

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE L'HYDRAULIQUE

ARBAOUI Abdellah

DEPARTEMENT DE GENIE DE L'EAU

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR
D'ETAT EN HYDRAULIQUE

OPTION : CONCEPTION DES SYSTEMES D'IRRIGATION-DRAINAGE

THEME:

**IMPACT DE LA REUTILISATION DES EAUX USEES EPUREES SUR LES
PROPRIETES PHYSICO-CHEMIQUES ET PHYSICO-HYDRIQUES DU SOL**

Présenté par :

M^{elle} BOUCHAKOUR Mejda

Promotrice :

M^{me} L.S.BAHBOUH

Membre de Jury :

Président : Mr B.BENLAOUKLI

Examineurs : M^{me} A. AZIEZ

M^{me} D.DJOUJAR

M^r D.KOLIAI

Mr^r R.REKROUK

Novembre 2011

ملخص:

نظرا لتزايد ندرة الموارد الطبيعي المائية التقليدية. إعادة استعمال المياه الصرف المطهرة أصبحت أكثر أهمية باعتبارها الحل ، ولكن هذه التقنية يتطلب دراسة متأنية تأخذ في الاعتبار الجوانب البيئية على وجه الخصوص، فمن واجبنا الحفاظ على مواردنا المائية والتربة.

ولكن استعمالها على المدى الطويل قد يسبب التملح الأراضي ، وانخفاض غلة المحاصيل، تعطل سير المياه في التربة، وانتقال الملوثات إلى المياه الجوفية.

في هذا إطار يندرج المشروع حيث يهدف إلى رصد تأثير إعادة استخدام مياه الصرف الصحي المطهرة على الخصائص المياه الفيزيوكيميائية والفيزيوميائية للتربة.

Résumé:

En raison de la rareté croissante des ressources naturelles en eau conventionnelle. La réutilisation des eaux usées épurées s'impose de plus en plus comme une solution pertinente, toutefois sa mise en valeur exige une étude prudente qui tienne compte surtout des aspects environnementaux; Il est de notre devoir de préserver nos ressources en eau et en sol.

Son utilisation à long terme risque d'engendrer la salinisation et des terres, chute de rendements des cultures, perturbation du fonctionnement hydrique des sols, transfert de produits polluants dans les nappes.

C'est dans cette optique que ce travail a été réalisé afin de suivre l'impact de la réutilisation des eaux usées épurées sur les propriétés physico-chimiques et physico-hydriques d'un sol.

Abstract:

Due to the increasing scarcity of natural resources in conventional water. The reuse of treated wastewater is becoming more and more relevant as a solution, but its development requires a careful study that takes into account environmental aspects in particular, it is our duty to preserve our water and soil.

Its long-term use may cause salinization and land, crop yields drop, disruption of the functioning of soil water, transfer of pollutants into groundwater.

With this in mind that this work was conducted to monitor the impact of reuse of treated wastewater on the physico-chemical and physicochemical water of a soil.

Remerciements

J'exprime toute ma profonde gratitude à ma promotrice Mme L.BAHBOUH, pour l'effort fourni, les conseils prodigués, sa patience et sa persévérance dans le suivi de ce mémoire.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent à tous mes enseignants de l'ENSH qui m'ont transmis les bases de génie de l'eau ainsi qu'aux membres du jury en espérant qu'ils apprécieront mon travail.

Je tiens à remercier également Mr M.OUIR pour son aide et ces conseils sans qui la réalisation pratique de ce mémoire n'aurait pas pu se dérouler dans d'aussi bonnes conditions.

Je remercie aussi Mr AMIROUCH chef de service pour avoir veillé

Une sincère reconnaissance que je veux témoigner à Mme D.DJOUJAR, Mme W.Aziez, Mme HOULI, Mme MOKRANE, Mme B.TOUAIBIA, Mme S.OUIR, Mr M.K.MIHOUBI, Mr B. BENLAOUKLI, Mr D.KOLIAI, Mr B.SALAH pour leurs conseils et leur soutien.

Je remercie tout particulièrement Mr HADJI Raouf, propriétaire foncier et agriculteur de m'avoir aidé et laissé prendre de la terre pour mon expérimentation ainsi que sa gentillesse et sa disponibilité.

Je tiens à remercier FETHI ingénieur de laboratoire du génie civil de m'avoir aidé à finaliser le montage du dispositif.

Je ne voudrais pas manquer l'opportunité qui m'est ici offerte de remercier tout mes amis et collègues de l'ENSH, Kahina, Lamia, Zahra, Houda, Fariza, Takfarinas, Abdou, Samir, Ishak, Amine, Oumar, Modibo, Tarek, Yacine, Karim pour leur soutien et leur aide.

Je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.



Enfin, j'aimerais dédier ce mémoire à mes très chers parents qui se sont dévoués corps et âmes pour ma réussite et pour qui je leur témoigne une très grande affection. Je le dédie également à ma très chère sœur Imène qui m'a beaucoup aidé, à la mémoire de ma tante Hadjira, à mes copines Marwa et Nesrine.

Sommaire

Introduction	1
Chapitre I : Généralité sur la réutilisation des eaux usées épurées	
I. Les grands chiffres des besoins en eau mondiaux et de la REUE.....	2
II. La REUE dans le cycle de l'eau.....	3
III. La réutilisation des eaux usées épurées en Algérie	4
III.1) Situation de l'assainissement	4
III.2) Localisation des STEP qui fournissent actuellement de l'eau à l'agriculture	4
III.3) Réglementation	5
III.3.1) Les différentes réglementations dans le monde	5
III.3.2) Le contexte réglementaire d'usage des eaux usées épurées en Algérie.....	6
IV. Les usages de la REUE (Aspects techniques et sanitaires).....	10
IV.1) Les valorisations directes – Le cycle court.....	10
IV.1.1) Valorisation agricole.....	10
IV.1.2) La valorisation en zone urbaine	11
IV.1.3) la valorisation industrielle	12
IV.1.4) L'aquaculture	12
IV.1.5) La valorisation à des fins d'AEP	12
IV.2) Les valorisations indirectes – le cycle long.....	13
IV.2.1) Recharge de nappes.....	13
IV.2.2) Le soutien d'étiage.....	14
IV.2.3) Alimentation de zones humides.....	15
V. Les risques liés à la réutilisation agricole des eaux épurées.....	15
V.1) Le risque microbiologique.....	15
V.2) Les risques liés aux éléments traces : le risque chimique.....	16
V.2.1) Les métaux lourds.....	16
V.2.2) Les micropolluants organique.....	16
V.3) Le risque environnemental.....	16
V.3.1) Les eaux souterraines.....	16
V.3.2) Les eaux superficielles.....	17
V.3.3) Effets sur le sol.....	17
VI. La pollution de l'eau et son impact.....	18

VI.1) Les différents polluants de l'eau.....	18
VI.2) Les conséquences de la pollution de l'eau.....	20
Conclusion.....	22

Chapitre II : L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation

I. Origines et composition des eaux usées.....	24
I.1) Origines des eaux usées.....	24
I.1.1) Les eaux usées domestiques.....	24
I.1.2) Les eaux usées industrielles.....	24
I.1.3) Les eaux pluviales	25
I.1.4) Les eaux usées agricole.....	25
I.1.5) Les eaux usées issues des matières de vidanges (des fosses septiques).....	25
I.2) Composition des eaux usées.....	25
I.2.1) Les micro-organismes.....	26
I.2.2) Matière en suspension(MES) et matière organique (MO).....	26
I.2.3) Les éléments traces minéraux ou organiques.....	26
I.2.4) Les substances nutritives.....	26
I.2.5) La salinité.....	27
II. Mesure de la pollution des eaux résiduaires urbaines.....	27
II.1) Caractéristiques physico-chimiques des eaux usées.....	27
II.2) La mesure de la pollution carbonée.....	27
II.3) La pollution azotée et phosphorée.....	28
II.4) Les matières inhibitrices (M.I).....	28
II.5) Estimation des rejets.....	28
II.6) Equivalent habitant	29
II.7) Les germes pathogènes.....	29
III. Les étapes et procédés de traitement des eaux usées.....	29
III.1) Les étapes de traitements d'une station d'épuration.....	29
III.1.1) Les traitements physiques.....	29
III.1.1.1) Les prétraitements.....	29
III.1.1.2) Le traitement primaire Décantation.....	29
III.1.1.3) La clarification ou décantation secondaire.....	30
III.1.2) Les traitement physico-chimiques.....	30
III.1.3) Les traitements biologiques.....	30

III.1.3.1) Procédé par boues activées.....	30
III.1.3.1.1) L'élimination de l'azote.....	31
III.1.3.1.2) L'élimination du phosphore.....	31
III.1.3.2) Les lits bactériens.....	31
III.1.3.3) Les disques biologiques.....	32
III.1.3.4) Le biofiltre.....	32
III.1.4) Les procédés de désinfection supplémentaires (traitement tertiaire).....	32
III.1.4.1) Les traitements chimiques et les ultraviolets.....	32
III.1.4.2) Le lagunage tertiaire.....	33
III.1.4.3) Infiltration/percolation.....	33
III.1.5) Le traitement des boues.....	33
III.2) Le lagunage naturel.....	34
IV. Le stockage.....	35
V. La qualité de l'eau d'irrigation.....	36
V.1) Risque de salinité.....	36
V.2) Risque d'alcalinité (excès en sodium).....	37
V.3) Risque des carbonates et bicarbonates.....	37
V.4) Les éléments toxiques.....	38
V.5) Les nutriments.....	39
V.6) Les métaux lourds.....	39
VI. Classification des eaux d'irrigation.....	40
VI.1) Les classifications les plus utilisées.....	40
VI.1.1) La classification de l'USDA (1954).....	40
VI.1.2) La classification de Christiansen et al (1977).....	41
VI.1.3) La classification de Ayers et Westcot (1985).....	41
VI.2) Diagrammes de faciès chimique des eaux usées épurées.....	42
VI.2.1) Diagramme de Piper.....	42
VI.2.2) Diagramme de Schoeller Berkloff.....	43
VII. Irrigation.....	44
VII.1) Les modes d'irrigation.....	44
VII.1.1) L'irrigation de surface (gravitaire).....	44
VII.1.2) L'irrigation sous pression.....	44
VII.2) Choix du système d'irrigation.....	44
VII.3) Les problèmes liés au réseau de distribution.....	45

VII.4) Les recommandations.....	45
VII.4.1) Les recommandations concernant les systèmes d'irrigation.....	45
VII.4.2) Les recommandations sur le type de culture et de la récolte.....	46
VII.4.3) Quelques recommandations environnementale et sanitaire.....	46
Conclusion.....	47

Chapitre III : Propriétés et fonctions des sols irrigués

I. Principaux composants du sol.....	49
II. Caractéristiques du sol.....	50
II.1) La texture.....	50
II.2) La structure.....	51
II.3) La porosité.....	51
II.4) Les fluides du sol.....	52
II.4.1) La phase gazeuse.....	52
II.4.2) La phase liquide.....	52
III. Stockage et circulation de l'eau dans le sol.....	53
III.1) Rétention de l'eau dans le sol (hydrostatique du sol).....	53
III.1.1) La teneur en eau pondérale.....	53
III.1.2) La teneur en eau volumique.....	53
III.2) Transport de l'eau dans le sol (hydrodynamique du sol).....	53
III.2.1) Les équations particulière du transport de l'eau	53
III.2.2) La conductivité hydraulique	55
III.2.2.1) Conductivité hydraulique des milieux saturés en eau.....	56
III.2.2.2) Conductivité hydraulique des milieux non saturés.....	56
III.2.3) Les fonctions de pédotransfert	57
III.2.4) Influence de la qualité de l'eau sur la conductivité hydraulique	59
III.2.5) La température du sol et son influence sur la conductivité hydraulique.....	60
III.2.6) Les effets des microorganismes sur la conductivité hydraulique.....	61
IV. Transport de soluté.....	61
IV.1) la diffusion moléculaire.....	62
IV.2) La convection-dispersion.....	63
IV.3) l'existence de phénomènes puits et sources pour les solutés.....	63
V. Salinité et sodicité des sols.....	64
V.1) La dégradation des sols par salinisation	65

V.2) La dégradation des sols par alcalinisation.....	65
VI. Les éléments traces métalliques (ETM).....	67
VI.1) Localisation des éléments traces métallique dans les sols.....	67
VI.2) Facteurs et conditions de Transfert.....	68
VI.2.1) Le pH du sol.....	68
VI.2.2) Le potentiel d'oxydo-réduction.....	68
VI.2.3) La température et l'humidité du sol.....	69
VI.2.4) L'apport de matière organique.....	69
VII. Les fonctions épuratrices du sol.....	70
Conclusion	71

Chapitre IV : Expérimentation

I. Objectif.....	72
II. Protocole expérimental.....	72
II.1) Présentation du dispositif expérimental.....	72
II.2) Préparation du dispositif.....	73
II.2.1) Procuration du sol.....	73
II.2.2) Remplissage des colonnes	74
II.2.3) Marquage des colonnes.....	75
II.2.4) Les eaux usées épurées pour l'arrosage.....	76
II.2.4.1) Provenance des eaux usées épurées.....	76
II.2.4.2) Analyse physico-chimique des eaux usées épurées.....	77
III. Mesures des principales caractéristiques du sol apporté.....	85
III.1) Les caractéristiques physiques.....	85
III.2) Les caractéristiques chimiques	86
IV. Mesure des principaux paramètres physico-chimiques des eaux apportées et témoin.....	87
Conclusion.....	88

Chapitre V : Résultats et Interprétation

I. Qualité des eaux usées épurées et de l'eau témoin.....	89
I.1) Classification des EUE et eau témoin selon le diagramme de Riverside.....	89
I.1.1) Carbonates et bicarbonates.....	90
I.1.2) Détermination du SAR _{ajusté}	91
I.2) Classification selon le diagramme de Piper.....	91

I.3) Classification selon le diagramme de Schoeller Berkloff	92
II. Caractérisation physico-chimique du sol.....	93
II.2) Courbes de l'évolution de la salinité du sol.....	98
II.3) le calcaire total.....	102
III. Qualité physico-chimique des eaux drainées.....	104
III.1) Analyse des éléments minéraux.....	104
III.2) Faciès chimique des eaux drainées.....	106
III.3) pH des eaux drainées	108
III.4) La conductivité électrique des eaux drainées	110
IV. Caractérisation physico-hydrrique du sol.....	112
IV.1) L'évolution de la de porosité totale.....	112
IV.2) Courbes pF.....	112
IV.3) Conductivité hydraulique à saturation.....	113
V. Discussion des Résultats	114
Conclusion générale.....	117

Bibliographie

Annexe

LISTE DES FIGURES

Fig I.1: Le rôle des installations techniques de traitement, récupération et réutilisation dans l'ensemble du cycle hydrologique.....	4
Fig I.2 : Image qui représente les différentes origines de la pollution.....	19
Fig I.3: Exemple d'images qui montrent le phénomène de l'eutrophisation.....	21
Fig II.1 : Intégration des eaux usées épurées dans le cycle générale des eaux usées.....	23
Fig II.2 : Les étapes de traitement d'une station d'épuration à boue activée.....	34
Fig II.3: Schéma qui représente le lagunage naturel.....	35
Fig II.5: Diagramme de classification des eaux d'irrigation.....	41
Fig II.6: Diagramme de Piper.....	42
Fig II.7: Diagramme de Schoeller Berkaloff.....	43
Fig III.1 : Le flux de matières polluantes transitant par le sol.....	48
Fig III.2 : Description d'un sol.....	49
Fig III.3: Le triangle texturale.....	50
Fig III.4 : Les différents types de structure fragmentaire.....	51
Fig III.5: Les formes de l'eau dans le sol.....	52
Fig III.6: Allure générale de la relation $K(h)$	56
Fig III.7: Allure générale des relations $K(\theta)$ et $h(\theta)$	56
Fig III.8 : Localisation des phénomènes de transport dans l'espace poral.....	62
Fig III.9 : Salinité et sodicité des sols.....	64
Fig III.10 : Destruction de la structure du sol due à l'excès de sodium.....	65
Fig III.11 : Processus de dégradation de la qualité des sols suite à l'irrigation.....	66
Fig IV.1 : Bassines recueillant les eaux drainées et un tuyau d'arrosage.....	73
Fig IV.2 : Préparation des colonnes.....	73
Fig IV.3 : Remplissage des sacs en plastique par de la terre.....	73
Fig IV.4 : Rinçage du gravier.....	74

Fig IV.5 : Remplissage par de la couche de gravier.....	74
Fig IV.6 : Remplissage des colonnes par de la terre.....	74
Fig IV.7: Saturation du sol dans le bassin.....	74
Fig IV.8 : Mise en place finale du dispositif.....	75
Fig IV.9 : Disposition des colonnes.....	75
Fig IV.10 : Image avec vue aérienne de la STEP de Beni Messous (Google Earth).....	76
Fig IV.11 : Image avec vue aérienne de la STEP de Tipasa (Google Earth).....	76
Fig IV.12: Variation du pH à l'entrée et à la sortie de la STEP de Beni Messous en 2008.....	78
Fig IV.13: Variation du pH à l'entrée et à la sortie de la STEP de Beni Messous en 2009.....	78
Fig IV.14: Variation du pH à l'entrée et à la sortie de la STEP de Beni Messous en 2010.....	78
Fig IV.15: Variation du pH à l'entrée et à la sortie de la STEP de Beni Messous en 2011.....	79
Fig IV.16: Variation de la salinité de la STEP de Beni Messous de l'année 2008.....	79
Fig IV.17: Variation de la salinité de la STEP de Beni Messous de l'année 2009.....	79
Fig IV.18: Variation de la salinité de la STEP de Beni Messous de l'année 2010.....	80
Fig IV.19: Variation de la salinité de la STEP de Beni Messous de l'année 2011.....	80
Fig IV.20: Variation des MES de la STEP de Beni Messous de l'année 2008.....	80
Fig IV.21: Variation des MES de la STEP de Beni Messous de l'année 2009.....	81
Fig IV.22: Variation des MES de la STEP de Beni Messous de l'année 2010.....	81
Fig IV.23: Variation des MES de la STEP de Beni Messous de l'année 2011.....	81
Fig IV.24: Variation du pH à l'entrée et à la sortie de la STEP de Tipasa de l'année 2008.....	82
Fig IV.25: Variation du pH à l'entrée et à la sortie de la STEP de Tipasa de l'année 2009.....	82
Fig IV.26: Variation du pH à l'entrée et à la sortie de la STEP de Tipasa de l'année 2010.....	82
Fig IV.27: Variation de la salinité de la STEP de Tipasa de l'année 2008.....	83
Fig IV.28: Variation de la salinité de la STEP de Tipasa de l'année 2009.....	83

Fig IV.29: Variation de la salinité de la STEP de Tipasa de l'année 2010.....	83
Fig IV.30: Variation des MES de la STEP de Tipasa de l'année 2008.....	84
Fig IV.31: Variation des MES de la STEP de Tipasa de l'année 2009.....	84
Fig IV.32: Variation des MES de la STEP de Tipasa de l'année 2010.....	84
Fig IV.33 : Marmite de Richards.....	86
Fig IV.34 : Mesure de la conductivité hydraulique par la méthode Henin.....	86
Fig IV.35 : Mesure du calcaire total à l'aide du calcimètre de Bernard.....	87
Fig IV.36 : Mesure du pH de l'eau.....	87
Fig IV.37: Mesure de la conductivité électrique.....	87
Fig IV.38 : Mesure des MES par filtration.....	88
Fig V.1 : Classification des eaux selon le diagramme de Riverside.....	90
Fig V.2: Classification chimique des eaux selon le diagramme de Piper.....	91
Fig V.3 : Classification chimique selon le diagramme de Schoeller Berkloff.....	92
Fig V.4 : pH-eau et pH-KCl du sol pour les colonnes de 20 cm après 4 irrigations.....	93
Fig V.5 : pH-eau et pH-KCl du sol pour les colonnes de 40 cm après 4 irrigations	93
Fig V.6 : pH-eau et pH-KCl du sol pour les colonnes de 60 cm après 4 irrigations	94
Fig V.7 : pH-eau et pH-KCl du sol pour les colonnes de 40 cm après 5 irrigations.....	94
Fig V.8 : pH-eau et pH-KCl du sol pour les colonnes de 60 cm après 5 irrigations.....	95
Fig V.9 : L'évolution du pH du sol en fonction du temps pour les colonnes de 20 cm.....	95
Fig V.10 : L'évolution du pH du sol pour les colonnes T de 40 cm.....	96
Fig V.11 : L'évolution du pH du sol pour les colonnes B de 40 cm.....	96
Fig V.12 : L'évolution du pH du sol pour les colonnes C de 40 cm.....	96
Fig V.13 : L'évolution du pH du sol pour les colonnes T de 60 cm.....	97
Fig V.14 : L'évolution du pH du sol pour les colonnes B de 60 cm.....	97
Fig V.15 : L'évolution du pH du sol pour les colonnes C de 60 cm.....	97

Fig V.16 : L'évolution de la salinité du sol pour les colonnes de 20 cm.....	98
Fig V.17 : L'évolution de la salinité du sol pour les colonnes T de 40 cm.....	99
Fig V.18 : L'évolution de la salinité du sol pour les colonnes B de 40 cm.....	99
Fig V.19 : L'évolution de la salinité du sol pour les colonnes C de 40 cm.....	99
Fig V.20 : L'évolution de la salinité du sol pour les colonnes T de 60 cm.....	100
Fig V.21 : L'évolution de la salinité du sol pour les colonnes B de 60 cm.....	100
Fig V.22 : L'évolution de la salinité du sol pour les colonnes C de 60 cm.....	100
Fig V.23 : Variation du taux de calcaire total pour les colonnes de 40 cm.....	102
Fig V.24 : Variation du taux de calcaire total pour les colonnes de 60 cm.....	103
Fig V.25 : Résultats d'analyse des eaux drainées de la colonne T de 60 cm.....	104
Fig V.26 : Résultats d'analyse des eaux drainées de la colonne B de 60 cm.....	104
Fig V.27 : Résultats d'analyse des eaux drainées de la colonne C de 60 cm.....	105
Fig V.28 : Résultats d'analyse des eaux drainées de la colonne T de 40 cm.....	105
Fig V.29 : Résultats d'analyse des eaux drainées de la colonne B de 40 cm.....	105
Fig V.30 : Résultats d'analyse des eaux drainées de la colonne C de 40 cm.....	106
Fig V.31 : Faciès chimique des eaux drainées des colonnes de 60 cm.....	106
Fig V.32 : Faciès chimique des eaux drainées des colonnes de 40 cm.....	107
Fig V.33 : Faciès chimique des eaux drainées des colonnes de 60 cm.....	107
Fig V.34 : L'évolution du pH de l'eau drainée pour les colonnes de 20 cm.....	108
Fig V.35 : L'évolution du pH de l'eau drainée pour les colonnes de 40 cm.....	109
Fig V.36 : L'évolution du pH de l'eau drainée pour les colonnes de 60 cm.....	109
Fig V.37 : L'évolution de la salinité de l'eau drainée pour les colonnes de 20 cm.....	110
Fig V.38 : L'évolution de la salinité de l'eau drainée pour les colonnes de 40 cm.....	110
Fig V.39 : L'évolution de la salinité de l'eau drainée pour les colonnes de 60 cm.....	110
Fig IV.40 : Courbes pF après 3 irrigations.....	112
Fig IV.41 : Courbes pF après 5 irrigations.....	113

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Recommandation microbiologiques révisées de l’OMS pour le traitement des eaux usées avant utilisation en agriculture.....	7
Tableau I.2: Résumé des recommandations de l'état de Californie pour la REUE.....	8
Tableau I.3: Recommandations de l'USEPA concernant la REUE.....	9
Tableau I.4: Limites recommandées en élément traces (mg/l) dans les eaux usées épurées destinées à l'irrigation.....	9
Tableau II.1: La conductivité électrique.....	40
Tableau II.2: La teneur en sodium.....	40
Tableau II.3: Classification de Christiansen et al.....	41
Tableau II.4: Directives pour l'interprétation de la qualité de l'eau d'irrigation.....	42
Tableau III.1: Échelle granulométrique de la texture du sol.....	50
Tableau III.2: Parallélisme entre les paramètres de la zone non saturée et de la zone saturée du sol.....	57
Tableau III.3: Des fonctions de pédotransfert pour la conductivité hydraulique à l'état saturé.....	58
Tableau III.4: Catégories de sols salés et sodique (d'après Black, 1968).....	66
Tableau III.5: Effets du pH et du potentiel redox sur la mobilité des ETM du sol.....	69
Tableau IV.1 : Granulométrie du sol.....	85
Tableau IV.2: Résultats de la densité apparente prélevée in situ.....	85
Tableau IV.3: Résultats des paramètres physico-chimique des eaux apportées.....	87
Tableau V.1: Qualité physico-chimique des eaux usées épurées et de l'eau témoin.....	89
Tableau V.2 : Principaux paramètres pour la classification des eaux	89
Tableau V.3: Paramètres pour la détermination des risques liés aux carbonates et bicarbonates.....	90
Tableau V.4 : Résultats du SAR ajusté.....	91
Tableau V.5: Résumé des résultats de la salinité pour les colonnes de 20 cm.....	102
Tableau V.6: Résumé des résultats de la salinité pour les colonnes de 40 cm.....	102

Tableau V.7: Résumé des résultats de la salinité pour les colonnes de 60 cm.....	102
Tableau V.8: Résultats de mesures de la porosité après 3 irrigations.....	112
Tableau V.9: Résultats de mesures de la porosité après 5 irrigations.....	112
Tableau V.10: Résultats des conductivités hydrauliques.....	113

Parce qu'elle est source de vie, l'eau est fragile
Parce qu'elle est source de prospérité, l'eau est convoitée
Parce qu'elle semble inépuisable, l'eau est gaspillée
Parce qu'elle semble inaltérable, l'eau est polluée

INTRODUCTION GENERALE :

Il est reconnu que l'irrigation apporte aux agriculteurs la possibilité de lever un certain nombre de contraintes dont celles liées aux aléas climatiques.

Tout en permettant la diversification, l'irrigation joue un rôle important dans les domaines techniques et socio-économiques.

A l'échelle de l'exploitation, l'irrigation permet de diversifier les cultures, elle améliore la productivité des exploitations et facilite la stabilisation des productions.

Par conséquent, l'irrigation constitue, en volume, un des plus gros consommateurs d'eau.

A l'échelle régionale et nationale l'irrigation contribue à l'amélioration du PIB (produit intérieur brut) ainsi que la structuration de l'espace en apportant des changements significatifs à l'aménagement d'un territoire et en contribuant à la mise en place et le développement de microclimats favorables.

En raison de la rareté croissante des ressources naturelles en eau conventionnelle et étant donné la concurrence entre les secteurs du développement économique de point de vue demande en eau, la valorisation des eaux usées épurées est considérée comme une composante essentielle dans la politique de gestion intégrée des ressources hydriques. Cependant, pour qu'elle soit inscrite dans un cadre de développement durable, la mise en valeur de la réutilisation de ces eaux exige une étude prudente et intégrée qui tiennent compte surtout des aspects environnementaux.

Beaucoup d'études se sont penchées sur ce sujet, notamment sur l'aspect sanitaire de la consommation des cultures irriguées avec ce type d'eau. Cependant ce n'est que récemment que des travaux portant sur la relation eau épurée-sol se sont développés car l'enjeu est important.

C'est dans ce contexte que nous avons réalisé ce travail dont l'objectif est l'étude de l'impact de la réutilisation des eaux usées épurées sur les propriétés physico-chimiques et physico-hydriques d'un sol. le plan de travail adopté est le suivant :

La première partie comportant une synthèse bibliographique sur les généralités de la réutilisation des eaux usées épurées, ainsi que son utilisation en irrigation suivie d'une synthèse sur les propriétés et fonctions des sols.

La deuxième, expose la partie expérimentale résumant et décrivant le protocole et les travaux expérimentaux, ainsi que les résultats et leurs interprétations.

Chapitre I

Généralité sur la réutilisation des eaux
usées épurées

Introduction :

Les motifs qui ont conduit et qui conduisent à envisager la réutilisation des eaux usées épurées sont de deux ordres: en termes de ressource en eau, la valorisation des eaux usées épurées répond à un **objectif quantitatif** et ce sont surtout les zones arides et semi arides du globe qui sont concernées. En parallèle, dans le domaine de la préservation environnementale, et donc **des objectifs qualitatifs**, de nombreuses réflexions ont conduit et conduisent à des opérations de réutilisation. L'objectif quantitatif est prépondérant dans la genèse des projets de la REUE. Pour répondre à des pénuries chroniques ou occasionnelles, et après prise en compte des coûts d'investissement et d'exploitation, la réutilisation des eaux usées épurées s'impose de plus en plus comme une solution économiquement pertinente.

Toutefois force est de constater que la mise en œuvre effective de projets de REUE tarde souvent à voir le jour du fait des contraintes institutionnelles et organisationnelles, mais également des réticences culturelles.

I. Les grands chiffres des besoins en eau mondiaux et de la REUE :

Afin de mettre en perspective les enjeux potentiels de la réutilisation des eaux usées épurées, il convient de garder en mémoire les valeurs suivantes concernant la mobilisation de l'eau à l'heure actuelle [1] :

- Le volume total de l'eau prélevée par l'activité humaine dans le monde s'élève à **3 800 milliards m³/an**
- La répartition de ce volume est à l'échelle mondiale de **70 %** pour l'irrigation (**2 660 milliards m³/an**), **22 %** pour l'eau industrielle (soit **836 milliards m³/an**) et **8 %** pour l'eau à usage domestique (soit **304 milliards m³/an**)
- Les eaux usées collectées (sur les **1 140 milliards m³/an** affectés à l'eau domestique et industrielle) représentent **370 milliards m³/an** et un peu moins de la moitié fait l'objet d'un traitement, soit **160 milliards m³/an**
- On estime à **2 %** de ce total, soit **7 milliards m³/an**, la fraction de ces eaux usées épurées qui sont réutilisées à ce jour tous usages confondus.

Il ressort de ces données numériques les enseignements suivants :

- Le gisement des eaux usées épurées encore à recycler est important
- La REUE n'est qu'une solution partielle à la forte demande en eau, notamment agricole à travers le monde et ne se substitue pas aux questions globales de la mobilisation de l'eau.

II. La REUE dans le cycle de l'eau :

Dans le cycle naturel de l'eau, on sait que la série précipitation – ruissellement – évaporation – précipitation – etc....traduit globalement la conservation de la masse hydrique sur le globe.

Il est pertinent de conserver en mémoire ce schéma car l'homme reproduit un schéma similaire dans son usage de l'eau : prélèvement dans le milieu – utilisation – retour au milieu.

