 : Dosage des ETM (mg/kg) dans les sols avant et après irrigation avec EC et EUT.	94
Tableau 26 : L'évolution de la hauteur, le diamètre des plantes de tomate irriguées avec l'EC et ceux irrigués avec l'EUT.	98

Tableau 27 : Evolution du nombre des feuilles des plantes de tomate irrigués avec EC et ceux irrigués avec EUT. _____	100
Tableau 28 : Comparaison entre les plantes de tomate irrigués par EC et EUT. _____	104
Tableau 29 : Représentation des caractéristiques des fruits par bouquets floraux. _____	92
Tableau 30 : Dosage des ETM (mg/kg) dans les plantes de tomate irrigués avec des EC et EUT. _____	109
Tableau 31 : Dosage des ETM (mg/kg) dans les fruits de tomate irrigués avec EC et EUT. _____	110
Tableau 32 : Composition physico-chimique des fruits de tomate. _____	111
Tableau 33 : Qualité microbiologique des fruits de tomate irrigués avec EC et EUT. _____	112

Liste des abréviations

ADE	Algérienne des Eaux
CRED	Centre of Research on the Epidemiology of Disasters
ETM	Elément Trace Métalique
FAO	Food and Agriculture Organisation
GIZ	Société allemande pour la coopération internationale
ha	hectare.
JORA	Journal Officiel de la République Algérienne
Kg	kilogramme
Km	Kilomètre
MADR	Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural
MEER	Ministère de l'Environnement et l'Energie Renouvelable
Mg	Milligramme
NA	Norme Algérienne
OMM	Organisation Mondiale de Météorologie
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ONA	Office National de l'Assainissement
ONID	Office National de l'Irrigation et Drainage.
ONU	Organisation des Nations Unies
OSS	Observatoire du Sahara et du Sahel
REUE	Réutilisation des Eaux Usées Épurées.
SAT	Surface Agricole Totale
SAU	Surface Agricole Utile
STEP	Station de Traitement des Eaux Polluées
UE	Union Européenne
UNDRR	Un office for Disaster Risk Reduction
WHO	World Health Organization
WMO	World Meteorological Organisation

Introduction

Introduction

L'Algérie se situe parmi les pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la Banque Mondiale à 1.000 m³/hab/an malgré les ressources en eau disponibles estimées à 17 milliards de m³ (Touil et al., 2020). L'indicateur de stress hydrique de l'Algérie est passé de 104,92 en 2010 à 137,2 en 2019, ce qui se confirme au niveau de la disponibilité en eau douce par habitant qui est passée de 314 m³/hab/an en 2010 à 263 m³/hab/an en 2019, soit une baisse d'environ 16,24% en à peine 10ans (Bakhtache & Hadjene, 2023). Les effets du changement climatique sont déjà perceptibles qu'il s'agisse de la hausse des températures ou de la baisse des précipitations. En Algérie, le climat est varié et qualifié de climat de transition instable entre celui des moyennes latitudes et des tropiques ; environ 13% seulement des terres ont un climat méditerranéen ; le reste est dominé par un climat semi-aride à désertique. Les sécheresses constituent un risque climatique important sur pratiquement l'ensemble du territoire, on observe une diminution des ressources en eau alors que la demande globale des différents secteurs de l'industrie et de l'agriculture augmente rapidement.

Face au défi du stress hydrique, l'Algérie a entrepris un vaste programme national de dessalement, la construction de barrages, la réalisation de nombreux transferts ainsi qu'à un programme de forages. Il faut rappeler que le secteur agricole consomme plus de 60 % des ressources en eau mobilisées. Il est envisagé une extension des terres irriguées à plus de 1.560.000 hectares d'ici 2030 (MEER 2023). Afin d'atténuer ce stress hydrique dans l'agriculture, le recyclage et la réutilisation des eaux usées traitées semblent être une alternative souhaitable et un outil de gestion des ressources en eau découlant de la nécessité d'un approvisionnement régulé qui compense les pénuries d'eau (Jaramillo & Restrepo, 2017).

La valorisation des sous-produits de l'assainissement « Eau épurée » s'intègre parfaitement dans le NEXUS : Eau-Energie-Alimentation. Ce concept consiste à établir le lien entre ces trois volets pour assurer une meilleure interaction entre les différents secteurs et atteindre les objectifs de la sécurité hydrique et alimentaire (ONA, 2023). En raison du manque des ressources en eau douce, la production agricole est très limitée d'où l'eau usée traitée devient une source attrayante et bon marché à employer dans les régions déficitaires en eau. La réutilisation des eaux usées traitées est une option importante pour la gestion intégrée des ressources en eau et une source d'éléments nutritifs pour les cultures. L'utilisation des eaux usées traitées en agriculture fournit des éléments nutritifs tels que l'azote et le phosphore ainsi que la matière organique (Belkhair et Ashref, 2018). Selon

Introduction

l'office national de l'assainissement, 220 stations d'épuration des eaux usées (STEP) sont installées sur le territoire algérien avec une capacité de 1,039 milliard de m³/an, un volume traité de 540 millions de m³/an et un volume réutilisé de 59 millions de m³/an (11%). Seules 15 STEP sont orientées vers la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture, représentant un volume de 15,3 millions de m³, soit 5,5% du volume total traité pour l'irrigation de 10125 hectares de terres agricoles (ONA 2023).

Cependant, des études ont montré que les sols irrigués par les eaux usées peuvent présenter des teneurs importantes en éléments traces métalliques (ETM) qui ne sont pas biodégradables et peuvent bio-accumuler dans les plantes. L'absorption des ETM par les plantes cultivées dans les sols contaminés représentent la principale voie d'entrée dans la chaîne alimentaire (Christou et al, 2017). Comme a été souligné par l'Organisation Mondiale de la Santé dans ses lignes directrices pour l'utilisation des eaux usées dans l'agriculture (OMS, 2012); le paramètre qui limite l'utilisation des eaux usées pour l'irrigation est leur qualité microbiologique qui représente le risque majeur pour la santé publique associé à la contamination par des microorganismes pathogènes, notamment des virus, des bactéries, des helminthes et des protozoaires.

Compte tenu de ces faits, la présente étude a été entreprise pour la première partie de ce travail de recherche afin d'étudier la possibilité de réutiliser les eaux usées traitées en agriculture en déterminant la qualité physico-chimique et bactériologique en se référant aux normes nationales (JORA N°41 2012 et NA 17683 2014) et internationales (FAO 2003 et OMS 2012) de la réutilisation des EUT en irrigation. Aussi, afin de soutenir la nouvelle politique nationale en matière de traitement des eaux usées, notre contribution prend en compte l'identification des défaillances rencontrées et leurs répercussions sur l'utilité des stations d'épuration. Le partage de cette expertise avec les gestionnaires des différentes stations mises en place au niveau national permettra d'atteindre les objectifs de cette nouvelle politique de manière optimale. La STEP choisit pour l'étude est celle de Barraki (Alger) qui assure un traitement de type boues activées à moyenne charge suivie par une filtration sur sable comme traitement tertiaire ; cette étude est réalisée de la période allant de Janvier à Décembre 2022.

La deuxième partie de cette étude consiste à estimer l'impact de l'irrigation aux eaux usées traitées; bien que l'utilisation des eaux usées domestiques en agriculture pour l'irrigation soit une pratique ancienne dans différents pays elle n'a pas été largement étudiée et évaluée

Introduction

en Algérie. Cependant, une étude a été menée sur la station de Corso (Boumerdes- Alger Est) qui est considérée comme une station pilote pour l'irrigation de la vigne. Les résultats des analyses effectuées sur le jus de raisin ont montré que les raisins irrigués avec des eaux usées domestiques sont contaminés par des ETM avec des teneurs variables d'un élément à l'autre et d'une variété à l'autre ; ces valeurs augmentent avec l'irrigation continue depuis plus de dix ans et certains éléments ETM dépassent les normes et recommandations du codex-Alimentarius (Djillali 2020).

Dans cette perspective nous avons étudié l'impact de la réutilisation des eaux usées traitées de la STEP de Baraki sur une culture de tomate industrielle par un suivie agronomique tout au long du cycle de la plante pour évaluer les paramètres de croissance, de développement et de production, évaluer l'accumulation des ETM dans les racines, les tiges, les feuilles et le fruit de tomate et analyser la composition chimique ainsi que la qualité bactériologique des fruits de tomates. L'étude est réalisée au niveau de la serre située à la station expérimentale de l'institut national de recherche agronomique d'Alger (INRA Mahdi Boualem Baraki) de la période allant de Novembre 2022 à Juin 2023.

Chapitre I:

Synthèse bibliographique

I.1. Etat des lieux du climat et de l'eau

I.1.1. Le changement climatique

Toutes les régions du monde sont touchées par le changement climatique et les conditions météorologiques, hydrologiques et climatiques extrêmes menacent la sécurité des personnes, les économies nationales, les zones urbaines et rurales, la production alimentaire et l'approvisionnement en eau (OMM, 2023). D'après la définition des Nations Unies, on entend par « changements climatiques » des changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables (ONU, 1992). Suite à l'action de l'homme, des changements rapides et historiques ont été causés par le réchauffement de l'atmosphère, des océans et des terres qui se traduisent par plusieurs extrêmes météorologiques et climatiques à savoir les vagues de chaleur, les précipitations extrêmes, les sécheresses ou les cyclones tropicaux (Campagna et al., 2023)

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) souligne que les êtres humains influencent sur le réchauffement de l'atmosphère et des océans principalement par les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES). Ce réchauffement climatique s'aggrave puisque nous continuons à émettre des GES qui s'accumulent dans l'atmosphère et d'ici 2035 la limite des +1,5°C va probablement être franchie (GIEC, 2023). Si au cours des prochaines décennies les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) et des autres GES ne diminuent pas, le réchauffement de 2 °C sera atteint d'ici 2100 (Campagna et al., 2023). Le rapport de l'Organisation Mondiale de Météorologie confirme que l'année 2023 est l'année la plus chaude jamais enregistrée où la température moyenne mondiale a atteint $1,45 \pm 0,12$ °C au-dessus de la moyenne de 1850-1900 (1.5°C). Les concentrations de gaz à effet de serre ont continué à augmenter (WMO, 2024).

Parmi les Objectifs de Développement Durable « ODD » adopté par l'ONU en 2015 à l'horizon 2030 on trouve l'objectif numéro 13 des ODD pour lutter contre les changements climatiques et qui consiste à adopter certaine mesure d'urgence pour réduire les émissions mondiales de gaz à effet de serre afin d'éviter le point de basculement de 1,5°C (ONU, 2023).

I.1.2. Les ressources en eau

La Terre est une planète dont 71 % de la surface est recouverte d'eau et dont 97 % représente l'eau de mer (Musie & Gonfa, 2023). Près de 99 % de toutes les réserves d'eau douce liquide sur Terre sont constituées des eaux souterraines qui fournissent déjà la moitié de la quantité d'eau prélevée pour un usage domestique par la population mondiale (ONU, 2020). Selon l'estimation de Ferguson et al. (2021), le volume mondial d'eau douce est estimé à 15,9 millions de km³. A l'horizon 2030 l'eau est au centre du programme de développement durable (Cullen & Semedo, 2023). Pour réduire le stress hydrique, il est essentiel d'utiliser les ressources en eau avec efficacité et les exploiter de façon rationnelle.

Dans de nombreuses régions dans le monde le stress hydrique est une préoccupation et la rareté de l'eau est variable d'une région à une autre. La région du Moyen-Orient et l'Afrique du Nord (MENA) est confrontée à un grave manque d'eau sans précédent du fait de la croissance démographique, du changement climatique et du développement socioéconomique. La disponibilité annuelle moyenne des ressources en eau par habitant dans la région MENA d'ici 2030 va passer en dessous du seuil absolu de pénurie d'eau de 500 m³/personne/an (Waal et al., 2023).

Selon le rapport mondial des Nations Unies sur les ressources en eau de 2021, plus de 2 milliards de personnes vivent dans des pays soumis à un stress hydrique et près de 4 milliards de personnes vivent dans des zones touchées par une grave pénurie d'eau au moins un mois par an. Par ailleurs près de 1,6 milliards de personnes subissent une pénurie d'eau économique où cette population ne dispose pas des infrastructures nécessaires pour accéder à l'eau douce (ONU, 2021). La population humaine augmente régulièrement et devrait atteindre 9,8 milliards en 2050 (Singh, 2021). On estime que d'ici 2050 les changements climatiques vont toucher plus de 570 villes qui représentent 685 millions de personnes et qui subiront une diminution de la disponibilité d'eau douce (ONU, 2020). Le risque de sécheresse dans de nombreuses régions vulnérables du monde est augmenté par le changement climatique, en particulier celles qui connaissent une croissance démographique rapide et des populations vulnérables ainsi que des problèmes de sécurité alimentaire (CRED&UNDRR, 2020). L'Afrique est le continent le plus touché par une sécheresse sévère avec 300 événements enregistrés au cours des 100 dernières années, soit 44 % du total mondial (ONU, 2022).

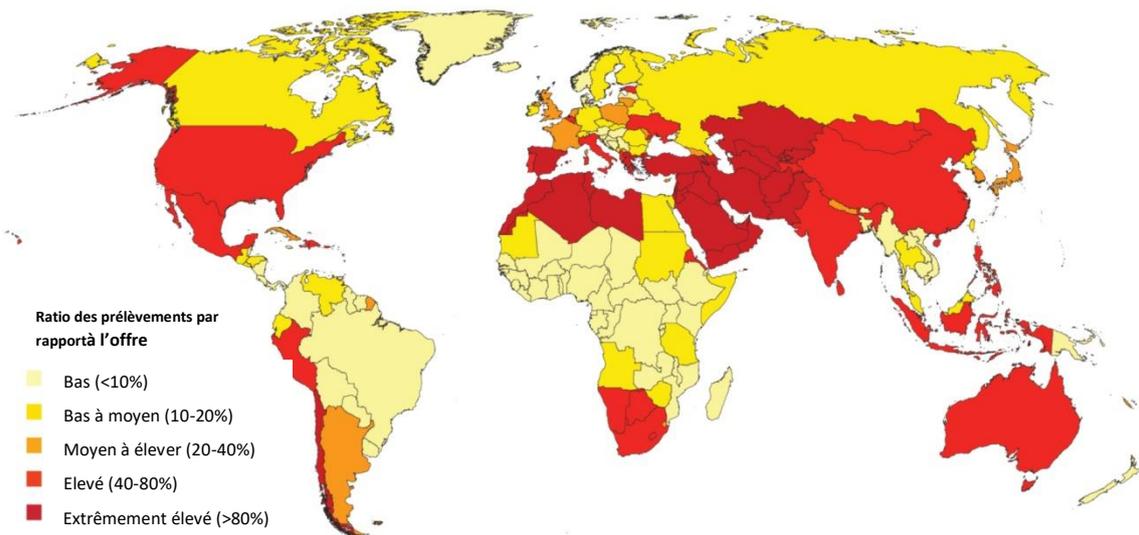


Figure 1: Stress hydrique dans le monde d'ici 2040 (World Resources Institute, 2015)

Avec le réchauffement climatique, les sécheresses seront plus fréquentes et dureront plus longtemps et deviendront plus intenses dans les régions du sud et de l'ouest de l'Europe. Les pertes dues à la sécheresse pourraient être 5 fois plus élevées qu'aujourd'hui et l'augmentation la plus forte étant prévue dans les régions méditerranéennes et atlantiques de l'Europe (Cammalleri et al., 2020). L'agriculture est le secteur le plus touché par les changements climatiques et la sécheresse. Le système de production alimentaire dépend fortement des ressources en eau et des écosystèmes qui sont menacés suite au changement climatique (Kompas et al., 2024).

I.1.3. La situation en l'Algérie

Le réchauffement de la planète qui a débuté à partir du 21ème siècle suite aux changements climatiques a touché d'avantage l'Algérie par la baisse des précipitations et l'augmentation des températures. Ce qui a engendré la non régénération du couvert végétal, la baisse des rendements agricoles, l'accélération de la dégradation des sols et la perte de terre productives déjà rare dans notre pays et ne représente que 3% du territoire nationale (Bakhtache & Hadjene, 2023).

I.1.3.1. Le climat de l'Algérie

L'Algérie avec une superficie de 2381 millions de km² est considéré le plus grand pays de l'Afrique, de la région MENA et de la région euro-méditerranéenne. Son climat est varié et qualifié de climat de transition instable entre celui des moyennes latitudes et des tropiques. La frange nord qui englobe le littoral et l'Atlas Tellien est de type méditerranéen alors que le type semi-aride est au niveau des hauts plateaux, et dès que la chaîne de l'Atlas Saharien est franchie c'est le type désertique (MEER, 2023a).

I.1.3.2. Les ressources en eau de l'Algérie

Les ressources en eau de l'Algérie sont estimées en moyenne à 18 milliards de m³/an, dont 12,5 milliards de m³ au nord et 5,5 milliards de m³ dans les régions sahariennes (Mozas& Ghosn, 2013). L'Algérie est divisée en cinq bassins hydrographiques regroupant 19 bassins versants (tableau 1).

Tableau 1 : Les bassins hydrographiques de l'Algérie (FAO, 2015)

Bassins	Superficie (Km ²)	Bassins versant
Oranie-Chott Chergui	77 169	Côtiers oranais, Macta, Tafna, Chott Chergui
Chélif-Zahrez	56 227	Côtiers Dahra, Chélif, Chott Zahrez
Algérois-Hodna-Soummam	47 431	Côtiers Algérois, Sébaou, Isser, Soummam, Chott Hodna
Constantinois-Seybousse-Mellegue	44 348	Côtiers Constantinois, Kébir Rhumel, Medjerda Mellegue, Seybousse, Hauts Plateaux
Sahara	2 018 054	Constantinois Sahara, Chott Melghir

Les eaux de surface caractérisées par une irrégularité constituent les deux tiers des potentialités du pays soit 11 milliards de m³. Pour les ressources en eaux souterraines renouvelables disponibles dans les aquifères du nord Algérien sont estimés à près de 2,5 milliards de m³. Tandis que le Sahara septentrional recèle deux grandes nappes aquifères fossiles dont les réserves sont immenses mais qui ne sont pas renouvelables ; Les potentialités exploitables de ces aquifères sont estimés à 6.1 milliards de m³/an (GIZ/BGR/OSS, 2016).

La baisse de la pluviométrie est régulière depuis trois décennies, avec un pic de sécheresse en 2001-2002. Cet état s'est poursuivi en 2020 où le taux moyen de remplissage des barrages sur

le territoire national n'a pas dépassé les 45%. Le déficit pluviométrique diminue le taux de renouvellement des eaux souterraines et pousse à l'excès d'exploitation et/ou de surexploitation des nappes. La faiblesse des ressources est aggravée par leur mauvaise répartition spatiale qui impose des transferts importants pour satisfaire les besoins des régions moins pourvues, l'irrégularité saisonnière et interannuelle des écoulements, l'envasement des barrages, et les pertes énormes d'eau dues à la vétusté des réseaux et à la mauvaise gestion. Ainsi, la mauvaise répartition des ressources entre le Nord et le Sud, l'Est et l'Ouest, a nécessité la mise en œuvre d'une politique couteuse de grands transferts, notamment vers l'ouest du pays et les Hauts Plateaux Constantinois. Le phénomène de désertification des sols accentue les menaces de sécheresse en particulier dans l'Ouest Algérien (MEER, 2023b). Selon le classement des pays en fonction du stress hydrique projeté par Aqueduct pour 2040 dans le cadre du scénario Business-as-Usual établie par l'institut des ressources mondiales en 2015 l'Algérie est classée 30ème sur 161 pays étudiés (Luo et al., 2015).

I.1.3.3 Organisation des services de l'eau

Le ministère des ressources en eau (MRE) assure la mise en œuvre de la politique de l'eau à travers les différentes agences dont le rôle principal est d'assurer la conduite de l'ensemble des opérations d'études et/ou de réalisation. La figure 2 représente l'organisation des services de l'eau en Algérie.

➤ Les établissements d'exécution

L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) : chargée de l'inventaire des ressources en eaux et en sols irrigables, la surveillance périodique des ressources sur les plans quantitatif et qualitatif et la protection des ressources en eau.

L'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) : chargée de deux missions principales : la maîtrise d'ouvrage (MOA) des programmes d'études et des travaux de barrages et d'infrastructures de transferts d'eau, l'exploitation et l'entretien des barrages.

L'Office National de l'Irrigation et du Drainage (ONID) : chargé d'une part de la MOA des programmes d'études et de travaux des infrastructures d'irrigation et de drainage, d'autre part de l'exploitation et l'entretien des Grands Périmètres d'Irrigation.

➤ Les établissements de gestion

L'Algérienne des Eaux (ADE) : chargée de la gestion de la production et de la distribution de l'eau potable dans l'ensemble du pays, la MOA déléguée et la régulation de l'activité du sous-secteur de l'eau potable.

L'Office National de l'Assainissement (ONA) : assure l'assainissement urbain et l'épuration des eaux usées.

L'Agence Nationale de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (AGIRE) : chargée de réaliser au niveau national toutes actions concourant à une gestion intégrée des ressources en eau.

Les cinq Agences de Bassin Hydrographiques (ABH) : Elles sont chargés de gérer le système d'information à l'échelle des bassins hydrographiques à travers l'établissement et l'actualisation des bases de données et des outils d'information géographique ; de contribuer à l'élaboration, à l'évaluation et à l'actualisation des plans de développement sectoriel à l'échelle des bassins hydrographiques ; de collecter les redevances instituées par la législation et la réglementation en vigueur (Algérie-UE, 2019).

I.1.3.3. Les dépenses d'investissement (barrages, forages, unités de dessalement)

Les dépenses publiques affectées à la mobilisation et à la distribution de l'eau et à la réalisation des infrastructures hydrauliques de 2001 à 2013 (pendant laquelle a eu lieu le lancement des plans de relance économique) ont été estimés à une moyenne annuelle de 1459 milliards de dinars constants sur le budget d'équipement du ministère des ressources en eau. Trois différents plans de relance économique se sont succédés, financés exclusivement par le budget de l'Etat à partir de 2001. De 2001 à 2004 le plan de soutien est doté d'une enveloppe globale de 525 milliards de DA et le plan complémentaire de 2005 à 2009 enregistre un investissement de 499,8 milliards de DA. Le plan de développement quinquennal (2010-2014) se voit octroyer de 20 % du budget d'équipement global de l'Etat (GIZ/BGR/OSS, 2016). Malgré de nombreux efforts pour la construction d'infrastructures hydrauliques et le processus de réformes institutionnelles en Algérie de 1999 à 2019, la gestion de l'eau reste axée sur la mobilisation de l'eau en amont sans valorisation en aval (Kherbache, 2020).

D'après la carte qui figure dans le rapport sur les objectifs de développement durable de 2023 l'Algérie appartient à la catégorie qui connaît des progrès modérés de mise en œuvre de la gestion intégrée des ressources en eau entre 2017 et 2020 (ONU, 2023).

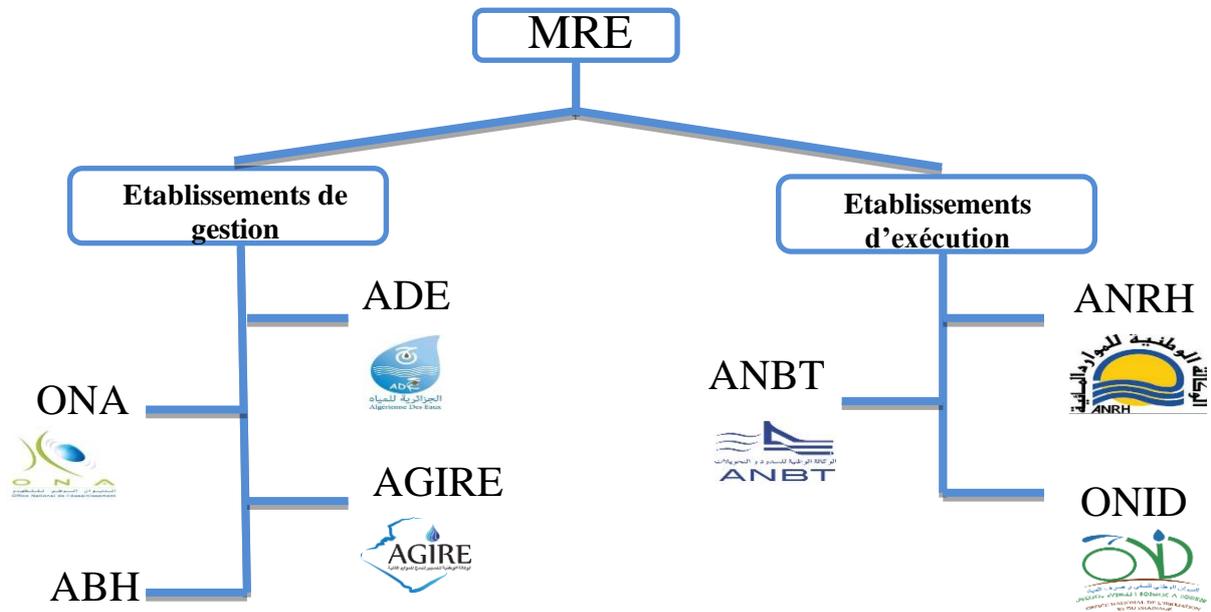


Figure 2 : Organisation des services de l'eau en Algérie.

I.1.3.4. L'hydraulique agricole

L'Algérie compte une surface agricole utile qui représente 42 millions d'hectares tandis que la surface agricole utile (SAU) ne dépasse pas les 8,5 millions d'hectares. Avec une population qui atteint 42.4 millions d'habitants et le ratio hectare par habitant ne représente que 0.19 ha qui est le plus faible de la région du Maghreb. Les superficies irriguées sont estimées à 1,3 millions d'hectares en 2017 soit plus de 15 % de la SAU. Près de 100 barrages ont été réalisés en 2016 dotés d'un potentiel mobilisable de plus de 12 milliards de m³ avec plus de 6 milliards de m³ qui sont destinés au secteur agricole (Bessaoud et al., 2019). Plus de 70 % des besoins alimentaires du pays sont assurés par l'agriculture et suite à l'irrégularité des précipitations depuis les années 2000 l'état a donné la priorité au développement de l'irrigation. Les périmètres irrigués sont gérés par l'Office National de l'Irrigation et du Drainage (ONID) depuis 2005 ; les superficies irriguées se subdivisent en grand périmètres d'irrigation (GPI) et en petite et moyenne hydraulique (PMH). Les GPI comprennent une

Chapitre I: Synthèse bibliographique

superficie équipée totale de 260 600 ha en 2014. Le volume d'eau alloué en 2013 aux GPI était de 663 millions m³ provenant des eaux superficielles stockées dans les grands barrages. En 2012, la superficie équipée en PMH s'élevait à 1 million ha (FAO, 2015). Selon le MRE le volume d'eau pour les besoins annuels prévus pour l'agriculture à l'horizon 2030 est estimé à 8,3 milliards de m³ (contre 6,8 milliards de m³ en 2018). L'effort fourni en matière de mobilisation et de gestion de la ressource hydrique affectée à l'agriculture principalement par le biais de la petite et moyenne hydraulique a permis d'élever les superficies irriguées et les équiper par les systèmes économiseurs d'eau (aspersion et goutte à goutte) pour atteindre 977 000 ha en 2018, ce qui correspond au 3/4 de la superficie irriguée totale (Guergueb & Ferhat, 2021). Ces superficies irriguées jouent un rôle économique très important et représentent une valeur agricole ajoutée au pays. Le tableau 2 représente l'exploitation des eaux souterraines pour l'irrigation. L'exploitation des ressources en eau souterraine suite à la découverte des immenses réserves hydriques au sud Algérien a permis de créer une dynamique agricole et développer l'agriculture saharienne par l'extension des superficies irriguées. L'eau souterraine représente près de 64 % de la superficie agricole irriguée (près de 900 000 ha). L'accès aux nappes se fait par les forages et les puits ; les dernières statistiques disponibles datent de 2015, elles recensent 74000 forages et 147310 puits (Kuper et al., 2023).

Tableau 2 : Exploitation des eaux souterraines pour l'irrigation (Kuper et al., 2023)

Superficies irriguées (million ha)	Superficies irriguées à partir des eaux souterraine	Nombre des forages	Nombre des puits	Nombre d'aquifères sur-exploités
1.4	0.9 (64%)	74000	147310	28 (Nord) 38 (Sud)

I.2. Réutilisation des eaux usées traitées en agriculture

La réutilisation des eaux usées traitées en agriculture apparaît comme une solution alternative suite au manque des ressources hydriques ce qui permet de préserver les ressources naturelles et de contribuer à la gestion intégrée de l'eau. A travers cette partie, un aperçu du contexte actuel de la réutilisation agricole des eaux usées traitées dans le monde et en Algérie permettra de mieux comprendre les perspectives d'évolution de ce secteur.

I.2.1. Situation Mondiale

D'après les données de Hashem & Qi (2021) les eaux usées mondiales rejetées chaque année sont d'environ 0,4 trillion de m³ et contaminent environ 5,5 trillions de m³ d'eau. Christou et al. (2024) mentionnent que plus de 80 % des eaux usées mondiales sont rejetées sans traitement dans les eaux souterraines, les rivières et les lacs. La production d'aliments pour animaux ou des denrées alimentaires en utilisant directement ou indirectement ces eaux usées non traitées conduit à une contamination potentielle. On estime qu'environ 6 millions d'hectares sont irrigués en utilisant des eaux polluées dans le monde entier. Ces eaux usées contiennent de nombreux éléments nutritifs qui peuvent réduire les besoins en engrais et en même temps augmenter la croissance et la productivité des cultures (Al Hamedi et al., 2023). Mais en contrepartie la présence d'agents pathogènes et de parasites sur les cultures peuvent se transmettre à l'homme et provoquer de graves problèmes sanitaires. Par conséquent, tous les pays devraient se préoccuper du traitement de ces grandes quantités d'eaux usées pour pouvoir les réutiliser en toute sécurité.

I.2.2. Réutilisation mondiale des eaux usées traitées en irrigation

Il apparaît que la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation est essentiellement présente dans les pays à vocation agricole mais dont les ressources hydriques sont faibles, comme les régions de l'Ouest et de l'Est des Etats-Unis, l'espace méditerranéen, l'Australie, l'Afrique du Sud, les zones semi-arides de l'Amérique du Sud et de l'Asie du Sud qui ont installés les plus grands projets de réutilisation (Boutin et al., 2009). Cette réutilisation permet d'atténuer le manque d'eau et assurer une production alimentaire qui répond aux besoins des populations assurant ainsi la sécurité alimentaire. La Chine est considérée comme le plus grand producteur d'eaux usées environ 108,16 milliards de m³ d'eaux usées sont générés chaque année en Chine et le taux de traitement des eaux usées est passé à 86 %.

Selon les données de Christou et al. (2024) les pourcentage et volume annuel des eaux usées traités réutilisé directement pour l'irrigation sont représenté dans le tableau 3.

Chapitre I: Synthèse bibliographique

Tableau 3 : Volume annuelle et pourcentage des eaux usées traitées réutilisé directement en irrigation (Christou et al., 2024).

Continents	Volume Mm ³ /an	%
Amérique du Nord	1,380	3.4
Amérique du Sud	260	6.4
Europe	400	1.8
Asie	3,920	15.3
Afrique	330	2 %
Océanie	140	3.4

Les données collectées par Hashem & Qi (2021) sur les superficies totales cultivées de certain pays et les volumes des eaux usées générées et traités avec les volumes réutilisés pour l'irrigation des cultures sont représentées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Volume mondiale des eaux usées traitées et réutilisation en irrigation (Hashem & Qi, 2021)

Pays	Superficies agricoles (1000 ha)	Eaux usées générées (10 ⁹ m ³ /an)	Eaux usées traitées (10 ⁹ m ³ /an)	Eaux usées utilisé en irrigation (10 ⁹ m ³ /an)
Chine	122.524	48.51	42.37	1.26
USA	157.205	60.41	45.35	-
India	169.360	-	4.416	-
Brazil	86.589	-	3.1	0.008
Canada	50.846	6.613	5.632	-
Australie	47.307	-	2	0.28
Turkey	23.944	4.297	3.483	-
Allemagne	12.074	-	5.213	5.183
Italie	9121	3.926	3.902	0.087
Jordan	322	-	0.115	0.103

Dans environ 44 pays du monde ; un volume de 15 millions de m³ des eaux usées traitées sont réutilisés quotidiennement pour l'irrigation des cultures. Alors que les surfaces irriguées par des eaux usées sont estimées à 20 millions d'hectares dans près de 50 pays (Hashem & Qi, 2021).

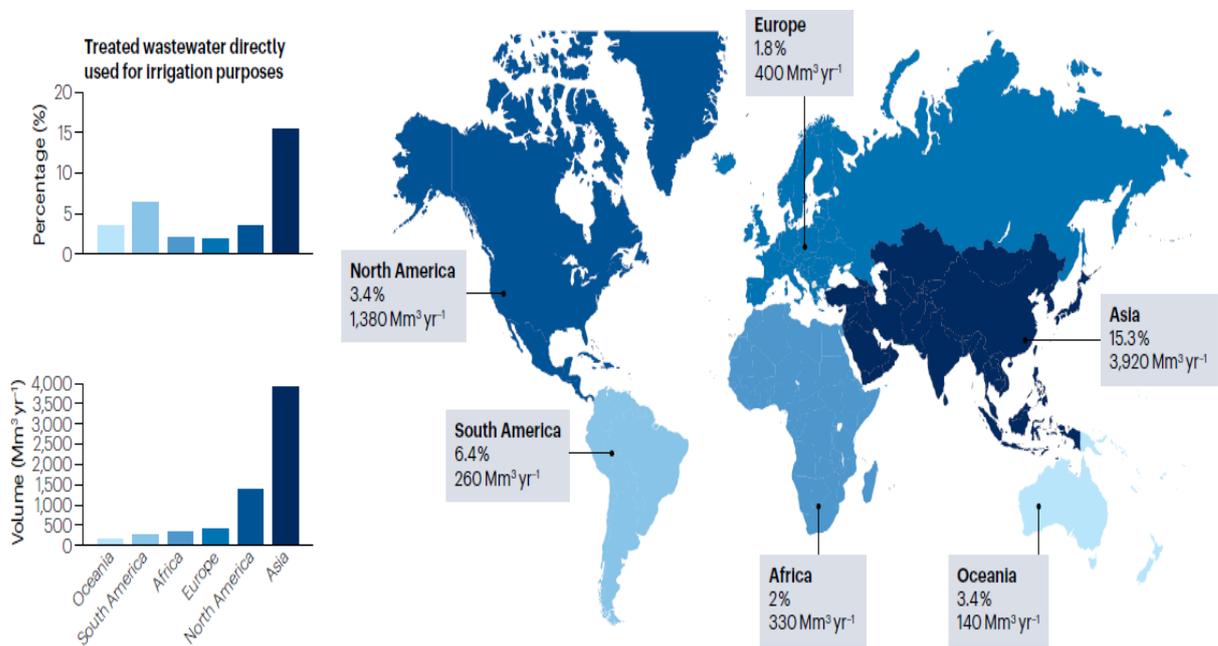


Figure 3 : Volume annuel et pourcentage des eaux usées traitées réutilisées directement pour l'irrigation (Christou et al., 2024).

Au niveau mondial, la réutilisation directe de l'eau usée traitée (sans dilution ou avec peu d'eau douce) pour l'irrigation varie d'un continent à l'autre. L'application directe pour l'irrigation est la plus importante en Asie au niveau continental et au niveau régional ; c'est une pratique courante dans les pays du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord, en Australie, dans la région méditerranéenne, au Mexique, en Chine et aux États-Unis (Christou et al., 2024).

La réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation est un système complexe et une pratique qui mobilise des thématiques multiples. La figure 4 représente les six thématiques de l'approche de la REUSE produite lors de l'atelier COSTEA de Lyon en octobre 2018 qui réunit l'ensemble des composantes techniques, sanitaire, réglementaire, agronomique, social et économique (Hamamouch & Hartani, 2022). Un projet de réutilisation des eaux usées en agriculture nécessite une planification et de la gestion d'amont en aval. C'est en comprenant les spécificités locales et notamment les besoins générés par les contextes socio-économique,

environnemental, sanitaire, réglementaire et agronomique que l'on peut appliquer le principe de la réutilisation de l'eau (Deboos, 2018).

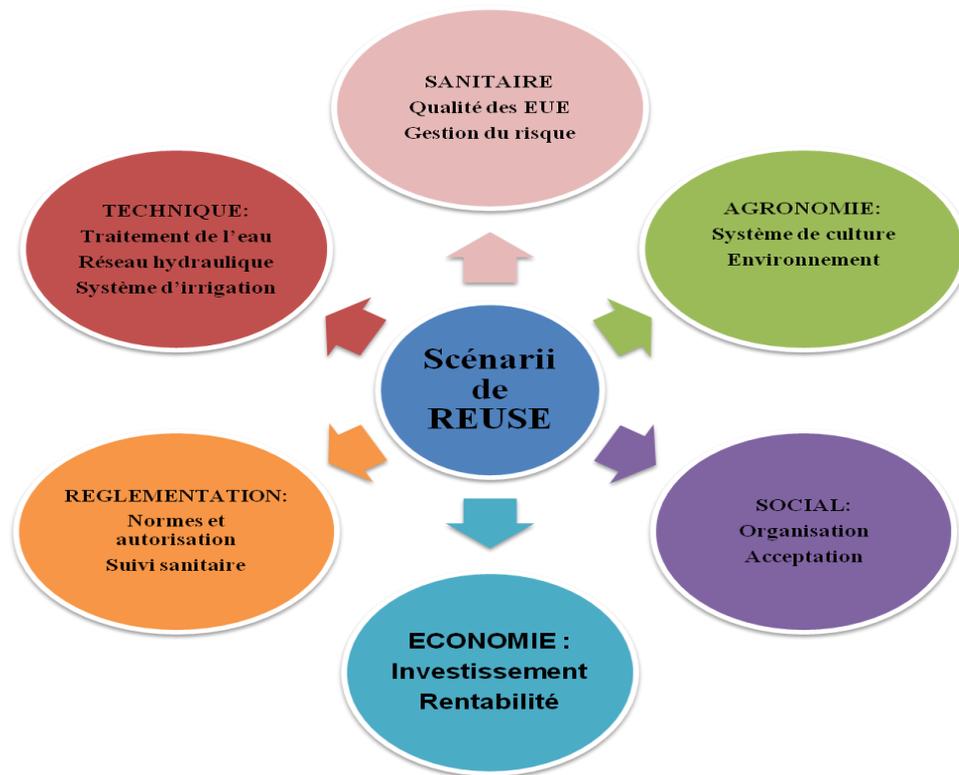


Figure 4 : Approche d'analyse multithématique de la REUSE

I.2.3. Les avantages de la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture

Dans un contexte de la gestion des ressources en eau ; la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture apporte une contribution à la conservation de l'eau douce surtout dans les régions confrontées à une rareté de cette ressource suite aux changements climatiques que connaît la planète. L'irrigation par des eaux usées est une forme de recyclage de l'eau au lieu de le rejeter dans l'environnement (OMS, 2012a). La croissance rapide de la population mondiale a engendré une augmentation de la demande en ressource hydrique et les besoins en alimentation. Environ 805 millions de personnes soit un neuvième de la population mondiale souffrent de la faim. En outre, la réutilisation des eaux usées augmente la production agricole et contribuant ainsi à la sécurité alimentaire (Jaramillo & Restrepo, 2017). Des résultats agronomiques positifs peuvent être obtenus par la réutilisation des eaux usées traitées qui contiennent des nutriments bénéfiques et permettant ainsi la croissance des végétaux. Cette

pratique permet d'augmenter les rendements agricoles et diminuer les dépenses sur l'apport d'engrais.

