REPUBLIQUE TUNISIENNE

MINISTERE DE L'AGRICULTURE, DES RESSOURCES HYDRAULIQUES ET DE LA PECHE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE DE TUNISIE

Département Génie Rural, Eaux et Forêts

PROJET DE FIN D'ÉTUDES
DU CYCLE INGENIEUR

Présenté par

Fatma MANSOURI

Spécialité: **Génie Rural, Eaux et Forêts**

Option: Hydraulique et Aménagement Rural

CONTRIBUTION A L'AMELIORATION D'UN SYSTEME DE POST-TRAITEMENT DES EUT A DES FINS AGRICOLES ET FORESTIERES

Devant le jury composé de:

Mme Jamila TARHOUNI	**INAT**	**Présidente du Jury**
M. Karim ERGAIEG	**INAT**	**Encadrant**
Mme Sonia BEHI BOUKED	**ONAS**	**Encadrant Profession**
M. Hatem CHAAR	**INAT**	**Examinateur**
M. Mohamed Haythem MSADDEK	**FST**	**Invité(e)**

Octobre 2020

Dédicace

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices.

Je dédie cet événement marquant de ma vie à ta mémoire cher père.

J'espère que, du monde qui est le sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'une fille qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le tout-puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer mes remerciements à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à son réalisation. J'espère que ces quelques lignes sauront traduire toute ma gratitude envers vous tous.

Je tiens tout d'abord à remercier tous les membres du jury, de m'avoir fait l'honneur de siéger aujourd'hui pour juger ce travail.

Il m'est particulièrement agréable de remercier très vivement professeur Jamila TARHOUNI, pour l'honneur qu'elle me fait de présider le jury de ma soutenance de PFE.

Mes vifs remerciements vont particulièrement à M. Karim ERGAIEG pour sa grande qualité d'encadrement et sa bienveillance. Ses conseils judicieux, et le soutien qu'il m'avait fourni tout au long de ma formation et de mon travail ont été déterminants pour l'aboutissement de ce travail. Qu'il trouve l'expression de ma profonde reconnaissance, de mon profond respect et de toute ma gratitude.

Mes sincères remerciements sont aussi adressés, à M. Hatem CHAAR pour sa disponibilité et surtout pour l'évaluation de ce travail. Je le remercie infiniment pour ses qualités humaines et pédagogiques, ses remarques pertinentes vont certainement contribuer à l'amélioration de mon manuscrit de PFE.

Je suis très reconnaissant envers Mme Sonia BEHI BOUKED, de l'Office National de l'Assainissement, pour son encadrement et son soutien à la formtion des élèves ingénieurs de l'INAT.

Je tiens à remercier également et avec la même gratitude M. Mohamed Haythem MSSADEK de la FST pour son soutien inestimable lors du travail de terrain.

Ma gratitude également à tous les membres du GDA Sidi Amor pour leurs précieux conseils et leur soutien.

Mes profondes gratitudes sont exprimées finalement aux membres de ma famille pour leurs encouragements et le support tant moral que matériel durant toutes mes études. Sans eux je n'aurais jamais réussi à poursuivre mon chemin…

RÉSUMÉ

L'épuration des eaux usées par les macrophytes est un procédé de traitement par voie naturelle (ou zone humides artificielles) au développement récent. Il s'agit d'une technique vraisemblablement prometteuse, dans le contexte local, récemment adoptée pour le traitement des eaux de certaines localités tunisiennes, mais également mise à l'épreuve, voire en expérimentation, dans certains sites pilote.

L'objectif de la présente étude est d'évaluer les performances de la station d'épuration pilote de filtre planté à macrophytes de Sidi Amor (STEP Sidi Amor, patrimoine de l'ONAS depuis 2017), et de dégager les principales défaillances de fonctionnement ainsi que les perspectives d'amélioration. La filière de traitement comprend deux filtres plantés à écoulement horizontal (montés en parallèle) et un bassin de maturation (lagune de finition).

L'analyse des performances de la STEP est basée dans un premier temps sur l'historique de *monitoring* de la qualité des eaux usées traitées, depuis la mise en eau, fournie par l'ONAS et portant essentiellement sur des paramètres physico-chimiques (MES, CE, DBO_5, DCO, NtK, Pt) et bactériologiques (CF). Les principaux résultats obtenus montrent des rendements épuratoires satisfaisants pour les paramètres étudiés et une qualité d'eau usée traitée conforme à la la norme de réutilisation à des fins agricoles, NT 106.03.

Cependant, la qualité de l'eau à l'entrée de la STEP est fluctuante et aurait engendré vraisemblablement des phénomènes de colmatage notamment pour le premier filtre planté. Le recours à la prospection électrique (technique d'exploration géophysique) nous a permis de confirmer cette hypothèse et d'identifier les différentes zones de colmatage et d'obstruction à l'écoulement de l'eau dans le filtre. En effet, les profils de résistivité obtenus révèlent une grande hétérogénéité au niveau du premier filtre, visiblement en étroite relation avec la densité de macrophytes, mais également une détérioration en partie de la géomembrane et une grande fraction boueuse limitant la répartition régulière de l'effluent sur la totalité de filtre. En revanche, le deuxième filtre demeure moins impacté et présente par ailleurs une densité relativement homogène des macrophytes.

MOTS CLES : eaux usées traitées ; filtre planté à macrophytes ; rendements épuratoires ; colmatage ; prospection électrique.

ABSTRACT

Macrophyte-based wastewater treatment is a recently developed natural (or artificial wetland) treatment process. It is probably a promising technique, in the local context, recently adopted for the treatment of water in certain Tunisian localities, but it has also been tested, or even experimented with, in certain pilot sites.

The objective of the present study is to evaluate the performance of the pilot macrophyte planted filter treatment plant of Sidi Amor (Sidi Amor WWTP, ONAS heritage since 2017), and to identify the main operating failures as well as the prospects for improvement. The treatment process includes two horizontal flow planted filters (mounted in parallel) and a maturation basin (finishing lagoon).

The analysis of the WWTP's performance is initially based on the monitoring history of the quality of the treated wastewater, since its impoundment, provided by ONAS and focusing mainly on physico-chemical (TSS, EC, BOD_5, COD, NTK, PT) and bacteriological (CF) parameters. The main results obtained show satisfactory purification yields and a quality of treated wastewater that complies with both the environmental protection standard and the standard for reuse for agricultural purposes, respectively, 106.02 and 106.03.

However, the quality of the water at the entrance to the WWTP is fluctuating and would likely have led to clogging, particularly for the first planted filter. The use of electrical prospecting (geophysical exploration technique) allowed us to confirm this hypothesis and to identify the various zones of clogging and obstruction to the flow of water in the filter. Indeed, the resistivity profiles obtained reveal a great heterogeneity at the level of the first filter, visibly in close relation with the macrophyte density, but also a partial deterioration of the geomembrane and a large muddy fraction limiting the regular distribution of the effluent over the entire filter. On the other hand, the second filter remains less impacted and has a relatively homogeneous macrophyte density.

KEYWORDS: treated wastewater; constructed wetlands; purification yields; clogging; electrical prospecting.

ملخص

معالجة مياه الصرف الصحي بالنباتات البحرية هي عملية معالجة طبيعية تم تطويرها مؤخرًا. ربما تكون هذه تقنية واعدة ، في السياق المحلي ، تم تبنيها مؤخرًا لمعالجة المياه في مناطق تونسية معينة ، ولكنها أيضًا خضعت للاختبار ، في بعض المواقع التجريبية.

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم أداء محطة المعالجة التجريبية للمصفى المزروع بالنباتات البحرية في سيدي عمر (محطة تطهير سيدي عمر ، تراث الديوان الوطني للتطهير منذ 2017) ، وتحديد أعطال التشغيل الرئيسية. فضلا عن آفاق التحسين. يشتمل نظام المعالجة على مرشحين مزروعين بالتدفق الأفقي (مركبين بالتوازي) وحوض تصفية (بحيرة التشطيب).

يعتمد تحليل أداء محطة معالجة مياه الصرف الصحي أولاً على سجل مراقبة جودة مياه الصرف الصحي المعالجة ، منذ الحجز ، (PT، NTK، DCO ، BOD_5، CE، MES) المقدم من قبل الديوان والمتعلق بشكل أساسي بالمعايير الفيزيائية والكيميائية تظهر النتائج الرئيسية التي تم الحصول عليها محاصيل تنقية مرضية ونوعية مياه الصرف الصحي المعالجة .(CF) والبكتريولوجية التي تلبي كلاً من معيار حماية البيئة ومعيار إعادة الاستخدام الزراعي ، على التوالي ، 106.02 و 106.03.

ومع ذلك ، فإن جودة المياه الداخلة إلى محطة معالجة مياه الصرف الصحي متذبذبة وربما تتسبب في حدوث ظاهرة انسداد ، خاصة بالنسبة للمرشح الأول الذي تم زرعه. مكننا استخدام التنقيب الكهربائي (تقنية استكشاف جيوفيزيائية) من تأكيد هذه الفرضية وتحديد مناطق الانسداد المختلفة وعرقلة تدفق المياه في المصفى. في الواقع ، تكشف النتائج اللتي تم الحصول عليها عن عدم تجانس كبير على مستوى المصفى الأول ، بشكل واضح في علاقة وثيقة مع شدة التيار الكهربائي ، ولكن أيضًا تدهور في جزء من الغشاء الأرضي و تراكم كميات كبيرة من الوحل يحد من التوزيع المنتظم للمياه المستعملة على المصفى بأكمله. من ناحية أخرى ، يظل المصفى الثاني أقل تأثرًا ، علاوة على ذلك ، فإنه يتمتع بكثافة متجانسة نسبيا.

الكلمات المفتاحية: مياه الصرف الصحي المعالجة ؛ مرشح مزروعة بالنباتات الكبيرة. أداء التنقية انسداد. التنقيب الكهربائي.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION **1**
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE **3**
1. GÉNÉRALITÉS SUR LES EAUX USÉES 4
1.1. DÉFINITION 4
1.2. ORIGINES 4
1.3. COMPOSITION 4
1.4. EPURATION 4
2. ZONES HUMIDES ET EPURATION DES EAUX **6**
2.1. DÉFINITIONS ET TYPOLOGIE 6
2.2. EPURATION PAR LES MACROPHYTES 8
2.2.1. LES MACROPHYTES 8
2.2.2. LES FILTRES PLANTÉS 10
2.2.3. LAGUNAGE 13
3. REUTILISATION DES EAUX USEES **14**
3.1. DOMAINES ET AVANTAGES 14
3.2. USAGES DES EUT DANS LE MONDE 15
3.3. REUTILISATION DES EUT EN TUNISIE 15
4. CADRE REGLEMENTAIRE ET INSTITUTIONNEL **17**
4.1. CADRE REGLEMENTAIRE 17
4.2. CADRE INSTITUTIONNEL 19
CHAPITRE II : MATÉRIELS ET MÉTHODES **20**
1. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ETUDE 21
1.1. CADRE GENERAL DU PROJET PILOTE 21
1.2. LES OUVRAGES DE POST-TRAITEMENT DES EUT 22
2. ANALYSE SOMMAIRE DE L'EXISTANT 25
2.1. COLLECTE ET TRAITEMENT DES DONNEES 25
2.2. DIAGNOSTIC SOMMAIRE DES OUVRAGES 27
2.3. PROSPECTION ELECTRIQUE DES FILTRES PLANTES 27
2.3.1. PRINCIPE PHYSIQUE 28
2.3.2. APPROCHE ADOPTÉE / ADAPTÉE SUR LE TERRAIN 29
2.3.3. MARTERIEL DE MESURE ET TRAITEMENT DES DONNEES 31

CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION 33
1. PREDIAGNOSTIC DE LA STATION A MACROPHYTES 34
2. CONFORMITÉ ET PERFORMANCES ÉPURATOIRES 39
3. PROSPECTION ELECTRIQUE DES FILTRES VEGETALISES 53
CONCLUSION 69
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 71
LES REFERENCES ELECTRONIQUES 73

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Les macrophytes émergents des systèmes d'épuration des eaux par filtre artificiel : a) système a écoulement de surface libre, avec l'espèce végétale Scirpus lacustris; b) système à écoulement horizontal de sous surface, avec l'espèce végétale Phragmites 7
Figure 2. Les différentes formes de vie des marophytes aquatiques : a) Scirpus lacustris, (b) Phragmites australis, (c) Typha latifolia, (d) Nymphaea alba, (e) Potamogeton gramineus, (f) Hydrocotyle vulgaris, (g) Eichhornia crassipes, (h) Lemna minor, (i) Potamogeton crispus, and (j) Littorella unifloran 9
Figure 3. Filtre planté de roseaux à écoulement vertical 12
Figure 4. Filtre planté de roseaux à écoulement horizontal 12
Figure 5. Utilisation des EUT (en % en fonction des usages) 16
Figure 6. Situation géographique de la zone d'étude 22
Figure 7. Schéma d'adduction et de transfert des EUT 23
Figure 8. Schéma simplifié du système de post-traitement des EUT au GDA Sidi Amor 25
Figure 9. Principe de la mesure de la résistivité électrique 29
Figure 10. Mise en œuvre de la traînée électrique 29
Figure 11. Schéma d'acquisition de la résistivité électrique avec le dispositif Wenner 30
Figure 12. Carte du maillage adopté pour la prospection électrique des deux filtres végétalisées 31
Figure 13. Principales phases (sommaire) du projet pilote 34
Figure 14. Surface de la tranchée d'alimentation du filtre planté 1 en charge 35
Figure 15. Evolution du pH aux différents points de contrôle de la STEP 40
Figure 16. Evolution de la CE (µS/cm) aux différents points de contrôle de la STEP 41
Figure 17. Evolution de la MES (mg/l) aux différents points de contrôle de la STEP 42
Figure 18. Evolution de la DCO (mg O_2/l) aux différents points de contrôle de la STEP 42
Figure 19. Evolution de la DBO_5 (mg O_2/l) aux différents points de contrôle de la STEP 43
Figure 20. Evolution de la NtK (mg N/l) aux différents points de contrôle de la STEP 44
Figure 21. Evolution de la Pt (mg/l) aux différents points de contrôle de la STEP 44
Figure 22. Evolution des CF (log NPP/100 ml) aux différents points de contrôle de la STEP 45
Figure 23. Valeurs moyennes (± Intervalle de confiance au seuil de 5%) des MES en fonction du point d'échantillonnage (PE) 47

Figure 24. Valeurs moyennes (± Intervalle de confiance au seuil de 5%) de la DCO en fonction du point d'échantillonnage (PE) 48
Figure 25. Valeurs moyennes (± Intervalle de confiance au seuil de 5%) de la DCO en fonction de l'année (Year)..... 49
Figure 26. Valeurs moyennes (± Intervalle de confiance au seuil de 5%) de la DBO_5 en fonction du point d'échantillonnage (PE) 50
Figure 27. Valeurs moyennes (± Intervalle de confiance au seuil de 5%) du NtK en fonction du point d'échantillonnage (PE)..... 51
Figure 28. Valeurs moyennes (± Intervalle de confiance au seuil de 5%) du NtK en fonction de l'année (Year)..... 52
Figure 29.Valeurs moyennes (± Intervalle de confiance au seuil de 5%) du Pt en fonction du point d'échantillonnage (PE)..... 53
Figure 30. Carte d'iso-résistivité AB = 0,8m du premier filtre végétalisé 1..... 58
Figure 31. Carte d'iso-résistivité AB= 1,6m du filtre végétalisé 1 59
Figure 32. Cartes d'iso-résistivité AB = 2,4 m du filtre végétalisé 1..... 59
Figure 33. Carte d'iso-résistivité AB = 3,2 m du filtre végétalisé 1 60
Figure 34. Carte d'iso-résistivité AB= 4 m du filtre végétalisé 1 61
Figure 35. Cartes d'intensité pour différentes profondeurs d'investigation (0,2 m ; 0,4 m ; 0,6 m) du filtre végétalisé 1..... 62
Figure 36. Cartes d'intensité pour des profondeurs d'investigation de 0.8 et 1 m du filtre végétalisé 1..... 63
Figure 37. Cartes d'iso-résistivité et d'intensité du filtre végétalisé 1 à différentes profondeurs d'investigation..... 64
Figure 38. Localisation du système de drainage de l'eau dans le filtre végétalisé 1 Coupes géo-électriques 65
Figure 39: Cartes d'iso-résistivité du filtre végétalisé 2 pour les différentes profondeurs d'investigation..... 66
Figure 40. Cartes d'intensité du filtre végétalisé 2 pour les différentes profondeurs d'investigation..... 67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Les niveaux d'épuration et les systèmes employés 5
Tableau 2 : Les mécanismes épuratoires dans les filtres plantés 11
Tableau 3: Comparaison entre filtre à écoulement vertical et filtre à écoulement horizontal 13
Tableau 4: Relevé sommaire d'observations sur site de l'état actuel du système de post-traitement 36
Tableau 5: Qualité moyenne des eaux produites par la STEP Sidi Amor (2017 – 2020) 39
Tableau 6: Performances épuratoires (%) de la STEP Sidi Amor (2017 – 2020) 46
Tableau 7: Analyse de variance (ANOVA) 46
Tableau 8: Résultats de la prospection électrique du filtre végétalisé 1 55
Tableau 9: Résultats de la prospection électrique du filtre végétalisé 2 56

LISTE DES ABREVIATIONS

CE	Conductivité électrique
CF	Coliformes fécaux
CRDA	Commissariat Régional au Développement Agricole
DBO_5	Demande biochimique en oxygène
DCO	Demande chimique en oxygène
EUT	Eaux Usées Traitées
FAO	Food and Agriculture Organization
MES	Matières en suspension
NtK	Azote de Kjeldahl
ONG	Organisation non gouvernementale
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ONAS	Office National de l'Assainissement
PPI	Périmètre public irrigué
Pt	Phosphore total
STEP	Station d'épuration

INTRODUCTION

En Tunisie, les eaux usées traitées réutilisées en agriculture permettent de résoudre en partie le problème de la rareté des ressources hydriques et de diminuer les rejets d'effluents épurés dans les milieux aquatiques et terrestres. Cette ressource peut avoir différentes qualités, selon le type de traitement. En général, cette eau est traitée au niveau secondaire voire tertiaire dans certaines installations avant d'être rejetée et/ou réutilisée en agriculture conformément à la réglementation en vigueur. Cependant, le recyclage agricole des eaux usées traitées demeure une pratique relativement controversée dans certaines régions à cause de la fluctuation et/ou de la dégradation de la qualité de l'eau d'irrigation. Ce fait n'encourage pas l'agriculteur à l'exploiter et reste méfiant quant aux risques sanitaires y associés. De plus, la législation tunisienne limite son exploitation en irrigation à des cultures à faible valeur ajoutée ce qui expliquerait, mais qu'en partie, la réticence de la profession au recyclage agricole des eaux usées et les faibles taux d'intensification agricole enregistrés en irrigué dans certaines régions, en l'occurrence, le périmètre irrigué de Borj Touil. En effet, la mauvaise qualité des eaux usées traitées constitue la contrainte majeure au recyclage agricole auquel s'ajouterait vraisemblablement la disponibilité de l'eau d'irrigation en continue et/ou en quantité suffisante.

Il est important de souligner que la gestion de la réutilisation des eaux usées traitées (REUT) implique un très grand nombre d'acteurs en Tunisie. Les institutions étatiques ont un rôle central dans le processus de décision de la REUT et cela quel que soit son usage : agricole, espace vert (touristique et municipal), golf et le rechargement de nappes. La recherche, les bailleurs de fonds, les industriels, des groupements d'usagers ainsi que des associations de la société civile implantées au niveau des régions viennent compléter le panorama des parties prenantes de la REUT en Tunisie. Avec un contexte institutionnel local en pleine évolution, particulièrement favorable aux coopérations de proximité, plusieurs projets ont été initié pour l'amélioration de la qualité des EUT, en l'occurrence, « le projet pilote de valorisation de la réutilisation des EUT dans le périmètre irrigué de Borj Touil dans le Gouvernorat de l'Ariana », financé par la Banque Mondiale et porté par la société civile (GDA Sidi Amor) en étroite collaboration avec l'ONAS et le CRDA au profit des agriculteurs de la région.

Le projet pilote consiste en la conception et la réalisation d'ouvrages de post-traitement (filtres plantés à roseaux, bassin de maturation et filtres à sable) des eaux usées épurées produites par quatre stations d'épuration (Charguia, Choutrana I et II et Côtière Nord) et à l'aménagement de parcelles agricoles irriguées par ces eaux, situées dans le périmètre irrigué de Borj Touil et au niveau du domaine GDA Sidi Amor. Cela s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de la qualité des eaux usées traitées utilisées dans ce périmètre et a vocation de promouvoir le développement des activités agricoles innovantes utilisant les eaux usées traitées. Le système de traitement comprend deux filtres plantés à écoulement horizontal en sous surface. Cet ouvrage est une pièce maitresse du système de post-traitement des EUT. En effet ce dernier permet par le biais de phénomène physique chimique et biologique, la réduction de la fraction organique polluante, donc la réduction de des matières en suspension, la DCO et la DBO mais également un abattement non négligeable des germes pathogènes. Comme toute station d'épuration, une installation de ce type doit faire l'objet d'une surveillance et d'un entretien régulier, notamment l'inspection des ouvrages et l'inspection du fonctionnement afin de limiter l'amortissement des filtres et conserver des rendements épuratoires satisfaisants.

En règle générale, les eaux usées traitées à réutiliser en irrigation, seront mieux acceptées par les agriculteurs si leur épuration est mieux maîtrisée et que la qualité de ces eaux traitées est plus stable et respecte les normes de rejet. L'objectif de notre travail est de contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la station pilote de Sidi Amor, compte tenu du rythme de fonctionnement mitigé depuis la mise en eau du système, mais également le rythme d'alimentation alterné des massifs filtrants au regard de la fluctuation de la qualité de l'eau à l'entrée de la STEP. Pour ce faire, nous avons choisi, dans la limite du temps qui nous est alloué, de réaliser : i) une évaluation de la qualité l'eau usée traitée au regard des normes tunisiennes en vigueur et une analyse des performances épuratoires de la STEP basées sur l'historique des données fournies par l'ONAS, ii) un diagnostic sommaire des différents ouvrages, et iii) une étude plus poussée du problème de colmatage des deux filtres plantés basée sur la prospection électrique.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. GÉNÉRALITÉS SUR LES EAUX USÉES

1.1. DÉFINITION

Les eaux usées, aussi appelées eaux polluées, sont constituées de toutes les eaux qui parviennent dans les canalisations d'eaux usées (réseaux de collecte ou "égouts") dont les propriétés naturelles sont transformées par les utilisations domestiques, les entreprises industrielles, agricoles et autres. On englobe, aussi, les eaux de pluie qui s'écoulent dans ces canalisations (Bliefert et Perraud, 2001). Ces eaux de rejet peuvent être de composition et de quantités régulières ou irrégulières et peuvent s'étendre sur toute l'année ou simplement sur une saison déterminée (dans les industries dites saisonnières ou à campagne).

1.2. ORIGINES

En Tunisie, les eaux usées sont généralement collectées dans le réseau général de l'ONAS dans les zones municipales. Le réseau d'assainissement des eaux usées, de toutes origines, d'une agglomération a pour fonction de collecter ces eaux pour les conduire à une station d'épuration. Les rejets pollués de diverses origines se mélangent ainsi aux eaux naturelles. On distingue trois origines possibles pour les eaux usées : domestiques, industrielles et pluviales.

1.3. COMPOSITION

La composition des eaux usées est extrêmement variable en fonction de leurs origines (industrielles, domestiques, eaux de ruissellement). Elles peuvent contenir de nombreuses substances, sous forme solide ou dissoute, ainsi que de nombreux microorganismes. En fonction de leurs caractéristiques physiques, chimiques, biologiques et du danger sanitaire qu'elles représentent, ces substances peuvent être classées en quatre groupes : i) les micro-organismes, ii) les matières en suspension, iii) les éléments traces minéraux ou organiques, et iv) les substances nutritives.

1.4. EPURATION

L'épuration des eaux usées passe par différentes étapes, mais il y a également différentes méthodes de traitement pour ces eaux, tels que les traitements biologiques et les traitements physico-chimiques. Le traitement des eaux usées exige une méthode d'épuration appropriée pour chaque constituant. Ces méthodes peuvent être classées en différents niveaux de traitement (Tableau 1).

Les procédés biologiques sont utilisés pour le traitement secondaire des eaux résiduaires urbaines et éventuellement industrielles. Dans leur configuration de base, ils sont essentiellement employés pour l'élimination de la matière carbonée contenue dans l'eau usée. Des traitements complémentaires, dites tertiaires, peuvent être envisagées selon les objectifs que se donnent les gestionnaires ou les usagers des eaux usées (traitées) notamment la protection de l'environnement et le développement des options de recyclage.

Tableau 1. Les niveaux d'épuration et les systèmes employés (Crites et Tchobanoglous, 1998 ; Weber *et al*., 2002)

Niveau de traitement	**Définition**	**Systèmes**
Préliminaire	Première étape d'un traitement collectif d'eaux usées qui enlève les grandes particules, les huiles et graisses, et tout autre matériau qui peut perturber ou affecter l'exécution des opérations et des procédés qui suivent.	Criblage, dessablage, morcellement, déshuilage et dégraissage.
Primaire	Enlèvement d'une partie des solides décantables, des flottants et de la matière organique de l'eau usée.	Sédimentation primaire, fosse septique, bassin de stabilisation anaérobie…
Secondaire	Epuration de la matière organique biodégradable et des solides en suspension principalement par des processus biologiques. Le traitement secondaire s'appelle également le traitement biologique.	Bassin de stabilisation facultatif, lit bactérien, traitement biologique anaérobie, boue activée, filtres plantés, etc.
Tertiaire	Epuration des matériaux dissous et en suspension restants afin de clarifier l'effluent final. Implique l'abattement des pathogènes et des nutriments tels que le nitrate et le phosphore.	Bassin de maturation, filtre à sable, Epuvalisation, etc.

Le traitement biologique peut être effectué par exemple dans des étangs de stabilisation, dans des lagunes aérées, sur des lits bactériens ou dans des stations d'épuration à boues

activées. D'autres techniques d'épuration par voie naturelle, au développement relativement récent, telles que les filtres plantés à macrophytes (ou zone humides artificielles), sont progressivement adoptées pour le traitement des eaux usées domestiques voire industrielles (Weber *et al*., 2002).

2. ZONES HUMIDES ET EPURATION DES EAUX

2.1. DÉFINITIONS ET TYPOLOGIE

Les zones humides sont des écosystèmes qui ont une eau de faible profondeur permanente, ou une nappe permanente en surface ou proche de la surface, avec une végétation adaptée à des sols saturés en eau. Les zones humides sont caractérisées par une très grande capacité à dégrader et transformer la matière organique et d'autres substances. Les marais reconstitués ou construits (Constructed Wetlands, CW) utilisent cette capacité pour améliorer la qualité de l'eau (traitement des eaux usées urbaines, industrielles, agricoles, et de ruissellement).

Les marais construits (constructed wetlands), filtres plantés, lits végétalisés, roselières, ou encore marais artificiels selon la terminologie employée sont créés intentionnellement dans le seul but du traitement des eaux usées ou eaux de ruissellement, alors que les marais reconstitués (created wetlands) sont intentionnellement créés pour produire ou remplacer un habitat naturel (Hammer, 1992).

La première classification des marais artificiels est basée sur le type de végétaux macrophytes dominants. Ces derniers peuvent être des *macrophytes flottants*à la surface libre où le système racinaire flotte avec la plante entière en surface; des macrophytes émergents, où le système racinaire est ancré dans le fond et le végétal se développe au dessus de la surface; ou encore, des macrophytes immergés, dont le système racinaire est ancré dans le fond et le végétal se développe sous la surface (Brix and Schierup, 1989). Une autre classification, secondaire, se base sur les écoulements hydrauliques qui peuvent être d'une part des écoulements de surface ou écoulements de sous-surface et d'autre part, des écoulements verticaux ou écoulements horizontaux (Figure 1).