Une distinction tout de même avec le cycle naturel : alors que la molécule H₂O météorique reste H₂O quand elle ruisselle puis qu'elle est reprise en évaporation ou en évapotranspiration, il n'en va pas de même dans le cycle anthropique qui voit H₂O prélevée au milieu pour les activités humaines, être restituée au milieu polluée.

Au-delà du rejet, le milieu récepteur possède parfois une certaine capacité à dépolluer. En effet les mécanismes cumulés de la dilution, des transformations naturelles physico-chimiques, du pouvoir bactéricide du soleil et du sol et du temps, ont pendant longtemps suffi à garantir la dépollution de façon naturelle et ont en quelque sorte permis d'échapper aux questions environnementales posées par les rejets des eaux usées par l'activité humaine.

C'est quand un seuil quantitatif (et qualitatif) a été franchi que le milieu naturel a perdu cette aptitude à dépolluer et qu'il est devenu urgent de penser au devenir exact des eaux usées.

La première logique historique a donc été de dépolluer les eaux rejetées par les égouts afin d'en supprimer les nuisances et de les réinsérer dans le cycle naturel. Pour cela on s'est préoccupé de réduire la charge organique. Le transit via les cours d'eau, puis l'évaporation via les étendues lacustres ou marines conduisent ensuite à la régénération d'eaux météoriques.

II.1) Le rôle de la récupération et réutilisation des eaux usées dans le cycle hydrologique :

Le cycle de l'eau se compose de ressources en eau de surface douce et salée, en eau souterraine, en eau associée à diverses fonctions d'utilisation des sols, et en vapeur d'eau atmosphérique. De nombreux cycles secondaires existent au sein du grand cycle hydrologique, y compris le transport de l'eau permis par l'ingénierie, comme dans le cas des aqueducs. La récupération, le recyclage et la réutilisation des eaux usées sont devenus des éléments importants du cycle hydrologique dans les domaines municipal, industriel et agricole. Un aperçu général du cycle de l'eau, depuis les ressources en eaux de surface et en eau souterraine jusqu'aux installations de traitement de l'eau, à l'irrigation, aux applications industrielles et municipales et aux installations de récupération et réutilisation des eaux usées, est présenté dans la figure I.1 [1] .

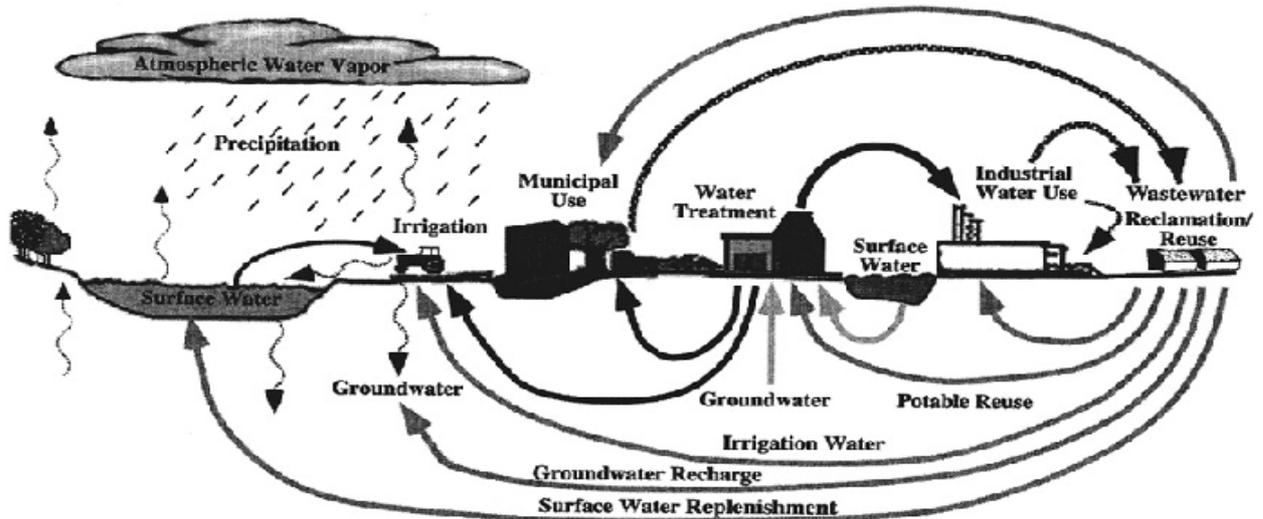


Fig I.1: Le rôle des installations techniques de traitement, récupération et réutilisation dans l'ensemble du cycle hydrologique.

III. La réutilisation des eaux usées épurées en Algérie :

III.1) Situation de l'assainissement :

Ces dernières années le secteur de l'assainissement a connu une redynamisation et une attention particulière des pouvoirs publics et du secteur des ressources en eau. Selon le ministère des ressources en eau le taux de raccordement moyen national calculé sur la base moyenne des taux de raccordement de **48 wilayas** est de **86 %** pour une longueur totale du réseau d'assainissement qui avoisine les **38 000 kml** [20].

Aujourd'hui, on compte **100 stations d'épurations** fonctionnelles représentant une capacité d'épuration annuelle qui se rapproche du volume rejeté à l'échelle nationale qui est de **900 Hm³/an**[20].

III.2) Localisation des STEP qui fournissent actuellement de l'eau à l'agriculture :

- Le périmètre d'irrigation de M'leta à partir de la STEP d'oran sur une superficie de 8100 ha
- L'irrigation d'un périmètre sur une superficie de 350 ha à partir de la STEP de BBA
- L'irrigation d'un périmètre à Constantine sur une superficie de 327 ha à partir de la STEP de Hamma Bouziane.

III.3) Réglementation :

III.3.1) Les différentes réglementations dans le monde :

A l'échelle mondiale, il n'existe pas une réglementation commune concernant la réutilisation des eaux usées épurées. Ceci est dû à la diversité du climat, de la géologie, de la géographie, du type de sols et de cultures, mais surtout au contexte économique et sociale du pays. Cependant, quelques gouvernements et organismes ont déjà établi des normes de réutilisation telles que :

- Les normes de L'OMS de 1989
- Les normes de l'USEPA 1992
- Les normes californiennes
- Les directives de la FAO de 1985

La plus part des pays développés et en voie de développement ont formulé leurs normes de REUE sur la base des recommandations fixées par l'un des organismes précités.

Le point de vue de l'OMS

Les recommandations de l'OMS sont source d'inspiration pour de nombreux pays à travers le monde, et notamment l'Algérie.

L'OMS a demandé en 1982 à trois équipes indépendantes de chercheurs de fournir une base scientifique pour établir ces recommandations. Cela a abouti en 1989 au " Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture" ou " Recommandations sanitaires pour l'utilisation des eaux usées en agriculture et en aquaculture". Elles ont été révisées en 2000 par Blumenthal et coll. Cette révision a affiné les normes de l'OMS. Les modifications ont essentiellement porté sur la norme "œufs d'helminthes" qui pour certaines catégories est passé de 1 à 0,1 œuf/l [21].

Ces recommandations ne concernent que l'usage agricole, et il y a donc un "vide juridique" pour les autres usages.

Le point de vue de l'USEPA

L'USEPA (United States Environmental Protection Agency) a publié en 1992, en collaboration avec l'USAID (United States Agency of international Development), ses propres recommandations sur la REUE, intitulées "Guidelines water Reuse". Contrairement à l'OMS, ces normes ne sont pas basées sur des études épidémiologiques et une estimation du risque, mais sur un objectif de Zéro pathogène dans les eaux réutilisées. Les normes microbiologiques sont donc beaucoup plus strictes. Les normes de L'USEPA concernent tous les usages envisageables pour des eaux usées épurées (usage urbain, agricole, industriel, recharge de nappe, etc) ce qui en fait un outil puissant [28].

Les recommandations de l'USEPA apparaissent dans le tableau I.3. Plusieurs paramètres sont pris en compte : le pH, la demande biologique en oxygène, la turbidité, ou les solides en suspension et les coliformes fécaux. Il faut retenir que seul le facteur " coliformes fécaux " permet de juger de la qualité microbiologique.

Aujourd'hui, 34 états américains ont une réglementation. Elles sont souvent strictes, les plus sévères étant celles de l'Arizona, de la Floride, de la Californie, du Texas et l'état de Washington.

La réglementation californienne, exprimée dans un document appelé "Title22" est une des plus sévères au monde. Elle est basée sur une approche de haute technologie et repose sur le principe du "better safe than sorry".

La FAO a établi des directives complémentaires pour quelques paramètres chimiques, ainsi elle a fixé en 2003, selon la durée de réutilisation, des limites concernant les éléments traces dans les eaux usées épurées destinées à l'irrigation voir tableau I.4 [13].

III.3.2) Le contexte réglementaire d'usage des eaux usées épurées en Algérie :

La loi n°05-12 du 28 Jomada Ethania 1426 correspondant au 04 août 2005, relative à l'eau, a institué, à travers ses articles 76 et 78, la concession d'utilisation des eaux usées épurées à des fins d'irrigation [16].

Le décret n°07-149 du 3 Jomada el Oula 1428 correspondant au 20 mai 2007 fixe les modalités de concession d'utilisation des eaux usées épurées à des fins agricole ainsi que le cahier des charges-type y afférent[17].

Tableau I.1: Recommandation microbiologiques révisées de l'OMS pour le traitement des eaux usées avant utilisation en agriculture ^a [21].

Catégories	Condition de réutilisation	Groupes exposés	Techniques d'irrigation	Nématodes intestinaux ^b	Coliformes fécaux ^c	Traitement recommandés pour atteindre le niveau de qualité microbiologique
A	Irrigation sans restriction A1 pour les cultures maraichères consommées crues, les terrains de sport, les parcs publics ^d	Travailleurs, consommateurs, public	Toutes	< ou égale à 0.1 ^c	< ou égale à 10 ³	Série de bassin de stabilisation bien conçus, réservoir de stockage et de traitement remplis séquentiellement, ou traitement équivalent (p.ex. traitement secondaire conventionnel suivi soit d'un lagunage tertiaire, soit d'une filtration et d'une désinfection).
B	Irrigation restreinte. Céréales, cultures industrielles, fourragères, pâturage et forêt ^f	B1 Travailleurs (mais pas les enfants < 15 ans), population alentour	Par aspersion	< ou égal à 1	< ou égal à 10 ⁵	Série de bassin de rétention dont un bassin de maturation ou un bassin séquentiel ou un traitement équivalent (p.ex. traitement secondaire conventionnel suivi soit par des lagunages tertiaires, soit une filtration. Comme pour la catégorie A Comme pour la catégorie A
		B2 comme B1	Par rigole d'infiltration ou par gravité	< ou égal à 1	< ou égal à 10 ³	
		B3 Travailleurs dont les enfants < 15 ans, population alentour	toutes	< ou égal à 0.1	< ou égal à 10 ³	
C	Irrigation localisation sur des cultures de la catégorie B s'il n'y a pas d'exposition des travailleurs ou du public	Aucun	Goutte-à-goutte, Micro-jet, etc.	Pas de norme	Pas de norme	Prétraitement nécessaire pour des raisons techniques liées à l'irrigation, mais pas moins d'une sédimentation primaire.

^aDans certains cas, il faut tenir compte des conditions locales épidémiologiques, socio-culturelles et environnementales et modifier les directives en conséquence.

^bEspèces *Ascaris* et *Trichuris* et ankylostomes.

^cPendant la période d'irrigation.

^dUne directive plus stricte (≤ 200 coliformes intestinaux par 100 ml) est justifiée pour les pelouses avec lesquelles le public peut avoir un contact direct, comme les pelouses d'hôtels.

^eDans le cas des arbres fruitiers, l'irrigation doit cesser deux semaines avant la cueillette et les fruits tombés ne doivent jamais être ramassés. Il faut éviter l'irrigation par aspersion.

Tableau I.2: Résumé des recommandations de l'état de Californie pour la REUE.

	Applications de la REUE	Techniques d'irrigation	Coliformes fécaux ou totaux^b	Traitements des eaux usées requis
Utilisation pour l'irrigation et l'arrosage	Cultures comestibles	par aspersion	< 2,2/100ml ^a	Traitement secondaire, coagulation, clarification, filtration et désinfection
	Cultures comestibles	Surface	< 2,2/100ml ^a	Traitement secondaire et désinfection
	Arbres fruitiers et vigne	Surface	Aucune limite	Traitement primaire
	Cultures fourragères, production de fibres végétales et cultures de semences	surface ou pas aspersion	Aucune limite	Traitement primaire
	Pâturage pour animaux élevés pour leur lait	Surface ou par aspersion	< 23/100 ml ^a	Traitement secondaire et désinfection
	Parcours de golfs, cimetières, bordures de routes et autres espaces avec un accès public similaire	Surface ou par aspersion	< 23/100 ml ^{a, c}	Traitement secondaire et désinfection
	Parcs, jardins publics, aires de jeux, cours d'école et autres espaces similaires	Surface ou par aspersion	< 2,2/100 ml ^a	Traitement secondaire, coagulation, clarification, filtration et désinfection
Autres usages	Bassin d'agrément sans restriction d'usage	-	< 2,2/100 ml	Traitement secondaire, désinfection, oxydation.
	Bassin paysager	-	< 23/100 ml	Traitement secondaire, désinfection, oxydation
	Recharge de nappe	-	^d	^d

Source: [1]

(a) Les critères californiens de réutilisation des eaux usées épurées sont exprimés comme la médiane du nombre de coliformes totaux pour 100 ml, déterminée à partir d'analyses bactériologiques réalisées les 7 derniers jours.

(b) La concentration en coliformes ne doit pas excéder 23 pour 100 ml dans plus d'un échantillon sur une période de 30 jours.

(c) La concentration en coliforme ne doit pas excéder plus de 240 pour 100 ml dans plus d'un échantillon sur une période de 30 jours.

(d) Chaque projet est examiné individuellement par les services de santé de l'État de Californie.

Tableau I.3: Recommandations de l'USEPA concernant la REUE[28].

Type of Use	Reclaimed Water Quality	Treatment
Urban uses, crops eaten raw, recreational impoundments	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH = 6 – 9 ▪ ≤10 mg/L BOD ▪ ≤2 NTU^a ▪ No detectable fecal coli/100 mL^b ▪ ≥1 mg/L Cl₂ residual^c 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secondary ▪ Filtration ▪ Disinfection
Restricted access area irrigation, processed food crops, nonfood crops, aesthetic impoundments, construction uses, industrial cooling, ^d environmental reuse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH = 6 – 9 ▪ ≤30 mg/L BOD ▪ ≤30 mg/L TSS ▪ ≤200 fecal coli/100 mL^c ▪ ≥1 mg/L Cl₂ residual^c 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secondary ▪ Disinfection
Groundwater recharge of nonpotable aquifers by spreading	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Site specific and use dependent 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Site specific and use dependent ▪ Primary (minimum)
Groundwater recharge of nonpotable aquifers by injection	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Site specific and use dependent 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Site specific and use dependent ▪ Secondary (minimum)
Groundwater recharge of potable aquifers by spreading	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Site specific ▪ Meet drinking water standards after percolation through vadose zone 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secondary ▪ Disinfection ▪ May also need filtration & advanced wastewater treatment
Groundwater recharge of potable aquifers by injection, augmentation of surface supplies	Includes the following: <ul style="list-style-type: none"> ▪ pH = 6.5 – 8.5 ▪ ≤2 NTU^a ▪ No detectable fecal coli/100 mL^b ▪ ≥1 mg/L Cl₂ residual^c ▪ ≤3 mg/L TOC ▪ ≤0.2 mg/L TOX ▪ Meet drinking water standards 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secondary ▪ Filtration ▪ Disinfection ▪ Advanced wastewater treatment

Tableau I.4: Limites recommandées en élément traces (mg/l) dans les eaux usées épurées destinées à l'irrigation [13].

Constituent	Utilisation à long terme ^b (mg/l)	Court terme ^c (mg/l)
Aluminium	5.0	20.0
Arsenic	0.10	2.0
Béryllium	0.10	0.5
Bore	0.75	2.0
Cadmium	0.01	0.05
Chrome	0.1	1.0
Cobalt	0.05	5.0
Cuivre	0.2	5.0
Fluor	1.0	15.0
Fer	5.0	20.0
Plomb	5.0	10.0
Lithium	2.5	2.5
Manganèse	0.2	10.0
Molybdène	0.01	0.05
Nickel	0.2	2.0
Sélénium	0.02	0.02
Vanadium	0.1	1.0
Zinc	2.0	10.0

IV. Les usages de la REUE : (Aspects techniques et sanitaires)

L'utilisation des EUE présente des avantages multiples aussi bien au niveau économique qu'environnemental:

- La mobilisation d'une ressource potentielle en eau (dont la qualité peut être encore améliorée);
- L'économie des ressources en eau conventionnelle (permet éventuellement de différer les investissements d'une nouvelle mobilisation en eau conventionnelle);
- La protection des milieux récepteurs en particulier le littoral et le réseau hydrographique contre la pollution hydrique,
- La préservation des zones humides (apport d'eau en continu);
- L'atténuation des impacts liés à la sécheresse (ressource en eau indépendante du climat);
- La réduction des quantités d'engrais utilisée en agriculture;
- Le renforcement des capacités nationales en matière de gestion intégrée des ressources en eau.

Quasiment tous les domaines relatifs aux usages de l'eau sont concernés par la REUE sauf ce qui touche aux eaux thermales et minérales, dont les exigences de qualité sont telles qu'elles n'entrent pas dans le champ de la réutilisation. La classification qui suit permet d'y voir plus clair en matière d'utilisations des EUE.

IV.1) Les valorisations directes – Le cycle court :

Dans ce cas, l'eau usée traitée passe directement du statut d'eau usée au statut de nouvelle ressource après avoir transité par des mécanismes d'épuration.

IV.1.1) Valorisation agricole :

Dans le cas spécifique de l'irrigation, les bénéfices d'une réutilisation des eaux usées épurées ne résident pas seulement dans la préservation du milieu et de la ressource, mais aussi dans la nature des eaux usées. En effet, elles contiennent des éléments fertilisants (azote, phosphore et potassium) ainsi que les oligo-éléments (fer, cuivre, manganèse, zinc, etc.) qui sont bénéfiques pour les cultures, et qui peuvent augmenter significativement le rendement. Les MES contribuent également à la fertilisation des sols car elles sont riches en matière organique. L'utilisation d'eaux usées à la place d'engrais de synthèse coûteux est économiquement intéressante pour les agriculteurs.

De plus, l'arrosage avec des eaux usées constitue une sorte de **fertigation**, c'est-à-dire l'application combinée d'eau et de fertilisant via le système d'irrigation. La fertigation permet un apport fractionné et à faible dose des engrais ; en cela elle est bénéfique pour l'environnement car elle évite la pollution des sols et les dépendances aux fertilisants, qui sont des phénomènes qui apparaissent avec une fertilisation classique [1].

Le bénéfice d'une REUE peut donc être double :

- Au niveau économique, car en plus d'une préservation quantitative de la ressource, les agriculteurs font des économies d'engrais;
- Au niveau écologique, car en plus de la diminution des rejets d'eaux usées dans le milieu, la pollution agricole diminue.

Mais il faut faire attention à ne pas apporter ces éléments fertilisants en excès. Il y a en effet un triple risque :

- Un risque sanitaire : les matières en suspension protègent les micro-organismes de beaucoup de traitement, comme les traitements au chlore ou au ultraviolet. Il existe donc une compétition entre l'élimination des micro-organismes et la préservation des MES en vue d'une utilisation agricole [12].
- Un risque technique : si les MES sont présentes en trop grand nombre, elles peuvent entraîner le bouchage des canalisations et les systèmes d'irrigation;
- Un risque agronomique et environnemental : il est possible que les éléments soient apportés en excès. Dans ce cas, il y a un risque de pollution des sols et de diminution du rendement. Les taux en éléments nutritifs (les nitrates essentiellement) et la salinité de l'eau utilisée (cause de la dégradation des sols) sont de première importance. Il faut donc trouver le bon équilibre entre le niveau de traitement, les besoins des cultures et la nature du sol.

IV.1.2) La valorisation en zone urbaine :

Les utilisations possibles d'eaux épurées en zone urbaine sont extrêmement nombreuses, et il en existe de multiples exemples à travers le monde. Ces projets concernent :

- l'arrosage de parcs, de terrains de sport, de terrains de golf, d'aires de jeux ;
- l'alimentation des plans d'eau récréatifs tel que: les lacs artificiels ;
- les eaux des sanitaires d'un immeuble ou d'un groupe d'immeubles ;
- le lavage de voirie, réservoirs anti-incendie, etc.

La REUE en zone urbaine nécessite un réseau double qui permet de distribuer séparément les eaux épurées et l'eau potable. Il peut y avoir un réseau double à l'échelle de la ville entière ou à l'échelle de l'habitation. Lors de la modification d'un système déjà existant, l'installation d'un second réseau de distribution peut représenter jusqu'à 70 % du prix d'un projet de REUE [11], ce qui peut rendre le projet économiquement irréalisable ; cependant, si le double réseau est installé en une seule fois, lors de la construction d'un nouveau lotissement par exemple, le coût est moins élevé. Ainsi, le surcoût de l'installation d'un réseau double dans un immeuble en construction est inférieur à 10 % du prix du réseau non doublé [11].

La qualité requise dans les projets de REUE en zone urbaine a des exigences similaires aux autres réutilisations, avec quelques variances :

- la qualité esthétique est importante : la présence de mousse, d'algues est à éviter (mauvaise perception de la part du public). Il faut également réduire le développement d'insectes (moustiques...);
- la présence d'une faune concentrant des polluants (mercure, DDT, etc.) peut poser problème pour les activités de pêche.

Les pays à la pointe de la REUE en milieu urbain sont en majorité des pays développés et fortement urbanisés : Etats-Unis, Japon, Corée du sud, Allemagne.

IV.1.3) la valorisation industrielle :

La réutilisation en industrie a deux origines :

- les effluents spéciaux issus des process industriels
- les effluents issus d'eaux usées domestiques d'origine urbaine, car il arrive parfois qu'elles réinsèrent ces effluents épurées dans leur process.

Les applications sont nombreuses et on peut classer les secteurs où se pratique la REUE en fonction des différentes catégories d'activités industrielles [1]:

- le secteur de l'énergie, dans les circuits de refroidissement fermés ou ouverts.
- Le secteur chimique et para chimique
- Les laveries industrielles
- Les stations de lavage de voiture
- L'industrie du papier
- L'industrie de la production d'acier
- Les industries d'électroniques et de semi-conducteurs, etc.

La qualité requise est spécifique à chaque industrie parce que sa composition chimique peut avoir des répercussions sur les process industriels. Les préoccupations concernent principalement les phénomènes d'entartrage, de corrosion, de développement de bactérie, d'encrassement, de formation de mousse, et d'inhalation d'aérosols par les travailleurs.

IV.1.4) L'aquaculture :

Cette valorisation est encore relativement embryonnaire à travers le monde mais elle est déjà pratiquée en Inde ainsi que des pays asiatiques à la fois comme procédé d'épuration et pour l'économie piscicole qui en résulte.

IV.1.5) La valorisation à des fins d'AEP :

La réutilisation des eaux à des fins de consommation en eau potable est une catégorie comptant un nombre réduit de projets. Il y a deux types de réutilisation :

- **La réutilisation directe** : c'est-à-dire les eaux épurées sont directement acheminées de la station d'épuration à l'usine de traitement pour l'eau potable (système « *pipe to pipe* »). L'unique exemple dans le monde de réutilisation directe se trouve en Afrique, à Windhoek, capitale de la Namibie. Cependant, ce mode de REUE sans passer par le traitement supplémentaire offert par le milieu naturel est déconseillé ; il doit être mis en œuvre uniquement quand aucune autre solution n'est possible[10].

- **La réutilisation indirecte** :
 - **La réutilisation indirecte et non planifiée**, quand les eaux épurées sont rejetées dans un cours d'eau ou une réserve souterraine qui sert à l'alimentation d'une usine de traitement, sans que ce lien soit volontaire. Cette notion est à la limite de la définition d'une REUE.
 - **La réutilisation indirecte et planifiée**, consiste à rejeter des effluents de station volontairement en amont d'une usine de traitement, au niveau du plan d'eau ou de la nappe qui sert d'ultime réservoir naturel avant le pompage et le traitement. C'est le cas du comté d'Essex en Angleterre, où une ville de 140 000 habitants, Chelmsford, est alimentée en eau potable pendant l'été par des eaux épurées, après un passage dans la rivière Chelmer [19]. C'est également le cas à Singapour où l'eau est mixée avec une ressource conventionnelle ou en Australie dans la ville de Goulburn.

On comprend aisément que le premier frein à ces projets est d'ordre psychologique. Par ailleurs les méthodes de traitement et leur fiabilité doivent être exemplaires pour permettre d'envisager de tels projets.

IV.2) Les valorisations indirectes – le cycle long :

On désigne ainsi les dispositions hydrauliques où le cycle naturel de l'eau météorique d'une part et celui des eaux usées plus ou moins traitées d'autre part se rejoignent. Les milieux récepteurs peuvent apporter des possibilités de traitement additionnel des eaux rejetées avant le prélèvement en vue de la REUE qui peuvent être prises en compte et utilisées. Ces modes de valorisation peuvent être plus délicats car ils supposent qu'on puisse suivre efficacement le devenir des eaux injectées dans le milieu, ce qui n'est pas forcément simple, dans le cas d'une recharge de nappe par exemple [24].

IV.2.1) Recharge de nappes :

Le dispositif de la recharge de nappe consiste à faire infiltrer ou percoler les EUE dans le sous sol. Pour cela nous avons plusieurs objectifs:

- La restauration d'une nappe surexploitée par excès de pompage et dont le rabattement est préjudiciable,

- La protection des aquifères côtiers contre l'intrusion d'eau salée,
- Le stockage des eaux pour une utilisation différée,
- L'amélioration du niveau de traitement de l'eau, utilisant de la sorte le pouvoir d'autoépuration du sol [24].

Il existe deux moyens de recharger une nappe phréatique :

- **Par percolation** : qui consiste à une infiltration depuis la surface, dans des bassins ou des lits de cours d'eau. Les formations du sous sol agissent généralement comme un filtre dont l'effet est d'éliminer un certain nombre des constituants physiques, chimiques et microbiologiques des EUE, c'est le « pouvoir épurateur » du sous sol, qui améliore la qualité de l'eau et constitue souvent le principal objet de recharge par les EUE : ces procédés d'épuration complémentaire constituent les systèmes de géo-épuration.

Le principal problème rencontré est celui des algues, qui pullulent dans les bassins. Les solutions préconisées sont variées :

- Introduction de poisson
- D'algicides (produit qui détruit les algues)
- Teindre l'eau pour empêcher la photosynthèse
- Faire circuler l'eau pour empêcher la stagnation
- Eviter le stockage dans des lacs peu profonds
- Eviter de laisser l'eau stagner trop longtemps

Un autre problème est la formation d'un microfilm de vase, d'argile et de micro-organismes au fond du bassin qui bloque la percolation [1].

- **Par recharge directe** : qui consiste à une injection profonde, par puits ou forages, où l'eau est introduite directement dans la nappe souterraine.

Quel qu'en soit le mode, il est nécessaire d'avoir une connaissance précise du devenir des quantités injectées et de leurs écoulements dans le sous sol, afin de pouvoir évaluer le rendement de la recharge et déterminer les quantités éventuellement récupérables.

Quant à l'impact de la recharge sur la nappe rechargée, il se mesure en remontées des niveaux et en variations des qualités physiques, chimiques et biologiques de l'eau de la nappe suite au mélange avec les eaux de recharge[24].

IV.2.2) Le soutien d'étiage :

Le soutien d'étiage peut avoir pour objectif le maintien en vie faunistique d'un tronçon de cours d'eau. Il peut aussi viser à fournir à un cours d'eau (souvent de type oued) un débit dont la destination est d'être partiellement récupéré à l'aval pour différents usages dont principalement l'irrigation[24].

IV.2.3) Alimentation de zones humides :

En liaison avec les objectifs des sites sous convention Ramsar, la sauvegarde de zones humides par des EUE constitue à ce jour un domaine non négligeable de la REUE. Là aussi ce sont principalement les enjeux floristiques et faunistiques qui sont ciblés, et plus globalement la sauvegarde et la valorisation du patrimoine environnemental[24].

V. Les risques liés à la réutilisation agricole des eaux épurées

Les risques liés à une REUE agricole sont :

- Le risque microbiologique;
- Le risque chimique;
- Le risque environnemental.

V.1) Le risque microbiologique :

Dans le cas de l'agriculture, il est prouvé depuis longtemps que les micro-organismes pathogènes des animaux ne peuvent ni pénétrer ni survivre à l'intérieur des plantes [26]. Les micro-organismes se retrouvent donc à la surface des plantes et sur le sol. Il peut donc y avoir une contamination pendant la croissance des plantes ou la récolte. Les pathogènes survivent plus longtemps sur le sol que sur les plantes[1].

Le mode d'irrigation a une influence directe sur le risque, car des contaminations directes peuvent avoir lieu lors de la maintenance du système d'irrigation.

Afin de limiter l'impact sanitaire et psychologique de la réutilisation d'eaux usées pour irriguer des plantes destinées à la consommation humaine, les modes d'arrosage dits « localisés » sont recommandés. Elle permet de réduire considérablement les risques de contamination microbiologique. C'est une gestion intégrée des risques sanitaires pour laquelle le traitement de désinfection n'est pas le seul facteur permettant de diminuer les risques, mais un des facteurs.

Les populations humaines exposées à une pathologie associée de manière certaine à une utilisation agricole d'effluents bruts ou traités sont de quatre ordres [8]:

- **les consommateurs de légumes crus** : le risque est statistiquement plus élevé pour les helminthes (par rapport à la population générale), par contre il ne l'est pas pour le risque bactériologique ;
- **les consommateurs de viande bovine insuffisamment cuite** : la contamination par le ver solitaire (*Tænia*) est possible car les bovins sont des hôtes intermédiaires de cet helminthe ;
- **les travailleurs agricoles** : le risque est plus élevé pour les helminthes. En laboratoire, il a été mis en évidence que les travailleurs agricoles sont légèrement

plus exposés que la population normale ou que les personnels de station d'épuration ;

- **les populations avoisinantes** : surtout dans le cas d'irrigation par aspersion qui forme des aérosols. Le risque est légèrement plus élevé.

V.2) Les risques liés aux éléments traces : le risque chimique :

La seule voie de contamination vraiment préoccupante pour les éléments traces est la consommation de plantes cultivées, dans lesquelles ils s'accumulent. Les modes de réutilisation autre que l'agriculture ne semblent pas dangereux et ceci pour deux raisons : premièrement, les quantités d'eau potentiellement ingérables par les utilisateurs sont extrêmement faibles, et deuxièmement les concentrations en micro-polluants sont infinitésimales dans les eaux épurées.