Sur le plan économique le coût limité du traitement des eaux usées par rapport à l'approvisionnement en eau souterraine profonde et au dessalement (Kettab, 2017a) ; il convient de noter que l'énergie nécessaire au pompage des eaux souterraines peut représenter jusqu'à 65% des coûts des activités d'irrigation (Jaramillo & Restrepo, 2017). L'utilisation des eaux usées pour l'irrigation a un impact significatif sur le sol en fournissant des macro- et micronutriments sous forme d'azote (N), de phosphore (P), de potassium (K), de fer (Fe), de zinc (Zn), de cuivre (Cu) et de manganèse (Mn) (Mishra et al., 2023).

I.2.4. Les risques liés à la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture

Les eaux usées sont composées de 99,9 % d'eau et les 0,1 % restants étant constitués de matières organiques telles que des micro-organismes, des composés inorganiques et d'autres matières organiques biodégradables composées des protéines, carbohydrates et graisses (Al Hamedi et al., 2023). L'utilisation d'eau recyclée pour l'irrigation peut avoir des impacts négatifs sur la santé publique et sur l'environnement qui dépendent du niveau de traitement, des conditions locales et des pratiques d'irrigation.

L'irrigation des champs avec des eaux usées non ou mal traitées constitue un risque sanitaire sur les ouvriers agricoles et les habitants à proximité des terres agricoles. La consommation des produits agricoles contaminés issus de l'irrigation avec des eaux usées traitées en particulier les cultures consommées crues et ne sont pas correctement lavées et nettoyées peuvent infecter les consommateurs (FAO, 2003a). Les produits chimiques présents dans les eaux usées mal traitées constituent des risques environnementaux, liés à la contamination des sols et des plantes et par la pollution d'eau souterraine et de surface due à l'infiltration d'eau d'irrigation contaminée. On retrouve dans les eaux usées des bactéries, protozoaires, helminthes et virus qui proviennent de l'environnement et des matières fécales. Parmi les facteurs qui limitent l'utilisation des eaux usées sont les microorganismes pathogènes qui peuvent provoquer des problèmes de santé chez les êtres vivants (Younas & Younas, 2022).

Les eaux usées traitées peuvent contenir des éléments traces métalliques et d'autres polluants en fonction de leurs types et des méthodes de traitement employées. Les chercheurs affirment que l'irrigation avec des eaux usées ou des eaux d'égout plutôt qu'avec de l'eau douce peut entraîner l'accumulation de ETM dans les plantes (Mishra et al., 2023). L'irrigation à partir

Chapitre I: Synthèse bibliographique

d'eaux usées, va apporter des oligo-éléments non indispensables à la plante tels que le plomb, le mercure, le cadmium, le brome, le fluor, l'aluminium, le nickel, le chrome, le sélénium et l'étain. La biodisponibilité de ces éléments dans le sol peut engendrer leur accumulation dans les tissus des plantes et dans certains cas, les teneurs en ces éléments peuvent atteindre des seuils de phytotoxicité (Faby & Brissaud, 1997). Certains ETM s'accumulent dans les plantes et pouvant atteindre des niveaux préjudiciables à la santé. Les métaux qui peuvent être présents dans les eaux résiduaires, cadmium (Cd), cuivre (Cu), molybdène (Mo), nickel (Ni) et 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, 2003b).

L'utilisation des eaux usées comporte des avantages mais aussi des risques ; les experts recommandent de simplement bannir cette pratique imprudente ou bien traiter adéquatement les eaux usées avant leur réutilisation. Ces recommandations, pratiquement impossibles à mettre en œuvre dans la plupart des pays en développement pour des raisons économiques et sociales, auraient aussi comme résultat la suppression des composants de ces « déchets » qui n'agissent pas comme polluants, mais qui sont au contraire bénéfiques. Par conséquent, dans la pratique il doit y avoir un compromis entre les avantages et les inconvénients et il convient de chercher la meilleure solution pour chaque situation, même si elle est considérée comme non conventionnelle en particulier du point de vue des pays développés. D'un point de vue technique, la solution consistera fondamentalement à trouver une manière d'approvisionner les sols et les cultures en eau, en éléments nutritifs et en matières organiques. Il faudrait tirer profit de la capacité d'assimilation des sols, de sorte que les pathogènes ou les ETM ne soient pas nocifs, tout en mettant en place des mesures supplémentaires pour livrer des aliments sains aux consommateurs. Ces mesures et d'autres options de remplacement pour la réduction des risques sanitaires sont appuyées par les directives de l'OMS là où le traitement conventionnel des eaux usées échoue pour une raison quelconque.

Dans tous les cas, les connaissances scientifiques existantes, les retours d'expérience et les bonnes pratiques permettent de réduire les risques par la mise en œuvre d'une planification efficace, d'une sélection technologique appropriée et d'une gestion rigoureuse des pratiques d'irrigations. Par principe, la majorité des normes plus récentes exigent au minimum un traitement biologique des eaux usées destinées à la réutilisation agricole et un traitement

tertiaire complémentaire est souvent indispensable pour les cultures à haut risque sanitaire, comme par exemple l'irrigation de cultures maraîchères consommées crues.

I.2.5. Le stockage des eaux usées traitées pour la valorisation agricole

Les projets de réutilisation des eaux usées traitées nécessitent la mise en place des ouvrages de stockages pour assurer une régulation des flux. La présence de l'unité de stockage permet de contrôler le volume rejeté, une gestion des ressources et assurer une viabilité économique du projet. Deux types de réservoir peuvent être utilisés selon les besoins du projet de réutilisation agricole :

➤ **Les réservoirs saisonniers**

Ce type de réservoir est utilisé pour les régions qui rencontrent un déficit hydrique ; les eaux usées traitées sont collectées en période hivernale pour les utiliser en période d'été ce qui permet de répondre aux besoins des cultures.

➤ **Les réservoirs opérationnels**

Les réservoirs opérationnels sont des unités de stockage qui ont le rôle de compléter les réservoirs saisonniers et permettent de mieux gérer le réseau de distribution des EUT par une régulation horaire ou journalière. Pour le cas des cultures qui exigent une irrigation nocturne, ce type de réservoir permet de stocker les volumes nécessaires pendant la journée. Ce stockage est une solution en cas de dysfonctionnement des systèmes de traitement (Claire Eme & Pascal Molle, 2013).

I.3. Réutilisation des eaux usées traitées en Algérie

Devant la rareté en ressources hydriques conventionnelles et afin de répondre partiellement à la demande en eau dans les régions les plus déficitaires ; la réutilisation des eaux usées traitées est une nécessité stratégique pour préserver la sécurité hydrique du pays dans les années futures et assurer la sécurité alimentaire pour une population en croissance démographique rapide.

I.3.1. État des lieux de l'assainissement urbain

Un large programme d'investissement pour la réalisation et la réhabilitation des stations d'épuration est entrepris par le Ministère des Ressources en Eau dans le but de protéger le littoral et les cours d'eau contre la pollution et l'eutrophisation. L'accès à l'assainissement atteint 95 % pour une population qui dépasse 40 millions d'habitants et le volume annuel des eaux usées générées en 2017 était de 1,6 milliards de m³/an où 1,44 milliards de m³/an sont rejetées en mer soit 90 % du volume total (Hamamouch & Hartani, 2022). L'office national de l'assainissement (ONA) prend en charge la gestion des systèmes d'assainissement de 1 162 communes sur 1 541 communes que compte le pays. Le reste des communes sont gérées soit par les régies communales en attendant le transfert de ces communes à l'ONA, soit par les sociétés par actions créées dans le cadre de la gestion déléguée du service public de l'eau et de l'assainissement telles que SEAAL pour Alger, SEAOR pour Oran, SEACO pour Constantine (ONA, 2024).

Une importante avancée en matière d'infrastructures de base est réalisée et l'ONA gère directement le service public de l'assainissement dans 54 wilayas et indirectement dans 04 wilayas (Alger, Tipasa, Oran, Constantine) à travers les SPA. Les dernières données de l'ONA comptent 220 systèmes épuratoires à l'échelle nationale avec une capacité installée de 1 039 milliards de m³/an, le volume épuré d'environ 540 millions de m³/an et le volume réutilisé est de 59 millions de m³/an (11%) (ONA, 2024).

I.3.2. Situation de la réutilisation des EUT en Algérie

Suite à la crise hydrique que connaît l'Algérie ; les autorités publiques ont mis en place une stratégie nationale à l'horizon 2030 qui définit les ressources en eau non-conventionnelles et comment les réutiliser. Depuis 2007 la réutilisation des eaux usées traitées s'est mise en place avec une volonté étatique prudente appuyée sur un cadre réglementaire assez complet, avec un parc épuratoire conséquent et un taux de raccordement important tant dans les zones

urbaines que rurales. Le 30 mai 2021 le conseil des ministres accorde la priorité absolue aux projets de réutilisation des ressources en eau non conventionnelles en adoptant une stratégie nationale de développement visant à faire face à la pénurie d'eau en valorisation les eaux usées traitées en agriculture. Le MRE en concertation avec le MADR dispose d'un potentiel d'EUT de l'ordre de 900 millions m³/an (en capacité installée) dont la production est assurée à partir de 172 systèmes épuratoires en exploitation et en travaux ; ce potentiel permettra d'irriguer une superficie de 86 500 hectares (Hamamouche & Hartani, 2022).

Suite à la crise hydrique que connaît la plaine de la MITIDJA où aucun volume d'eau n'a été alloué à l'irrigation à partir des barrages en 2021 ; une initiative étatique est proposée pour alimenter les réseaux d'irrigation de l'ONID par les EUT :

- Mitidja Centre : Barrage de Douera - STEP de Baraki : potentiel de 125 000 m³/j d'EUT.
- Mitidja Est-Hamiz littoral : Barrage de Hamiz - STEP de Reghaia : potentiel de 22 000 m³/j d'EUT.
- Mitidja Ouest-Sahel Algérois : Barrage de Boukerdane- STEP de Chenoua-Hadjout : potentiel de 6 500 m³/j d'EUT.

I.3.3. Potentiel de réutilisation des EUT en agriculture

Des enquêtes ont été réalisées entre 2018 et 2020 par le Ministère des Ressources en Eau sur les STEP qui répondent aux critères de réutilisation agricole et les superficies susceptibles d'être irriguées par les eaux usées traitées ; le tableau 5 résume tous les paramètres étudiés et l'état des lieux (Hamamouch & Hartani, 2022).

Une étude préliminaire a été réalisée par l'ONA entre 2022 et 2023 pour identifier les potentialités de REUSE à proximité des STEP qui a permis la création et l'intégration d'une nouvelle thématique REUSE dans le SIG national. Une superficie de 52 400 ha de la Petite et Moyenne Hydraulique a été délimitée à proximité de 136 STEP répartis selon le type de culture, l'origine de l'eau et le mode d'irrigation. La figure 5 représente les superficies délimitées (ONA, 2024).

Chapitre I: Synthèse bibliographique

Tableau 5 : Le potentiel de la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture d'après les enquêtes réalisées par l'ONA entre 2018 et 2020.

Nombre de STEP enquêtées	Procédés de traitement	Traitement tertiaire	Capacité (hm ³ /an)	Potentiel à irriguer (ha)
67 STEP en exploitation	34 boue activée FC	1 STEP (existant)	444,4	38 663
	8 boue activée MC	2 STEP (existant) à Bordj Bou Arreridj et Annaba		
	14 lagunage naturel	1 STEP (prévu) à Mostaganem		
	11 lagunage aérée			
14 STEP en travaux	12 boue activée FC	2 STEP (existant) à Tlemcen	74,4	6 254
	1 boue activée MC	2 STEP (prévu) à Tlemcen et Ain Temouchent		
	1 lagunage naturel			
Total: 81 systèmes épuratoires			518,8	44 917

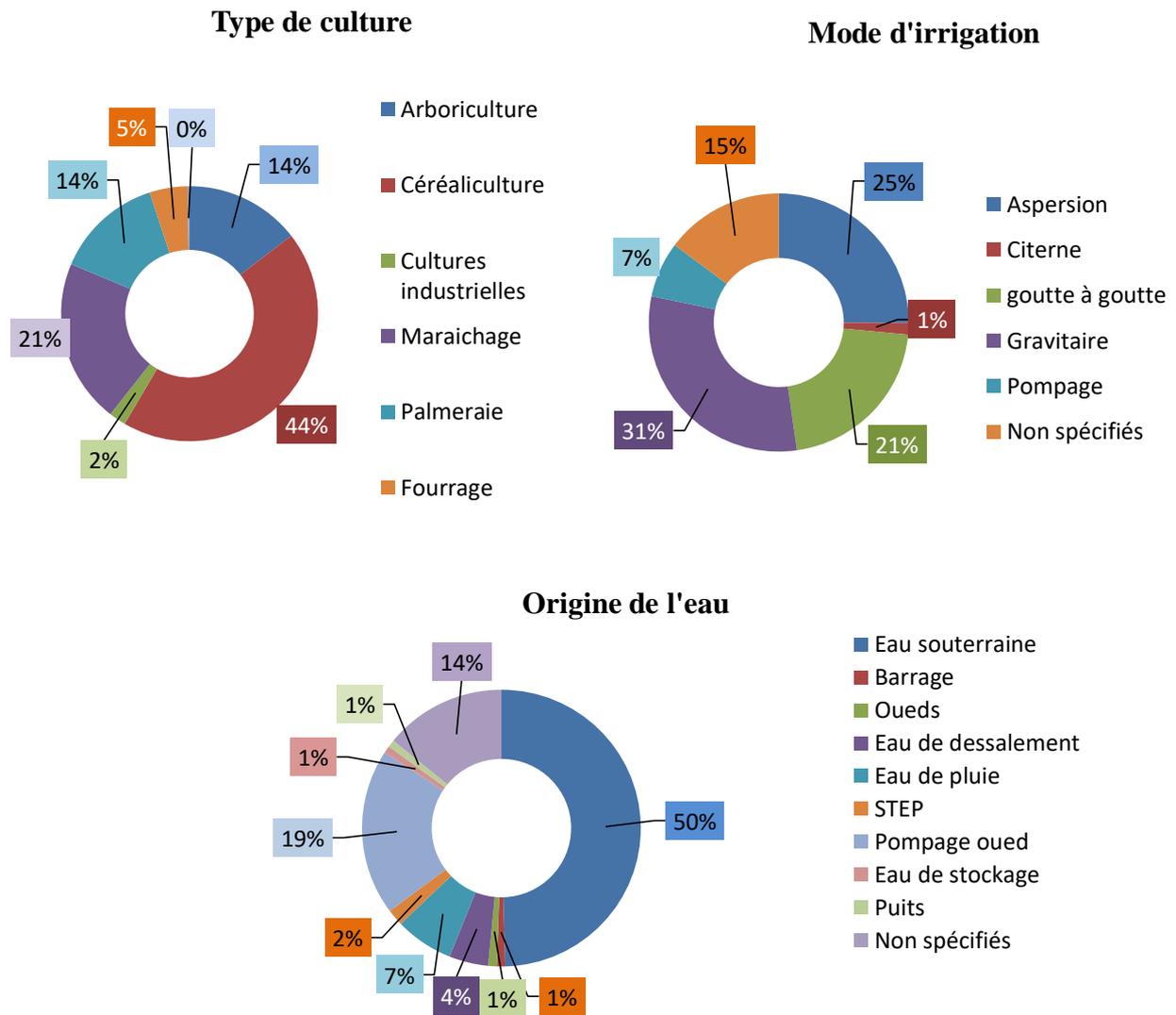


Figure 5 : Les superficies délimitées et réparties selon le type de culture, le mode d'irrigation et l'origine de l'eau (ONA, 2024).

I.3.4. Les obstacles de la réutilisation des eaux usées traitées

D'après le rapport de synthèse sur la REUSE en Algérie les obstacles rencontrés pour la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture sont les suivants (Hamamouch & Hartani, 2022) :

1. Les STEP disposent d'un traitement secondaire qui ne permet pas une réutilisation sans risque en irrigation.
2. Difficultés de transferts d'eau suite à l'implantation des ouvrages en aval des parcelles à irriguer.

3. Variabilité de la composition des EUT suite aux déversements non contrôlés des industries.
4. Une coordination non efficace entre les ministères ainsi que les services de la wilaya.
5. Les agriculteurs ne sont pas prêts à adapter leurs pratiques aux conditions d'utilisation de cette eau non-conventionnelle.
6. Des interrogations sont soulevées sur l'application du cadre réglementaire.
7. La tarification trop faible pose un problème de recouvrement des coûts.

I.3.5. Règlementation Algérienne pour la réutilisation des eaux usées traitées

La réutilisation des eaux usées non traitées est formellement interdite par la loi n° 83-03 du 5 février 1983, relative à la protection de l'environnement et la loi n° 83-17 du 16 juillet 1983, portant le code des eaux. Par contre la réutilisation des eaux usées épurées « REUE » est une action volontaire et planifiée qui vise la production de quantités complémentaires en eau pour différents usages qui est réglementée par la loi n°05-12 du 04 Août 2005, relative à l'eau, qui a institué la concession de l'utilisation des eaux usées épurées à des fins d'irrigation (JORA n°60, 2005) et le décret n°07-149 du 20 mai 2007 fixant les modalités de concession de l'utilisation des eaux usées épurées à des fins d'irrigation ainsi que le cahier des charges-type y afférent.

Les arrêtés interministériels du 02 janvier 2012 qui prennent en application les dispositions de l'article 2 du décret exécutif n°07-149, publiés en Janvier 2012 par le ministère des ressources en eau (JORA n°41, 2012). Ces arrêtés fixent les spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation et notamment en ce qui concerne les paramètres microbiologiques et les paramètres physico-chimiques ainsi que la liste des cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées.

Il existe aussi la norme Algérienne N°17683- 2014 « Réutilisation des eaux usées épurées à des fins agricoles, municipales et industrielles - Spécifications physico-chimiques et biologiques » établie par l'Institut Algérien de Normalisation (IANOR).

Le transport et la réutilisation des eaux usées domestiques dans l'agriculture sont régis par le décret exécutif 07-149 du 20 mai 2007 (JORA N°35 2007). Le tableau 6 et 7 regroupe les recommandations physico-chimiques et les spécifications microbiologiques des eaux usées épurées destinée à l'irrigation agricole respectivement sont selon JORA N°41 2012.

Chapitre I: Synthèse bibliographique

Tableau 6 : recommandations physico-chimiques pour la réutilisation des eaux usées épurées en agriculture pour l'Algérie (JORA N°41, 2012).

Paramètres	Unité	Concentration Maximale admissible
Physique	pH	$6.5 \leq \text{pH} \leq 8.5$
	CE	3 ds/m
	MES	30 mg/L
Chimique	DBO ₅	30 mg /L
	DCO	90 mg/L
	Chlorure (Cl)	10 meq/L
	Azote (NO ₃ -N)	30 mg/L
	Bicarbonate (HCO ₃)	8.5 meq/L
Eléments toxiques	Aluminium	20 mg/L
	Arsenic	2 mg/L
	Béryllium	0.5 mg/L
	Bore	2 mg/L
	Cadmium	0.05 mg/L
	Chrome	1 mg/L
	Cobalt	5 mg/L
	Cuivre	5 mg/L
	Cyanures	0.5 mg/L
	Fluor	15 mg/L
	Fer	20 mg/L
	Phénols	0.002 mg/L
	Plomb	10 mg/L
	Lithium	2.5 mg/L
	Manganèse	10 mg/L
	Mercure	0.01 mg/L
	Molybdène	0.05 mg/L
Nickel	2 mg/L	
Sélénium	0.02 mg/L	
Vanadium	1 mg/L	
Zinc	10 mg/L	

Chapitre I: Synthèse bibliographique

Tableau 7 : Spécifications microbiologiques des eaux usées épurées destinées à l'irrigation agricole (JORA N°41, 2012).

Groupe de cultures	Paramètres microbiologiques	
	Coliformes fécaux (CFU/100 mL)	Nématodes intestinaux (Œufs/L)
Irrigation non restrictive Culture de produit pouvant être consommés crus	<100	Absence
Légumes qui ne sont consommés que cuits Légumes destinés à la conserverie ou à la transformation non alimentaire	<250	<0.1
Arbres fruitiers (1) Cultures et arbustes fourragers (2) Cultures céréalières Cultures industrielles (3) Arbres forestiers Plantes florales et ornementales (4)	Seuil recommandé <1000	<1
Cultures du groupe précédent utilisant l'irrigation localisée (5) (6)	Pas de norme recommandée	Pas de norme recommandée

(1) L'irrigation doit s'arrêter deux semaines avant la cueillette. Aucun fruit tombé ne doit être ramassé sur le sol. L'irrigation par aspersion est à éviter.

(2) Le pâturage direct est interdit et il est recommandé de cesser l'irrigation au moins une semaine avant la coupe.

(3) Pour les cultures industrielles et arbres forestiers, des paramètres plus permissifs peuvent être adoptés.

(4) Une directive plus stricte (<200 coliformes fécaux par 100 ml) est justifiée pour l'irrigation des parcs et des espaces verts avec lesquels le public peut avoir un contact direct, comme les pelouses d'hôtels.

(5) Exige une technique d'irrigation limitant le mouillage des fruits et légumes.

(6) A condition que les ouvriers agricoles et la population alentour maîtrisent la gestion de l'irrigation localisée et respectent les règles d'hygiène exigées. Aucune population alentour.

Chapitre I: Synthèse bibliographique

Selon l'arrêté interministériel du 02 janvier 2012 ; le concessionnaire ne doit utiliser l'irrigation avec les eaux usées traitées que sur la liste des cultures autorisées figurant dans le tableau 8.

Tableau 8 : Liste des cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées traitées.

Groupes de cultures	Liste des cultures
Arbres fruitiers	Datte, vigne, pomme, pêche, poire, abricot, nêfle, cerise, prune, nectarine, grenade, figue, rhubarbe, arachide, noix, olive
Agrumes	Pamplemousse, citron, orange, mandarine, tangerine, lime, clémentine.
Cultures fourragères	Bersim, maïs, sorgho fourrager, vesce et luzerne
Cultures industrielles	Tomate industrielle, haricot à rames, petit pois à rames, betterave sucrière, coton, tabac, lin
Cultures céréalières	Blé, orge, triticales et avoine
Cultures de production de semences	Pomme de terre, haricot et petit pois
Arbustes fourragers	Acacia et Atriplex
Plantes florales à sécher ou à usage industriel	Rosier, Iris, Jasmin, Marjolaine et Romarin

I.3.6. Utilisation des eaux usées à des fins d'irrigation en Algérie

Au cours de l'année 2021 on compte 11 stations d'épuration qui ont permis d'irriguer 905 922 hectares de superficies agricoles par l'utilisation d'un volume de 15.6 millions m³ d'eau usée traitée. Les STEP utilisés en irrigation agricole assurent un traitement secondaire et répondent aux normes d'utilisation à des fins d'irrigation. Le bilan annuel de l'ONA sur les STEP concernés par la réutilisés en agriculture, les volumes et les superficies irriguées sont représentés dans le tableau 9(ONA, 2021). Une collaboration entre ONID et ONA est établie afin de déterminer les GPI à proximité des STEP destiné à la réutilisation dans un but d'utiliser 44000 m³/an pour irriguer plus de 2000 ha principalement l'arboriculture (ONA 2021). Le bilan de l'ONA en 2023 indique que 15 STEP sont concernées par la réutilisation agricole sur le territoire national à savoir :

Chapitre I: Synthèse bibliographique

Ain El Houtz (Tlemcen), Azzefoun (Tizi Ouzou), Ammi Moussa (Relizane), Boumerdes, Guelma, Ain Témouchent, Mascara et Mohammadia (Mascara), Bouguirat, Hadjadj, Sidi Lakhdar, Khadra (Mostaganem), Timgad (Batna), El Bayedh et Médéa. Un total de 10 125 hectares de superficies agricoles sont concernés par la REUSE (ONA, 2024).

Pour pallier au manque d'eau conventionnelle tout en sécurisant l'accès à l'eau pour l'alimentation en eau potable (AEP) et à l'eau d'irrigation ; la SEAAL et l'ONID ont élaboré une stratégie commune pour répondre à l'urgence actuelle dans la plaine de la Mitidja. La stratégie consiste à alimenter le réseau d'irrigation de l'ONID des trois périmètres irrigués par les eaux usées traitées et qui concerne les trois régions agricoles de la plaine de la Mitidja : Mitidja Centre depuis la STEP de Baraki, Mitidja Est-Hamiz depuis la STEP de Reghaia, et le Sahel Algérois depuis les STEP de Chenoua et Hadjout (Hamamouch & Hartani, 2022). La STEP de Boufarik en exploitation avec un système de traitement tertiaire est en cours de réalisation qui est adapté à une réutilisation non restrictive.

Une initiative étatique fructueuse a permis l'aménagement de plusieurs périmètres irrigués en aval de plusieurs STEP avec une eau réutilisée distribuée gratuitement encourageant ainsi les agriculteurs et les familiarisant avec cette alternative d'économie d'eau. L'ONID a entrepris une irrigation aux eaux usées traitées pour le périmètre agricole de la région de Hennaya et M'leta mais il y a un manque d'informations sur les réalités de terrain et sur le suivi et les contrôles sanitaires par les autorités compétentes à l'échelle territoriale. Une autre expérience du site décentralisé a eu lieu au niveau de l'Eco-quartier Tafilalet à Ben Isguen ; la station installée est de type phyto-épuration constituée de trois bassins de filtration en cascade contenant des roseaux comme plantes épuratrices. Des problèmes de dysfonctionnement sont rencontrés au cours de l'été ce qui provoque des odeurs désagréables et la prolifération des moustiques (Hamamouche & Hartani, 2022).

Chapitre I: Synthèsbibliographique



Figure 6 : Carte des STEP concernées par la réutilisation des eaux usées traitées en 2023 (ONA, 2024)

Tableau 9 : Bilan annuel de l'ONA sur les STEP destinés à la réutilisation agricole (ONA 2021)

Zone/ D.A	Unité	Désignation	Volume (m ³)		Domaine Agricole (Ha)	Type de culture	Utilisateurs (Concessionnaire)
			Epuré	Réutilisé			
Alger	Boumerdès	Station d'épuration à boues activées de Boumerdès	3 067 050	312 666	Flici: 49	Pépinière d'oliviers, Orangers, Vignes	M. Flici
					Rahmoun: 76		M. Rahmoun
Annaba	Guelma	Station d'épuration à boues activées de Guelma	28 736	26 951	Guelma, Boumahra et Bouchegouf : 6 980	Vergers	Contribution à l'irrigation du périmètre géré par l'ONID par l'apport des eaux usées à Oued seyousse
Chlef	Relizane	Station de lagunage aéré de Ammi Moussa	9 986 750	2 974 200	400	Arboriculture	Réutilisation indirecte (Barrage Gargar)
	Tlemcen	Station d'épuration à boues activées de Tlemcen	4 976 096	4 105 035	Plaine de Hennaya 912,22	Arboriculture	O.N.I.D
Oran	Mascara	Station d'épuration à boues activées de Mascara	3 322 735	2 763 177	El-Kouaer : 400	Oliviers Culture céréalière Agrumes	Associations agriculteurs avec autorisation de la DRE
	Ain Témouchent	Station d'épuration à boues activées d'Ain Témouchent	3 322 735	2 763 177	135	Arboriculture	Autorisation DRE
	Mostaganem	Station de lagunage naturel de Bouguirat	1 092 563	908 222	20	Arbresfruitiers (agrumes)	
		Station de lagunage aéré de Hadjadj	784 338	653 457	20		
		Station d'épuration à boues activées de Sidi Lakhdar	503 665	0	7		
	Station d'épuration à boues activées de Khadra	79 692	0	2			
Saida	Saida	Station d'épuration à boues activées d'Ain El Hadjar	1 023 963	255 000	58	Arboriculture	
Total des 11 STEP			31 420 160	15 400 971	11 494.22		

I.4 Traitement des eaux usées

I.4.1 Définition des eaux usées

Les eaux usées se sont les eaux utilisées pour des usages domestiques, industriels ou même agricole qui constituent un effluent pollué rejeté dans un émissaire d'égout (Kettab, 2017a).

I.4.2 Origine des eaux entrant en station d'épuration

Les eaux usées qui entrent dans les stations de traitement des eaux polluées (STEP) ont trois origines possibles :

I.4.2.1. Les eaux domestiques

Ils sont issus de l'utilisation de l'eau par les particuliers pour satisfaire tous les usages ménagers (toilettes ; lave-linge, lave-vaisselle, douche/bain, etc.).

I.4.2.2. Les eaux industrielles

Concerne les rejets des usines, mais aussi les rejets d'activités artisanales ou commerciales : blanchisserie, restaurant, laboratoire d'analyses médicales, etc. les effluents industriels peuvent fortement modifier la composition des eaux usées. Cette modification est très étroitement liée à l'activité industrielle concernée et peut prendre des formes innombrables.

I.4.2.3. Les eaux de ruissellement

Les eaux de pluie qui ruissellent sur les surfaces imperméabilisées, en général en zone urbaine vont récupérer divers polluants sous forme particulaire. Les surfaces imperméables (toiture, voiries, etc.) peuvent être contaminées par les feuilles des arbres, les cendres de cheminées (industrielles ou de maisons de particuliers), les déjections d'oiseaux, les dépôts de métaux lourds, etc. (Baumont, 1997).

I.4.3. Les niveaux du traitement des eaux usées

Le traitement des eaux usées permet de produire des effluents traités à un niveau approprié et acceptable pour protéger l'environnement des différents polluants et diminuer le risque pour la santé humaine (FAO, 2003a). Les eaux usées sont acheminées par les égouts vers les stations de traitement des eaux polluées (STEP) afin d'être traitées pour devenir des eaux usées épurées ou traitées.

I.4.3.1. Le pré-traitement

C'est une séparation physique qui consiste à éliminer les fragments solide et grossiers par dégrillage, dessablage et déshuilage.

I.4.3.2. Le traitement primaire

C'est une étape visant à éliminer par décantation les matières minérales ou organiques par des procédés physiques et physico-chimiques. Ce traitement primaire permet d'éliminer jusqu'à 90% de MES et de 40 à 65% de la DBO₅ des effluents résiduels urbains (INEC, 2018)

I.4.3.3. Le traitement secondaire ou biologique

Ce traitement permet de dégrader les matières organiques solubles et les matières en suspension grâce à l'action des micro-organismes.

I.4.3.4. Le traitement tertiaire et/ou avancé

Enlèvement de constituants spécifiques de l'eau usée tels que les nutriments (azote et phosphore) et les métaux lourds. Il comprend également la désinfection employée pour réduire les contaminants microbiologiques ; s'effectue soit par chloration, ozonation ou ultraviolet (Kettab, 2017a). La figure 7 schématise les chaînes de traitement des eaux usées et sous-produits associés pour différentes réutilisations.

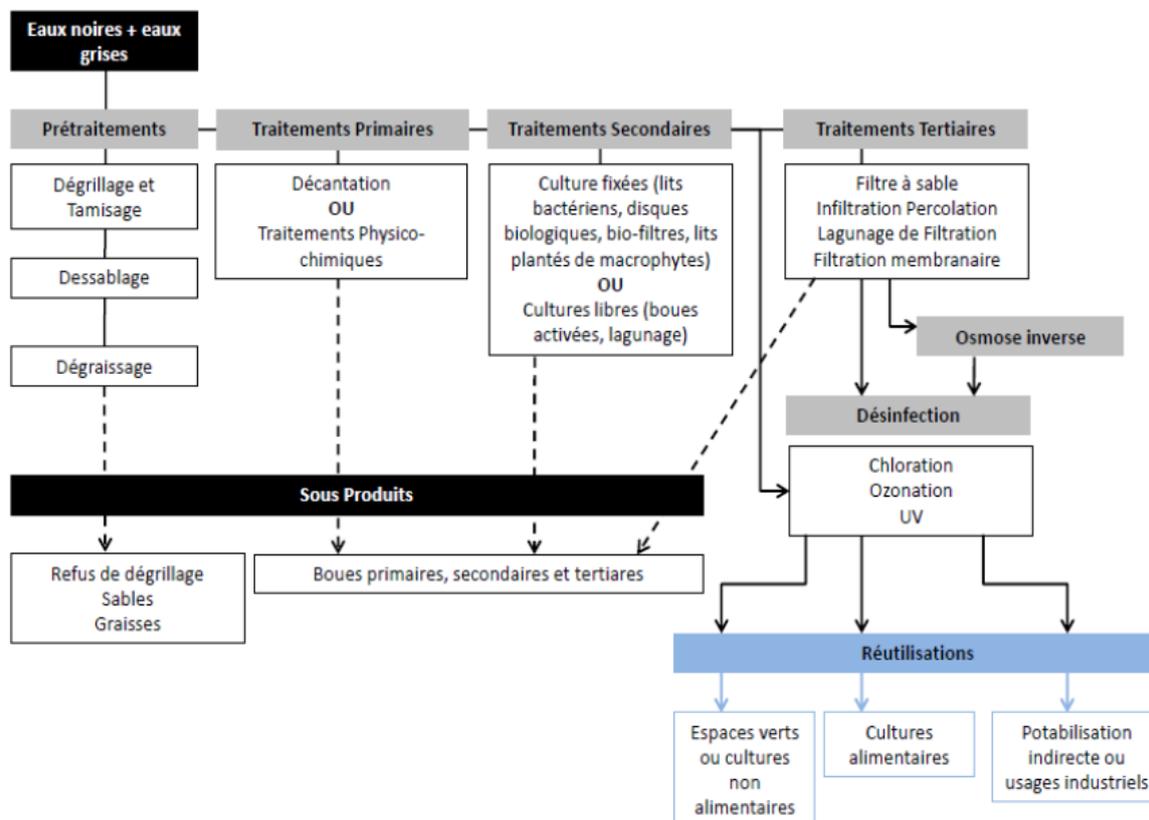


Figure 7 : Chaines de traitement des eaux usées et sous-produits associés pour différentes réutilisations(Catherinot, 2013)

I.4.4. Evaluation de la qualité des eaux usées pour l'irrigation

I.4.4.1. Le potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH est une mesure de la concentration des ions d'hydrogènes, un pH naturel est entre 6,5 et 8,5.

I.4.4.2. La conductivité électrique (EC)

La conductivité électrique d'une eau permet d'apprécier les sels dissous, l'EC d'une eau naturelle est entre 50 et 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

I.4.4.3. Les matières en suspension (MES)

Les matières en suspension sont des matières insolubles de nature organique et minérale pouvant accumuler des matières toxiques. Des taux élevés de MES produisent le colmatage du système d'irrigation goutte à goutte qui est préconisé pour éviter la contamination des plantes et assurer une protection sanitaire.

I.4.4.4. La demande chimique en oxygène (DCO)

C'est la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder toutes les matières organiques et les matières minérales contenues dans l'eau.

I.4.4.5. La demande biochimique en oxygène (DBO)

Elle présente la quantité d'oxygène nécessaire pour décomposer par oxydation avec l'intervention des bactéries les matières organiques et minérales contenues dans les eaux usées. L'évaluation du degré de pollution et la qualité et des eaux usées est estimée en mesurant ces matières organiques présentes.

I.4.4.6. Indice de biodégradabilité

La DCO représentant la matière organique dans sa globalité et la DBO la seule fraction biodégradable dans des conditions fixées. Le rapport DCO/DBO5 nous permet de déterminer l'indice de biodégradabilité qui va indiquer la nature de l'effluent selon les valeurs mentionnées dans le tableau 10. L'eau résiduaire urbaine contient une majorité de composés organiques biodégradables et la DBO représente environ 80 à 90 % de la DCO et le rapport DCO/DBO5 est généralement compris entre 1,5 et 2,5 (Rodier et al., 2009).

Chapitre I: Synthèse bibliographique

Tableau 10 : Indice de biodégradabilité des effluents (Rodier 2009).

DCO/DBO ₅	Signification
DCO/DBO ₅ < 3	Effluent facilement biodégradable
3 < DCO/DBO ₅ < 5	Effluent moyennement biodégradable
DCO/DBO ₅ > 5	Effluent difficilement biodégradable, voire non biodégradable

I.4.4.7. La salinité

Dans la perspective d'un projet d'irrigation on évalue la salinité de l'eau en mesurant la concentration totale en sels solubles. Parmi les éléments induisant la salinité des eaux usées sont le sodium et le chlore qui sont responsables en grande partie de la salinisation des sols. La salinité excessive de l'eau d'irrigation provoque des dommages vis-à-vis des sols et réduit les rendements cultureux (Boutin et al., 2009).

Richards (1969) a établi une échelle de qualité des eaux d'irrigation en fonction de leur salinité évaluée par leur conductivité électrique (tableau 11).

Tableau 11 : Classe de qualité de salure de l'eau d'irrigation (Faby & Brissaud, 1997)

Qualité de l'eau	Conductivité de l'eau (mmhos/cm)	Sels soluble correspondants estimés en NaCl (mg/L)
I. Excellente	<0.25	<160
II. Faible salinité	0.25 – 0.75	160 - 500
III. Forte salinité	0.75 – 2.25	500 - 1500
IV. Très forte salinité	2.25 – 5	1500 - 3600

I.4.4.8. Le ratio d'absorption du sodium (SAR)

La concentration de sodium dans l'eau d'irrigation est estimée par le ratio d'absorption du sodium (SAR). La sodisation est l'accumulation du sodium sur le complexe adsorbant du sol ce qui provoque la dégradation de ces propriétés physiques et affecte sa perméabilité en posant des problèmes d'infiltration (Boutin et al., 2009). Le risque lié au sodium exprimé en termes de SAR est calculé à partir du rapport entre le sodium le calcium et le magnésium. Rhoades (1977) explique que la concentration élevée en sodium fait augmenter l'alcalinité du sol et réduit sa perméabilité. Toutefois une association entre le SAR et EC_w devraient être employés pour évaluer les problèmes d'infiltration (FAO, 2003a).