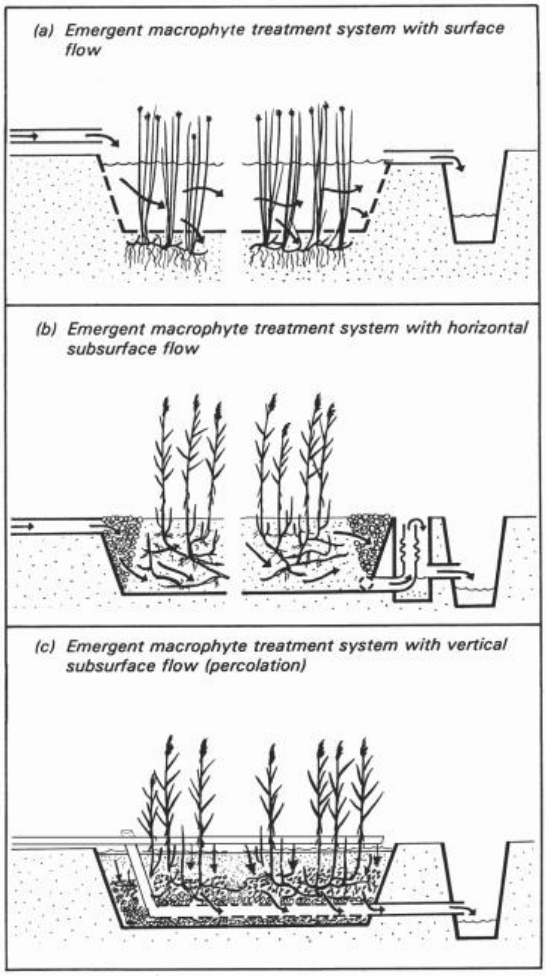


Figure 1. Les macrophytes émergents des systèmes d'épuration des eaux par filtre artificiel : a) système a écoulement de surface libre, avec l'espèce végétale Scirpus lacustris; b) système à écoulement horizontal de sous surface, avec l'espèce végétale Phragmites

- Les systèmes à écoulement de surface

Les systèmes à écoulement de surface libre sont inondés et la surface de l'eau est exposée à l'atmosphère ; alors que dans les écoulements de sous surface le niveau d'eau est dans le substrat du lit, sous la surface. Dans les systèmes à écoulement horizontal de sous surface, le substrat est en condition de saturation permanente ; dans les systèmes à écoulement vertical, le substrat est non saturé car l'eau est apportée à des intervalles de temps plus ou moins réguliers et percole au travers un substrat non saturé (similaire aux filtres à sable intermittents).

Tous les types de systèmes sont plantés d'au moins une espèce de macrophyte émergent aquatique dans un substrat de sol, gravier ou sable. Une combinaison de processus physiques, chimiques et biologiques va permettre un abattement des polluants par sédimentation,

précipitation, adsorption aux particules du substrat, assimilation par les tissus des plantes et transformation microbiologiques (Brix, 1993; Vymazal *et al*, 1998).

- Les systèmes à écoulement de sous surface

La plupart de ces systèmes sont planté de roseaux communs (Phragmites australis), certains incluant d'autres espèces végétales des zones humides. Le substrat est soit du sol, soit des graviers, qui assurent l'écoulement de sous surface. La majorité des systèmes basés sur un substrat de type sol sont confrontés à des problèmes de ruissellement de surface, et les systèmes à substrat type graviers font face au colmatage. En général, ces systèmes fournissent un traitement secondaire des eaux usées domestiques pour des petites collectivités. Ils peuvent servir dans certaines installations pour produire un traitement tertiaire.

2.2. EPURATION PAR LES MACROPHYTES

2.2.1. LES MACROPHYTES

La grande majorité des plantes aquatiques qui croissent dans les marais sont des macrophytes. Ils utilisent l'énergie solaire pour assimiler le carbone inorganique de l'atmosphère et produire la matière organique, qui elle-même fournit de l'énergie aux organismes hétérotrophes (animaux, bactéries et champignons). Leur grande productivité est généralement associée à une grande productivité hétérotrophique, telle que par exemple une très grande capacité à décomposer et transformer la matière organique ainsi que d'autres substances. Bien que les principaux processus épuratoires des marais artificiels soient physiques et microbiologiques, les macrophytes ont plusieurs fonctions en relation au traitement épuratoire de l'eau. Il y a trois groupes principaux de macrophytes (Figure 2) selon leur mode de vie (Brix and Schierup, 1989; Cronk andFennessy, 2001; Wetzel, 2001) :

- Les macrophytes émergents aquatiques : ces plantes sont morphologiquement adaptées à une croissance dans des substrats noyés ou submergés grâce à leur espaces aérifères internes qui transportent l'oxygène depuis les feuilles jusqu'aux racines et rhizomes.
- Les macrophytes à feuilles flottantes : englobent les espèces dont les racines sont ancrées dans le substrat et des espèces qui flottent librement à la surface.
- Les macrophytes aquatiques immergés : ont leur tissus photosynthétiques complètement immergés, leurs fleurs sont généralement exposées à l'atmosphère.

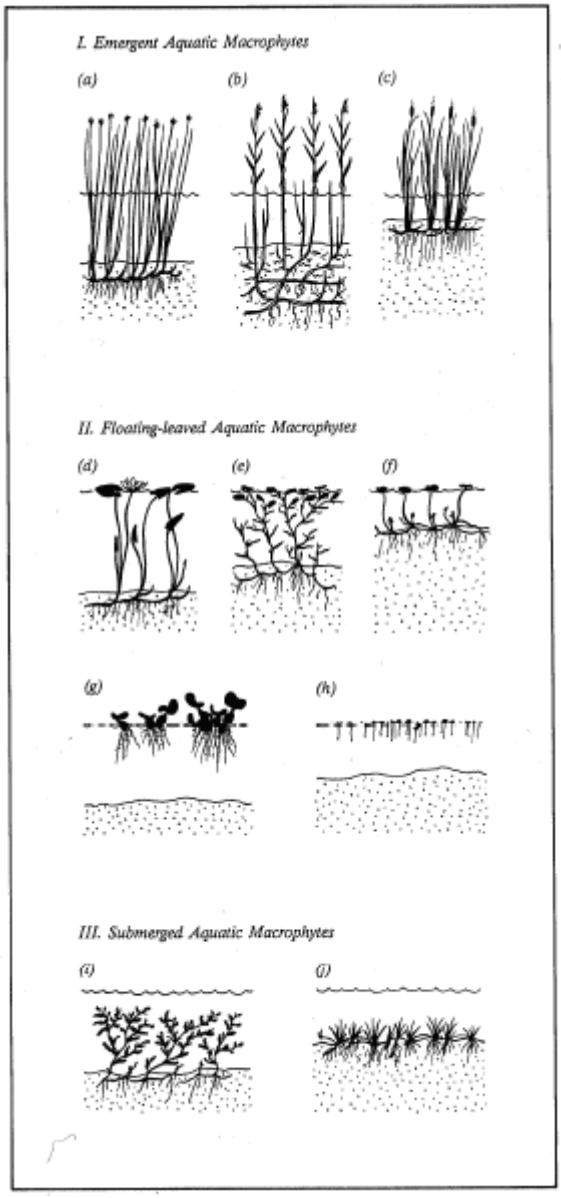


Figure 2. Les différentes formes de vie des marophytes aquatiques :a) Scirpus lacustris, (b) Phragmites australis, (c) Typha latifolia, (d) Nymphaea alba, (e) Potamogeton gramineus, (f) Hydrocotyle vulgaris, (g) Eichhornia crassipes, (h) Lemna minor, (i) Potamogeton crispus, and (j) Littorella unifloran (Brix and Schierup, 1989)

Le rôle le plus important des macrophytes en relation avec le traitement des eaux usées sont les effets physiques des tissus végétaux (par exemple, le contrôle de l'érosion, la filtration, surface d'attache pour les micro-organismes). Le métabolisme des macrophytes (prélèvement par la plante, relargage d'oxygène) influe sur le traitement épuratoire de façon variée selon le dimensionnement des systèmes.

2.2.2. LES FILTRES PLANTÉS

Les filtres plantés de roseaux ou à macrophytes dites aussi les filtres végétalisés, sont créés intentionnellement dans le seul but du traitement des eaux usées (ou eaux de ruissellement). Leur fond est imperméabilisé pour éviter toute contamination du sol par les eaux polluées.L'épuration est assurée par un temps de séjour de l'eau chargée en polluants qui circule à travers un substrat de filtration, sur lequel poussent des macrophytes enracinés émergents. Comme dans la nature, l'eau est épurée par l'action de microorganismes divers principalement des bactéries qui colonisent la porosité du massif filtrant et fixées sur les racines des plantes. En effet, ces systèmes emploient les racines des plantes pour fournir un substrat où peut se développer une croissance bactérienne, qui elles-mêmes emploient les nutriments contenus dans les effluents pour transférer l'oxygène. Les bactéries effectuent la majorité du travail dans ces systèmes, bien qu'il y ait également une certaine quantité d'azote, de phosphore et de potassium qui soit capté par les plantes. Le mécanisme majeur d'épuration de l'azote dans les marais construits est la nitrification-dénitrification.

On distingue deux types de filtres plantés, à écoulements de sous surface, suivant le sens de filtration ayant des rôles épuratoires propres :

- Les filtres plantés de roseaux à écoulement vertical (Figure 3) : l'eau s'écoule depuis la surface du lit vers l'intérieur, de manière verticale, permettent l'élimination de la matière en suspension ainsi que la nitrification de la matière organique par la rhizosphère.
- Les filtres plantés de roseaux à écoulement horizontal (Figure 4) : l'eau s'écoule dans le lit de manière horizontale. Les filtres à écoulement horizontal est le siège de la dénitrification.

Les principaux mécanismes d'épuration dans les filtres plantés sont rapportés dans le tableau 2.

L'une des caractéristiques principales des systèmes à écoulement de sous surface, qu'ils soient à écoulement vertical ou horizontal, est l'écoulement de l'eau à travers le substrat. Le substrat doit respecter un équilibre entre d'une part, une grande conductivité hydraulique et des conditions appropriées pour le développement des végétaux et d'autre part, une surface spécifique suffisante des graviers utilisés pour permettre le bon développement du biofilm afin d'éviter les problèmes de colmatage. Le diamètre moyen du sable et des graviers utilisés pour les filtres à écoulement de sous surface va de 0,3 à 12 mm.

Tableau 2. Les mécanismes épuratoires dans les filtres plantés

Composant	Mécanisme épuratoire
Solides en suspension	▪ Sédimentation/filtration et dégradation
DBO	▪ Dégradation microbiologique (aérobie et anaérobie) ▪ Sédimentation (accumulation de matière organique/ boue à la surface des sédiments)
Azote	▪ Ammonification suivie de la nitrification et dénitrification microbiologique ▪ Prélèvements par les plantes ▪ Volatilisation de l'ammoniac
Phosphore	▪ Sorption sur le substrat (adsorption- réactions de précipitation avec l'aluminium, le fer, le calcium et les minéraux argileux du sol) ▪ Prélèvement par les plantes
Pathogènes	▪ Sédimentation/filtration ▪ Mortalité naturelle ▪ Radiation UV ▪ Excrétion d'antibiotiques par les racines des macrophytes

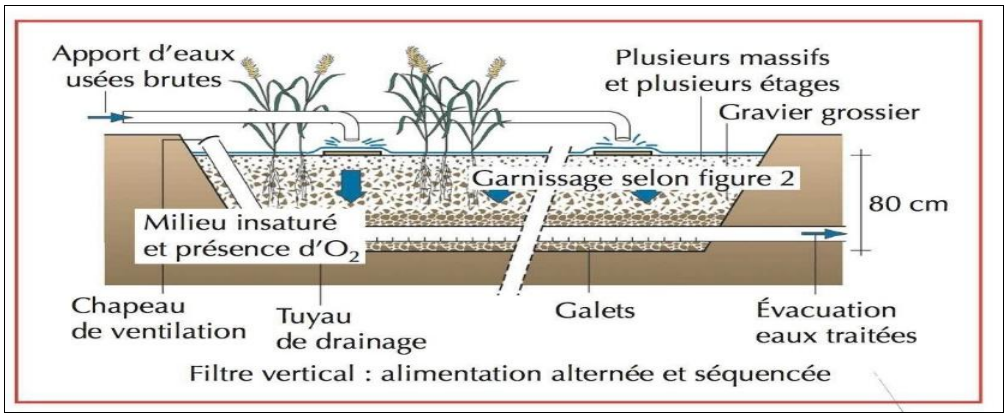


Figure 3. Filtre planté de roseaux à écoulement vertical (Agence de l'eau RMC, 1999)

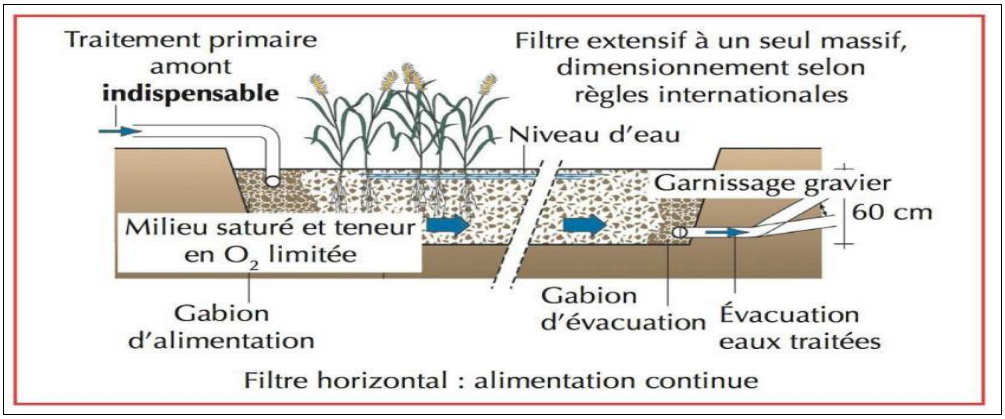


Figure 4. Filtre planté de roseaux à écoulement horizontal (Agence de l'eau RMC, 1999)

Généralement une station comporte plusieurs bassins à écoulement vertical disposés en « parallèle » convergeant dans un unique bassin à écoulement horizontal. Le but étant de faire fonctionner les bassins verticaux par intermittence. Une phase de travail avec nitrification et filtration, suivi d'une phase de repos avec aération de la rhizosphère. Tout ceci pour optimiser les conditions aérobies au sein de ces bassins. On dit qu'ils fonctionnent par bâchées successives d'eau brute. Alors que le bassin à écoulement horizontal est maintenu à saturation d'eau pour favoriser l'action des bactéries anaérobies de dénitrification.

Une synthèse comparant les filtres plantés à roseaux vertical (FPRv) et les filtres plantés à roseaux horizontal (FPRh) est rapportée dans le Tableau 3.

Tableau 3. Comparaison entre filtre à écoulement vertical et filtre à écoulement horizontal (CEMAGREF, 2007)

	Eaux Usées	Condition	Dégradation	Alternance	Alimentation	Dimensionnement	Hauteur	Dénivelé
FPR_v	Brutes	Aérobie	Carbone + Nitrification complète	Indispensable	Bâchées	2-2,5 m^2. hab^{-1}	60 cm	Utile
FPR_h	Issues d'un FPRv	Anoxique	Carbone + Nitrification partielle, Dénitrification complète	Non	En continue	(1^{er} étage FPRv) + 2 m^2. hab^{-1} de FPRh		Inutile

2.2.3. LAGUNAGE

En général, une filière de lagunage se compose d'une succession de bassins où l'on privilégie un type d'écosystème épuratoire spécifique. Les bassins de lagunage sont classés en fonction de l'environnement biologique prédominant ou selon leur type de végétation.

En fonction de l'environnement biologique on distingue le lagunage aérobie, anaérobie, facultatif et de maturation (finition). Les bassins de finition ont une large population algale, qui joue un rôle essentiel dans le procédé ; ils sont parfois appelés bassins naturels ou photosynthétiques. Ces derniers sont des lacs artificiels dont la profondeur est de 1 à 1,5 m. Utilisé en traitement secondaire et surtout tertiaire, les lagunes de maturation assurent une finition/polissage des effluents avant rejet et surtout sont employées à l'abattement des germes de contamination fécale dans une filière lagunage ou après un traitement compact (lagunage tertiaire). Leur fonction première est donc l'abattement des pathogènes. Ils ne participent que très peu à l'abattement de DBO, mais par contre ils sont très performants pour la réduction des nutriments. Les mécanismes principaux de l'élimination des bactéries dans les bassins de maturation sont :

- Le temps de rétention dans le bassin et la température ;
- Un pH élevé (> 9) combiné à l'insolation ;
- Une forte intensité lumineuse, combinée avec une grande concentration en oxygène dissous.

On peut classer également les lagunes selon leur type de végétation en lagune à microphytes et lagune à macrophytes.

Les lagunes à microphytes sont des bassins à biomasse végétale constitué par des algues microscopiques nommé des phytoplanctons (algues bleues, vertes ou brunes) qui produisent

l'oxygène dissous O_2 ; leur peuplement varie en fonction de plusieurs facteurs, tels que la profondeur de l'eau, la température, la charge organique, etc. Ce type de bassin est caractérisé par une faible profondeur et un long temps de séjour.

Les lagunes à macrophytes est un écosystème qui comprend des végétaux macroscopiques (macrophytes) qui comprennent des formes libres (ex. : lentilles d'eau, jacinthes d'eau, laitues d'eau…) ou fixées (ex. : roseaux). Utilisée en traitement secondaire ou tertiaire sur des effluents faiblement concentrés, l'efficacité de ces lagunes n'est pas vraiment démontrée. Cette technique nécessite en effet d'exporter régulièrement la biomasse produite, opération relativement lourde.

Les bassins de maturation sont également des lagunes à microphytes dont le fonctionnement est proche des lagunes facultatives mais où les conditions sont essentiellement aérobies compte tenu des faibles charges organiques appliquées à ce niveau de traitement.

3. REUTILISATION DES EAUX USEES

3.1. DOMAINES ET AVANTAGES

La FAO définit les eaux usées comme : « Eau qui n'a pas de valeur immédiate pour le but pour lequel elle a été utilisée ou pour laquelle elle a été produite en raison de sa qualité, de sa quantité ou du moment où elle est disponible. Cependant, les eaux usées d'un utilisateur peuvent être utilisées pour fournir un autre utilisateur dans un autre lieu. Les eaux de refroidissement ne sont pas considérées comme des eaux usées ».

En se fiant à la qualité des EUT, on peut avancer différents types d'usages :

- Dans le domaine agricole, en irrigation pour couvrir le déficit en eau
- Dans le domaine industriel, comme eau de « process », pour tous les cycles thermiques, pour le lavage…
- Dans le domaine de l'environnement, pour la recharge des nappes phréatiques, pour le maintien d'un débit sortant minimal…
- Dans le domaine urbain pour le lavage des rues…

La réutilisation des eaux usées traitées en agriculture présente plusieurs avantages, elle peut contribuer, à titre indicatif et non exhaustif, à :

- Réduire la pression sur les ressources en eau conventionnelles, et diminuer la pression par ailleurs des rejets des eaux usées épurées dans les milieux récepteurs
- Multiplier les opportunités d'emplois verts et de valorisation des sous-produits d'épuration
- La disponibilité régulière des ressources en eau au fil du temps et la présence des éléments nutritifs
- La possibilité de développer des cultures gourmandes en eau et/ou industrielles.

3.2. USAGES DES EUT DANS LE MONDE

Au cours des dernières années la réutilisation des eaux usées a connu une croissance très rapide, même dans certaines régions qui ne subissent pas actuellement un stress hydrique. Le volume total des EUT dans le monde s'élève à 160 milliards de m^3/an (AFD, 2011). Les volumes de réutilisation des eaux usées ont augmenté d'environ 10 à 29 % par an en Europe, aux États-Unis et en Chine et jusqu'à 41 % en Australie (Aziz et Farissi, 2014).

Avec l'amélioration des technologies de traitement des eaux usées, leur réutilisation connaît une hausse remarquable principalement dans les pays développés. Environ 1,7 millions de m^3 d'EUT sont réutilisées par jour dans plusieurs pays, comme par exemple en Californie, en Floride, au Mexique et en Chine (Lazarova et Brissaud, 2007).

En Floride et en Californie, respectivement 34 % (340 000 m^3/j) et 63 % (570 000 m^3/j) du volume total des EUT sont alloués à l'agriculture (Wright et Missimer, 1995).

Cette évolution quantitative s'est accompagnée d'une diversification des cultures conduites en irrigué à partir des EUT telles que les cultures maraîchères à Noirmoutier en France, où l'irrigation concerne les pommes de terre (Puil, 1998) et la betterave à Clermont-Ferrand sur un périmètre de 580 ha.

3.3. REUTILISATION DES EUT EN TUNISIE

Jusqu'à ce jour, la valorisation des EUT, bien que placée comme axe essentiel dans la mobilisation des eaux non conventionnelles, a vu sa progression considérablement ralentie

.

En 2017, les effluents de 66 STEPs sont concernés par la valorisation pour un volume d'environ 62 Mm^3 d'eaux usées traitées (MARHP, 2018) :

- Valorisation agricole : 30 STEP irriguent 31 périmètres irrigués (15,4 Mm^3).
- Valorisation à des fins récréatives : 8 STEP irriguent 10 terrains de golf (6,5 Mm^3 pour 1040 h) ; S'y ajoute un certain nombre d'espaces verts (parcs, jardins et espaces verts routiers) plus 27 espaces verts de STEP (0,7 Mm^3 pour l'irrigation de 450 h).
- Valorisation pour la préservation de la ressource : 2 STEP pour la recharge de nappe (0,5 Mm^3).
- Valorisation industrielle : elle est encore très marginale et peu prise en considération ; 1 STEP (Gafsa) pour PPI et usage industriel (Groupe chimique – 0,2 Mm^3).
- Valorisation environnementale : 33,5 Mm^3 au profit de zones humides / agro-écologiques ; cependant il ne s'agit pas encore d'un usage régulé de réutilisation des EUT, puisqu'il s'apparente plus à un rejet dans le milieu naturel (oueds, sebkhas, etc.).

Le volume des EUT a atteint 270 Mm^3 en 2018 provenant de 122 STEP. 32 STEP fournissent de l'eau à 33 périmètres irrigués d'une surface totale de 8530 ha. Toutefois, seulement environ 30% de cette surface est réellement irriguée. A titre d'exemple, le principal périmètre irrigué avec les EUT est celui de Borj Touil (gouv. de l'Ariana) dont la superficie est de 3145 ha mais la superficie irriguée se limite à environ 400 ha. Par ailleurs, le volume des EUT réutilisé tout usage confondu ne dépasse pas 25% des quantités disponibles. La réutilisation des eaux épurées en irrigation se heurte principalement au problème de la qualité des eaux qui est non stable. En effet, la salinité des eaux épurées est souvent élevée, ce qui limite sa réutilisation en irrigation (MARHP, 2019).

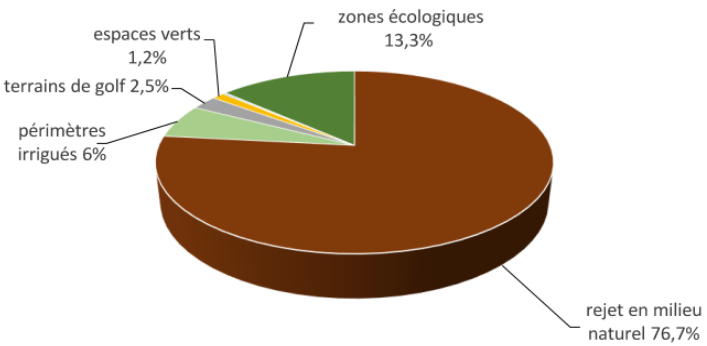


Figure 5. Utilisation des EUT (en % en fonction des usages) (MARHP, 2019)

4. CADRE REGLEMENTAIRE ET INSTITUTIONNEL DES EUT EN TUNISIE

4.1. CADRE REGLEMENTAIRE

Avant de présenter les principaux instruments juridiques en matière des eaux usées, il convient dans un premier temps de rappeler la définition adoptée pour les eaux usées et rapportée dans le décret n° 85-56 du 2 janvier 1985 relatif à la réglementation des rejets dans le milieu récepteur.

Selon l'article 2, les eaux usées au sens large du terme sont, les eaux à évacuer des zones bâties. Elles proviennent des ménages, des différentes installations communales ou publiques, de l'artisanat et de l'industrie y compris les eaux de refroidissement ainsi que les eaux de drainage et de ruissellement urbain.

- Code des eaux

Promulgué le 31 mars 1975, le Code des Eaux a consacré les principes fondateurs de la politique tunisienne contemporaine de l'eau : Centralisation de l'Administration de l'Eau, Priorité à l'Eau Potable, Valorisation maximale de la ressource, Règlement de l'Abonnement à l'Eau.

Le code des Eaux est constitué des réglementations de protection des ressources en eau ainsi que leur utilisation optimale. Amendé en 1987, 1999 et 2001, ce code fait actuellement l'objet d'une révision (en cours). En matière des eaux usées, et selon l'article 106, l'utilisation d'eaux usées à des fins agricoles n'est autorisée qu'après traitement approprié de ces eaux usées en station d'épuration et sur décision du Ministre de l'Agriculture, prise après accord du Ministre de la Santé Publique. Dans tous les cas, la réutilisation des eaux usées, même traitées, pour l'irrigation ou de l'arrosage de crudités est interdite.

- Les décrets

- Décret n°89-1047 du 28 juillet 1989, modifié par le décret n°93-2447 du 13 décembre 1993, fixant les conditions d'utilisation des eaux usées traitées à des fins agricoles
- Décret n° 2005 - 1991 Du 11 juillet 2005, relatif à l'étude d'impact sur l'environnement et fixant les catégories d'unités soumises à l'étude d'impact sur l'environnement et les catégories d'unités soumises aux cahiers des charges. Ce texte a stipulé l'obligation l'élaboration des études d'impact pour réalisation des périmètres irrigués avec des EUT.

- Les arrêtés

- Arrêté du 18/5/1990, portant homologation de la norme tunisienne relative aux spécifications d'utilisation des eaux usées traitées à des fins agricoles.
- Arrêté du 21/6/1994, fixant la liste des cultures qui peuvent être irriguées par les EUT. Les cultures autorisées sont :
  - ✓ Les cultures industrielles : coton, le tabac, le lin, de jojoba,
  - ✓ Les cultures céréalières,
  - ✓ Les cultures fourragères : bersim, du maïs, du sorgho,
  - ✓ Les arbustes fourragers : Acacia et Atriplex,
  - ✓ L'arboriculture : palmier, les agrumes et les vignes, sans utiliser l'irrigation par aspersion,
  - ✓ Les arbres forestiers,
  - ✓ Les plantes florales : rose, iris, jasmin, la marjolaine et le romarin,
- Arrêté des ministres de l'agriculture, de l'environnement et de l'aménagement du territoire et de la santé publique du 28 septembre 1995, approuvant le cahier des charges fixant les modalités et les conditions particulières de l'utilisation des eaux usées traitées des fins agricoles.

- Les normes

Les normes relatives aux EUT se répartisse en trois catégorie en fonction de l'usage des EUT.

- N.T 106.002

La norme tunisienne relative aux rejets d'effluents dans le milieu hydrique a pour objet de définir les conditions auxquelles sont subordonnés les effluents dans les milieux hydriques soumis à une autorisation (Décret n° 85-56 du 2 Janvier 1985) et les conditions de branchement et de déversement des effluents dans le réseau public d'assainissement (décret n° 79-768 du 8 Septembre 1979). La NT 106.02 date de 1989, mais depuis 2018 elle a fait l'objet d'une révision (Arrêté du ministre des affaires locales et de l'environnement et du ministre de l'industrie et des petites et moyennes entreprises du 26 mars 2018, fixant les valeurs limites des rejets d'effluents dans le milieu récepteur).