Dans le cas d'une réutilisation agricole, par contre, l'accumulation des micro-polluants dans les plantes peut sembler plus problématique. Mais certains de ces micro-polluants peuvent être intéressants en tant que facteurs de croissance des végétaux ; il faut donc trouver un équilibre entre le risque sanitaire et l'intérêt agronomique.

V.2.1) Les métaux lourds :

Le risque posé par les métaux lourds dépend de leur toxicité potentielle et du niveau d'exposition (concentration, durée) ; par ailleurs, certains sont bons pour la croissance des végétaux. Ils s'éliminent facilement par des traitements physiques (décantation) et se retrouvent généralement dans les boues. On notera donc qu'avec un bon traitement, et sauf exception (rejets industriels, accidents), les concentrations de la majorité des métaux lourds dans les eaux épurées domestiques sont trop faibles pour poser un réel problème sanitaire, quelle que soit la réutilisation envisagée, même agricole [8].

V.2.2) Les micropolluants organique :

Les micropolluants organiques sont essentiellement issus de l'utilisation de substances produites par l'industrie chimique.

Le risque posé par les effets à long terme de ces produits, pour lesquels il n'existe souvent aucune étude, est encore inconnu. De même, l'apparition de nouvelles substances toxiques n'est pas à exclure. Toutefois, il faut rester prudent, surtout vis-à-vis d'eaux épurées urbaines qui, dans certains cas particuliers, pourraient avoir des caractéristiques chimiques différentes et des concentrations en substances toxiques importantes.

V.3) Le risque environnemental :

V.3.1) Les eaux souterraines :

La contamination des eaux souterraines dépend de trois paramètres : le sol, les roches sous-jacentes et la nappe.

Deux caractéristiques sont essentielles pour les sols : la capacité de rétention et la capacité d'épuration. Les sols qui ont une bonne capacité de rétention sont les sols argilo-sableux, ceux ayant une mauvaise qualité sont les roches fissurées. Une bonne capacité de rétention assure une bonne assimilation par les plantes et un étalement de la pollution dans le temps. La capacité d'épuration est assurée par la fixation des substances polluantes (adsorption, précipitation), la transformation des molécules organiques par des micro-organismes et l'exportation par les végétaux.

Les réservoirs ayant une perméabilité d'interstices (gravier, sable) permettent une bonne épuration à l'inverse des sols avec une perméabilité de fissures (calcaire, dolomies, granit, etc.).

Les nappes libres sont les plus exposées à la contamination, non seulement parce qu'elles ne bénéficient pas d'une protection naturelle vers la surface, mais encore parce qu'elles sont en général peu profondes. **Les nappes captives** sont plus protégées mais peuvent être éventuellement contaminées par des forages ou une autre mise en communication avec la surface ou un autre aquifère pollué.

La réutilisation des eaux usées épurées peut donc être remise en cause dans des zones qui cumulent ces facteurs de risque, c'est-à-dire des nappes libres proches de la surface du sol dans des réservoirs avec une perméabilité de fissures. L'utilisation de ces ressources pour l'alimentation en eau des collectivités constitue un facteur aggravant le risque.

Pour ce qui est de la survie des micro-organismes lors de l'infiltration et des risques de contamination du sol, les bactéries, les protozoaires et les helminthes sont très rapidement éliminés, par le phénomène d'adsorption. Seuls les virus semblent poser problème, mais les différentes études recensées convergent toutes vers le fait qu'après quelques mètres (au-delà de 3) la quasi-totalité des virus est éliminée [1].

Les produits les plus préoccupants sont les nitrates et les dérivés halogénés, parce qu'ils peuvent migrer en profondeur. La pollution azotée diminue en fonction de la profondeur de la nappe. Il a été prouvé que les eaux provenant de puits de moins de 30 m de profondeur sont plus pollués par l'azote que les autres puits [14].

V.3.2) Les eaux superficielles :

Les rejets directs d'eaux épurées posent des problèmes d'eutrophisation des cours d'eau, de qualité de l'eau destinée à la production d'eau potable et le risque de contamination microbiologique. C'est pourquoi une réutilisation des eaux usées épurées est quasiment toujours préférable à un rejet direct dans le milieu [8].

V.3.3) Effets sur le sol :

Ces impacts sont d'importance particulière pour les agriculteurs puisqu'ils peuvent réduire la productivité, la fertilité et le rendement de leurs terres. Le sol doit rester à un bon niveau

de fertilité chimique et physique, afin de permettre une utilisation durable à long terme et une agriculture rentable. Les problèmes prévus au niveau du sol sont [13]:

- la salinisation
- l'alcalinité et la réduction de la perméabilité du sol
- l'accumulation d'éléments potentiellement toxiques
- l'accumulation de nutriments pour la plante

VI. La pollution de l'eau et son impact :

La pollution de l'eau est une dégradation physique, chimique, biologique ou bactériologique de ses qualités naturelles, provoquée par l'Homme et ses activités. Elle perturbe les conditions de vie de la flore et de la faune aquatiques; elle compromet les utilisations de l'eau et l'équilibre du milieu aquatique.

VI.1) Les différents polluants de l'eau :

a) La pollution chimique :

Différents polluants: Exemples et Origine

■ Les pesticides (produits phytosanitaires)

- Contre les insectes : insecticides
- Contre les mauvaises herbes : herbicides
- Contre les champignons : fongicides (Agricole & Industrie)

■ Les hydrocarbures - pétrole, gaz naturel (Industries)

■ Les métaux lourds - plomb, mercure, arsenic, cyanure : agricole (plomb dans engrais), naturelle (pluies acides) & industrielle

■ Les détergents - phosphates : domestique (lessives) & industrie, les engrais - nitrates -> agricole

■ Les solvants - Hydrocarbures aromatiques : industrie, domestique & agricole

■ Les colorants - chrome : industrie (peintures).

b) La pollution physique :

Elle provient essentiellement des centrales thermiques et nucléaires et des usines utilisant l'eau comme liquide de refroidissement. L'eau prélevée dans le milieu naturel va être rejetée par ces structures à une température plus élevée. Ceci va provoquer une élévation de la température.

Ensuite, un autre facteur de la pollution physique de l'eau serait celui lié aux risques de pollution radioactive tels que les accidents potentiels. (L'accident de Tchernobyl a par exemple libéré dans l'atmosphère divers radioéléments, provoquant une augmentation très nette de la radioactivité des aérosols. Retombés au sol avec les pluies, ces contaminants ont été entraînés par ruissellement et infiltration jusque dans les nappes phréatiques). On

peut aussi constater une pollution de l'eau par des matières en suspension provenant des mines ou des cimenteries qui peuvent alors modifier la turbidité de l'eau.

c) La pollution biologique :

Elle est liée au surdéveloppement de micro-organismes (bactéries, virus...) ou de végétaux micro ou macroscopiques (champignons) qui provoquent un déséquilibre du milieu environnant.

Elle est la conséquence d'une action humaine: enrichissement en nitrates d'un milieu (rejets organiques), développement de virus/bactéries, modification de la température d'un milieu (rejet d'eau chaude), introduction d'espèces invasives, concentration d'élevages intensifs (excédent de déjections animales),...etc. La pollution microbiologique résulte des déchets organiques, en particulier les excréments qui contiennent des germes pathogènes (virus, bactéries ou parasites) véhiculés par l'eau. Ces germes peuvent provoquer des maladies graves qui ont été jadis responsables d'épidémies dramatiques dans le monde.

Cette pollution des eaux a fortement diminué dans les pays industrialisés grâce à la mise en service de stations d'épuration qui assurent le nettoyage des eaux usées avant leur rejet dans la nature.

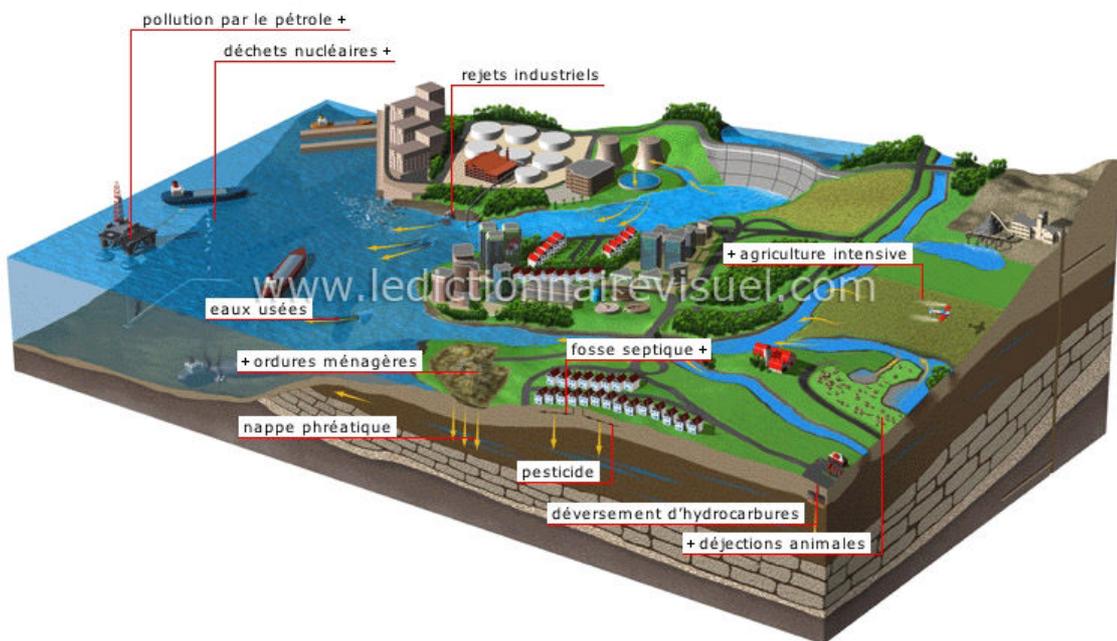


Fig I.2 : Image qui représente les différentes origines de la pollution.

VI.2) Les conséquences de la pollution de l'eau :

a) Les conséquences sur l'environnement :

■ L'eutrophisation

L'eutrophisation (du grec "EU" : bien et "TROPHOS" : nourri) est un phénomène lent d'asphyxie des écosystèmes aquatiques résultant de la prolifération d'algues, qui consomment tout l'oxygène indispensable à la survie de l'écosystème. Il résulte d'un apport trop riche de substances nutritives et a plutôt lieu dans des milieux aquatiques où l'eau est stagnante comme les rivières ou lacs. Les inconvénients principaux de l'eutrophisation sont la diminution de la biodiversité et de la qualité de l'eau en tant que ressource.

Cette pollution de l'eau est principalement due au phosphore d'origine agricole et industrielle (contenu dans les phosphates, présents dans les lessives, les détergents, les engrais et les déjections notamment) et à l'azote d'origine agricole (contenu dans l'ammonium et les nitrates présents dans les engrais). Les algues qui se développent grâce à ces substances nutritives absorbent de grandes quantités d'oxygène lorsqu'elles meurent et se décomposent (les bactéries aérobies augmentent leur consommation en oxygène qui vient à manquer et les bactéries anaérobies se développent en dégageant des substances toxiques : méthane, ammoniac, hydrogène sulfuré, toxines, etc.). Leur prolifération provoque alors l'appauvrissement, puis la mort de l'écosystème aquatique présent qui ne bénéficie plus de l'oxygène nécessaire pour vivre. Le phénomène s'intensifie également quand la température augmente, ce qui amène à une solubilité de l'oxygène qui diminue.

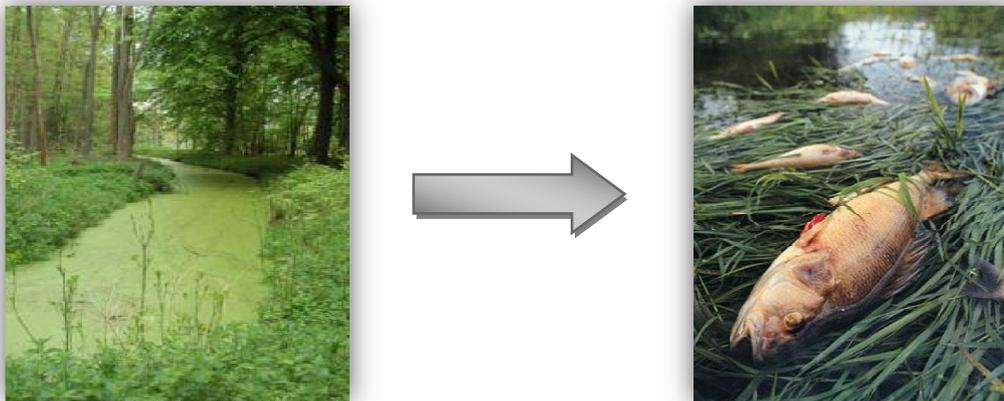


Fig I.3: Exemple d'images qui montrent le phénomène de l'eutrophisation et ses conséquences sur la faune.

Une des méthodes consistant à réduire ce phénomène d'eutrophisation est le brassage qui est un phénomène naturel mais rare (ayant lieu surtout les hivers très froids) permettant la réoxygénation des couches profondes de l'eau. En été, il se forme dans les lacs des couches de températures différentes qui ne se mélangent pas entre elles, car la densité de l'eau est fonction de sa température. Les couches les plus froides, donc lourdes, se trouvent au fond

du lac. Lors d'hivers très froids, la couche supérieure se refroidit et l'eau atteint une densité plus élevée. Sous l'effet des vents, elle gagne le fond du lac en créant des courants verticaux. Les eaux sont ainsi brassées.

Les autres conséquences :

- L'empoisonnement et dégradation de la flore et de la faune par les toxiques (exemple : les hydrocarbures, les métaux lourds...etc)
- En agriculture, les nitrates entraînent sur les cultures des retards de maturation, une altération de la qualité,...etc
- La radioactivité des eaux du fait du développement du déversement des résidus radioactifs dangereux.

b) Les conséquences sur la santé :

Les maladies provenant de l'eau polluée tuent encore aujourd'hui des millions de personnes chaque année dans les pays pauvres. Il s'agit de maladies provoquées par le fait de boire cette eau polluée ou dues à un simple contact de la peau avec cette eau. Les conséquences:

- les produits Cancérigènes et toxique provoquent des atteintes au foie, aux reins et au système nerveux (pesticide, hydrocarbures, solvants, colorants)
- Maladies de la peau (champignons, solvants)
- Maladies diarrhéiques telles que la dysenterie, la typhoïde et le choléra (bactérie, virus).
- Reproduction et/ou croissance perturbée (fausse couche, baisse de fertilité,... (engrais, colorants, solvants, métaux lourds).
- les nitrates peuvent être à l'origine de la formation de nitrites et de nitrosamines. Les nitrites sont de puissants oxydants qui ont la capacité de transformer l'hémoglobine en méthémoglobine, rendant le sang incapable de transporter l'oxygène jusqu'aux tissus. Les nourrissons de moins de 6 mois représentent une population à risque.

c) Les solutions pour remédier à cette pollution :

Il convient donc de lutter de manière individuelle mais aussi collective, dans la mesure du possible, à la source même de celle-ci:

- Diminuer les sources de pollution (= les polluants).
- Diminuer notre consommation (= diminuer les traitements chimiques et les infrastructures nécessaires).
- Réduire la dose de détergents (vaisselle, carrelage, agriculture).

- Utiliser des détergents qui respectent l'environnement (sans phosphates ni décolorants).
- Eviter les engrais chimiques (nitrates), utiliser des engrais biologiques.
- Ne pas jeter des déchets dans l'eau (les trier).
- Ne pas jeter les huiles de vidange, huiles ménagères, herbicides et autres rejets de produits polluants dans le réseau d'eaux usées.
- Les Agences de l'eau doivent apporter des conseils techniques aux élus, aux industriels et aux agriculteurs. Etablir des taxes à la pollution de l'eau, qui seront mises en œuvre au niveau de la facture d'eau. Ces fonds seront ensuite redistribués sous forme d'aides financières (prêts, subventions) aux collectivités locales, aux industriels et aux agriculteurs pour la réalisation de travaux de lutte contre la pollution (construction, extension ou amélioration des stations d'épuration et des réseaux de collecte des eaux usées, mise en place de procédés de production plus propres...).

Conclusion :

Les applications des projets de REUE sont multiples. Elles dépendent de nombreux facteurs que l'on peut regrouper en cinq classes :

- le contexte socio-économique : le type d'activité industrielle, le nombre et la densité de l'habitat, l'importance de l'agriculture, la présence d'usines de production d'énergie, etc.
- le contexte écologique : la quantité des ressources disponibles, la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines, la sensibilité du milieu récepteur à l'eutrophisation et aux autres pollutions, le contexte hydro géographique, etc. ;
- le niveau de traitement des eaux : à chaque niveau de traitement, on peut appliquer un usage différent ;
- la réglementation : elle limite les usages en fonction de la qualité de l'eau utilisée et donc de son niveau de traitement. Plus le niveau sanitaire est bon, plus les applications autorisées seront nombreuses ;
- l'acceptation par la population : ce dernier aspect n'est pas à négliger. L'idée de réutiliser des eaux usées peut avoir un impact psychologique négatif sur la population.

Chapitre II

L'utilisation des eaux usées épurées en
irrigation

Introduction :

Les démographies galopantes des pays en développement, l'effet de la pollution sur les eaux de surfaces et souterraines, la distribution inégale des ressources en eau et les graves sécheresses ont forcé l'homme à rechercher de nouvelles sources innovatrices d'approvisionnement. Les eaux usées deviennent une autre manière de répondre à la demande en eau, associant l'approvisionnement en eau au développement des systèmes d'assainissements. Etant donné que plus de 70 % de l'eau est utilisée par l'agriculture et les autres 30% partagés pour les besoins en eau humaine, cette ressource de seconde main est clairement une solution pour compenser le déficit et surtout dans le secteur le plus consommateur en eau telle l'agriculture. Pour cela il est important pour tout projet de REUE de connaître les origines et la composition des eaux usées et un suivi irréprochable de leur qualité après épuration, car l'utilisation d'eaux usées épurées pour l'irrigation doit se faire avec précaution.

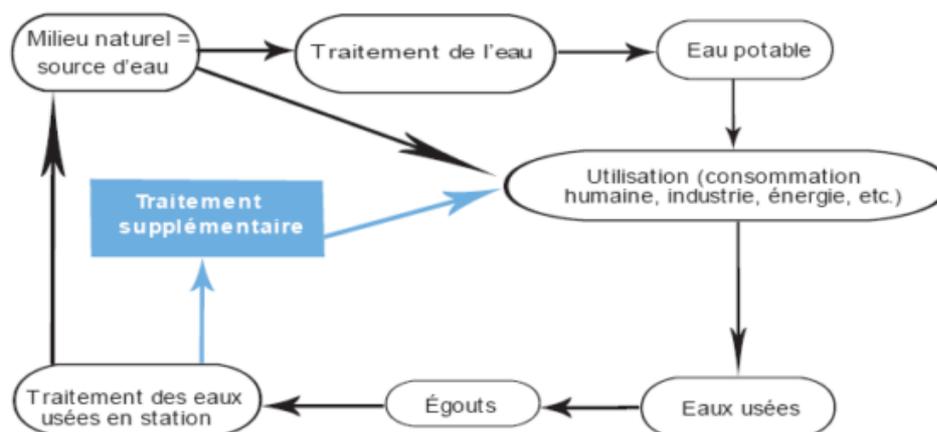


Fig II.1 : Intégration des eaux usées épurées dans le cycle générale des eaux usées [3].

La réutilisation agricole trouve sa motivation en trois points essentiels:

1. Réalisation des économies d'eaux de première main (Réserver l'eau conventionnelle pour l'AEP)
2. La préservation des milieux naturels
3. Et consiste à :
 - a. Collecter les eaux d'égouts
 - b. Les transporter
 - c. Les traiter dans une station d'épuration
 - d. A stocker
 - e. A utiliser pour irriguer les cultures ou arroser les espaces verts.

I. Origines et composition des eaux usées :

I.1) Origines des eaux usées :

On distingue plusieurs grandes catégories d'eaux usées :

I.1.1) Les eaux usées domestiques : sont issues des habitations, elles comprennent:

- les eaux « ménagères » ou eaux grises d'évacuation des cuisines et salle de bains. Elles sont polluées par des détergents, les lessives et les graisses, les eaux de vaisselle.
- les eaux « vannes » d'évacuation des toilettes. Les déchets présents dans ces eaux souillées sont constitués de matières organiques dégradables et de matières minérales. Ces substances sont sous forme dissoute et en suspension.

La composition des eaux usées d'origine domestique peut être extrêmement variable et dépend de trois facteurs :

1. La composition originelle de l'eau potable, de la qualité du traitement de cette eau, des normes sanitaires du pays concerné, de la nature de canalisations, etc.
2. Les diverses utilisations par les particuliers qui peuvent apporter un nombre quasi-infini de polluants : tous les produits d'entretien, lessives mais aussi, solvants, peintures, mercure de thermomètre, colle, etc.
3. Le rejet de la matière organique dans les égouts (urines et fèces) ; Sachant que la matière organique est le polluant majoritaire des eaux domestiques.

I.1.2) Les eaux usées industrielles :

Tous les rejets résultant d'une utilisation autre que domestique sont qualifiés de rejets industriels. Cette définition concerne les rejets des usines: Laiteries, industries de textile, tanneries, industrie papetière...etc, mais aussi les rejets d'activités artisanales ou commerciales : blanchisserie, restaurant, laboratoire d'analyses médicales, etc. Les rejets industriels peuvent suivre trois voies d'assainissement :

1. Soit ils sont directement rejetés dans le réseau domestique;
2. Soit ils sont prétraités puis rejetés dans le réseau domestique;
3. Soit ils sont entièrement traités sur place et rejeté dans le milieu naturel.

Dans le cas d'un rejet dans le réseau domestique, avec ou sans prétraitement, les effluents industriels peuvent fortement modifier la composition des eaux usées. Cette modification est étroitement liée à l'activité industrielle concernée et peut prendre des formes innombrables.

I.1.3) Les eaux pluviales :

Les eaux pluviales peuvent être fortement polluées en particulier en début de pluie du fait du lessivage des fumées dans l'atmosphère, du lavage des chaussées grasses et des toitures chargées de poussière, du lessivage des zones agricoles traitées (écoulement de purin, épandage d'engrais et de désherbants) et des zones de terrassements (écoulement de boues). Les polluants présents dans ces eaux peuvent être des matières organiques biodégradables ou non, des matières en suspension ou dissoute, des toxiques.

Les eaux de pluie qui ruissellent sur les surfaces imperméabilisées, en général en zone urbaine, sont collectées par un réseau qui peut-être le même que celui qui collecte les eaux usées, ou non. On distingue [25] :

- **les réseaux unitaires** : un seul collecteur assure le transport des eaux usées et des eaux pluviales. La qualité et le volume des eaux qui arrivent alors à la station d'épuration sont très variables. Pour éviter qu'un débit supérieur à sa capacité n'arrive à la station d'épuration, des ouvrages de déviation (réservoirs et déversoirs d'orage) sont répartis sur le réseau ;
- **les réseaux séparatifs** : deux réseaux sont mis en place, l'un pour collecter les eaux usées, l'autre pour les eaux de ruissellement. En principe seules les eaux usées arrivent à la station d'épuration pour traitement, c'est-à-dire que les eaux de pluie ne sont pas traitées et rejetées directement. La station ne doit donc théoriquement recevoir qu'un effluent brut de qualité relativement régulière et de débit relativement bien déterminé.
- **Les réseaux pseudo séparatifs** : Afin d'enlever le risque de faux branchement un système pseudo séparatif a été mis en place, le principe est d'évacuer les eaux pluviales qui proviennent du domaine privé (les toits et les cours des maisons) avec le réseau d'eaux usées .Un inconvénient c'est le risque de compromettre le fonctionnement de la station d'épuration.

I.1.4) Les eaux usées agricole :

Issues des élevages, elles sont polluées notamment par les déjections des animaux.

I.1.5) Les eaux usées issues des matières de vidanges (des fosses septiques) :

Les matières de vidange correspondent aux matières extraites de l'entretien des systèmes épuratoires individuels. Elles constituent un concentré de pollution domestique, leur évacuation et collecte font partie intégrante de l'assainissement.

I.2) Composition des eaux usées :

La composition des eaux usées est extrêmement variable en fonction de leur origine (industrielle, domestique, etc.). Elles peuvent contenir de nombreuses substances, sous forme solide ou dissoute, ainsi que de nombreux micro-organismes. En fonction de leurs

caractéristiques physiques, chimiques, biologiques et du danger sanitaire qu'elles représentent, ces substances peuvent être classées en cinq groupes :

I.2.1) les micro-organismes : comprennent, les bactéries, les virus, les protozoaires et les helminthes. Ils proviennent dans leur immense majorité des matières fécales ; on distingue alors la flore entérique (*i.e.* intestinale) normale et les micro-organismes pathogènes.

I.2.2) Matière en suspension(MES) et matière organique (MO): Ce sont des matières biodégradables pour la plupart. Les micro-organismes sont le plus souvent adsorbés à la surface et sont ainsi « transportés » par les MES. Elles donnent également à l'eau une apparence trouble, un mauvais goût et une mauvaise odeur. Les particules en suspension plus dense que l'eau, sont éliminées par décantation.

I.2.3) les éléments traces minéraux ou organiques :

■ **Les métaux lourds :**

Les métaux lourds que l'on trouve dans les eaux usées urbaines sont extrêmement nombreux ; les plus abondants (de l'ordre de quelques $\mu\text{g/l}$) sont le fer, le zinc, le cuivre et le plomb. Les autres métaux (manganèse, aluminium, chrome, arsenic, sélénium, mercure, cadmium, molybdène, nickel, etc.) sont présents à l'état de traces. Leur origine est multiple : les roches du sol, des eaux pluviales dans le cas de réseau unitaire, des activités de service (santé, automobile) et éventuellement de rejets industriels [8].

■ **Les micro-polluants :**

Les micro-polluants d'origine organique sont extrêmement nombreux et variés, ce qui rend difficile l'appréciation de leur dangerosité. Ils proviennent de l'utilisation domestique de détergents, pesticides, solvants, et également des eaux pluviales : eaux de ruissellement sur les terres agricoles, sur le réseau routier, etc. Ils peuvent aussi provenir de rejets industriels quand ceux-ci sont déversés dans les égouts ou même certains se forment aussi lors des traitements de désinfection des effluents par le chlore (haloformes)[12].

I.2.4) Les substances nutritives :

L'azote, le phosphore, le potassium, et les oligo-éléments, le zinc, le bore et le soufre, indispensable à la vie des végétaux, se trouvent en quantités appréciables, mais en proportions très variables par rapport aux besoins de la végétation, dans les eaux usées épurées ou non. Dans certaines circonstances, ces éléments peuvent être en excès par rapport aux besoins de la plante et provoquer des effets négatifs, aussi bien au niveau de la culture que des sols. Un contrôle périodique de quantité de nutriments présents dans l'effluent est nécessaire afin d'en tenir compte lors du calcul des besoins en fertilisant des cultures irriguées[12].

I.2.5) La salinité :

D'une manière générale, la concentration en sels de l'eau usée excède celle de l'eau du réseau d'alimentation en eau potable. Le taux élevé de salinité des eaux usées épurées est le facteur limitant le plus important pour une éventuelle réutilisation agricole en dehors de la charge microbiologique[12].

II. Mesure de la pollution des eaux résiduaires urbaines :

II.1) Caractéristiques physico-chimiques des eaux usées :

II.1.1) La température : à température élevée la décantation est plus efficace, par contre l'activité biologique durant le traitement diminue quand la température est basse.

II.1.2) Le pH : Le potentiel hydrogène pH traduit l'acidité ou l'alcalinité d'une eau résiduaire. Il varie de 0 à 14, la plage acceptable dans une eau usée est de 6,5 à 8,5.

II.1.3) La conductivité électrique: Pour connaître la minéralisation d'un effluent (quantité de sels dissous dans l'eau), on utilise couramment une mesure de conductivité électrique.

II.1.4) Couleur-Odeur : la couleur est due à la présence des matières organiques dissoutes ou colloïdales. L'odeur est due à la fermentation des matières organiques. [32]

II.2) La mesure de la pollution carbonée :

II.2.1) Les matières en suspension (MES) : c'est des matières non dissoute qui comportes des éléments minéraux et organique, leur taux est mesuré par filtration puis pesée, ou par centrifugation puis pesée, l'unité est en mg/l.

II.2.2) La demande biochimique en oxygène en 5 jours (DBO₅): Ce paramètre mesure la quantité d'oxygène nécessaire à la destruction des matières organiques sachant que la quantité d'oxygène est consommée en 5 jours par les micro-organismes, l'unité est en mgO₂/l.

II.2.3) La demande chimique en oxygène (DCO) : Représente la quantité d'oxygène qu'il faut fournir par des réactifs chimique très puissant pour oxyder les matières contenues dans l'effluent, l'unité est en mgO₂/l.

II.2.4) Le carbone organique total (COT) :

La détermination du taux de carbone peut être considérée comme une très bonne approximation de la quantité de matières organiques, dans la mesure où cet élément est le constituant majeur de ces composés.

II.2.5) Indice de biodégradabilité (DCO/DBO₅) :

Le rapport **DCO/DBO₅** détermine en outre la possibilité et le rendement de dégradation que l'on peut espérer par un traitement d'oxydation biologique. Si ce rapport est inférieur à 3, on peut dire que l'effluent est facilement biodégradable et un traitement biologique devrait être capable d'éliminer l'essentiel de la pollution.

Rappelons que la plupart des matières organiques ne deviennent polluantes que lorsqu'elles se retrouvent en excès dans le milieu. Les matières organiques non biodégradables sont essentiellement constituées par les hydrocarbures. [32]

II.3) La pollution azotée et phosphorée :

L'azote peut se présenter sous plusieurs formes dans l'eau usée, on a :

- L'azote organique où l'azote se retrouve dans des molécules avec de l'hydrogène, du carbone et du phosphore
- L'azote ammoniacal ou le N est sous forme d'ammoniac dissous dans l'eau (NH₃) ou sous forme d'ions ammoniacal (NH₄⁺)
- Les ions nitrates (NO₃⁻) ou d'ions nitrites (NO₂⁻)

Les rejets en matière azotées sont mesurés par 2 paramètres :

- Le **NTK** (azote Kjeldahl) : c'est la mesure des matières azotées sous forme réduite, principalement l'urée, d'origine humaine. Le rejet direct de l'azote réduit dans le milieu consomme de l'oxygène et défavorise la vie piscicole ;
- le **NGL** (azote total) : c'est la mesure de l'azote total, réduit ou oxydé. L'élimination du NGL signifie que les nitrates formés ont été éliminés (dénitrification).