Chapitre I: Synthèse bibliographique

Le pourcentage de sodium soluble (SSP) est également utilisé pour évaluer le risque lié au sodium. Le SSP est défini comme le rapport de sodium en epm (équivalents par million) par rapport au nombre total de cations epm multiplié par 100. Une eau dont la SSP supérieure à 60 pour cent peut entraîner des accumulations de sodium de sodium qui entraînera une dégradation des propriétés physiques du sol (Fipps, 1996).

Un diagramme est proposé par le laboratoire USSL qui classe les eaux d'irrigation en fonction des risques de sodisation et de salinité par la combinaison du SAR et EC. Pour déterminer l'aptitude de l'eau à l'irrigation plusieurs mesures peuvent être utilisés ; un classement de la valeur du SAR permet de déterminer le risque lié au sodium (tableau 12).

Tableau 12 : Risque lié au sodium dans l'eau sur la base des valeurs SAR(Fipps, 1996)

Valeurs SAR	Risque lié au sodium	Commentaire
1 - 10	Faible	Peut être utilisé sur les cultures sensibles
10 - 18	Moyen	Amendements (gypse) et lixiviation nécessaires
18 - 26	Elevé	Généralement inadapté à une utilisation continue
>26	Très élevé	Généralement inadapté à l'utilisation.

I.4.4.9. Eléments traces métalliques

Les métaux présents dans les eaux usées traitées représentent le principal problème de réutilisation agricole ; le cadmium (Cd), cuivre (Cu), molybdène (Mo), nickel (Ni) et zinc (Zn) peuvent s'accumuler dans la plante et constituer un risque sanitaire significatif pour les humains et les animaux. L'irrigation avec des eaux usées sur des sols calcaires ne devraient pas être considérés comme un problème sachant qu'une forte concentration en CaO_3 et un pH supérieur à sept (7) inactive les métaux lourds et diminue leur mobilité et leur disponibilité pour les cultures (FAO, 2003a). Les ETM peuvent causer une carence en fer qui se traduit par une chlorose et nécrose de la plante, le cadmium induit une inhibition de la photosynthèse. Alors que le plomb et mercure sont très toxique pour les végétaux et une chlorose est observé suite à la présence de sélénium qui est absorbé par la plante et affecte son métabolisme (Kettab, 2017b).

Selon (Baumont, 1997) les métaux lourds se séparent en quatre classes en fonction de leur dangerosité et leur intérêt agronomique :

1. *Intéressant pour les plantes et ne posant pas de problème sanitaire* : le manganèse (Mn) et le Fer (Fe) sont tous deux indispensables au bon développement des végétaux.
2. *Intéressant pour les plantes et posant de problèmes sanitaires* : le cuivre (Cu), molybdène (Mo) et zinc (Zn) sont indispensables pour les végétaux.
3. *Inutiles ou mauvais pour les plantes et ne posant pas de problème sanitaire* : le plomb (Pb), sélénium (Se), étain (Sn), mercure (Hg), chrome (Cr) et l'aluminium (Al).
4. *Inutiles ou mauvais pour les plantes et posant de problèmes sanitaires* : l'arsénique (As), cadmium (Cd) et nickel (Ni).

I.4.4.10. Eléments nutritifs

L'eau usée urbaine après traitement secondaire peut contenir un taux d'azote qui varie de 20 à 60 mg/l ; concernant le phosphore le taux varie de 6 à 15 mg/l (15-35 mg/l P_2O_5) et le potassium varie de 10 à 30 mg/l (12-36 mg/l K_2O). Pour mieux gérer les apports en engrais et préparer un programme de fertilisation optimal il faut connaître la concentration en azote, phosphore et potassium de l'eau et du sol pour ne pas dépasser les besoins des cultures. Ils peuvent contenir des concentrations adéquates en soufre, zinc, cuivre et autres micronutriments mais une attention particulière doit être portée au bore qui est phytotoxique lorsqu'il se trouve en excès (FAO, 2003a).

I.4.4.11. Paramètres microbiologiques

Les eaux usées peuvent contenir des bactéries, des virus, des protozoaires et les helminthes. Les microorganismes pathogènes peuvent provoquer des gastro-entérites comme des maladies mortelles (choléra) (Kettab, 2017a). La surveillance des eaux usées traitées s'intéresse à rechercher les coliformes totaux, coliformes fécaux et streptocoques fécaux pour estimer la population des pathogènes. En effet, il existe une corrélation entre la présence de ces bactéries témoins et la présence de bactéries pathogènes mais certaines formes de résistance des protozoaires (kystes) et des œufs d'helminthes peuvent échapper au contrôle (Baumont et al., 2014). Les principales maladies à transmission hydriques, agent pathogène, les symptômes et mode de contamination sont regroupés dans les tableaux I et II en annexe.

Chapitre I: Synthèse bibliographique

I.4.5. Normes et réglementations en vigueur

Les eaux usées traitées réutilisées pour l'irrigation doivent répondre aux normes de qualité qui précisent la qualité physico-chimique et microbiologique afin de garantir la protection de la santé humaine et la préservation de l'environnement. Parmi les normes internationales on trouve la FAO, l'OMS et l'USEPA.

I.4.5.1. Les directives de la FAO

Les directives de la FAO relatives à la qualité physicochimique de l'eau usées traitée destinée à l'irrigation et les teneurs limites en éléments traces métalliques pour la réutilisation des eaux épurées à court terme et à long terme. Les limites sont représentées dans les tableaux 13 et 14.

Tableau 13 : Directives pour l'interprétation de la qualité de l'eau pour l'irrigation.

Problème potentiel en irrigation	Unité	Degré à restriction d'usage		
		Aucun	Léger à modérer	Sévère
Salinité				
EC _w ¹	dS/m	< 0.7	0.7 – 3	> 3
TDS	mg/l	450	450 – 2000	> 2000
Infiltration	dS/m			
SAR ² = 0 – 3		> 0.7	0.7 – 0.2	< 0.2
CE = 3 – 6		> 1.2	1.2 – 0.3	< 0.3
= 6 – 12		> 1.9	1.9 – 0.5	< 0.5
= 12 – 20		> 2.9	2.9 – 1.3	< 1.3
= 20 – 40		> 5.0	5.0 – 2.9	< 2.9
Toxicité spécifique des ions				
Sodium (Na)				> 9
Irrigation de surface	SAR	< 3	3 – 9	
Irrigation par aspersion	méq/l	< 3	> 3	
Chlorure (Cl)				> 10
Irrigation de surface	méq/l	< 4	4 – 10	
Irrigation par aspersion	méq/l	< 3	> 3	
Bore (B)	mg/l	< 0.7	0.7 – 0.3	> 3.0
Effets divers				
Azote (NO ₃ -N) ³	mg/l	< 5	5 – 30	> 30
Bicarbonate (HCO ₃)	méq/l	< 1.5	1.5 – 8.5	> 8.5
pH			Gamme normale 6,5 – 8,4	

1 EC_w signifie la conductivité électrique en deciSiemens par mètre à 25°C. 2 SAR signifie le taux d'adsorption de sodium (sodium adsorption ratio). 3 NO₃-N signifie l'azote sous forme de nitrate rapporté en terme d'azote élémentaire. NH₄-N et N-organique devraient être également examinés dans les eaux usées.

Tableau 14 : Limites recommandées en éléments trace dans les eaux usées épurées destinées à l'irrigation^a.

Paramètres	Utilisation à long terme ^b (mg/L)	Utilisation à court terme ^c (mg/L)
Aluminium	5.0	20.0
Arsenic	0.1	2.0
Béryllium	0.1	0.5
Bore	0.75	2.0
Cadmium	0.01	0.05
Chrome	0.1	1.0
Cobalt	0.05	5.0
Cuivre	0.2	5.0
Cyanures	0.05	0.5
Fluor	1.0	15.0
Fer	5.0	20.0
Phénols	0.002	0.002
Plomb	5.0	10.0
Lithium	2.5	2.5
Manganèse	0.2	10.0
Mercure	0.01	0.01
Molybdène	0.01	0.05
Nickel	0.2	2.0
Sélénium	0.02	0.02
Vanadium	0.1	1.0
Zinc	2.0	10.0

^aAdapté de: Académie nationale des sciences - National Academy of Engineering (1973)

^bPour l'eau utilisée sans interruption sur tous les sols

^cPour l'eau utilisée pendant une période d'au plus 20 ans sur des sols de texture fine, neutres ou alcalins

I.4.5.2. Recommandations de l'OMS

Les normes d'usage agricole des eaux usées traitées éditée par l'OMS visent à protéger la santé des agriculteurs et de leurs familles, des communautés locales et des consommateurs des produits cultivés en examinant les données épidémiologiques et relatives à l'évaluation des risques. L'objectif des directives est de recycler cette ressource et bénéficier des nutriments pour une production alimentaire tout en protégeant la santé publique. Ils indiquent que les agents pathogènes (helminthes et schistosomes), les irritants cutanés et les agents pathogènes à transmission vectorielle sont les plus dangereux suite à l'utilisation d'eaux usées en agriculture et représente la plus forte probabilité de provoquer des pathologies (OMS, 2012c). Les recommandations de l'OMS pour les exigences de la réutilisation des eaux usées en agriculture sont indiquées dans le tableau 15.

Chapitre I: Synthèse bibliographique

Les lignes directrices de l'OMS pour une utilisation sûre des eaux usées appliquent des approches de gestion des risques et recommandent de définir des objectifs réalistes fondés sur la santé, ainsi que d'évaluer et de gérer les risques. Ces lignes directrices portent sur le niveau de traitement des eaux usées, la restriction des cultures, les méthodes d'application des eaux usées et le contrôle de l'exposition humaine. Les objectifs sanitaires utilisés par l'OMS s'appuient sur un niveau de confiance en un risque acceptable en adoptant une charge tolérable de maladies véhiculées par l'eau $\leq 10^{-6}$ DALY par personne et par an. Le DALY est un indicateur quantitatif de la « charge de morbidité » qui reflète la durée totale de vie en bonne santé perdue, c'est-à-dire la qualité de vie réduite en raison d'un handicap, ou la durée de vie perdue en raison d'une mortalité prématurée. Selon les circonstances, diverses mesures de protection de la santé - barrières - sont possibles notamment le traitement des déchets, la limitation des cultures, l'adaptation de la technique d'irrigation et du temps d'application et le contrôle de l'exposition humaine. Un traitement partiel selon une norme moins exigeante peut être suffisant s'il est associé à d'autres mesures de réduction des risques pour atteindre le risque $\leq 10^{-6}$ (ou 1 sur 100 000) (Winpenny et al., 2010). La Figure 8 présente les réductions des agents pathogènes obtenues avec plusieurs options de combinaisons de traitements des eaux usées et d'autres mesures de protection sanitaire dans l'objectif d'atteindre $\leq 10^{-6}$ DALY par personne et par an (OMS, 2012b).

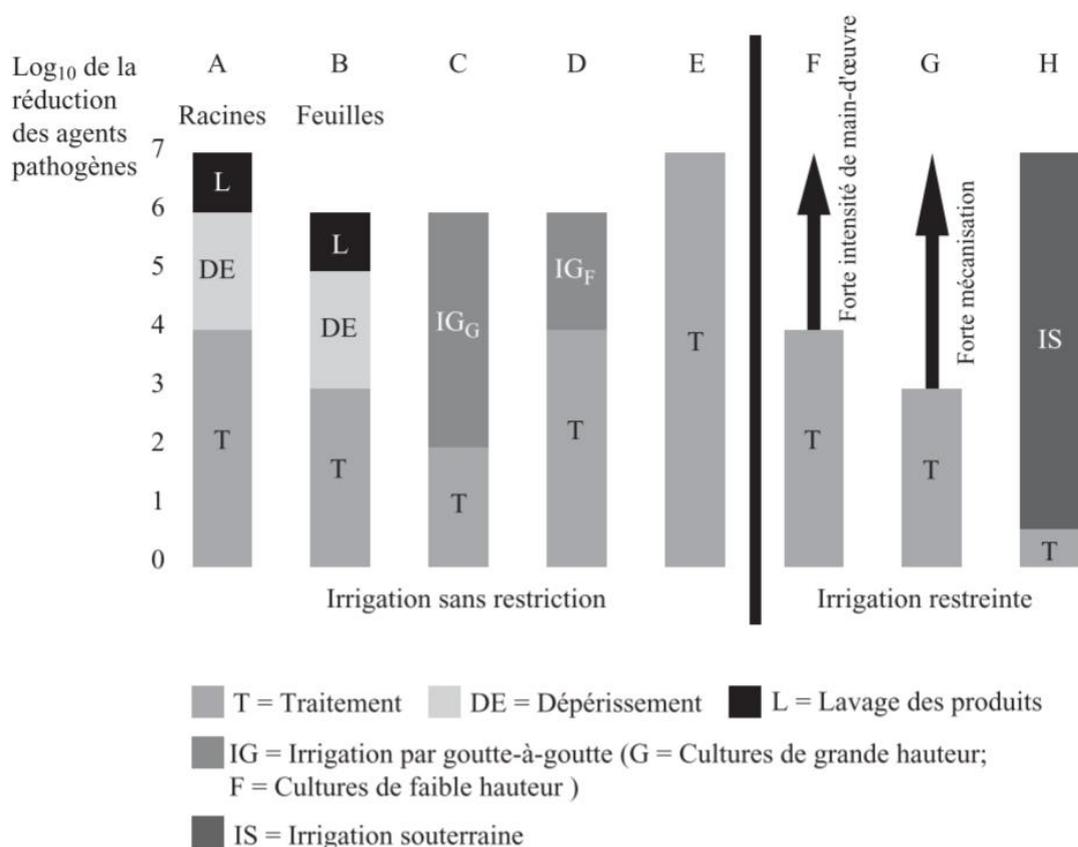


Figure 8 : Exemples d'options pour la réduction des agents pathogènes viraux, bactériens et protozoaires par différentes combinaisons de mesures de protection sanitaire permettant de réaliser l'objectif lié à la santé de $\leq 10^{-6}$ DALY par personne et par an

I.4.5.3. Recommandations de l'USEPA

Des recommandations sur la réutilisation des eaux usées traitées ont été élaborées par l'USEPA (United States Environmental Protection Agency) en collaboration avec l'USAID (United States Agency of International Development). Les normes microbiologiques établies sont beaucoup plus strictes que ceux indiqués par l'OMS dans un objectif de zéro pathogène dans les eaux réutilisées et exige des traitements tertiaires et avancés. Les recommandations portant sur les coliformes fécaux (CF) qui est le facteur permettant de déterminer la qualité microbiologique pour une réutilisation agricole. Les EUT destinées à l'irrigation avec restriction, les usages paysagers, industriels et environnementaux ne doit pas dépasser les 200 CF/100 mL, alors que l'irrigation sans restriction, la baignade et la réutilisation indirecte pour l'eau potable exige un niveau de non détectabilité.

Tableau 15 : Recommandations microbiologiques révisées de l'OMS pour le traitement des eaux usées avant utilisation en agriculture.

Catégories	Conditions de réutilisation	Groupes exposés	Techniques d'irrigation	Nématodes intestinaux ^b	Coliformes fécaux ^c	Traitements recommandés pour atteindre le niveau de qualité microbiologique
A	Irrigation sans restriction A1 Pour les cultures maraichères consommées crues, les terrains de sports, les parcs publics ^d	Travailleurs, consommateurs, public	Toutes	$\leq 0,1$ ^e	$\leq 10^3$	Série de bassin de stabilisation bien conçus, réservoir de stockage et de traitement remplis séquentiellement, ou traitement équivalent (p.ex. traitement secondaire conventionnel suivi soit d'un lagunage tertiaire, soit d'une filtration et d'une désinfection).
B	Irrigation restreinte. Céréales, cultures industrielles, fourragères, pâturage et forêt ^f	B1 Travailleurs (mais pas les enfants < 15 ans), population alentour	Par aspersion	≤ 1	$\leq 10^5$	Série de bassins de rétention dont un bassin de maturation ou un bassin séquentiel ou un traitement équivalent (p.ex. traitement secondaire conventionnel suivi soit par des lagunages tertiaires, soit une filtration.
		B2 comme B1	Par rigole d'infiltration ou par gravité	≤ 1	$\leq 10^3$	Comme pour la catégorie A.
		B3 Travailleurs dont les enfants < 15 ans, population alentour	Toutes	$\leq 0,1$	$\leq 10^3$	Comme pour la catégorie A.
C	Irrigation localisation sur des cultures de la catégorie B s'il n'y a pas d'exposition des travailleurs ou du public	Aucun	Goutte-à-goutte, micro-jet, etc.	Pas de norme	Pas de norme	Prétraitement nécessaire pour des raisons techniques liées à l'irrigation, mais pas moins qu'une sédimentation primaire.

Chapitre II :

Matériels et méthodes

II.1. Evaluation de la qualité des eaux usées traitées de la STEP de Baraki pour une réutilisation agricole

Notre étude s'intéressera particulièrement à la possibilité de la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture par l'évaluation de leur qualité pour l'irrigation et identifier les risques. Cette première partie de notre travail de recherche porte sur l'analyse de la qualité physico-chimique, bactériologique et détermination du taux en métaux lourds des eaux usées traitées de la STEP de Baraki (Alger) durant la période allant de janvier 2022 à décembre 2022. La comparaison des valeurs se fait par rapport aux standards et recommandations internationaux (OMS et FAO) et les normes Algériennes (JORA N°41 et NA 17683) destinées à l'irrigation.

II.1.1. Localisation et présentation de la STEP

La station de traitement des eaux usées traitées de Baraki est gérée par la société de l'eau et l'assainissement d'Alger (SEAAL) qui se situe à la commune de Baraki entre latitude 36°47'43'' N et longitude 2°57'55'' E. C'est la station principale de traitement des eaux usées d'Alger et la deuxième plus grande installation de son genre en Algérie et s'étend sur une superficie de 10 km. Cette STEP est destinée à traiter les eaux résiduaires urbaines de l'est d'Alger des communes d'El Harrach, Birtouta, Bab Ezzouar, Baba Ali, Oued Samar, Hussein Dey et Dar El Beida (figure 9).

Cette STEP est dimensionnée pour traiter les rejets d'une population équivalente à 1 800 000 Eq/hab avec un débit nominal de 298 200 m³/j. Le débit de pointe au temps sec 19 200 m³/h et en temps de pluie 38 400 m³/h, une charge à traiter DBO₅ de 90 000 kg/j, DCO de 216 000 et MES de 126 000 kg/j. Cette STEP fait appel aux processus biologiques (boues activées à moyenne charge) et qui additionne un traitement tertiaire qui est celui de la filtration sur sable alors que la désinfection par UV est à l'arrêt.

II.1.2. Principe et fonctionnement de la STEP

Après une série de prétraitements pour débarrasser les eaux usées des débris les plus volumineux des sables et des graisses (dégrillage, dessablage et déshuilage), les eaux usées sont transférées vers les bassins d'aération pour un traitement biologique. Après dégradation de la pollution carbonée et azotée, les eaux usées sont dirigées vers un clarificateur qui permet d'éliminer les matières résiduelles par décantation. L'eau clarifiée est directement filtrée sur un filtre de sable ensuite rejetée dans l'Oued El Harrach.

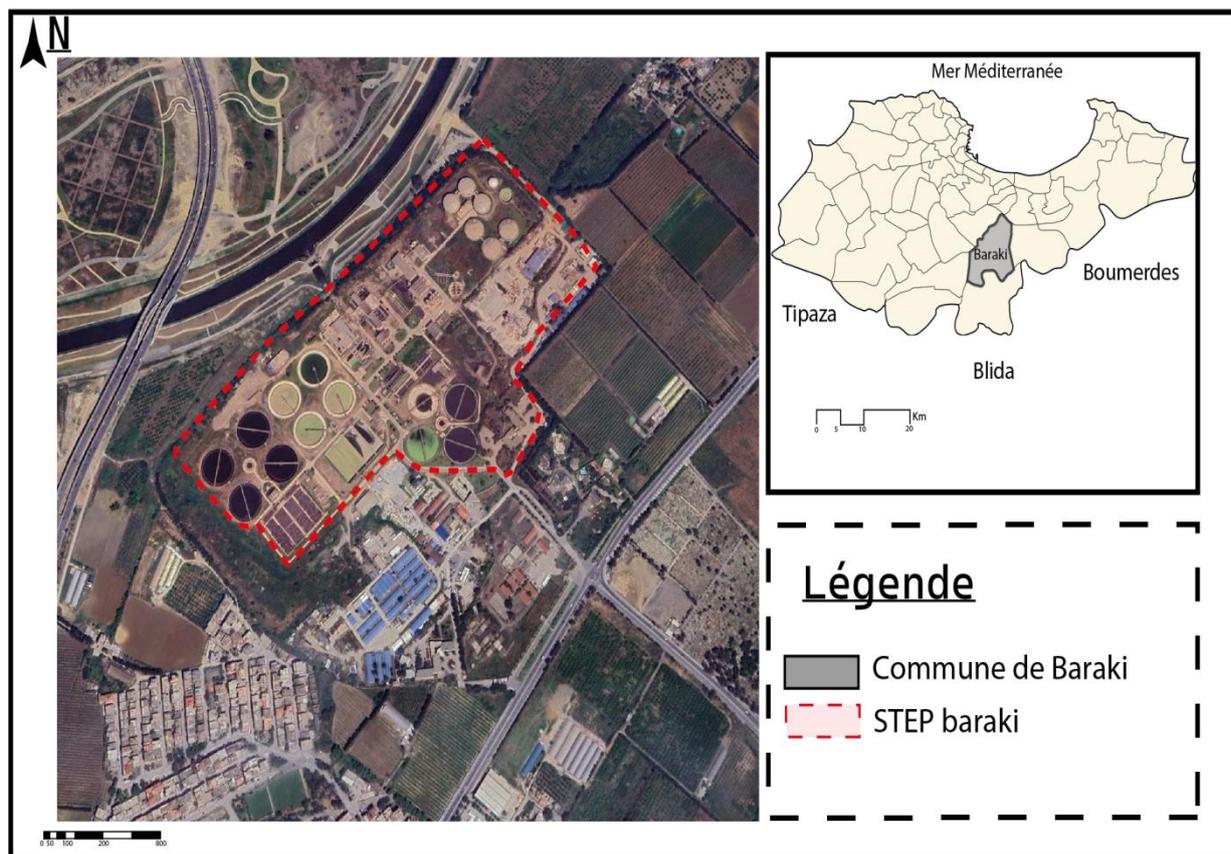


Figure 9 : Localisation géographique de la STEP de Baraki (Alger).

L'objectif de traitement en sortie de la STEP de Baraki pour l'eau filtrée est de :

- ✓ $DBO_5 \leq 20 \text{ mg/l}$;
- ✓ $DCO \leq 100 \text{ mg/l}$;
- ✓ $MES \leq 10 \text{ mg/l}$.

La figure 10 présente les différents ouvrages de la STEP de Baraki et les étapes de traitement des eaux usées sont les suivants :

- 1- Relevage des eaux usées : La STEP ne bénéficie pas d'une implantation en pente naturelle suffisante, la première opération consiste à relever les eaux usées par vis d'Archimède (7 vis disponible). Cette élévation assure par la suite un écoulement gravitaire nécessaire au traitement des eaux usées,
- 2- Dégrillage : les eaux usées sont dégrillées une première fois pour éliminer tous les déchets de taille supérieure à 60 mm, et une deuxième fois pour l'élimination de ceux supérieurs à 20 mm,

- 3- Dessablage & déshuilage : les sables contenus dans les eaux usées précipitent au fond du bassin où ils sont ensuite aspirés. Des fines bulles sont injectées qui ont pour effet de faire flotter les graisses et sont par la suite raclées à la surface puis acheminées vers le traitement des graisses,
- 4- Décantation primaire : le décanteur primaire permet de piéger une première partie de la pollution particulaire et de produire des boues primaires. L'eau décantée est recueillie en surface par des goulottes et dirigés vers le traitement biologique,
- 5- Traitement biologique « Clarification » : les micro-organismes se développent sous la forme de flocons de boue qui sont ensuite séparés par clarification pour produire de la boue biologique en excès et de l'eau clarifiée,
- 6- Filtration sur sable : l'eau clarifiée passe par un filtre à sable ce qui permet d'intercepter les dernières matières en suspension et obtenir une eau filtrée,
- 7- Désinfection par UV : c'est un procédé physique qui neutralise instantanément les micro-organismes exposés à des lampes UV immergées dans l'effluent, constitué de quatre canaux de huit modules composés de 288 lampes.
- 8- Epaissement statique
- 9- Epaissement dynamique
- 10- Digestion
- 11- Stockage du biogaz
- 12- Déshydratation
- 13- Stockage des boues

II.1.3. Prélèvement des échantillons de l'EUT

Les prélèvements des échantillons d'eau usée traitée sont effectués par l'échantillonneur automatique de 24 heures. Une analyse journalière est effectuée pour le pH, conductivité électrique (CE), matières en suspensions (MES), demande chimique en oxygène (DCO) et demande biologique en oxygène (DBO₅). Alors que pour l'azote total (NT), le phosphore total (PT), l'ammonium (NH₄⁺) et nitrate (NO₃⁻), une analyse par semaine est réalisée. Les macronutriments calcium (Ca²⁺), magnésium (Mg²⁺), sodium (Na⁺), potassium (K⁺), carbonates (CO₃²⁻) et bicarbonates (HCO₃⁻) sont analysés une fois par mois et les métaux lourds (ETM) deux fois par an. Les prélèvements pour l'analyse bactériologique sont réalisés à raison de deux fois par mois dans des flacons stériles qui sont conservés à 4°C et transportés directement au laboratoire central de SEAAL-Kouba (Alger).



Figure 10 : Les différents ouvrages de la STEP de Baraki.

II.1.4. Analyse physico-chimique de l'eau usée traitée

Les analyses physicochimiques ont été effectuées au niveau du laboratoire de la STEP et le laboratoire central de SEAAL.

II.1.4.1. Mesure du pH et conductivité électrique (CE)

Le pH et CE sont mesurés par un multimètre numérique HQ40D multi (HACH) qui est préalablement étalonné, les deux électrodes sont plongées dans l'échantillon à analyser et les résultats sont directement affichés.

II.1.4.2. Mesure des matières en suspension (MES)

Les MES sont déterminés par la méthode de filtration sur membrane en utilisant des disques filtrants. Une coupelle et un filtre en papier sont pesés (P_0) ensuite un volume de 200 mL d'eau est filtré à travers le papier filtre en utilisant un creuset filtrant et une pompe aspirante. Après filtration des eaux usées traitées, on remet le filtre dans la coupelle et laissant à l'étuve réglée à 150°C pendant 2 heures. Le taux des MES exprimé en mg/L est calculé par pesée différentielle en utilisant l'équation suivante :

$$(P_1 - P_0)/V \times 1000 \quad \text{Équation 1}$$

P_0 : Poids du disque filtrant et coupelle avant filtration (mg).

P_1 : Poids du disque filtrant et coupelle après filtration et dessiccation (mg).

V : Volume d'eau utilisée (mg).

II.1.4.3. Détermination de la demande biologique en oxygène (DBO5)

La DBO₅ étant la quantité d'oxygène consommée par les bactéries à 20°C à l'obscurité pendant 5 jours d'incubation. Les échantillons sont analysés par un Oxitop IS6 et la valeur est lue directement sur l'écran digital des bouteilles Oxitop qui est multipliée par un facteur selon l'intervalle de mesure.

$$DBO_5 = \text{Valeur lue} \times \text{facteur} \quad \text{Équation 2}$$

II.1.4.3. Détermination de la demande chimique en oxygène (DCO)

La DCO est déterminée par la méthode des kits LCK en utilisant un thermostat LT200 (HACH LANGE). Un volume de 2 mL d'échantillon est mélangé avec le réactif LCK 314 ensuite le mélange est minéralisé à 148°C pendant 120 mn et la lecture est effectuée par un spectrophotomètre DR 2800 (HACH LANGE) à une longueur d'onde $\lambda = 620$ nm.

II.1.4.4. Dosage de l'azote et du phosphore

Le dosage de l'azote total NT, NH_4^+ , NO_3^- , et PT sont effectués par la méthode des kits LCK en utilisant un thermostat HACH LT200. Un volume de 2 mL de l'échantillon est mélangé avec le réactif approprié pour chaque élément LCK (238, 305, 339, 348 respectivement). Ensuite,

on minéralise à 100°C pendant 60 mn. La lecture des résultats se fait par un spectrophotomètre DR 2800 (HACH LANGE).

II.1.4.5. Mesure des cations et anions

Les concentrations du Ca^{2+} et le Mg^{2+} sont quantifiées par la méthode titrimétrique utilisant le standard EDTA et l'instrument de dosage automatique Dosimat plus (Metrohm). Pour le sodium (Na^+) et potassium (K^+), l'analyse est effectuée par un ICP-OES (OPTIMA 8000).

II.1.4.6. Analyse des métaux lourds

Les ETM cadmium (Cd), cuivre (Cu), zinc (Zn), plomb (Pb), chrome (Cr), arsenic (As), nickel (Ni), manganèse (Mn), fer (Fe), sélénium (Se), antimoine (Sb), argent (Ag), baryum (Ba), molybdène (MO), bore (B), mercure (Hg) et aluminium (Al) sont analysés par ICP-OES (OPTIMA 8000).

II.1.5. Indicateurs de la qualité de l'eau pour l'irrigation

II.1.5.1. Rapport d'Adsorption du Sodium (SAR)

La dispersion de la phase colloïdale du sol, la stabilité des agrégats, la structure du sol et la perméabilité à l'eau sont toutes très sensibles aux types d'ions échangeables présents dans l'eau d'irrigation. L'augmentation de l'alcalinité du sol, qui peut se produire avec l'eau usée traitée à cause de la concentration élevée en Na réduit la perméabilité du sol particulièrement en surface même si le lessivage a lieu. Ce phénomène est lié à la dispersion et au gonflement des argiles lorsque la concentration en Na échangeable augmente. Toutefois, pour une certaine valeur du Rapport d'Adsorption du Sodium (SAR – Sodium Adsorption Ratio), la vitesse d'infiltration augmente ou diminue avec le niveau de salinité. Par conséquent le SAR et EC (salinité) devraient être employés en association pour évaluer les problèmes potentiels éventuels (Rhoades, 1977). Le SAR est déterminé selon l'équation 3, où Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , sont exprimés en milli-équivalents par litre (meq/L).

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})}{2}}} \text{Équation 3}$$

II.1.5.2. Pourcentage du Sodium Soluble (SSP)

Le pourcentage du sodium soluble (SSP- Soluble sodium percentage) est également un autre paramètre important utilisé pour déterminer le risque lié au sodium, ce dernier est l'ion le plus soluble et le plus dangereux dans l'eau d'irrigation. Un taux de SSP supérieur à 60 % peut induire une accumulation de sodium dans le sol et perturbe ainsi ses propriétés physiques.

Le SSP est déterminé selon l'équation 4. Ci-dessous, où Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ sont exprimés en milli-équivalents par litre (meq/L).

$$SSP = \frac{Na^+ \times 100}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + k^+} \text{Équation 4}$$

II.1.5.3. Carbonates de sodium résiduels (RSC)

L'alcalinité résiduelle n'est qu'autre que le concept proposé par Eaton (1950) et Richards (1954) nommée RSC (Residual Sodium Carbonates), elle est définie comme étant la part de l'alcalinité qui n'est pas neutralisée par les cations divalents. L'équation 5 a été utilisée pour calculer l'indicateur RSC, où Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- et CO_3^{2-} sont exprimés en milli-équivalents par litre (meq/L).

$$RSC = (CO_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \text{Équation 5}$$



Figure 11 : Matériels utilisés pour l'analyse physico-chimique de l'eau usée traitée.

(1) spectrophotomètre DR 2800 ; (2) Oxitop IS6 ; (3) multimètre numérique HQ40D ; (4) dispositif de filtration; (5) Titrimètre Dosimat plus; (6) ICP-OES (OPTIMA 8000).

II.1.6. Analyse bactériologique

Pour les déterminations bactériologiques ; les échantillons d'EUT ont été dissous dans de l'eau saline stérile pour les dilutions allant de 10^{-1} à 10^{-3} et toutes les mesures ont été effectuées par la méthode de filtration sur membrane (Rodier et al., 2009) (figure 12). Les coliformes totaux (CT), les coliformes fécaux (CF), *Escherichia coli* (*E. coli*), les entérocoques fécaux (EF), les germes pathogènes du genre *Salmonella spp.* Et *Staphylococcus spp.* ont été identifiés et dénombrés selon les normes ISO ; les résultats ont été exprimés en nombre d'unités formatrices de colonies (UFC) par 100 mL.

II.1.6.1. Les coliformes totaux

Le dénombrement des bactéries coliformes et *Escherichia coli* selon les normes ISO 9308-1 : 2014.

- Un volume de 10 mL de chaque dilution est filtrée sur une membrane filtrante de porosité $0.45 \mu\text{m}$ qui retient les microorganismes, cette membrane est placée à la surface de la boîte de gélose chromogène CCA qui est incubée à $36 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 24 h.
- Comptage des colonies positives de couleur rose à rouge en tant que bactéries coliformes présomptives et les colonies bleues à violet en tant que *E. coli*. Pour confirmer les bactéries coliformes présomptives qui ne sont pas des *E. coli*, un essai de recherche de l'oxydase doit être effectué.
- Les bactéries coliformes totales sont la somme des colonies négatives à l'oxydase de couleur rose à rouge et toutes les colonies de couleur bleu foncé à violet.

➤ Test à l'oxydase

On imbiber un disque d'oxydase avec une goutte d'eau distillée stérile puis on dépose à l'aide d'une pipette stérile la colonie. On considère la réaction positive s'il y a apparition d'une couleur bleu foncé dans les 30 secondes qui suivent. Toutes les colonies ayant une réaction négative à l'oxydase sont des bactéries coliformes. L'équation 6 est permet de déterminer le nombre de coliforme.

$$a = \left(\frac{b}{A}\right) \times c \quad \text{Équation 6}$$

b : nombre des colonies répondant positivement aux critères du test de confirmation.

A : nombre de colonies repiquées (5 colonies).

c : nombre total de colonies caractéristiques (rose à rouge) trouvées dans la boîte.



Figure 12 : Rampe de filtration pour analyse microbiologique de l'eau.

II.1.6.2. Entérocoques fécaux

Le dénombrement des entérocoques intestinaux a été réalisé selon les normes ISO 7899-2 : 2000 et ISO 8199 : 2005. La méthode est basée sur la filtration d'un volume de 10 mL de l'échantillon d'EUT pour chaque dilution sur une membrane filtrante de porosité 0,45 μm . Les membranes sont placées sur la surface d'un milieu sélectif SLANETZ et BARTLEY. Après incubation à 36 ± 2 °C pendant 48h toutes les colonies présentant une coloration rouge, marron ou rose sont dénombrées comme entérocoques intestinaux présumés. Pour confirmer les résultats, on transfère le filtre sur la gélose BEA et incubé à 44°C pendant 2 heures si la gélose prend une coloration noirâtre autour et/ou sous les colonies donc le résultat est positif.

II.1.6.3. Recherche et dénombrement des Staphylocoques

La recherche des staphylocoques a été réalisée par une méthode de recherche et de dénombrement à coagulase positive par filtration sur membrane.

- Un volume de 100 mL de l'échantillon EUT est filtrée à travers une membrane filtrante d'une porosité de 0.45 μm , déposer cette membrane sur un milieu sélectif gélose Chapman au mannitol. La boîte de pétrie est incubé à 36 ± 2 °C pendant 44 ± 4 h.

Chapitre II : Matériels et méthodes

- Le dénombrement des colonies caractéristiques formées sur la membrane filtrante par comptage : Ils apparaissent sous forme de petites colonies lisses, légèrement bombées à contours réguliers et pigmentées soit en jaune (fermentation du mannitol) ou en blanc qui seront soumis ensuite aux tests de confirmation.

- La confirmation est basée sur la recherche de l'enzyme catalase et sur la recherche de l'enzyme coagulase.

Après la période d'incubation spécifiée, on dénombre les colonies caractéristiques (Staphylocoques à coagulase positive ou plus particulièrement *staphylococcus aureus*); prendre 3 à 5 colonies au hasard, pour confirmation.

Une demi colonie servira au test à la catalase et l'autre demi sera triturer dans un tube contenant du bouillon BHIB, à incuber a 36 ± 2 °C pendant 20 ± 4 heures pour le test à la coagulase.

➤ **Test à la catalase :**

- Placer une goutte d'une solution de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) à 20 volumes sur une lame de microscope.
- Prélever une demi-colonne avec une pipette pasteur ou en plastique et l'émulsionner doucement dans la goutte d' H_2O_2 .
- Observer immédiatement s'il y a apparition de bulles d'oxygène (catalase positive) ou absence (Catalase négative).
- Les observations peuvent se faire macroscopiquement ou à l'aide d'un microscope à faible grossissement.

➤ **Test à la coagulase :**

- Après incubation du bouillon BHIB, ajouter stérilement 0.1 ml de cette culture à 0.3 ml de plasma de lapin contenu dans un tube stérile à essai ou à hémolyse, et incuber de nouveau à 36 ± 2 °C pendant 2 à 6 heures.
- Examiner la coagulase du plasma de lapin sinon réincuber à 20 ± 4 heures et examiner de nouveau.
- Considérer que la réaction à la coagulase est positive quand le coagulum occupe plus des trois quarts du volume initialement occupé par le liquide.

II.1.6.4. Recherche et dénombrement des Salmonelles

La recherche des salmonelles a été réalisée selon la norme ISO6579/A1 (2007) qui nécessite quatre (4) étapes standardisées. Il s'agit d'un pré-enrichissement, d'un enrichissement, d'un isolement et d'une identification (Rodier et *al.*, 2009). Un volume de 100 mL des échantillons

Chapitre II : Matériels et méthodes

sont filtrés sur une membrane de 0,45 µm pour concentrer les bactéries ensuite les membranes sont introduites dans un flacon d'eau peptoné et incubé à 36 °C pendant 24h pour un pré-enrichissement. L'enrichissement est réalisé en introduisant 0,1 mL de la solution pré-enrichie dans un tube de bouillons rapport qui ont été incubés à 44°C pendant 24h. Si on observe un changement de couleur on repique en strie sur les milieux gélosés XLD et Hektoen et on laisse incuber encore à 36°C pendant 24h. L'apparition d'une couleur noire au centre de la colonie confirme la présence des salmonelles.