- N.T 106.03

La norme tunisienne relative aux spécifications des eaux usées traitées à des fins agricoles a pour objet de définir les conditions fixes des normes d'utilisation des EUT à des fins agricoles

dont le but principal est de prévenir les problèmes sanitaires qui peuvent affecter la santé du personnel d'exploitation et les consommateurs.

- Normes NT 106.20

Conçue pour réguler l'utilisation des boues d'épuration issues des ouvrages de traitement des eaux usées urbaines comme fertilisant.

L'ensemble des textes règlementaires et juridiques relatifs à l'usage des EUT se focalise essentiellement sur les usages en irrigation. Cela peut s'expliquer par l'approche prudente de l'Etat à répandre cette pratique en dehors du secteur agricole reflétant l'aspect restrictif de cet usage.

4.2. CADRE INSTITUTIONNEL

Le traitement et la réutilisation des eaux usées en irrigation impliquent plusieurs acteurs institutionnels, en amont et en aval, relevant de différents ministères et institutions de tutelles.

- Ministère des Affaires Locales et de l'Environnement (ONAS, DGEQV, ANPE, CITET) : Le ministère de l'environnement est chargé de l'élaboration de la politique générale de l'Etat dans les domaines relatifs à la préservation de l'environnement. Elle intervient aussi dans la mise en place des stratégies et des orientations de l'Etat en matière de développement durable en collaboration avec les autres ministères dans divers secteurs.
- Ministère de la Santé Publique (DHMPE, ANCSEP) : Ce ministère est chargé essentiellement de « veiller à la santé de la population » dans le cadre de l'exercice de ses compétences à travers des actions préventives et curatives.
- Ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques et de la Pêche (DGGREE, BPEH, DGRE, DGACTA, DGPCQPA, DGPA, OEP, AVFA, CRDAs) : Le MARHP est l'acteur central de la filière de réutilisation des eaux usées traitées à des fins agricoles. Conformément aux dispositions du code des eaux, le MARHP est tenu responsable de l'allocation, la mobilisation et l'exploitation des ressources en eau. Dans le cadre de la décentralisation, les CRDA représentent la prolongation du MARHP à l'échelle régionale. Ils sont chargés de la transposition et l'application de la politique du ministère et agissent en tant qu'acteur central régional dans le domaine de l'irrigation avec les EUT. A l'échelle organisationnelle, plusieurs directions interviennent dans les questions relatives aux ressources hydriques du pays et le secteur irrigué.
- Autres acteurs : D'autres parties sont également impliqués tels que : Les groupements de développement agricoles (GDA), ainsi que certaines institutions de recherche : INRGREF, CERTE, INAT, etc.

CHAPITRE II

MATERIELS ET METHODES

1. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1.1. CADRE GENERAL DU PROJET PILOTE

Le système de post-traitement des EUT, qui fait l'objet de la présente étude, a été réalisé dans le cadre du projet pilote de valorisation de la réutilisation des eaux usées traitées dans le périmètre irrigué de Borj Touil dans le Gouvernorat de l'Ariana. Le PPI de Borj Touil est le plus grand périmètre irrigué alimenté à partir des eaux usées traitées en Tunisie. Il couvre une superficie totale irrigable de 3145 ha. Ce projet pilote s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de la qualité des eaux usées traitées utilisées dans ce périmètre et a vocation de promouvoir le développement des activités agricoles innovantes utilisant les eaux usées traitées.

Financé par la banque mondiale, le projet de réutilisation des EUT implique trois parties prenantes principales qui sont : *i)*L'Office National d'Assainissement (ONAS) en tant que maitre d'ouvrage, *ii)* le Commissariat Régional au Développement Agricole de l'Ariana (CRDA) en tant que partenaire, chargé de la promotion de l'agriculture locale et de la gestion du périmètre irrigué de Borj Touil, et *iii)* le Groupement de développement agricole de Sidi Amor (GDA Sidi Amor) en tant que bénéficiaire de certaines composantes du projet. Le GDA Sidi Amor est une association tunisienne de développement durable dont l'objectif central est la valorisation du site naturel Sidi Amor.

Le dit projet pilote consiste en la conception et la réalisation d'ouvrages de post-traitement des eaux usées épurées, du bassin de régulation qui alimente le PPI de Borj Touil, et l'aménagement de parcelles agricoles et de démonstration irriguées par ces eaux, situées au niveau du domaine du GDA Sidi Amor et celui du périmètre irrigué. La surface totale de ces parcelles totalise une surface de 7,5 ha.

Ce projet relève de la localité de Borj Touil - Délégation de Raouad dans le Gouvernorat de l'Ariana à environ 25 Km au Nord de Tunis (Figure 6). La zone d'étude appartient au sous étage bioclimatique semi-aride supérieur caractérisé par un hiver doux et un été chaud. La température moyenne annuelle de la région est d'environ 18°C et la pluviométrie moyenne annuelle ne dépasse pas les 450 mm ; les valeurs moyennes annuelles de l'ETP oscillent entre 1200 et 1400 mm (Station de référence expérimentale de l'INRGREF à Cherfech).

Figure 6. Situation géographique de la zone d'étude

1.2. LES OUVRAGES DE POST-TRAITEMENT DES EUT

Les travaux de mise en place de la station pilote de post-traitement des EUT ont débuté en 2015. Ces travaux ont été achevés en 2016, avec des ajustements et des améliorations apportés au système courant de l'année 2017. Cette station est alimentée par gravité à l'aide d'un système de prise d'eau au niveau du bassin de régulation vers les ouvrages de filtration. Ce bassin reçoit les eaux usées traitées de quatre stations d'épuration à savoir Charguia, Côtière-nord et le complexe d'épuration Choutrana. Il convient de rappeler que les eaux usées produites par ces quatre STEPs sont évacuées vers la mer de Raoued en passant par le canal à ciel ouvert El Khelij ; lequel canal alimente une station de pompage du CRDA qui a son tour refoule les eaux via deux conduites qui se déversent dans deux regards brise-charge au niveau du bassin de régulation pour desservir en eau d'irrigation le PPI de Borj Touil. Un schéma simplifié du transfert des eaux usées traitées est rapporté dans la figure 7.

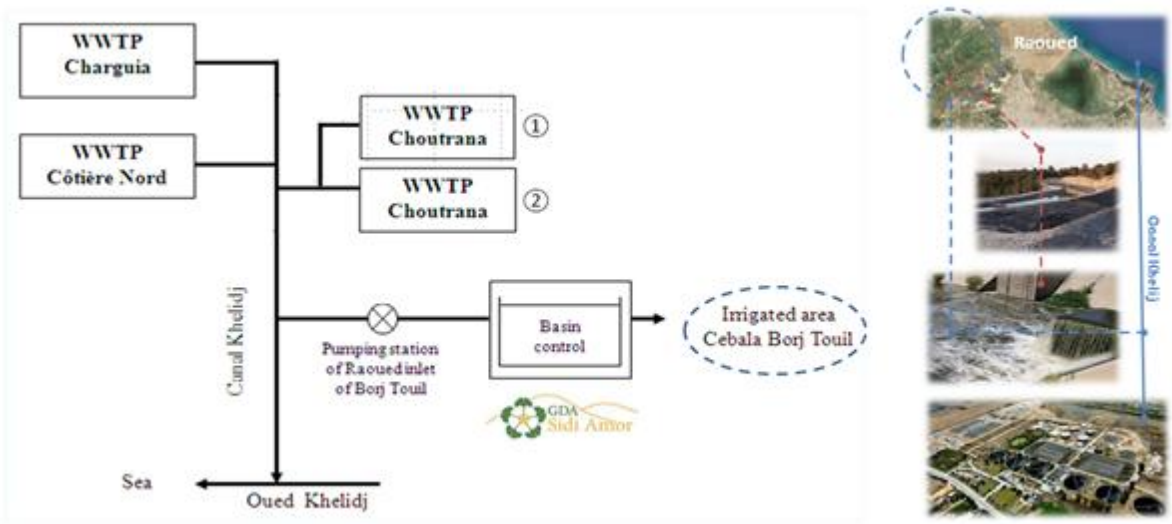


Figure 7. Schéma d'adduction et de transfert des EUT

La caractérisation des eaux épurées qui serviront à alimenter les ouvrages de post-traitement passe par une identification de la qualité des eaux usées épurées à la sortie des STEP, mais surtout au niveau de la station de pompage et le bassin de régulation lui-même. Les résultats d'analyses sont déterminants aussi bien pour le dimensionnement des ouvrages de traitement que pour la réutilisation de ces eaux en irrigation. Dans le cadre du dit projet pilote, une évaluation de la qualité des EUT du bassin de régulation du CRDA (BEUT) a été réalisée, dans un premier temps, pour tenir compte de l'approche intégrée de traitement tertiaire des eaux usées épurées et de l'utilisation de ces eaux en irrigation.

La base de dimensionnement des ouvrages de post-traitement est dictée par les résultats de l'*Etude de la qualité des eaux usées traitées et des boues* (SEGOR, 2015). La qualité des eaux usées qui sera retenue comme base de dimensionnement des ouvrages de traitement sera comme suit : DBO_5 : 100 mg O_2/l, DCO 160 mg O_2/l, MES : 100 mg/l. En termes de quantité, la station est conçue pour atteindre une capacité journalière de traitement de 520 m^3.

Au final, les ouvrages de post-traitement comprennent principalement les éléments suivants (Figure 8) :

- Ouvrage de répartition : Il s'agit d'un ouvrage qui récupère les eaux de manière gravitaire du bassin de régulation du CRDA en vue d'assurer leur répartition d'une manière équitable à l'entrée des deux filtres végétalisés.
- Filtres végétalisés : Le système de traitement comprend deux filtres plantés à roseaux (Phragmites australis) à écoulement horizontal montés en parallèle, initialement dimensionnés, de 660,5 m^2 chacun. Cet ouvrage est une pièce maîtresse du système de post-traitement des EUT.

Ce système permet par le biais de phénomènes physique, chimique et biologique, la réduction de la fraction organique polluante, donc la réduction des MES, la DCO et la DBO mais également un abattement substantiel des germes pathogènes.

- Ouvrage de collecte et de distribution: Il assure essentiellement la collecte des eaux en provenance des deux filtres végétalisés et l'alimentation du bassin de maturation avec les eaux filtrées.
- Bassin de maturation: Cet ouvrage constitue également un élément important du système de post-traitement, dont le rôle principal est l'abattement des germes pathogènes. Le volume du bassin de maturation est d'environ 1000 m^3, avec une profondeur de 1 m, et un temps de séjour de l'eau filtrée de 7 jours.
- Bassin Tampon : Ce bassin d'environ 120 m^3, adjacent au bassin de maturation, permet le stockage de l'eau nécessaire aux besoins intermittent du débit d'eau traitée bactériologiquement sans provoquer une diminution de la hauteur d'eau dans le bassin de maturation. Il alimente l'ouvrage de transfert de l'eau d'irrigation (eau usée post-traitée) vers les parcelles de démonstration dans le PPI de Borj Touil et le domaine du GDA.

Sur le plan de la qualité des EUT produites, la conception et le dimensionnement ainsi que l'exécution de ces ouvrages ont été réalisés dont l'objectif de garantir en premier lieu le respect des normes tunisiennes de protection de l'environnement et du recyclage agricoles des EUT à des fins agricoles, respectivement, NT 106.02 et NT 106.03.

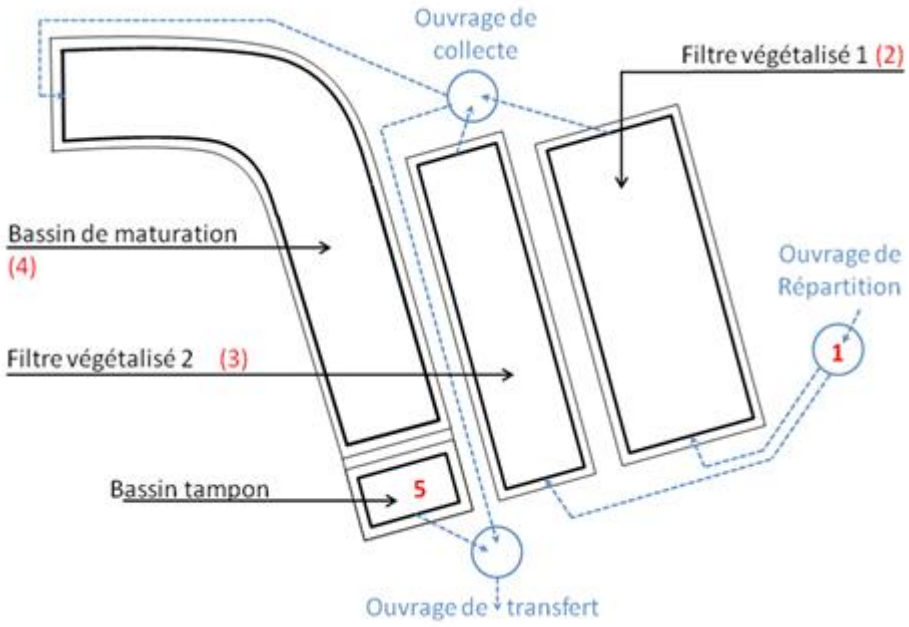


Figure 8. Schéma simplifié du système de post-traitement des EUT au GDA Sidi Amor

2. ANALYSE SOMMAIRE DE L'EXISTANT

Dans la limite du temps alloué à cette étude, nous avons choisi dans un premier temps de faire une analyse sommaire du système de post-traitement qui a pour objectifs :

- l'établissement des données générales de base, notamment les données sur la qualité des eaux produites ;
- la réalisation d'un diagnostic *participatif* des contraintes et des potentialités d'exploitation du système ; et
- la proposition d'ébauche de solutions pour les problèmes prioritaires.

2.1. COLLECTE ET TRAITEMENT DES DONNEES

Compte tenue de la diversité des enjeux que porte le projet pilote, en l'occurrence, l'amélioration de la qualité des EUT, nous nous sommes attardés dans un premier temps sur la collecte des données, essentiellement qualitatives, issues du *monitoring* de la qualité des eaux produites par les ouvrages de post-traitement, et ce, depuis la mise en eau du système en 2016. Plusieurs sources de données ont été prises en considération. Les données sont fournies : i) principalement par l'ONAS dans le cadre du suivi et du contrôle régulier du système (STEP Sidi Amor, patrimoine de l'ONAS depuis 2017), et ii) dans une certaine mesure à partir de quelques rapports de projets de fin d'études ou de recherches initiés récemment sur la station. Pour l'étude des performances de la STEP, toutes les données ont été rassemblées et organisées sur Excel.

Il convient de rappeler que les ouvrages de post-traitement doivent garantir le respect des normes suivantes :

- La norme 106.02 relative au rejet dans le domaine public hydraulique :
  - DBO_5< 30 mg/l
  - DCO < 90 mg/l
  - MES < 30 mg/l
  - CF < 2000 NPP/100 ml
  - Absence de salmonelles
  - SF < 1000 NPP/100 ml
  - …
- La norme NT 106.03
  - Œufs d'Helminthes < 1 œuf par litre
  - MES < 30 mg/l
  - …

Cependant, l'ensemble des données, *disponibles* et/ou *accessibles*, de suivi de la qualité des eaux produites par la filière de post-traitement ne couvrent pas la liste exhaustive des paramètres de contrôle à prendre en considération, qu'il s'agisse de la NT 106.02 ou 106.03.
Dans le cadre de cette étude, pour chaque variable quantitative, des analyses statistiques descriptives, avec de simples calculs de moyenne, d'écart-type, de valeurs min et max, et aussi de fréquences en subdivisant ces variables en classes ou plages (en tenant compte de la norme tunisienne), ont été menées. Les paramètres de base de l'analyse statistique sont : T°C, pH, CE, Salinité, MES, Turbidité, DBO_5, DCO, Chlorures, NTK, PT et CF. De plus, les rendements de chaque paramètre mesuré à la sortie de chaque ouvrage ont été calculés par rapport à l'entrée de la station (valeur initiale de l'eau brute). De même, les rendements épuratoires, pour chaque paramètre de pollution, à la sortie de chaque ouvrage ont été calculés par rapport à l'entrée du même ouvrage.

Il faut rappeler que les mesures pour chaque paramètre sont des mesures répétées dans le temps, depuis la mise en eau du système jusqu'à aujourd'hui. Ensuite, des analyses de variance (ANOVA) ont été menées pour les différents paramètres, ainsi que pour les rendements calculés, afin de tester l'effet Ouvrage, composé de cinq « modalités » : 1 (entrée station), 2 (sortie FV1), 3 (sortie FV2), 4 (entrée bassin de maturation) et 5 (sortie station :

bassin tampon). Il est à rappeler que les deux filtres sont montés en parallèle. Enfin, des comparaisons de moyennes ont été également effectuées, en utilisant le test de Tukey-Kramer.
Le logiciel statistique SAS, version 9.2 (moyennant les procédures Proc means, Proc mixed, Proc Freq) a été utilisé pour mener les différents calculs et analyses.

2.2. DIAGNOSTIC SOMMAIRE DES OUVRAGES

Afin d'élaborer un diagnostic *partagé* du système de post-traitement, nous avons consulté dans un premier temps : i) les différents documents techniques relatifs à la mise en place du projet pilote, ii) le manuel d'exploitation de la station de post-traitement depuis sa mise en eau, et iii) l'état récapitulatif des principales défaillances relevées par les différentes parties prenantes du projet.

Dans le cadre contextuel de cette étude, il s'agit entre autres de dresser une prise chronologique des évènements qui auraient impacté le fonctionnement du système et de rapporter surtout l'état des lieux actuel du système afin d'identifier à court terme les priorités d'actions à entreprendre pour conserver les performances épuratoires. Pour se faire, nous avons choisi de se limiter dans notre diagnostic à un nombre limité de visites exploratoires afin de vérifier et relever les principales contraintes d'exploitation et d'éventuelles défaillances d'ordre général…

2.3. PROSPECTION ELECTRIQUE DES FILTRES PLANTES

Le point clé de l'entretien d'un filtre est la gestion de son colmatage. En colmatant un filtre, on diminue les niveaux de traitement (un colmatage total provoque un écoulement de l'effluent par le top plein de surface) mais surtout on diminue la durée de vie de l'ouvrage.
D'après les informations fournies par les exploitants, la station pilote fait face depuis sa mise en eau à une alimentation en EUT intermittente caractérisée par de grandes fluctuations de la qualité de l'eau au niveau du bassin de régulation et à l'entrée des ouvrages de filtration, avec des accumulations des matières solides en premier lieu sous forme de boues dans la tranchée d'alimentation et en partie sur la surface des filtres végétalisés. Des débordements fréquents sont observés dans la tranchée d'alimentation et parfois même au niveau de l'ouvrage de répartition.
En marge des améliorations projetées de la qualité de l'eau d'alimentation pour éviter le colmatage des filtres, nous avons choisi dans le cadre de ce travail, compte tenu des problèmes apparents, de réaliser une investigation géophysique des massifs filtrants afin d'apporter des éléments de réponse sur le degré (risque) de colmatage et l'état de fonctionnement actuel des filtres plantés.

L'investigation géophysique est fondamentale pour la caractérisation d'un sol en profondeur. La méthode utilisée dans notre étude est celle des trainées électriques, moyennant des séries de mesures de la résistivité électrique apparente, et ce, afin de permettre l'identification des zones à haut risque en surface et en profondeur. Cette approche est utile dans notre contexte de travail pour cartographier les zones de colmatage et expliquer les problèmes apparents sur la surface des filtres (débordements, répartition hétérogène des macrophytes …). L'utilisation de la méthode de trainée électrique est une approche classique, récemment adoptée pour surveiller les problèmes de colmatage dans les filtres plantés à écoulement de sous surface.

2.3.1. PRINCIPE PHYSIQUE

La résistivité électrique (également appelée résistance électrique spécifique ou résistivité volumique) et sa conductivité électrique inverse, est une propriété fondamentale d'un matériau qui quantifie la force avec laquelle il résiste ou conduit le courant électrique.

La prospection électrique est basée sur la mesure de la résistivité apparente notée « ρ » à l'aide d'un dispositif de quatre électrodes plantées dans le sol, suivant la configuration de Wenner (Figure 9). Deux d'entre elles, situés aux limites extérieures, servent à générer un champ électrique dans le sol: *ce sont les électrodes d'injection ou de courant notées* A *et* B. Les deux autres notées M et N sont utiles pour mesurer la différence de potentiel, dite aussi le voltage qui résulte: *ce sont les électrodes de mesures ou de potentiel*. L'injection d'un courant d'intensité connue et la mesure de la distribution du potentiel électrique, nous donnent une estimation de la résistivité apparente du sous-sol. La profondeur de pénétration du procédé peut être réglée avec la distance entre les électrodes et le résistivimètre.

La prospection électrique suivant la méthode de Wenner est appropriée pour les structures horizontales plutôt que verticales. Elle est caractérisée par une bonne résolution des terrains superficiels. Ce dispositif est caractérisé par une profondeur de pénétration faible et une distance entre les électrodes de mesure / écartement qui représente le tiers de la longueur AB, ce qui donne une configuration d'électrode toujours identique (AM = MN = NB = a) et une différence de potentiel mesuré plus élevée.

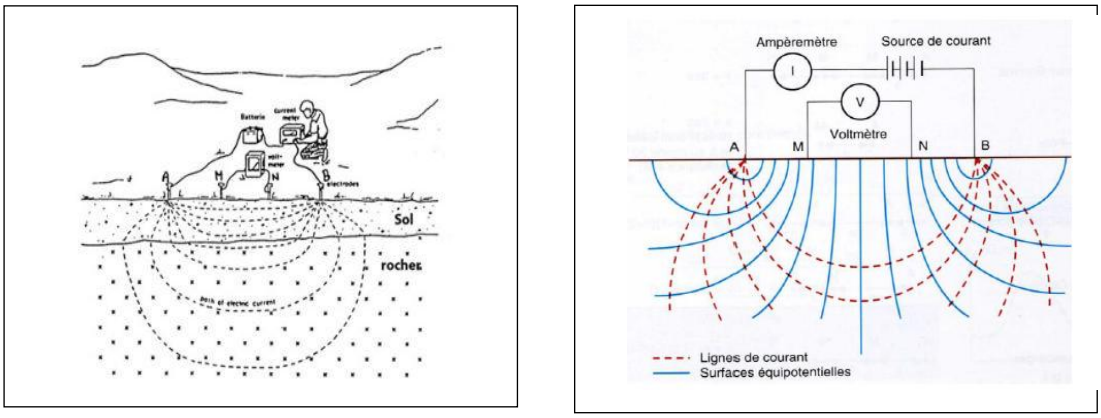


Figure 9. Principe de la mesure de la résistivité électrique (Wikhydr, 2016)

La méthode de la traînée électrique a été utilisée pour délimiter les zones d'anomalies correspondantes à variabilité horizontale des propriétés du sous-sol. Cette méthode s'intéresse à la détection de variations latérales de résistivités. Le principe, différent de celui du sondage électrique, est d'effectuer une série de mesures avec le même dispositif (même écartement entre électrodes) en déplaçant ce dernier le long d'un axe (Figure 10).

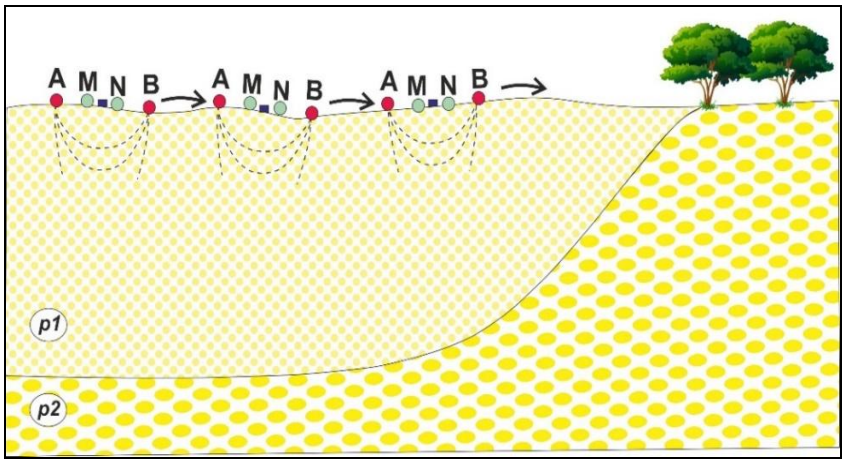


Figure 10. Mise en œuvre de la traînée électrique (Redalyc, 2015)

2.3.2. APPROCHE ADOPTEE / ADAPTEE SUR LE TERRAIN

Les mesures des résistivités apparentes sont réalisées à l'aide d'un dispositif quadripôle ABMN, en utilisant le dispositif Wenner avec différents écartements **(a)** entre électrodes **ABMN** soit **0.266 m**, **0.533 m, 0.8 m, 1.066 m** et **1.333 m** pour investiguer le sol, respectivement, à **0.2 m**, **0.4 m, 0.6 m, 0.8** et 1 **m** de profondeur.

La profondeur atteinte par les lignes de courant est directement fonction de l'espacement entre les 4 électrodes (a) d'injection et des résistivités vraies des terrains rencontrés.
Donc, plus l'écartement **(a)** entre les 4 électrodes est grand, plus la profondeur d'investigation **(P)** est grande.

Comme le dispositif Wenner est utilisé, alors toutes les électrodes sont équidistantes et espacées régulièrement ; avec : a = **AM = MN = NB = AB / 3**.

La résistivité apparente est obtenue par l'équation suivante : $\rho_a = 2\,\pi\,a\,\Delta V/I$

On considère généralement que la profondeur d'investigation est : **P = 3/4 a**

Le schéma d'acquisition est récapitulé dans la figure 11.

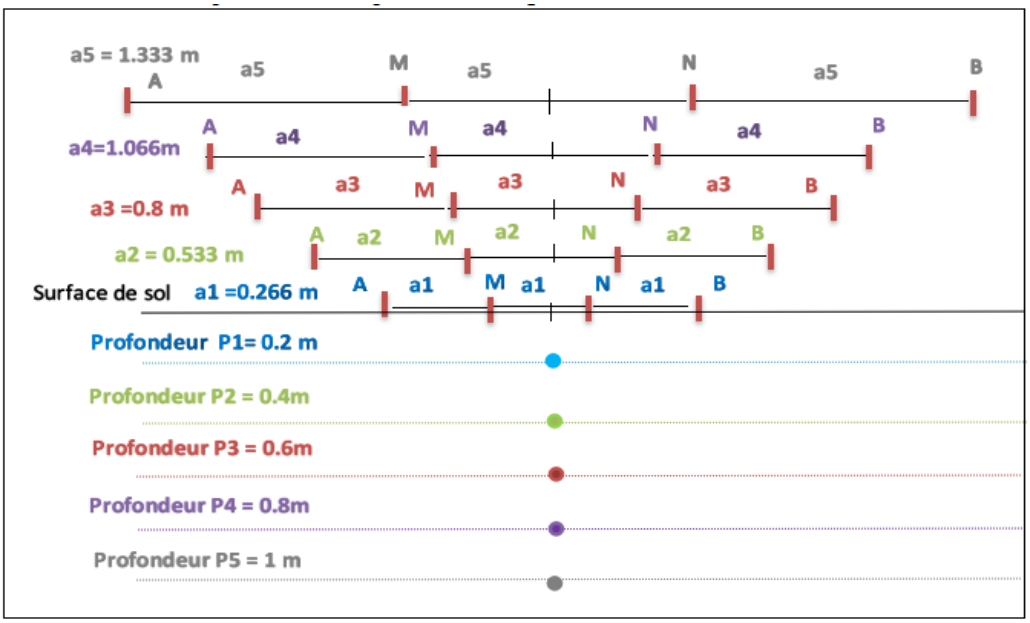


Figure 11. Schéma d'acquisition de la résistivité électrique avec le dispositif Wenner

Cette approche est appliquée sur les deux filtres végétalisés dont le maillage choisi est un carré de cote 5 m. La géométrie de chaque filtre impose un nombre de points de prospection bien déterminé : i) pour le filtre 1 : 27 points distribués sur 3 lignes, et ii) 22 points pour le filtre 2 distribués sur 2 lignes. Pour chaque point, 5 mesures sont effectuées respectivement pour 5 profondeurs. Au final, nous avons réalisé 47 points de prospection avec 235 mesures.