Le taux de phosphate (**PT**) est également réglementé ; Le phosphore est sous forme organique ou minérale (PO₄H₂⁻ orthophosphate, ou polyphosphate). [32]

II.4) Les matières inhibitrices (M.I) :

La toxicité aiguë peut-être évaluée par le test biologique Daphnie et les résultats sont exprimés en equitox, soit l'immobilisation de 50% des daphnies en 24 heures .

La daphnie sorte de puce d'eau est un bio indicateur. En toxicologie de l'environnement ou écotoxicologie, elle est couramment utilisée pour étudier la qualité de l'eau et sa capacité à permettre la survie du zooplancton. [32]

II.5) Estimation des rejets :

Par les débits suivant :

- Débit moyen horaire journalier (m³/h)
- Débit moyen horaire diurne (de 8h00 à 00h00)

- Débit de pointe en saison sèche (m^3/j)
- Débit de pointe en saison humide (m^3/j)

II.6) Equivalent habitant :

Unité de mesure permettant d'évaluer la capacité d'une station d'épuration. Cette unité de mesure se base sur la quantité de pollution émise par personne et par jour.

II.7) Les germes pathogènes :

On doit dans ce cas mesurer les "germes tests" qui comprennent les coliformes du genre *Escherichia coli* et les streptocoques fécaux.

III. Les étapes et procédés de traitement des eaux usées :

On distinguera les traitements « classiques » largement utilisés par les stations d'épuration, et les traitements supplémentaires, le plus souvent de désinfection, nécessaires pour un projet de REUE. Ces derniers sont communément utilisés dans les stations de traitement qui produisent de l'eau potable.

Les traitements classiques utilisés suivent le principe d'épuration biologique, il existe deux catégories de procédés d'épuration [12] :

1) Les procédés intensifs :

- Boues activées
- Les lits bactériens
- Les disques biologiques
- Le biofiltre

2) Les procédés extensifs :

- Le lagunage naturel

III.1) Les étapes de traitements d'une station d'épuration :

III.1.1) Les traitements physiques :

III.1.1.1) Les prétraitements :

Ces traitements permettent d'éliminer la fraction la plus grossière, afin de ne pas gêner les opérations ultérieures. Ce sont le dégrillage, le dessablage, le dégraissage également appelé déshuilage. Les déchets sont évacués dans une benne, puis envoyés en décharge.

III.1.1.2) Le traitement primaire : Décantation

La décantation primaire pour une STEP à boue activée s'effectue dans des bassins, le plus souvent cyclonique, elle permet d'éliminer 50 à 60% environ des matières minérales et organiques en suspension qui se déposent au fond du bassin où elles constituent les boues

primaires. Celles-ci sont récupérées par raclage au fond du bassin et envoyées dans des épaisseurs pour y être traitées. Cette étape réduit environ 30% la DBO et la DCO.

III.1.1.3) La clarification ou décantation secondaire :

La clarification permet de séparer par décantation l'eau épurée des boues secondaires issues du traitement biologique. Cette décantation se fait dans des ouvrages spéciaux, le plus souvent circulaire, appelés clarificateurs ou décanteurs secondaires.

Une partie des boues secondaires est évacuée en aval vers le traitement des boues; l'autre partie est recyclée vers le bassin d'aération pour maintenir la masse biologique nécessaire au fonctionnement de l'installation.

III.1.2) Les traitements physico-chimiques :

Ils sont généralement utilisés dans les stations d'épuration de grande capacité, ou dans celles ayant à faire face à de grandes variations de charge dans l'année (zone touristique).

Des traitements de coagulation et de floculation permettent, grâce à l'addition de réactifs chimiques, de séparer les fines particules en suspension et une partie de la fraction colloïdale. Après la coagulation et la floculation, la séparation de la phase aqueuse de la phase solide est réalisée par un traitement physique, décantation ou flottation. Ces procédés permettent d'obtenir des abattements de 50 à plus de 90 % des matières en suspension. La charge polluante organique est réduite dans des proportions bien supérieures à ce que procure une simple décantation primaire. L'élimination des coliformes fécaux et des virus est fonction de la valeur du pH qui résulte de l'ajout de flocculant

III.1.3) Les traitements biologiques :

III.1.3.1) Procédé par boues activées :

Ce procédé biologique à culture libre est très largement utilisé. Il s'agit d'introduire l'effluent dans des bassins équipés de dispositifs d'aération (turbines, insufflation d'air...) où des micro-organismes, naturellement présent dans l'effluent, dégradent les matières organiques dissoutes. L'air insufflé leur fournit de l'oxygène nécessaire pour respirer et ils se développent en se nourrissant de la pollution organique.

Après un temps de séjour dans ce bassin d'aération, l'effluent est renvoyé dans un clarificateur, appelé aussi décanteur secondaire. L'eau épurée est ainsi séparée des boues par décantation. Ensuite, les boues sont soit envoyées dans une unité de traitement spécifique, en vue de leur épandage agricole ou de leur élimination, soit réinjectées pour partie dans le bassin d'aération. On qualifie cette opération de "recirculation des boues". Ce recyclage d'une partie des boues produites par le système d'épuration permet de maintenir la masse de bactéries contenue dans le bassin d'aération à un niveau compatible avec les

performances épuratoires attendues. Les traitements par boues activées éliminent de 85% à 95 % de la DBO5, selon les installations.

C'est le traitement biologique le plus simple et le plus utilisé actuellement en Algérie.

III.1.3.1.1) L'élimination de l'azote :

Les stations d'épuration prévues pour éliminer les matières carbonées n'éliminent qu'environ 20 % de l'azote présent dans les eaux usées. Pour satisfaire aux normes de rejet en zones sensibles, des traitements complémentaires doivent être mis en place.

Les techniques conventionnelles ne sont pas conçues pour réduire la teneur en azote des eaux usées. Pour y parvenir, la voie classique consiste à modifier un traitement biologique secondaire de telle sorte qu'un processus de nitrification-dénitrification puisse se développer. En résumé la nitrification consiste en une transformation, par des cultures bactériennes, de l'azote ammoniacal en nitrates (NO₃), une forme oxydée de l'azote. Une seconde phase, la dénitrification, complète le processus. Les nitrates, sous l'action de bactéries "dénitrifiantes", sont transformés en azote gazeux. Ce gaz s'échappe alors dans l'atmosphère comme le CO₂ produit par l'élimination des matières carbonées.

III.1.3.1.2) L'élimination du phosphore :

L'élimination du phosphore, ou "déphosphatation", peut être réalisée par des voies physico-chimiques ou biologiques.

En ce qui concerne les traitements physico-chimiques, l'adjonction de réactifs, comme des sels de fer ou d'aluminium, permet d'obtenir une précipitation de phosphates insolubles et leur élimination par décantation. Ces techniques, les plus utilisées actuellement, éliminent entre 80 % et 90 % du phosphore, mais engendrent une importante production de boues.

La déphosphatation biologique consiste à provoquer l'accumulation du phosphore dans les cultures bactériennes des boues. Les mécanismes de la déphosphatation biologique sont relativement complexes et leur rendement variable (en fonction notamment de la pollution carbonée et des nitrates présents dans les eaux usées). Le rendement moyen est d'environ 60 %. Dans les grosses installations d'épuration, ce procédé est souvent couplé à une déphosphatation physico-chimique, pour atteindre les niveaux de rejets requis.

III.1.3.2) Les lits bactériens :

C'est un Procédé d'épuration biologique à culture fixée sur support immobile. Procédé qui utilise des bactéries fixées sous forme de lits sur lesquels l'eau à traiter percole au travers du matériau, soit :

- sur des matériaux naturels poreux : pouzzolane de quelques centimètres,
- sur des matériaux plastiques ordonnés (plaques ondulées, tubes, etc.).

La difficulté consiste à trouver la bonne vitesse du flux d'eau, qui ne doit pas être trop rapide (pour permettre la dégradation bactérienne) ni trop lent (pour une bonne évacuation des MES en excès). Ce procédé élimine de 60% à 95% de la DBO₅ selon la charge.

III.1.3.3) les disques biologiques :

Le biodisque consiste en un assemblage de plusieurs disques, réalisés en matériau composite, montés et solidement fixés sur un arbre. L'arbre est mis en rotation lente par un motoréducteur, avec une vitesse comprise entre 1 à 6 rotations par minute, selon le diamètre des disques et les caractéristiques de l'effluent à traiter. Le Biodisque est en partie immergé dans l'effluent à épurer, lui-même contenu dans un réservoir. Son mouvement rotatif le met alternativement en contact avec l'oxygène de l'air. Une flore bactérienne, nourrie par les microorganismes contenus dans l'effluent, se forme à la surface des disques.

III.1.3.4) Le biofiltre :

Le principe de la biofiltration repose sur l'utilisation d'un matériau filtrant de type granulaire immergé (aéré ou non) sur lequel se développent des populations bactériennes qui vont dégrader la charge polluante apportée par l'effluent. Cette technologie, caractérisée par son extrême compacité et sa modularité, est adaptée aux stations d'épuration implantées en zone fortement urbanisée. Par contre, il nécessite un nettoyage fréquent du filtre. Son efficacité serait similaire à celle des boues activées.

III.1.4) Les procédés de désinfection supplémentaires (traitement tertiaire) :

À l'issue des traitements décrits précédemment, les eaux sont normalement rejetées dans le milieu naturel. Dans le cadre d'une REUE, les eaux usées nécessitent des traitements supplémentaires, essentiellement pour éliminer les micro-organismes qui pourraient poser des problèmes sanitaires.

III.1.4.1) Les traitements chimiques et les ultraviolets :

Le chlore est un oxydant puissant qui réagit à la fois avec des molécules réduites et organiques, et avec les micro-organismes.

L'ozone permet l'élimination des bactéries, des virus et des protozoaires. C'est le seul procédé vraiment efficace contre les virus.

On peut également utiliser l'**acide peracétique**, le **dioxyde de chlore** et les **ferrates**.

Le traitement par **rayons ultraviolets** utilise des lampes à mercure disposées parallèlement ou perpendiculairement au flux d'eau. Leur rayonnement s'attaque directement aux micro-organismes. Ce traitement est très simple à mettre en œuvre, car il n'y a ni stockage, ni

manipulation de substances chimiques et les caractéristiques chimiques de l'effluent ne sont pas modifiées.

Les désinfections utilisant des produits chimiques (chlore, ozone, etc.) sont efficaces, sauf contre *Cryptosporidium*. Il a été montré que des kystes de *Cryptosporidium* pouvaient résister à des traitements à pH = 11,2, à la chloration et à d'autres traitements chimiques[23]. Cependant, la plus grande partie des kystes de *Cryptosporidium* sont éliminés pendant les phases primaires de décantation. Par ailleurs, il faut trouver l'équilibre entre le risque posé par les désinfectants en eux-mêmes, et le risque lié aux micro-organismes pathogènes[1]. C'est essentiellement le cas pour le chlore dont l'utilisation crée des dérivés halogénés potentiellement cancérigènes.

III.1.4.2) Le lagunage tertiaire :

Le lagunage tertiaire est un procédé **extensif** de désinfection similaire au lagunage naturel, si ce n'est qu'il est précédé d'un traitement d'épuration comme par exemple un traitement par boues activées. Il permet d'éliminer les micro-organismes, d'affiner l'épuration, de faire face aux variations de flux et de protéger le milieu récepteur.

III.1.4.3) Infiltration/percolation :

L'infiltration ou percolation consiste à traiter l'eau par l'intermédiaire du sol ou d'un massif filtrant. On infiltre les effluents à raison de quelques centaines de litres d'effluent par mètre carré de massif filtrant et par jour. Trois mécanismes entrent en jeu :

- la filtration des MES ;
- l'adsorption des bactéries libres par les grains de sable du filtre : il se forme alors un film biologique contaminé, surtout dans la partie supérieure ;
- Ce film va permettre une dégradation microbienne de la matière organique et des substances dissoutes dans l'effluent (phosphates, nitrates, etc.). Cette dégradation consomme de l'oxygène et produit du CO₂, il faut donc aérer régulièrement le film pour éviter l'asphyxie du milieu.

III.1.5) Le traitement des boues :

Le traitement d'un mètre cube d'eaux usées produit de 350 à 400 grammes de boues. Ces boues généralement très liquides, contiennent une forte proportion de matières organiques. Elles sont donc très fermentescibles et susceptibles de causer des nuisances.

Cette boue subit au préalable un traitement composé de trois phases principales :

- Une phase d'épaississement qui permet de réduire son volume.
- Une phase de digestion qui assure une stabilisation de la boue.

- Et une phase de déshydratation sur lit de séchage ou par séchage thermique qui réduit au mieux le volume de la boue.

La gestion des boues représente souvent une préoccupation pour les exploitants de la STEP et pour les collectivités locales. Les débouchés finaux de ces boues sont : l'utilisation agricole, compostage, récupération d'énergie, envoi au centre d'enfouissement technique[2].

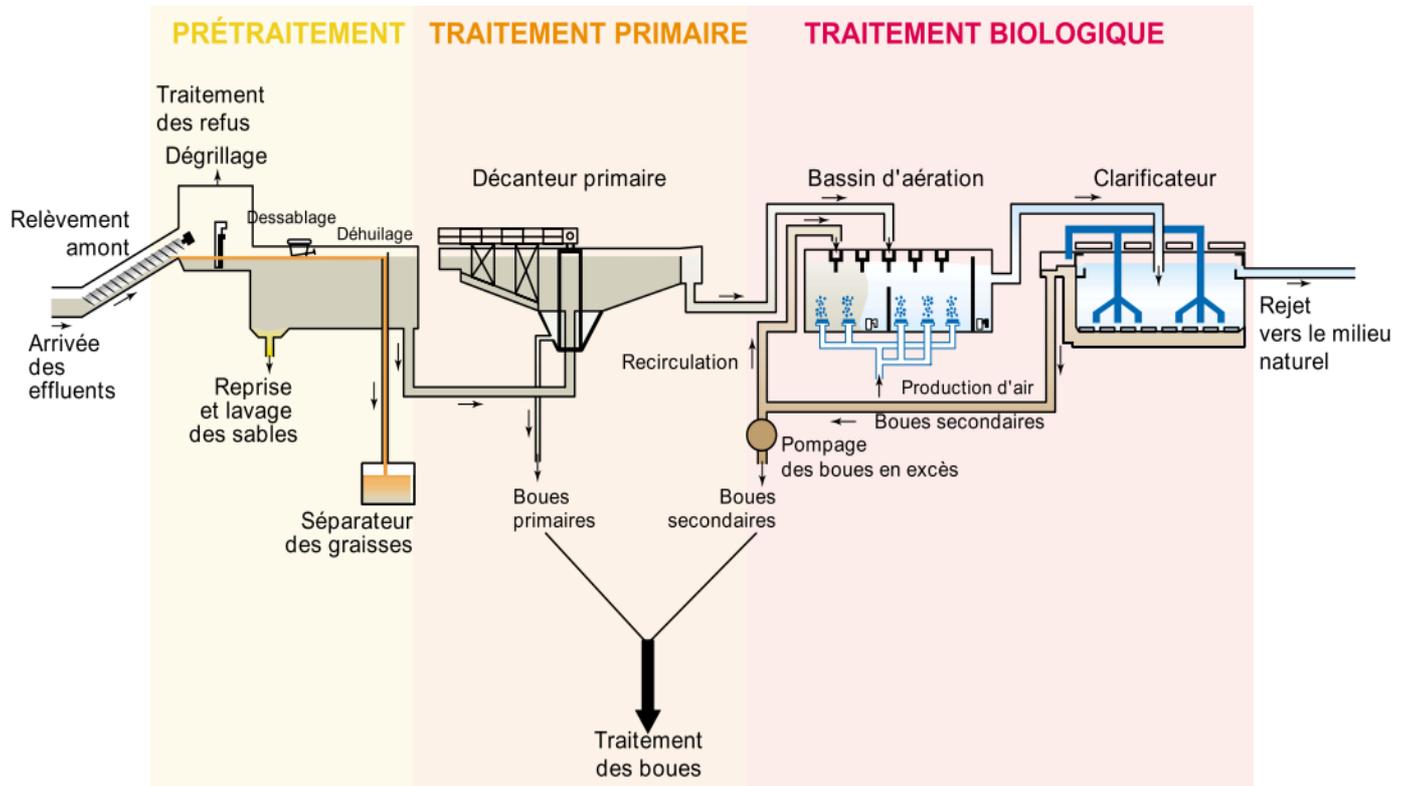


Fig II.2 : Les étapes de traitement d'une station d'épuration à boue activée[2].

III.2) Le lagunage naturel :

Ce procédé utilise des mécanismes naturels pour traiter les eaux usées : bactéries, photosynthèse et pouvoir germicide de la lumière et de certaines algues. Un traitement par lagunage comprend en général trois types de bassins :

- 1) **Le bassin anaérobie** permet de diminuer la charge en matière organique. L'anaérobiose est obtenue en apportant un effluent très chargé en matière organique. Ce type de bassin pose parfois des problèmes d'odeur, notamment à cause de la formation de composés soufrés.
- 2) **Le bassin facultatif** permet le développement d'algues photosynthétiques qui vont produire de l'oxygène, tout en diminuant la charge en matière organique.
- 3) Enfin, **le bassin de maturation** va permettre l'élimination des pathogènes, sous l'action conjuguée des UV et du pouvoir germicide de certaines algues.

Les bactéries pathogènes sont éliminées de 90 à 99 %. L'élimination des virus est un peu moins efficace[1]. Un lagunage à plusieurs bassins, dont les profondeurs sont comprises entre 0,7 et 1,2 m et pour une durée de rétention supérieure à 60 jours, la concentration finale en bactéries dans l'effluent est inférieure à $10^4/l$. Si la durée de rétention est suffisante, les œufs d'helminthes peuvent être éliminés à 100 % par décantation [12].

Le lagunage naturel est donc un moyen peu coûteux et efficace de traiter les eaux usées. Il nécessite peu de moyens financiers, techniques et humains. Cependant, il requiert une surface importante. On retiendra que l'efficacité du traitement dépend surtout de la durée de rétention et des conditions climatiques. Ainsi, il est moins efficace en hiver qu'en été.

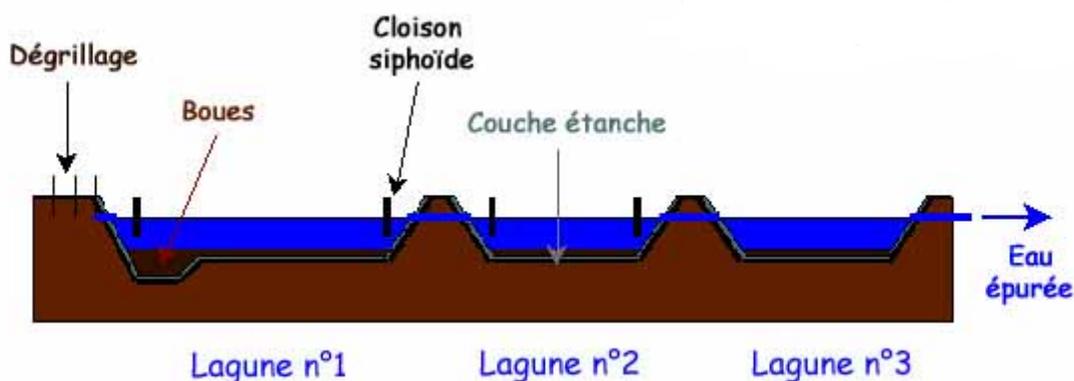


Fig II.3: Schéma qui représente le lagunage naturel.

IV. Le stockage :

Un stockage est souvent requis car le rythme de production et d'utilisation étant différent, ce qui permet aussi de faire face aux variations de flux liées aux précipitations ainsi aux variations démographiques (stations touristiques). Le stockage après épuration de l'eau aura une incidence sur la qualité de l'eau en fonction du temps de rétention :

- Un stockage « tampon » : il sert uniquement à réguler les variations quotidiennes de flux dans la station. La durée de stockage peut varier de 24 à 72 h [8] , ce qui laisse supposer que la qualité de l'eau n'aura pas varié ;
- Un stockage pour affiner le traitement microbiologique, notamment pour les parasites, qui peut durer une dizaine de jours ;
- Un stockage de longue durée, plusieurs mois pour certaines réutilisations agricoles. Dans ce cas, une évolution de la qualité microbiologique est possible [1].

Ce dernier type de stockage, appelé aussi stockage **inter saisonnier**, peut devenir un véritable traitement supplémentaire. Dans la partie inférieure du bassin la masse d'eau est anaérobie, ce qui permet la dénitrification ; par contre, la partie supérieure est aérobie, ce qui permet la nitrification. La succession nitrification-dénitrification débarrasse les eaux usées des nitrates. De plus, le phosphore est éliminé par sédimentation. Enfin, les bactéries sont détruites par l'action de la lumière. Cependant, le stockage à long terme peut

entraîner la formation d'algues ce qui pose des problèmes techniques (bouchage des goutte-à-goutte) et esthétiques. En tant que traitement, le stockage est plus efficace si les bassins ne sont pas alimentés continuellement, mais remplis puis mis en réserve, au coup par coup [12].

Il existe un mode de stockage particulier : la recharge de nappe phréatique. Elle nécessite un terrain propice, c'est-à-dire l'existence d'une nappe phréatique perméable, non exploitée, ainsi qu'un site pour l'infiltration, puis la récupération de l'eau. Il permet de lutter contre l'invasion des nappes par le biseau salé.

V. La qualité de l'eau d'irrigation :

La qualité de l'eau épurée dépend du niveau de traitement, de la maintenance et de l'entretien du système de traitement et de l'expérience des personnes faisant fonctionner la station d'épuration des eaux résiduaires.

La qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation est un paramètre essentiel pour le rendement des cultures, le maintien de la productivité du sol et la protection de l'environnement. Ainsi, les propriétés physiques et chimiques du sol, telles que sa structure (stabilité des agrégats) et sa perméabilité, sont très sensibles au type d'ions potentiellement échangeables présents dans les eaux d'irrigation.

Les facteurs les plus importants pour déterminer la qualité requise de l'eau dans l'agriculture sont les suivants:

- pH
- La salinité (CE)
- L'alcalinité (le SAR)
- La dureté (les carbonates et bicarbonates)
- Les éléments toxiques
- Les nutriments
- Les métaux lourds

V.1) Risque de salinité :

Une concentration élevée en sel dans l'eau ou dans les sols affectera négativement le rendement des récoltes, provoquera une dégradation des sols et une pollution des eaux souterraines.

L'utilisation d'une eau salée pour l'irrigation dépendra de plusieurs facteurs:

- La tolérance en sel de la récolte
- Les caractéristiques du sol sous l'irrigation

- Les conditions climatiques. La qualité de l'eau d'irrigation joue un rôle essentiel dans les secteurs arides affectés par des taux d'évaporation élevés entraînant une accumulation importante de sel dans les sols.
- Les procédures de gestion des sols et de l'eau.

La concentration en sel est donnée par le TDS (Quantité Totale de Matière Dissoutes) exprimé en mg de sel par litre d'eau (mg/L) ou en gramme de sel par mètre cube d'eau (g/m³). Elle peut être aussi mesurée grâce à la conductivité électrique de l'eau d'irrigation (CE_w), qui est exprimée en millimhos par centimètre (mmhos/cm) ou deciSiemens par mètre (dS/m) ou microSiemens par centimètre, sachant que $1\text{dS/m} = 1000\mu\text{S/cm}$.

V.2) Risque d'alcalinité (excès en sodium) :

Une grande quantité d'ions sodium dans l'eau affecte la perméabilité des sols et pose des problèmes d'infiltration. Ceci est dû au fait que le sodium présent dans le sol en forme échangeable remplace le calcium et le magnésium adsorbés sur les argiles et cause la dispersion des particules dans le sol.

Cette dispersion a comme conséquence l'altération des agrégats des sols. Le sol devient alors dur et compact (lorsqu'il est sec) réduisant ainsi les vitesses d'infiltration de l'eau et d'air, affectant ainsi sa structure.

Ce problème est également relié avec plusieurs facteurs tels que le taux de salinité et le type de sol. Par exemple les sols sableux ne subiront pas de dommage si facilement en comparaison aux plus lourds quand ils sont irrigués avec de l'eau à haut SAR.

Qu'est ce que le SAR ?

L'index utilisé est le rapport d'adsorption du sodium (SAR) qui exprime l'activité relative des ions de sodium dans les réactions d'échange dans les sols. Cet indice mesure la concentration relative du sodium par rapport au calcium et au magnésium.

Le SAR est défini par l'équation suivante :

$$\text{SAR} = \frac{[\text{Na}^+]}{\sqrt{\frac{[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]}{2}}} \quad [27]$$

V.3) Risque des carbonates et bicarbonates :

Une forte teneur en carbonate (CO_3) et en bicarbonate (HCO_3^-) augmente la valeur du S.A.R. Les ions carbonate et bicarbonate combinés au calcium ou au magnésium précipiteront sous forme de carbonate de calcium (CaCO_3) ou carbonate de magnésium (MgCO_3) dans des conditions de sécheresse.

Lorsque la concentration de Ca et de Mg décroît, la teneur en sodium donc l'indice SAR devient plus important. Ceci causera un effet d'alcalisation et augmentera le pH.

Par conséquent, lorsqu'une analyse d'eau indique un pH élevé, ça peut être un signe d'une teneur élevée en ions carbonate et bicarbonate.

■ Carbonate de Sodium Résiduel (RSC) :

Le RSC se calcule grâce à l'équation suivante: $RSC = (CO_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$

C'est un autre moyen de calculer la teneur en sodium grâce au Mg et au Ca. Cette valeur peu apparaître dans certains rapport d'analyse d'eau [36].

Niveau du risque	Nul	Léger à modéré	Sévère
RSC (meq/l)	< 1,25	1,25 – 2,5	>2,5

- En présence de bicarbonates, le SAR devient insuffisant pour déterminer les risques d'alcalinisation, pour cela on doit déterminer le SAR ajusté [27]:

$$SAR_{ajusté} = SAR * [1 + (8,4 - pH_c)]$$

pH_c : c'est le pH théorique d'une eau d'irrigation en équilibre avec de la calcite

$$pH_c = (pK'_2 - pK'_c) + p(Ca+Mg) + p(Alk)$$

pK'_2 : c'est le log négatif de la deuxième constante de dissociation de l'eau

pK'_c : c'est le produit de solubilité de $CaCO_3$

$p(Ca+Mg)$: c'est le log négatif de la concentration de Ca et Mg

$p(Alk)$: C'est le log négatif de la concentration en ions carbonates et bicarbonates dans l'eau. Avec :

$pH_c > 8,4$	$SAR_{ajusté} < SAR$	L'eau a tendance de dissoudre le $CaCO_3$ du sol
$pH_c < 8,4$	$SAR_{ajusté} > SAR$	L'eau a tendance à précipiter le $CaCO_3$

Source: [27]

V.4) Les éléments toxiques :

Les éléments toxiques sont :

- Bore (B)
- Chlorure (Cl)
- Sodium (Na)

Le sodium et le chlorure sont habituellement absorbés par les racines. Lorsque l'absorption se fait par les feuilles le taux d'accumulation est plus grand. L'absorption directe se produit habituellement dans des systèmes d'irrigation par arrosage dans des conditions de faible humidité et de hautes températures.

Le bore peut être toxique à très faible concentration. Une concentration en bore inférieure à 1mg/L est essentielle pour le développement des plantes, mais des niveaux plus élevés peuvent poser des problèmes pour les plantes sensibles [13].

V.5) Les nutriments :

Ce sont des substances nécessaires pour le métabolisme et la photosynthèse des plantes comprenant les macronutriments (N, P, K, Ca, Mg) et les oligoéléments (Fe, Mn, B, Cu, Mo, Zn et Si) [13].

V.6) Les métaux lourds :

On peut séparer les métaux lourds en quatre classes, selon qu'ils sont ou non indispensables au développement des végétaux, et selon qu'ils posent ou non des problèmes sanitaires.

Métaux lourds...		intéressants pour les plantes	inutiles ou mauvais pour les plantes
ne posant pas de problème sanitaire	Mn Fe	Pb Hg Sn Cr Se Al	
posant un problème sanitaire	Cu Mo Zn	As Ni Cd	

Figure II.4: Classification des métaux en fonction de leur dangerosité et de leur intérêt agronomique

Cette classification a été réalisée à partir des recommandations du Conseil supérieur de l'hygiène publique de France (CSHPF) de 1991.

Le manganèse (Mn), le Fer (Fe), le plomb (Pb), le sélénium (Se), l'étain (Sn), le mercure (Hg), le chrome (Cr) est sous forme ionique (Cr^{3+}), l'aluminium (Al), du cuivre (Cu), du molybdène (Mo), du zinc (Zn), de l'arsenic (As), du nickel (Ni), du cadmium (Cd).

VI. Classification des eaux d'irrigation :

La classification de l'eau d'irrigation tente de prédire l'incidence de l'emploi de l'eau sur les conditions de croissance et notamment :

- Sur la salinité des sols
- Sur des problèmes d'imperméabilisation associés au sodium
- Sur certaines toxicités spécifiques.

VI.1) Les classifications les plus utilisées :

VI.1.1) La classification de l'USDA (1954) : elle se base sur les critères suivants

Tableau II.1: La conductivité électrique.

Classe	La conductivité électrique en $\mu\text{mhos/cm}$	Définition
C1	0 - 250	Eau à faible salinité, elle peut être utilisée pour la plupart des cultures sur la plupart des sols.
C2	250-750	Eau de salinité moyenne, elle peut être utilisée si il se produit un lessivage modéré, les plantes ayant une résistance modérée au sel peuvent être cultivée.
C3	750 - 2250	Eau à forte salinité, il est nécessaire de prendre des dispositions spéciales pour abaisser la salinité tel que le drainage, choisir les plantes ayant une forte résistance au sel.
C4	2250-5000	Eau à très forte salinité, elle ne convient pas à l'irrigation.

Tableau II.2: La teneur en sodium (le SAR).

Classe	Définition
S1	l'eau contenant une faible quantité de sodium, peut être utilisée pour l'irrigation de presque tous les sols sans crainte de difficulté. Cependant les plantes comme les arbres à fruit à noyaux et les avocats accumulent des quantités dangereuse de sodium dans leurs feuilles
S2	l'eau contenant une quantité moyenne de sodium, peut présenter quelques difficultés dans les sols à texture fine, à moins qu'il n' y ait du gypse dans le sol.
S3	l'eau contenant une quantité élevée de sodium, peut provoquer des difficultés dans la plupart des sols et ne s'emploie qu'avec précaution: bon drainage, lessivage important et addition de matière organique ou amendement chimique.
S4	l'eau contenant une quantité très élevée de sodium et sont généralement impropre à l'irrigation.