II.1.7. Analyse statistique

Les données collectées ont toutes été abrégées en valeurs statistiques qui sont présentées sous la forme moyenne \pm écart-type. La distribution normale a été testée par le test de Kolmogorov-Smirnov et des tests non paramétriques ont été utilisés en cas de distribution non normale. L'effet de la saison sur les paramètres quantitatifs a été testé à l'aide d'analyses de variance à mesures répétées de Friedman sur les rangs et les comparaisons entre les saisons ont été effectuées à l'aide du test de Wilcoxon. Les différences ont été considérées comme statistiquement différentes à $p < 0,05$. Le SPSS (version 26 ; INC., Chicago, IL, USA) a été utilisé pour l'évaluation statistique des résultats.

II.2. Etude de l'impact de la réutilisation des eaux usées traitées de la STEP de Baraki sur une culture de tomate « *Solanum lycopersicum* ».

II.2.1. Site d'étude

La station de traitement des eaux usées traitées choisit pour l'essai est la STEP de Baraki qui fait appel aux processus biologiques de boues activées à moyenne charge poursuivie d'un traitement tertiaire de filtration sur sable. La caractérisation de l'eau usée traitée dans la première partie de l'étude nous a permis de conclure que sa qualité physico-chimique répond aux critères de réutilisation en irrigation agricole selon la réglementation algérienne (JORA N°41, 2012 et NA 17683, 2014) et international (FAO et OMS); tandis que la qualité microbiologique présente des valeurs plus élevées que les limites recommandées >1000 UFC/100 mL mais qui peut être utilisée pour une culture industrielle avec une irrigation localisée.

II.2.2. Localisation de l'expérimentation

L'expérimentation est réalisée au niveau de la serre expérimentale de la station expérimentale Mehdi Boualem de l'institut national de recherche agronomique (INRA) situé à la commune de Baraki entre latitude 36°41'05.3"N et longitude 3°06'25.8"E. La serre est de type multi-chapelles en verre avec une armoire de contrôle automatique constituée de ; ventilateurs interne et externe, le tampon de refroidissement par évaporation, un système d'ombrage interne et externe, tables de culture grillagées avec système d'irrigation goutte à goutte. La figure 13 présent lalocalisation géographique de la zone d'étude et la figure 14 présente la serre expérimentale.

II.2.3. Installation de l'essai

Le dispositif mis en place est de type bloc aléatoire complet à un seul facteur de variation qui est la qualité de l'eau. Chaque traitement est constitué de 02 lignes de 34 pots d'un volume de 5 L (22.8X18 cm) nécessaire pour le développement racinaire de la plante :

L'étude va porter sur la **tomate industrielle** qui est une culture autorisée pour une irrigation à l'eau usée traitée selon la réglementation algérienne (JORA N°41, 2012et NA 17683, 2014). La variété choisit pour l'essai est « **Ercole** » avec un cycle de culture qui s'étale de 4 à 6 mois, le type de croissance est déterminé et le fruit est de forme allongée de belle couleur rouge. Son potentiel de rendement est très élevé et sa maturité groupée idéale pour faire de la tomate concentrée, pelée et séchée.

Chapitre II : Matériels et méthodes

Le semis des graines est réalisé en pépinière le 20/11/2022 et sous des conditions optimales les plantules de tomate atteignent 3 feuilles le 28/12/2022 et sont transférées à la serre. La transplantation des plants de tomate à 4 feuilles est effectuée le 10/01/2023 dans des pots remplis d'abord par une couche de gravier puis d'un mélange de tourbe et de terre dont les proportions de 1/3 respectivement. L'irrigation est assurée par le système goutte à goutte qui est préconisé pour la réutilisation des eaux usées traitées (figure 14). Les quantités apportées aux plantes dépendent de la demande climatique journalière et le besoin de la culture qui dépend de la phase de croissance de la plante (floraison, nouaison, fructification et maturité des fruits). Une ferti-irrigation d'engrais NPK est apporté aux deux traitements pour couvrir les besoins de croissance et de production des plants de tomate. Le traitement 1 composé de 68 pots irrigués avec l'eau conventionnel (EC) et le traitement 2 composé de 68 pots irrigués avec l'eau usée traitée (EUT) ; la figure 13 présente le dispositif expérimental de la culture de tomate irriguée avec EC et EUT.

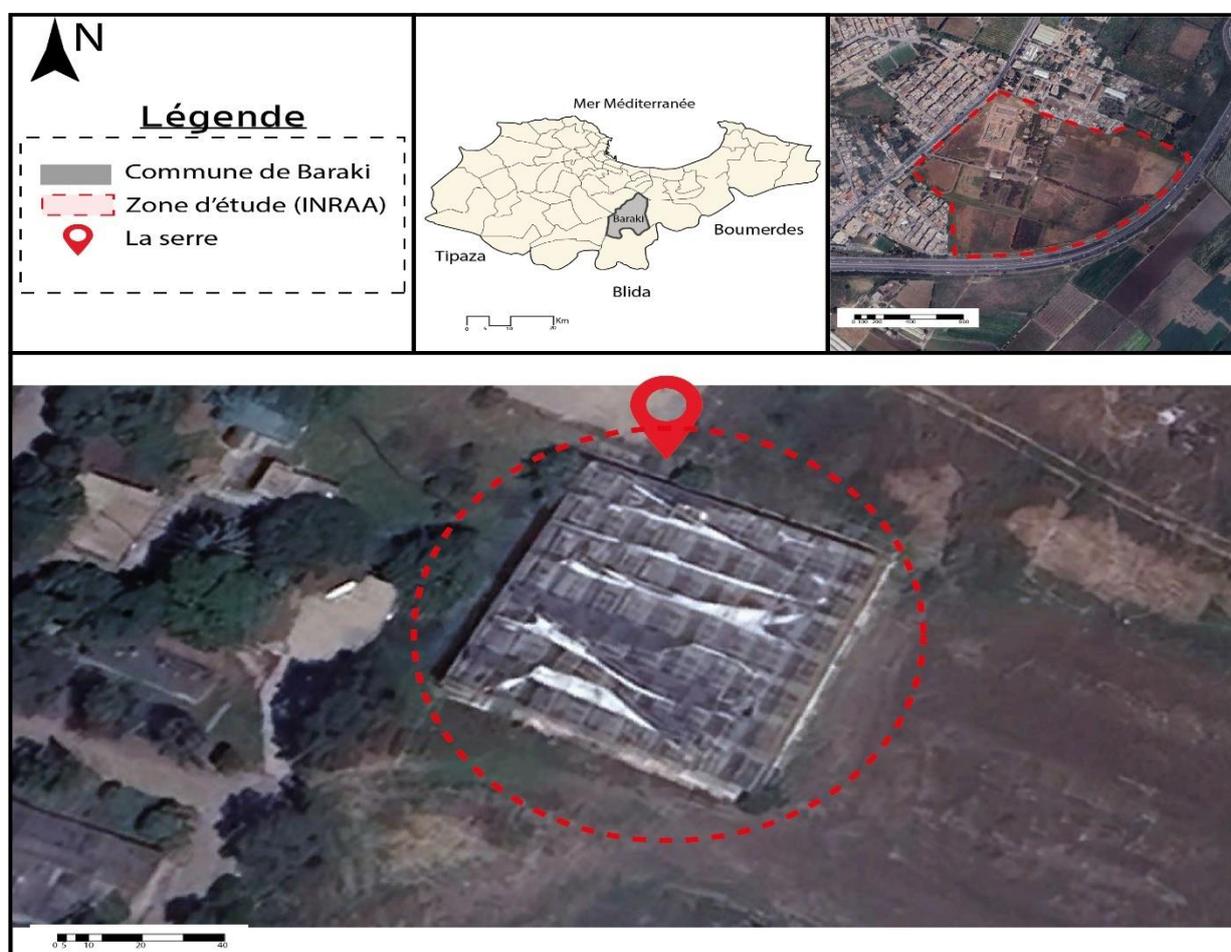


Figure 13 : Localisation géographique de la serre de l'INRA Baraki.



Figure 14 : La serre expérimentale de la station INRA de Baraki.

II.2.4. Evaluation des conditions climatiques au niveau de la serre

II.2.4.1. Température de l'air

La température minimale et maximale à l'intérieur de la serre est mesurée par un thermomètre suspendu à 1 m du sol quotidiennement.

II.2.4.2. Humidité de l'air

La mesure de l'humidité de l'air minimale et maximale à l'intérieur de la serre est effectuée quotidiennement à l'aide d'un hygromètre

II.2.5. La protection phytosanitaire de la culture

La gestion phytosanitaire doit porter sur la mise au point d'une stratégie globale de lutte intégrée fiable contre tous les bio-agresseurs et particulièrement sur un des plus importants ravageurs parmi d'autre sur tomate : la mineuse (*Tutaabsoluta*)(ITCMI, 2017).

- Installation de plaques engluées jaunes et bleues permet la surveillance et un dépistage précoce des ravageurs ainsi que les Thrips.
- Mise en place de pièges à phéromone afin de mettre en évidence la présence du ravageur qui est la mineuse de la tomate et de le contrôler, ce qui représente un outil fiable de détection précoce des papillons mâles de *Tutaabsoluta*.
- Application des insecticides, acaricides, nématicides, fongicides en cas de besoin.

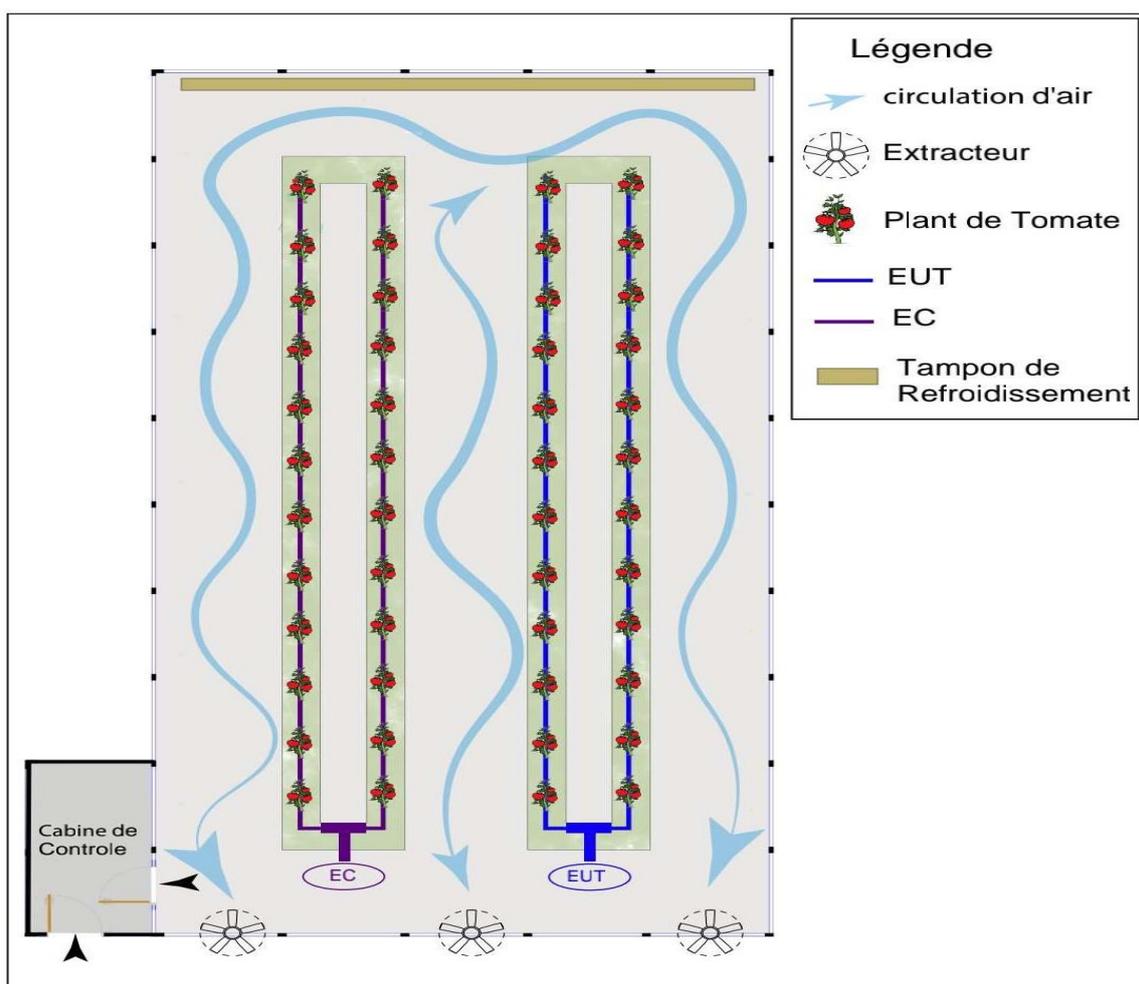


Figure 15 : Dispositif expérimental de la culture de tomate irriguée avec EC et EUT.

II.2.6. Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation

La qualité de l'eau utilisée a été évaluée pour l'irrigation en ce qui concerne ses propriétés physico-chimiques, toxicologiques telles que les métaux lourds, bactériologiques et parasitologiques selon les normes et recommandations nationales et internationales.

II.2.6.1. Analyse physico-chimique

Les analyses physico-chimiques ont été effectuées au niveau du laboratoire de la STEP et le laboratoire central de SEAAL. Le pH, CE, MES, DBO₅, DCO, NH₄⁺, NO₃⁻, TN, TP, Ca²⁺ et le Mg²⁺ sont déterminés par les méthodes standard ISO. Les concentrations des ETM cadmium (Cd), cuivre (Cu), zinc (Zn), plomb (Pb), chrome (Cr), arsenic (As), nickel (Ni), manganèse (Mn), fer (Fe), sélénium (Se), antimoine (Sb), argent (Ag), baryum (Ba), molybdène (MO),

bore (B), mercure (Hg) et aluminium (Al) sont analysés par ICP-OES (OPTIMA 8000) ainsi que le sodium (Na⁺) et potassium (K⁺).

II.2.6.2. Analyse microbiologique

Pour l'analyse bactériologique, elle a été réalisée au niveau du laboratoire central de SEAL où les échantillons ont été dilués avec l'eau saline stérile pour obtenir différentes concentrations de 10⁻¹ à 10⁻³. Toutes les mesures ont été effectuées par la méthode de filtration sur membrane (Rodier 2009). Les coliformes totaux (CT), les coliformes fécaux (CF), *Escherichia coli* (E. coli), les entérocoques fécaux (EF), les germes pathogènes du genre *Salmonella spp.* Et *Staphylococcus spp.* ont été identifiés et dénombrés selon les normes ISO. Les résultats ont été exprimés en nombre d'unités formatrices de colonies (UFC) par 100 ml.

II.2.6.3. Analyse parasitologique

Selon l'OMS, le risque majeur de la réutilisation des eaux usées en agriculture est la présence d'un grand nombre d'agents pathogènes tel que les protozoaires et les helminthes. Les parasites en particulier les nématodes intestinaux (*Ascaris*, *Trichuris*, *Ankylostoma*) sont la principale contrainte pour la réutilisation à cause de leur dose infectante faible et leur longue survie dans l'environnement (OMS, 2012c). L'analyse parasitologique des eaux usées traitées a été réalisée selon la technique de *BAILENGER* fortement recommandée par l'OMS (1997) au niveau du laboratoire de parasitologie de l'ENSV-Alger.

La méthode comme décrite par (Ayes & Duncan Mara, 1997) consiste à prélever dix litres d'eau usée traitées puis laissés décanter pendant 12 heures. Le culot obtenu après concentration par centrifugation est introduit à l'intérieure des cellules de la lame Mac Master.

Le nombre total des œufs d'helminthes par litre (N) présent dans l'échantillon est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$N = (A.X)/(P.V) \text{ Équation (7)}$$

N : nombre d'œufs par litre

A : nombre d'œufs comptés sur la lame de Mac Master ou moyenne des nombres trouvés sur 2 ou 3 lames ;

X : volume du produit final (ml) ;

P : contenance de la lame de Mac Master (0,15 ml) ;

V : Volume de l'échantillon initial d'eau usée à analyser.

Chapitre II : Matériels et méthodes

L'identification des œufs d'helminthes à partir du culot obtenu est effectuée par observations sur microscope optique au grossissement 10x ou 40x (figure 16).

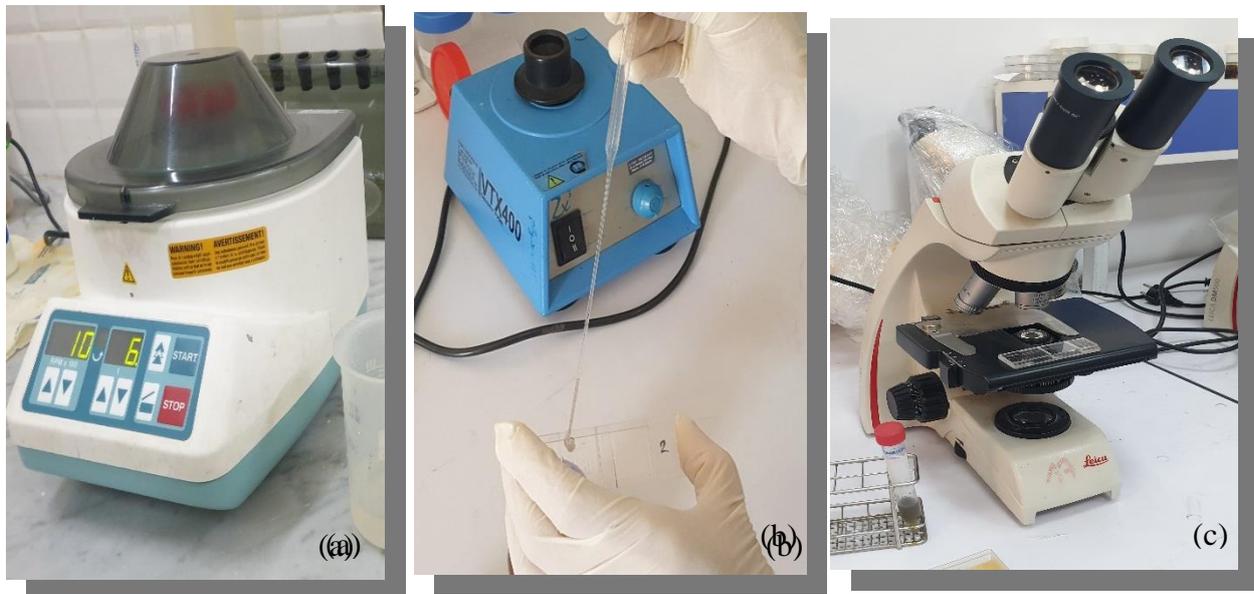


Figure 16 : Matériels utilisés pour l'analyse parasitologique.

(a : centrifugeuse, b : lame Mac Master ; c : microscope optique)

II.2.7. Impact de la réutilisation des EUT sur le sol

Afin d'évaluer l'effet de l'irrigation par les EUT sur les propriétés physico chimiques du sol, des échantillons du sol ont été prélevés avant plantation et en fin de culture après irrigation avec les EUT. Les échantillons ont été séchés à l'air libre ensuite broyés et tamisés de 2 mm.

II.2.7.1. Analyse physico-chimique du sol

Les propriétés physico-chimiques ont été analysées selon la méthode standard. L'analyse de la taille des particules a été déterminée par classe de texture à l'aide du triangle textural de l'USDA. Le pH du sol a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre dans des extraits sol-eau de 1/2,5 et la conductivité électrique (CE) a été déterminée à l'aide d'un conductimètre dans des extraits sol-eau de 1/5. Le CaCO_3 a été analysé par méthode volumétrique à l'aide du calcimètre Bernard et la méthode noire de Walkley a été utilisée pour analyser la matière organique. La CEC a été déterminée par la méthode Metson. L'azote total a été mesuré par la méthode Kjeldahl et la méthode OLSEN a été utilisée pour déterminer le phosphore assimilable. Le

potassium assimilable extrait avec de l'acétate d'ammonium a été déterminé par spectrophotométrie.

II.2.7.2. Analyse des métaux lourds du sol

Pour évaluer l'impact des eaux usées sur l'accumulation des métaux lourds (Pb, Cd, Ni, Cr Mn et Cu) dans le sol une analyse au spectromètre à absorption atomique (SAA) est effectuée sur un échantillon recueilli au hasard avant irrigation et à la fin du cycle de culture. Les échantillons du sol ont été mélangés et homogénéisés, tamisés à 2 mm et séchés à l'air libre pendant plusieurs jours puis séchés à l'étuve à 72°C pendant 48h. L'analyse des ETM est réalisée par digestion acide dans des godets en téflon. Des quantités de 0,5 g de chaque échantillon ont été pesés directement dans les godets ensuite 3 mL d'acide nitrique (HNO₃) concentré à 69% et 9 mL d'acide chlorhydrique (HCl) à 37% ont été ajoutés. Les godets sont fermés hermétiquement avec une pince et laissés à la température ambiante pendant une heure par la suite les godets sont placés pendant 120 min dans une étuve réglée à 110°C. Après refroidissement, les échantillons sont filtrés par un filtre à seringue dans des tubes en polyéthylène gradués; les godets sont rincés plusieurs fois avec de l'eau ultra-pure et le filtrat est ajusté à 50 mL. Les solutions standards de Pb, Cd, Ni, Cr, Mn et Cu ont été préparées par la dilution appropriée de solutions; le dosage des métaux lourds est réalisé par spectrophotomètre à absorption atomique (Agilent Technologies 200 Series AA) au niveau du Centre de Recherche d'Analyse Physico-Chimique CRAPC Bousmail.

II.2.8. Impact de la réutilisation des EUT sur les paramètres morphologiques et agronomiques de la plante

Au cours de l'essai sous serre des observations et mesures ont été réalisées régulièrement afin de mettre en évidence les différences entre les deux traitements et évaluer l'effet des eaux usées traitées sur la culture de tomate. Le suivi du cycle de croissance et de développement de la tomate est évalué par la mesure des paramètres morphologiques et agronomiques suivants.

II.2.8.1 Evaluation des paramètres de croissance

- La hauteur moyenne de la tige pour apprécier la croissance végétative des plans est mesurée par un mètre ruban.
- Le diamètre de la tige est mesuré par un pied à coulisse.
- Hauteur du premier bouquet floral mesurée par un mètre ruban du sol jusqu'au collet du premier bouquet.

Chapitre II : Matériels et méthodes

- Le nombre de feuilles développées.
- La teneur en chlorophylle est mesurée par un appareil SPAD de marque Conica Minolta.

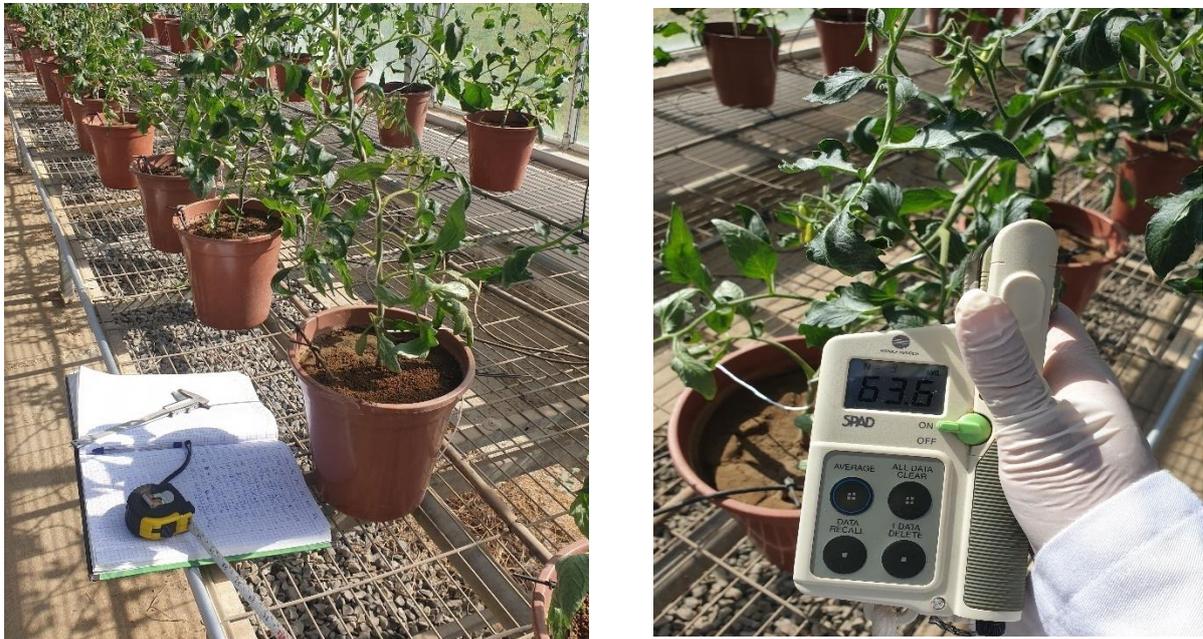


Figure 17 : Mesure des paramètres de croissance.

II.2.8.2. Evaluation des paramètres de développement (Floraison- Nouaison)

Les paramètres de développement ont été observés tout au long de la période de croissance pour estimer le début et la pleine floraison ensuite le début et pleine nouaison. Pour cela on a procédé au comptage des fleurs épanouies et celles ayant nouées. Selon les critères suivants on a pu estimer le stade de floraison jusqu'à la nouaison (Laumonnier, 1978).

- Début floraison : lorsque 10% des plants ont fleuri.
- Pleine floraison : lorsque 75% des plants ont fleuri.
- Début nouaison : lorsque 10% des plants présentent des fleurs nouées.
- Pleine nouaison : lorsque 75% des plants présentent des fleurs nouées.



Figure 18 : Floraison et nouaison des fleurs de tomate

II.2.8.3. Evaluation des paramètres de production

- Déterminer le nombre moyen de fruit par plant, par bouquet floral et par traitement.
- Déterminer le poids moyen des fruits par plant, par bouquet floral et par traitement.
- Mesure de la longueur et largeur du fruit en (cm) avec pieds à coulisse.
- Mesure du poids frais du fruit en (g) par une balance de précision.



Figure 19 : Maturité des fruits de tomate.

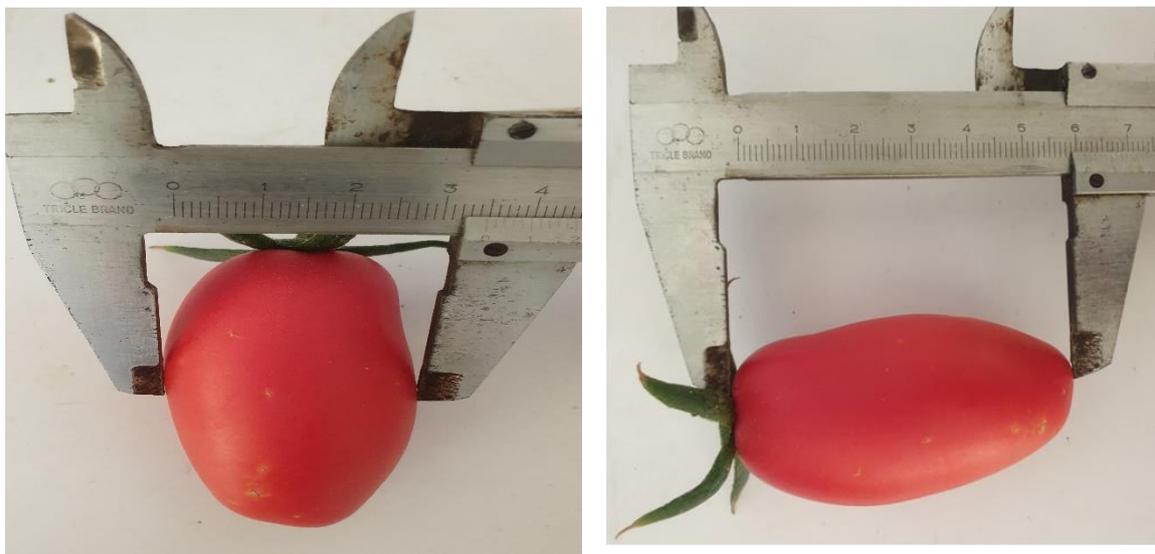


Figure 20 : Mesure de la longueur et largeur du fruit de tomate par un pied à coulisse.

II.2.9. Evaluation de la qualité des fruits de tomate

II.2.9.1. Analyse microbiologique des fruits de tomate

Une analyse microbiologique des fruits après récolte est effectuée au niveau du laboratoire HUPE d'hygiène urbaine d'Alger. Des échantillons de tomate des deux traitements EC et

Chapitre II : Matériels et méthodes

EUT sont prélevés directement dans un sac stérile et fermé hermétiquement ensuite transportés dans une glacière directement au laboratoire de microbiologie.

II.2.9.1.1. Préparation de la suspension mère

La préparation des échantillons a été réalisée selon les directives de la norme AFNOR (NFV08-201).

On prépare la suspension mère par une pesée de 18 g de tomate dans un sac stérile qu'on lui ajoute 180 mL de TSE ensuite on mélange dans un Stomacher, on verse le mélange obtenu qui correspond à la dilution **1/10** dans un flacon stérile et on laisse reposer 15 minutes. On prépare à partir de la suspension mère deux dilutions successives en progression géométrique à raison de 1/10.

II.2.9.1.2. Dénombrement des coliformes totaux et fécaux

Le dénombrement des coliformes est réalisé par la méthode solide par comptage de colonie selon la norme NF ISO 4832.

On prélève 1 mL de chaque dilution de 10^{-1} , 10^{-2} à 10^{-3} qu'on dépose par gouttes dans la boîte de pétrie ensuite on coule 15 mL du milieu VRBL fondue et refroidit à 45°C. On mélange par un mouvement circulaire en forme de huit pour permettre à l'inoculum de bien se mélanger à la gélose utilisée. Les boîtesensemencées doublement pour chaque dilution sont laissées sur une surface horizontale pour refroidir et solidifier avant de les incuber à 37 °C pendant 24 h pour les CT et à 44°C pendant 48h pour les CF.

On dénombre toutes les colonies caractéristiques des coliformes qui cultivent sur la gélose de couleur violacées entourées d'une zone rougeâtre.

II.2.9.1.3. Recherche et dénombrement des Entérocoques fécaux

On prélève 1 mL de chaque dilution de 10^{-1} , 10^{-2} à 10^{-3} qu'on dépose en gouttes dans la boîte de pétrie ensuite on coule 15 mL du milieu *Slanetz et Bartley* et on mélange par un mouvement circulaire. Les boîtesensemencées doublement pour chaque dilution sont laissées sur une surface à température ambiante pour refroidir et solidifier ensuite les incubées à 44°C pendant 48h.

II.2.9.1.4. Dénombrement des Anaérobies Sulfito-Réducteurs (ASR)

On prélève aseptiquement 1 mL des dilutions 10^{-1} , 10^{-2} à 10^{-3} dans des tubes stériles et on chauffe à 80 °C pendant 10 mn puis refroidir immédiatement les tubes à l'eau de robinet. On ajoute environ 15 à 20 mL de gélose viande-foie additionnée d'une ampoule d'Alin de fer et

Chapitre II : Matériels et méthodes

une ampoule de sulfite de sodium. On laisse solidifier sur pailleuse puis incuber à 37 °C pendant 48 h avec une première lecture à 24h.

Les tubes considérés positifs contenant des colonies noires de spores d'anaérobies sulfito-réducteurs après 24h sont incubés encore pour 24h. On dénombre le nombre final de spores en tenant compte du facteur de dilution.

II.2.9.1.5. Recherche des levures et moisissures

On prélève 1 mL de la solution mère et on distribue par goutte sur la boîte de pétrie ensuite on verse le milieu OGA et on incube à 25°C pendant 5 jours. On procède au comptage des levures et moisissures et le nombre trouvé est multiplié par cinq pour revenir à 1 mL qu'on multiplie par l'inverse de la dilution.



Figure 21 : Analyse microbiologique des fruits de tomate

II.2.9.2. Analyse physico-chimique des fruits de tomate

II.2.9.2.1. Lyophilisation des fruits de tomate

Les fruits de tomate ont été préparés pour lyophilisation par une pesée de 25 g de la purée de tomate dans des pots de 50 mL qu'on ferme avec la paraffine et on perfore avec une épingle. Les pots sont placés sur les plateaux du lyophilisateur et on choisit le programme adapté pour les végétaux qui détermine le temps, la température et la pression en mbar pour différentes sections du processus de lyophilisation. Le temps total pour lyophiliser les fruits de tomate et obtenir un échantillon sec est de 72 heures.



Figure 22 : Lyophilisation des fruits de tomate.

II.2.9.2.2. Détermination du pH

La tomate est broyée avec un mixeur pour obtenir une purée ensuite on pèse 25 g dans un bécher et on fait plonger l'électrode du pH-mètre étalonné pour la lecture. Le pH-mètre doit être auparavant étalonné.

II.2.9.2.3. Détermination de l'acidité titrable

La méthode utilisée pour la détermination de l'acidité titrable est réalisé par le titrage de l'acidité avec une solution de NaOH (0.1N) en présence de phénolphtaléine comme indicateur de couleur.

- Peser 10 g de la purée de tomate dans un bécher.
- Ajouter 50 mL d'eau distillé bouillie et refroidie et mettre sous agitation.
- Chauffer sur bain mari à 30 °C pendant 30 mn.
- Après refroidissement, on verse le mélange dans une fiole de 100 mL et ajuster avec l'eau distillé au trait de jauge.
- On filtre et on prélève 10 mL du filtrat qu'on mélange avec 10 mL d'eau distillé et quelque goutte de phénolphtaléine.
- Titration avec NaOH 0.1 N jusqu'à obtention d'une couleur rose persistante.

$$A^{\circ} = \frac{100 \times V_1 \times 100}{V_0 \times M \times 10} \times 0.07 \quad \text{Équation 8}$$

M : Poids de purée de tomate

V_0 : Volume du filtrat

V_1 : Volume de la descente de burette NaOH 0.1N

0.07 : facteur de conversion de l'acidité titrable en équivalent d'acide citrique pour 100 g de tomate.

II.2.9.2.4. Détermination de la matière sèche

Les tomates récoltées des deux traitements sont pesées à l'état frais dans une capsule en porcelaine ensuite séchées à l'étuve ventilée réglée à 72 °C jusqu'à obtention d'un poids sec constant, la teneur en matière sèche est calculée par l'équation suivante :

$$MS(\%) = \frac{P_1}{P_0} \times 100 \quad \text{Équation 9}$$

P_0 : le poids de l'échantillon humide (g)

P_1 : le poids de l'échantillon après dessiccation (g)

II.2.9.2.5. Détermination de la matière minérale

La teneur en matières minérales d'un aliment est le résidu obtenu après destruction de la matière organique par incinération.

- On porte au four à moufle la capsule + le résidu qui a servi à la détermination de la M.S.
- L'incinération à 550 °C doit être poursuivie jusqu'à combustion complète de charbon formé et obtention d'un résidu blanc ou gris.
- Refroidir au dessiccateur la capsule contenant le résidu de l'incinération puis peser.

La teneur en matières minérales (cendres totales) est obtenue par la relation suivante :

$$MM(\%MS) = \frac{A \times 100}{B \times MS} \times 100 \quad \text{Équation 10}$$

A : Poids des cendres (g).

B : Poids de l'échantillon séché (g).

MS : Teneur en matière sèche (en P. cent).

II.2.9.2.6. Détermination de la matière azotée totale

Les échantillons séchés et broyés en une poudre fine sont tamisés à 2 mm et conservés dans des flacons hermétiquement fermés. La méthode *Kjeldahl* est utilisée pour la détermination des protéines qui est constitué de trois étapes.

a) Minéralisation

- Opérer sur une prise d'essai de 0,5 à 2 g de substance.
- Introduire la prise d'essai dans un matras de 250 ml.
- Ajouter environ 2 g de catalyseur et 20 ml d'acide sulfurique pur.
- Porter le matras sur le support d'attaque et poursuivre le chauffage jusqu'à décoloration du liquide et obtention d'une coloration verte stable.
- Laisser refroidir puis ajouter peu à peu, avec précaution 200 ml d'eau distillée en agitant, et en refroidissant sous un courant d'eau. Rincer l'agitateur. Laisser refroidir compléter au trait de jauge.

b) Distillation

- Transvaser 10 à 50 ml du contenu de matras dans l'appareil distillatoire.
- Ajouter lentement 50 ml de lessive de soude ($d = 1,33$).
- Dans un bécher destiné à recueillir le distillat ; introduire 20 ml de l'indicateur.
- Laisser l'attaque se faire jusqu'à obtention d'un volume de distillat de 100 ml.

c) Titrage

- Titrer avec de l'acide sulfurique N/50 jusqu'à l'obtention de la couleur initiale de l'indicateur.

$$N(g) = V_1 \times 0.00028 \times \frac{100}{Y} \times \frac{250}{V_0} \text{Équation 11}$$

V_1 : Descente de burette (ml) (Volume de l'acide sulfurique N/50).

Y : Poids de l'échantillon de départ.

V_0 : Volume de la prise d'essai.

$$MAT(\%MS) = \frac{N(g) \times 6,25}{MS \times 100} \text{Équation 12}$$

II.2.9.2.6. Détermination de la matière grasse

La matière grasse est analysée par la méthode *Soxhlet* selon les étapes suivantes :

- Peser 3 à 5 g de l'échantillon dans une cartouche cellulosique de *Soxhlet*.
- Peser le ballon de *Soxhlet* sec.

Chapitre II : Matériels et méthodes

- Placer la cartouche dans un extracteur *Soxhlet* et monter le ballon sur l'extracteur qui est raccordé à une colonne réfrigérante.
- Verser 150 mL de solvant, l'éther de pétrole, dans l'extracteur.
- Extraire la matière grasse pendant 6 à 8 h
- A la fin de l'extraction siphonner le solvant restant dans l'extracteur au niveau du ballon.
- Faire évaporer à l'évaporateur rotatif le solvant jusqu'à séchage total du ballon.
- Placer le ballon + résidu à l'étuve à 102 ° C pendant 3 h, en position couchée.
- Laisser refroidir au dessiccateur et peser.