La figure 12 rapporte le plan de maillage adapté à la géométrie des deux filtres plantés sur un fond extrait de *Google Earth Pro*.

Figure 12. Carte du maillage adopté pour la prospection électrique des deux filtres végétalisées

2.3.3. MARTERIEL DE MESURE ET TRAITEMENT DES DONNEES

La méthode électrique nécessite, dans notre cadre de travail, trois types d'outils :

- Un matériel de positionnement servant à localiser le profil.
- Un matériel de mesure pour l'acquisition des données. Il comporte essentiellement : i) un système d'acquisition et un résistivimètre de type PASI GEA RM1, pour mesurer la résistivité apparente de milieu, l'intensité du courant I et la différence de potentiel ΔV, et ii) une batterie de type PASI P100-2-N pour avoir un courant électrique. Il comprend aussi le panneau électrique des électrodes, 4 câbles de connexion reliant les électrodes d'injection et de réception au système d'acquisition et des connecteurs de câbles.
- Un logiciel pour le traitement des données (Surfer).Surfer est un logiciel couramment utilisé pour le tracé de courbes de niveau et de surfaces en perspective.

Dans notre cas d'études les données d'entrées sont :

- X et Y représentent les coordonnées de chaque point et R représentant les valeurs de résistivité enregistrées lors de la prospection électrique ⇨ Pour établir les cartes d'iso-résistivités.

- X et Y représentent les coordonnées de chaque point et I représente les valeurs de résistivité trouvées lors de la prospection électrique ⇨ Pour établir les cartes d'intensités.

- Pour les coupes horizontales Y représente l'altitude de chaque point, P représente les différents profondeurs (0.2, 0.4, 0.6, 0.8 et 1 m) et R représente les valeurs de résistivités correspondent à chaque profondeur ⇨ Pour établir les coupes géo électriques de résistivités.

- Pour réaliser des coupes géo électriques verticales on prend comme données de base : X qui représente la Latitude de chaque point, P représentant les différentes profondeurs et R les valeurs de résistivités correspondant à chaque profondeur.

La méthode d'interpolation choisie pour le traitement des données et l'élaboration des cartes est celle de *Krigeage*. Il s'agit d'une méthode d'estimation linéaire, en géostatistique, garantissant le minimum de variance. Elle permet l'interpolation spatiale d'une variable régionalisée par calcul de l'espérance mathématique d'une variable aléatoire, utilisant l'interpolation et la modélisation variogramme expérimental.

CHAPITRE III

RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. PREDIAGNOSTIC DE LA STATION A MACROPHYTES

Il est à rappeler que : i) les études et les travaux de réalisation de la station ont commencé courant de l'année 2015, ii) l'achèvement des travaux et les premiers essais de conformité sont effectués courant de l'année 2016, iii) le début des essais de distribution des eaux produites aux bénéficiaires, suite à des travaux complémentaires d'amélioration, et la validation du système ont été réalisés courant de l'année 2017, iv) la distribution de l'eau d'irrigation a été assurée d'une manière régulière courant de l'année 2018, v) la distribution de l'eau courant de l'année 2019 était irrégulière à cause de l'approvisionnement en eau intermittent du système, liée essentiellement à une contamination par les salmonelles du réseau d'adduction des EUT, en amont du bassin de régulation (Canal Khelij), et une demande mitigée des bénéficiaires (année pluvieuse), et vi) la distribution de l'eau est relativement régulière dans le domaine du GDA (à la demande), mais en arrêt temporaire pour le PPI Borj Touil (nécessité de maintenance du réseau de distribution) ; évaluation en cours. La figure 13 renseigne succinctement les principales phases de ce projet.

Figure 13. Principales phases (sommaire) du projet pilote

Une visite générale au site de projet, depuis le bassin de régulation jusqu'au bassin tampon, nous a permis de relever l'ensemble des défaillances relevées dans le tableau 3. Il s'agit essentiellement de dégager les défaillances liées à l'amortissement de certains constituants du système ou des anomalies de fonctionnement liées entre autres aux contraintes d'exploitation actuelle de la station.

Différentes situations de non-conformité ont été observées en amont de la station de post-traitement notamment : *i)* la présence de flottants et de dépôts de boues dans le bassin de régulation, et *ii)* la détérioration du raccord coudé en tête du système de prise d'eau.

Il s'agit d'un accessoire de connexion entre le bassin de régulation et les équipements d'amenée d'eau vers les ouvrages de filtration. Des fuites dans les conduites d'amenée de l'eau usée traitée sont à signaler également.

A l'entrée de la station nous avons relevé dans un premier temps la dégradation de la grille, installée dans l'ouvrage de répartition en guise de mesure préventive de prétraitement (dégrillage) mais également la présence d'une couche superficielle de dépôts solides (colmatage des grilles). Par ailleurs, il est à signaler que les éventuelles fluctuations de la qualité de l'eau à l'entrée du système peuvent causer progressivement la dégradation du compteur d'eau placé au niveau de la conduite d'amenée

En ce qui concerne les deux filtres végétalisés, il convient de rappeler que lors de la mise en place de ces ouvrages, les dimensions considérées pour l'exécution des filtres ont été adaptées aux contraintes imposées par le lieu d'implantation retenu. Les dimensions relatives au système dans son état actuel sont mesurées *in situ* et vérifiées par le logiciel QGIS pour les filtres 1 et 2, respectivement, ~776 m^2 et ~464,6 m^2. En revanche, le système conserve la même capacité de traitement du volume journalier d'eaux usées (Q) réparti entre les deux filtres : le filtre 1 (~2/3 Q) et le filtre 2 (~1/3 Q).

Les premières observations concernant le premier filtre montrent la présence de zones mortes et une densité hétérogène des macrophytes marquée par une concurrence avec les mauvaises herbes. Des débordements d'eau ont été relevés au niveau de la tranchée d'alimentation du filtre 1 (Figure 14), mais également des traces de dépôt de boues sur la surface du filtre. Les mêmes observations sont rapportées pour le filtre 2, excepté la densité relativement homogène des roseaux. Cependant, les deux filtres présentent des signes de colmatage.

Figure 14. Surface de la tranchée d'alimentation du filtre planté 1 en charge

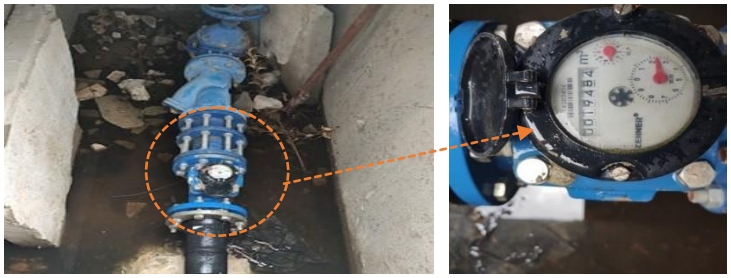
Le bassin de maturation (finition), ainsi que le bassin tampon, présente des signes d'eutrophisation et de développement algal assez important. On note également la présence de flottants et de dépôts solides. L'entretien (nettoyage des ouvrages par exemple) et l'exploitation des différentes composantes sont des leviers considérables pour augmenter la durée de vie de la station.

Dans la liste succincte des désordres observés (liste non exhaustive), certains défauts comme par exemple le choix de la hauteur de revanche (hauteur entre la surface du filtre et le haut du talus entourant ce dernier) ou l'absence d'un ouvrage de prétraitement (décantation, projeté par l'ONAS), ne sont pas évoqués. Des défauts fréquents mais dont on ne mesure pas bien les conséquences et/ou qui ne sont peut-être pas traités correctement, en l'occurrence le colmatage, doivent être étudiés en urgence, en vue des observations évidentes de dysfonctionnement des filtres plantés, et ce, afin d'évaluer les conséquences sur le fonctionnement du système et ses performances épuratoires et proposer des mesures correctives en marge des améliorations d'ores et déjà entamées par l'ONAS.

L'analyse des performances épuratoires de la station repose essentiellement sur les rendements de dépollution et les rendements hydrauliques du système. Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail, compte tenue des données disponibles, concernent essentiellement les *rendements de dépollution* des différents ouvrages de filtration et une cartographie de l'état de colmatage des deux filtres plantés réalisée sur la base d'une campagne de mesures de *prospection électrique*.

Tableau 4. Relevé sommaire d'observations sur site de l'état actuel du système de post-traitement

Composante	**Illustration**	**Observations**
Bassin de régulation du CRDA		• L'eau du bassin de régulation est chargée en matières solides.

Composante	Illustration	Observations
Prise d'eau vers le système de post-traitement		• La coude de prise d'eau est détériorée, laissant passer vraisemblablement les flottants et les dépôts du bassin de régulation. • Conduite d'amenée de l'eau : fuite localisée au niveau d'un raccord de jonction.
Ouvrage de répartition : entrée du système		• Le compteur au niveau de l'ouvrage de répartition est vraisemblablement en panne. • La grille placée en amont du système est en mauvaise état.

Composante	Illustration	Observations
Filtre végétalisé 1		• Présence de dépôts de boues à l'entrée du système et sur la surface du filtre • Densité faible et hétérogène des macrophytes marquée par une concurrence avec les mauvaises herbes.
Filtre végétalisé 2		• Présence d'une couche superficielle de boues • Densité relativement homogène des roseaux mais présence de mauvaises herbes.
Chambre de collecte et de distribution		• Les deux compartiments de la chambre de collecte récupèrent respectivement les eaux usées traitées par le filtre 1 et 2. : vraisemblablement fuites au niveau des coudes de sortie raccordées aux drains de collecte.
Bassin de maturation		• Développement d'algues • Problèmes de flottants et de dépôts au fond du bassin

Composante	Illustration	Observations
Bassin Tampon		• Problèmes de flottants et de dépôts au fond du bassin

2. CONFORMITÉ ET PERFORMANCES ÉPURATOIRES

Les données relatives à la qualité des eaux usées traitées nous ont servi dans un premier temps à observer si les eaux produites par la STEP Sidi Amor respectaient bien les exigences réglementaires de traitement qui leur étaient imposées, notamment pour les paramètres suivants : pH, CE, MES, DCO, DBO_5, NtK, Pt, et CF. Des résultats préliminaires de la qualité moyenne des eaux produites par la STEP sont rapportés dans le tableau 5.

Tableau 5. Qualité moyenne des eaux produites par la STEP Sidi Amor (2017 – 2020)

Paramètre	Moyenne	Min - Max	NT 106.02*		NT 106.03
			DPM	DPH	
pH	7,49	6,58 - 9,2	6,5 - 8,5		6,5 - 8,5
CE (µS/cm)	3464,29	1410 - 8300	5000		7000
MES (mg/l)	23,33	2,40 - 100	30		30
DCO (mg O_2/l)	61,82	19 - 132	125		90
DBO_5 (mg O_2/l)	20,41	3 - 140	30		30
NtK (mg N/l)	13,82	2,80 - 84,1	30	5	-
Pt (mg/l)	1,2	0,07 - 4,9	2		-
CF (log NPP/100 ml)	4,83	1,55 - 6,05	3,3		-

* Arrêté du 26 mars 2018

Il convient de rappeler que le suivi et le contrôle de la qualité des eaux usées traitées de la STEP Sidi Amor sont réalisés au niveau de 5 points prélèvements, depuis le démarrage de la mise en place du système (2015 – 2020) :

- **P1:** Entrée de la STEP (Entrée)
- **P2:** Sortie du filtre végétalisé 1 (FV 1)
- **P3:** Sortie du filtre végétalisé 2 (FV 2)
- **P4:** Entrée du bassin de maturation (BM)
- **P5:** Sortie de la STEP (Bassin tampon)

➢ **pH :** Le pH des eaux produites par la STEP, destinées par ailleurs à l'irrigation de parcelles de démonstration, est un paramètre très important qui affecte entre autres la solubilité des métaux ainsi que l'alcalinité des sols. La gamme de variation du pH des eaux utilisées à des fins agricoles est limitée par la norme tunisienne entre 6,5 et 8,5. L'évolution du pHdes eaux usées post-traitées est rapportée dans la figure 15, ainsi que la variation du pH aux différents points de prélèvement.

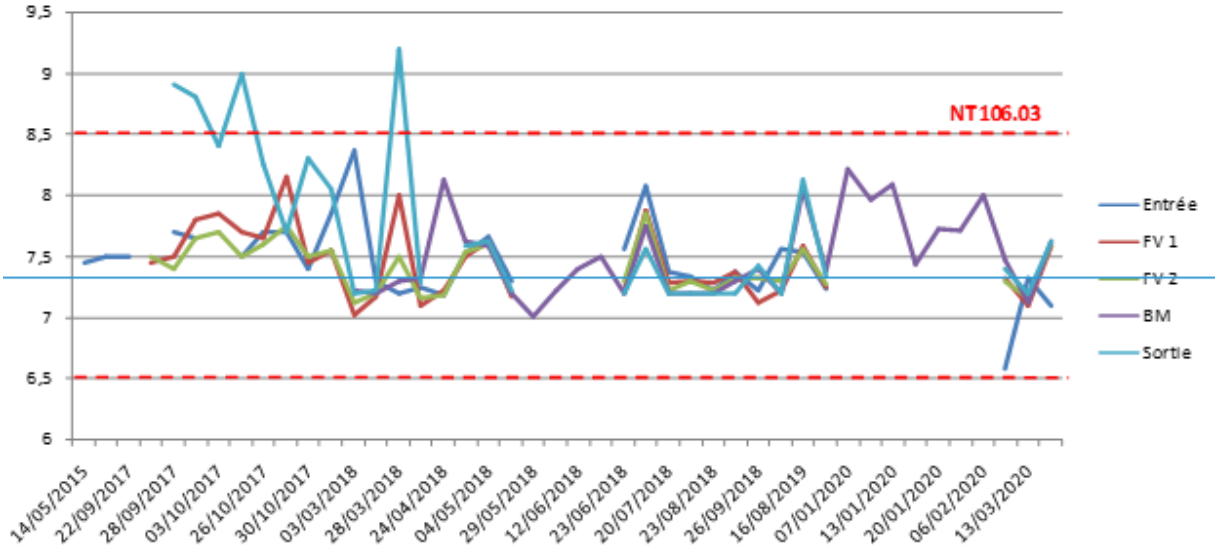


Figure 15. Evolution du pH aux différents points de contrôle de la STEP

En se fiant à la norme tunisienne NT 106.03 relative à réutilisation agricole des eaux usées traités,les échantillons prélevés à différents points de prélèvements des EUT sont conformes à la norme tunisienne qui exige une valeur comprise entre 6,5 et 8,5, excepté quelques dépassement enregistrés à la sortie de la station. En effet, des valeurs élevées de pH (supérieures à 9) se produisent dans les bassinssuite à une photosynthèse rapide des algues présentes, qui consomment le CO_2plus rapidement qu'il ne peut être remplacé par la respiration bactérienne. Il enrésulte la dissociation des ions carbonate et bicarbonate. Ainsi, les algues fixent le CO_2 produit et les ions hydroxyle s'accumulent, montant lepH à des valeurs au-dessus de 9 ; combiné à l'insolation, un pH > 9 contribue auxmécanismes d'élimination des bactéries dans les bassins de maturation.

➢ **Conductivité électrique :** La mesure de la conductivité de l'eau permet d'estimer sa minéralisation et donc la quantité de sels dissous apportés au sol. Cette mesure est cependant incomplète car elle n'intègre pas le type de minéraux apportés. Les résultats de la conductivité électrique relevés aux des différents points de contrôle sont rapportés sur la Figure 16. Au

niveau des 5 points de prélèvements la conductivité des eaux usées traités répond à la norme tunisienne NT 106.03 fixant une valeur maximale de 7000 µS/cm, excepté une seule mesure ponctuelle réalisée à la sortie des filtres végétalisés en mars 2018 (valeurs aberrantes à écarter).

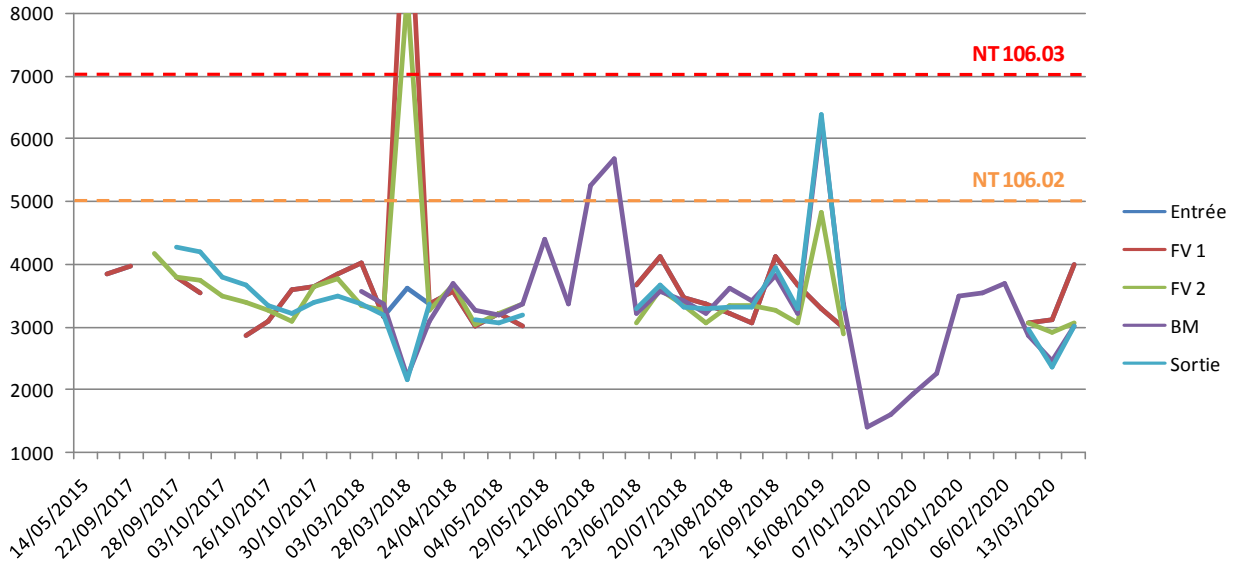


Figure 16. Evolution de la CE (µS/cm) aux différents points de contrôle de la STEP

➢ **MES :** La variation des valeurs des MES aux différents points de prélèvements est représentée dans la figure 17. Les eaux usées produites sont conformes à la norme tunisienne de réutilisation agricole des EUT, excepté quelques mesures au démarrage des essais de validation du système en 2017.

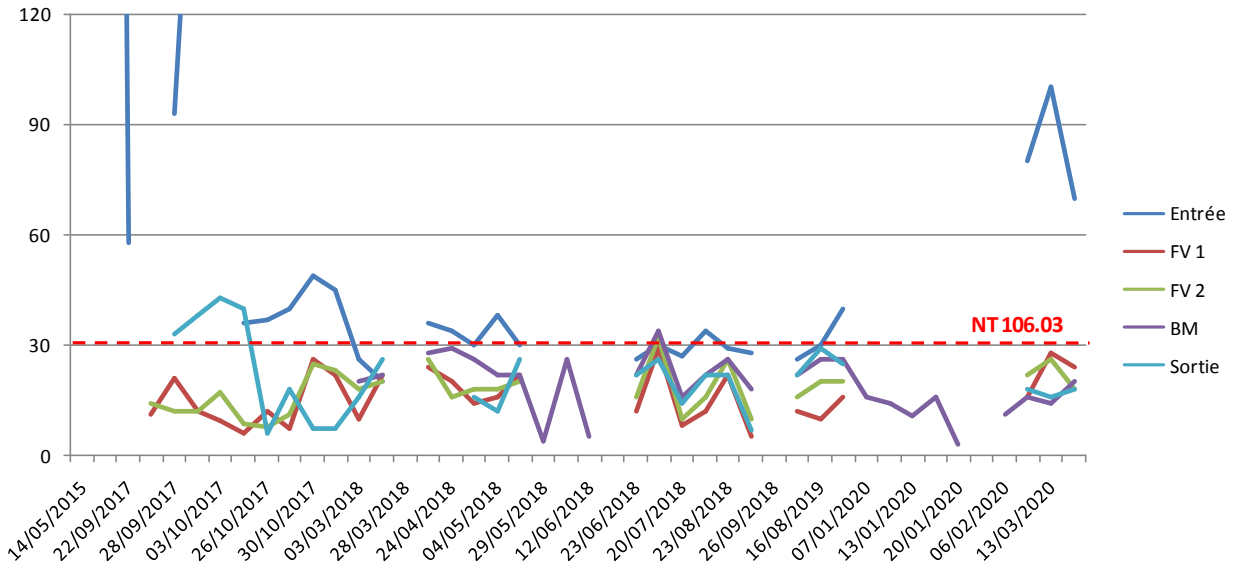


Figure 17. Evolution de la MES (mg/l) aux différents points de contrôle de la STEP

Deux paramètres permettent d'évaluer la teneur en matières organiques dans les eaux usées: la DCO et la DBO_5.

➢ **DCO :** La demande chimique en oxygène (DCO) est l'un des paramètres de la qualité d'une eau. Elle permet d'évaluer la charge polluante des eaux usées. Les données relatives à la DCO aux différents points de prélèvements sont rapportées dans la figure 18. Les eaux usées produites sont conformes à la norme tunisienne NT 106.02, excepté une seule mesure ponctuelle réalisée en mars 2018 (valeurs aberrantes à écarter).

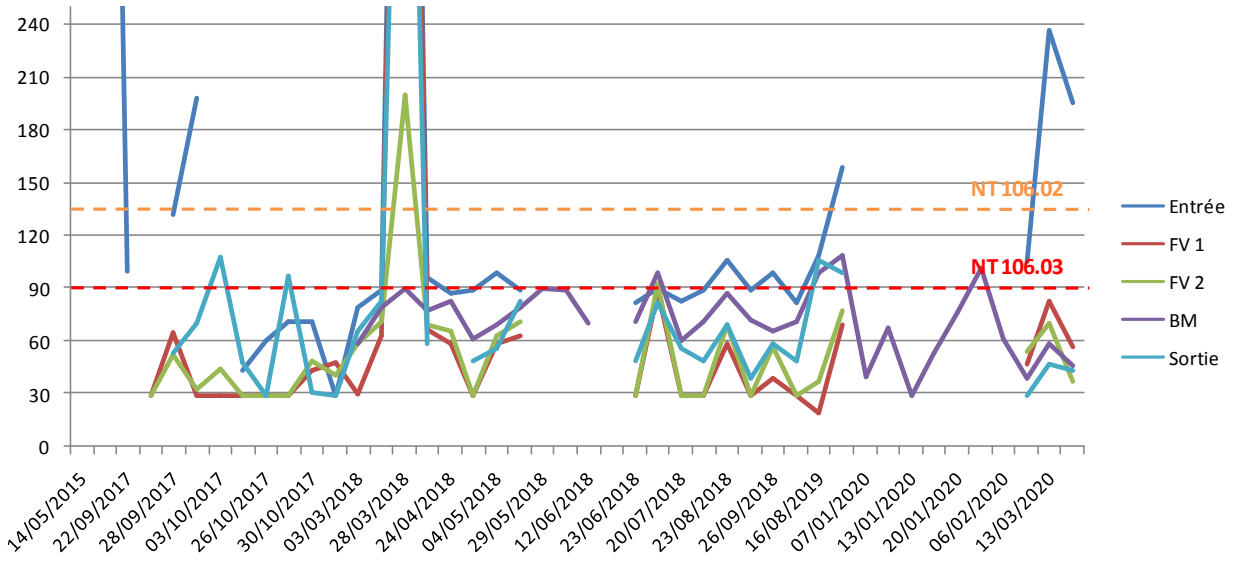


Figure 18. Evolution de la DCO (mg O_2/l) aux différents points de contrôle de la STEP

➢ **DBO_5 :** La demande biochimique en oxygène (DBO_5) est l'un des paramètres physico-chimiques d'estimation du carbone organique biodégradable dans une eau, sa variation pour les différents points de suivi et de contrôle est rapportée sur la figure 19. Les eaux usées produites sont conformes à la norme tunisienne NT 106.03.

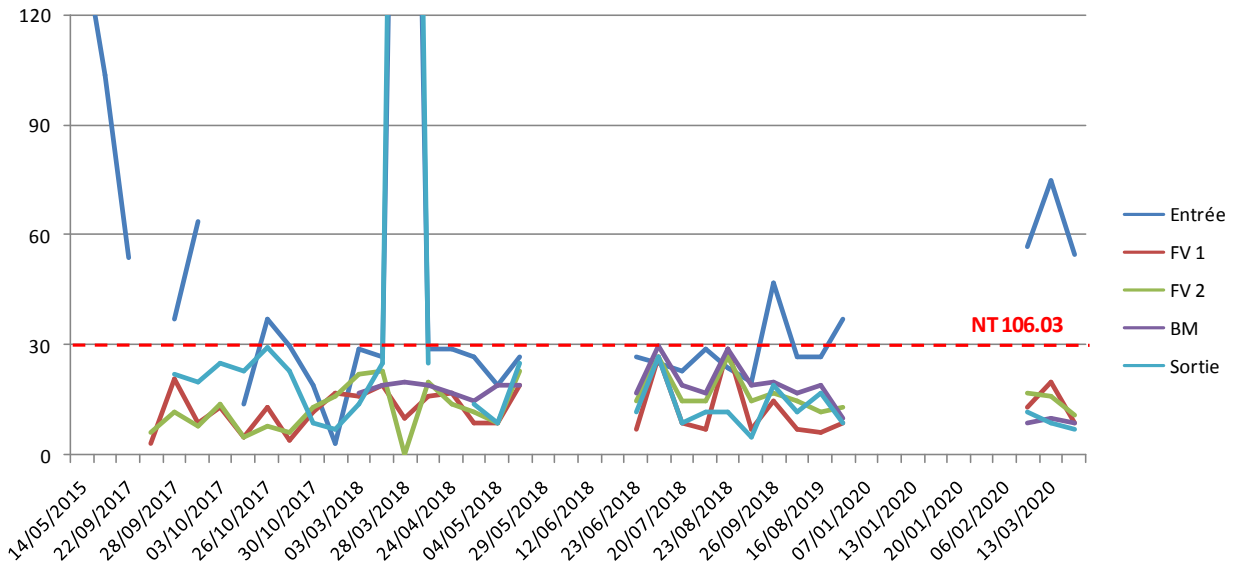


Figure 19. Evolution de la DBO5 (mg O_2/l) aux différents points de contrôle de la STEP

➢ **NtK :** L'azote total Kjeldahl, noté NtK, représente l'ensemble des formes réduites de l'azote contenues dans les eaux, c'est-à-dire la somme de l'azote organique et de l'azote ammoniacal (ce qui exclut les nitrites et les nitrates). La NT 106.03 ne prend pas en considération les limites des différentes formes d'azote. Cependant, les valeurs de la variation du NtK rapportées sur la figure 20sont conformes à la NT 106.02 DPM.