Source: [27]

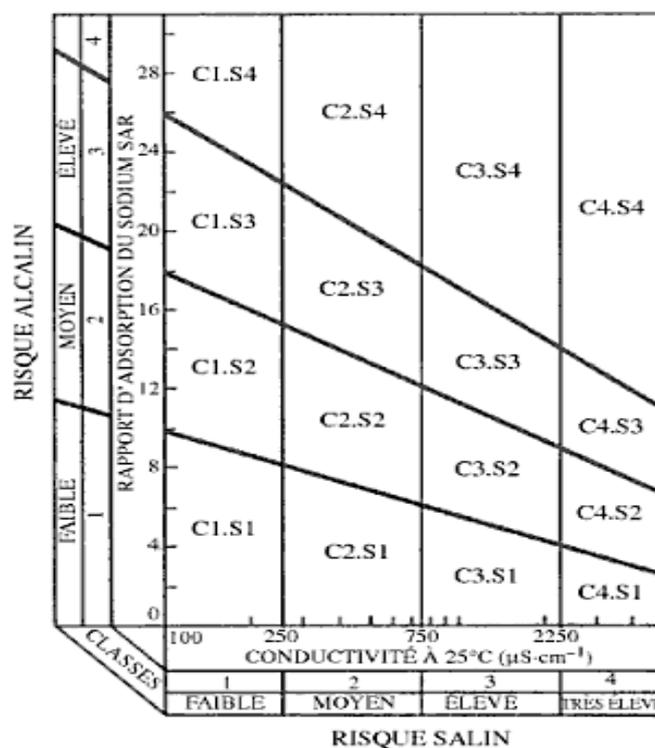


Fig II.5: Diagramme de classification des eaux d'irrigation (US Soil Salinity Laboratory)[27].

VI.1.2) La classification de Christiansen et al (1977) : Elle est fondée sur la considération de 7 critères :

La conductivité électrique, le pourcentage en sodium (Na), le SAR, Na_2CO_3 (Carbonate de sodium), Cl, la salinité effective (ES), la teneur en bore.

Tableau II.3: Classification de Christiansen et al.

Classe	CE en mmhos/cm	Na en %	SAR	Na_2CO_3 en méq/l	Cl^- en méq/l	ES en méq/l	Bore en ppm
1	0.5	40	3	0.5	3	4	0.5
2	1.0	60	6	1.0	6	8	1.0
3	2.0	70	9	2.0	10	16	2.0
4	3.0	80	12	3.0	15	24	3.0
5	4.0	90	15	4.0	20	32	4.0
6	Valeurs supérieures aux limites de 5						

VI.1.3) La classification de Ayers et Westcot (1985) :

Le tableau suivant donne la classification proposée par un groupe de chercheurs américain de l'université de Californie.

Tableau II.4: Directives pour l'interprétation de la qualité de l'eau d'irrigation.

Problèmes Potentiels en Irrigation	Unités	Degré de restriction à l'usage		
		Aucun	Léger à modéré	Sévère
Salinité				
EC _w ¹	dS/m	< 0.7	0.7 - 3.0	> 3.0
ou TDS	mg/l	< 450	450 – 2000	> 2000
Infiltration				
SAR ² =0 - 3 et EC _w =	dS/m	> 0.7	0.7 - 0.2	< 0.2
=3 - 6 =		> 1.2 =	1.2 - 0.3	< 0.3
=6 - 12 =		> 1.9 =	1.9 - 0.5	< 0.5
=12 - 20 =		> 2.9 =	2.9 - 1.3	< 1.3
=20 - 40 =		> 5.0 =	5.0 - 2.9	< 2.9
Toxicité Spécifique des ions				
Sodium (Na)				
Irrigation de surface	SAR	< 3	3 – 9	> 9
Irrigation par aspersion	méq/l	< 3	> 3	
Chlorure(Cl)				
Irrigation de surface	méq/l	< 4	4 – 10	> 10
Irrigation par aspersion	méq/l	< 3	> 3	
Bore (B)				
	mg/l	< 0.7	0.7 - 3.0	> 3.0
effets divers				
Azote (NO ₃ -N) ³	mg/l	< 5	5 – 30	> 30
Bicarbonate (HCO ₃)	méq/l	< 1.5	1.5 - 8.5	> 8.5
pH		Gamme normale 6.5 - 8.4		

Source: [13]

VI.2) Diagrammes de faciès chimique des eaux usées épurées :

VI.2.1) Diagramme de Piper :

Le diagramme de Piper permet de représenter le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons d'eaux [35].

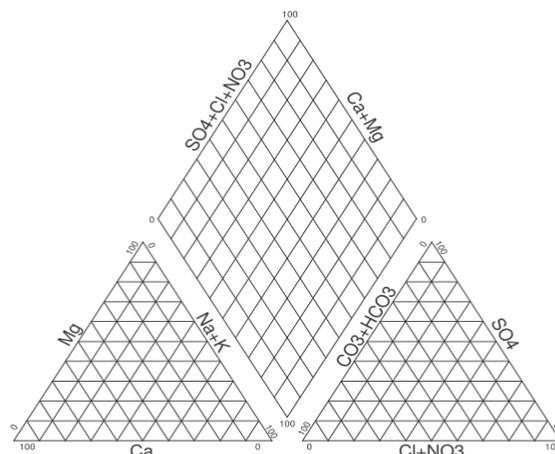


Fig II.6: Diagramme de Piper.

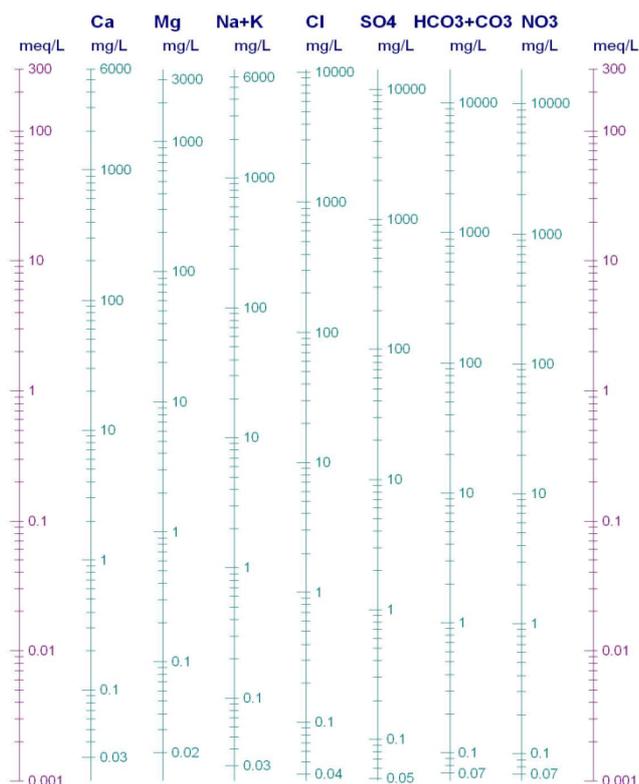
Il est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et faciès anionique et d'un losange synthétisant le faciès global.

Ce type de diagramme est particulièrement adapté pour étudier l'évolution du faciès des eaux lorsque la minéralité augmente ou bien pour distinguer des groupes d'échantillons.

VI.2.2) Diagramme de Schoeller Berkaloff :

Le diagramme de Schoeller Berkalov permet de représenter le faciès chimique de plusieurs eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne brisée. La ligne brisée est formée en reliant tous les points figurant les différents éléments chimiques.

Un groupe d'eau de minéralité variable mais dont les proportions sont les mêmes pour les éléments dissous, donnera une famille de lignes brisées parallèles entre elles. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence [35].

**Fig II.7:** Diagramme de Schoeller Berkaloff.

VII. Irrigation :

VII.1) les modes d'irrigation :

VII.1.1) L'irrigation de surface (gravitaire) :

Dans ce cas, le ruissellement s'effectue entièrement à l'air libre, par simple écoulement à la surface du sol. La répartition de l'eau est assurée par la topographie du terrain.

1. **Irrigation par submersion** : à la planche ou par bassin
2. **Irrigation à la raie** :
 - par siphon,
 - par rampe à vannette,
 - par gaine souple
 - l'irrigation à la raie automatisée (transirrigation)

VII.1.2) L'irrigation sous pression :

1. **Irrigation par aspersion** : Cette technique consiste à imiter la pluie sans ruissellement. L'eau est pulvérisée sur le terrain par un système de rampes sous pression et de buses, le débit de l'arrosage doit être toujours inférieur à celui de l'infiltration, cela impose beaucoup de calculs.
2. **Irrigation au goutte à goutte**: Cette technique consiste à apporter l'eau sur une partie du sol seulement par petites doses fréquentes. A la limite, la compensation de l'évapotranspiration se fait quotidiennement et l'eau est apportée par des distributeurs, ce qui crée dans le sol des zones humides appelées « bulbes d'arrosage ». Elle limite les percolations profondes et réduit la croissance des mauvaises herbes, le feuillage est maintenu sec.
3. **Irrigation souterraine** : Fonctionne à l'inverse du drainage, l'eau mise sous une légère pression dans les drains, remonte par capillarité.

VII.2) Choix du système d'irrigation :

Etant une pratique particulière, le choix du système d'irrigation approprié dépend de la qualité de l'eau usée épurée, de la culture, des coutumes, de l'expérience, de la compétence, de la capacité des agriculteurs à gérer les différentes méthodes et du risque potentiel sur l'environnement et sur la santé des agriculteurs et du public.

Les techniques d'irrigation représentent à des degrés divers un risque de propagation des agents pathogènes et des polluants vers les ressources en eaux. Ce risque est directement lié aux quantités d'eau nécessaires aux irrigations qui sont elles mêmes dépendantes des systèmes d'irrigation.

De même en ce qui concerne la pollution des sols et des cultures , on peut globalement hiérarchiser les systèmes d'irrigation selon le degré de risque de contamination croissant comme suit [30]:

Irrigation gravitaire >>> irrigation par aspersion > irrigation localisée

VII.3) Les problèmes liés au réseau de distribution :

Les bactéries présentes dans les eaux épurées peuvent s'accrocher aux parois du réseau de distribution et se développer et former ce qu'on appelle un **biofilm**. Le dépôt et le développement des bactéries va dépendre des conditions du milieu : vitesse de circulation de l'eau, taux de matière organique, température... Si le biofilm devient important, les bactéries peuvent se détacher et rejoindre le circuit de distribution. L'épaisseur du biofilm dépend donc de la quantité de bactéries déposées sur les parois, de leur multiplication et de leur arrachage. Le biofilm protège efficacement les bactéries contre les traitements au chlore ; son développement est quasi-inévitable.

L'irrigation localisée et l'irrigation souterraine sont des systèmes qui assure le mieux la protection sanitaire et la contamination des plantes, mais en pratique ces systèmes révèle un problème de colmatage des distributeurs, de canalisations d'alimentations et des tuyaux enterrés . Cela est lié à la qualité physico-chimique et microbiologique de l'eau usée épurée (MES, dépôts biologique, dépôts de sel...etc).

Les problèmes de colmatage touche aussi l'irrigation par aspersion par conséquent ce système présente plus d'inconvénients, tel que le mouillage des feuilles et des cultures par l'aérosol des asperseurs, ce qui risque leurs contamination par les agents pathogène, ou brûlure des feuillages dû à la salinité de l'eau. Sans oublier l'action du vent qui fait propager ces aérosols vers les voies de circulations et les habitants.

L'irrigation gravitaire a comme inconvénients :

- Les pertes par colatures peuvent contaminer les eaux superficielles
- Irrigation sur les sols légers d'où le risque de contamination de la nappe.

VII.4) Les recommandations :

VII.4.1) Les recommandations concernant les systèmes d'irrigation :

Les solutions suggérées pour résoudre le problème de colmatage du système d'irrigation sont [13]:

- Pour éviter les problèmes dus aux algues en suspension qui s'accumulent à la surface de l'eau et aux problèmes dus à l'accumulation de boues au fond du

réservoir, l'eau doit être pompée à une profondeur d'environ un mètre de la surface.

- Filtration. En fonction de la concentration des solides en suspension, des algues et d'autres impuretés, des filtres à gravier, à sable ou autres sont requis avec le système goutte à goutte.
- le circuit d'irrigation doit être nettoyé régulièrement

L'irrigation par aspersion :

- N'est pas recommandée en conditions venteuses
- Privilégier l'aspersion à basse et moyenne pression
- Faire orienter les buses d'asperseurs vers le sol
- Protection des parcelles contre les vents dominants par des haies d'arbres, maintien d'une zone tampon non arrosée du domaine irrigué

VII.4.2) Les recommandations sur le type de culture et de la récolte :

- En irrigation par aspersion, les cultures recommandées sont les cultures fourragères, les cultures industrielles et les céréales.
- Le goutte à goutte est à pratiquer systématiquement sur l'arboriculture;
- La récolte se fera au plus tôt, 2 semaines après le dernier arrosage [17].

VII.4.3) Quelques recommandations environnementale et sanitaire :

1. Environnementale :

Il est recommandé de surveiller NO₃-N, NH₄-N, P et K, pour deux raisons principales:

- L'estimation des engrais additionnels à fournir pour optimiser le rendement et la qualité des cultures ;
- La protection des eaux de surface et souterraine de la pollution par NO₃-N [13].

2. Sanitaire :

- Les personnels d'exploitation, des agents chargés du contrôle ou de l'assistance technique aux exploitants de stations d'épuration et éventuellement les agents de laboratoires agréés devront recevoir une formation adaptées (hygiène et sécurité, risque sanitaire, qualité des eaux, analyses, etc...).
- Les ouvriers irrigants doivent être protégés et sensibiliser car la probabilité pour eux de se mouiller les mains, les vêtements, ou d'autres parties de leurs corps à partir de fuites ou autrement, est certainement le plus gros risque d'exposition. Par conséquent les agriculteurs devraient être avertis du risque et manipuler l'eau usée épurée avec précaution.

- Les personnes vivantes à proximité des zones irriguées avec l'eau usées épurée, doivent être tenus informées de l'endroit où les champs irrigués avec les eaux usées sont situés. De cette façon, ils peuvent éviter d'y entrer et également empêcher leurs enfants de le faire aussi.
- Il est conseillé de faire vacciner les personnes qui présentent un haut risque d'exposition (les agriculteurs, les ouvriers irrigants, le personnel d'exploitation de la STEP).
- Les précautions d'usage classiques sont le marquage du réseau et l'information du consommateur. Dans certains états américains, les réseaux d'eau réutilisée sont peints systématiquement en violet. Il faut avertir le public de la non-potabilité de l'eau par des panneaux.

Conclusion :

A travers leur composition chimique et biologique, les eaux usées constituent un mélange très complexe. Ainsi, même après traitement, ces eaux peuvent garder une pollution chimique et biologique résiduelle par conséquent la qualité physico- chimique de ces effluents doit faire objet d'une évaluation de leurs effets sur le système d'irrigation, le sol (plus particulièrement pour le problème de salinisation et d'accumulations des éléments toxiques), les plantes et sur l'environnement.

Chapitre III

Propriétés et fonctions des sols irrigués

Introduction :

Le sol se forme par l'action directe de l'atmosphère, de la biosphère et du climat sur la lithosphère, il se situe donc à l'interface entre ces différentes composantes de l'environnement et c'est ce qui rend son rôle si important et sa pollution si dangereuse. On confère ainsi au sol d'importantes fonctions environnementales :

- 1) Vis-à-vis de l'air, le sol exerce une fonction de tampon des pluies acides ou des autres actions anthropiques analogues.
- 2) Vis-à-vis du Carbone, séquestration du gaz carbonique de l'atmosphère, des études montrent que ce n'est pas la végétation qui contient le plus de carbone mais le sol [29].
- 3) Vis-à-vis de l'eau, rôle de filtre et de réacteur chimique et biologique pour les nitrates, phosphates, pesticide, etc. Ainsi il a pour rôle de protection de la qualité de l'eau (eaux superficielles et souterraines)
- 4) Vis-à-vis des polluants, rôle de piège des polluants minéraux.
- 5) Vis-à-vis de la biodiversité, rôle de réservoir d'organisme et de gènes.

Le sol est donc le maillon central des cycles et tout déséquilibre ou pollution peut avoir des conséquences sur les différentes composantes de l'écosystème. De plus certaines activités humaines agressent le sol et altèrent ses propriétés. Trois types de dégradation (Fig III.1):

- ✓ Dégradation physique
- ✓ Dégradation chimique
- ✓ Dégradation biologique

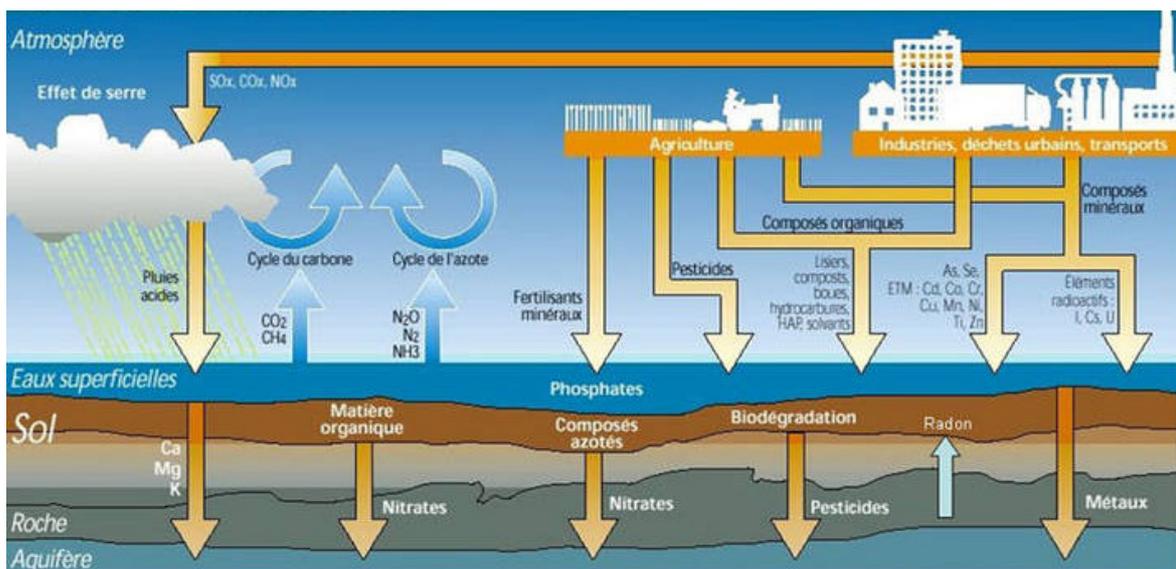


Fig III.1 : Le flux de matières polluantes transitant par le sol [33].

Le degré de sévérité de ces dégradations va dépendre aussi de la nature du sol (sableux, argileux...) et de sa situation, selon qu'il est soumis au vent, à l'humidité, etc. A cela s'ajoute la déforestation (liée aux trois quarts à l'expansion agricole), qui accroît également la détérioration des sols en accélérant leur érosion. Ainsi chaque année, des millions d'hectares disparaissent, deviennent impropres à l'agriculture ou perdent leurs fonctions positives d'épuration de l'eau, de régulation des cours d'eau ou d'accumulation de carbone.

I. Principaux composants du sol :

Issu de l'évolution des roches, le sol est un système complexe formé de très nombreux composants minéraux et organiques soumis à des phénomènes physiques, chimiques et biologiques en constante interaction. Il comprend (Fig III.2) :

■ Une fraction minérale :

Faite de fragments de roche issus du sous-sol comprenant, du plus fins au plus gros, des argiles, des limons, des sables, et d'ions comme les anions phosphate, (PO_4^{3-}), sulfate (SO_4^{2-}) et nitrate (NO_3^-). Les silicates tels les argiles, constituent 95 % des roches de la croûte terrestre ; quant au grain de sable, il s'agit d'un cristal de quartz, forme cristalline de la silice.

■ Des organismes vivants :

Racines, champignons, invertébrés, quelques vertébrés et une multitude de micro-organismes qui transforment la matière organique en matière minérale.

■ De l'humus :

Matière organique en cours de minéralisation essentiellement issue des feuilles mortes, cadavres, excréments.

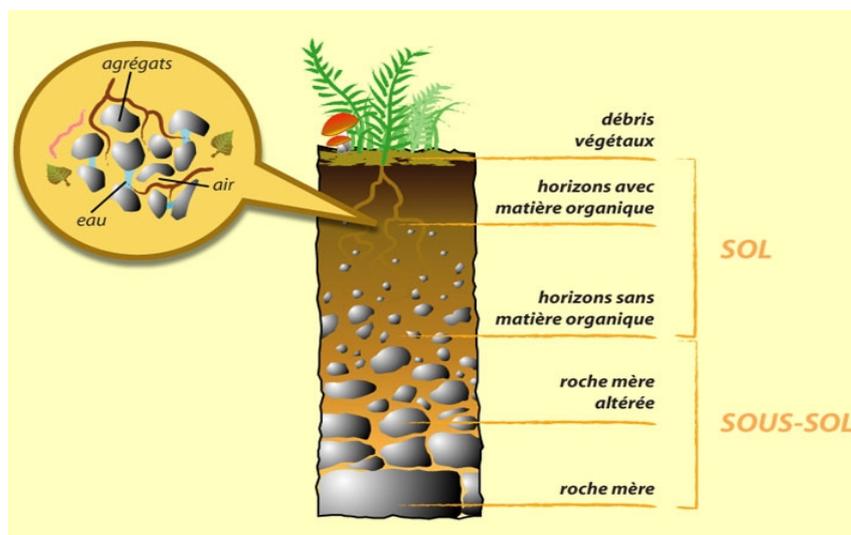


Fig III.2 : Description d'un sol [34].

II. Caractéristiques du sol :

Le sol comporte trois phases : une phase solide (qui est minérale et organique), une phase liquide ou solution du sol (qui correspond à l'eau et aux éléments dissous), et une phase gazeuse (composée principalement de dioxygène, de méthane, de dioxyde de carbone). Le sol est d'abord caractérisé par une texture et une structure qui vont fortement conditionner ses propriétés physiques et chimiques, notamment celles liées à l'eau.

II.1) La texture :

La texture du sol fait référence à la taille et à la proportion des particules minérales qui le composent. Plus spécifiquement, elle réfère à la proportion de sable, de limon et d'argile contenus dans le sol.

Tableau III.1: Échelle granulométrique de la texture du sol.

Terre fine				Terre grossière		
Argile	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers	Graviers	Cailloux
< 2 mm	2 mm à 20 mm	20 mm à 50 mm	50 mm à 200 mm	200 mm à 2 mm	2 mm à 20 mm	> 20 mm

Certains spécialistes, notamment agronomes et pédologues, savent déterminer approximativement, après humidification, si le sol est plutôt argileux, limoneux ou sableux. En effet, l'argile colle aux doigts au toucher, le limon est doux et le sable rugueux.

Pour déterminer plus finement la texture on évalue au laboratoire pour un échantillon de sol la teneur en sable, en argile et limon. Ensuite on utilise un diagramme qui permet de déterminer la classe texturale du sol (Fig III.3).

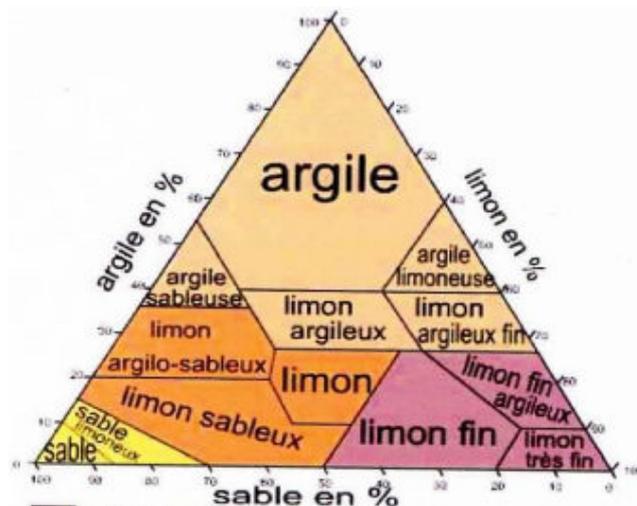


Fig III.3: Le triangle textural.

La texture joue un rôle essentiel dans la rétention de l'eau du sol et des échanges avec les racines des plantes.

II.2) La structure :

Elle correspond à la façon dont les minéraux sont agencés.

■ Structure fragmentaire :

L'agencement des grains, appelés agrégats est suffisamment espacé pour permettre à la fois une infiltration et une rétention suffisante de l'eau nécessaire à la végétation. C'est la structure la plus intéressante pour l'agriculture. Il existe plusieurs types de structure fragmentaire (Fig III.4).

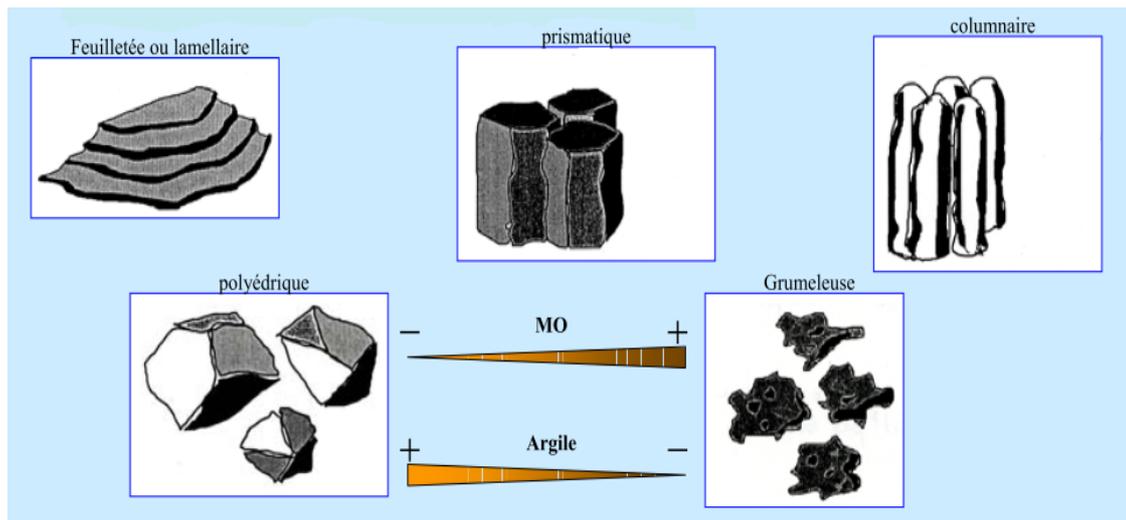


Fig III.4 : Les différents types de structure fragmentaire.

■ Structure particulaire :

Les particules individuelles n'adhèrent pas les unes aux autres (sable par exemple).

■ Structure compacte :

Les particules adhèrent fortement les unes aux autres et ne se désagrègent pas sous une forme particulière.

II.3) La porosité :

La porosité est la conséquence du mode d'assemblage des constituants du sol, c'est une des caractéristiques essentielles. Elle est constituée par tous les vides qui sont laissés entre les particules élémentaires, ainsi que par des vides qui se créent entre les agrégats et ceux qui proviennent d'activité biologiques.

La porosité peut être définie comme une valeur sans dimension qui représente le volume des vides du sol contenu dans le volume apparent du matériau. Cette valeur s'exprime en pourcentage du volume total :
$$P_t = \frac{\text{Volume des vides}}{\text{Volume apparent}} = \frac{V_v}{V_t}$$

Dans la pratique, la porosité se calcule à partir des mesures de densité réelle et de densité apparente du matériau.

■ La densité réelle : $d_r = \frac{M}{V' - V} = \frac{\text{Masse d'un échantillon de sol}}{\text{volume du solide}}$

■ La densité apparente :

$$d_a = \frac{M}{V} = \frac{\text{masse d'un échantillon de sol sec}}{\text{volume apparent}}$$

La densité apparente est une donnée indispensable pour transformer les valeurs pondérales en valeur volumiques. C'est une valeur saisonnière car elle peut varier au cours de l'année sous l'effet de causes climatiques, mécaniques, chimiques et biologiques.

On aboutit à la relation générale : $P_t = \frac{d_r - d_a}{d_r} = 1 - \frac{d_a}{d_r}$

II.4) Les fluides du sol :

II.4.1) La phase gazeuse :

Dans la zone superficielle du sol, les gaz se trouvent en permanence en contact avec la phase liquide. Leur rôle est important car ils participent à la respiration des végétaux. Ils interviennent dans la circulation de l'eau et donc sur la conductivité hydraulique de la phase liquide.

II.4.2) La phase liquide :

L'eau est liée au sol avec des degrés d'énergie très différents, pour cela on distingue trois formes de l'eau dans le sol (Fig III.5) :

1. **L'eau hygroscopique** : qui est retenue à la surface des grains par des forces d'adhésion moléculaires et électriques.
2. **L'eau capillaire** : qui est retenue par les forces de contact dont font partie les forces capillaires. Cette eau adhère aux particules solides du sol et les couvre d'une pellicule relativement continue. Elle se déplace dans le sol sous l'effet des potentiels hydriques.
3. **L'eau gravitaire** : est celle qui contrairement aux catégories précédentes, possède la propriété de se mouvoir sous l'effet de la gravité, elle remplit les pores les plus gros et transmet la pression hydrostatique.

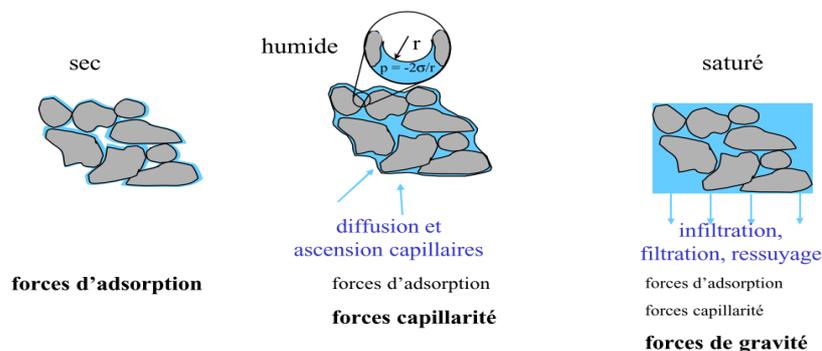


Figure III.5: Les formes de l'eau dans le sol.

III. Stockage et circulation de l'eau dans le sol :

III.1) Rétention de l'eau dans le sol : (hydrostatique du sol)

La teneur en eau est une variable d'état, essentielle pour caractériser le sol. Elle peut être exprimée sous deux formes : la teneur en eau pondérale et la teneur en eau volumique.