La teneur en matières grasses est obtenue par la formule suivante :

$$MG(\%MS) = \frac{A-B}{C \times MS} \times 100 \text{ Équation 13}$$

A : poids du ballon + les matières grasses extraites(g)

B : poids du ballon vide (g)

C : poids de l'échantillon initial(g)

II.2.9.2.6. Analyse des sucres totaux

Le dosage des sucres totaux est effectué par la méthode DUBOIS selon les étapes suivantes :

a) *Extraction des glucides*

- Peser 10 g de l'échantillon dans un bêcher de 500 mL et additionner 400 mL d'eau distillée et 3 g de carbonate de sodium.
- Porter à ébullition tout en agitant pendant 30 mn.

b) *Clarification*

- Transvaser la solution dans une fiole de 1 L et ajouter l'acétate de plomb à 10%.
- Agiter jusqu'à apparition d'un précipité au fond de la fiole.
- Ajuster avec l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.
- Procéder à la filtration
- Ajouter le charbon au filtrat et filtrer une deuxième fois sur un papier filtre

c) *Élimination de l'acétate de plomb*

- Additionner au filtrat l'oxalate de potassium
- Filtrer la solution pour éliminer le plomb précipité

d) *Dosage*

- Prélever 5 mL du filtrat et ajouter 45 mL d'eau distillé (solution 10%)
- Introduire dans un tube à essai 1 mL de la solution de 10% et ajouter 1 mL de solution de phénol à 5% ensuite agiter soigneusement.
- Ajouter 5 mL d'acide sulfurique pur et agiter rapidement par un vortex
- Chauffer dans un bain mari 10 mn à 90 °C
- Laisser refroidir à l'obscurité pendant 30 mn

e) *Lecture*

- Préparer la courbe d'étalonnage
- Lire la densité optique (DO) à une longueur d'onde de 488 nm

II.2.9.2.7. Dosage de l'acide ascorbique (vitamine C)

Le dosage de l'acide ascorbique est effectué selon les étapes suivantes :

- Dans un bécher, mettre 10 mL de jus de tomate fraîchement pressé
- Ajouter 4 gouttes d'empois d'amidon
- Ajouter 15 mL d'iode ($C = 0,005 \text{ M}$)
- Titrer avec $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ($C = 0,005 \text{ M}$) jusqu'à disparition de la couleur noir
- Noter le volume de la descente de burette

Equations de calcul

$$n_{I_2 \text{ restante}} (\text{mol}) = \frac{1}{2} (CS_2O_3 - VS_2O_3) \quad \text{Équation 14}$$

$$n_{I_2 \text{ initial}} (\text{mol}) = CI_2 X VI_2 \quad \text{Équation 15}$$

$$n_{I_2 \text{ réagit}} (\text{mol}) = n_{I_2 \text{ initial}} - n_{I_2 \text{ restante}} \quad \text{Équation 16}$$

$$C_{\text{molaire}} (\text{mol/L}) = \frac{n_{I_2 \text{ réagit}}}{V_{\text{jus}}} \quad \text{Équation 17}$$

$$C_{\text{massique}} (\text{g/L}) = C_{\text{molaire}} X M_{\text{molaire vitc}} \quad \text{Équation 18}$$

$$m_{\text{vitc}} (\text{mg}) = C_{\text{massique}} X 100 X 10^{-3} \quad \text{Équation 19}$$



Figure 23 : Analyse physico-chimique des fruits de tomate.

II.2.10. Analyse des ETM dans la plante et le fruit de tomate

Afin d'évaluer l'accumulation des ETM au niveau des différentes parties de plants de tomate de la racine passant par la tige et arrivant aux feuilles ainsi jusqu'au fruits de tomates qui sont destinées à la consommation, différents échantillons ont été recueillis pour chaque traitement EC et EUT.

Les échantillons des racines, tiges, feuilles ont été séchés à l'étuve à 72°C jusqu'à poids constant ; broyé finement et tamisés à 2 mm ensuite conservés dans des boîtes fermées hermétiquement. Les fruits de tomate séchés par lyophilisation sont utilisés pour cette analyse. Dans des godets en téflon, on pèse 0,5 g de chaque échantillon ensuite 8 mL d'acide nitrique (HNO_3) concentré à 69% et 2 mL de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) ont été ajoutés. On ferme les godets avec une pince et on laisse à la température ambiante pendant une heure par la suite ils sont placés pendant 120 min dans une étuve réglée à 110°C. Après refroidissement on filtre les échantillons sur un filtre à seringue dans des tubes en polyéthylène gradués; les godets sont rincés plusieurs fois avec de l'eau ultra-pure et le filtrat est ajusté à 50 mL. Les éléments traces métalliques analysés dans la plante par SAA sont le Pb, Ni, Cr, Mn et Cu au niveau du Centre de Recherche d'Analyse Physico-Chimique CRAPC Bousmail.



Figure 24 : Analyse des ETM par SAA Agilent Technologies.

II.2.11. Facteur de bioconcentration

La principale entrée des métaux lourds dans les aliments est un transfert du sol vers les différentes parties du légume (Sharma et al, 2018).

Le facteur de bioconcentration est calculé selon la formule suivante :

$$BCF = \frac{C_{plante}}{C_{sol}} \quad \text{Equations 20}$$

C_{plante} indique la concentration de métaux dans les parties comestibles des légumes

C_{sol} indique la concentration du métal dans le sol.

Si BFC est supérieure à un, la plante est un accumulateur potentiel de métaux lourds.

II.2.12. Analyse statistique

Les données collectées ont toutes été représentées sous la forme de moyenne \pm écart-type. L'analyse statistique a été effectuée à l'aide du logiciel STATISTICA (StatSoft France (2003) version 6.1) avec un seuil de signification de $\alpha = 0.05$. Les paramètres de croissance qui représentent l'évolution de la hauteur, le diamètre et le nombre de feuilles des plants de tomate et les paramètres de production par bouquets floraux (le poids, largeur et longueur des fruits) des deux traitements (EC vs EUT) ont été analysés par le test Z. Le nombre de fruits par bouquets floraux a été analysé par le test khi-deux.

Chapitre III :

Résultats et discussion

III.1. Paramètres physico-chimiques et biologiques des eaux usées traitées de la STEP de Baraki

Les résultats d'analyse physico-chimique des effluents de la STEP de Baraki sont présentés dans le tableau 16 qui sont interprétés et comparés aux recommandations et normes de qualité des eaux usées traitées destinées à l'irrigation international (OMS et FAO) et Algériennes (JORA N°41 et NA 17683).

III.1.1. Détermination du pH

Comme décrit dans la littérature, le pH est un paramètre important à évaluer dans le suivi de la qualité des eaux usées destinées pour l'agriculture. Ainsi, un pH compris entre 6.5 et 8.4 est considéré comme normal et acceptable pour l'irrigation. Cependant, si le pH se situe en dehors de cette fourchette, cela signifie que l'eau usée traitée peut contenir des ions toxiques et induire un déséquilibre nutritionnel (Alobaidy et al. 2010 ; Shakir et al. 2017 ; Pescod 1992). Nous observant que la valeur de pH la plus élevée est enregistré au mois d'Aout 8.10 ± 0.13 alors que la valeur de pH la plus basse est enregistré au mois juin 7.16 ± 0.13 . La valeur du pH moyenne de Janvier à Décembre est de 7.85 ± 0.25 légèrement alcaline mais dans la gamme de pH normal pour l'eau d'irrigation ; cette valeur est légèrement supérieure à la valeur 7.75 trouvé par Djemil (2021) pour la même STEP et 7.72 pour la STEP de Beni Messous Alger. Cette EUT est adaptée à l'irrigation et n'a aucun effet négatif sur les plantes et le sol en termes d'ions toxiques.

III.1. 2. Conductivité électrique (CE)

La salinité est un paramètre clé dans la détermination de l'aptitude des eaux usées traitées à être utilisées pour l'irrigation et la grande variabilité de la tolérance des plantes à la salinité peut compliquer la question de l'établissement de critères de salinité (EPA 2004). La salinité est évaluée en déterminant la conductivité électrique (CE) qui mesure tous les anions et cations dissous dans l'eau. Les valeurs de CE de nos échantillons expérimentaux variaient de 1341 à 1708 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (valeur moyenne = $1511 \pm 118 \mu\text{S}/\text{cm}$). D'après la classification de l'USSL (United State Salinity Laboratory), l'eau d'irrigation est classée dans la classe de salinité élevée C3 (750- 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$) admissible pour l'irrigation mais elle ne peut pas être utilisée sur des sols mal drainés même si le drainage est suffisant (Richards 1954). Nos valeurs de CE obtenues peuvent indiquer un niveau modéré de restriction pour l'utilisation des EUT dans l'irrigation en raison de l'ajout d'une concentration de sel dans le sol qui augmente la

Chapitre III : Résultats et discussion

concentration initiale en causant ainsi des effets néfastes sur les cultures. En fait, dans le cas d'une CE élevée, l'activité osmotique de la plante sera réduite, ce qui peut créer des interférences avec l'absorption des nutriments et l'eau (Tatawat & Chandel 2008). En général, dans une situation similaire la gestion et la surveillance de la salinité avec une sélection de plantes tolérantes au sel est recommandée (Alobaidy et al. 2010).

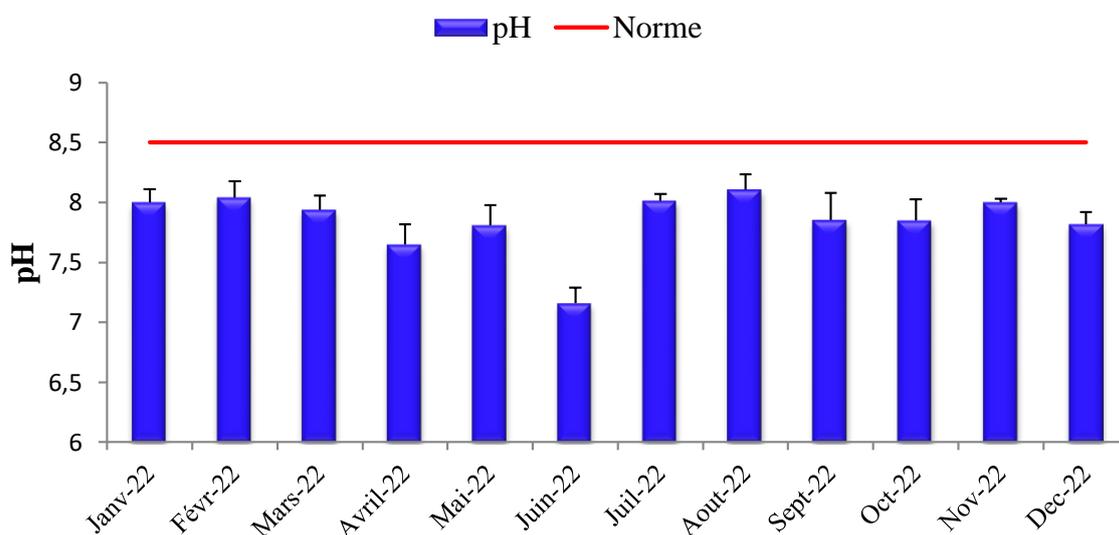


Figure 25 : Evolution mensuelle de pH durant la période expérimentale.

III.1.3. Matières en suspension (MES)

Les MES représentent l'ensemble des particules minérales et organiques insolubles flottantes ou en suspension qui sont contenues dans les eaux usées (Nakib et al. 2016). Les MES contribuent également à la fertilisation des sols par leur richesse en matière organique. La teneur en MES varie entre un maximum de 35 ± 14.9 au mois de Juin et minimum de 7.23 ± 3.96 au mois d'Avril avec une moyenne de 21.84 ± 12.29 mg/L. Ce taux est inférieur aux normes (30 mg/L) permettant ainsi leur utilisation en irrigation sans nécessité de filtration (FAO 2003). Selon les directives des normes algériennes (JORA, 2006 et NA 17683) ces eaux peuvent être utilisées en irrigation et ne présentent aucun risque de colmatage sur le sol.

Chapitre III : Résultats et discussion

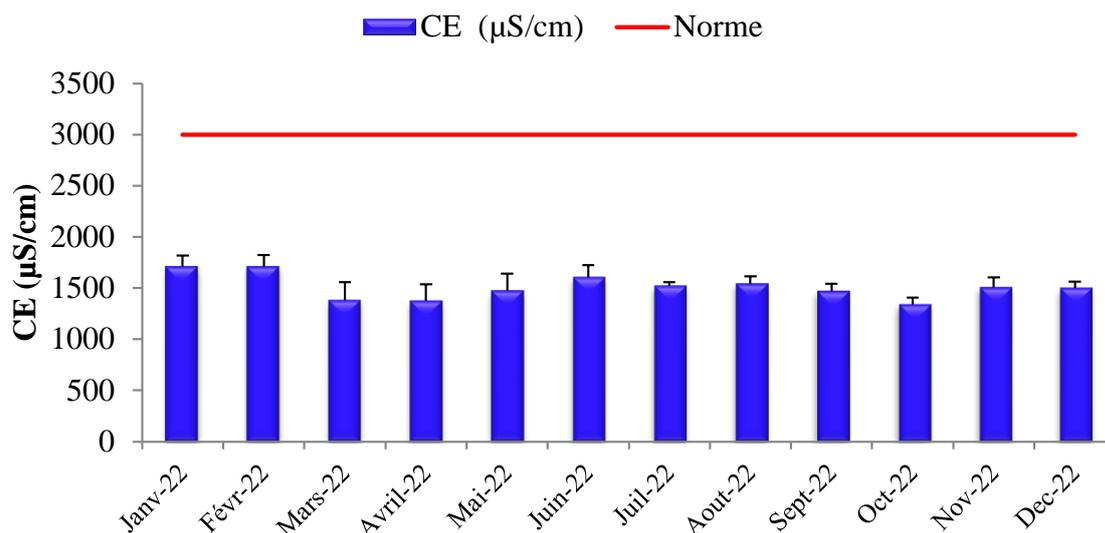


Figure 26 : Evolution mensuelle de la conductivité électrique durant la période expérimentale.

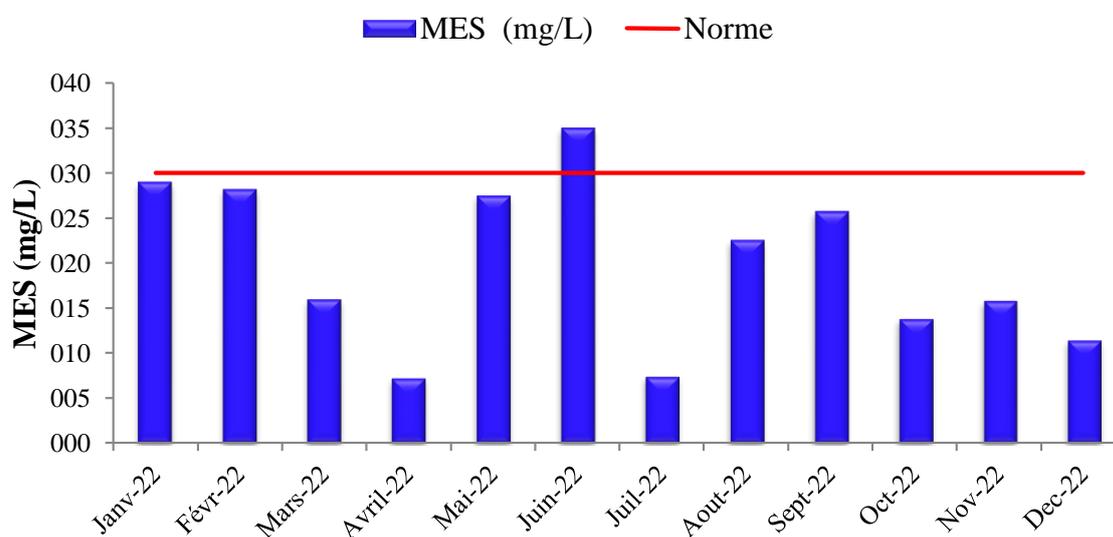


Figure 27 : Evolution mensuelle des MES durant la période expérimentale.

III.1.4. Demande chimique en oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène (DCO) est la quantité d'oxygène consommée par les matières présentes dans l'eau (Rodier 2009). Une DCO élevée indique une teneur plus importante en matières oxydables dans l'eau ce qui réduit les niveaux d'oxygène dissous (Shirin& Yadav 2014). Une concentration maximale de la DCO est observée au mois de Juin

Chapitre III : Résultats et discussion

qui atteint 122.93 mg/L alors que la valeur minimale est à 25.69 mg/L observée au mois d'Avril. La concentration moyenne est à 56.08 ± 31.85 mg/L inférieure aux recommandations qui exige une DCO < 90 mg/L.

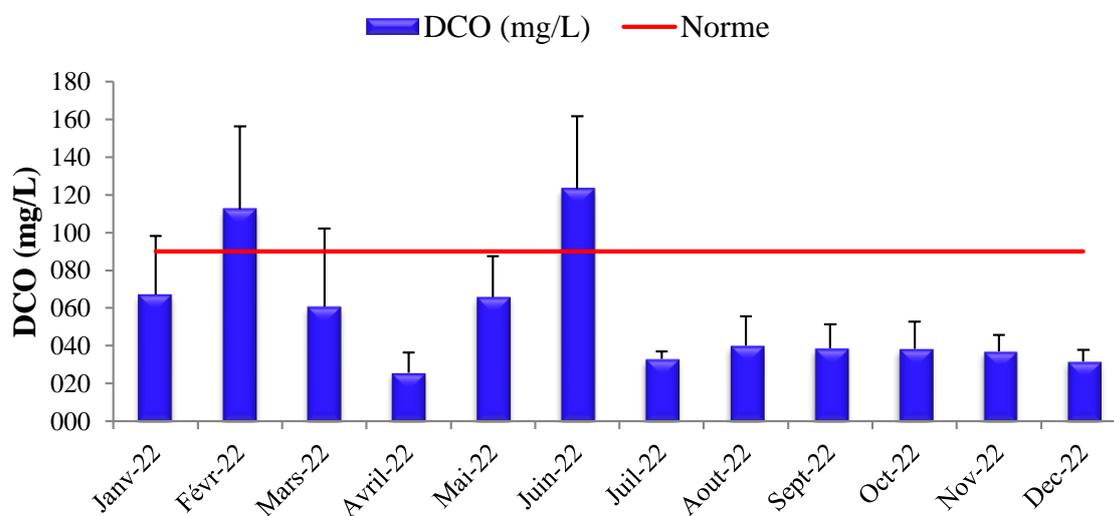


Figure 28 : Evolution mensuelle des DCO durant la période expérimentale.

III.1.5. Demande biochimique en oxygène (DBO₅)

La demande biochimique en oxygène (DBO₅) exprime la quantité d'oxygène dissous nécessaire aux organismes aérobies dans une masse d'eau pour décomposer la matière organique (Moghadam et al. 2015). Si la DBO₅ est faible l'eau contient peu de matières organiques et peu d'organismes microbiens. Si la DBO₅ est élevée l'eau contient davantage de matières organiques ce qui réduit la qualité globale de l'eau (Poonia et al. 2023). On observe un dépassement de la limite de 30 mg/L au mois de Février et juin avec des valeurs respectives de 43.3 et 50 mg/L alors que la concentration moyenne de la DBO₅ est de 15.94 ± 16.91 mg/L. Les EUT de la STEP de Baraki présentes des valeurs de la DBO₅ inférieures aux recommandations.

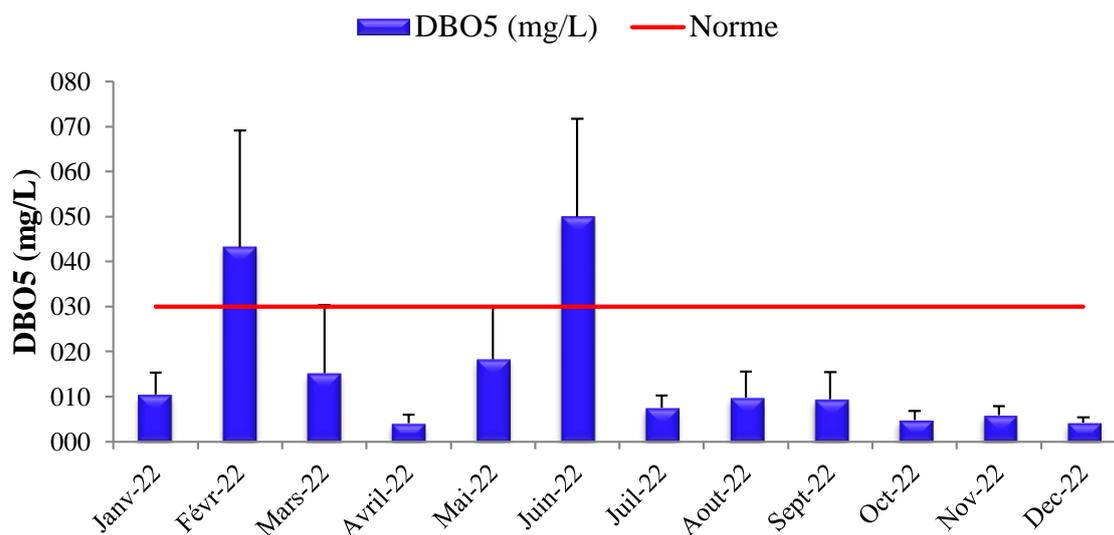


Figure 29 : Evolution mensuelle des DBO₅ durant la période expérimentale.

III.1. 6. Ratios indicatifs de la qualité des effluents

Le ratio DCO/DBO₅ représente la capacité de biodégradabilité de l'effluent et dépend de sa nature et s'avère également très utile pour le suivi de l'efficacité de traitements biologiques. Dans le cas des eaux usées urbaine qui contient une majorité de composés organiques biodégradables, le rapport DCO/DBO₅ est compris entre 1,5 et 2,5. Les effluents industriels peuvent contenir des composés non biodégradables. Pour notre STEP nous avons noté une valeur moyenne de 4.95 ± 1.92 qui est supérieure à 3 indiquant un effluent moyennement biodégradable (Rodier 2009). Ceci montre que la contribution des activités industrielles à la modification de la DBO₅ et de la DCO est élevée (Tamrabet 2011).

De plus, le ratio DBO₅/DCO donne des indications très intéressantes sur l'origine de la pollution (Karef et al. 2017). Les résultats des calculs varient d'un minimum de 0.12 à un maximum de 0.43 avec une moyenne de 0.24. Cette valeur est inférieure à celle trouvée par d'autres chercheurs qui ont rapporté une valeur de 0.56 (Karef et al. 2017). Par conséquent, cet effluent est modérément biodégradable et confirme que ces eaux sont chargées en matière organique (26%) et en matière inorganique (74%). Ces résultats indiquent que les eaux usées nécessitent davantage de traitements.

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1.7. Les matières azotées

Les nutriments contenus dans les eaux usées domestiques constituent un paramètre de qualité important pour la valorisation de ces eaux dans l'agriculture. L'eau usée contenant des matières azotées peut agir comme un engrais pour les plantes ; il est donc possible de réduire l'utilisation d'engrais chimiques. Mais il faut noter qu'elles peuvent également contaminer l'aquifère avec des nitrates en cas de concentrations élevées (Rahimi et al. 2018). L'une des étapes essentielles du traitement des eaux usées est l'élimination de l'azote et l'évolution biogéochimique de l'azote organique conduit à la formation d'ammoniac, de nitrites et de nitrates (Bachi et al. 2022). Les résultats de l'analyse de l'effluent de la STEP de Baraki ont montré des quantités faibles et admissibles de nitrate (NO_3^-) de 3.43 ± 2.21 mg/L. Cependant il a été noté des teneurs très élevées en ammoniac (NH_4^+) avec une moyenne de 28.55 ± 10.37 mg/L dépassant la limite admissible de l'USEPA (10 mg/L). Cette concentration d'ammoniac (NH_4^+) trouvée dépasse la valeur de 2.28 mg/L mentionnée par Djemil et al. (2018) dans les eaux usées traitées de la STEP de Baraki (Alger) et 3.55 mg/L mentionnée par Djillali et al. (2020) dans les eaux usées traitées de la STEP de Corso (Boumerdès). L'azote total enregistre une concentration maximale de 97.1 ± 42.8 mg/L au mois de Février alors que la valeur minimale est à 34 ± 15.55 mg/L observée au mois d'Avril ; la moyenne est de 57.19 ± 20.63 mg/L ce qui est supérieur à la limite admissible de la FAO pour l'irrigation (30 mg/L) et supérieur à la teneur moyenne de 15,31 mg/L trouvée par Djillali et al. (2020).

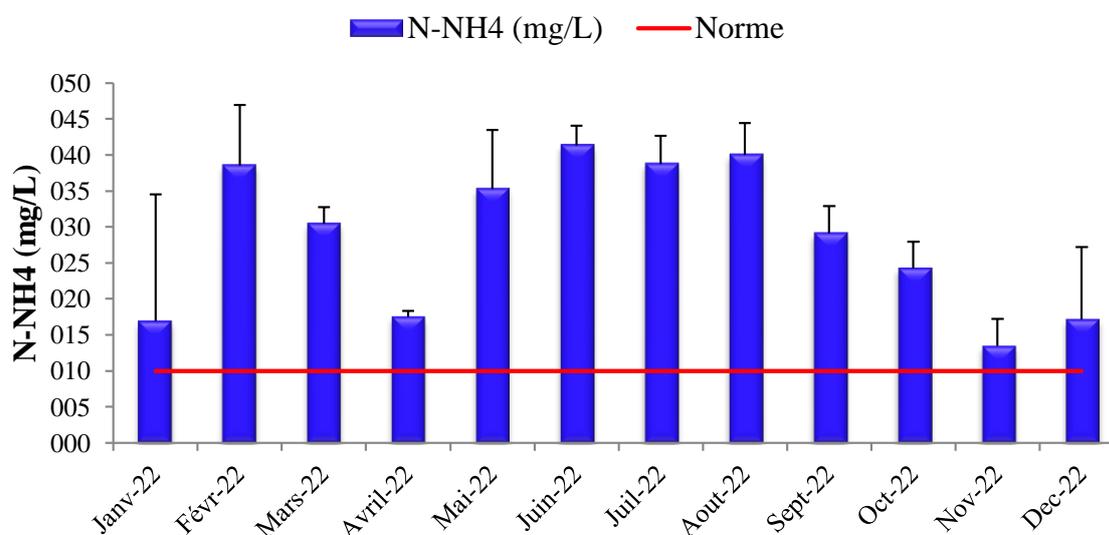


Figure 30 : Evolution mensuelle de l'ammoniac (NH_4^+) durant la période expérimentale.

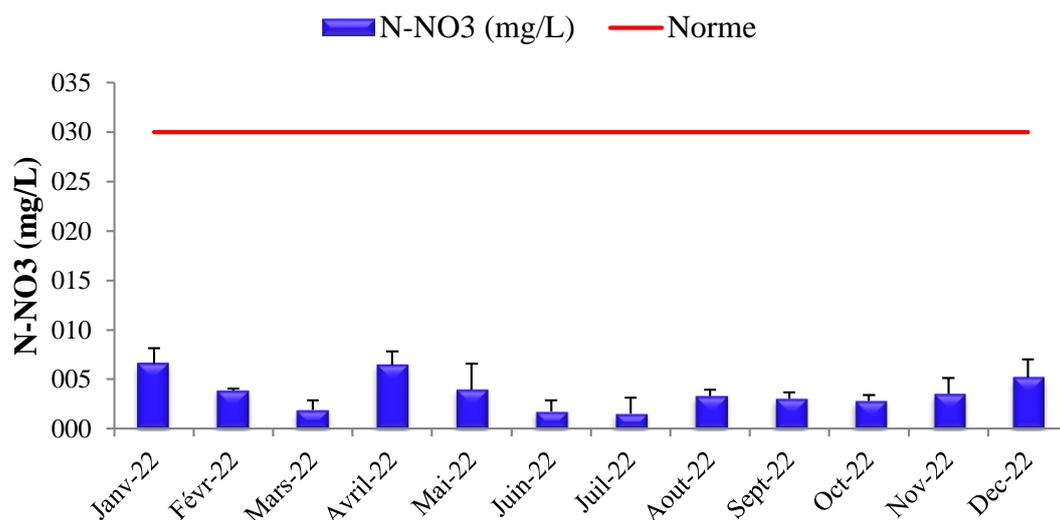


Figure 31 : Evolution mensuelle du nitrate (NO_3^-) durant la période expérimentale.

III.1.8. Le phosphore total (PT)

Le phosphore se trouve dans les eaux usées sous forme de sels minéraux (orthophosphates, polyphosphates) et sous forme de composés organiques. Ces différents composés sont soit solubilisés, soit fixés sur les matières en suspension (Sarkar Phyllis et al., 2022). La valeur du phosphore total est en moyenne de 3.67 ± 1.68 mg/L ce qui est supérieur à la valeur de 1.78 mg/L trouvée dans la même STEP étudiée par Djemil et al (2018). Cette valeur ne dépasse pas la norme Algérienne JORA 2006 (10 mg/l) destinée à l'irrigation. Cette concentration ne dépasse pas la limite de 13 mg/l recommandée par Müller & Cornel (2017), sachant que cette limite est basée sur les besoins de la plupart des cultures et ne présente aucun effet nocif en irrigation.

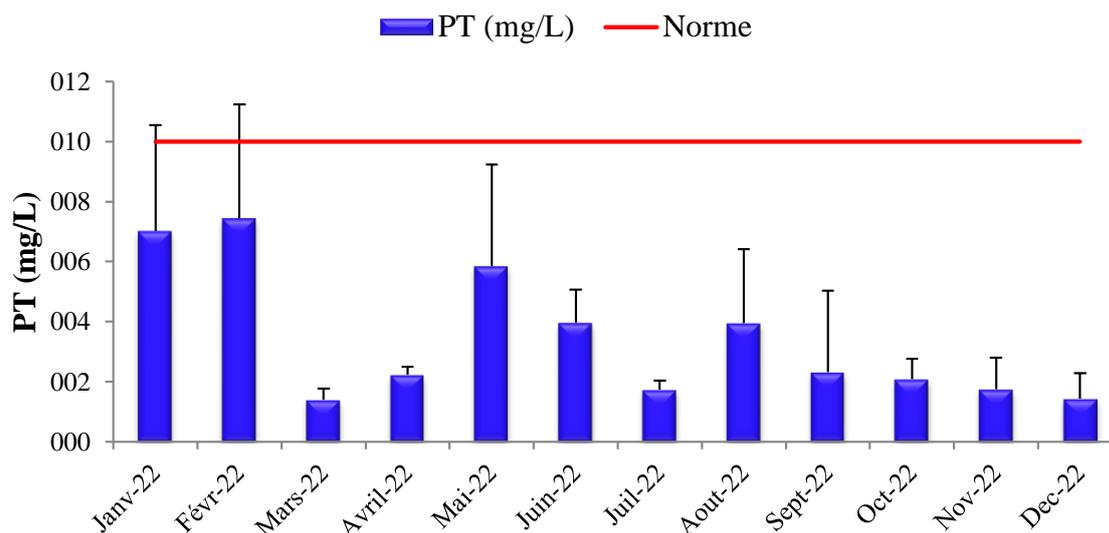


Figure 32 : Evolution mensuelle du phosphore total durant la période expérimentale

III.1.9. Les ETM

On se basant sur les recommandations de la FAO pour évaluer la toxicité spécifique des ions, le bore est considéré comme l'ion le plus phytotoxique et une concentration supérieure à 500 $\mu\text{g/L}$ peut être toxique pour les cultures sensibles. La valeur moyenne du bore dans les eaux usées traitées est de 147 $\mu\text{g/L}$ ce qui est inférieur aux normes de la FAO fixées à 750 $\mu\text{g/L}$ pour une utilisation à long terme. Les métaux lourds intéressants pour les plantes et posant des problèmes de santé sont le Cu et le Zn ; le Cu est toxique pour un certain nombre de plante à une concentration de 0,1 à 1,0 mg/l et le zinc est toxique pour de nombreuses plantes à des concentrations très variables (EPA 2004). Les valeurs respectives de Cu et Zn étaient de 29 $\mu\text{g/L}$ et 22 $\mu\text{g/L}$. Ces teneurs sont très négligeables et n'ont pas d'effets toxiques ni sur le sol ni sur la plante (200 et 2000 $\mu\text{g/L}$, respectivement pour la limite d'utilisation à long terme). La valeur moyenne de Mn est de 56 $\mu\text{g/L}$ ce qui est inférieur à la norme (5000 $\mu\text{g/L}$). Les valeurs moyennes en Pb, Cd, Cr et Ni étaient <2, <2, 18 et 14 $\mu\text{g/L}$, respectivement. Ces résultats ont été jugés sans danger pour l'irrigation agricole. Les valeurs de Pb, Cd et Cr trouvées par Djemil et al (2018) dans la même STEP étudiée sont respectivement 4250, <50, 200 $\mu\text{g/L}$, ce qui est supérieur à nos valeurs. Les valeurs moyennes des teneurs en As, Fe, Se, Mo et Al sont respectivement <2, 625, <1, <2 et 115 $\mu\text{g/L}$, ces valeurs sont inférieures à la norme de réutilisation agricole. Les concentrations de métaux lourds dans les eaux usées traitées sont inférieures aux normes de la FAO pour l'eau d'irrigation. Par conséquent, cette source d'eau peut être utilisée à des fins d'irrigation sans aucun effet dangereux sur le sol et les plantes en termes d'absence de toxicité des métaux.

Chapitre III : Résultats et discussion

Tableau 16 : Résumé statistique des données analytiques de janvier 2022 à décembre 2022.

Paramètres	Unité	Moyenne	Ecartype	Erreur standard	Max	Min	Standard FAO
pH		7.85	0.25	0.03	8.1	7.16	6.5-8.5
CE	µS/cm	1511	118	14.46	1708	1341	3000
MES	mg/L	21.84	12.29	1.57	46.4	7.23	30
DOC	mg/L	56.08	31.85	3.94	122.93	25.69	90
DOB ₅	mg/L	15.94	16.91	2.23	53.08	4.1	30
NT	mg/L	57.19	20.63	5.55	97.1	35.95	30
NH ₄ ⁺	mg/L	28.55	10.37	2.79	41.3	13.43	-
NO ₃ ⁻	mg/L	3.67	1.68	0.45	6.6	1.55	30
PT	mg/L	3.43	2.21	0.59	7.45	1.39	-
Ca ²⁺	mg/L	95.25	5.53	3.13	109	90	-
Mg ²⁺	mg/L	26.25	2.34	1.32	29	21	-
Na ⁺	mg/L	111.58	17.4	9.84	146	86	-
K ⁺	mg/L	16.33	1.72	0.97	18	13	-
HCO ₃ ⁻	mg/L	348.33	60.38	34.16	429	199	518.5
CO ₃ ²⁻	mg/L	0	0	0	0	0	-
Cd	µg/L	<2	0	0.00	<2	<2	10
Cu	µg/L	29	0	0.00	40	17	200
Zn	µg/L	22	0.01	0.01	30	13	2000
Pb	µg/L	<2	0.01	0.01	<2	<2	5000
Cr	µg/L	18	0.01	0.01	23	13	100
As	µg/L	<2	0.01	0.01	<2	<2	100
Ni	µg/L	14	0.01	0.01	21	6	200
Mn	µg/L	56	0.02	0.03	77	34	200
Fe	µg/L	625	0.09	0.12	711	538	5000
Se	µg/L	<1	0	0.00	<1	<1	20
Sb	µg/L	<2	0	0.00	<2	<2	-
Ag	µg/L	17	0.1	0.14	31	<2	-
Ba	µg/L	65	0	0.00	69	61	-
Mo	µg/L	<2	0	0.00	<2	<2	10
B	µg/L	147	0.14	0.19	288	5	750
Hg	µg/L	<2	0	0.00	<2	<2	-
Al	µg/L	115	0.11	0.15	255	5	5000

III.1.10. Indicateurs de la qualité de l'eau pour l'irrigation

Le tableau 17 regroupe les indicateurs de qualité pour l'irrigation de l'eau usée traitées de la STEP de Baraki, à savoir le Rapport d'Adsorption du Sodium (SAR), Pourcentage de Sodium Soluble (SSP) et Résiduel du Carbonate de sodium (RSC).

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1.10.1. Rapport d'adsorption du sodium (SAR)

La teneur en sodium est un facteur important dans l'évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation. Un excès de sodium conduit au développement d'un sol alcalin qui peut causer des problèmes physiques et réduire la perméabilité du sol (Moghadam et al. 2015). Il est adsorbé et s'attache aux particules du sol, puis le sol sec devient dur compact et de plus en plus imperméable à la pénétration de l'eau (Fipps 1996). Nos résultats ont révélé une teneur moyenne en sodium de 112.88 ± 17.64 mg/L. Selon les critères de la FAO de l'eau d'irrigation pour les effluents traités, ces valeurs indiquent que notre EUT peut être utilisé pour l'usage en irrigation. D'après d'autres recherches (Alobaidy et al. 2010) il a été rapporté que l'eau usée contenant 184 mg/l de sodium peut être utilisée pour l'irrigation. Pour évaluer le risque de salinité les classifications de la qualité de l'eau sont utilisées selon Richards (1954) ; cette évaluation est basée sur la conductivité électrique (EC) et le taux d'adsorption du sodium (SAR) de l'eau. L'indice SAR a été appliqué pour estimer l'adsorption de sodium et évaluer son aptitude à l'irrigation. La valeur SAR de notre EUT varie de 2.90 à 4.80 (moyenne = 3.70 ± 0.58) ce qui indique que le taux de sodium est faible et qu'aucune perturbation n'est observée dans le sol. On constate que les échantillons appartiennent à la classe C3-S1 qui indique une salinité élevée et une eau pauvre en sodium qui peut être utilisée pour l'irrigation sur presque tous les types de sol à l'exception des cultures qui sont très sensibles au sodium (figure 33). La figure 34 illustre la classification des eaux usées domestiques pour l'irrigation et met en évidence la bonne qualité de nos échantillons d'eaux usées domestiques. L'effet négatif le plus important sur l'environnement causé par les eaux usées agricoles est l'augmentation de la salinité du sol si elle n'est pas contrôlée ce qui peut diminuer la productivité à long terme (OMS 2006). Un problème d'infiltration d'eau lié à la qualité de l'eau est généralement associé à la salinité et à la teneur en sodium de l'eau (Ayres & Westcot, 1985).

III.1.10.2 Pourcentage de sodium soluble (SSP)

Le pourcentage de sodium soluble (SSP) est un autre paramètre important utilisé pour déterminer le risque lié au sodium. La valeur SSP mesurée pour l'EUT varie de 34.81 % à 46.51 % (moyenne = 39.69 ± 3.69). Elle est conforme à la valeur moyenne recommandée par le laboratoire américain (USSL) sur la salinité (40-60 %) ce qui indique un degré modéré de restriction de l'utilisation de ces eaux usées pour l'irrigation. De plus, les eaux usées domestiques avec un SSP supérieur à 60% peuvent induire une accumulation de sodium dans le sol et ainsi perturber ses propriétés physiques. En effet, un échange d'ions va s'établir entre le Na^+ qui se trouve dans les exsudats du sol, le Ca^{2+} et le Mg^{2+} dans les particules d'argile.

Chapitre III : Résultats et discussion

Des conditions physiques défavorables résultent lorsque le sodium est le cation prédominant (Wilcox 1948). Ce phénomène réduit la perméabilité et ralentit le drainage et l'infiltration de l'eau dans le sol. Alobaidy et al. (2010) ont démontré une corrélation positive entre SSP et SAR.