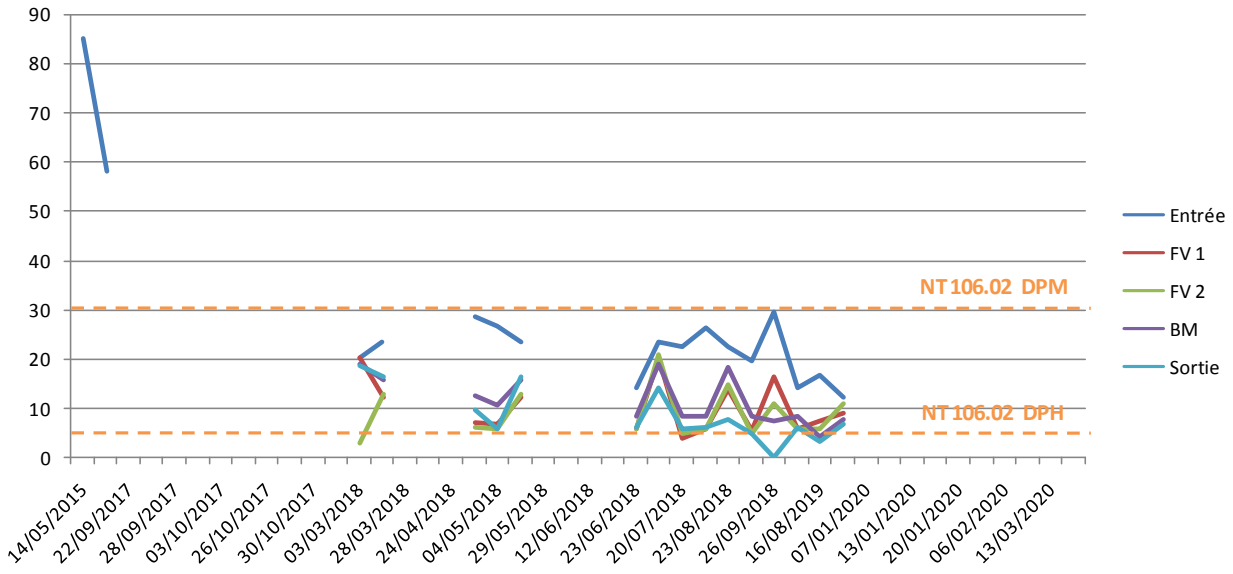


Figure 20. Evolution de la NtK (mg N/l) aux différents points de contrôle de la STEP

➢ **Pt :** Le phosphore total est l'ensemble du phosphore présent dans l'eau sous forme de phosphates ou de composés organophosphorés. Les données relatives à l'eau produite par la STEP sont conformes à la NT 106.02 (Figure 21) ; la NT 106.03 ne fixe pas de valeurs limites.

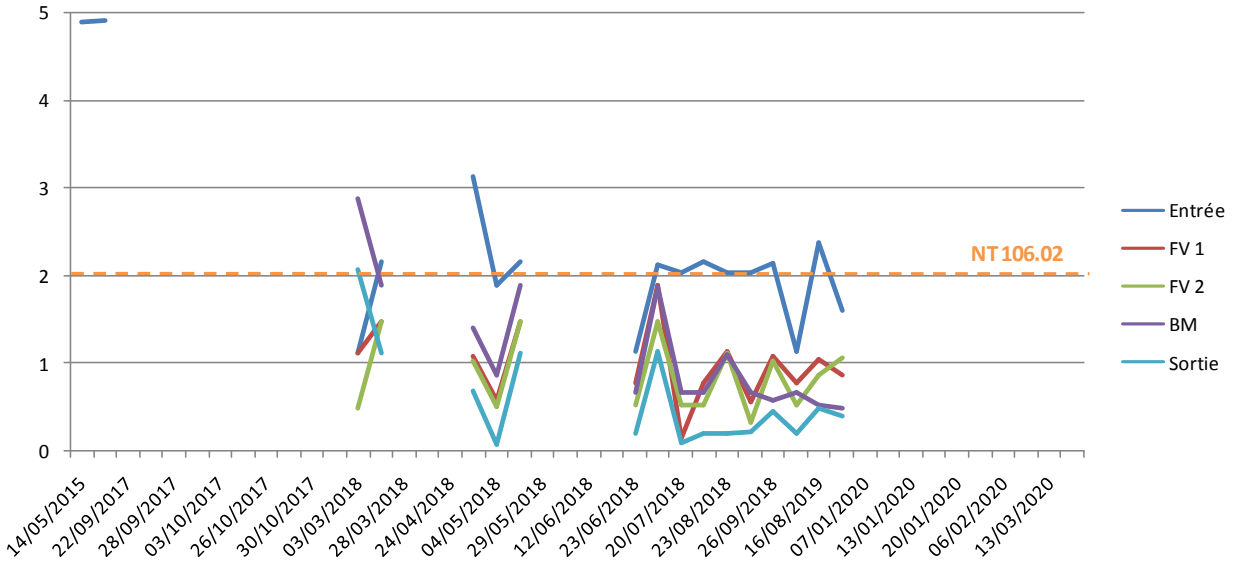


Figure 21. Evolution de la Pt (mg/l) aux différents points de contrôle de la STEP

➢ CF : Les résultats du dénombrement bactérien des coliformes fécaux (valeur log/100 ml), lors de la validation du fonctionnement de la STEP, sont rapportés dans la figure 22. Les valeurs enregistrées sont fluctuantes à la sortie de la STEP ; en revanche, absence des Œufs de Nématodes intestinaux.

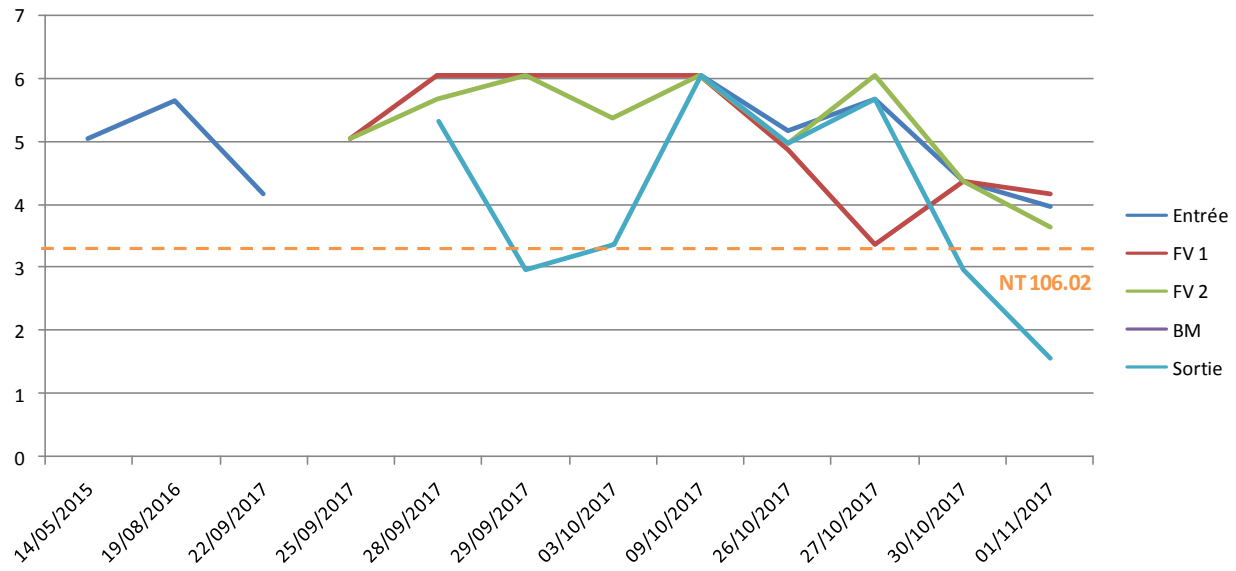


Figure 22. Evolution des CF (log NPP/100 ml) aux différents points de contrôle de la STEP

Une synthèse des performances épuratoires de la STEP est rapportée dans le tableau 6. L'abattement de la pollution organique (DBO5 et DCO) est de l'ordre de 40 %. Les rendements épuratoires obtenus pour les MES, l'azote de Kjeldahl (NtK) et le phosphore total (Pt), sont respectivement de l'ordre de 50%, 58% et 68%.

Bien que ces rendements épuratoires de la STEP permettent d'atteindre les objectifs de conformité pour les eaux usées produites, du moins pour la réutilisation à des fins agricoles, les niveaux d'abattement semblent être fluctuants selon : i) l'étape du traitement des eaux usées dans la filière d'épuration, et ii) les années de fonctionnement.

Tableau 6: Performances épuratoires (%) de la STEP Sidi Amor (2017 – 2020)

	DCO	**DBO_5**	**MES**	**NtK**	**Pt**
Entrée	-	-	-	-	-
FV 1	48,20	37,10	55,38	49,00	45,10
FV 2	44,80	33,04	49,21	53,07	52,01
BM	29,81	39,20	34,01	42,97	39,03
Sortie	**39,74**	**40,28**	**49,11**	**58,80**	**67,83**

Les données ont été analysées ensuite par une analyse de variance effectuée avec le logiciel SAS en effectuant un test ANOVA à un facteur, afin de tester l'effet du stade de traitement (effet ouvrage par rapport à l'entrée du système) et éventuellement l'effet du vieillissement de la station (premières années de fonctionnement du système), à l'aide de logiciel SAS. Les données préliminaires sont rapportées dans le tableau 7. Afin de vérifier les valeurs, un test de normalité a été effectué et certaines valeurs aberrantes ont été supprimées.

Tableau 7. Analyse de variance (ANOVA)

Paramètre	**Test F de Fisher ***	
	Point d'échantillonnage (PE)	**Année (Year)**
CE	-	-
MES	<0.0001	**0.1337**
DCO	<0.0001	0.0092
DBO_5	<0.0001	**0.2021**
NtK	<0.0001	0.0007
Pt	<0.0001	**0.1713**
CF	**0.4039**	-

* Pr < 0.001 ⇨ test hautement significatif - Pr < 0,005 ⇨ test significatif - **Pr > 0.005 ⇨ test non significatif**

➢ **MES :** D'après les résultats obtenus, les matières en suspension présentent : i) un effet PE hautement significatif, et ii) non significatif pour les années. La figure 23 rapporte la variation moyenne de MES en fonction du point d'échantillonnage ; les valeurs qui portent des lettres différentes sont significativement différentes selon test de Tukey-Kramer, au seuil de 0,05.

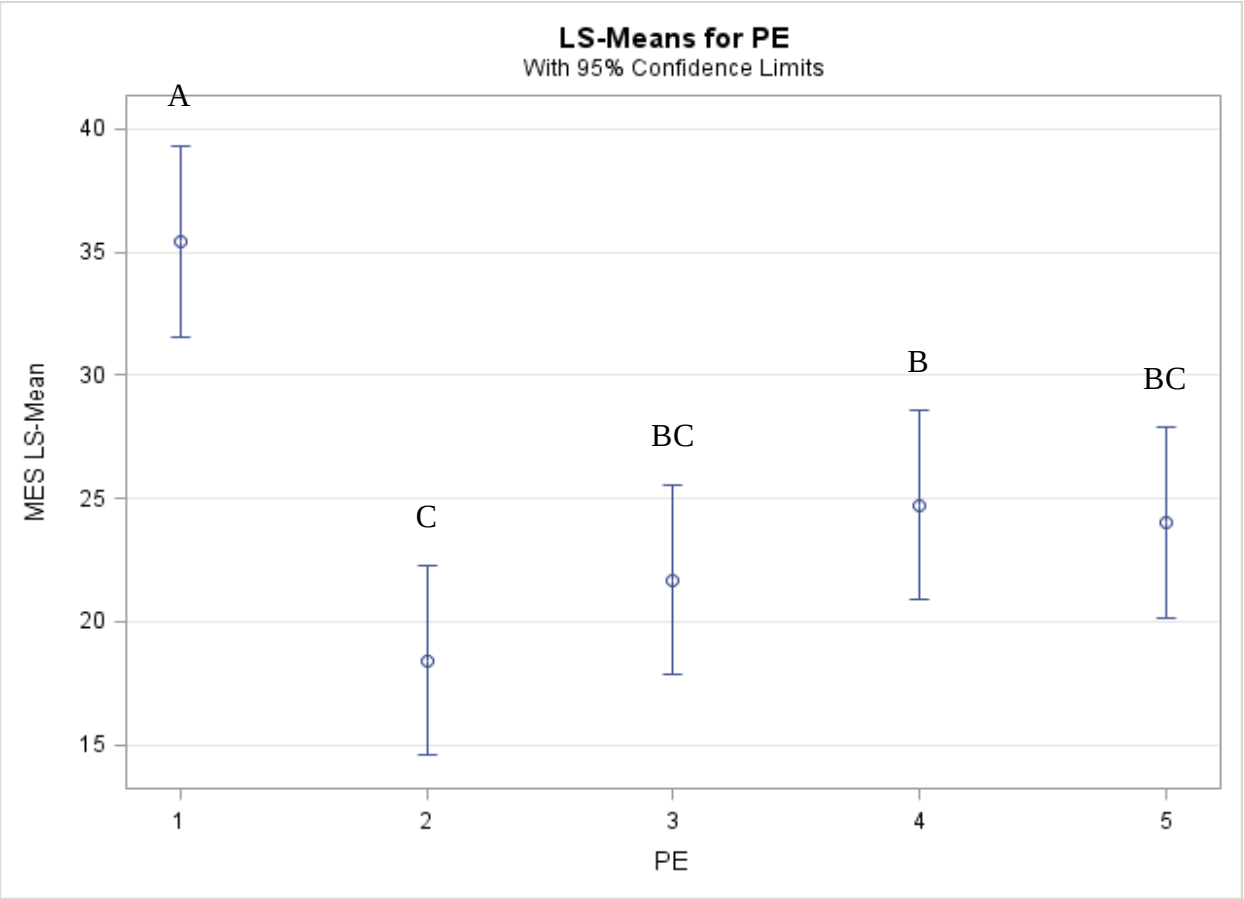


Figure 23. Valeurs moyennes (± Intervalle de confiance au seuil de 5%) des MES en fonction du point d'échantillonnage (PE)

Selon le test de comparaison des moyennes de Tukey, on remarque que l'abattement des MES est significatif à la sortie de la STEP. Cependant, le meilleur rendement d'élimination des MES serait obtenu avec le filtre végétalisé 1. Le bassin semble apporter une détérioration à la qualité de l'eau comparé aux deux filtres plantés.

Selon le test de comparaison des moyennes de Tukey, on remarque que l'abattement des MES est significatif à la sortie de la STEP. Cependant, le meilleur rendement d'élimination des MES serait obtenu avec le filtre végétalisé 1. Le bassin semble apporter une détérioration à la qualité de l'eau comparé aux deux filtres plantés.

➢ **DCO :** Les résultats obtenus montrent un effet PE hautement significatif, et un effet (faiblement) significatif de l'année. Les figures24 et yy rapportent la variation moyenne de la DCO en fonction du point d'échantillonnage et en fonction de l'année ; les valeurs qui portent des lettres différentes sont significativement différentes selon test de Tukey-Kramer, au seuil de 0,05. En se fiant à la figure 24, on remarque une amélioration de la qualité de l'eau filtrée

au niveau des deux filtres végétalisés. En revanche, on peut noter une dégradation significative au niveau du bassin de maturation. Néanmoins, on obtient une légère amélioration à la sortie de la station et une qualité d'eau post-traitée conforme.

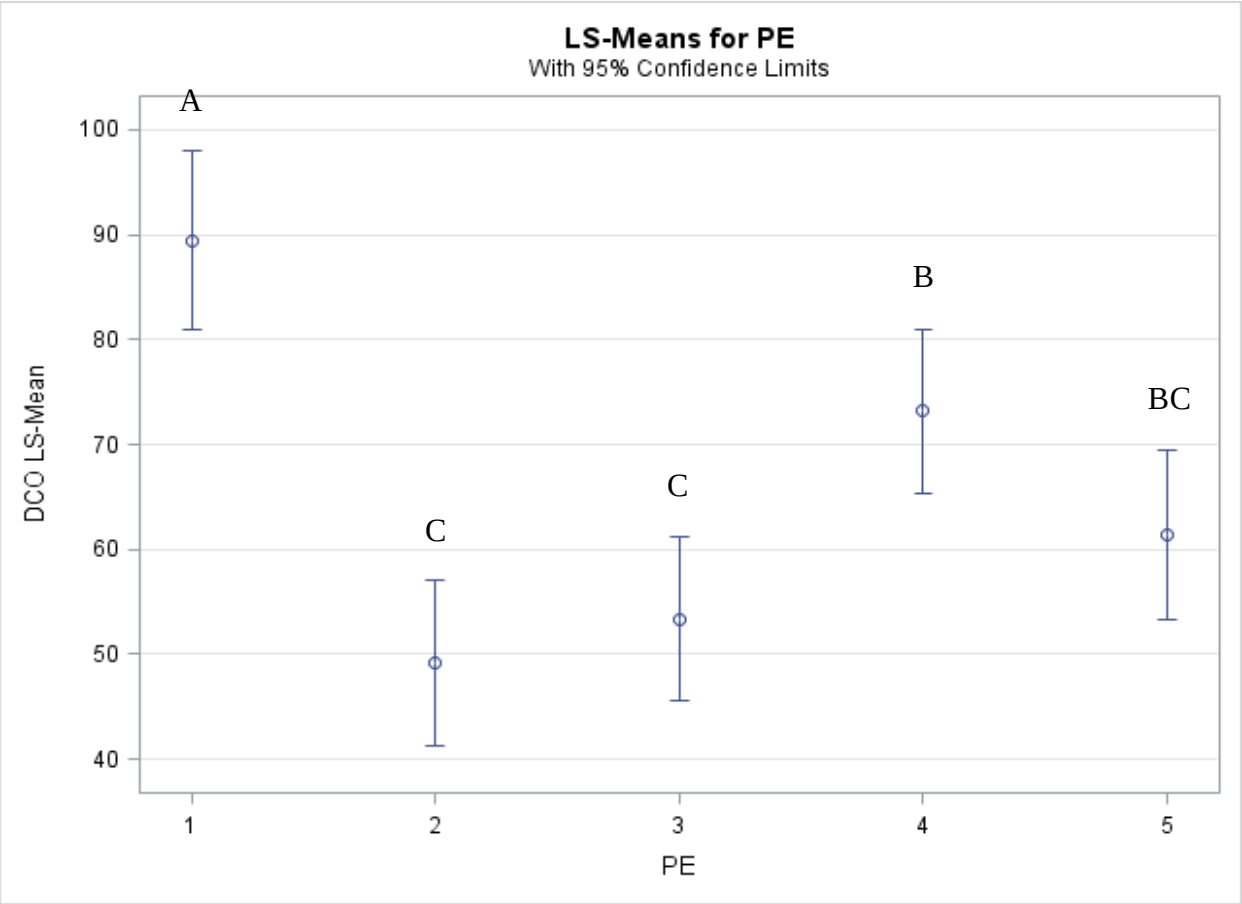


Figure 24. Valeurs moyennes (± Intervalle de confiance au seuil de 5%) de la DCO en fonction du point d'échantillonnage (PE)

Durant les premières années de fonctionnement de système, on note une amélioration de la qualité de l'eau post-traitée relativement significative, et ce, depuis la mise en eu du système (Figure 25).

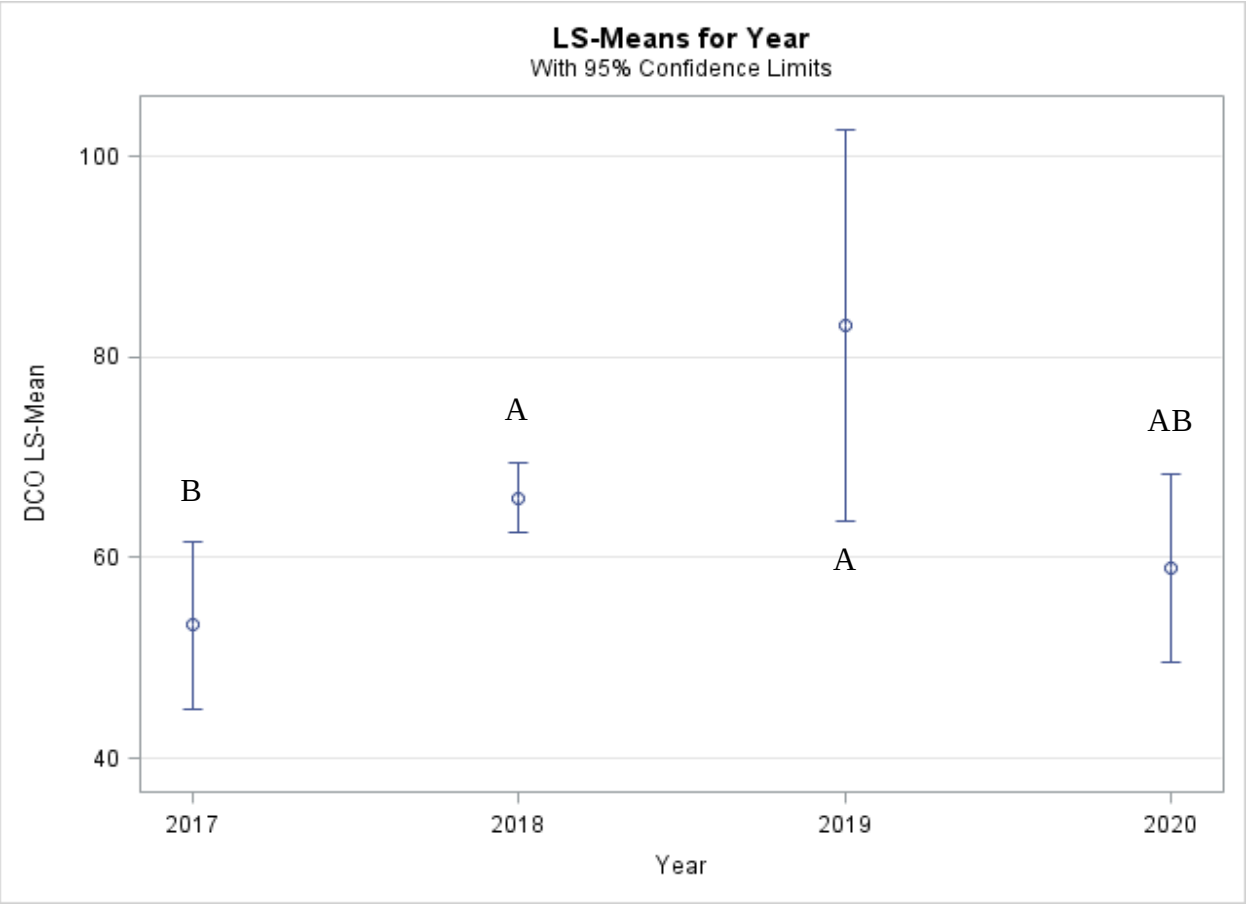


Figure 25. Valeurs moyennes (± Intervalle de confiance au seuil de 5%) de la DCO en fonction de l'année (Year)

➢ **DBO_5 :** Les résultats obtenus pour la DBO_5montrent un effet PE significatif mais non significatif pour l'effet année. Les valeurs moyennes pour chaque point d'échantillonnage sont représentées ci-dessous. La figure 26 rapporte la variation moyenne de la DBO_5 en fonction du point d'échantillonnage ; les valeurs qui portent des lettres différentes sont significativement différentes selon test de Tukey-Kramer, au seuil de 0,05.En se fiant à la figure 26, on remarque une amélioration de la qualité de l'eau filtrée au niveau des deux filtres végétalisés. En revanche, on peut noter une légère dégradation au niveau du bassin de maturation. Néanmoins, on obtient une légère amélioration à la sortie de la station et une qualité d'eau post-traitée conforme.

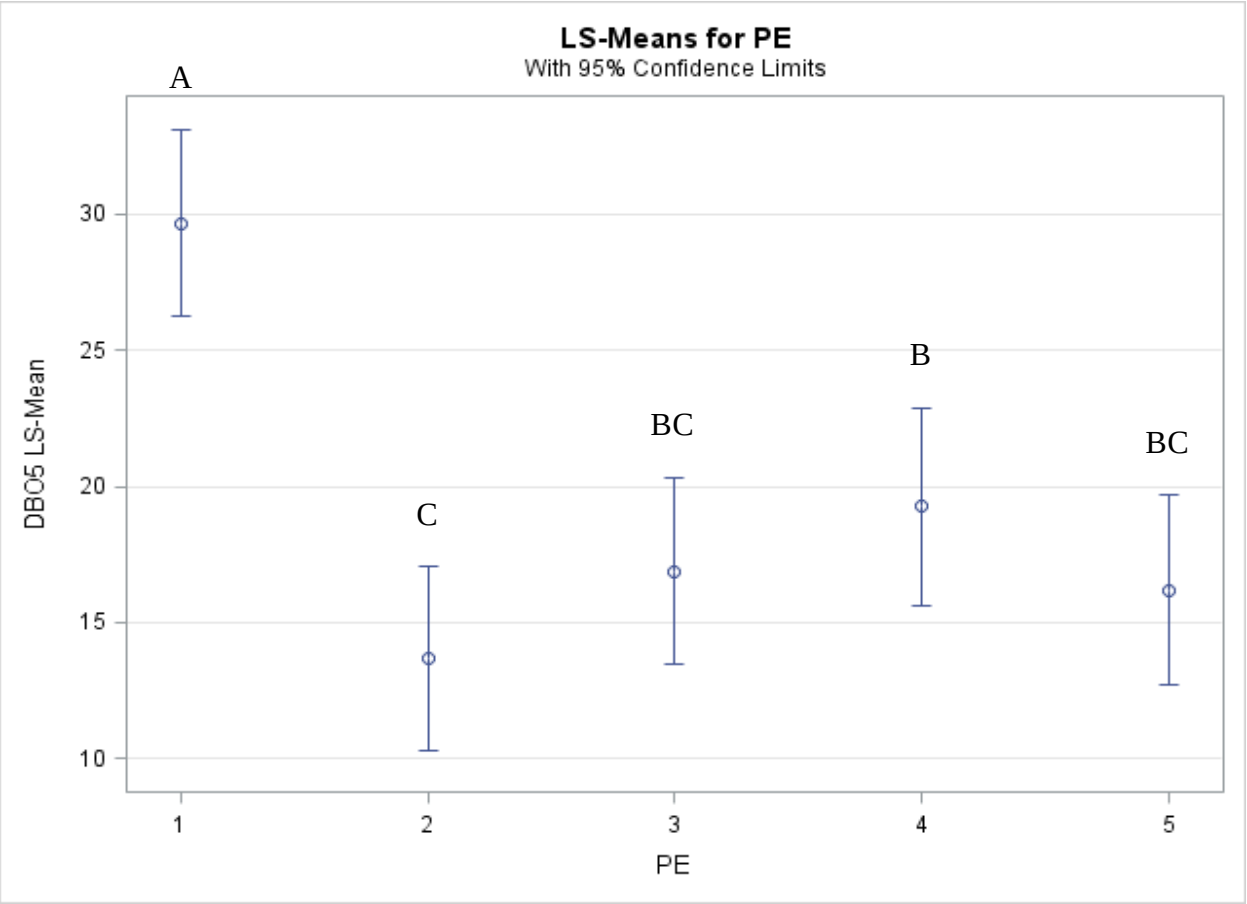


Figure 26. Valeurs moyennes (± Intervalle de confiance au seuil de 5%) de la DBO_5 en fonction du point d'échantillonnage (PE)

- **NtK :** Les résultats obtenus pour le NtK montrent un effet PE hautement significatif et un effet significatif pour l'effet année. Les figures 27 et 28 rapportent la variation moyenne du NtK en fonction du point d'échantillonnage et en fonction de l'année ; les valeurs qui portent des lettres différentes sont significativement différentes selon test de Tukey-Kramer, au seuil de 0,05. En se fiant à la figure 27, on remarque une amélioration significative de la qualité de l'eau filtrée à la sortie du système. Cependant, la réduction du NtK est vraisemblablement assurée par les deux filtres végétalisés.