III.1.1) La teneur en eau pondérale :

Par définition, la teneur en eau pondérale correspond au rapport de la masse d'eau contenue dans le sol à la masse de sol sec. La méthode classique pour mesurer l'humidité pondérale est relativement simple. Elle est aussi appelée méthode gravimétrique, elle est donnée par l'expression suivante :

$$W = \frac{M_{eau}}{M_{totale\ du\ sol\ sec}} = \frac{\text{poids de l'échantillon humide} - \text{poids de l'échantillon sec}}{\text{poids de l'échantillon sec}}$$

III.1.2) La teneur en eau volumique :

Cette valeur intéresse l'hydrologue, l'hydraulicien; c'est celle qui est utilisée en générale dans la modélisation. L'expression mathématique de la mesure de la teneur en eau volumique est alors la suivante : $\Theta = \frac{V_{eau}}{V_{total}}$

En combinant l'expression de la teneur en eau volumique et celle de la densité apparente, on obtient une relation simple entre teneur en eau volumique et teneur en eau pondérale :

$$\Theta = W * d_a$$

III.2) Transport de l'eau dans le sol : (hydrodynamique du sol)

III.2.1) Les équations particulière du transport de l'eau :

Le transport de l'eau dans le sol et dans les substrats géologiques, d'une façon générale dans les milieux poreux naturels, est décrit par plusieurs équations qui sont des applications des lois générales. Elles reposent sur des hypothèses simplificatrices qui néanmoins permettent de décrire le transport de l'eau avec une approximation suffisante pour beaucoup d'utilisations pratiques. Ces équations sont :

- L'équation de **Darcy** qui relie le flux de liquide qui traverse un milieu poreux saturé en eau au gradient de pression hydrostatique appliqué au milieu.
- L'équation de **Darcy-Buckingham** qui est la généralisation de l'équation de Darcy aux milieux non saturés en eau.
- L'équation de **Richards** qui donne une description générale du transport de l'eau dans les milieux poreux non saturés en eau [7].

1) Loi de Darcy :

Henry Darcy, ingénieur chargé de l'alimentation en eau de la ville de Dijon, étudia l'écoulement de l'eau dans des colonnes de sable et montra l'existence d'une relation linéaire entre la densité de flux et le gradient de pression hydrostatique. Cette relation constitue le fondement de l'hydrodynamique des milieux poreux.

La loi de Darcy telle qu'elle a été formulé dans l'appendice D de son célèbre ouvrage *Les fontaines publiques de la ville Dijon* s'exprime par :

$$Q = K S \frac{\Delta H}{L}$$

Avec :

Q : le débit (m³/s)

K : la conductivité hydraulique (m/s)

S : surface de la section étudiée (m²)

$\Delta H/L$: le gradient hydraulique ($i = \Delta H/L$) ou ΔH est la différence des hauteurs piézométriques en amont et en aval de l'échantillon, L est la longueur de l'échantillon.

2) Loi de Darcy-Buckingham :

Edgar Buckingham proposa en 1907 une modification de la loi de Darcy pour décrire le transport de l'eau dans les milieux non saturés en eau. Il s'appuya sur deux hypothèses :

1. Le flux d'eau dans un milieu non saturé en eau est dû au gradient de potentiel hydrique qui est la somme du potentiel matricielle, ψ_m et du potentiel gravitationnel ψ_g .
2. La conductivité hydraulique du milieu est une fonction de la teneur en eau ou du potentiel matriciel ψ_m .

Pour un transport monodimensionnel dans une direction x, la densité de flux d'eau, q est

alors exprimé par :

$$q = -K(\theta) \frac{\partial \Psi_T}{\partial x}$$

où K (θ) est la fonction décrivant la relation entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau et ψ_T le potentiel hydrique total.

le signe (-) permet de donner un signe positif au flux d'eau. En effet, les écoulements ne peuvent se produire spontanément que dans le sens des potentiels décroissant ce qui correspond à un gradient de potentiel négatif [7].

3) Equation de Richards :

En conditions isothermes, la description complète du transport de l'eau ne fait intervenir que deux lois, la loi de conservation de la quantité de mouvement et la loi de conservation de masse. Leur combinaison conduit à l'équation de Richards :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(\theta) \frac{\partial \Psi_T(\theta)}{\partial x} \right)$$

Dont les solutions sont les fonctions $\theta(x,t)$ et $\Psi(x,t)$ qui représentent respectivement les variations de la teneur volumique en eau et du potentiel total en fonction de la variable d'espace x et du temps t . [7]

III.2.2) La conductivité hydraulique :

Les équations précédentes contiennent une grandeur fondamentale pour la description du transport de l'eau, la conductivité hydraulique (K). C'est un coefficient qui dépend des propriétés du milieu poreux où l'écoulement a lieu (granulométrie, forme des grains, répartition et forme des pores, porosité intergranulaire). Elle s'exprime en fonction des propriétés intrinsèques du milieu poreux et du fluide :

$$K = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu}$$

avec :

- k : la perméabilité intrinsèque du milieu poreux (m^2),
- ρ : la masse volumique du fluide (kg/m^3),
- g : l'accélération de la pesanteur (m/s^2),
- μ : la viscosité dynamique du fluide.

Notons que Darcy a exprimé la conductivité hydraulique K à partir d'un perméamètre rempli avec du sable, dans lequel seul la perméabilité verticale a été examinée. Or, dans les sols, l'eau se déplace dans les trois directions de l'espace et cette conductivité hydraulique K n'est pas la même dans toutes les directions de l'espace: l'anisotropie comme hétérogénéité sont des propriétés incontournables qu'il faut prendre en compte.

Les variations de potentiel de l'eau dans le sol sont le moteur des écoulements, leur intensité est aussi déterminée par la capacité du sol à se laisser traverser par l'eau, c'est-à-dire par sa conductivité hydraulique K . Elle est fortement dépendante du taux de saturation en eau de sa porosité, c'est-à-dire de sa teneur en eau [9].

III.2.2.1) Conductivité hydraulique des milieux saturés en eau :

En conditions saturées, le potentiel de pression matricielle est nul et la teneur en eau maximale. La conductivité hydraulique est alors constante à sa valeur maximale, qu'on nomme conductivité hydraulique à saturation.

III.2.2.2) Conductivité hydraulique des milieux non saturés :

En condition non saturé, la teneur en eau θ et la charge de pression h diminuent à mesure que l'on s'éloigne de la saturation.

Les relations liant la conductivité hydraulique à la charge de pression ou à la teneur en eau sont complexes et dépendent du type de sol considéré, par le biais de ces caractéristiques structurales et texturales. La figure III.6 montre l'allure générale de la dépendance entre la conductivité et la charge de pression dans le cas de deux sols de textures différentes.

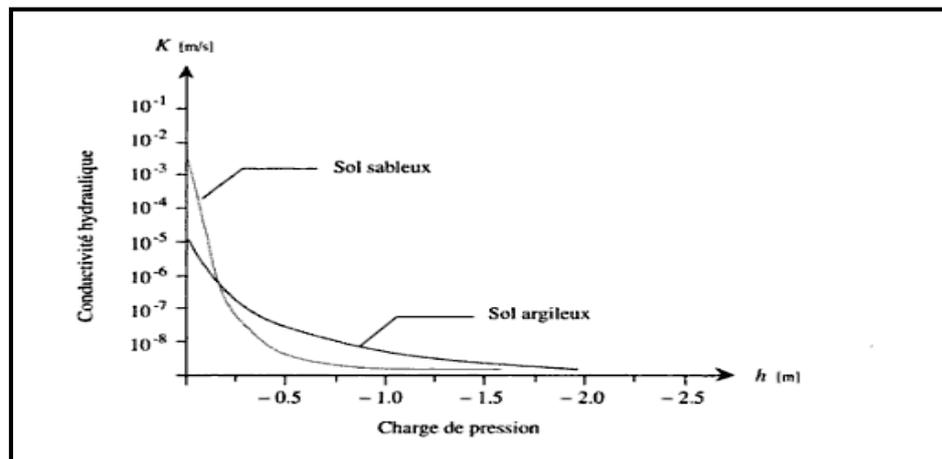


Fig III.6: Allure générale de la relation $K(h)$.

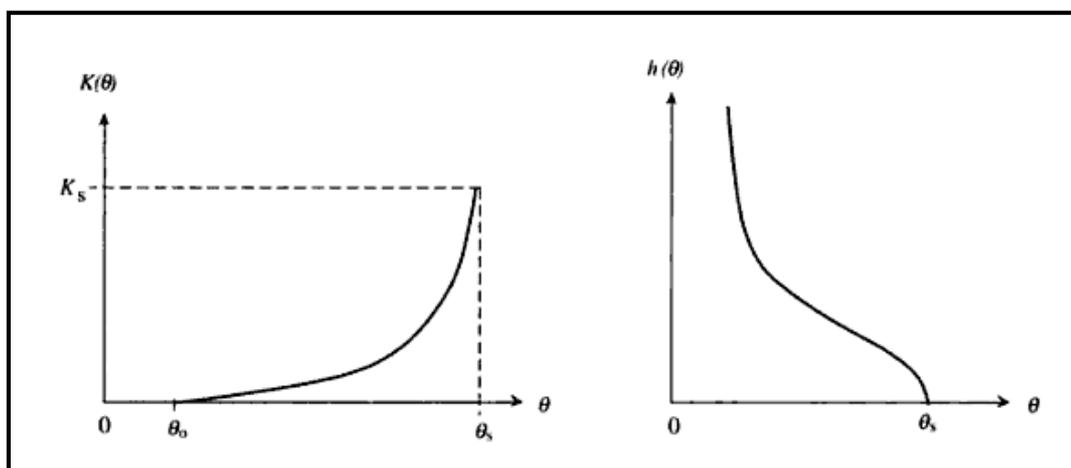


Fig III.7: Allure générale des relations $K(\theta)$ et $h(\theta)$.

Tableau III.2: Parallélisme entre les paramètres de la zone non saturée et de la zone saturée du sol [9].

Paramètres	Zone saturée	Zone non saturée
Charge de pression ψ	> 0	< 0
Teneur en eau volumique θ	$\theta_{saturé} = porosité$	$\theta \leq \theta_{saturé}$
Conductivité hydraulique K	K est constant	$K(\theta, \psi)$ Est influencé par la teneur en eau et la charge de pression
Débit spécifique q	Calculé au moyen de la loi de Darcy avec une conductivité hydraulique constante	Calculé au moyen de la loi de Darcy généralisée avec une conductivité hydraulique variable
Evolution de la teneur en eau du milieu	Le drainage provient du déplacement de l'eau sous sa propre charge	L'évolution de la teneur en eau résulte du remplacement de l'eau des pores par l'air sous l'action de l'extraction par les racines des végétaux
Mesure de la charge hydraulique h	Piézomètre	Tensiomètre

III.2.3) Les fonctions de pédotransfert :

Dans le domaine de la science du sol, les fonctions de pédotransfert (FPT) sont des outils, basés sur des relations statistiques, qui permettent d'estimer et de prédire des propriétés ou des comportements du sol difficiles à mesurer directement et en de nombreux points (déterminations lourdes et coûteuses), à partir d'autres caractéristiques du sol aisément observables sur le terrain ou déterminées en routine sur échantillons de sols, et de ce fait plus aisément cartographiables.

Le terme de *pedotransfer function* fut créé par Johan Bouma avec l'idée de « traduire les données dont nous disposons en celles dont nous avons besoin ».

Les fonctions pédotransfert correspondent à une expression mathématique reliant des caractéristiques du sol (composition granulométrique, densité apparente, taux de carbone organique, etc.) à une propriété ou à un comportement (rétention en eau, conductivité hydraulique, etc.).

Les différentes fonctions pédotransferts existantes ont été évaluées selon les critères suivant :

- L'applicabilité à une large gamme des sols différents
- L'absence de déviations systématique par rapport aux valeurs mesurées
- L'exactitude

Celle qui a été considérée comme la meilleure est celle établie par Vereecken et al (1989). Elle est basée sur une méthode de régression fonctionnelle des paramètres: on suppose qu'une fonction de forme fermée lie h et θ , respectivement le potentiel hydrique du sol et sa teneur en eau, et les paramètres sont trouvés par régression. La fonction utilisée dans ce cas est basée sur l'expression de Van Genuchten. Cependant elle a été simplifiée en supposant $m=1$, ce qui implique que les paramètres α et n n'ont pas la même signification que dans l'équation initiale.

III.2.3.1) Des fonctions de pédotransfert pour la conductivité hydraulique à l'état saturé :

Des FPT développées pour la conductivité hydraulique à l'état saturé (K_s en cm par jour) sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau III.3: Des fonctions de pédotransfert pour la conductivité hydraulique à l'état saturé [6].

Cosby et al. (1984)	$K_s = 60,96 \times 10^b$ avec $b = -0,6 + 0,0126 (\%Li) - 0,0064 (\%Ar)$
Brakensiek et al. (1984)	$K_s = 24 \exp(x)$ avec $x = 19,52348 (P) - 8,96847 - 0,028212 (\%Ar) + 0,00018107 (\%Sa)^2 - 0,0094125 (\%Ar)^2 - 8,395215 (P)^2 + 0,077718 (\%Sa) (P) - 0,00298 (\%Sa)^2 (P)^2 - 0,019492 (\%Ar)^2 (P)^2 + 0,0000173 (\%Sa)^2 (\%Ar) + 0,02733 (\%Ar)^2 (P) + 0,001434 (\%Sa)^2 (P) - 0,0000035 (\%Ar)^2 (\%Sa)$
Saxton et al (1986)	$K_s = 24 \exp \{ [12,012 - 0,0755 (\%Sa)] + [- 3,895 + 0,03671 (\%Sa) - 0,1103 (\%Ar) + 0,00087546 (\%Ar)^2] / [0,332 - 0,0007251 (\%Sa) + 0,1276 \log_{10} (\%Ar)] \}$
Vereecken et al (1990)	$K_s = \exp[20,62 - 0,96 \ln (\%Ar) - 0,66 \ln (\%Sa) - 0,46 \ln (\%MO) - 8,43 (Da)]$
Bloemen (1980)	$K_s = 0,02 M^{1,93} GSDI^{-0,74}$ Avec M : médiane de la distribution granulométrique et $GSDI$: grain size distribution index.
Campbell (1985)	$K_s = 339 (1,3 / Da)^{1,3} \exp [-6,9 (\%Ar) - 3,7 (\%Li)]$ Avec $b = GMPS^{-0,5} + 0,2 GSD$, $GMPS$ = geometric mean particle size, GSD = geometric standard deviation of the particle size distribution.

$\%Ar$: teneur en argile, $\%Li$: teneur en limon, $\%Sa$: teneur en sable, $\%MO$: teneur en matière organique, $\%CO$: teneur en carbone organique, Da : densité apparente et P : porosité

Un ensemble de fonctions de pédotransfert proposées pour la conductivité hydraulique à l'état saturé a été testé par Tietje et Hennings (1996). Il en ressort que les estimations qu'elles donnent ne sont pas très précises.

III.2.3.2) Modèles paramétriques pour la conductivité hydraulique en milieu non saturé :

Un modèle couramment utilisé pour décrire la conductivité hydraulique en milieu non saturé a été proposé par Van Genuchten (1980). Il peut être écrit comme suit [7] :

$$K(\theta) = \begin{cases} K_s Se^\lambda \left[1 - (1 - Se^{1/m})^m \right]^2 & h < 0 \\ K_s & h \geq 0 \end{cases}$$

Avec : $Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$

- où
- Se est la teneur en eau effective [-];
 - K_s , la conductivité hydraulique à saturation [$L T^{-1}$];
 - θ_r , la teneur en eau résiduelle [$L^3 L^{-3}$];
 - θ_s , la teneur en eau à saturation [$L^3 L^{-3}$];
 - λ , un paramètre de connectivité des pores [-];
 - α [L^{-1}], n [-] et m [-], des paramètres empiriques.

L'expression de Van Genuchten pour la courbe de rétention $h(\theta)$ (Fig III.7) est:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left(1 + |\alpha h|^n \right)^{-m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases}$$

où θ_r est la teneur en eau résiduelle [$L^3 L^{-3}$], θ_s est la teneur en eau à saturation [$L^3 L^{-3}$], h est le potentiel de pression [L], α est un paramètre empirique [L^{-1}], n est un paramètre empirique (supérieur à 1) [-], $m = 1 - (1/n)$, est un paramètre empirique [-].

III.2.4) Influence de la qualité de l'eau sur la conductivité hydraulique :

Jusqu'à la fin du XX^e siècle, les expérimentateurs se sont peu souciés de la qualité de l'eau utilisée pour la mesure de la conductivité hydraulique en utilisant sur le terrain de l'eau de nappe ou de rivière, et au laboratoire, l'eau délivrée par le réseau public de distribution d'eau.

Cette attitude est en train de se modifier avec l'évolution des techniques et la demande sociale d'utilisation ou de réutilisation des eaux dites "non conventionnelles". Ces eaux chargées en solutés (eaux nappes salées, eau de mer,...) ou provenant de stations

d'épuration des eaux urbaines ou industrielles font de plus en plus l'objet de recherches dans le domaine.

Les recherches sur l'influence de la qualité de l'eau sur la conductivité hydraulique des sols n'en sont qu'à leurs débuts. Elles deviendront très certainement une discipline à part entière à l'avenir [9].

Pour avoir quelques idées concernant ces recherches qui s'engagent, on notera que l'eau que l'on utilise dans les mesures de conductivité hydraulique présente un certain nombre de caractéristiques physico-chimiques dont :

- Les électrolytes présents
- La charge en Matières En Suspension (MES).

1. Les électrolytes :

L'influence sur les sols des sels dissouts (principalement du chlorure de sodium) est connue depuis de nombreuses années. Mais comment évoluent les propriétés hydrauliques d'un sol (en particulier sa conductivité hydraulique), lorsqu'il est soumis à des apports d'eau contenant des sels dissouts, du type des effluents de station d'épuration urbaine? Ou en présence d'une couche d'étanchéité à la base d'une décharge?

On sait que l'on a au bout d'un certain temps de contact des modifications du comportement des minéraux constitutif avec le plus souvent une diminution de la conductivité hydraulique. Au contraire dans d'autre cas et avec d'autres types de cations, on peut obtenir une augmentation de ce paramètre hydraulique [9].

2. Les matières en suspension :

Les particules organiques et/ou minérales qui composent les matières en suspension ne restent pas mobiles mais finissent par se déposer dans la porosité et constituent des barrages à la circulation de l'eau [9].

III.2.5) La température du sol et son influence sur la conductivité hydraulique :

Les sols sont soumis dans leur partie supérieure à la fluctuation saisonnière de la température de l'air. Ils se réchauffent sous l'effet du rayonnement solaire direct ou indirect, ainsi que des apports géothermiques par les nappes profondes.

La température du sol varie de façon sinusoïdale. L'amplitude de la variation diminue avec la profondeur.

Lors de la réalisation de mesures sur le terrain, on peut se poser la question de l'isothermie des milieux observés, condition principale pour le calcul de la conductivité hydraulique. Cette condition peut être conservée si l'on réalise la mesure dans un temps très court, de l'ordre de la journée, et de préférence pendant des périodes où l'amplitude des variations

est faibles. Mais pour des mesures qui doivent durer plusieurs jours, voir plusieurs semaines, ou être répétées à des saisons très tranchées du point de vue de la température. Il est donc indispensable dans ce cas d'effectuer par la suite les corrections nécessaires.

En ce qui concerne les mesures de la conductivité hydraulique des horizons non saturés du sol, la prise de température devrait être impérative. En effet, pendant la période estivale, la couche superficielle du sol peut être portée à des températures de 30°C à 50°C. La viscosité de l'eau est très différente et peut modifier sensiblement résultats [9].

III.2.6) Les effets des microorganismes sur la conductivité hydraulique :

L'activité des microorganismes est relativement importante dans la plupart des sols. Olson et al. (1981) ont présenté des données sur les effets des microorganismes sur la conductivité hydraulique. Ils en déduisent que la croissance des colonies bactériennes est la cause de diminution de la conductivité hydraulique par colmatage des pores les plus important.

Miyazaki (1993), Seki et al. (1998) ont par la suite étudié cette action en comparant des essais réalisés avec des sols stérilisés et non stérilisés.

Dans les sols stérilisés, la conductivité hydraulique varie dans le temps en fonction des facteurs chimiques ou physique, alors que, dans les sols non stérilisés, la variation du paramètre hydrodynamique est due non seulement aux facteurs physico-chimique mais aussi aux facteurs biologiques.

Miyazaki (1993) propose deux hypothèses pour expliquer ce phénomène :

- La première correspond à la constitution d'un biofilm, où les bactéries couvrent les parois des pores en emprisonnant des particules physique (micelles organique ou minérale) de petites tailles, qui accélèrent le colmatage.
- La deuxième correspond plutôt à la constitution de microcolonies bactériennes qui obstruent les pores les plus gros [9].

IV. Transport de soluté :

Le transport des solutés dans le sol concerne des substances dissoutes organique et inorganique ionisées et non ionisées. Il s'agit d'un phénomène très générale et se déroulant partout dans le sol et à tous moments et qui est impliqué dans plusieurs processus:

- La pédogénèse puisque la formation et l'évolution est le résultat d'apports ou de pertes de solutés
- Le devenir des substances fertilisantes et leur absorption par les plantes et les autres organismes vivant
- Le devenir des substances à caractère polluant, leur persistance et leur transfert dans les eaux souterraines et superficielles.

S'agissant de substances dissoutes, le transport de l'eau est un déterminant du transport des solutés (Fig III.8). Les phénomènes élémentaires mis en jeu dans ce transport sont :

1. La diffusion moléculaire
2. Convection- dispersion.

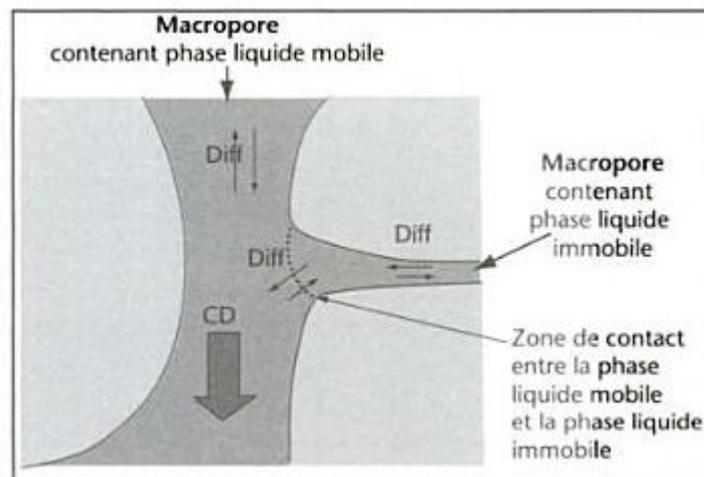


Fig III.8 : Localisation des phénomènes de transport dans l'espace poral.

Diff = Diffusion moléculaire

CD = Convection-dispersion

- La convection dispersion hydrodynamique ont lieu dans les macropores
- La diffusion moléculaire a lieu partout mais elle intervient principalement dans les micropores.

IV.1) la diffusion moléculaire :

La diffusion moléculaire est un processus impliquant seulement le soluté (substance polluante, dissoute ou autre).

Elle se produit lorsqu'un gradient de concentration provoque la migration des solutés d'une zone de forte concentration vers une zone de faible concentration ou à concentration initiale nulle. Son influence ne devient importante que dans le cas d'écoulements lents ($<10^{-7}$ cm/h). Ce phénomène est régi par la loi de Fick, dont l'expression :

$$J_{diffx} = -D_x \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

Le signe (-) permet d'avoir une densité de flux positive dans la direction Ox puisque le gradient de concentration est négatif, et D est un coefficient de diffusion moléculaire.

Ce transport a lieu à des vitesses très différentes dans chaque phase. En 24 heures, les distances parcourues sont approximativement de l'ordre de grandeur :

- Du mètre en phase gazeuse
- Du millimètre en phase liquide

- De la dizaine de micromètre en phase solide (adsorbée)

On retient que la diffusion moléculaire concerne de petites distances (quelques mm) dans la solution du sol.

IV.2) La convection-dispersion:

1) La convection : c'est le transport de solutés dû à l'écoulement de la phase liquide du sol.

2) Dispersion hydrodynamique: cette notion a été introduite par Bear (1972). La dispersion hydrodynamique est un phénomène par lequel une substance migre dans le sol. En se déplaçant, l'espèce chimique se dilue et s'étale pour occuper un volume plus grand avec une concentration corrélativement décroissante.

Cette propagation est provoquée, d'une part, par le déplacement des molécules sous l'effet de la diffusion moléculaire et, d'autre part, de la dispersion mécanique.

3) Equation de convection-dispersion :

La dispersion hydrodynamique = dispersion mécanique + diffusion moléculaire

$$\text{D'où l'équation : } \frac{\partial c}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} (J) = D_h \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - u \frac{\partial c}{\partial x}$$

Avec :

$D_h = D + D_m$, le coefficient de dispersion hydrodynamique

Cette équation convient pour un soluté qui n'est pas retenu et qui ne subit pas de transformations chimiques. Dans le cas contraire, il faut ajouter un terme $\pm \phi$ pour exprimer l'influence d'une source ou d'un puit.

IV.3) l'existence de phénomènes puits et sources pour les solutés :

Le sol est le siège de plusieurs phénomènes qui ont une influence sur la concentration des solutés dans la phase liquide :

- Certains diminuent la concentration, ce sont **les phénomènes puits** qui résultent soit de l'immobilisation par adsorption et précipitation, soit de transformations chimiques. Par exemple, l'adsorption et la dégradation sont des puits pour les pesticides.
- D'autres augmentent la concentration, ce sont **les phénomènes sources** qui résultent soit de la mobilisation par désorption et dissolution, soit de transformations chimiques. Par exemple, la désorption des pesticides est une source et la nitrification est une source de nitrate [7].

V. Salinité et sodicité des sols :

La salinité et la sodicité des sols sont identifiées et qualifiées à partir de la composition ionique de la solution du sol. Certains sols, les sols salés et sols sodiques, possèdent en effet une phase liquide très riche en sels dissous qui leur confère des propriétés souvent défavorables, en particulier à l'égard du sol et des plantes.

Les sources de sels sont variables :

- **Le matériau géologique**, par le biais de l'altération, peut libérer les éléments nécessaires à la formation des sels solubles (altération de minéraux primaires riches en sodium, de roches volcaniques, des produits de l'hydrothermalisme riches en soufre et en chlore, ou encore dissolution des évaporites, qui sont des accumulations salines anciennes).
- **L'eau de mer** est bien entendu une source principale de sel en milieu côtier.
- **Une nappe phréatique**, d'origine continentale et salée par héritage géologique, peut contaminer le sol par ascension capillaire.
- **L'eau d'irrigation**, on parle alors de salinisation anthropique.

Cette dernière est le processus de dégradation de la qualité des sols le plus rapide dans les périmètres irrigués.

Les ions les plus fréquemment présents dans la solution du sol des sols salés sont : les cations, sodium (Na^+), potassium (K^+), calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}) et les anions carbonates (CO_3^{-2}), sulfates (SO_4^{-2}) et chlorures (Cl^-). La présence de ces ions se manifeste surtout sous les climats où la demande évaporative est grande conduisant à des concentrations d'ions souvent très élevées.

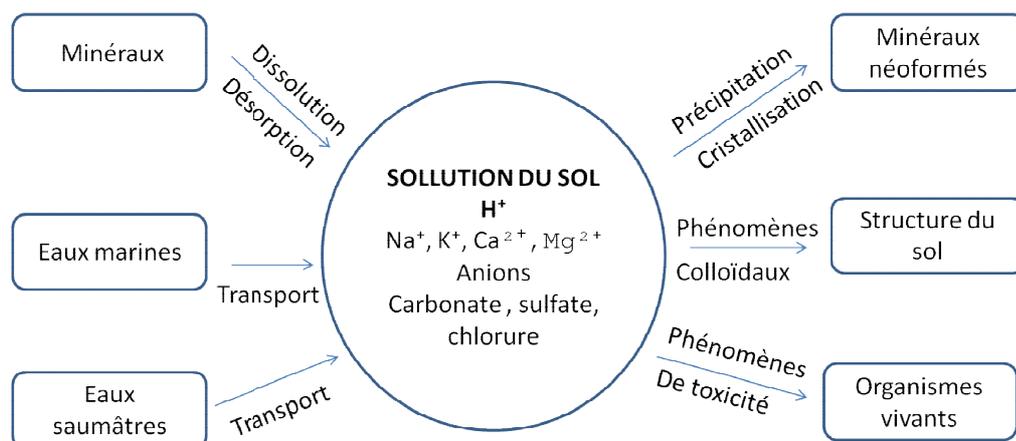


Fig III.9 : Salinité et sodicité des sols [7].

V.1) La dégradation des sols par salinisation :

La salinisation est l'accumulation des sels hydrosolubles dans le sol. Les sels se dissolvent et se déplacent avec l'eau (Fig III.11) . Quand l'eau s'évapore, les sels restent. Elle a pour principales conséquences :

- L'augmentation de la pression osmotique dans la solution du sol empêche la pénétration de l'eau dans la plante, provoque une plasmolyse des cellules, parfois irréversible et qui peut aboutir à la mort du végétal. Certaines plantes sont adaptées à ces concentrations, ce sont les plantes halophytes, mais les plantes cultivées ne le sont pas.
- Une toxicité pour les végétaux due à l'accumulation de certains ions, dont : chlorure, sodium, bore, qui s'accumulent dans les feuilles et peuvent provoquer des dommages métaboliques.
- Diminution de l'activité microbienne du sol, la nitrification et la production de CO₂. Les produits organiques formés changent.

Lorsque le sodium domine dans l'eau, on parle de salinité, et lorsque il domine adsorbé à l'argile on parle de sodicité.

V.2) La dégradation des sols par alcalinisation :

Les sols alcalins, caractérisés par un pH élevé, souvent au-dessus de 9, et une forte proportion de sodium sur le complexe d'échange (supérieure à 15 % aux sols salés), deux points les distinguent des sols salés. Ce sont :

- La composition chimique de la solution du sol à nette prédominance bicarbonaté-sodique ;
- Une dégradation des propriétés physiques des sols, les cations sodium tendent à provoquer la destruction de la structure en favorisant la dispersion des colloïdes minéraux.



Fig III.10 : Destruction de la structure du sol due à l'excès de sodium.