III.1.10.3 Résiduel du Carbonate de sodium (RSC)

Une concentration élevée de bicarbonates dans l'eau entraîne la précipitation du calcium et du magnésium sous forme de carbonates. Le carbonate de sodium résiduel est calculé pour évaluer cet effet (Tatawat & Chandel, 2008). Des valeurs élevées de carbonate de sodium résiduel indiquent des niveaux élevés d'alcalinité de l'eau, ce qui affecte l'irrigation (Badr et al., 2023). L'eau n'est pas adaptée à l'irrigation lorsque la valeur RSC est supérieure à 2.5 ; tandis que lorsqu'elle se situe entre 1.25 et 2.5 l'eau peut être considérée comme étant dans une zone critique. La seule région sûre est celle où la valeur RSC est inférieure à 1.25 (Alobaidy et al., 2010). La valeur moyenne RSC calculée est de $-1.20 \pm 0,96$ meq/L est inférieure à zéro, ce qui indique que cette valeur est sûre pour l'irrigation et qu'il n'y a pas de précipitation du calcium et du magnésium.

Tableau 17 : Indices de qualité de l'eau d'irrigation.

Indices	Moyenne	Max	Min
SAR	$3,7 \pm 0.58$	4,8	2,9
SSP	$39,69 \pm 3.69$	46,51	34,81
RSC	$-1,2 \pm 0.96$	0,28	-3,29

Chapitre III : Résultats et discussion

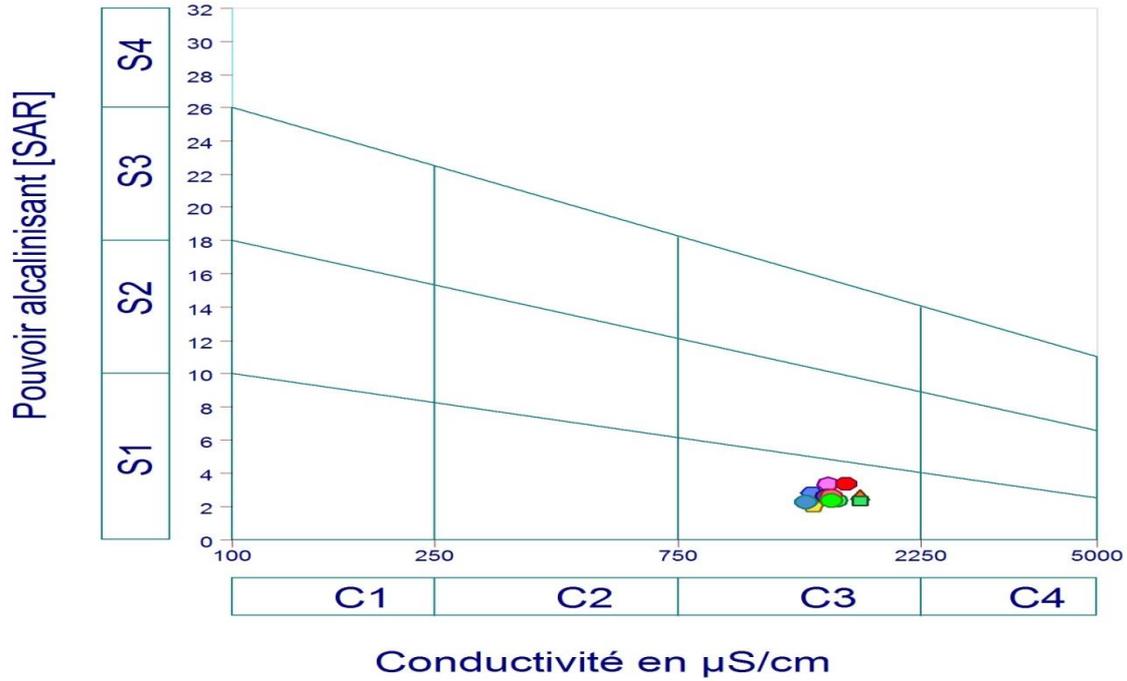


Figure 33 : Diagramme de Wilcox des EUT prélevées de la STEP de Baraki montrant une salinité (C3) élevée et une faible teneur en sodium (S1).

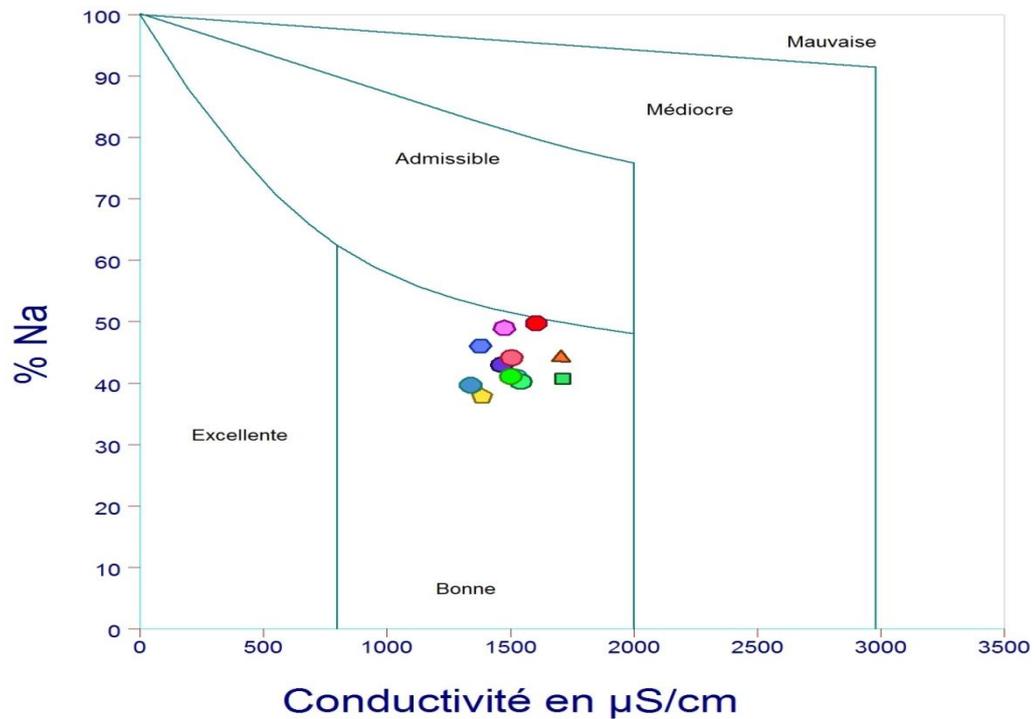


Figure 34 : Diagramme de la Riverside indiquant la bonne qualité des eaux usées.

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1.11. Paramètres bactériologiques

L'examen bactérien des eaux usées traitées a révélé une concentration élevée de bactéries indicatrices. La teneur en coliformes totaux est en moyenne de $2.E+06$ UFC par 100mL ce qui est supérieur aux limites autorisées par la norme de l'OMS qui recommandent que les eaux usées destinées à l'irrigation des cultures contiennent moins de 1 000 coliformes fécaux par 100 mL (tableau 18). La concentration moyenne d'E. coli est de $5.E+05$ UFC par 100 mL était beaucoup plus élevée que la valeur recommandée par l'OMS pour la réutilisation des eaux usées dans l'irrigation des cultures de racines et de feuilles (10^3 et 10^4 E. coli par 100 mL pour les cultures de racines et de feuilles, respectivement), ce qui indique que l'irrigation par les eaux usées pourrait augmenter le risque d'infections par des agents pathogènes entériques chez les consommateurs de cultures irriguées par les eaux usées (OMS 2006). La teneur en entérocoques fécaux est en moyenne de $4.E+05$ UFC par 100 mL ce qui reflète une charge de pollution fécale élevée dans l'eau due principalement aux eaux usées domestiques. Cependant l'analyse des pathogènes a donné des résultats négatifs pour tous les échantillons analysés. Ainsi *Salmonella spp.* et *staphylococcispp.* n'ont pas été trouvés dans les EUT pendant la période d'étude en raison de leur absence à l'entrée de la station ou de l'élimination des micro-organismes par les processus de traitement. Un certain nombre d'études ont rapporté qu'aucune salmonelle n'avait été détectée dans les eaux usées municipales traitées (Cirelli et al. 2012 ; Gatta et al. 2016 ; Farhadkhani et al. 2018). Une concentration élevée des indicateurs bactériens reflète une faible efficacité de la station d'épuration en termes d'élimination de ces bactéries et est probablement liée à l'absence de processus de désinfection. Au vu des résultats bactériologiques obtenus la qualité sanitaire des eaux usées de la STEP de Baraki (Alger) est loin d'être acceptable pour l'irrigation pour le moment. En fait, il est indiqué que l'application de cette eau usée étudiée à des fins agricoles peut présenter un risque pour les travailleurs et les consommateurs. La désinfection de la STEP peut éliminer la majorité des pathogènes mais ce type de traitement n'est pas pratiqué dans la STEP de Baraki. Cependant, dans le cas de la mise en place d'un système de désinfection adéquat, nos résultats actuels sur la qualité bactériologique peuvent varier et devenir très prometteurs.

Chapitre III : Résultats et discussion

Tableau 18 : Qualité microbiologique des EUT de la STEP de Baraki

Paramètres	Résultats (UFC/100 mL)	Standards OMS
Coliformes totaux	2.E+06	≥1000
<i>E. coli</i>	5.E+05	≥1000
<i>Enterococci fécal</i>	4.E+05	/
<i>Salmonella spp.</i>	Absence	Absence
<i>Staphylococcus spp.</i>	Absence	/

III.1.12. Surveillance saisonnière de la qualité des eaux usées traitées

Les eaux usées sont une matrice très complexe contenant des composés organiques, inorganiques et biologiques avec différents degrés de toxicité, en fonction des paramètres intrinsèques tels que la variation des propriétés physiques, chimiques et microbiologiques et des paramètres extrinsèques tels que l'environnement, la pluviométrie et la température (saisons froides et chaudes). Le suivi saisonnier de certains paramètres des eaux usées domestiques a révélé des différences significatives entre les saisons pour la plupart d'entre eux (tableau 19). Pour mieux comprendre si les conditions météorologiques ont un impact sur cette variation, l'évaluation de la température et de la pluviométrie a été effectuée et présentée dans le tableau 20. Les valeurs moyennes des paramètres évalués présentées dans le tableau 19 ont montré que le pH, la CE, les MES, la DCO, la DBO₅, le NH₄⁺ et le PT étaient significativement différents (p<0,05) entre les saisons de l'année. Cependant, aucune différence significative n'a été observée pour NT, NO₃⁻, HCO₃⁻ et les cations évalués Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ et K⁺. En outre, on a remarqué des valeurs plus élevées pour la CE, les MES, la DCO et la DBO₅ en hiver avec une température moyenne basse de 9,85°C et des précipitations de 252 mm par rapport au printemps, à l'été et à l'automne. En ce qui concerne les nutriments, les valeurs de NT, NO₃⁻ et PT étaient également plus élevées en hiver, mais NH₄⁺ était plus élevé en été coïncidant avec des valeurs plus élevées de pH, HCO₃⁻ et des cations. Ces résultats peuvent être principalement liés à la variation des charges polluantes au cours de l'année affectées par diverses activités humaines, Le tableau 20 montre une variation normale et modérée de la température au cours de l'année mais une faible pluviométrie moyenne avec une fluctuation apparente entre les saisons d'hiver, de printemps et d'automne. De nombreuses études ont démontrés que les changements climatiques ont des effets significatifs sur les processus de traitement des STEP qui se manifestent par une augmentation

Chapitre III : Résultats et discussion

des températures des eaux usées et des débits d'entrée (Ranieri et al., 2023). L'augmentation des températures a influencé la solubilité de l'oxygène, le métabolisme microbien et les processus de biodégradation. Elle a également compromis la demande biologique en oxygène (DBO₅) et aura donc des effets néfastes sur les écosystèmes et les communautés aquatiques (Ranieri 2003; Hughes et al., 2021).

Tableau 19 : Variation saisonnière des paramètres de l'EUT.

Paramètres	Unités	Hiver	Printemps	Eté	Automne
pH		8.02±0.13 ^a	7.87±0.25 ^b	8.09±0.12 ^a	7.9±0.17 ^b
CE	μS/cm	1617.56±206.22 ^a	1472.54±169.88 ^b	1517.09±62.28 ^b	1458.23±97.10 ^c
MES	mg/L	26.43±21.42 ^a	19.57±15.22 ^b	19.03±19.38 ^b	16.8±19.87 ^c
DOC	mg/L	81.75±43.44 ^a	60.29±37.07 ^b	37.70±13.08 ^c	36.70±10.90 ^c
DBO ₅	mg/L	25.80±23.64 ^a	21.55±21.63 ^a	9.48±5.34 ^b	4.92±1.93 ^c
NT	mg/L	73.40±40.44 ^a	53.26±16.50 ^a	50.95±18.23 ^a	51.25±36.61 ^a
NH ₄ ⁺	mg/L	28.52±17.00 ^a	31.48±13.01 ^b	36.29±6.46 ^b	19.44±7.95 ^c
NO ₃ ⁻	mg/L	4.51±5.34 ^a	3.57±2.54 ^a	2.46±1.25 ^a	3.84±1.58 ^a
PT	mg/L	6.34±5.76 ^a	4.36±2.76 ^a	2.45±1.84 ^b	2.04±1.71 ^c
Ca ²⁺	mg/L	91.67±2.08 ^a	93.33±1.15 ^a	101.00±7.00 ^a	95.00±6.24 ^a
Mg ²⁺	mg/L	25.33±0.58 ^a	25.33±4.04 ^a	27.67±2.31 ^a	26.67±1.53 ^a
Na ⁺	mg/L	98.00±11.53 ^a	135.00±16.52 ^a	109.00±5.19 ^a	104.33±6.65 ^a
K ⁺	mg/L	14.33±2.31 ^a	17.33±0.58 ^a	17.33±1.15 ^a	16.33±0.58 ^a
HCO ₃ ⁻	mg/L	316.33±115.07 ^a	354.67±28.18 ^a	364.67±56.01 ^a	359.67±26.27 ^a

La différence entre les lettres en exposant d'une même ligne indique une différence statistique. (p<0.05).

Tableau 20 : Variations saisonnières de la température et des précipitations.

	Température (°C)	Précipitation (mm)
Hiver	9.85±3.19	2.52±4.34
Printemps	19.21±4.81	5.62±9.92
Eté	25.46±2.82	0.95±1.38
Automne	17.03±4.15	1.6±2.40

III.1.13. Corrélation des paramètres physico-chimiques des EUT de la STEP de Baraki

Le tableau 6 montre les coefficients de corrélation de Spearman statistiquement significatifs des paramètres physico-chimiques des EUT de la STEP de Baraki. Par définition, le coefficient de corrélation donne une mesure de l'intensité et du sens de la relation entre deux variables. Ainsi, nous remarquons que toutes les corrélations étaient positives entre les différents paramètres étudiés à l'exception celle entre CE et Na⁺ (r = -0,609) qui était sert

Chapitre III : Résultats et discussion

forte mais négative. Cependant, nous notons une très forte ($r \geq 0,8$) corrélation entre le HCO_3^- et le Mg^{2+} ($r = 0,853$). D'autre part, nous enregistrons une forte corrélation ($0,6 \leq r < 0,8$) entre K^+ vs Ca^{2+} ; DBO_5 vs DCO ; DCO vs MES ; Pt vs DCO ; Na^+ vs CE ($r = 0,663$; $0,621$; $0,618$; $0,611$ et $0,663$ respectivement) et une très faible ($r < 0,2$) corrélation mais significative entre MES et pH ($r = 0,144$). Cependant, le reste des coefficients reportés dans le tableau 6 étaient de faible à moyennement corrélés ($0,2 \leq r < 0,6$).

III.1.14 Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) est un outil de synthèse de l'information, très utile lorsque l'on est en présence d'une somme importante de données quantitatives à interpréter. C'est une méthode descriptive et de réduction de la dimensionnalité qui regroupe les variables corrélées. La figure représente les différents paramètres mesurés dans notre étude projetés sur un plan (axe 1 et axe 2) par la méthode ACP. Les axes 1 et 2 expliquaient respectivement 60,393 % et 23,383 % des informations contenues dans la base de données, soit un total de 83,776 %. Il ressort 3 groupes de paramètres : (i) groupe 1 : pH , CE , MES , DCO , DBO_5 et PT ; (ii) groupe 2 : Mg^{++} et HCO_3^- et (iii) groupe 3 : Ca^{++} et K^+ . Nous remarquons que le groupe 1 et le groupe 2 sont opposés par rapport à l'axe 1. D'un autre côté, le groupe 1 et le groupe 3 sont opposés par rapport à l'axe 2. Cependant, le groupe 2 et le groupe 3 sont diamétralement opposés.

Tableau 21 : Coefficient de corrélation de Spearman des paramètres physico-chimiques des EUT de la STEP de Baraki.

Paramètres	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	MES (mg/L)	DCO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	NT (mg/L)	N-NH ₄ (mg/L)	N-NO ₃ (mg/L)	PT (mg/L)	Ca ⁺² (mg/L)	Mg ⁺² (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)
pH	1													
CE	,327**	1												
MES	,144*	,233**	1											
DCO	,208**	,340**	,618**	1										
DBO ₅	,370**	,371**	,500**	,621**	1									
NT				,311*	,463**	1								
N-NH ₄		,306*		,351*	,508**	,330*	1							
N-NO ₃								1						
PT	,313*	,424**	,316*	,611**	,420**	,365**	,461**		1					
Ca ⁺²										1				
Mg ⁺²											1			
Na ⁺			,609*									1		
K ⁺										,663*			1	
HCO ₃											,853**			1

* La corrélation est significative au niveau 0.05 (bilatéral).

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

Chapitre III : Résultats et discussion

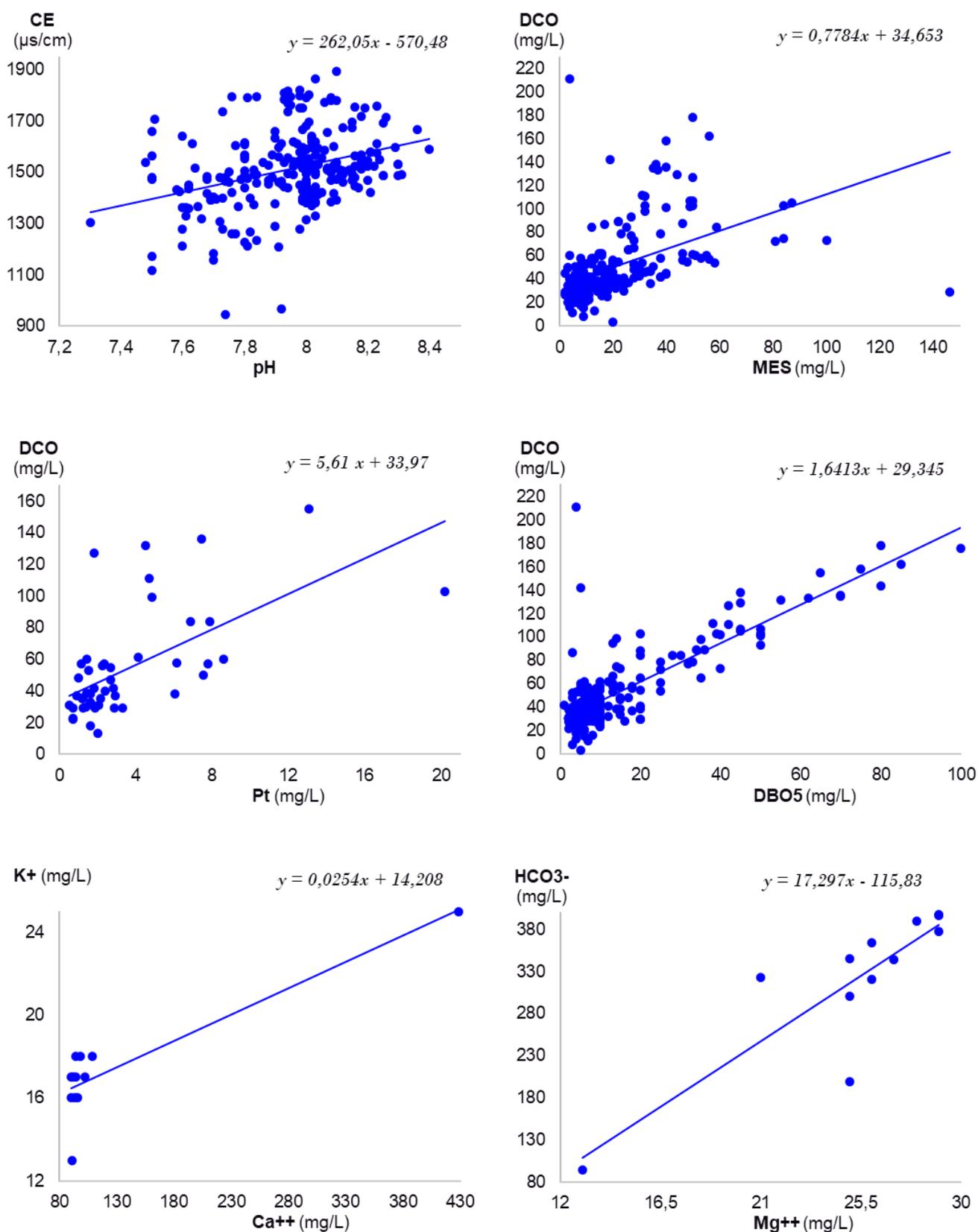


Figure 35 : Corrélation des paramètres physico-chimiques des EUT de Baraki.

Chapitre III : Résultats et discussion

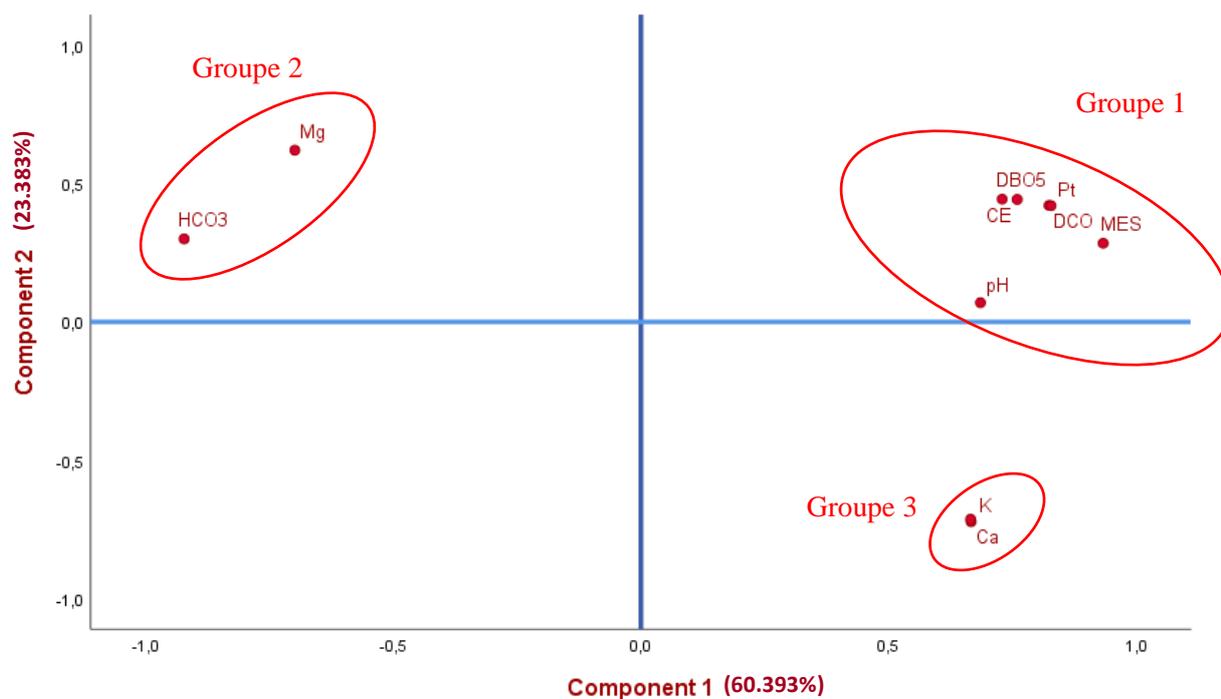


Figure 36 : Projection des paramètres de l'analyse physico-chimique de l'eau dans le plan principal (Dimension 1 et Dimension 2) par l'ACP.

III.2. Etude de l'impact de la réutilisation des eaux usées traitées de la STEP de Baraki sur une culture de tomate « *Solanum lycopersicum* ».

III.2.1. Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation

Il est important de noter ici que cette deuxième partie de notre travail a été réalisée en 2023, donc il était indispensable de réévaluer le statut physicochimique et bactériologique des eaux usées traitées avant leur réutilisation pour l'irrigation de notre culture de tomate. Ceci nous permettra de comparer avec l'eau conventionnelle et estimer les apports vers le sol et la plante.

III.2.1.1. Qualité physico-chimique

Les valeurs de qualité des eaux usées traitées (EUT) et des eaux conventionnelles (EC) appliquées à l'irrigation de la tomate « *Solanum lycopersicum* » de variété **Ercole** ont été comparées aux normes de réutilisation des eaux usées traitées (NA17683-2014) et aux normes de qualité destinées à l'eau potable (JORA N°34-2011), respectivement. Les paramètres physicochimiques, toxicologiques tels que les métaux lourds et la qualité bactériologique des EUT ont été évalués afin d'estimer la possibilité de leur utilisation à des fins agricoles (tableau 22).

Les valeurs du pH des EUT et EC sont respectivement de $7,8 \pm 0,1$ et $7,14 \pm 0,1$. Ces eaux d'irrigation sont dans une gamme de pH favorable pour l'irrigation entre 6.5 et 8.5 (Ayes 1988). La valeur de la conductivité électrique des EUT ($1667 \mu\text{S}/\text{cm}$) est plus élevée que celle des EC ($1512 \mu\text{S}/\text{cm}$) ; ces valeurs indiquent une salinité moyenne qui est inférieure à la limite autorisée pour l'irrigation 3000 et $2800 \mu\text{S}/\text{cm}$ respectivement. La teneur moyenne en ammonium (NH_4^+) dans les EUT était de $24,71 \text{ mg}/\text{L}$ contre une valeur très faible ($<0,03 \text{ mg}/\text{L}$) présente dans les EC. Le phosphore total (PT) était de $4,47 \text{ mg}/\text{L}$ dans les EUT, plus élevé que la concentration mesurée dans les EC $<0,4 \text{ mg}/\text{L}$. La concentration du PT dans les EUT ne dépasse pas la limite de $13 \text{ mg}/\text{L}$ recommandée par Müller et Cornel sur la base des besoins de la plupart des cultures. Les ETM analysés dans l'EUT notamment Cd, Cu, Zn, Pb, Cr, As, Ni, Mn, Fe, Se, Mo, B, Hg et Al présentent des valeurs inférieures aux limites recommandées par la norme Algérienne de réutilisation pour l'irrigation.

Chapitre III : Résultats et discussion

Tableau 22 : Paramètres physico-chimiques de l'eau d'irrigation

Paramètres	Unités	EC			EUT		
		Moyenne	Ecart type	Standard JORA 2011	Moyenne	Ecart type	Standard NA 17683 2014
pH		7.14	0.1	6.5-9	7.8	0.1	6.5-8.5
CE	μS/cm	1512	0.1	2800	1667	49.53	3000
MES	mg/L	-	-	-	45.27	5.22	30
DOC	mg/L	-	-	-	74.14	3.85	90
DOB5	mg/L	-	-	-	12.8	7.48	30
NT	mg/L	<0.03	-	1	43.17	2.98	-
NH ₄ ⁺	mg/L	<0.03	0	0.5	24.71	9.14	-
NO ₃ ⁻	mg/L	-	-	0.2	5.79	3.11	-
PT	mg/L	<0.4	0	-	4.47	0.28	-
Ca ²⁺	mg/L	161.47	6.33	200	103.67	4.73	-
Mg ²⁺	mg/L	35.51	2.27	50	27	2	-
Na ⁺	mg/L	98	1	-	105.67	5.51	1000
K ⁺	mg/L	1.4	0.1	-	16.67	1.53	-
HCO ₃ ⁻	mg/L	307.5	10.6	-	346.67	48.06	518.5
CO ₃ ²⁻	mg/L	0	0	-	0	0	-
SAR	meq/L	2.57	0.01	-	3.61	0.21	-
SSP	meq/L	27.91	0.12	-	38.64	1.67	-
RSC	meq/L	-7.18	2.3	-	-1.65	0.95	-
Cd	mg/L	<0.002	0	0.005	<0.002	0	0.01
Cu	mg/L	<0.002	0	0.05	<0.002	0	0.2
Zn	mg/L	<0.002	0	5	0.013	0	2
Pb	mg/L	<0.002	0	0.01	<0.002	0	5
Cr	mg/L	<0.002	0	-	<0.002	0	0.1
As	mg/L	<0.002	0	-	<0.002	0	0.1
Ni	mg/L	<0.002	0	-	<0.002	0	0.2
Mn	mg/L	<0.002	0	-	0.0288	0.04	0.2
Fe	mg/L	<0.002	0	-	0.327	0.33	5
Se	mg/L	<0.01	0	-	<0.01	0	0.02
Sb	mg/L	<0.002	0	-	<0.002	0	-
Ag	mg/L	<0.002	0	-	<0.002	0	-
Ba	mg/L	0.028	0.01	-	0.083	0.05	-
Mo	mg/L	<0.002	0	-	<0.002	0	0.01
B	mg/L	0.066	0.01	-	0.149	0.04	2
Hg	mg/L	<0.002	0	-	<0.002	0	0.001
Co	mg/L	<0.002	0	-	<0.002	0	0.05
Al	mg/L	<0.002	0	-	<0.002	0	5

Chapitre III : Résultats et discussion

III.2.1.2. Qualité bactériologique

L'examen microbien des eaux usées traitées de la STEP de Baraki (Tableau 23) a révélé une concentration élevée de coliformes totaux supérieure aux limites autorisées par la norme Algérienne qui recommandent que les eaux usées destinées à l'irrigation des cultures industrielles contiennent moins de 1000 coliformes fécaux (CFU) par 100 mL (Norme Algérienne 17683, 2014). La concentration moyenne d'*E. coli* était beaucoup plus élevée que la valeur recommandée par l'OMS pour la réutilisation des eaux usées dans l'irrigation des cultures de racines et de feuilles (10^3 et 10^4 *E. coli* par 100 mL pour les cultures de racines et de feuilles, respectivement), ce qui indique que l'irrigation par les eaux usées pourrait augmenter le risque d'infections par des agents pathogènes entériques chez les consommateurs de ces cultures (OMS, 2012c). Pour l'EC l'analyse a révélé la présence d'*E. coli* avec une concentration moyenne de $3.00E+00$ supérieure à la limite ; ce qui indique une contamination fécale et une nécessité de désinfection de la bache d'eau utilisé pour l'irrigation. La teneur en entérocoques fécaux dans les EUT est en moyenne de $1.00E+04$ ce qui reflète une charge de pollution fécale élevée tandis que l'analyse des EC indique une absence totale. Les résultats obtenus pour l'analyse des pathogènes montrent l'absence totale des *Salmonella spp.* et *staphylococcus spp.* pour tous les échantillons analysés de EC et EUT durant la période d'étude. Les ouvriers agricoles doivent maîtriser la gestion de l'irrigation localisée et respecter les règles d'hygiène exigées dont l'arrêt de l'irrigation deux semaines avant la cueillette et aucun fruit tombé ne doit être ramassé sur le sol (Norme Algérienne 17683, 2014).

L'analyse parasitologique sur les EUT de la STEP de Baraki par la méthode de **Bailenger** a révélé une absence des œufs d'helminthes et des nématodes ce qui rend ces eaux autorisées pour l'irrigation des cultures. Le type d'irrigation choisit soit le goutte à goutte permet de réduire le risque de contamination bactérienne. La culture de tomate industrielle est destinée à la transformation en tomate conserve et doit subir des traitements de stérilisation ce qui permet d'obtenir une qualité hygiénique des produits et protéger la santé du consommateur.

Chapitre III : Résultats et discussion

Tableau 23 : Paramètres microbiologiques de l'eau d'irrigation.

Paramètres	EC (CFU/100 mL)	Standard JORA (2011)	EUT (CFU/100 mL)	Standard NA 17683 (2014)
Coliformes totaux	7.90E+01	/	1.67E+06	/
<i>E. coli</i>	3.00E+00	20	3.19E+05	≥1000
Enterocoques fécaux	>20	20	1.00E+04	/
<i>Salmonella spp.</i>	Abs	Abs	Abs	/
<i>Staphylococcus spp.</i>	Abs	Abs	Abs	/
Oeuf helminths	/	Abs	Abs	>0.1

III.2.2. Caractérisation physico-chimique du sol

Les résultats de l'analyse physico-chimique et des ETM du sol avant et après irrigation à l'eau conventionnel (EC) et les eaux usées traitées (EUT) sont représentés dans le tableau 24 et 25 respectivement.

Tableau 24 : Les analyses physico-chimiques du sol avant et après irrigation avec EC et EUT.

Paramètres	Avant irrigation	Après irrigation	
		EC	EUT
pH	7.35	7.35	7.39
Conductivité électrique (ds/m)	0.785	0.756	0.854
Calcaire total (CaCO ₃) (%)	0	1.121	1.023
Complexe adsorbant (meq/100 g)			
Na+	5.88	4.25	3.54
K+	0.56	0.58	0.59
Ca++	10.52	10.44	9.85
Mg++	5.89	6.13	5.68
Capacité d'échange cationique (meq/100 g)	25.63	24.88	26.35
Matière organique (%)	2.13	1.32	3.21
Azote total (%)	0.023	0.003	0.023
Phosphore Assimilable (ppm)	11.32	0.006	0.008
Potassium Assimilable (meq/100 g)	0.65	0.002	0.004
Granulométrie (%)			
Argile	41.23	-	-
Limon fin	20.32	-	-
Limon grossier	15.89	-	-
Sable fin	14.68	-	-
Sable grossier	7.88	-	-

Chapitre III : Résultats et discussion

Tableau 25 : Dosage des ETM (mg/kg) dans les sols avant et après irrigation avec EC et EUT.

	Avant irrigation	Irrigation EC	Irrigation EUT	LMP
Pb	41.5	30.27	31.94	200
Cd	0	0	0	3
Ni	27.1	16.94	17.71	75
Cr	2.13	1.1	1.08	150
Mn	100.7	48.7	41.86	-
Cu	8.16	7.61	7.57	140

On observe que le pH du sol n'a pas été affecté par l'irrigation avec les EUT alors que les valeurs de la conductivité électrique, la CEC et la MO sont plus élevées dans le sol irrigué avec les EUT par rapport à celui irrigué par l'EC. Les complexes adsorbants Ca^{2+} et Na^{2+} ont dilués dans les deux sols irrigués avec EC et EUT par contre le K^+ a augmenté après irrigation avec les deux types d'eaux. Concernant le Mg^{2+} , on observe que sa concentration est plus ou moins stable dans les deux types d'irrigation. Le taux d'azote a été dilué avec l'irrigation au EC et reste constant avec l'irrigation aux EUT ce qui peut être expliqué par l'utilisation de la plante de l'azote ramené par l'eau. Concernant le phosphore et le potassium assimilable, il ressort une diminution des concentrations pour les deux traitements. Les résultats de AlHamaiedeh & Bino (2010) ont montré que la salinité, le taux d'adsorption du sodium (SAR) et le contenu organique du sol augmentaient en fonction du temps et que le lessivage du sol avec de l'eau douce était donc fortement recommandé pour réduire l'accumulation des sels et des matières organiques.

L'analyse des ETM dans le sol avant et après irrigation avec EC et EUT sont représentés dans le tableau 25. On observe d'après les résultats que les teneurs des ETM ont diminué dans le sol après irrigation avec EC et EUT et leurs teneurs sont inférieures aux limites permises fixées par la FAO/OMS. Les teneurs en Pb et Ni sont supérieures au niveau du sol irrigué avec EUT par contre le Mn et Cu sont supérieurs au niveau du sol irrigué par EC. La même teneur est observée pour le Cr dans les deux sols. On note que le sol n'est pas affecté par l'irrigation aux EUT suite à l'absence de ces éléments.

III.2.3. Evaluation des conditions climatiques sous serre

Les données climatiques sous serre ont été quotidiennement enregistrées durant la culture de tomate. Ces mesures ont été réalisées dans le but de caractériser les conditions climatiques

Chapitre III : Résultats et discussion

pendant la période expérimentale afin d’approvisionner les besoins en eau de la culture et de planifier le calendrier des irrigations.

III.2.3.1. Température de l’air

La température à l’intérieur de la serre est mesurée par un thermomètre ; la figure traduit l’évolution des températures maximale ; minimale sous serre au cours de l’essai.

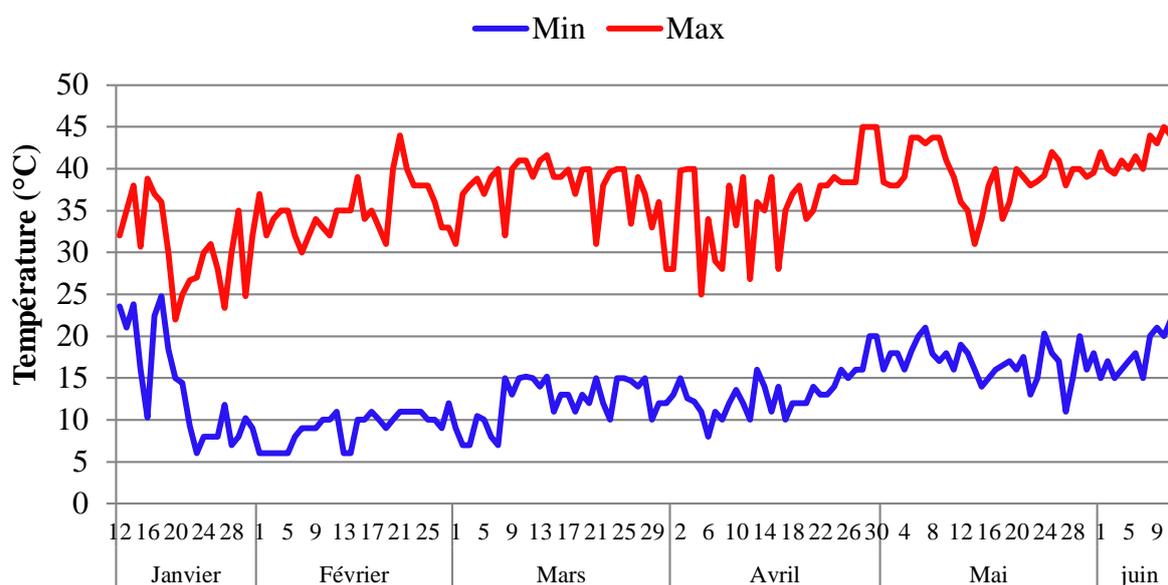


Figure 37 : Evolution de la température de l’air durant la période d’essai

Les conditions climatiques sous serre ont été caractérisés par des basses températures nocturnes dont les minimales enregistrées entre 6 – 9 °C durant le mois de janvier et février. Les températures maximales varient de 29.4°C pour le mois de janvier à 40°C pour le mois de juin, qui correspondent respectivement au mois le plus froid et le plus chaud de la campagne.