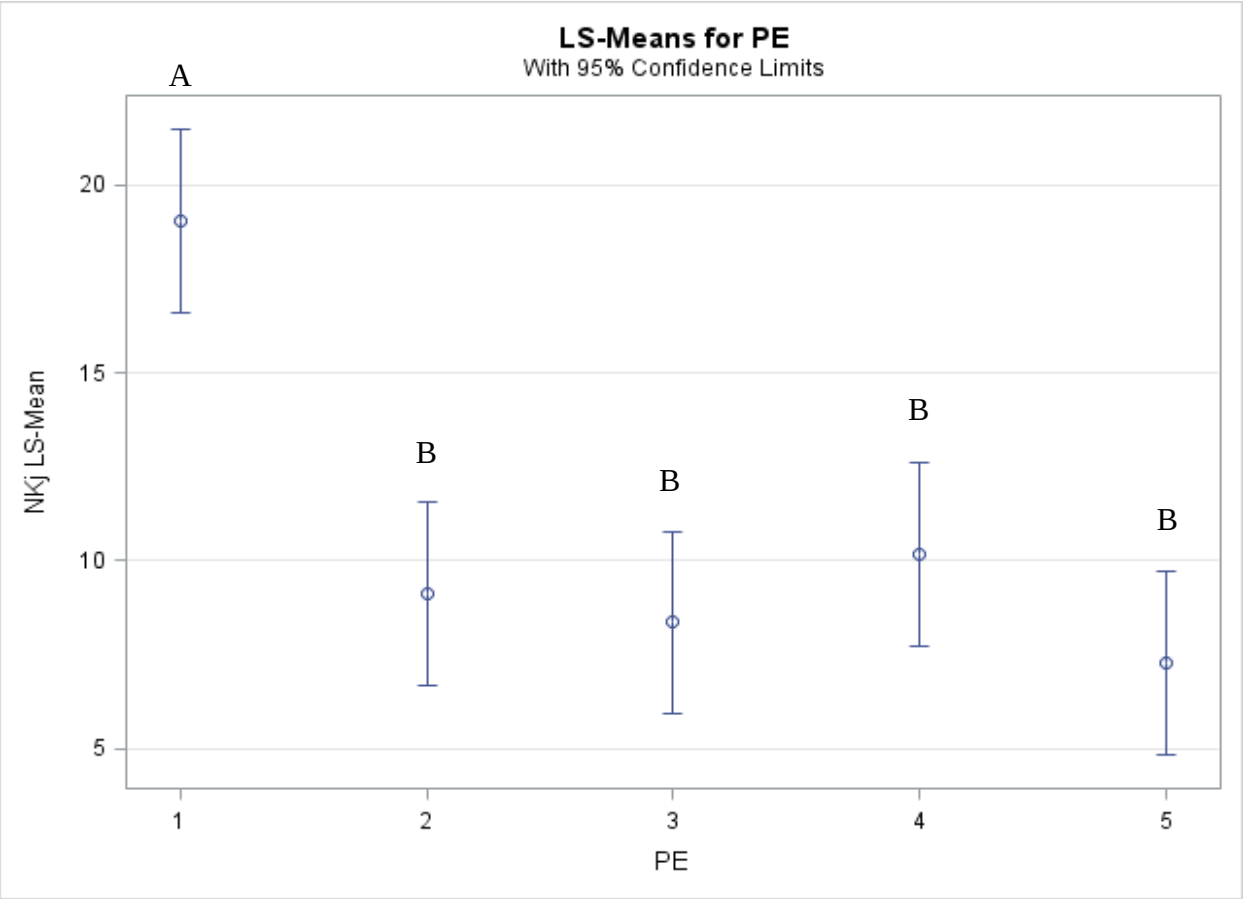


Figure 27. Valeurs moyennes (± Intervalle de confiance au seuil de 5%) du NtK en fonction du point d'échantillonnage (PE)

Par ailleurs, la fréquence d'échantillonnage pour l'azote de Kjeldahl est faible et les données collectées ne concernent que 2018 et 2019. Cependant, on note une amélioration nette de la qualité de l'eau en 2019.

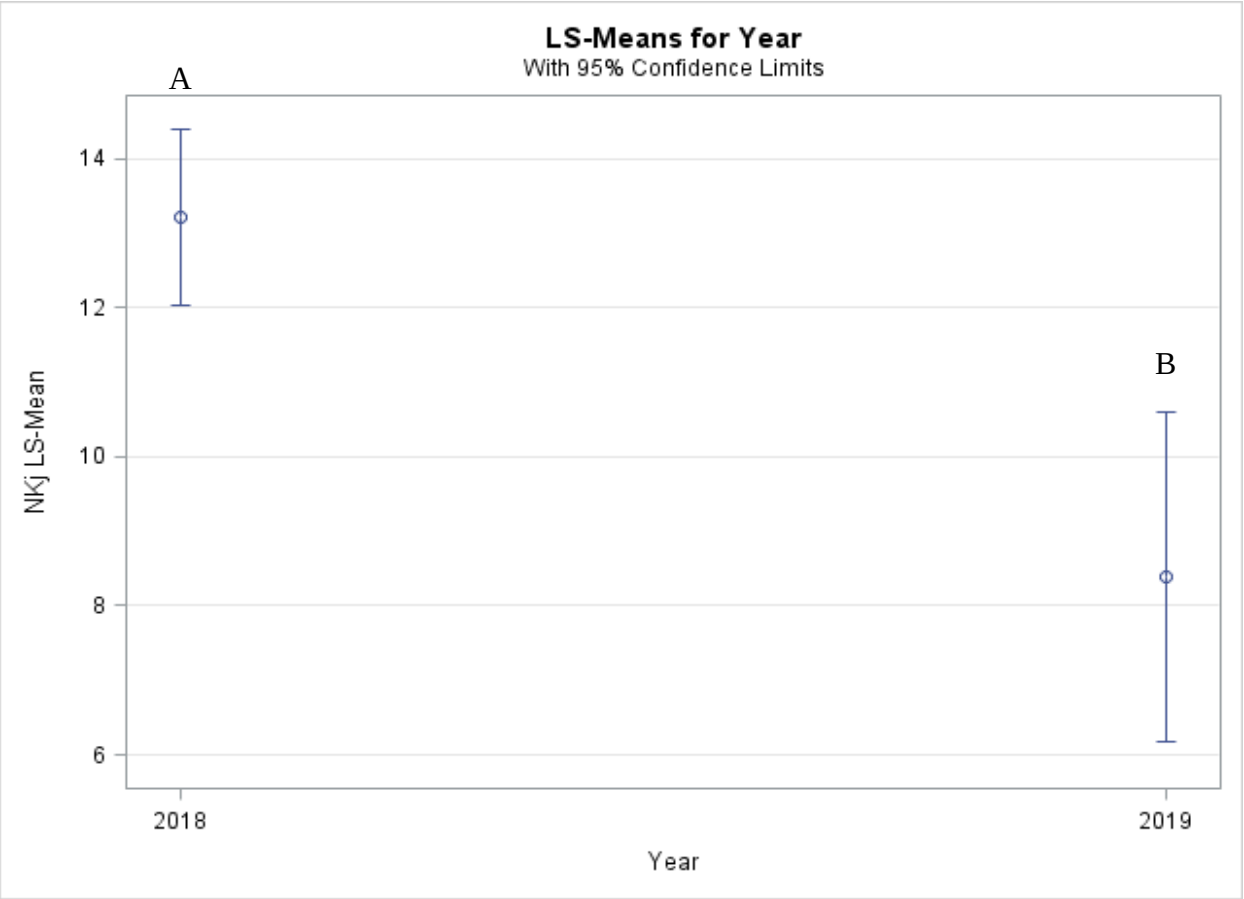


Figure 28. Valeurs moyennes (± Intervalle de confiance au seuil de 5%) du NtK en fonction de l'année (Year)

- **Pt :** L'analyse de variance de ce paramètre montre seulement un effet hautement significatif pour les points d'échantillonnages. Les résultats obtenus pour le phosphore total montrent un effet PE significatif mais non significatif pour l'effet année. La figure 29 rapporte la variation moyenne du Pt en fonction du point d'échantillonnage ; les valeurs qui portent des lettres différentes sont significativement différentes selon test de Tukey-Kramer, au seuil de 0,05. En se fiant à la figure 29, on remarque une amélioration significative de la qualité de l'eau filtrée à la sortie du système. Cependant, la réduction du Pt est essentiellement assurée par les deux filtres végétalisés, et serait complétée en partie par le bassin de maturation.

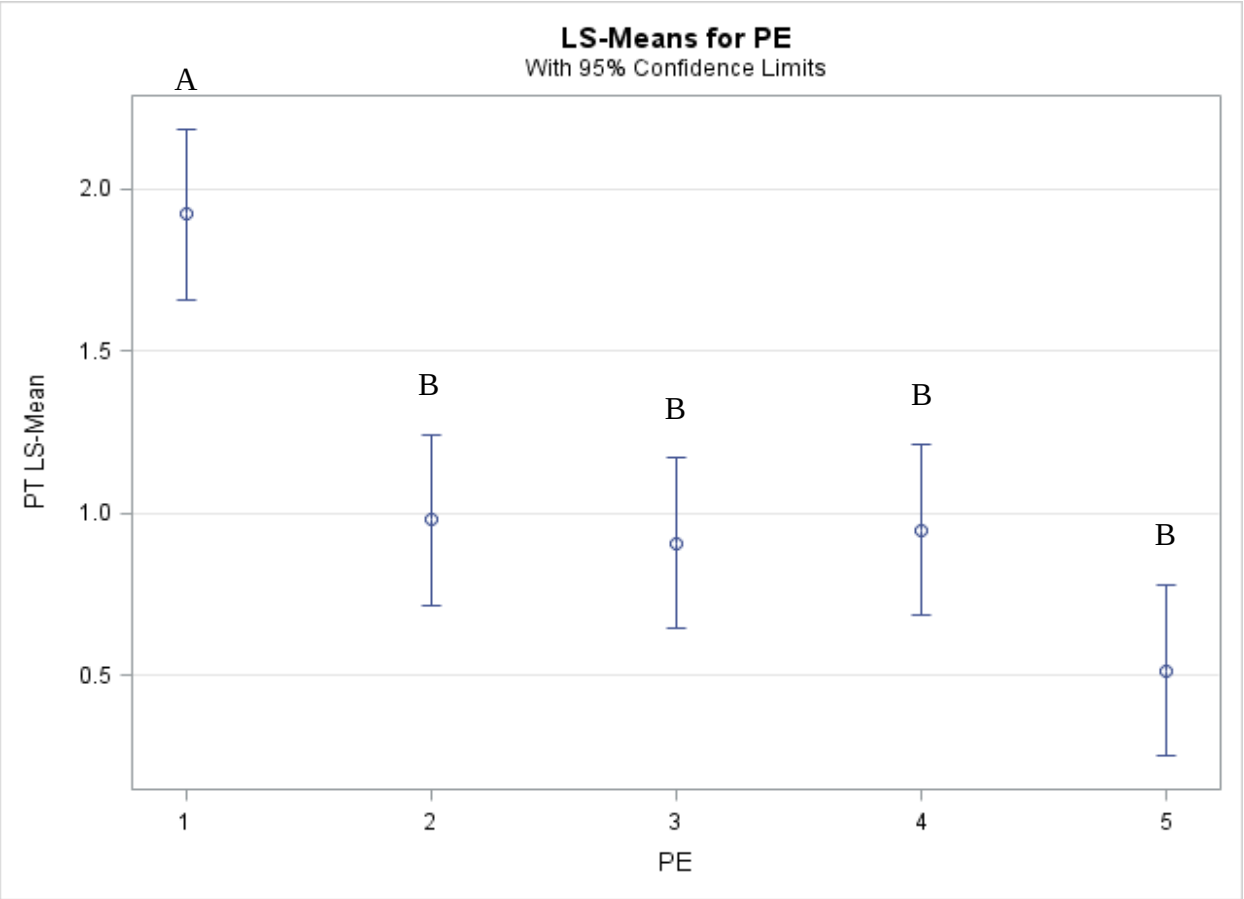


Figure 29.Valeurs moyennes (± Intervalle de confiance au seuil de 5%) du Pt en fonction du point d'échantillonnage (PE)

➢ **CF :** Les résultats obtenus pour l'année 2017 ne montrent pas un effet PE significatif pour les coliformes fécaux.

3. PROSPECTION ELECTRIQUE DES FILTRES VEGETALISES

L'analyse des performances épuratoires de la station repose essentiellement sur les rendements de dépollution et les rendements hydrauliques du système. Les résultats obtenus jusque-là concernent les rendements de dépollution de la station, en se fiant aux données collectées dans le cadre de cette étude. Afin de compléter ce travail et d'entamer l'étude des rendements hydrauliques de la station, nous avons choisi, dans un premier temps, de nous intéresser au fonctionnement des filtres plantés, d'autant plus que ce système végétalisé est une pièce maîtresse du système de post-traitement des EUT.

Rappelons cependant que le filtre planté de roseaux à écoulement horizontal ne peut recevoir que des eaux prétraitées, ou très peu chargées en matière en suspension. Cela permet d'éviter tout risque de colmatage du massif filtrant. Il s'agit donc d'évaluer en premier lieu

l'*état de santé* ou le *vieillissement* des filtres végétalisés qui présentent déjà des signes de colmatage, qui serait lié entre autres à la fluctuation de la qualité de l'eau et de la charge élevée en MES à l'entrée du système.

En marge des améliorations projetées de la qualité de l'eau d'alimentation pour éviter le colmatage des filtres, nous avons choisi dans le cadre de ce travail, compte tenu des problèmes apparents, de réaliser une investigation géophysique des massifs filtrants afin d'apporter des éléments de réponse sur le degré (risque) de colmatage et l'état de fonctionnement (comportement) actuel des filtres plantés : i) débordements fréquents au niveau de la tranchée d'alimentation, ii) densité hétérogène des macrophytes et présence de zones mortes notamment pour le filtre 1, iii) vidange rapide de ce dernier, iv) présence de mauvaises herbes…

Le recours à la prospection électrique (mesure de la résistivité électrique), retenue dans le cadre de ce travail pour étudier les massifs filtrants, permettrait dans un premier temps de cartographier les zones de colmatage et d'approcher également la nature des matériaux colmatant ; et contribuer à la caractérisation des écoulements de sous surface a posteriori. De plus, l'étude d'intensité au-delà de la limite inférieure du filtre à gravier (au-dessous de la géomembrane) permettrait de localiser des zones d'éventuelles (micro-)fissuration ou de détérioration de la géomembrane (zones d'infiltration ou d'exfiltration, fuites…).

Les principaux résultats obtenus lors des deux campagnes de mesure sur le terrain (filtres plantés 1 et 2) sont rapportés dans les tableaux 8 et 9.

Tableau 8. Résultats de la prospection électrique du filtre végétalisé

Point	Coordonnées		Profondeur (m)									
			0.2		0.4		0.6		0.8		1	
	X	Y	R (Ω.m)	I (A)	R (Ω.m)	I (A)	R (Ω.m)	I (A)	R (Ω.m)	I (A)	R (Ω.m)	I (A)
1	604124.5681	4087630.1133	98.997	26.870	160.632	25.984	243.366	27.502	339.634	20.496	443.185	18.442
2	604120.6746	4087629.1952	130.078	17.316	182.280	20.235	265.888	17.453	362.656	20.989	418.778	20.955
3	604116.7791	4087628.2767	115.891	4.886	183.338	4.340	250.373	6.186	338.400	6.668	396.578	9.351
4	604112.8865	4087627.3588	107.388	4.269	153.522	7.347	211.691	3.116	267.360	4.833	310.786	3.889
5	604108.9932	4087626.4408	56.482	10.366	96.743	23.351	141.353	29.957	190.041	16.351	231.508	19.792
6	604105.1004	4087625.5230	44.141	44.202	76.989	22.179	103.621	15.892	142.130	39.038	176.367	35.286
7	604101.2076	4087624.6051	43.992	15.080	86.173	26.395	128.970	39.878	171.883	29.592	205.298	19.339
8	604097.3147	4087623.6872	52.572	37.231	86.612	34.029	133.856	39.430	171.269	19.579	199.108	28.356
9	604093.4200	4087622.7689	122.459	6.926	139.592	10.727	188.559	37.498	251.738	11.665	300.813	19.590
10	604123.6457	4087633.9932	33.937	5.113	58.514	1.360	94.705	1.622	138.979	2.976	171.659	2.274
11	604119.7498	4087633.0746	74.924	3.454	60.320	3.715	81.185	4.495	103.476	3.203	125.577	3.839
12	604115.8573	4087632.1542	98.931	2.247	63.795	2.314	73.680	4.773	101.090	1.601	74.713	3.157
13	604111.9647	4087631.2364	47.055	4.243	43.934	10.272	25.231	4.762	85.234	6.547	110.367	5.983
14	604108.0714	4087630.3184	23.462	48.616	39.643	37.367	53.734	55.920	70.759	33.674	88.058	32.873
15	604104.1786	4087629.4005	22.551	90.446	37.862	61.884	49.042	81.558	70.675	86.935	85.203	80.090
16	604100.2858	4087628.4826	15.266	97.951	26.749	91.821	41.629	99.380	55.242	86.367	69.704	118.858
17	604096.3929	4087627.5647	11.538	2.369	15.958	28.739	34.497	75.871	47.229	79.546	63.113	79.091

Point	Coordonnées		Profondeur (m)									
			0.2		0.4		0.6		0.8		1	
	X	Y	R (Ω.m)	I (A)	R (Ω.m)	I (A)	R (Ω.m)	I (A)	R (Ω.m)	I (A)	R (Ω.m)	I (A)
18	604092.4982	4087626.6464	38.448	24.157	51.070	21.329	63.507	21.873	86.531	21.033	104.935	9.629
19	604122.7244	4087637.8686	89.063	3.111	67.116	4.821	103.791	1.413	144.629	1.158	188.574	1.011
20	604118.8286	4087636.9500	48.661	4.082	40.461	6.344	56.380	3.995	84.220	3.541	107.999	6.126
21	604114.9355	4087636.0321	48.326	5.322	36.830	9.165	55.632	5.382	80.605	7.837	106.106	12.098
22	604111.0428	4087635.1142	24.868	9.794	36.065	31.962	53.313	4.250	75.826	17.153	95.940	11.519
23	604107.1495	4087634.1962	30.238	26.565	30.889	19.085	46.331	12.220	67.582	5.949	90.465	5.592
24	604103.2567	4087633.2783	24.143	29.532	29.990	16.718	41.103	42.598	60.397	27.645	77.488	18.267
25	604099.3639	4087632.3604	22.229	36.044	31.710	46.039	38.659	61.323	39.209	47.364	68.989	44.148
26	604095.4710	4087631.4425	23.826	59.772	26.664	70.190	41.667	53.088	55.874	44.223	69.282	36.397
27	604091.5763	4087630.5242	25.949	21.520	30.286	32.037	41.581	29.916	57.069	38.482	75.940	9.118

Tableau 9. Résultats de la prospection électrique du filtre végétalisé 2

Point	Coordonnées		Profondeur (m)									
			0.2		0.4		0.6		0.8		1	
	X	Y	R (Ω.m)	I (A)	R (Ω.m)	I (A)	R (Ω.m)	I (A)	R (Ω.m)	I (A)	R (Ω.m)	I (A)
1	604125.2568	4087651.1339	153.354	3.412	223.403	6.614	280.539	6.539	352.244	3.984	438.318	3.800
2	604121.3634	4087650.2158	208.472	3.195	145.223	1.913	127.954	1.324	151.994	0.895	203.806	1.001
3	604117.4679	4087649.2973	99.235	4.053	108.140	2.055	108.679	3.365	33.751	3.520	131.665	2.296

Point	Coordonnées		Profondeur (m)									
			0.2		0.4		0.6		0.8		1	
	X	Y	R (Ω.m)	I (A)	R (Ω.m)	I (A)	R (Ω.m)	I (A)	R (Ω.m)	I (A)	R (Ω.m)	I (A)
4	604113.5753	4087648.3795	141.696	2.549	134.368	2.250	82.947	4.033	95.392	2.791	107.167	3.723
5	604109.6819	4087647.4615	190.837	1.292	125.023	3.938	100.678	4.941	97.866	6.098	116.256	4.685
6	604105.7892	4087646.5436	154.913	3.169	126.631	5.310	124.264	4.970	117.518	3.513	138.025	3.356
7	604101.8964	4087645.6257	162.754	6.085	130.630	5.444	114.186	0.230	118.605	3.763	135.570	2.465
8	604098.0035	4087644.7078	60.692	4.521	233.575	4.894	182.415	3.013	182.439	3.531	185.522	2.515
9	604094.1097	4087643.7876	214.553	3.655	185.051	1.753	223.393	4.863	252.105	3.362	285.510	8.364
10	604090.2169	4087642.8697	233.078	3.885	293.531	1.279	311.604	4.601	406.513	4.441	474.731	3.983
11	604086.3242	4087641.9518	263.072	1.815	565.177	2.361	777.311	2.272	1026.633	4.818	1065.809	1.507
12	604124.3345	4087655.0138	438.543	1.293	411.955	1.809	397.966	1.528	382.806	2.087	402.770	3.034
13	604120.4386	4087654.0952	188.884	6.225	199.614	6.182	202.665	9.368	217.649	4.372	252.564	7.256
14	604116.5461	4087653.1748	179.058	11.433	150.398	8.448	140.919	7.976	142.961	13.605	170.036	10.335
15	604112.6535	4087652.2570	160.181	7.341	141.192	5.155	158.183	6.123	164.140	6.625	190.292	6.260
16	604108.7602	4087651.3390	171.002	7.501	135.178	6.764	104.758	5.642	117.123	6.297	146.721	11.890
17	604104.8674	4087650.4211	102.129	10.422	89.914	27.242	88.911	3.740	94.314	6.347	106.169	6.338
18	604100.9746	4087649.5032	150.077	6.784	85.021	8.435	33.591	10.651	88.118	8.604	97.027	4.894
19	604097.0817	4087648.5853	173.703	2.977	122.440	2.922	93.119	3.463	82.520	2.890	100.360	4.546
20	604093.1879	4087647.6654	163.106	5.130	156.552	2.324	109.291	4.473	20.038	0.898	115.176	2.376
21	604089.2951	4087646.7475	202.929	2.522	170.137	2.720	133.000	2.972	166.145	2.919	193.223	4.482
22	604085.4023	4087645.8296	283.880	2.546	326.701	2.071	388.989	1.986	297.411	1.012	583.221	5.417

Élaboration des cartes d'iso-résistivité (filtre 1)

Le traitement des données est réalisé à l'aide du logiciel S**urfer**. Pour différentes profondeurs d'investigation, nous avons obtenu les cartes d'iso-résistivité suivantes :

- Carte d'iso-résistivité AB= 0,8 m, P= 0,2 m

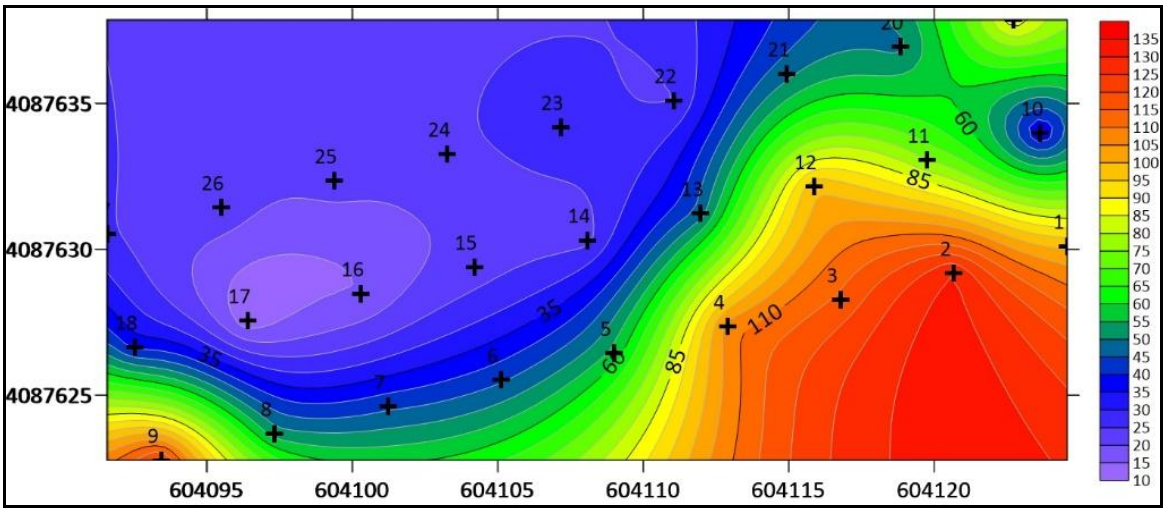


Figure 30. Carte d'iso-résistivité AB = 0,8m du premier filtre végétalisé 1

D'après la carte d'iso-résistivité (AB = 0,8m ; profondeur d'investigation = 0,2 m), on remarque que la couleur rouge représente la zone la plus résistante : 110 jusqu'à 135 Ωm (pts 1, 2, 3, 4 et 9) et les couleurs violet et bleu renseignent les zones les plus conducteurs avec des valeurs de résistivité allant de 10 à 40 Ωm (pt 10 et de 14 au 27).

Nous observons que la résistivité électrique diminue laissant prétendre une présence d'un milieu conducteur comme les argiles ou notamment les boues.

- Carte d'iso-résistivité AB= 1,6m, P= 0,4m

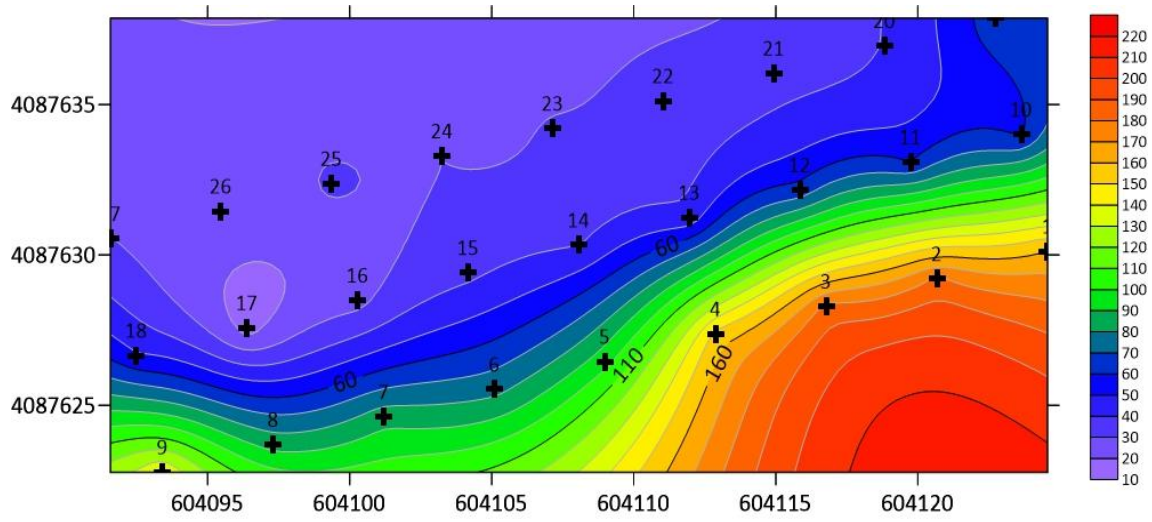


Figure 31. Carte d'iso-résistivité AB= 1,6m du filtre végétalisé 1

D'après la carte d'iso-résistivité (AB = 1,6 m ; profondeur d'investigation = 0,4 m), on remarque que, au Sud-Est la couleur rouge représente la zone la plus résistante : 170 jusqu'à 220 Ωm (pts 1, 2, et 3) et les couleurs violet et bleu montrent les zones les plus conducteurs pour une résistivité allant de 10 à 60 Ωm (deuxième et troisième lignes : pt 10 jusqu'au pt 27). D'après les données acquises, on remarque que le filtre 1 est encore plus conducteur pour AB = 1,6 m (profondeur 0,4 m), ce qui indiquerait la présence d'éventuelles fractions argileuses.