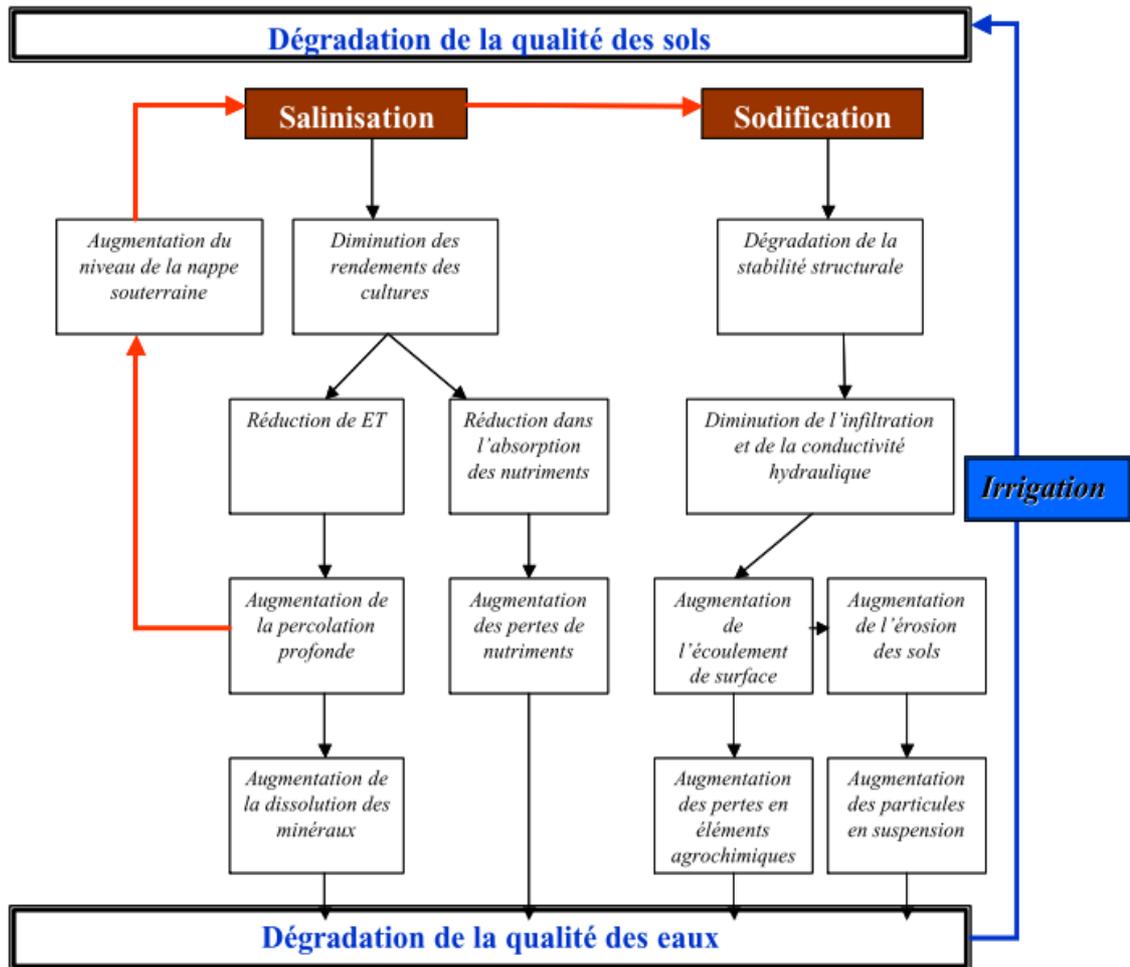


Fig III.11 : Processus de dégradation de la qualité des sols suite à l'irrigation [18].

Plusieurs grandeurs sont utilisées pour caractériser les sols salés :

1. Taux de sodium échangeable: $ESP = \frac{[Na^+]}{CEC} \times 100$ avec :

[Na⁺] en meq/100g

CEC : la capacité d'échange cationique en meq/100g

2. La conductivité électrique du sol (de l'extrait de pâte saturée ou de l'extrait dilué) : mesure la concentration en sel de la solution du sol.

Tableau III.4: Catégories de sols salés et sodique (d'après Black, 1968).

CE (mmho/cm)	< 4	< 4	> 4	> 4
ESP	< 15	> 15	< 15	> 15
	Sol non salin - non alcalin	Sol non salin- alcalin	sol salin- non alcalin	Salin-alcalin

VI. Les éléments traces métalliques (ETM) :

Les éléments traces métalliques (ETM) dans les sols proviennent en partie de l'altération de la roche mère mais aussi de sources externes au sol : dépôts atmosphériques, épandages d'engrais et différentes activités humaines.

Certains de ces éléments traces métalliques sont des oligo-éléments nécessaires pour la vie des plantes, il s'agit : Bore (B), cuivre (Cu), le Fer (Fe), Manganèse (Mn), Molybdène (Mo) et le zinc (Zn). Mais en excès, ces métaux deviennent toxiques.

Parmi les substances potentiellement toxiques contenues dans les boues d'épuration généralement utilisé pour l'épandage agricole, font l'objet d'une surveillance particulière, il s'agit : du cadmium (Cd), chrome (Cr), du cuivre (Cu), du mercure (Hg), du nickel (Ni), du plomb (Pb) et du zinc (Zn).

A l'inverse des pathogènes et des micro-polluants organiques, les ETM n'offre pas de possibilité de disparition. Toute quantité d'ETM apportée à la surface d'un sol ne peut que s'y accumuler, et/ou suivant la mobilité de l'élément être transférée vers d'autres compartiments de l'environnement : atmosphère, horizons profonds, eaux souterraines ou superficielles, plantes. A terme, il pourrait exister un risque de contamination du milieu qu'il est important d'étudier et de minimiser [22].

VI.1) Localisation des éléments traces métallique dans les sols :

Dans les sols, les ETM se répartissent entre la phase solide et la phase liquide qui constituent ces sols. Le plus souvent, la quantité existant dans la solution du sol ne représente qu'un infime pourcentage de la totalité du polluant. Les métaux se concentrent donc dans la fraction solide du sol, où ils se répartissent dans les différentes fractions organiques et minérales.

a) Les argiles:

On trouve une fraction importante des ETM du sol dans la phase argileuse : ils sont inclus dans les réseaux silicatés sous une forme très peu disponible, ou encore adsorbés à la périphérie des argiles.

b) Les carbonates de calcium :

En sol calcaire, les carbonates de calcium sont les constituants majeurs qui interviennent dans la fixation des éléments-traces, soit par adsorption, par précipitation d'hydroxydes ou de carbonates, ou encore par insertion dans le réseau de CaCO_3 .

c) Les oxydes :

Dans la majorité des sols, les oxydes de fer et de manganèse représentent la phase de rétention privilégiée de beaucoup de métaux.

d) La matière organique :

Elle participe efficacement à la rétention des ETM qui peuvent être retenus sous forme échangeable (donc assez facilement mobilisable) ou à l'état de complexes dans lesquels ils sont plus énergiquement fixés.

e) Des précipités :

Les micro-polluants métalliques peuvent précipiter dans les sols suivant les conditions qui y règnent, pour former des composés chimiques peu ou pas solubles, tels que des sulfures, des phosphates, des hydroxydes ou des sels organiques [22].

VI.2) Facteurs et conditions de Transfert :

La mobilité des métaux dans les sols peut être modifiée par une variété de processus comprenant l'échange par l'adsorption – désorption, par la précipitation – dissolution chimique et par la complexion. Ces processus peuvent être influencés par la composition du sol, le pH et le potentiel redox. L'adsorption semble être le mécanisme le plus important pour les métaux.

Le type ou la composition du sol est un facteur très important dans toutes les réactions de fixation des métaux lourds. Les argiles sont les échangeurs normaux d'ions, de capacités d'échange cationique élevées et ont été utilisés pour fixer les métaux lors du passage de l'eau polluée. Les minéraux d'argile jouent un rôle primordial dans le phénomène d'adsorption. La texture du sol intervient pour influencer le transport des métaux lourds [22].

VI.2.1) Le pH du sol :

La variation de pH (naturelle ou anthropique) semble être le facteur dont l'action sur la mobilité des métaux est la plus déterminante. L'abaissement du pH favorise la mobilité des ETM, notamment par mise en solution de sels métalliques ou destruction de la phase de rétention. Inversement, l'augmentation du pH provoque l'immobilisation par formation de composés insolubles.

On notera cependant que certains ETM comme le bore obéissent moins strictement à ce type de comportement ou, au contraire, comme le molybdène, l'arsenic, le sélénium présentent un comportement opposé : leur mobilité augmente avec le pH qui est plus élevé en sols calcaires. Actuellement, il semble que le contrôle du pH soit l'une des rares voies de contrôle de la mobilité des ETM.

VI.2.2) Le potentiel d'oxydo-réduction :

Le degré d'aération du sol est déterminé par les pratiques culturales (irrigation, tassement par passage répété d'engin, apport de matière organique biodégradable donc consommatrice d'oxygène) et par les événements climatiques (précipitations massives

entraînant des conditions hydromorphes). L'ensemble de ces facteurs favorisent l'anoxie modifiant ainsi la mobilité de certains ETM comme le manganèse et le fer dont les formes réduites sont plus mobiles dans le sol que les formes oxydées.

Outre l'influence directe du potentiel rédox du milieu sur l'état d'oxydation des ETM et donc leur mobilité, ce facteur intervient également sur les composants du sol qui fixent les métaux. Ainsi en conditions d'aération satisfaisantes du sol, les composés ferriques et manganiques sont très peu solubles et immobilisent donc les métaux qui leur sont associés.

A l'inverse, en conditions d'aération limitantes résultant par exemple du compactage ou de la battance du sol, les composés du fer et du manganèse sont réduits et solubilisés ; ils libèrent donc les éléments-traces qui leur étaient associés. Les travaux de Förstner (1985) résument le degré de mobilité relative des ETM en fonction du pH et du potentiel rédox.

Tableau III.5: Effets du pH et du potentiel redox sur la mobilité des ETM du sol.

Mobilité relative	pH		Potentiel rédox	
	Neutre-alcalin	Acide	Oxydant	Réducteur
Très haute	Se, Mo	B	B	-
Haute	As	Zn, Cd, Hg, Co, Ni, (Mn)	Mo, Se	
Moyenne	Mn	Cu, Al, Pb, Cr	Cu, Co, Hg, Ni, Zn, Cd	Mn
Basse	Pb, Fe, Zn, Cd, TI	Fe(III), TI	Pb, TI	Fe, Zn, Co, Ni, TI
Très basse	Al, Cr, Hg, Cu, Ni, Co	Mo, Se, As	Al, Cr, Fe, Mn	Al, Cr, Hg, Cu, Se, B, Mo, Cd, Pb

Source : Förstner (1985).

VI.2.3) La température et l'humidité du sol :

Elles jouent un rôle indirect en favorisant l'activité biologique du sol, et donc la production de substances acides ou complexantes issues de la biodégradation de matières organiques. L'élévation de température agit directement sur la dissolution de composés fixant un ETM, facilitant ainsi son absorption par la flore. L'humidité agit directement dans les processus de précipitation et de solubilisation.

VI.2.4) L'apport de matière organique :

L'apport de matière organique permet d'immobiliser les ETM du sol qui ont pour elle une grande affinité, mais la minéralisation ultérieure peut les remettre en solution, il ne s'agit donc que d'une immobilisation temporaire.

VII. Les fonctions épuratrices du sol :

La qualité de l'eau qui migre vers les aquifères dépend de l'aptitude du sol et du sous-sol qu'elle traverse à éliminer les matières polluantes qu'elle contient. Les mécanismes qui permettent de transformer une eau de surface plus ou moins chargée en matières dissoutes ou en suspension, minérales ou organiques, en une eau potable constituent les propriétés épuratrices du sol [15].

VII.1) Les capacités épuratrices du sol sont limitées par ses propres caractéristiques de fonctionnement :

1. les propriétés physiques du sol régulent ses capacités de transfert d'eau et constituent une limite aux quantités de liquides susceptibles d'être épandus.
2. les propriétés du complexe adsorbant sont déterminantes (importance de la CEC et par voie de conséquence de la nature minéralogique des argiles et de la nature de la MO impliquée).
3. les caractéristiques biologiques du sol déterminent les capacités de biotransformation et donc d'élimination des MO apportées.
4. rôle des conditions physiques ambiantes tient compte :
 - De la rapidité des processus physico-chimiques engagés (cinétique des réactions)
 - De la qualité bactériologique résultante du substrat

VII.2) Les fonctions épuratrices du sol :

1) Filtration et colmatage :

- Rôles de la porosité, de la texture, de la nature minéralogique des argiles
- Développement de la masse microbienne
- Déstructuration des constituants du sol

2) Le sol réacteur chimique :

- Rôle de la CEC exprimé (importance de la rétention d'eau des cations, cas du sodium)
- Rôle du pH (les pH acides solubilisent les éléments minéraux, alors que les pH alcalins favorisent leur précipitation)
- Rôle des phénomènes d'oxydo-réduction : Problème de l'aération du sol. Solubilisation du fer et du manganèse.
- Ségrégation des éléments lors de l'apport d'eaux résiduaire : chlorures et nitrates solubles migrent alors que phosphates et potassium sont retenus par le complexe adsorbant (ou précipités).
- Migration sélective des micropolluants. cas des triazines (micropolluants liés inextricablement).
- Phénomènes d'accumulation : le cuivre et le zinc.

3) Le sol bio transformateur :

L'objectif de la biotransformation sera de permettre la rétention des éléments soient sous forme de cellules microbiennes soit adsorbées sur le complexe. Les processus sont les suivants :

- oxydation complète d'une partie des composés minéraux
- formation de composés cellulaires microbiens
- libération de métabolites incomplètement oxydés
- formation de produits humiques de synthèse
- résidus composés de matières humiques héritées.
- La capacité de la biomasse microbienne à dégrader les produits organiques
- nécessite l'apport de produits organiques biodégradables,
- nécessite une activité respiratoire (microflore zymogène).

Elle dépend :

- de la cinétique des réactions et du développement microbien, fonction de la température
- de la diversification de la flore
- de la régulation de la biomasse microbienne épuratrice elle-même fonction :
 - de la biodégradabilité des molécules
 - de la ressource du milieu en nutriments N et P
 - de la teneur en oxygène du milieu
 - de la température

4) Le recyclage par la végétation : phytoremédiation

5) Le sol épurateur des agents pathogènes

Conclusion :

La maîtrise de cette ressource en eau nécessite qu'elle soit mieux connue afin de voir les interactions entre la couverture pédologique et l'eau de façon plus générale et comment interfère le système sol-plante avec le cycle de l'eau.

Il est important de connaître quelles sont les conséquences d'une irrigation avec des eaux usées épurées sur le fonctionnement hydrique des sols et des propriétés physico-chimiques, par ailleurs étudier les risques de salinisation et/ou alcalinisation, le transfert de produits polluants afin de préserver nos ressources en eau et en sol.

Chapitre IV

Expérimentation

I. Objectif :

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact des eaux usées épurées sur les propriétés physico-chimiques et physico-hydrauliques d'un sol, d'où la nécessité d'étudier la qualité de l'eau entrante et drainée. Un dispositif expérimental a été réalisé pour cette étude.

Les principales propriétés du sol étudiées sont:

a) Propriétés physico-hydrauliques :

- Porosité
- Densité apparente
- Densité réelle
- Conductivité hydraulique
- Les humidités volumiques et les courbes pF

b) Propriétés physico-chimiques :

- pH
- conductivité électrique

Pour la qualité de l'eau, l'étude s'est portée sur les mesures des principaux paramètres de qualité qui sont :

- pH
- Conductivité électrique
- Les MES (les matières en suspension)

II. Protocole expérimental :

II.1) Présentation du dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental est composé de 27 colonnes en PVC avec des hauteurs de 20 cm, 40 cm, 60 cm et un diamètre de 20 cm.

Ces colonnes sont munies au fond d'un grillage métallique reposant sur des ferrons qui traversent la colonne à 3 cm de sa base inférieure.

Ensuite nous avons muni les colonnes de 40 cm et 60 cm de deux trous à une distance de 3 cm du bord qui peuvent servir de poignée ou de trop plein pour les mesures.

Un tuyau d'arrosage a été mis en place et des bassines en plastique pour recueillir l'eau drainée.

Le dispositif se trouve à l'ENSH. Il a été conçu spécialement pour l'expérimentation.



Fig IV.1 : Bassines recueillant les eaux drainées et un tuyau d'arrosage.



Fig IV.2 : Préparation des colonnes.

II.2) Préparation du dispositif :

II.2.1) Procuration du sol :

Le sol a été ramené d'une parcelle agricole située à Ben Salah (Ouled Alleug) où on cultive de l'arboriculture (agrumes, pommiers). Il a été extrait de l'horizon de surface. Sachant que jusqu'à 1 mètre le sol présente la même texture, avec en dessous une couche de calcaire.



Fig IV.3 : Remplissage des sacs en plastique par de la terre.

II.2.2) Remplissage des colonnes :

Au dessus du grillage métallique, on y a versé une couche d'1 cm d'épaisseur de graviers préalablement lavés.



Fig IV.4 : Rinçage du gravier.



Fig IV.5 : Remplissage par de la couche de gravier.

Les colonnes sont ensuite remplies de sol sur des hauteurs de 10 cm, 25 cm, 45 cm. Elles ont été disposées dans un bassin au laboratoire de Génie civile, ce bassin a été rempli chaque jour en fonction de la hauteur de la colonne afin de saturer le sol.



Fig IV.6 : Remplissage des colonnes par de la terre.



Fig IV.7: Saturation du sol dans le bassin.

Après saturation du sol, les colonnes ont été transportées vers le dispositif.



Fig IV.8 : Mise en place finale du dispositif.

II.2.3) Marquage des colonnes :

Nous avons trois types de colonnes :

Colonnes T : c'est les colonnes arrosées avec une eau témoin (l'eau du robinet de l'ENSH).

Colonnes B : c'est les colonnes arrosées avec de l'eau usée épurée de la STEP de Beni Messous.

Colonnes C : c'est les colonnes arrosées avec de l'eau usée épurée de la STEP de Tipasa.

Tableau IV.1: Disposition des colonnes

3 colonnes T de 20 cm	3 colonnes B de 20 cm	3 colonnes C de 20 cm
3 colonnes T de 40 cm	3 colonnes B de 40 cm	3 colonnes C de 40 cm
3 colonnes T de 60 cm	3 colonnes B de 60 cm	3 colonnes C de 60 cm



Fig IV.9 : Disposition des colonnes.

II.2.4) Les eaux usées épurées pour l'arrosage :

II.2.4.1) Provenance des eaux usées épurées :

Pour cette étude nous avons décidé de prendre deux types d'eaux usées épurées afin de pouvoir comparer leur impact sur le sol.

Les eaux usées épurées apportées proviennent de la station d'épuration de Beni Messous et de la STEP de Tipaza. Les deux stations d'épuration font l'objet d'une future réutilisation de ces eaux. Ces projets sont en cours d'étude.

Les eaux usées épurées de la STEP de Beni Messous seront réutilisées pour l'arrosage d'un Parc et celles de la STEP de Tipaza pour l'irrigation de la plaine de Hadjout.

1. Station d'épuration de Beni Messous :

■ Localisation de la STEP :

La station d'épuration de Beni Messous se situe à l'ouest d'Alger dans la commune de Ain Benian. Elle est destinée à épurer les eaux résiduaires avant rejet dans l'Oued Beni Messous. Cette station prend en charge les rejets qui proviennent de Ain Benian, Beni Messous, Staouali, Chéraga. Elle est fonctionnelle depuis juillet 2008



Fig IV.10 : Image avec vue aérienne de la STEP de Beni Messous (Google Earth).

La capacité nominale de la station d'épuration de Beni Messous est de 250 000 équivalents habitants, elle a été conçue pour traiter un débit de $50\,400\text{ m}^3/\text{j}$ par le processus de boues activées à moyenne charge.

Il est important de signaler que la station d'épuration de Beni Messous traite des eaux usées urbaines constituées d'un mélange d'eaux usées domestiques et les eaux usées de l'hôpital de Beni Messous ainsi que les rejets de quelques petites industries des communes de Chéraga et Ain Benian.

2. Station d'épuration de TIPAZA :

■ Localisation de la STEP :

La STEP est située à la sortie de la ville de Tipaza sur la route allant vers Chenoua. Elle est destinée à épurer les eaux résiduaires avant rejet dans l'oued Nador. Cette station prend en charge les rejets de TIPAZA, NADOR, SIDI MOUSSA et SIDI AMAR. Elle est fonctionnelle depuis janvier 2008.



Fig IV.11 : Image avec vue aérienne de la STEP de Tipasa (Google Earth).

La capacité nominale de la station d'épuration de Tipasa est de 70 000 équivalents habitants, elle a été conçue pour traiter un débit de $10\,500\text{ m}^3/\text{j}$ par le processus de boues activées à faible charge. Elle traite principalement les eaux usées urbaines domestiques.

II.2.4.2) Analyse physico-chimique des eaux usées épurées :

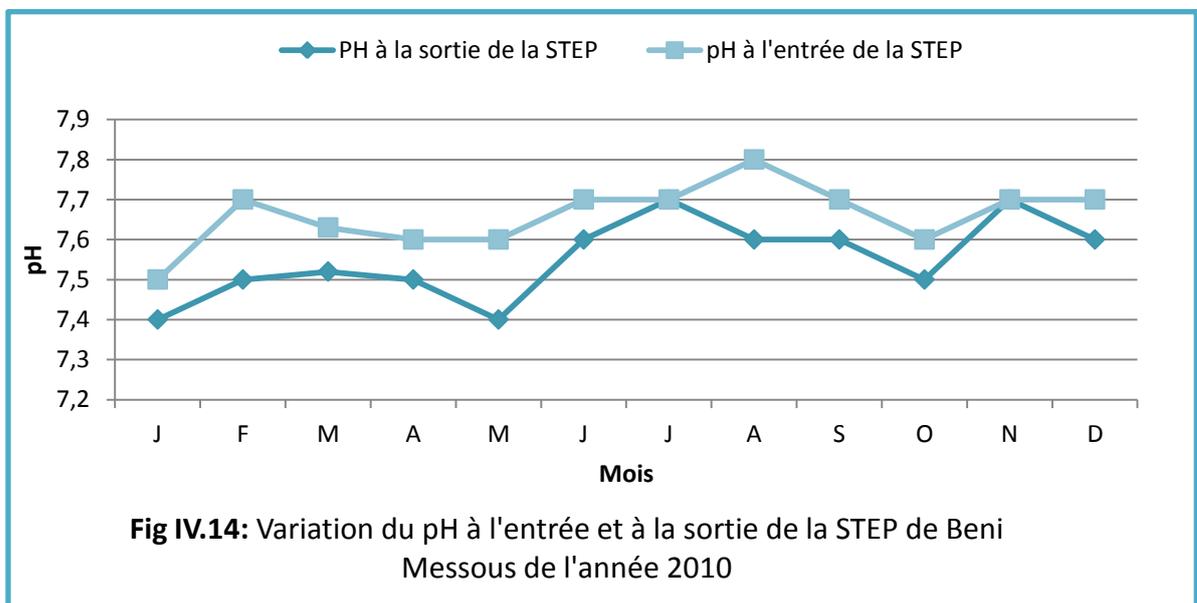
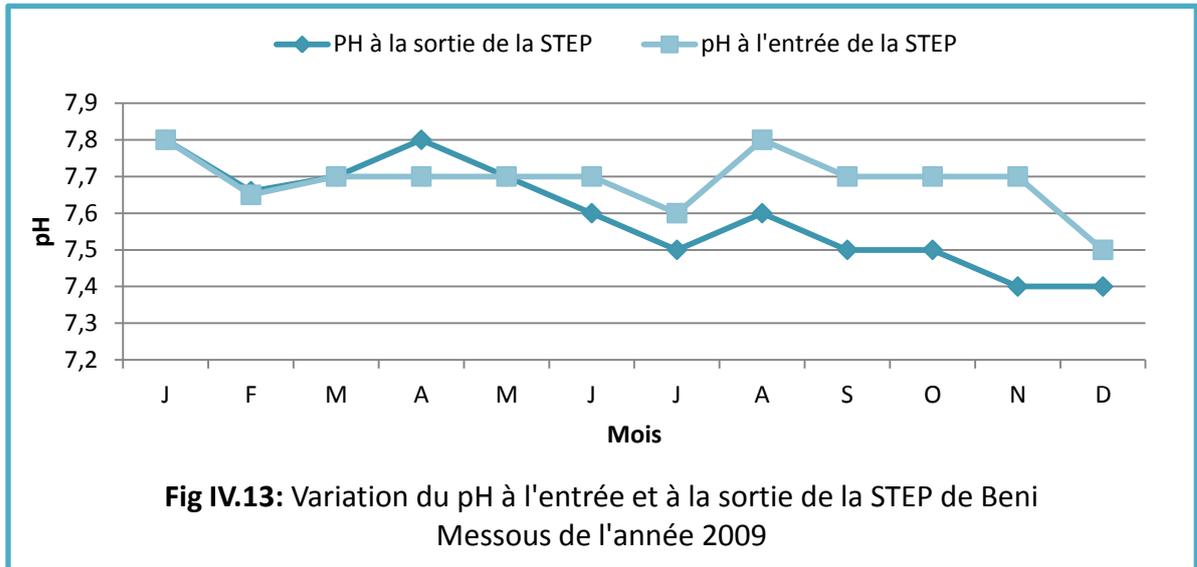
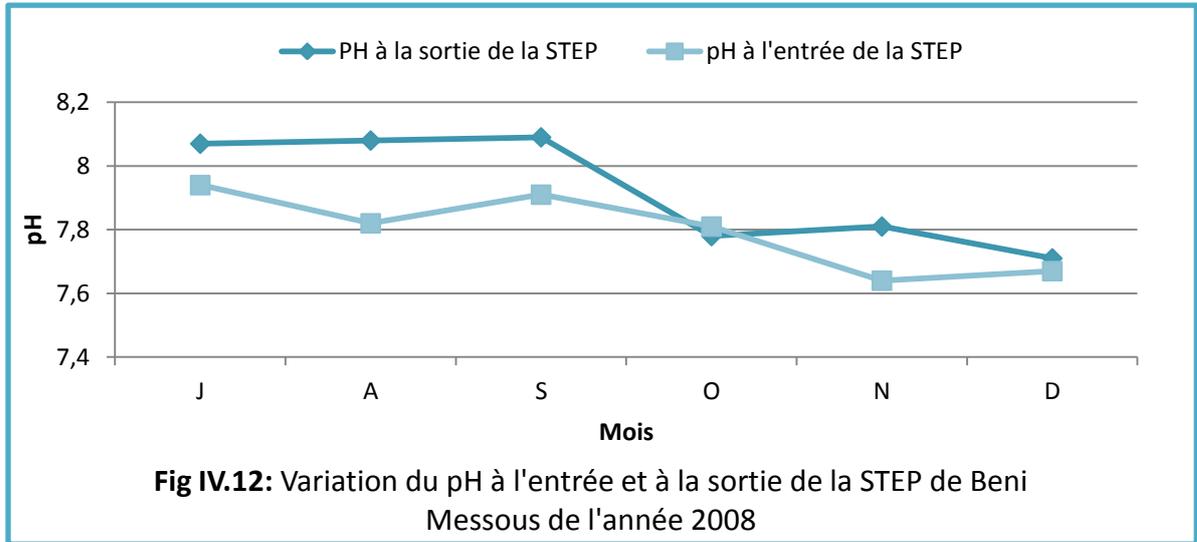
Afin de vérifier la qualité des eaux produites par la STEP et son fonctionnement dans le temps, les données ont été apportées du laboratoire des deux stations, elles sont données sous forme de graphe dans le but d'examiner leurs variations à l'entrée et à la sortie de la STEP au cours des trois années d'exploitation. Les paramètres sont :

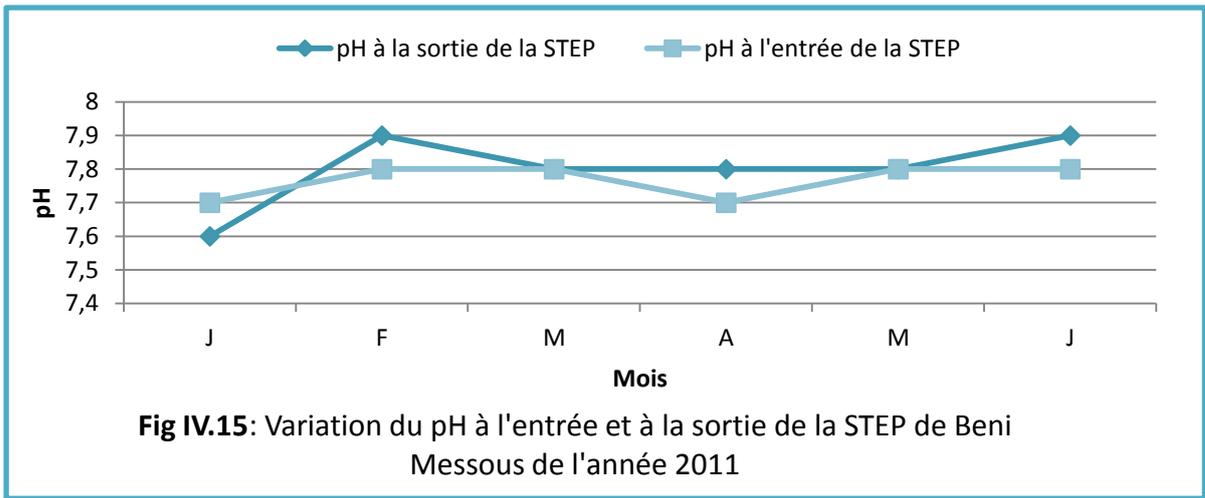
- pH
- La conductivité électrique
- Les matières en suspension (MES)

(Pour les normes de rejets voir annexe 4)

1) Courbes des paramètres physico-chimiques de la STEP de Beni Messous :