III.2.3.2. Humidité de l’air

La mesure de l’humidité de l’air à l’intérieur de la serre est effectuée à l’aide d’un hygromètre quotidiennement. Les mesures ont débuté le mois de janvier et ont continué durant toute la période de l’essai. Les mesures sont représentées dans la figure 38 ci-dessous :

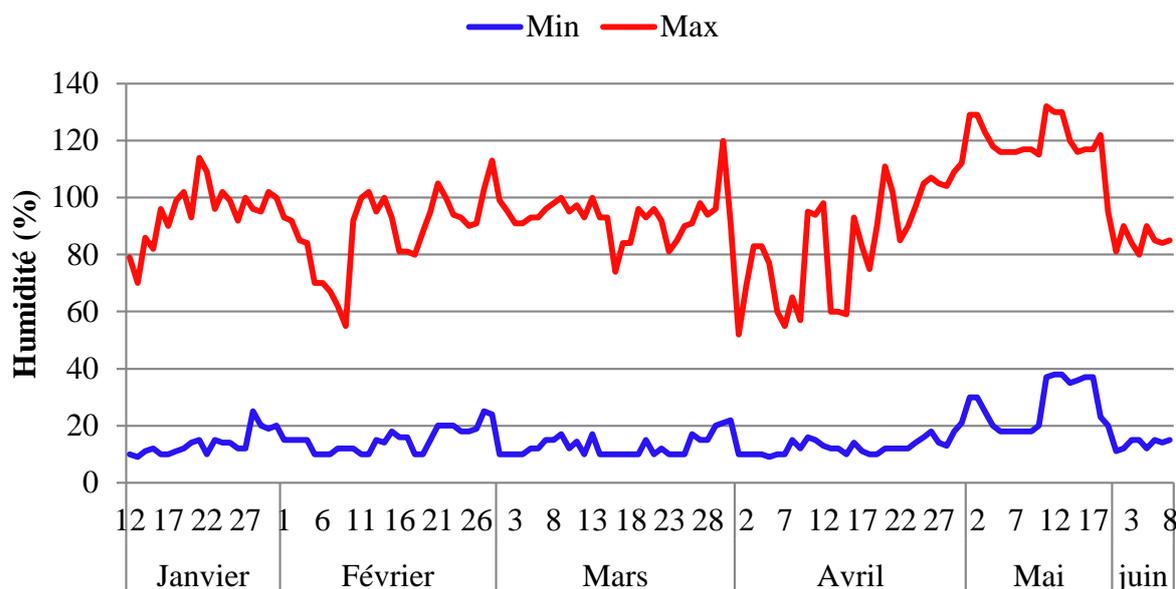


Figure 38 : Evolution de l'hygrométrie relative durant la période d'essai.

On observe que l'humidité relative de l'air à l'intérieure de la serre est varié maximale au mois de janvier jusqu'à une valeur minimale le mois de Juin.

III.2.4. Evaluation des paramètres agronomiques de la plante

III.2.4.1. Evaluation des paramètres croissance de la plante

Le tableau 26 représentent l'évolution de la hauteur et le diamètre des plantes de tomate irrigués avec l'EC et ceux irrigués avec l'EUT.

III.2.4.1.1. Suivi de l'évolution de la hauteur des plantes de tomate

La figure 37 en forme de plateau représente l'évolution de la hauteur des plantes de tomate irrigués par l'EUT et ceux irrigués par l'EC durant le cycle végétatif. On observe une évolution croissante superposée des hauteurs des plantes pour les deux traitements EC et EUT et la plus grande hauteur finale de la tige 62.69 ± 6.74 cm est enregistré pour le traitement EUT contre $61,68 \pm 9,47$ pour le traitement EC. L'analyse de la variance montre que les mesures sont significatives à T2 et très hautement significatives à T3 où il y'a un dépassement de la hauteur en EC par rapport à EUT alors que les autres mesures jusqu'à la fin de l'essai ne présentent aucune différence significative. Nous concluons que la hauteur de la tige de la plante de tomate n'est pas influencée par la qualité de l'eau utilisée et il n'y a aucun effet toxique des EUT sur la plante. Nos résultats concordent avec ceux obtenue par Djillali et al. (2020) qui ont menés une culture de fraise irrigué avec des eaux conventionnelle et des eaux usées traitée ; ils ont conclu qu'il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les moyennes des hauteurs des plantes de fraise en fonction de la qualité des eaux utilisées pour

Chapitre III : Résultats et discussion

l'irrigation. Paliwal et al., (1998) expliquent que l'irrigation avec les eaux usées traitées permet une augmentation de la croissance des plantes qui peut être attribuée à l'absence d'effets toxiques dans les eaux tel que les ETM et la présence des matières organiques et élément nutritif tel que les minéraux et l'azote assurent une meilleure évolution. Cirelli et al., (2012a) ont observés que les cultures de tomates irriguées avec des EUT produisaient des plantes plus hautes que celles cultivées avec de l'eau douce pendant les deux saisons de culture.

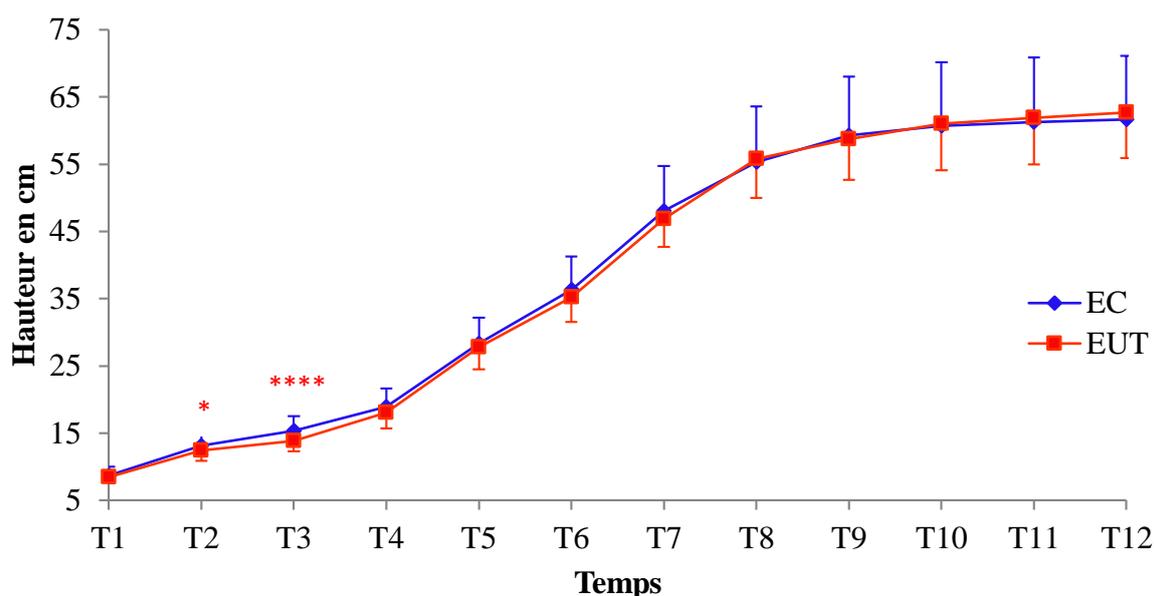


Figure 39 : Evolution de la hauteur moyenne des plantes de tomate en fonction de la qualité de l'eau d'irrigation

III.2.4.1.2. Suivi de l'évolution du diamètre de tige des plantes de tomate

La figure 39 sous forme de droite, représente l'évolution du diamètre de la tige des plantes de tomate irriguées par l'EUT et le EC durant le cycle végétatif. On observe une évolution croissante du diamètre de la tige des plantes de tomate pour les deux traitements EUT et EC et les deux courbes se superposent tout le long de l'essai ; nous constatons que le traitement EUT révèle le plus grand diamètre final de la tige à 7.18 ± 0.76 mm contre 7.11 ± 0.68 mm pour EC mais cette différence est négligeable. L'analyse de la variance montre qu'en T3 et T4 la différence est significative alors qu'en T6 et T7 on observe une différence très hautement significative et hautement significative respectivement. Les autres mesures ne présentent aucune différence significative et l'évolution est similaire pour les deux traitements. Ben Said et al., (2017) ont montré que le diamètre de *M. ciliaris* irrigué avec EUT était plus grand que le

Chapitre III : Résultats et discussion

diamètre de ceux irrigués avec EC durant les deux cycles de croissance. Beldjilali & Ababou, (2020) conclue que l'irrigation de la tomate de variété *Agora* avec les eaux usées traitées semblent avoir un effet très positif sur les paramètres de croissance. Le diamètre et la hauteur de la plante, le nombre de feuilles et la surface foliaire, le nombre de fruits et le rendement de la tomate irrigués avec des EUT présentent une meilleure croissance par rapport aux mêmes paramètres lors de l'irrigation à l'eau de puits.

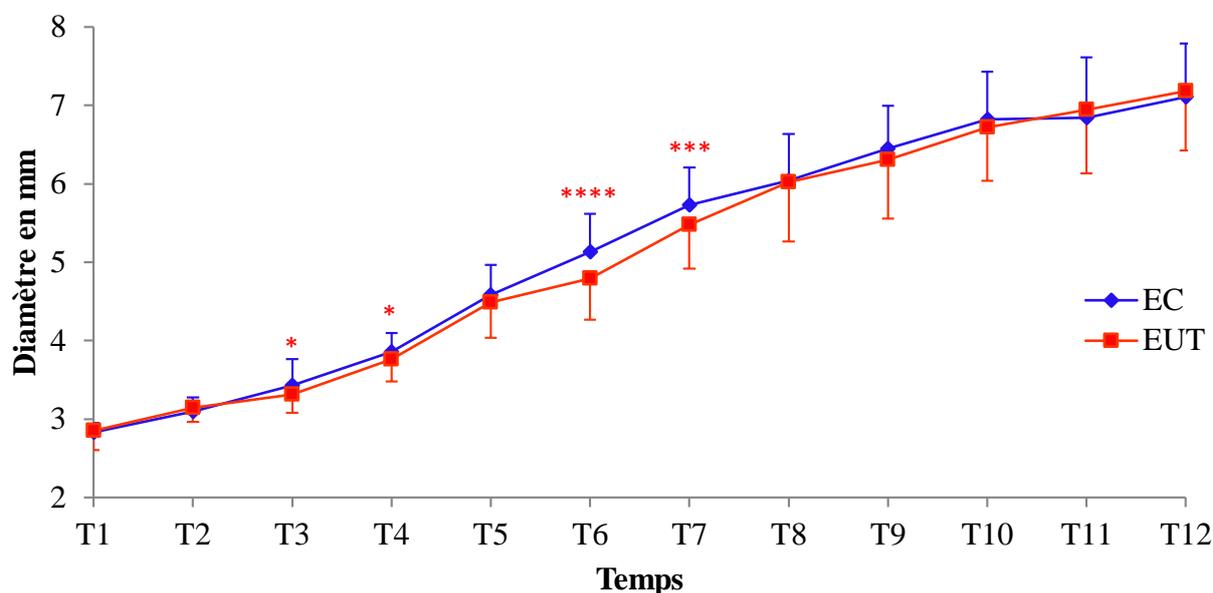


Figure 40 : Evolution du diamètre moyen de la tige des plantes de tomate en fonction de la qualité de l'eau d'irrigation.

Tableau 26 : L'évolution de la hauteur, le diamètre des plantes de tomate irrigués avec l'EC et ceux irrigués avec l'EUT.

Temps	Hauteur des tiges			Diamètre des tiges		
	EC	EUT	P	EC	EUT	P
T1	08,73±1,25	08,48±0,92	NS	2,83±0,12	2,85±0,24	NS
T2	13,09±1,92	12,41±1,52	0.0235	3,10±0,18	3,14±0,18	NS
T3	15,36±2,18	13,87±1,59	< 0.0001	3,43±0,33	3,31±0,23	0.0219
T4	18,87±2,75	18,00±2,29	NS	3,86±0,24	3,76±0,28	0.0294
T5	28,30±3,86	27,81±3,33	NS	4,58±0,38	4,48±0,45	NS
T6	36,35±4,91	35,21±3,68	NS	5,13±0,48	4,79±0,52	< 0.0001
T7	48,01±6,71	46,82±4,15	NS	5,73±0,48	5,48±0,56	0.0044
T8	55,35±8,21	55,76±5,77	NS	6,04±0,59	6,02±0,76	NS
T9	59,31±8,75	58,72±6,02	NS	6,45±0,55	6,30±0,74	NS
T10	60,72±9,44	61,06±6,98	NS	6,83±0,60	6,72±0,68	NS
T11	61,25±9,61	61,87±6,89	NS	6,84±0,77	6,94±0,81	NS
T12	61,68±9,47	62,69±6,75	NS	7,11±0,68	7,18±0,76	NS

Chapitre III : Résultats et discussion

III.2.4.1.3. Evolution du nombre de feuilles des plantes de tomate

La figure 40 sous forme de droite représente l'évolution du nombre de feuilles durant le cycle végétatif des deux traitements irrigués avec EC et EUT.

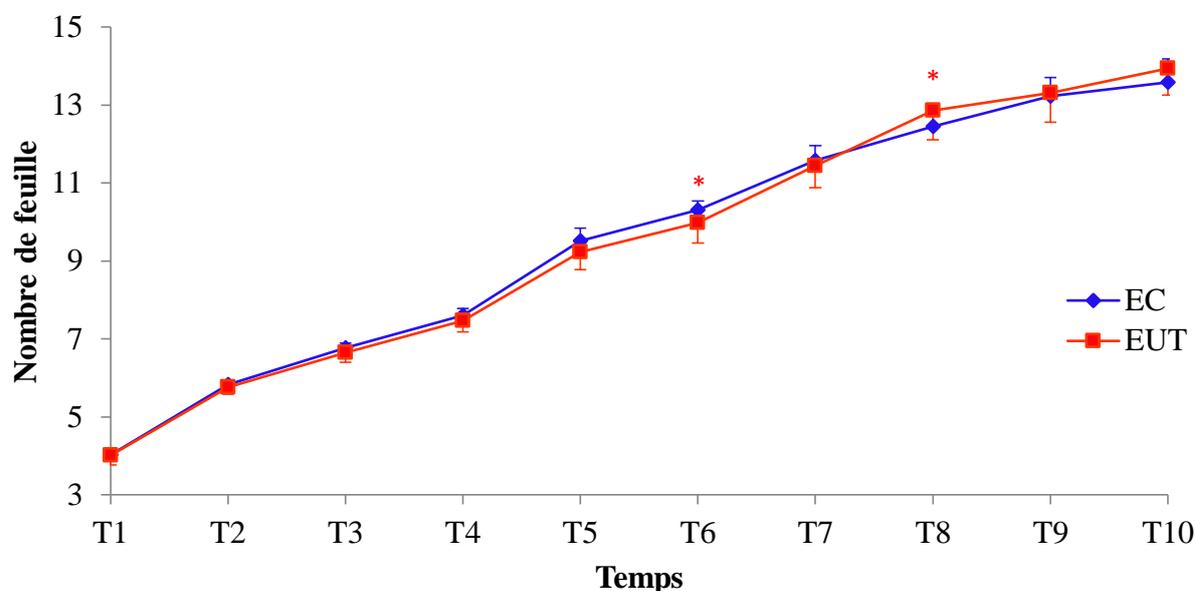


Figure 41 : Evolution du nombre moyen des feuilles en fonction de la qualité de l'eau.

On observe une évolution croissante du nombre de feuilles des plantes irriguées par les eaux usées traitées et par les eaux conventionnelles au cours de tout le cycle végétatif. L'analyse de la variance montre une différence significative en T6 où le nombre de feuilles des plantes irriguées par EC dépasse celui irriguées par EUT. Une autre différence significative est observée en T8 en faveur des plantes irriguées par EUT. En fin de cycle, le nombre de feuilles pour les deux traitements est similaire et aucune différence significative n'est observée. Elfanssi et al., (2018) ont constaté que la meilleure croissance de la surface foliaire moyenne de la luzerne a été observée avec l'irrigation par les eaux usées brutes, suivie par l'irrigation par l'eau usée traitée, et qu'une faible croissance a été observée avec l'eau de puits au cours des trois saisons de culture. Des travaux sur la surface foliaire des plantes de tomate montrent que les plants irrigués avec 100% d'EUT ont enregistré les plus larges couvertures foliaires et les différences hautement significatives ont été observées durant les stades floraison et fructification (Beldjilali, 2021).

Chapitre III : Résultats et discussion

Tableau 27 : Evolution du nombre des feuilles des plantes de tomate irrigués avec EC et ceux irrigués avec EUT.

Temps	Nombre des feuilles		
	EC	EUT	P
T1	04,03±0,24	04,01±0,12	NS
T2	05,84±0,54	05,76±0,52	NS
T3	06,78±0,48	06,65±0,51	NS
T4	07,60±0,78	07,47±0,66	NS
T5	09,51±0,89	09,24±0,79	NS
T6	10,31±0,93	09,99±0,72	0.0225
T7	11,57±1,16	11,44±0,82	NS
T8	12,46±1,27	12,87±1,09	0.0450
T9	13,24±1,29	13,31±1,08	NS
T10	13,59±1,40	13,94±1,12	NS

III.2.4.1.4. Distance entre le sol et le premier bouquet floral

Ce paramètre est mesuré pour apprécier l'impact de la qualité de l'eau sur la précocité des plantes de tomate. Nous constatons d'après la figure 4 que la plus faible distance entre le sol et le premier bouquet floral est de 23.4 ± 3.621 cm enregistré pour les plantes irrigués par l'EUT alors que les plantes irriguées avec EC enregistrent une hauteur de 23.65 ± 3.65 . La hauteur du premier bouquet floral du sol la plus importante permet de protéger les fruits de la contamination et de la pourriture. L'analyse de la variance montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux traitements EC et EUT. Cela explique que l'effet de la qualité de l'eau sur ce paramètre de croissance est similaire pour les deux traitements. Chauv et Foury (1994) estime que l'élongation de la tige est étroitement liée aux températures nocturnes, plus les températures sont élevées plus la première inflorescence est situé haut sur la tige. Une hauteur basse du premier bouquet est l'un des indices de précocité.

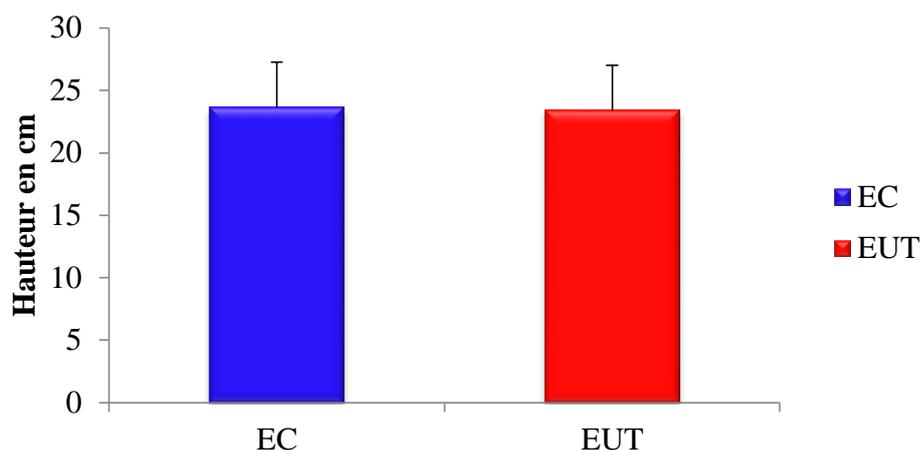


Figure 42 : Hauteur moyenne du premier bouquet floral du sol.

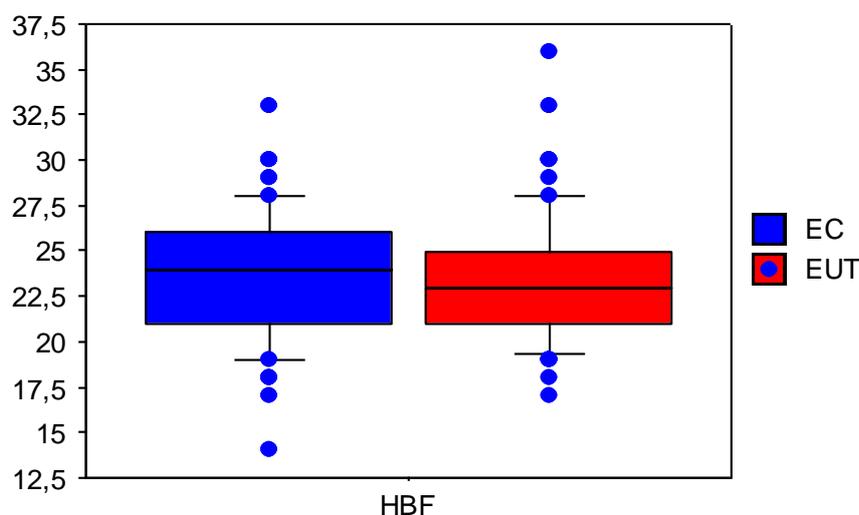


Figure 43 : Graphe en boîte représentant la hauteur moyenne du premier bouquet floral au sol.

III.2.4.1.5. Evaluation de la teneur en chlorophylle

La figure 43 représente l'évolution de la teneur en chlorophylle durant le cycle végétatif pour les deux traitements EC et EUT. La teneur moyenne en chlorophylle observé pour les plantes irriguée avec EUT en T1 est supérieur à ceux irriguées par EC tandis que pour T2 on observe le contraire c'est-à-dire que la moyenne en chlorophylle observé pour les plantes irriguées par EC est supérieure à EUT. L'analyse de la variance n'indique aucune différence significative entre les deux traitements et la qualité de l'eau d'irrigation n'a aucun effet sur ce paramètre. Les travaux de Elfanssi et al., (2018) ont montré que la luzerne irriguée par les eaux usées traitées présentait une teneur en chlorophylle similaire à celle irriguée par l'eau douce. Les mêmes observations sont présentées dans les résultats de Djillali et al., (2020) qui n'ont trouvé aucune différence significative entre les teneurs moyennes en chlorophylle des plantes

Chapitre III : Résultats et discussion

de fraise irriguées par l'eau conventionnelle et ceux irriguées par l'eau usée traitée et la qualité de l'eau n'a aucun effet.

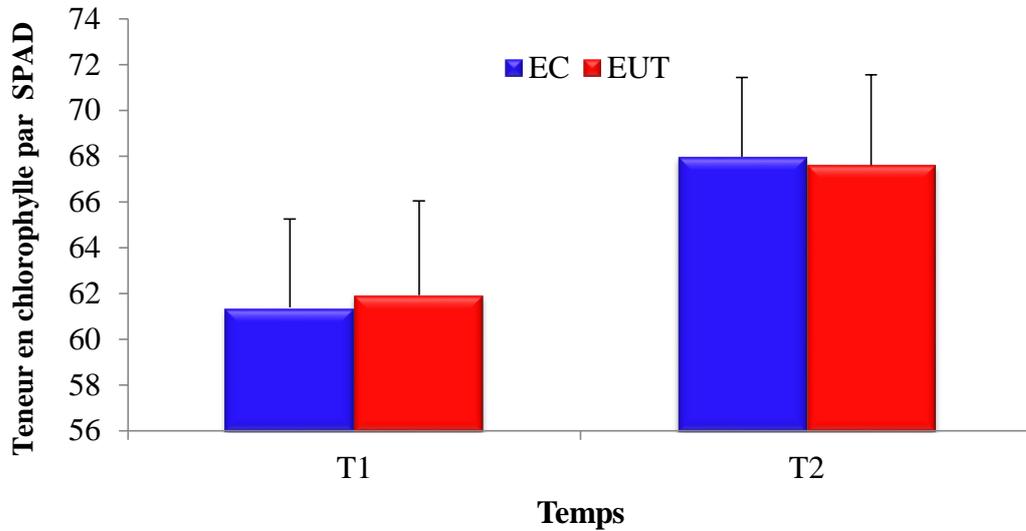


Figure 44: Evolution de la teneur en chlorophylle en fonction de la qualité de l'eau d'irrigation.

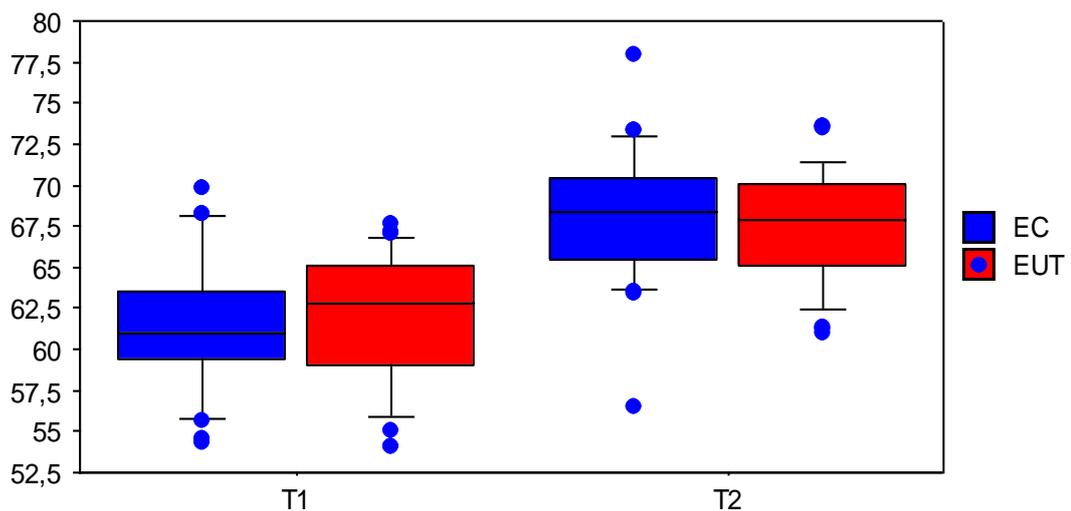


Figure 45 : Graphe en boîte représentant l'évolution de la teneur en chlorophylle en fonction de la qualité de l'eau d'irrigation.

Chapitre III : Résultats et discussion

III.2.4.2. Evaluation des paramètres de développement

Pour bien constater la différence entre les deux traitements nous avons estimé la pleine floraison et la pleine nouaison. La floraison et la nouaison sont deux paramètres qui sont influencés par les facteurs climatiques : température, humidité et intensité lumineuse (Jacob et Jansen 1979).

III.2.4.2.1. Floraison

Le comptage du nombre de fleurs par plante a été effectué au fur et à mesure de l'apparition des bouquets floraux jusqu'au troisième bouquet floral. D'après les résultats nous constatons que le traitement irrigué avec EC est le plus précoce où la floraison a débuté 71 jours après le semis et a atteint la pleine floraison 8 jours plus tard. Alors que pour le traitement irrigué avec EUT, on a observé le début de floraison après 74 jours du semis et atteint la pleine floraison 8 jours plus tard ; une différence de trois jours.

III.2.4.2.2. Nouaison

La pleine nouaison est observée pour le traitement EUT après 10 jours de la pleine floraison alors que le traitement EC enregistre sa pleine nouaison après 12 jours. D'après la figure 46 on observe que les plans soumis aux deux traitements ont atteint la pleine nouaison en même temps après le semis et il n'y pas de différence entre les deux traitements. On conclue d'après les résultats obtenus que la qualité de l'eau n'a pas d'effet sur les paramètres de développement des plants de tomate.

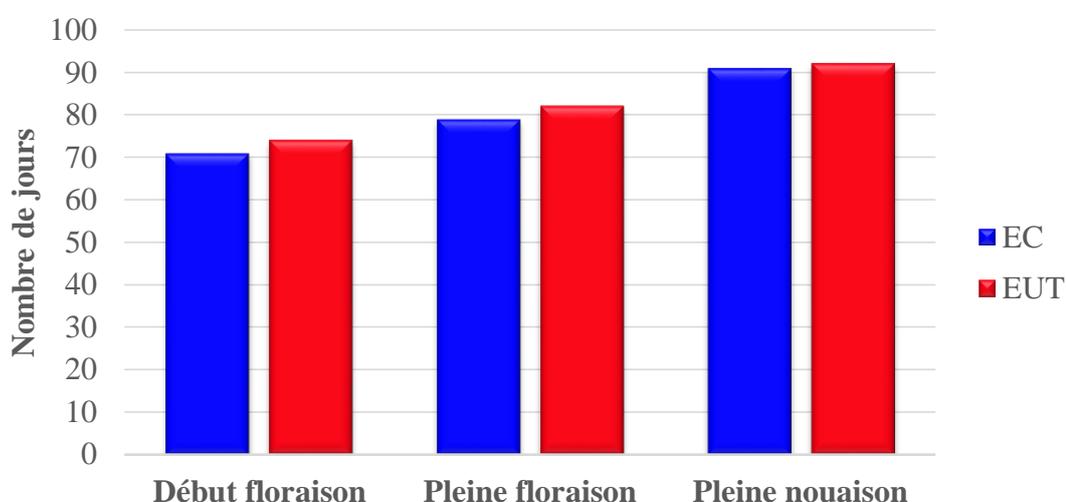


Figure 46 : Evolution de la Floraison-Nouaison des plantes en fonction de la qualité de l'eau d'irrigation

Chapitre III : Résultats et discussion

III.2.4.3. Evaluation des paramètres de production

III.2.4.3.1. Le nombre et le poids total des fruits de tomate par traitement

La première cueillette de fruits a été effectuée le 24 avril 2023 pour les deux traitements et la dernière le 13 Juin 2023. Les résultats obtenus durant cette expérimentation sont représentés dans le tableau 28.

Tableau 28 : Comparaison entre les plantes de tomate irrigués par EC et EUT.

	EC	EUT	P
Nombre total de fruit par traitement	1607	1730	
Poids des fruits (g)			
Poids total en g par traitement	8124,41	9141,84	
Poids moyens des fruits (M±DS)	5,06±4,34	5,28±3,81	NS
Poids minimal	0,91	1,3	
Poids maximal	44,38	48,1	
Largeur (cm)			
Largeur moyenne des fruits	1,65±0,33	1,69±0,29	0.0014
Largeur minimal	1	1,1	
Largeur maximal	3,8	3,5	
Longueur (cm)			
Longueur moyenne des fruits	2,59±0,63	2,67±0,61	0.0003
Longueur minimal	1,4	1,3	
Longueur maximal	7	9,9	

On observe que le nombre total des fruits obtenus pour le traitement EUT est de 1730 qui est supérieur au nombre total obtenu pour le traitement EC qui est de 1607 fruits, soit une différence de 123 fruits. De même, le nombre moyen de fruits par plant irrigué par EUT est supérieur à celui irrigué par EC soit une différence de 2 fruits par plant. Le poids total des fruits de tomate obtenus pour le traitement EUT qui est de 9141,84 g est supérieure à celui obtenus pour le traitement EC qui est de 8124,41 g soit une différence de 1017,43 g. Ainsi la production moyenne par plant est plus importante pour le traitement EUT avec 134,43 g contre 119,47g soit un écart de 14,96 g/plants. Cela peut s'expliquer par l'apport continu d'azote ammoniacal et nitrique et d'autres éléments nutritifs dans les eaux usées qui sont immédiatement disponibles pour les plantes. Les résultats de Djillali et al. (2020) sur les fraises sont opposés aux nôtres où le nombre des fruits obtenus par irrigation avec des eaux conventionnelles était plus élevé par rapport au nombre obtenu par irrigation avec des eaux usées traitées, avec une différence de 123 fruits et une différence moyenne de 3 fruits/plante.

Chapitre III : Résultats et discussion

III.2.4.3.2. Poids et calibre moyen des fruits de tomate (largeur et longueur)

Le calibre est fortement influencé par le milieu, il dépend de la température, humidité et nutrition (Guichard et al., 2005). Une humidité de 75% est jugée optimale pour obtenir des fruits de bon calibre et sans défaut de coloration. Le calibre dépend aussi de l'alimentation en eau et d'éléments fertilisants ainsi que les attaques parasitaires (Wacquant et al., 1974). La figure 47 représente les différences observées du poids, largeur et longueur du fruit des deux traitements.

Le poids moyen des fruits en (g) ainsi que les paramètres morphologiques (largeur et longueur) des tomates récoltées pour les deux traitements au cours de la saison expérimentale montrait une différence selon la qualité de l'eau. On observe que le poids moyenne des fruits obtenus avec le traitement EUT (5.28 ± 3.81) est supérieures à celui obtenus par le traitement EC (5.06 ± 4.34) mais la différence n'est pas significative. Par contre la largeur et la longueur des fruits obtenus par EUT (1.69 ± 0.29 et 2.67 ± 0.61 respectivement) présente une différence hautement significative et très hautement significative par rapport à ceux obtenus par EC (1.65 ± 0.33 et 2.59 ± 0.63 respectivement). Cela montre que la qualité de l'eau d'irrigation a affecté les paramètres morphologiques.

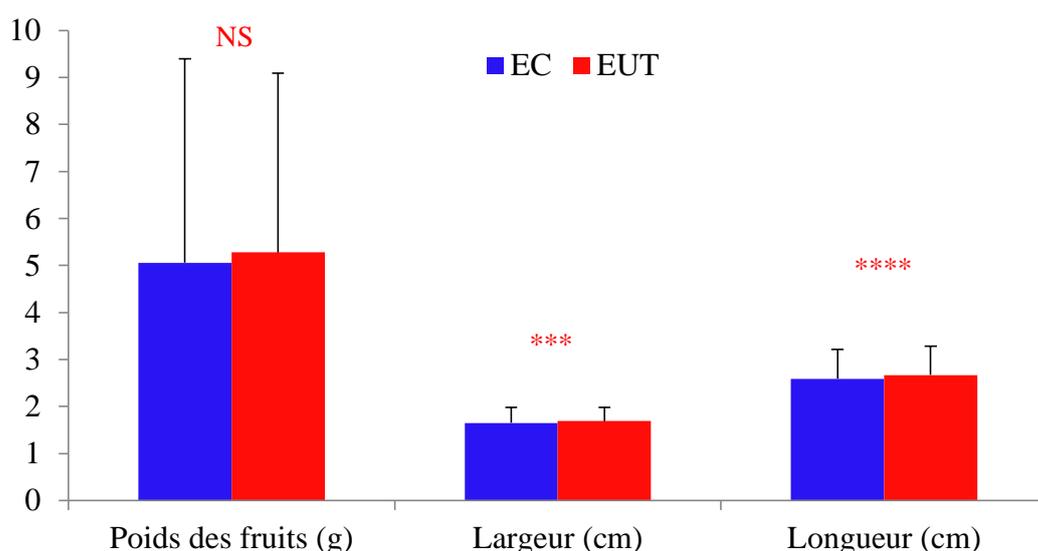


Figure 47 : Comparaison entre le poids, largeur et longueur du fruit par traitement.

Chapitre III : Résultats et discussion

Cirelli et al., (2012b) ont montré que l'eau usée traitée utilisée pour l'irrigation des tomates a permis d'augmenter les rendements de 20 % par rapport aux rendements des tomates utilisant de l'eau conventionnelle. De même les eaux usées avec traitement secondaire et tertiaire utilisées pour l'irrigation des artichauts suite à l'expérimentation menée par Gatta et al., (2016) ont eu un effet significatif sur le nombre total de têtes commercialisables, en termes de nombre et de poids par hectare, avec un rendement plus élevé que celui obtenu avec l'eau douce.

III.2.4.3.3. Comparaison entre le poids, largeur et longueur des fruits par bouquet floral

L'analyse plus approfondie par bouquet floral de nos résultats nous a permis d'observer après l'analyse statistique par le test Khi 2 du nombre de fruits qu'il n'y a pas de différence significative entre les bouquets floraux. Tandis que l'analyse effectuée par le test t de Student montre que le poids de fruit est uniquement significatif en BF2 et hautement significatif en BF3. La largeur du fruit présente une différence significative en BF2 et très hautement significatif en BF3 alors que la longueur du fruit présente une différence hautement significatif en BF2 et très hautement significatif en BF3 ; tous les résultats sont présentés en détail dans le tableau 29.

Tableau 29 : Représentation des caractéristiques des fruits par bouquets floraux.