- Carte d'iso-résistivité AB= 2,4m, P= 0,6m

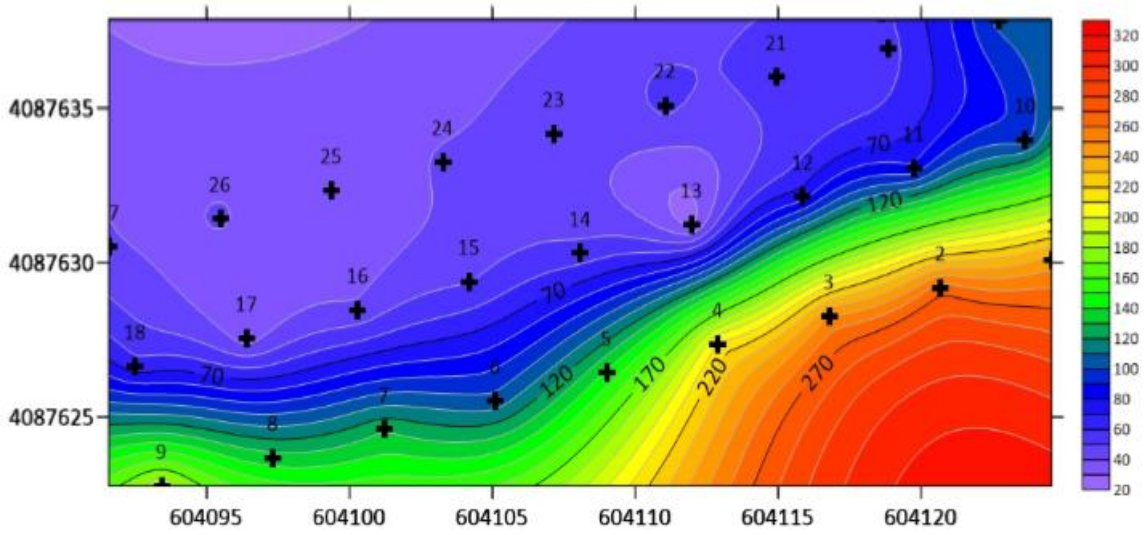


Figure 32. Cartes d'iso-résistivité AB = 2,4 m du filtre végétalisé 1

D'après la carte d'iso-résistivité (AB= 2,4 m ; profondeur d'investigation = 0,6 m), on remarque que, au Sud-Est les couleurs rouge et orange représentent les zones les plus résistantes. Cependant, les valeurs de résistivités sont de plus grandes allant de 240 à 320 Ωm (pts 1, 2, et 3).

Les couleurs violet et bleu montrent les zones les plus conducteurs pour des valeurs de résistivités également plus grandes que les précédentes allant de 20 à 100 Ωm (2ème et 3ème troisième lignes : pt 10 jusqu'au pt 27).

D'après les données acquis on remarque que notre filtre est un plus conducteur que pour AB= 2.4m (profondeur 0.6m) qui nous indique l'existence des fractions argileuses et des boues d'une manière très importante au niveau de cet horizon.

- Carte d'iso-résistivité AB= 3,2m, P= 0,8m

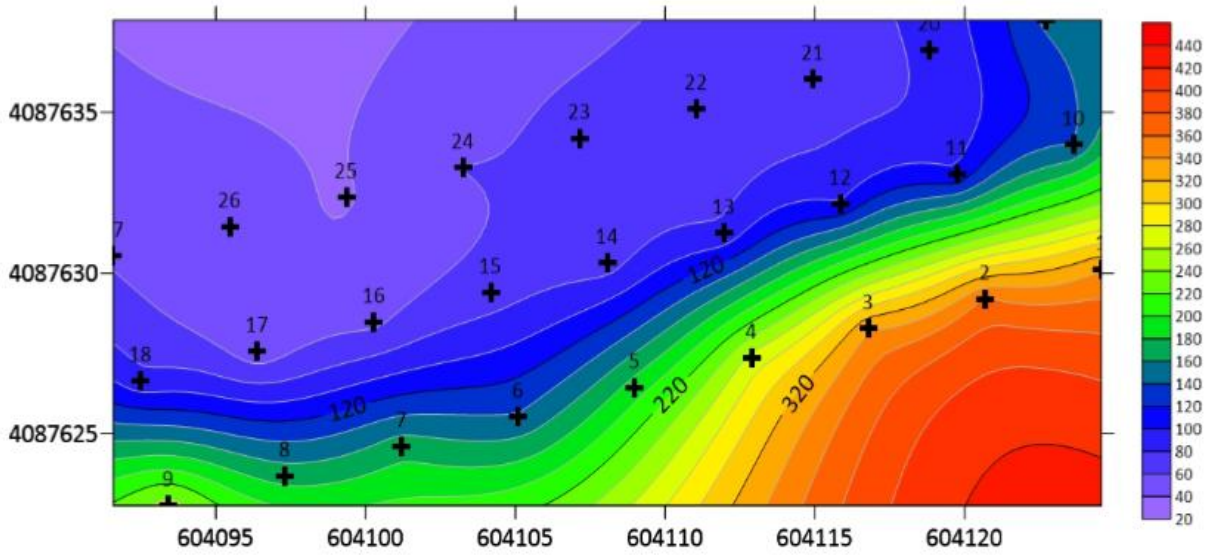


Figure 33. Carte d'iso-résistivité AB = 3,2 m du filtre végétalisé 1

D'après la carte d'iso-résistivité (AB = 3,2 m ; profondeur d'investigation = 0,8 m), on remarque que, au Sud-Est les couleurs rouge et orange représentent les zones les plus résistantes mais avec des valeurs de résistivités plus grandes allant de 360 jusqu'à 440 Ωm (pts 1, 2, et 3).

Les couleurs violet et bleu montrent les zones les plus conducteurs pour une résistivité aussi plus grande allant de 20 à 140 Ωm (2ème et 3ème lignes : pt 10 jusqu'au pt 27).

D'après les résultats obtenus pour le filtre 1, on remarque qu'à une profondeur d'investigation égale à 0,8 m les valeurs de résistivité varient entre 20 et 550 Ωm, caractéristique d'un terrain naturel argilo-calcaire.

- Carte d'iso-résistivité AB= 4m, P= 1m

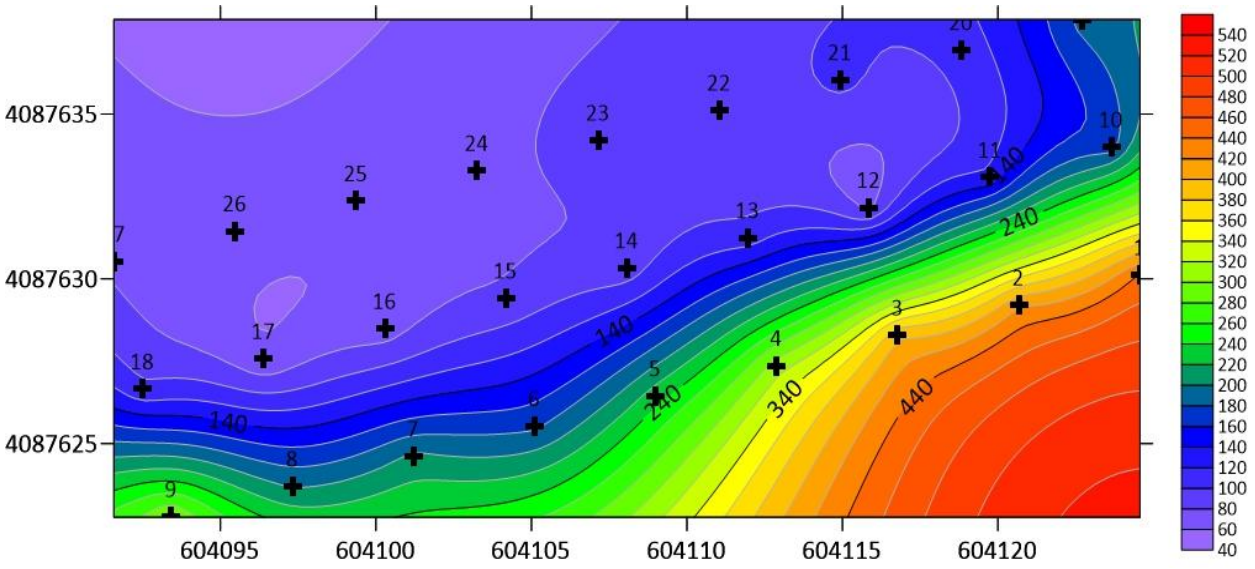


Figure 34. Carte d'iso-résistivité AB= 4 m du filtre végétalisé 1

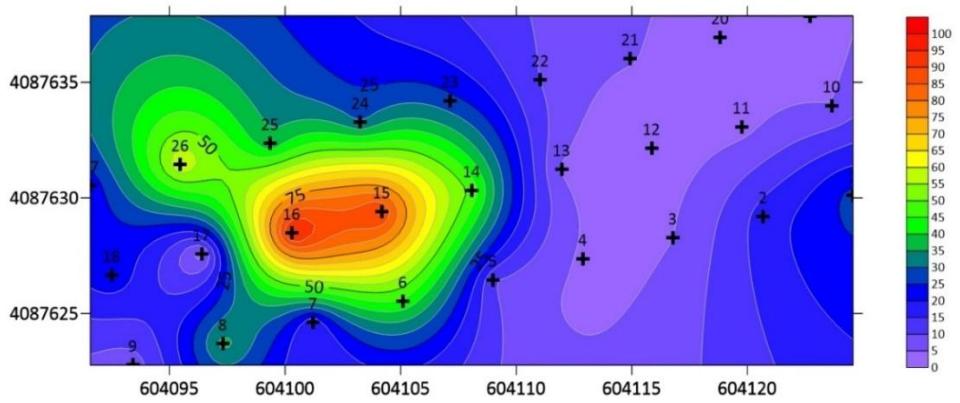
Même interprétation que la carte précédente (profondeur de 0,8 m), mais la valeur de résistivité monte jusqu'à 540 Ωm.

Élaboration des cartes d'intensité

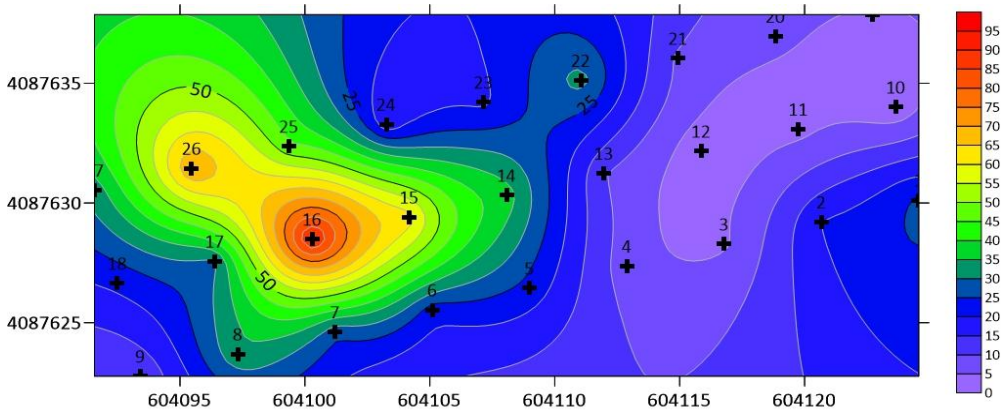
Pour examiner l'état physique de la géomembrane (altérations ponctuelles), l'étude de l'intensité est une utile pour savoir si elle est par exemple perforée, et permettrait d'expliquer l'origine ou les causes de formation des zones mortes et dégager d'éventuels relations avec la densité hétérogène des macrophytes du filtre 1, qui pourrait éventuellement être associée à la présence de fractions argileuses / boueuses.L'étude de l'intensité sert également à déterminer l'aspect de répartition de l'effluent dans le massif filtrant.

Les cartes d'intensités sont réalisées également par le logiciel Surfé sont rapportées dans les figures 35.

- Carte d'intensité AB= 0,8 m, P= 0,2 m



- Carte d'intensité AB= 1,6m, P= 0,4 m



- Carte d'intensité AB= 2,4m, P= 0,6 m

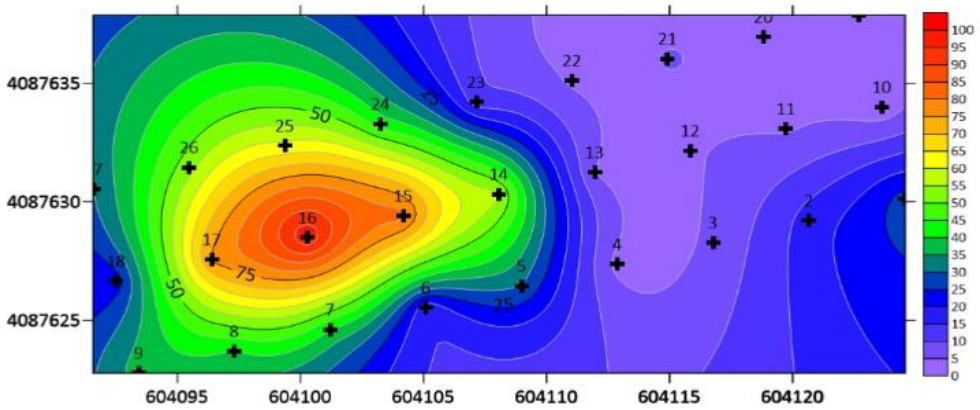


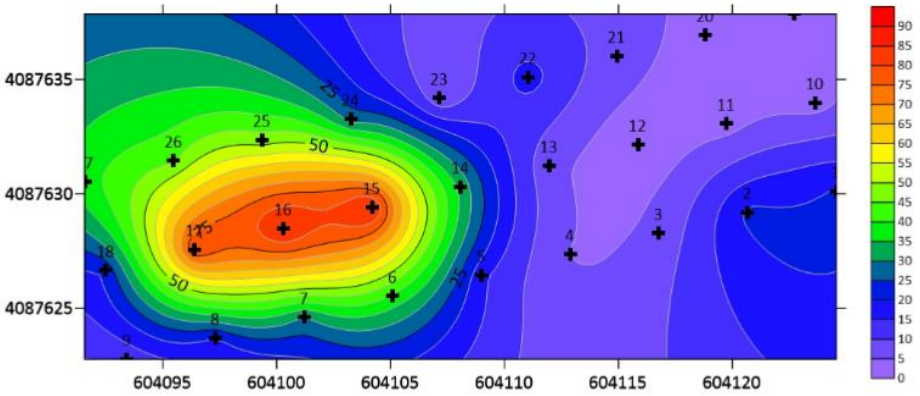
Figure 35. Cartes d'intensité pour différentes profondeurs d'investigation (0,2 m ; 0,4 m ; 0,6 m) du filtre végétalisé 1

D'après les cartes d'intensités à différentes profondeurs d'investigation allant de 0,2 jusqu'à 0,6 m (profondeur théorique du filtre ; limite inférieure étanchéifiée une géomembrane en PEHD), on distingue la présence de deux zones d'aspects différents : i) une zone avec les

couleurs orange et jaune où la valeur de l'intensité peut atteindre 100 A (points 14, 15, 16, 17, 24, 25 et 26) ce qui montre la présence de l'eau, et ii) une zone violet bleuâtre présentant des valeurs d'intensité allant de 0 jusqu'à 15 A ce qui renseigne sur l'absence de l'eau (points 3, 4, 10, 11, 12, 13, 19, 20, 21 et 22).

Pour les profondeurs d'investigation 0, 8 m et 1 m, les valeurs d'intensité atteignent 90 et 120 A. Ces valeurs ne sont pas caractéristiques d'un terrain naturel, et indiquent vraisemblablement la présence d'eau au-dessous de la géomembrane. La géomembrane serait alors perforée au niveau du point 16, ce qui expliquerait cette valeur importante de l'intensité (figure 36).

- Carte d'intensité AB= 3,2m, P= 0,8 m



- Carte d'intensité AB= 4m, P= 1 m

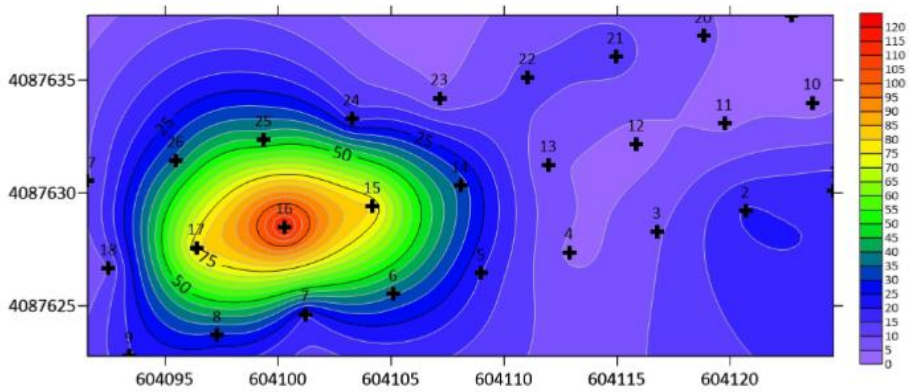


Figure 36. **Cartes d'intensité pour des profondeurs d'investigation de 0.8 et 1 m du filtre végétalisé 1**

Conclusions partielles

Pour mieux comprendre les défauts du filtre planté 1, nous rapportons ci-dessous l'ensemble des cartes d'iso-résistivité et d'intensité regroupées selon les profondeurs d'investigation.

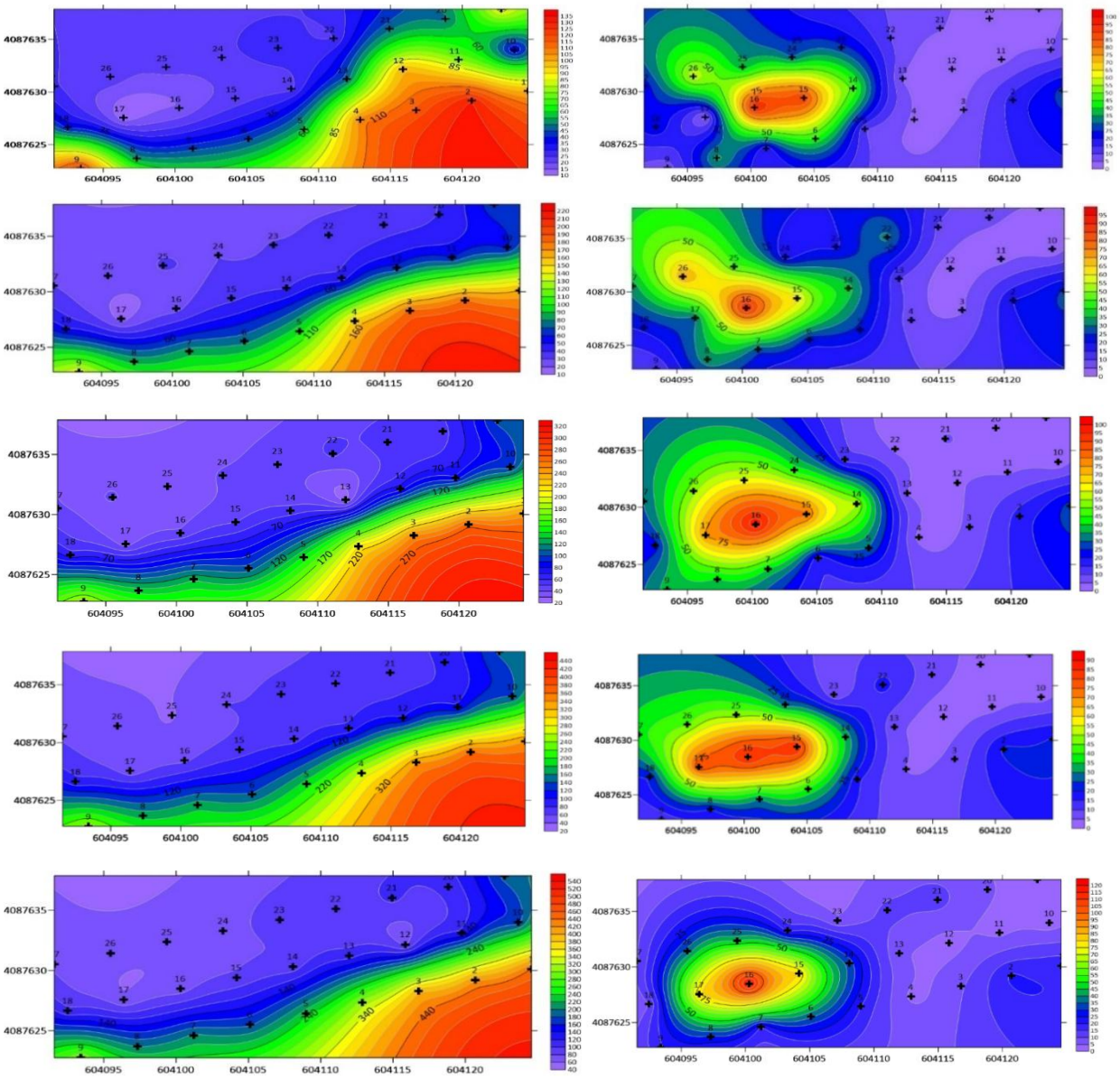


Figure 37. Cartes d'iso-résistivité et d'intensité du filtre végétalisé 1 à différentes profondeurs d'investigation

La dégradation présumée de la géomembrane au niveau du point 16, à l'entrée du filtre planté, provoquerait l'infiltration des eaux usées dans la couche de sol sous-jacente. Ces eaux sont chargées en matières solides qui auraient tendance à se déposer et s'accumuler à ce point en formant une couche de boues. Ceci expliquerait l'augmentation des valeurs de l'intensité qui sont inversement proportionnelle aux valeurs des résistivités, c'est-à-dire plus l'infiltration de l'eau augmente, plus la valeur de l'intensité augmente, plus les boues s'accumulent, plus la résistivité diminue.

Au niveau des points 2, 3, 4 et 5 les valeurs de résistivités sont plus grandes, alors que les valeurs d'intensités sont presque nulles, c'est-à-dire malgré l'absence de fraction boueuse au niveau de cette partie on a une absence totale de l'eau. Ceci pourrait être expliqué par le fait que la fraction argileuse diminue la perméabilité du filtre, et engendrer ainsi une diminution de la vitesse d'écoulement des eaux usées, et donc une répartition irrégulière de l'effluent ; l'eau n'arrive pas à la totalité de filtre ce qui explique l'apparition des zones mortes.

À la sortie du filtre, on remarque par exemple au niveau du point 10 la diminution des valeurs de résistivité surtout pour le premier horizon donc la présence d'une couche de boue. En revanche, les valeurs des intensités sous la géomembrane sont nulles. Ceci est vraisemblablement lié à la présence d'une crépine servant pour le drainage de l'eau filtrée vers la chambre de collecte. L'emplacement de cette crépine est mis en évidence par la figure 38, lors de la mise en place de la station courant de l'année 2016.

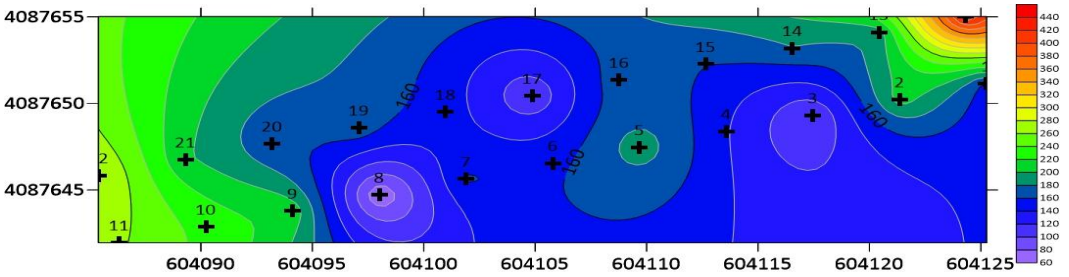
Figure 38. Localisation du système de drainage de l'eau dans le filtre végétalisé 1 Coupes géo-électriques

Afin de conforter nos constatations, des coupes géo-électriques dites aussi pseudo-section ont effectuées en en fonction des profondeurs d'investigation. Il s'agit des coupes horizontales (9 lignes) et verticales (3 colonnes) des résistivités. Les résultats sont rapportés dans les annexes 1 et 2.

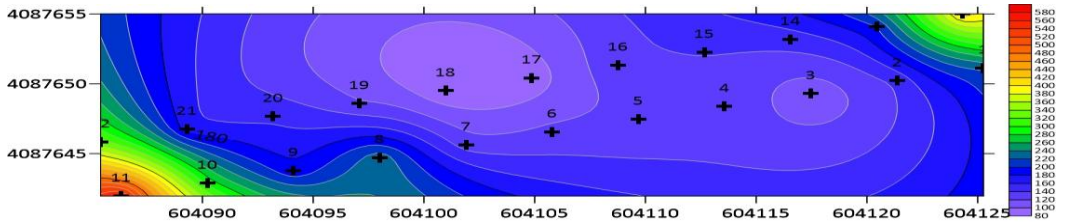
Par ailleurs, les résultats obtenus pour le filtre végétalisé 2 sont rapportés dans les cartes suivantes.

Élaboration des cartes d'iso-résistivité et d'intensité : Filtre 2

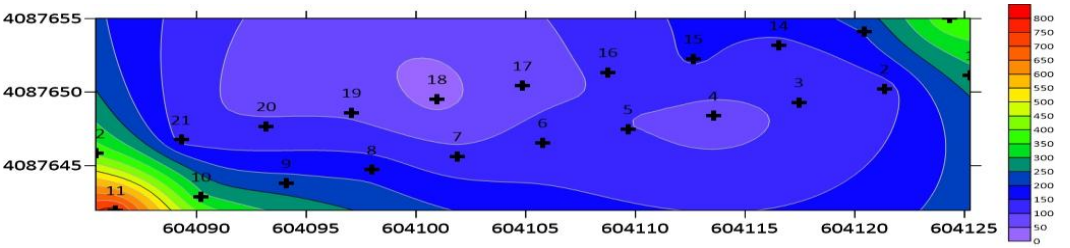
- Carte d'iso-résistivité AB= 0.8 m, P= 0.2 m



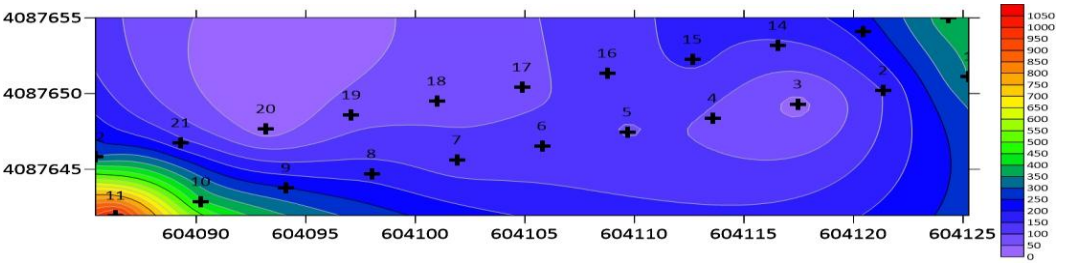
- Carte d'iso-résistivité AB= 1.6m, P= 0.4 m



- Carte d'iso-résistivité AB= 2.4m, P= 0.6 m



- Carte d'iso-résistivité AB= 3.2m, P= 0.8m



- Carte d'iso-résistivité AB= 4m, P= 1m

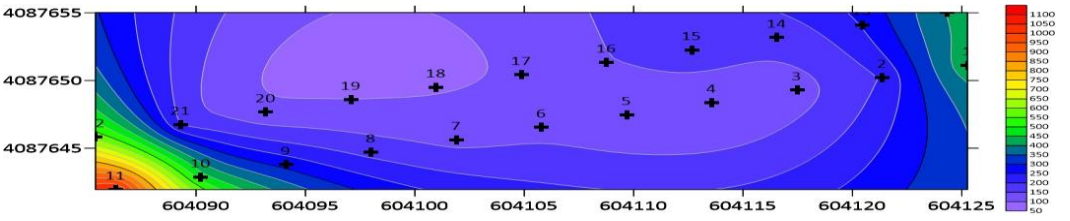


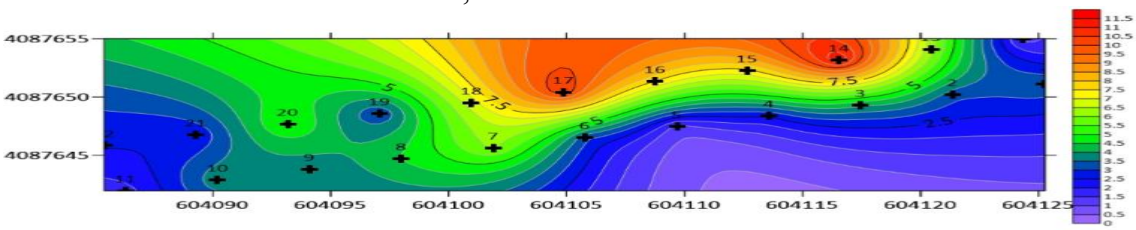
Figure 39. Cartes d'iso-résistivité du filtre végétalisé 2 pour les différentes profondeurs d'investigation

D'après ces cartes, on remarque que le filtre 2 présente un caractère plus homogène comparé au premier filtre.