	Total	BF 1	BF 2	BF 3	BF 4	BF 5	BF 6
Nombre de fruits							
EC	1607 (100 %)	402 (25,02 %)	370 (23,02 %)	371 (23,09 %)	278 (17,30 %)	172 (10,70 %)	14 (0,87 %)
EUT	1730 (100 %)	398 (23,01 %)	353 (20,40 %)	411 (23,76 %)	337 (19,48 %)	213 (12,31 %)	18 (1,04 %)
P	NS						
Poids des fruits (g)							
EC	5,06±4,34	5,44±4,31	4,55±3,86	4,21±3,26	5,7±5,42	5,92±4,74	6,43±7,16
EUT	5,28±3,81	5,25±3,30	5,31±4,65	5,08±4,22	5,4±2,77	5,36±3,65	7,04±5,17
P	NS	NS	0.0173	0.0014	NS	NS	NS
Largeur des fruits (cm)							
EC	1,65±0,33	1,63±0,30	1,59±0,32	1,61±0,28	1,75±0,37	1,78±0,37	1,71±0,51
EUT	1,69±0,29	1,62±0,23	1,65±0,32	1,69±0,30	1,77±0,25	1,72±0,29	1,82±0,41
P	0.0014	NS	0.0101	< 0.0001	NS	NS	NS
Longueur des fruits (cm)							
EC	2,59±0,63	2,70±0,67	2,62±0,68	2,41±0,54	2,60±0,63	2,67±0,52	2,76±0,86
EUT	0,67±0,61	2,70±0,62	2,79±0,76	2,60±0,60	2,63±0,43	2,62±0,47	2,89±0,75
P	0.0003	NS	0.0014	< 0.0001	NS	NS	NS

Chapitre III : Résultats et discussion

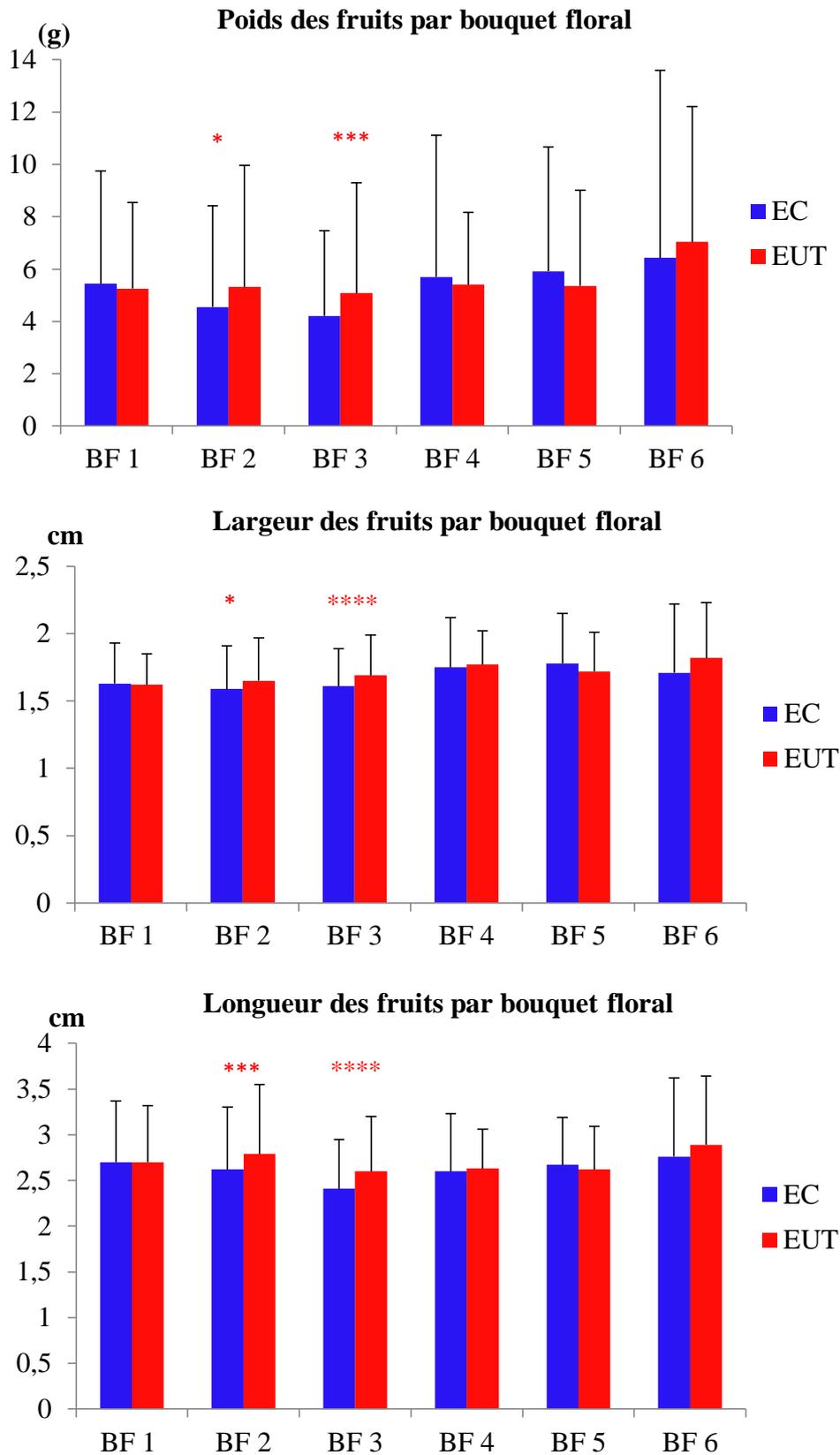


Figure 48 : Comparaison entre le poids, largeur et longueur des fruits par bouquet floral.

Chapitre III : Résultats et discussion

III.2.5. Evaluation des taux des ETM au niveau des plantes de tomate

III.2.5.1. Analyses des ETM dans les racines, tiges et feuilles de tomate

Le tableau 30 montre les résultats d'analyses des ETM (mg/kg) dans les racines, les tiges et les feuilles de tomates irriguées avec des EUT et des EC.

Tableau 30 : Dosage des ETM (mg/kg) dans les plantes de tomate irriguées avec des EC et EUT.

	Racine (mg/kg)		Tige (mg/kg)		Feuille (mg/kg)		LMP
	EC	EUT	EC	EUT	EC	EUT	
Pb	14	13.97	5.8	5.33	7.97	7.49	50
Cd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01-1
Ni	9.1	15.85	4.95	3.4	3.79	4.69	-
Cr	0.33	1.6	0.00	0.00	0.00	0.00	1-2
Mn	35.7	60.8	8.84	5.98	13.98	13.02	-
Cu	3.65	4.05	4.15	4.4	1.11	1.07	20

Les plantes de tomate irriguées avec de EC et EUT analysées dans cette étude sont contaminées par les ETM à savoir le Pd, Ni, Cr, Mn et le Cu. Au niveau de la racine la même teneur de Pb est observée pour les deux types de traitement alors que le Ni, Cr, Mn et Cu sont plus élevés dans les racines irriguées avec EUT. Tandis que les teneurs des ETM sont inférieures dans les tiges irriguées avec EUT sauf le Cu il est un peu plus élevé dans les tiges irriguées avec EC. Les teneurs en Pb, Mn et Cu sont plus élevées dans les feuilles irriguées avec EC sauf le Ni qui est légèrement supérieur dans les feuilles irriguées avec EUT. La concentration des ETM au niveau des racines, tiges et feuilles sont inférieure aux limites de sécurité des plantes. Les ETM tels que le Cd, Ni et Pb s'accumulent principalement dans les plantes sous des formes dangereuses et qui peuvent provoquer des maladies graves chez l'homme.

III.2.5.2. Analyses des ETM dans les fruits de tomate

La présence des ETM au niveau des aliments présente un risque majeur sur la santé humaine. A cet effet une analyse des ETM (mg/kg) dans les fruits de tomate irrigués avec des EUT et des EC a été effectuée, les résultats sont présentés dans le tableau 31.

Chapitre III : Résultats et discussion

Tableau 31 : Dosage des ETM (mg/kg) dans les fruits de tomate irrigués avec EC et EUT.

	Pb	Cd	Ni	Cr	Mn	Cu
EC	<0.1	<0.01	2.58	<0.06	0.8	0.87
EUT	<0.1	<0.01	2.16	<0.06	0.65	0.71
LMP	0.3	0.2	67.9	2.3	-	73.5

Codex Alimentarius Commission (FAO/WHO)

Les résultats mentionnés dans le tableau 31, montrent que les tomates irriguées avec des EC et avec des EUT sont contaminés par le Ni (2.58 et 2.16 mg/Kg respectivement) ; en sachant que les concentrations en cet élément dans les EUT et EC sont inférieures à 0.002 mg/L tandis que l'analyse du sol a révélé une concentration de 27 mg/Kg avant la culture de tomate et qui a connu une diminution après culture ce qui explique le transfert de cet élément dans le fruit à partir du sol. Malgré ces concentrations enregistrées en Ni elles sont de loin inférieures aux limites maximales admissibles fixées par la norme de la commission du Codex Alimentarius (FAO/OMS, 2001). Les concentrations en Cu dans les fruits irrigués avec EC et EUT sont très négligeables (0.87 et 0.71 mg/Kg respectivement) ainsi que les concentrations en Mn (0.8 et 0.65 mg/Kg respectivement) ; aucune différence importante n'est observée entre les deux traitements. Ces valeurs trouvées dans le fruit de tomate ne posent aucun problème de toxicité alimentaire selon les recommandations de FAO/OMS.

Sur une culture de tomate irrigué avec les eaux usées traitées mené par (Al-Lahham et al., 2007) ; des concentrations en ETM plus élevé ont été observés dans ces fruits par rapport au témoin irrigués avec l'eau douce. Une translocation partielle des ETM du sol vers les fruits a été observé en raison de la présence de ces éléments dans l'effluent traité ; toutefois leurs concentrations dans les fruits était inférieure aux limites standard.

III.2.5.3. Facteur de bioconcentration

La principale entrée des ETM dans les aliments est un transfert du sol vers les différentes parties du légume (Sharma et al, 2018). Nous avons calculé le transfert des ETM du sol vers le plant de tomate utilisé dans cette étude. Le facteur BCF pour les éléments Pb, Cd, Ni, Cr, Mn et Cu est inférieur à un (<1) ce qui indique qu'il n'y a pas d'accumulation dans les fruits de tomates depuis le sol.

III.2.6. Composition physico-chimique des fruits de tomate

Les résultats des analyses physico-chimiques des fruits de tomate sont présentés dans le tableau 32.

Chapitre III : Résultats et discussion

Tableau 32 :Composition physico-chimique des fruits de tomate.

	EC	EUT
pH	4.71±0.19	4.64±0.09
Acidité titrable	3.24±0.67	3.11±0.14
Sucres totaux (mg/100g)	13.63±0.59	14.53±1.86
Vitamine C (mg/100g)	52.43±0.52	58.67±3.32
MS %	18.99±1.62	18.68±1.16
MM %	8.30±0.26	6.99±0.09
MG %	1.54±0.21	1.53±0.39
MAT %	21.48±2.37	20.71±0.9

Les échantillons de tomates irrigués avec EC et EUT présentent un pH et une acidité titrable similaire et on n'observe pas de différence ; 4,71±0.19 / 4.64±0.09 respectivement pour le pH et 3.24±0.67 / 3.11±0.14 respectivement pour l'acidité titrable. Les mêmes résultats sont observés par (Libutti et al., 2018) qui n'ont pas trouvé de différence significative entre le pH et l'acidité titrable des tomates irriguées avec l'eau douce et l'eau usée traitée. Cependant les valeurs des sucres totaux et la vitamine C sont plutôt supérieures dans les tomates irriguées avec EUT (14,53±1,86 et 58,67±3,32, respectivement) par rapport à ceux irrigués avec EC (13,63±0,59 et 52,43±0,52, respectivement). Les matières sèches des fruits obtenus par les deux traitements sont similaires et la différence ne dépassant pas 0,31 %, ce qui indique que la qualité de l'eau d'irrigation n'a pas d'effet sur la biomasse. Nos résultats concordent avec les résultats obtenus sur des fraises irriguées avec des eaux usées traitées où aucune différence de poids sec n'est enregistrée en comparaison avec les fraises irriguées à l'eau conventionnelle (Djillali et al., 2020). L'irrigation avec des eaux usées traitées n'a pas eu d'effet significatif sur le rendement commercialisable ni sur les caractéristiques qualitatives des cultures de tomates et de brocoli par rapport aux eaux souterraines selon les résultats obtenus par Libutti et al., (2018). Le taux de matière minérale et les protéines des fruits de tomate irriguée avec EUT (6,99±0,09 et 20,71±0,9, respectivement) sont inférieurs aux taux trouvés pour les tomates irriguées avec EC (8,30±0,26 et 21,48±2,37, respectivement). Les propriétés chimiques des oliviers et des cultures maraîchères analysé par Al-Hamaiedeh & Bino(2010) irriguées avec

Chapitre III : Résultats et discussion

des EUT n'ont pas été affectées et aucun effet négatif sur les propriétés chimiques des fruits et des feuilles n'est observé.

III.2.7. Evaluation de la qualité microbiologique des fruits de tomate

Les échantillons de tomates irrigués avec EC et ceux irrigués par EUT ont été soumis à des contrôles microbiologiques pour déterminer leurs qualités. Les résultats sont présentés dans le tableau 33.

Tableau 33 : Qualité microbiologique des fruits de tomate irrigués avec EC et EUT.

Paramètres	Tomates irriguées avec	
	EC	EUT
Coliformes totaux	abs	abs
<i>Escherichia coli</i>	abs	abs
Enterocoques fécaux	abs	abs
ASR	abs	abs
Levures	abs	abs
Moisissures	abs	abs

L'analyse des coliformes totaux, *Escherichia coli*, Enterocoques fécaux, Anaérobies Sulfito-Réducteurs (ASR), levures et moisissures n'a révélé la présence d'aucun germe dans tous les échantillons de tomate irrigué avec EC et EUT et aucune contamination n'est observée. Cela peut être expliqué par l'utilisation de l'irrigation goutte à goutte et la hauteur du premier bouquet floral qui est à 23 cm du sol donc il n'y a aucun contact avec les eaux d'irrigation. Ces résultats confirment que le risque de contamination des cultures par les eaux usées traitées est diminué et la santé des consommateurs est préservée par l'utilisation de l'irrigation localisée ; ces résultats sont en accord avec ceux d'études antérieures. L'étude menée par Christou et al., (2014) pour évaluer l'impact de l'irrigation des cultures de tomates avec des effluents d'eaux usées traitées n'a montré aucune contamination microbiologique (coliformes totaux, coliformes fécaux, *Escherichia coli*, *Salmonella* spp., *Listeria* spp.) des fruits de tomates. Ils suggèrent fortement que les effluents de traitement tertiaire avancé de bonne qualité peuvent être réutilisés en toute sécurité pour l'irrigation des légumes. Pour évaluer l'impact de l'irrigation avec des eaux usées traitées (EUT) sur la sécurité des produits ; Orlofsky et al., (2016) ont mené des expériences sur le terrain pour comparer les eaux usées secondaires et

Chapitre III : Résultats et discussion

tertiaires avec l'eau potable en utilisant la tomate comme culture modèle. Les résultats indiquent que la contamination microbienne à la surface des tomates n'était pas associée à la source des eaux d'irrigation ; la contamination par des bactéries indicatrices fécales n'était pas statistiquement différente sur les tomates irriguées avec des EUT ou de l'eau potable. Les résultats indiquent que l'irrigation goutte-à-goutte de surface avec des eaux usées traitées n'a pas entraîné le transfert de bactéries indicatrices fécales ou de pathogènes microbiens au sol ou à la culture irrigués. L'analyse microbiologique réalisée par Touil et al., (2020) sur le raisin de table de variété Sabelle provenant de deux fermes irriguées par l'eau usée traitée n'ont pas révélé de contamination majeure en raison de l'absence de contact entre l'eau et les parties comestibles de la plante suite à l'utilisation du système goutte à goutte. Les résultats bactériologiques obtenus par Aiello et al., (2007) sur des échantillons de tomates et leurs solutions de lavage irrigués par des EUT ont révélé de très faibles concentrations d'E. coli (jusqu'à 40 MPN/100 mL) et la contamination microbienne des fruits est négligeable et suggère que les eaux usées traitées peuvent être utilisées comme une alternative valable pour l'irrigation au goutte-à-goutte des tomates.

Conclusion

Conclusion

Dans la première partie de cette étude de caractérisation des eaux usées traitées de la STEP de Baraki, on constate que la plupart des paramètres physico-chimiques sont conformes aux normes pour la réutilisation des EUT en irrigation. Il a également été noté des niveaux très élevés d'ammoniaque NH_4^+ et d'azote total qui sont supérieurs aux limites autorisées par l'USEPA et la FAO pour l'irrigation. La concentration en ETM est très faible par rapport aux normes de la FAO et n'aura pas d'effets toxiques sur le sol ou sur la plante à court ou à long terme.

Le diagramme de Wilcox montre que la plupart des échantillons d'eaux usées traitées se situent dans la zone C3-S1 ce qui indique une salinité élevée et une eau à faible teneur en sodium qui peut être utilisée pour l'irrigation sur presque tous les types de sol sans danger de sodium échangeable et peut convenir à l'irrigation d'espèces tolérantes au sel pour des sols bien drainés et lessivés. L'évaluation bactériologique a révélé l'absence de *Salmonella spp.* et de *staphylocoques spp.* alors que les valeurs de CT et CF étaient très élevées et dépassaient les directives de l'OMS. Ces concentrations élevées sont certainement liées à l'absence de processus de désinfection.

Ces données montrent que ces eaux usées traitées ne peuvent pas être utilisées en agriculture sans un traitement adéquat et une investigation devrait être menée pour identifier l'origine du niveau élevé d'azote pour la gestion du problème. Afin de minimiser le risque sanitaire lié à la réutilisation des eaux usées traitées avec une telle qualité bactériologique, nous recommandons fortement la mise en place d'un système de désinfection efficace dans la STEP de Baraki (Algérie), l'évaluation périodique de la qualité physico-chimique et bactériologique des EUT, la vulgarisation agricole auprès des agriculteurs qui utilisent ce type d'eau pour l'irrigation de leurs cultures, ainsi que la sensibilisation des consommateurs. Pour garantir la protection de la santé publique il est essentiel de respecter les normes et réglementations strictes adaptées à la spécificité des différentes cultures conformément aux recommandations de l'OMS et de la FAO. Cependant, les principales limites à ce type d'utilisation sont d'ordre psychologique et culturel, liées à la perception des eaux usées comme dangereuses pour la santé.

Dans la deuxième partie de recherche nous avons évalué l'impact de l'irrigation avec des eaux usées traitées en comparaison avec les eaux conventionnelles sur l'évolution des paramètres morphologiques et agronomiques tout au long du cycle de culture de la tomate industrielle. Nous avons aussi évalué l'impact de l'irrigation aux EUT sur l'accumulation des ETM dans

Conclusion

les différentes parties de la plante allant de la racine, tige, feuille arrivant au fruit de tomate destinée à la consommation humaine. Une analyse de la qualité bactériologique du fruit récolté afin d'évaluer le risque sanitaire sur la santé. En dernier la composition chimique du fruit de tomate a été également évaluée afin de mieux comprendre les changements et différences induit par la qualité de l'eau d'irrigation. La caractérisation de l'eau usée traitée de la STEP de Baraki suite à une évaluation continue pendant une année nous a permis de conclure que sa qualité physico-chimique et le taux des ETM répondent aux critères de réutilisation en irrigation agricole selon la réglementation algérienne (JORA N°41, 2012 et NA 17683, 2014) et international (FAO et OMS); et pour éviter la contamination bactérienne une irrigation localisée est appliquée pour la culture de tomate industrielle.

Le suivie de la culture tout au long de son cycle végétatif nous a permis d'observer une évolution croissante de la hauteur, du diamètre et du nombre de feuilles pour les deux traitements. Aucune différence significative n'est observée en fin de cycle et la qualité des EUT n'a aucun effet négatif sur l'évolution des plantes. La plus faible distance entre le sol est le premier bouquet floral est enregistrée pour les plantes irrigués par l'EUT alors que les plantes irriguées avec EC enregistrent une hauteur plus élevée ; cette différence n'est pas significative. L'analyse de la variance du taux de chlorophylle n'indique aucune différence significative entre les deux traitements et la qualité de l'eau d'irrigation n'a aucun effet sur ce paramètre. Les paramètres de croissance n'ont pas été affectés par l'irrigation aux EUT et un développement similaire est observé par rapport au témoin EC.

L'analyse des paramètres de production nous a permis d'observer un nombre de fruits produits par les plantes de tomate irriguées avec EUT supérieure à celui produit par l'irrigation avec EC. Une différence non significative du poids total des fruits de tomate obtenus par l'irrigation EUT et celui obtenus par l'irrigation EC. De même le poids moyen des fruits obtenus avec le traitement EUT ne présente aucune différence significative avec le traitement EC. Par contre, la largeur et la longueur des fruits obtenus par EUT présentent une différence très hautement significative par rapport à ceux obtenus par EC et ceci montre que la qualité de l'eau d'irrigation a affecté les paramètres morphologiques du fruit de tomate. Ces résultats nous permettent de dire que la réutilisation des EUT en irrigation peut être utilisée sans que cela conduit à un impact négatif sur les principaux paramètres agronomiques de la culture et permet d'envisager une possibilité de réutilisation des EUT en agriculture. Par conséquent, l'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation des tomates pourrait être

Conclusion

possible en raison de leur valeur nutritive élevée qui peut améliorer la croissance des plantes, réduire les d'application d'engrais et augmenter la productivité des sols pauvres.

L'analyse des ETM sur les plantes de tomate irriguées avec des EUT et EC a permis d'observer une présence du Pd, Ni, Cr, Mn et le Cu au niveau des racines, tiges et feuilles mais les valeurs trouvées sont inférieures aux limites de sécurité des plantes. Les concentrations du Ni, Mn et Cu détecté dans le fruit de tomate irrigué par les EUT et EC sont inférieures aux limites maximales admissibles fixées par la FAO/OMS et ne présentaient aucune menace de toxicité. Le facteur BCF calculé pour le Pb, Cd, Ni, Cr, Mn et Cu est inférieur à un (<1) et aucune accumulation dans les fruits de tomates depuis le sol n'est enregistré. L'analyse de la composition physico-chimique du fruit de tomate montre qu'il n'y a pas de différence entre les deux traitements pour le pH, acidité titrable, matière sèche et matière grasse. Les valeurs des sucres totaux et de vitamine C sont plus élevées pour les tomates irriguées avec EUT ; tandis que les valeurs des matières minérales et les protéines sont plus élevées pour les tomates irriguées avec EC. L'analyse bactériologique des fruits de tomate a permis de révéler une absence totale de toute contamination et cela s'explique par l'utilisation de l'irrigation localisée et les premiers bouquets sont loin du sol donc il n'y a aucun contact avec l'EUT.

Ces résultats confirment que le risque de contamination des cultures est diminué par l'utilisation de l'irrigation goutte à goutte. On peut conclure d'après les résultats obtenus que la qualité des fruits de tomate irrigués avec les EUT sont de bonne qualité physico-chimique et microbiologique et peuvent être destinés à la transformation pour une consommation humaine sans aucun risque sur la santé. En réalité, l'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation des cultures pourrait aider à diminuer voire éliminer le manque d'eau, soutenir l'agriculture et préserver les ressources en eau souterraine. Cependant, il convient de souligner l'importance d'une gestion adéquate de la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture, ainsi qu'une surveillance régulière des paramètres de qualité de l'eau, du sol et des produits agricoles.

Références

Références

- Aiello, R., Cirelli, G. L., & Consoli, S. (2007). Effects of reclaimed wastewater irrigation on soil and tomato fruits: A case study in Sicily (Italy). *Agricultural Water Management*, 93(1–2), 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.06.008>
- Al Hamedi, F. H., Kandhan, K., Liu, Y., Ren, M., Jaleel, A., & Alyafei, M. A. M. (2023). Wastewater Irrigation: A Promising Way for Future Sustainable Agriculture and Food Security in the United Arab Emirates. *Water (Switzerland)*, 15(12), 1–18. <https://doi.org/10.3390/w15122284>
- Algérie-UE. (2019). *Appui à la modernisation et au renforcement des capacités de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH)*. 35p.
- Al-Hamaiedeh, H., & Bino, M. (2010). Effect of treated grey water reuse in irrigation on soil and plants. *Desalination*, 256(1–3), 115–119. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.02.004>
- Al-Lahham, O., El Assi, N. M., & Fayyad, M. (2007). Translocation of heavy metals to tomato (*Solanum lycopersicom* L.) fruit irrigated with treated wastewater. *Scientia Horticulturae*, 113(3), 250–254. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.03.017>
- Ayres, R. M., & Duncan Mara, D. (1997). *Analyse des eaux résiduaires en vue de leur recyclage en agriculture: Manuel des techniques de laboratoire en parasitologie et bactériologie, OMS, Genève*, 37 p.
- Bakhtache, R., & Hadjene, O. (2023). Les retombées du changement climatique sur le secteur agricole et hydraulique en Algérie (2010-2022). *Revue Cahiers Economiques*, 14(01), 80–95.
- Baumont, S. (2014). *Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France*. Observatoire régional de santé d'Ile-de-France/ Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région, 22 p.
- Beldjilali, A. (2021). *Irrigation par utilisation des eaux usées traitées, impacts et toxicité sur les aspects nutritionnels, physiologiques et biochimiques de la tomate « Solanum lycopersicum »*. Université Hassiba Benbouali de Chlef Faculté.
- Beldjilali, A., & Ababou, A. (2020). Use of treated wastewater for irrigation, impacts on growth, development and heavy metal contents of tomato plant “*Solanum Lycopersicum*”. *International Journal of Sciences and Research*, 76(4/1), 300–315. <https://doi.org/10.21506/j.ponte.2020.4.24>
- Ben Said, I., Mezghani, I., Donyez, F., Mohamed, C., & Adele, M. (2017). Reclaimed municipal wastewater for forage production. *Water Science & Technology*, 75(November), 1784–1793. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.048>
- Bessaoud, O., Pellissier, J.-P., Rolland, J.-P., & Khechimi, W. (2019). Rapport de synthèse sur l'agriculture en Algérie. EmCiheam-Iamm: Vol. hal-021376.

Références

- Boutin, C., Héduit, A., & Helmer, J. (2009). *Technologies d'épuration en vue d'une réutilisation des eaux usées traitées (REUT)*. ONEMA & CEMAGREF, 100 p.
- Cammalleri, C., Naumann, G., Mentaschi, L., Formetta, G., Forzieri, G., Gosling, S., Bisselink, B., De Roo, A., & Feyen, L. (2020). Global warming and drought impacts in the EU. *Publications Office of the European Union*, 29. <https://doi.org/10.2760/597045>
- Campagna, C., Ouimet, M.-J., Généreux, M., & Pétrin-Desrosiers, C. (2023). Changements climatiques. *Environnement et santé publique*, p. 113–142. <https://doi.org/10.3917/ehesp.goupi.2023.01.0113>
- Catherinot, J. (2013). *Réutilisation des eaux usées et des excréta*s. AgroParisTech & S-eau, 24 p.
- Chaux D. et Foury C (1994). Production légumières, légumineuses potagères, légumes et fruits. Ed. TED lavoisier, 563 p.
- Christou, A., Beretsou, V. G., Iakovides, I. C., Karaolia, P., Michael, C., Benmarhnia, T., Chefetz, B., Donner, E., Gawlik, B. M., Lee, Y., Lim, T. T., Lundy, L., Maffettone, R., Rizzo, L., Topp, E., & Fatta-Kassinos, D. (2024). Sustainable wastewater reuse for agriculture. *Nature Reviews Earth and Environment*, 5(7), 504–521. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00560-y>
- Christou, A., Maratheftis, G., Eliadou, E., Michael, C., Hapeshi, E., & Fatta-Kassinos, D. (2014). Impact assessment of the reuse of two discrete treated wastewaters for the irrigation of tomato crop on the soil geochemical properties, fruit safety and crop productivity. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 192, 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.04.007>
- Cirelli, G. L., Consoli, S., Licciardello, F., Aiello, R., Giuffrida, F., & Leonardi, C. (2012a). Treated municipal wastewater reuse in vegetable production. *Agricultural Water Management*, 104, 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.12.011>
- Cirelli, G. L., Consoli, S., Licciardello, F., Aiello, R., Giuffrida, F., & Leonardi, C. (2012b). Treated municipal wastewater reuse in vegetable production. *Agricultural Water Management*, 104, 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.12.011>
- Claire Eme, & Pascal Molle. (2013). *Stockage des eaux usées traitées en vue de leur réutilisation*. Etat de l'art, Rapport final, ONEMA/EPNAC/irstea. 74 p.
- CRED&UNDRR. (2020). Human Cost of Disasters. An overview of the last 20 years 2000-2019. 74 p. <https://doi.org/10.18356/79b92774-en>
- Cullen, M. T., & Semedo, M. H. (2023). *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture: gestion intégrée des ressources en eau*. 43eme session, Rome, 27 p.
- Deboos, A. (2018). *Réutilisation des eaux usées traitées en Méditerranée et impacts sur les territoires*. IPEMED, N°19, 20 p.

Références

- Djillali, Y., Chabaca, M. N., Benziada, S., Bouanani, H., Mandi, L., Bruzzoniti, M. C., Boujelben, N., & Kettab, A. (2020). Effect of treated wastewater on strawberry. *Desalination and Water Treatment*, 181, 338–345. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25095>
- Elfanssi, S., Ouazzani, N., & Mandi, L. (2018). Soil properties and agro-physiological responses of alfalfa (*Medicago sativa* L.) irrigated by treated domestic wastewater. *Agricultural Water Management*, 202(February), 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.02.003>
- Faby, J. A., & Brissaud, F. (1997). *L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation*, Ministère de l'agriculture et de la pêche. FNDAE N°11, 20 p.
- FAO. (2003a). *L'irrigation avec des eaux usées traitées : Manuel d'utilisation*. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, 73 p.
- FAO. (2003b). *Users Manual for irrigation with treated wastewater*. FAO Regional Office for the Near East. 63 p.
- FAO. (2015). *AQUASTAT Profil de Pays – Algérie*. Organisation des Nations Unie pour l'alimentation et l'agriculture, 21 p.
- FAO/OMS. (2001). *Report of the 33rd session of the Codex Committee on Food Additives and Contaminants. Codex Alimentarius Commission, Joint FAO/WHO Food Standards Programme*. 300 p.
- Ferguson, G., McIntosh, J. C., Warr, O., Sherwood Lollar, B., Ballentine, C. J., Famiglietti, J. S., Kim, J. H., Michalski, J. R., Mustard, J. F., Tarnas, J., & McDonnell, J. J. (2021). Crustal Groundwater Volumes Greater Than Previously Thought. *Geophysical Research Letters*, 48(16), 1–9. <https://doi.org/10.1029/2021GL093549>
- Fipps, G. (1996). *Irrigation water quality standards and salinity management strategies*. Texas A&M AgriLife Extension service. 18 p.
- Gatta, G., Libutti, A., Beneduce, L., Gagliardi, A., Disciglio, G., Lonigro, A., & Tarantino, E. (2016). Reuse of treated municipal wastewater for globe artichoke irrigation: Assessment of effects on morpho-quantitative parameters and microbial safety of yield. *Scientia Horticulturae*, 213, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.10.011>
- GIEC. (2023). *Synthèse du sixième rapport de synthèse du GIEC*. Synthèse vulgarisée du résumé aux décideurs du rapport de synthèse de l'AR6 le 20/03/2023. 17 p.
- GIZ/BGR/OSS. (2016). *PROJET « CREM » Coordination régionale pour une gestion durable des ressources en eau au Maghreb (GIZ/ BGR/ OSS): Etude d'évaluation du secteur de l'eau en Algérie. Etat des lieux*. 102 p.
- Guergueb, M., & Ferhat, A. (2021). La gestion des eaux en Algérie : Vers un nouveau paradigme. *Journal of Advanced Economic Research*, 06, 304–315.

Références

- Hamamouch, F., & Hartani, T. (2022). *Réutilisation des eaux usées en agriculture : Rapport de synthèse Algérie*. AFIED & COSTEA, 65 p.
- Hamamouche, F., & Hartani, T. (2022). *Atelier National : Réutilisation des eaux usées en agriculture (Algérie)*. 24 p.
- Hashem, M. S., & Qi, X. (2021). Treated Wastewater Irrigation — A Review. *Water*, 13(1527), 1–37. <https://doi.org/10.3390/w13111527>
- INEC. (2018). *L'économie circulaire dans le petit cycle de l'eau: la réutilisation des eaux usées traitées*. Institut National de l'Economie Circulaire, 129 p.
- ITCMI, (2017). La culture de la tomate sous serre. Guide pratique de l'institut technique des cultures maraîchères et industrielles, 14 p.
- Jacob J.P. et Jansen J.L.M., (1979). La tomate. Polycopié de cours cultures maraichères : les solanacées, 210 p.
- Jaramillo, M. F., & Restrepo, I. (2017). Wastewater Reuse in Agriculture: A Review about Its Limitations and Benefits. *Sustainability*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/su9101734>
- Kettab, A. (2017a). *Traitement des eaux usées urbaines et leurs réutilisations en Agriculture*. Edition universitaire européenne, 146 p
- Kherbache, N. (2020). Water policy in Algeria: Limits of supply model and perspectives of water demand management (WDM). *Desalination and Water Treatment*, 180, 141–155. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25009>
- Kompas, T., Che, T. N., & Grafton, R. Q. (2024). Global impacts of heat and water stress on food production and severe food insecurity. *Scientific Reports*, 14(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65274-z>
- Kuper, A. C., Aloui, O., Daoudi, A., Elloumi, M., Gharbi, I., Terre, À. L. A., Eau, E. T. À. L., & Maghreb, A. U. (2023) Hybridation des modes d'accès à la terre et l'eau au maghreb : une perspective historique. AFD/AFEID/COSTEA, 29 p.
- Libutti, A., Gatta, G., Gagliardi, A., Vergine, P., Pollice, A., Beneduce, L., Disciglio, G., & Tarantino, E. (2018). Agro-industrial wastewater reuse for irrigation of a vegetable crop succession under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*, 196, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.015>
- Luo, T., Young, R., & Reig., P. (2015). *Aqueduct Projected Water Stress Country Rankings*. World resources Institute, 16 p.
- Laumonier R., (1978). Culture légumières et maraichères. Tome 1, Ed. Baillière, Paris, 276 p.
- MEER. (2023a). Premier Rapport Biennal Actualise de l'Algérie. A la convention cadre des nations unies sur le changement climatique. 199 p.

Références

- MEER. (2023b). Troisième Communication Nationale de l'Algérie. A la convention cadre des nations unies sur le changement climatique. 227 p.
- Mishra, S., Kumar, R., & Kumar, M. (2023). Use of Treated Sewage or wastewater as an Irrigation Water for Agricultural Purposes- Environmental , Health , and Economic Impacts Total Environment Research Themes Use of treated sewage or wastewater as an irrigation water for agricultural purposes- Env. *Total Environment Research Themes*, 6(100051), 12. <https://doi.org/10.1016/j.totert.2023.100051>
- Mozas, M., & Ghosn, A. (2013). État des lieux du secteur de l'eau en Algérie., Etudes & Analyses, IPEMED, 25 p.
- Musie, W., & Gonfa, G. (2023). Fresh water resource, scarcity, water salinity challenges and possible remedies: A review. *Heliyon*, 9(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18685>
- Norme Algérienne 17683, (2014). Réutilisation des eaux usées épurées à des fins agricoles, municipales et industrielles Spécifications physico-chimiques et biologiques.
- OMM. (2023). Congrès météorologique mondial. Rapport final abrégé de la dix-neuvième session Genève. 642 p.
- OMS. (2012). Directive OMS pour l'utilisation sans risques des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères: Utilisation des eaux usées en agriculture: Vol. II. 254 p.
- ONA. (2021). *Bilan annuelle prévisionnel ONA*. 11 p.
- ONA. (2024). *La réutilisation des eaux usées épurées en agriculture: de l'option à l'obligation*. Rencontre REUS en agrumiculture. 36 p.
- ONU. (1992). *Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*.
- ONU. (2020). *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2020: L'eau et les changements climatiques*. 259 p.
- ONU. (2021). *Rapport mondiale des Nation Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2021: La valeur de l'eau*. 12 p.
- ONU. (2022). *La Secheresse En Chiffres, 2022 - restaures afin d'être prêts et résilients*-. United Nation Decade On Ecosystem Restoration 2012-2030. 52 p.
- ONU. (2023). *Rapport sur les objectifs de développement durable*.
- Orlofsky, E., Bernstein, N., Sacks, M., Vonshak, A., Benami, M., Kundu, A., Maki, M., Smith, W., Wuertz, S., Shapiro, K., & Gillor, O. (2016). Comparable levels of microbial contamination in soil and on tomato crops after drip irrigation with treated wastewater or potable water. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 215, 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.08.008>

Références

- Paliwal, K., Karunaichamy, K. S. T. K., & Ananthavalli, M. (1998). Effect of sewage water irrigation on growth performance, biomass and nutrient accumulation in *Hardwickiabinata* under nursery conditions. *BioresourceTechnology*, 66(2), 105–111. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(98\)00044-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(98)00044-3)
- Rodier, J., Legube, B., & Merlet et coll., N. (2009). L'Analyse de l'eau. Em *Dunod* (9eme édition). <https://doi.org/10.5040/9781501365072.13617>
- Singh, A. (2021). A review of wastewater irrigation: Environmental implications. *Resources, Conservation and Recycling*, 168. 17 p. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105454>
- Touil, S., Chabaca, M. N., & Hasbaia, O. (2020). Impact assessment of long treated wastewater irrigation on soil and crops in Algeria. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 5(3). <https://doi.org/10.1007/s41207-020-00187-7>
- Waal, D. de, Khemani, S., Barone, A., & Borgomeo, E. (2023). *Aspects économiques de la pénurie d'eau au Moyen-Orient et en Afrique du Nord* (Croupe de la banque mondiale, Org.). <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1739-7>
- Winpenny, J., Heinz, I., Koo-Oshima, S., Salgot, M., Collado, J., Hernandez, F., & Torricelli, R. (2010). *The wealth of waste: The economics of wastewater use in agriculture*.
- WMO. (2024). State of the Global Climate 2023. *State of the Global Climate 2023*. N°1347, 53 p. <https://doi.org/10.18356/9789263113474>
- Younas, H., & Younas, F. (2022). Wastewater Application in Agriculture-A Review. *Water, Air, and Soil Pollution*, 233(8), 28. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05749-9>

Annexes

ANNEXES

Tableau I. Les bactéries pathogènes dans les eaux usées (Baumont et al.,2014).

Agent pathogène	Symptômes, maladie	Nombre pour un litre d'eau usée	Voies de contamination principales
Salmonella	Typhoïde, paratyphoïde, Salmonellose	23 à 80 000	Ingestion
Shigella	Dysenterie bacillaire	10 à 10 000	Ingestion
Escherichia coli	Gastro-entérite		Ingestion
Yersinia	Gastro-entérite		Ingestion
Campylobacter	Gastro-entérite	37 000	Ingestion
Vibrio	Choléra	100 à 100 000	Ingestion
Leptospira	Leptospirose		Cutané/inhalation/ingestion
Legionella	Légionellose		Ingestion
Mycobacterium	Tuberculose		Ingestion

ANNEXES

Tableau II. Parasites pathogènes dans les eaux usées (Baumont et al.,2014).

Agent pathogène	Symptômes, maladie	Nombre pour un litre d'eau usée	Voies de contamination principales
Protozoaires			
Entamoeba histolytica	Dysenterie amibienne	4	Ingestion
Giardia lamblia	Diarrhée, malabsorption	125 à 100 000	Ingestion
Balantidium coli	Diarrhée bénigne, ulcère du colon	28-52	Ingestion
Cryptosporidium	Diarrhée	0,3 à 122	Ingestion
Toxoplasma gondii	Toxoplasmose ganglions, faible fièvre		Ingestion/inhalation
Cyclospora	Diarrhée, légère fièvre, perte de poids		Ingestion
Microsporidium	Diarrhée		Ingestion
Helminthes			
Ascaris	Ascariadiase : diarrhée, troubles nerveux	5 à 111	Ingestion
Ancylostoma	Anémie	6 à 188	Ingestion / Cutanée
Necator	Anémie		Cutanée
Tænia	Diarrhée, douleurs musculaires		Ingestion de viande mal cuite
Trichuris	Diarrhée, douleur abdominale	10 à 41	Ingestion
Toxocora	Fièvre, douleur abdominale		Ingestion
Strongyloïdes	Diarrhée, douleur abdominale, nausée		Cutanée
Hymenolepis	Nervosité, troubles digestifs, anorexie		Ingestion