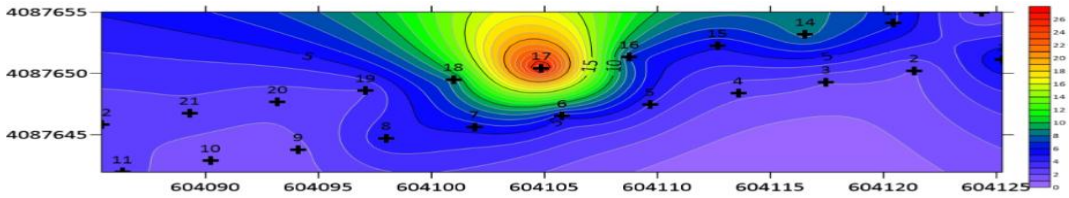
Les valeurs de résistivités varient de 50 à 200 Ωm à l'exception de la carte d'iso-résistivité d'AB= 2.4m et de profondeur= 0.6m (limite de la géo membrane) qui renseigne des zones à faible résistivité variable de 0 à 50 Ωm (point 18), d'où une accumulation de boues au niveau de ce point.

Au niveau du point 11 la valeur de résistivité monte jusqu'à 1100 Ωm, ceci est expliqué par l'augmentation de granulométrie au niveau de cette zone (tranchée de gabion).

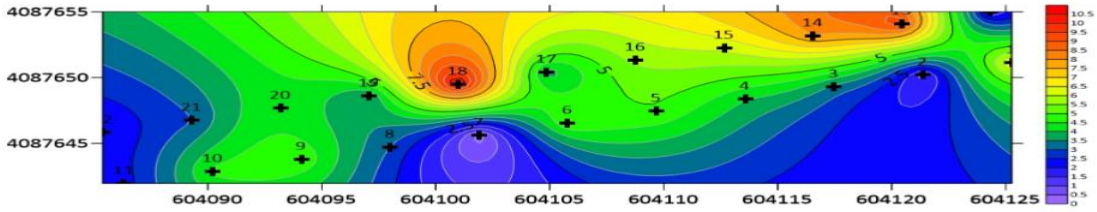
- Carte d'intensité AB= 0.8 m, P= 0.2m



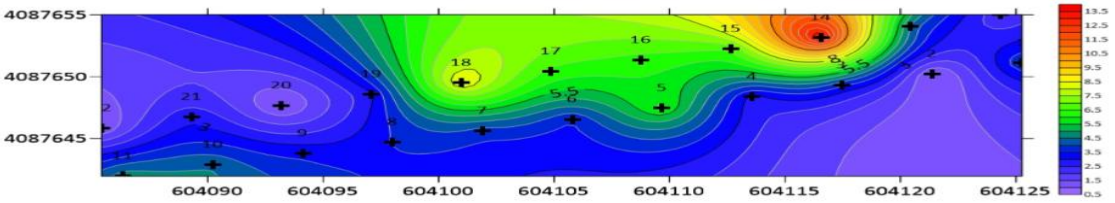
- Carte d'intensité AB= 1.6m, P= 0.4 m



- Carte d'intensité AB= 2.4m, P= 0.6 m



- Carte d'intensité AB= 3.2m, P= 0.8 m



- Carte d'intensité AB= 4m, P= 1 m

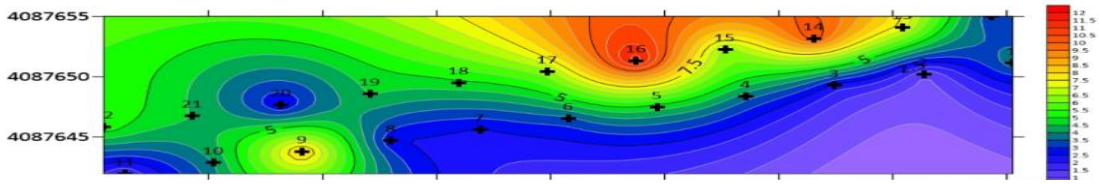


Figure 40. Cartes d'intensité du filtre végétalisé 2 pour les différentes profondeurs d'investigation

Le caractère homogène est rapporté également à partir des valeurs d'intensité enregistrées au niveau du filtre végétalisé 2. Ces valeurs varient de 0 à 12A dans les différents niveaux ; la géomembrane de ce filtre est en bon état.

Pour mieux confirmer ces résultats on a effectué des coupes géo-électriques des résistivités en fonction de profondeurs d'investigation : i) horizontales (11 lignes), et ii) verticales (2 colonnes). Les résultats sont représentés dans les annexes 3 et 4.

CONCLUSION

Ce travail avait pour objectifs : i) *d'évaluer la qualité de l'eau usée traitée et les performances épuratoires de la STEP pilote de Sidi Amor*, et ii) *d'examiner le taux de colmatage des filtres plantés à roseaux afin de contribuer à apporter, en partie, une réponse aux questions de dysfonctionnements des massifs filtrants*.

Pour réaliser cette étude, nous avons :

- Collecté les données relatives aux caractéristiques physico-chimiques des eaux usées traitées auprès de l'ONAS (données microbiologiques lacunaires), et les données relatives à certaines campagnes de *monitoring* réalisées en marge du suivi régulier de l'ONAS, et ce, afin de vérifier leur conformité à la norme tunisienne relative aux spécifications des eaux usées traitées à des fins agricoles NT 106.03.
- Réalisé une campagne d'exploration géophysique faites sur les deux filtres plantés à écoulement horizontal afin d'étudier le problème de colmatage et d'apprécier l'apport de la prospection électrique, suivant la méthode de Wenner, pour la surveillance de ces systèmes de filtration.

Dans un premier temps, ce travail nous a permis de monter que les caractéristiques physico-chimiques (pH, CE, DCO, DBO_5 et MES ; données ONAS) des EUT produites par les STEP pilote Sidi sont conformes à la norme tunisienne NT 106.03. Les rendements épuratoires sont de l'ordre de 40% et 50%, respectivement, pour la DBO_5 / DCO et les MES. En revanche nous avons enregistré un faible taux d'abattement des coliformes fécaux.

En se fiant aux analyses statistiques (ANOVA) nous avons pu démontrer des abattements significatifs des paramètres physico-chimiques, et non significatifs pour les coliformes fécaux, tout au long de la filière d'épuration. Un travail complémentaire permettrait de dégager le rôle prépondérant de chaque ouvrage sur la réduction de la pollution dans le système. Cependant, d'après les résultats préliminaires, les filtres plantés sont vraisemblablement les ouvrages qui jouent le rôle le plus important dans la diminution de la pollution organique (DBO_5, DCO) et particulaire (MES), ainsi que les éléments nutritifs. Le bassin de maturation aurait tendance à dégrader sensiblement la qualité de l'eau filtrée au regard du rythme de fonctionnement du système depuis sa mise en eau. Par ailleurs,

l'abattement des coliformes fécaux est fluctuant au niveau des différentes étapes de traitement.

Les résultats de prospection électrique ont permis de démontrer une dégradation de la géomembrane à l'entrée du premier filtre planté. Cela engendre une infiltration d'eau (problème d'étanchéité) et une accumulation de fraction boueuse en profondeur. Ceci aurait une incidence sur la vitesse d'écoulement et éventuellement une répartition irrégulière de l'effluent sur la totalité du filtre favorables à la formation de zones morte. En revanche, le deuxième filtre est moins impacté, du moins pour le moment, puisqu'il ne montre pas des signes de formation de fraction boueuse ou par ailleurs de détérioration de la géomembrane.

Afin d'améliorer les performances épuratoires de la station de Sidi Amor, la mise en place d'une unité de décantation en amont de la STEP (projeté d'ores et déjà par l'ONAS) permettrait de soulager le fonctionnement des filtres plantés à écoulement horizontal et limiterait les risques de colmatage, à long terme, notamment pour le deuxième filtre. Le premier filtre nécessiterait une intervention au niveau des zones de rupture de la géomembrane mais également au niveau des fractions boueuses identifiées comme barrière à l'écoulement dans certains compartiments du filtre. Cela permettrait de retrouver à terme une densité plus régulière des roseaux, et maintenir par leurs rhizomes les massifs de filtration hydrauliquement ouverts et minimiser le colmatage.

Références bibliographiques

- AFD, 2011. *REUT - Perspectives opérationnelles et recommandations pour l'action.* BRLi.
- Agence de l'eau RMC, 1999. Épuration des eaux usées par des filtres plantés de macrophytes, Une étude bibliographique. Lyon, 1999.
- Bahri, A., 2007. Water reuse in Tunisia : stakes and prospects. Atelier du PCSI (Programme Commun Systèmes Irrigués) sur une Maîtrise des Impacts Environnementaux de l'Irrigation, 2001, Montpellier, France. 11 p. ffcirad-00180335f.
- Ben Abdallah S., 2002. La réutilisation des eaux usées traités en Tunisie point de départ, condition, cadres et stratégie politique d'eau, partie I.
- Bliefert C., Perraud R., 2001. Chimie de l'environnement : Air, Eau, Sols, Déchets. Edition de Boeck, 477p.
- Brix, H., and Schierup, H.-H., 1989. The use of aquatic macrophytes in water-pollution control. Ambio 18, 100-107.
- Brix, H., 1993. Macrophyte-mediated oxygen transfer in wetlands: transport mechanisms and rates. In: Moshiri, G.A. (Ed.), Constructed wetlands for water quality improvement. Lewis Publishers, Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo, page 391-398.

- CEMAGREF, 2007. Les filtres plantés de roseaux, le lagunage naturel et leur association : comment? pourquoi?. Sinfotech, 1-6pp.
- Crites, R., and Tchobanoglous, G., 1998. Small and Decentralized Wastewater Management Systems. 4th edition, McGraw-Hill, New York, N.Y. 1064 p.
- Cronk, J.K., and Fennessy, M.S., 2001. Wetland Plants. Biology and Ecology. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.

- FAO, 2003. L'irrigation avec des eaux usées traitées. Manuel d'utilisation, 67 p.
- Hammer, D.A., 1992. Creating freshwater wetlands. Lewis Publishers, Inc., Chelsea, MI.
- Lazarova., V., 2002. Intérêt, bénéfices et contraintes de la réutilisation des eaux usées en France.
- Mara, D.D., et Cairncross., S, 1991: Appréhension des risques sanitaires liés à la réutilisation des eaux résiduaires et des excrétas en agriculture et aquaculture ; OMS et PNUE, Genève, 202p.
- MARHP, 2017. Rapport national du secteur de l'eau. Bureau de la Planification des équilibres hydrauliques.

- Metclaf., K, et Remous., R., 2003. Wastewater engineering-treatment and resue, 4th edition, New York, Mcgraw, 1819p.
- ONAS, 2013. Rapport annuel
- Wetzel, R.G., 2001. Limnology. Lake and River Ecosystems. Academic Press, San Diego.
- Weber, R., Vandevenne, L., and Edeline, F., 2002. Traitement biologique et physico-chimique des eaux usées. Lecture notes.
- Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P.F., Hberl, R., Perfler, R., and Laber, J., 1998. Removal mechanisms and types of constructed wetlands. In: Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P.F., Green, M.B., Haberl, R. (Eds.), Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe. Backhuys Publisher, Leiden, The Netherlands, 17-66.

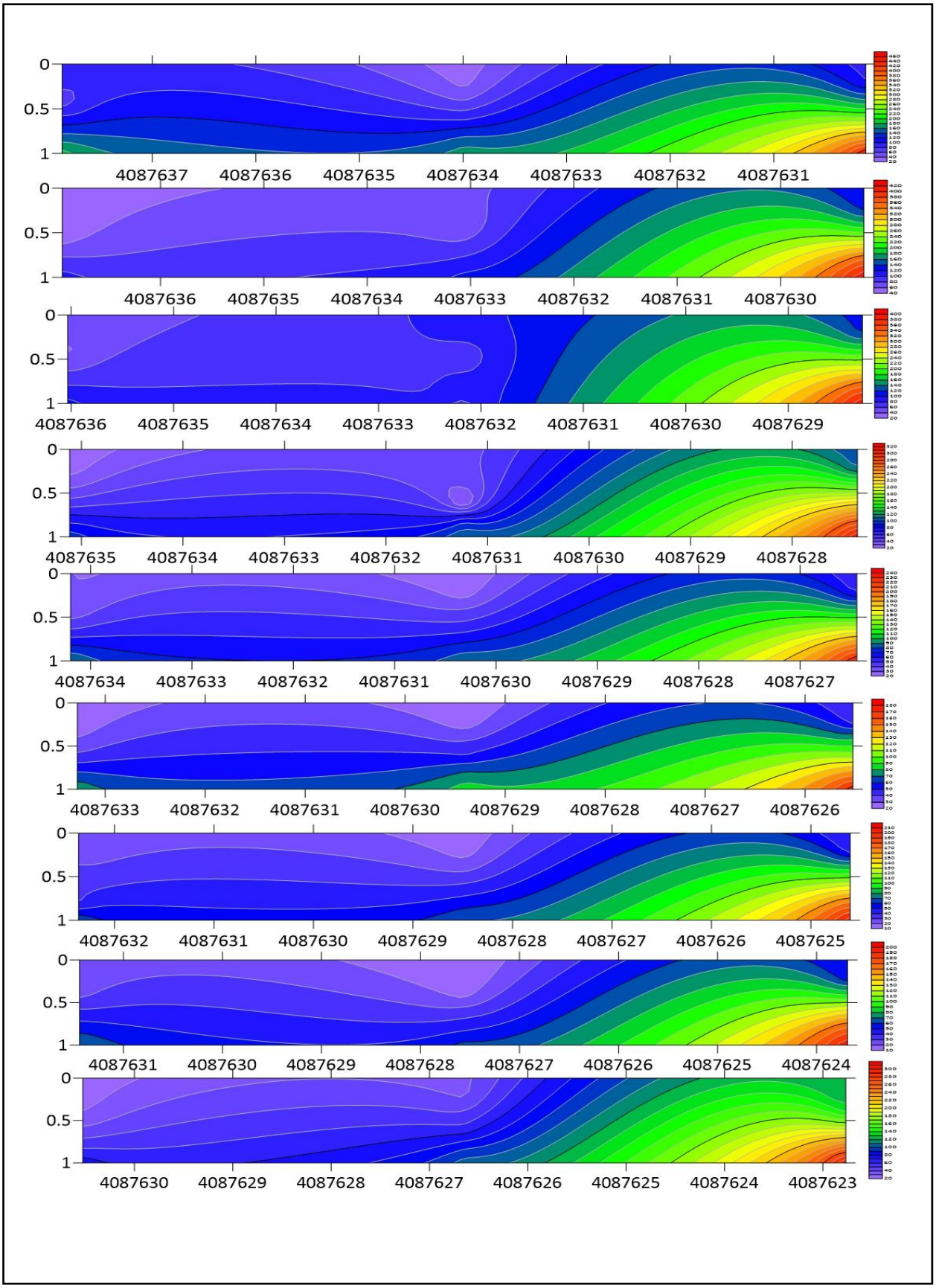
Les références électroniques

- Site web officiel de l'Office National de l'Assainissement, 2016.
- Site web: WWW. Dictionnaire environnement et développement durable. Com
- Site web: https://waterandcarbon.com.au/technology/surface-flow-wetlands/

ANNEXES

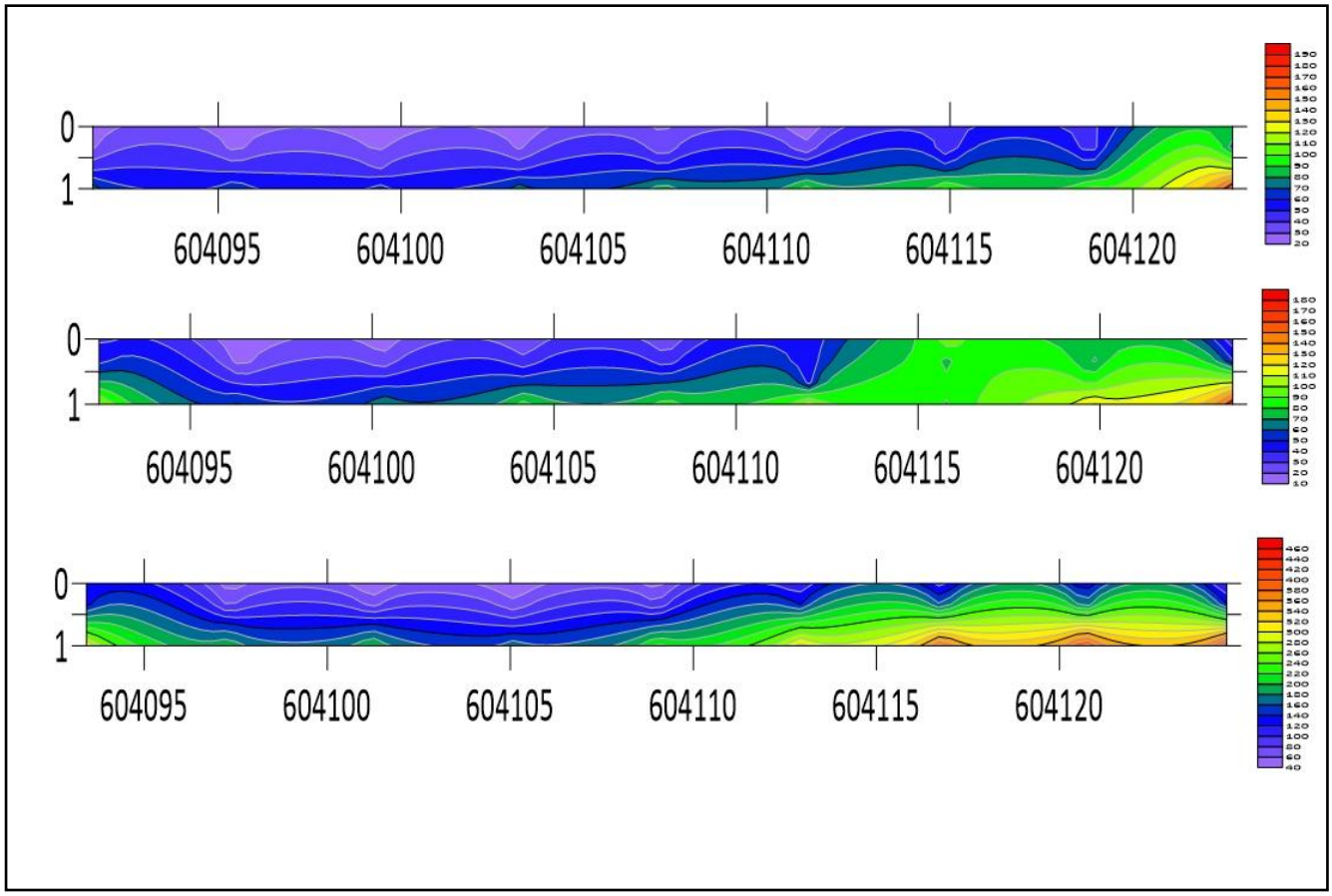
ANNEXE 1

Coupes géo-électrique horizontales du filtre végétalisé 1



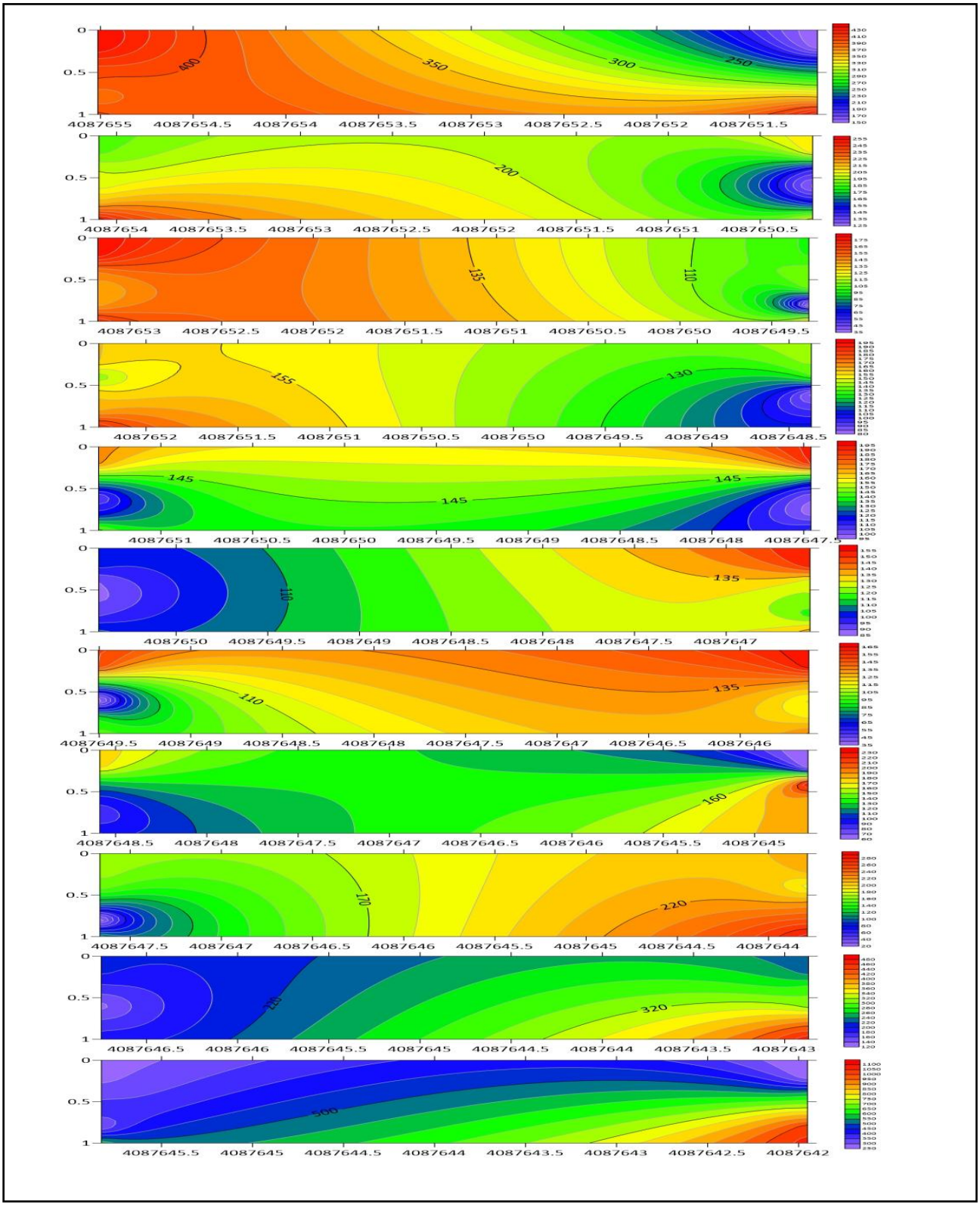
ANNEXE 2

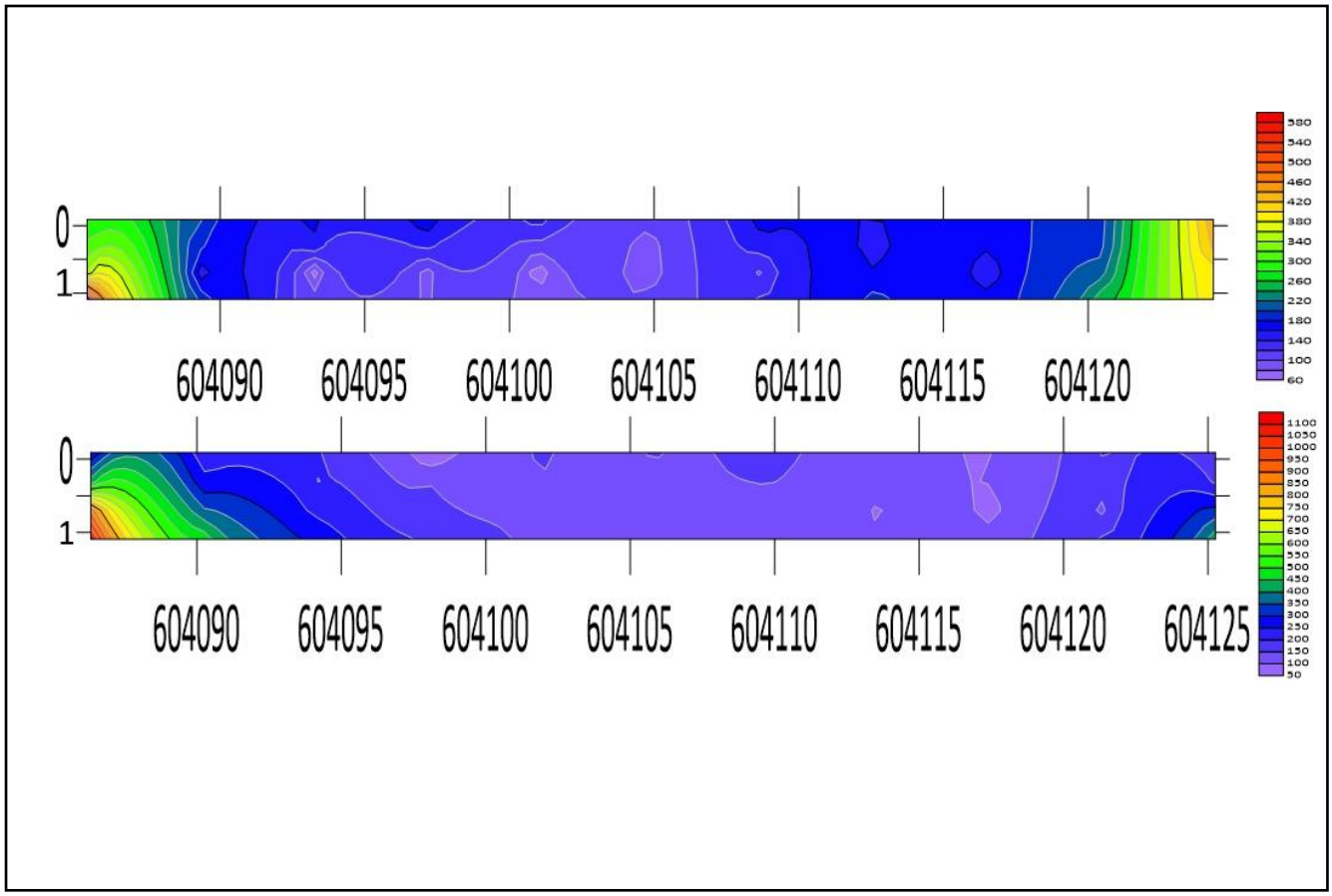
Coupes géo-électrique verticales du filtre végétalisé 1



ANNEXE 3

Coupes géo-électrique horizontales du filtre végétalisé 2



ANNEXE 4

Coupes géo-électrique verticales du filtre végétalisé 2