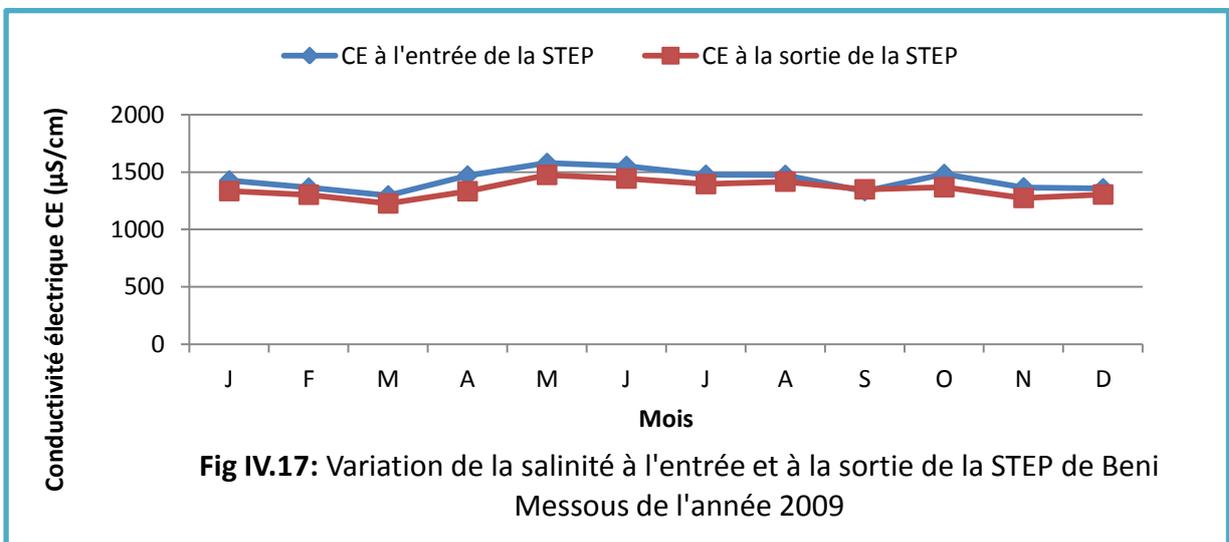
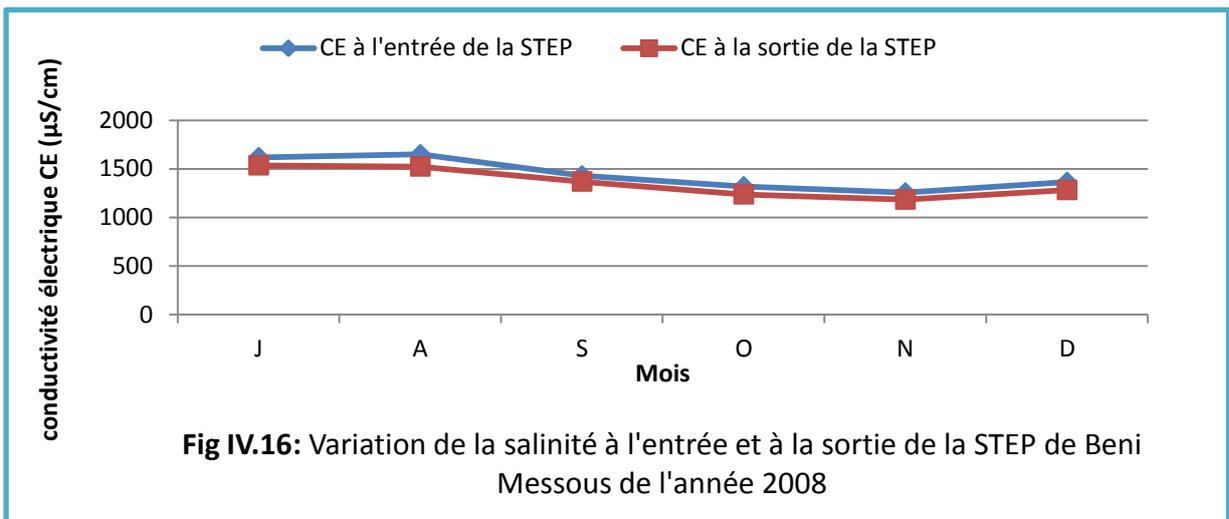
■ Courbes des pH :

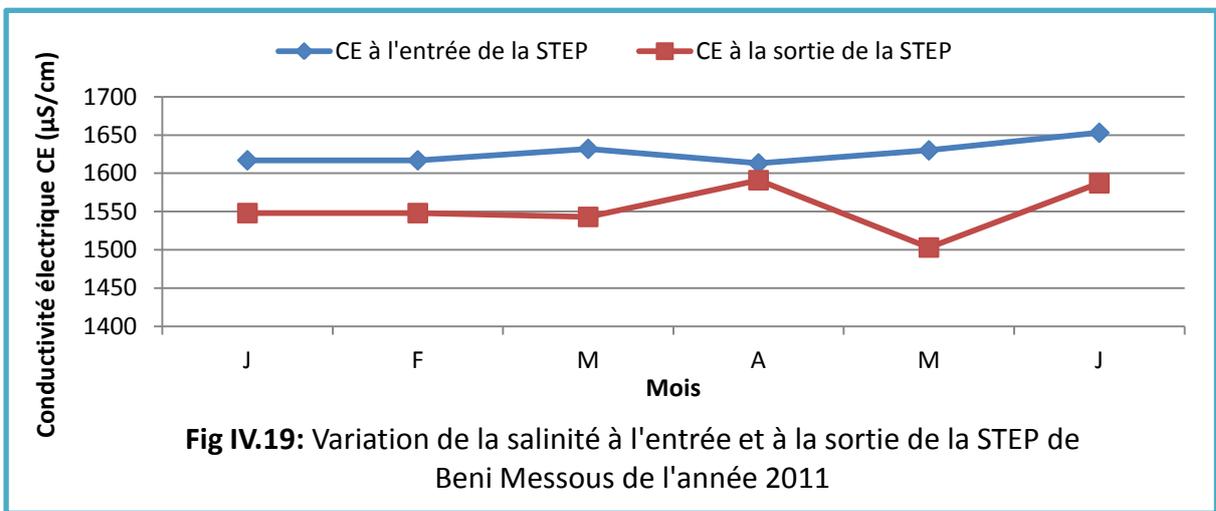
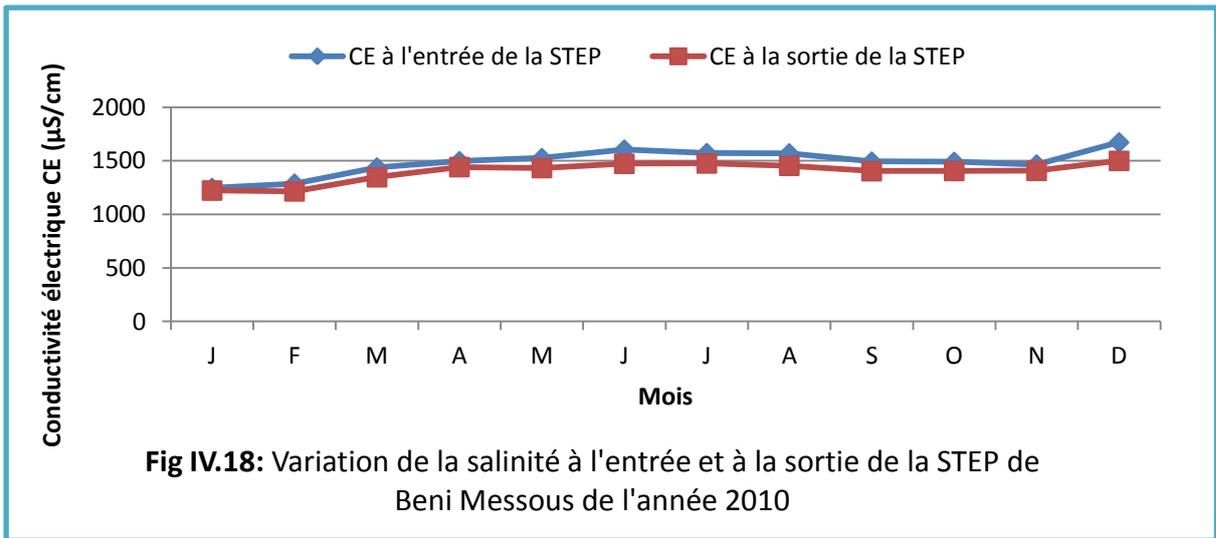




On constate que les pH à la sortie de la STEP de l'année 2008 et 2011 sont légèrement supérieurs aux pH à l'entrée, et pour les années 2009 et 2010 les pH à la sortie sont inférieurs aux pH à l'entrée. Ces variations ne sont pas préoccupantes car les pH sont dans les normes.

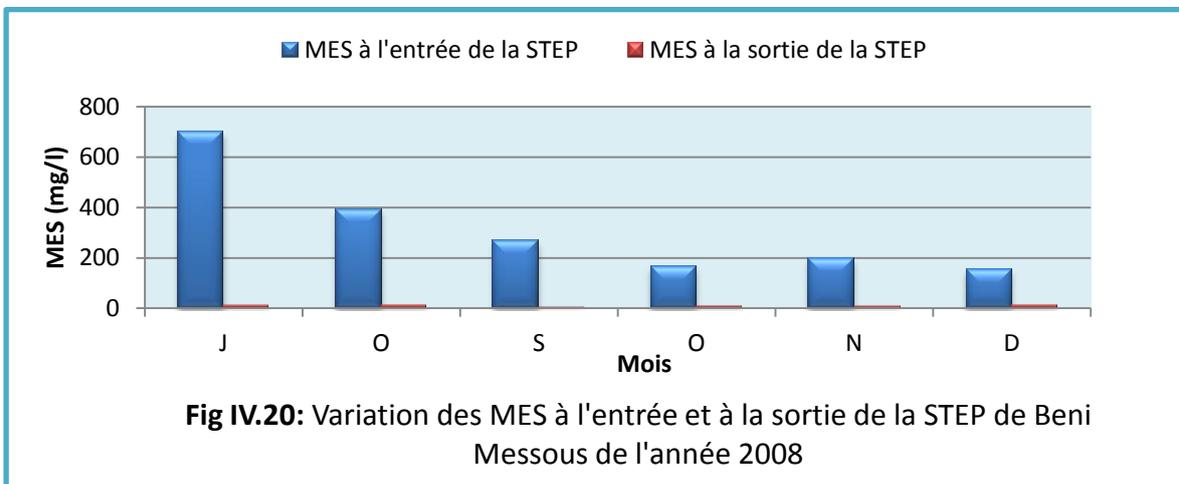
■ **Courbes des conductivités électriques :**

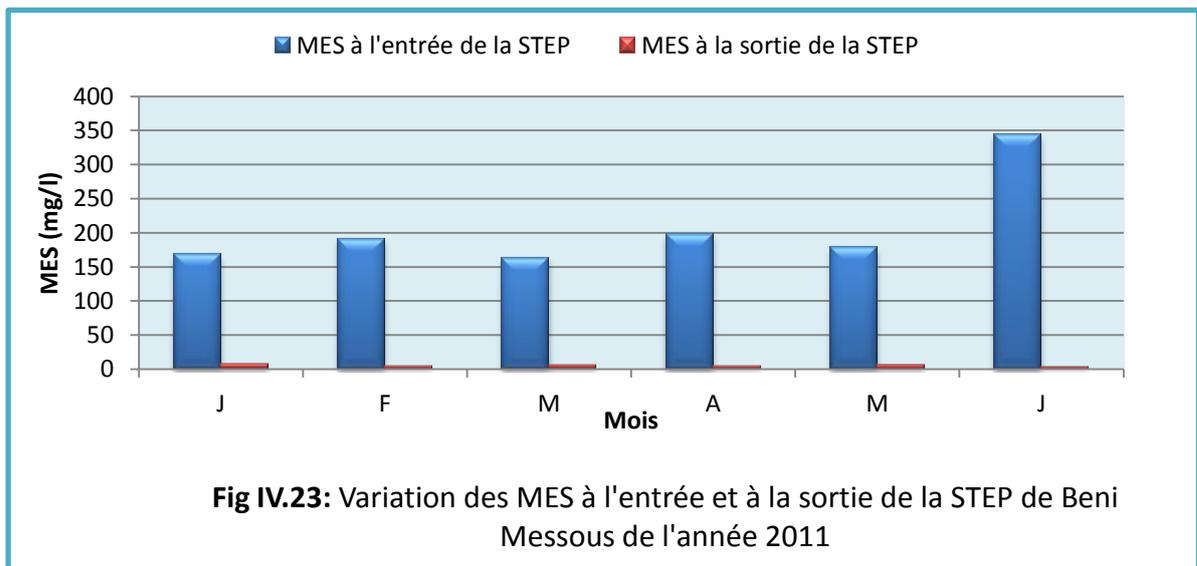
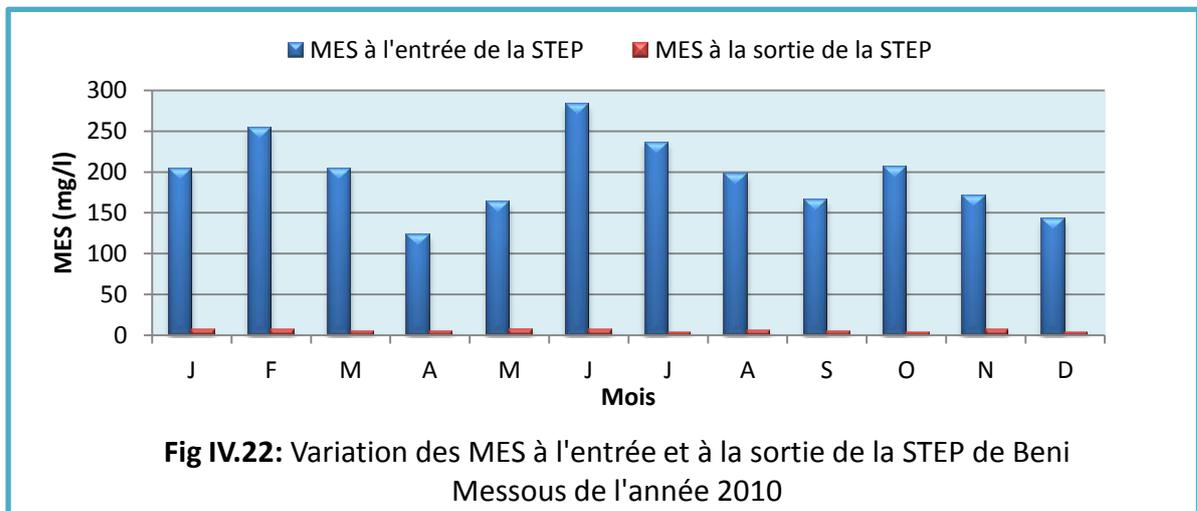
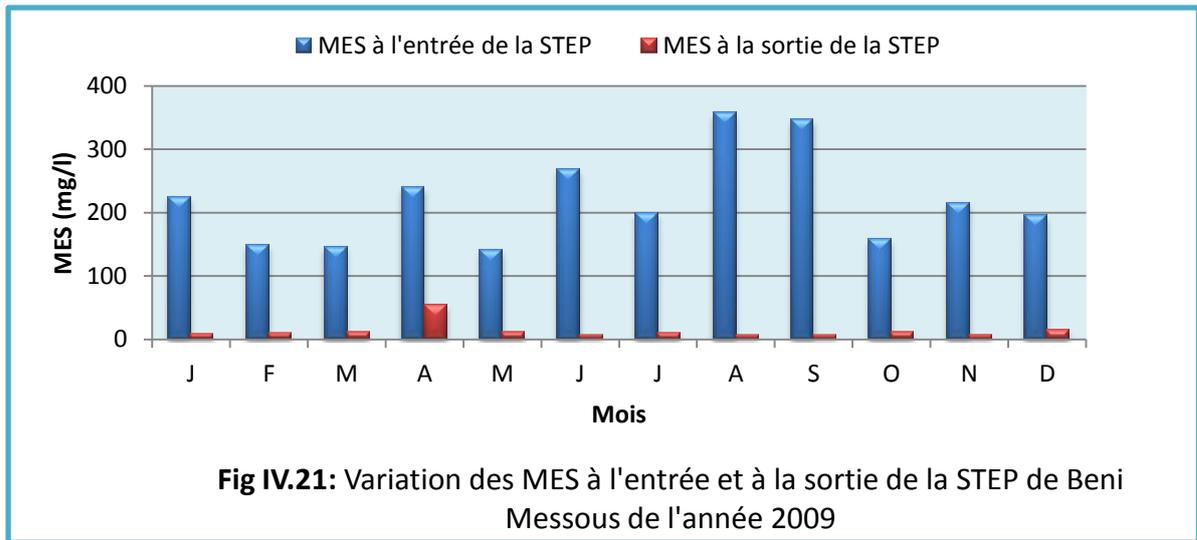




On constate que les valeurs de la conductivité électrique à la sortie de la STEP de l'année 2011 sont élevées, cela est peut être dû au changement de la qualité de l'effluent (rejets industriels, selon les saisons). Pour les autres années la conductivité électrique varie entre 1200 µS/cm et dépasse parfois les 1500 µS/cm.

■ Les histogrammes des MES :

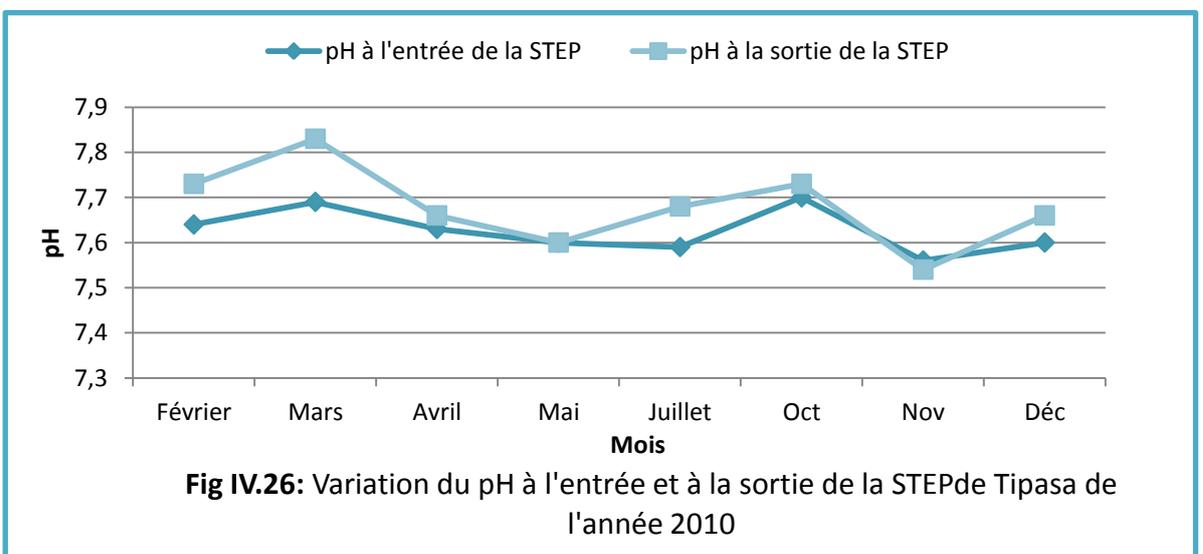
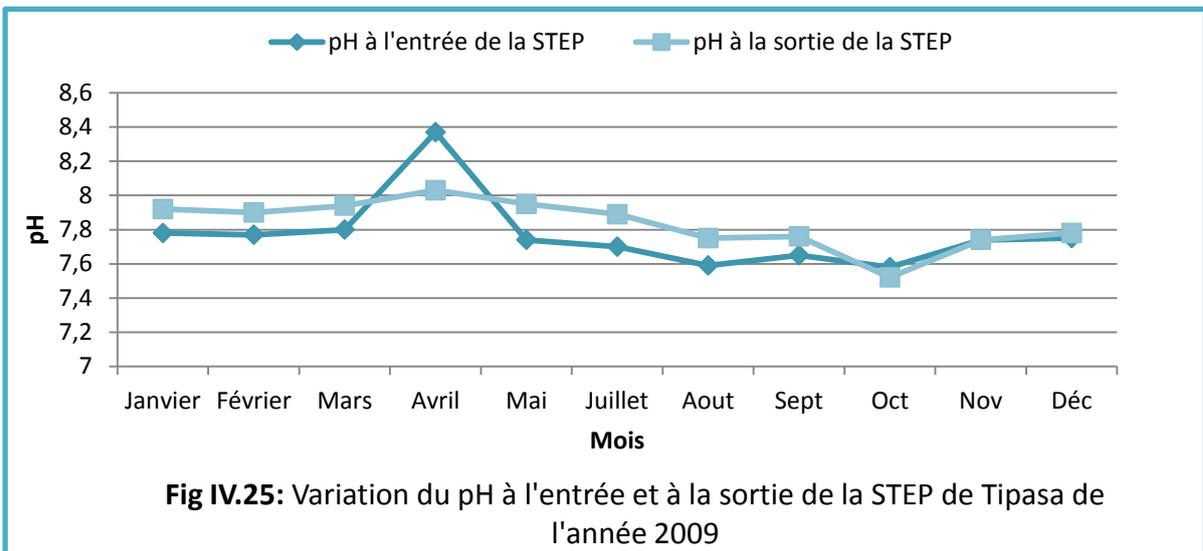
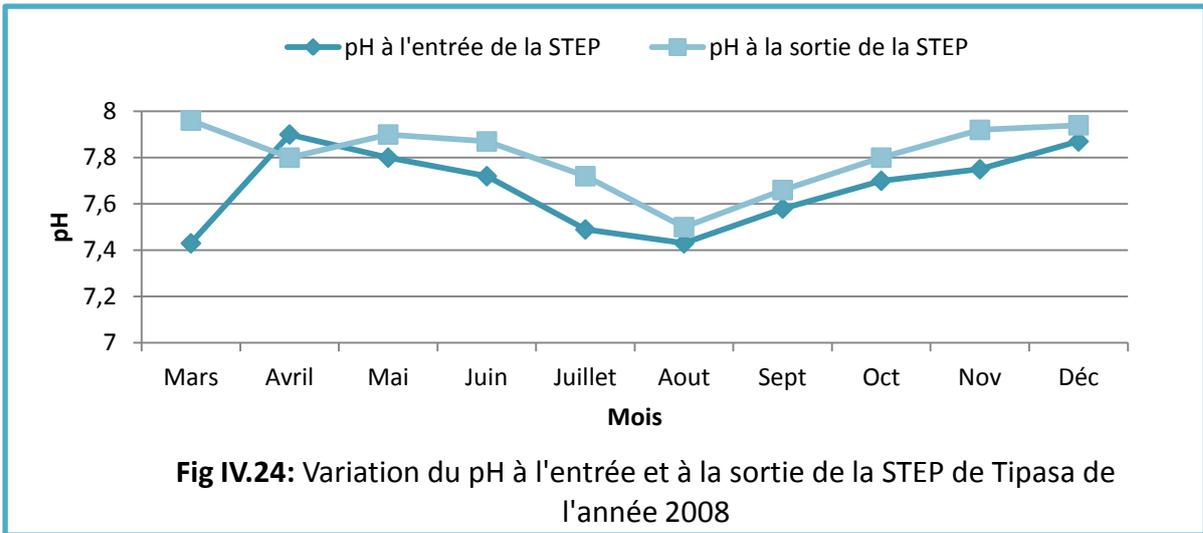




On constate que les MES à la sortie de la STEP sont dans les normes sauf pour le mois d'avril de l'année 2009 où les MES ont dépassé la norme de 25 mg/l.

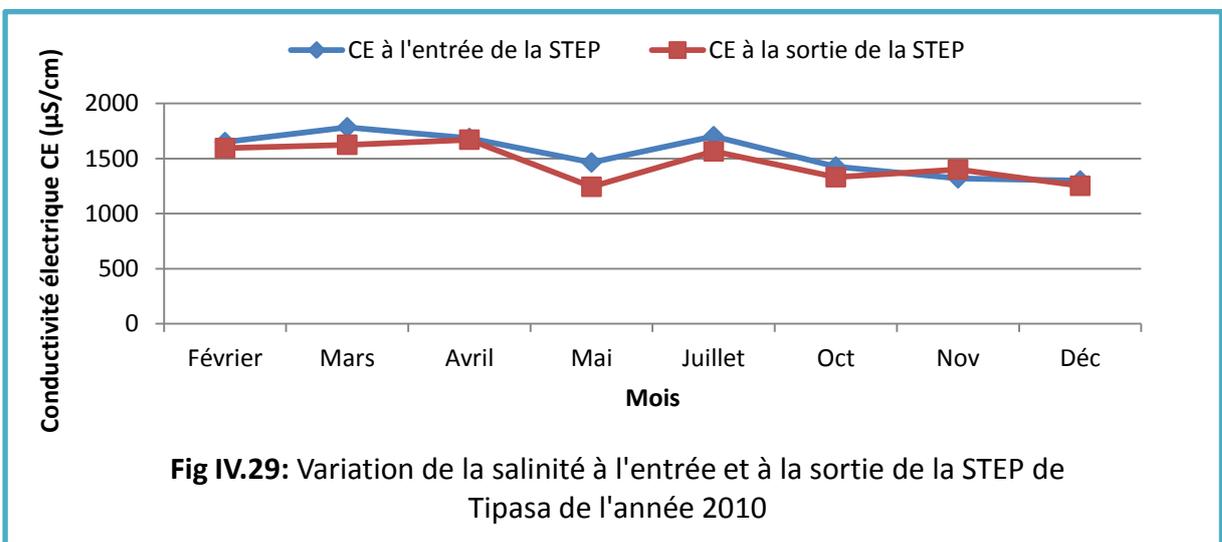
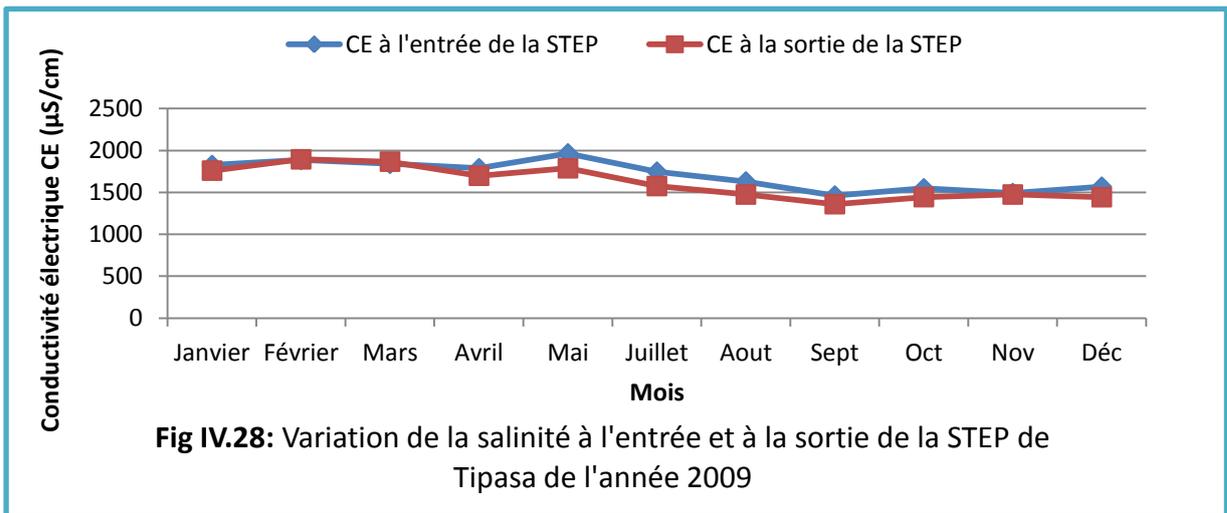
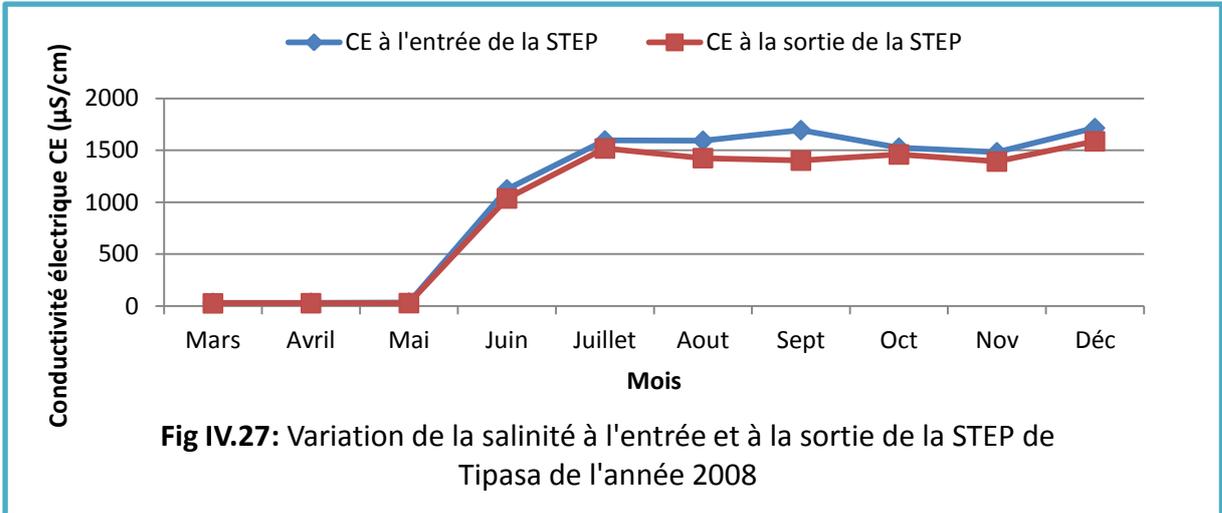
2) Courbes des paramètres physico-chimiques de la STEP de Tipasa :

■ Courbes pH :



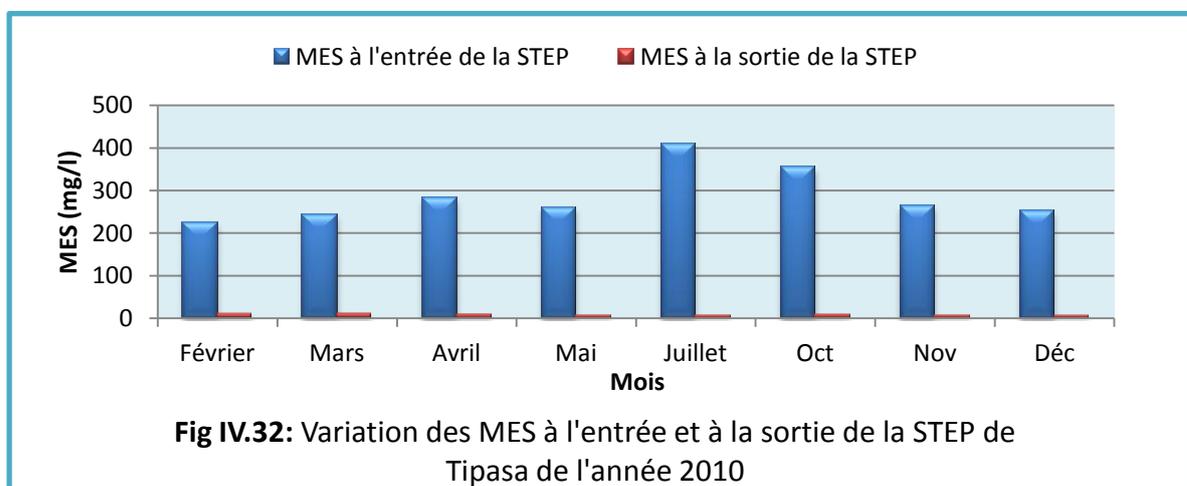
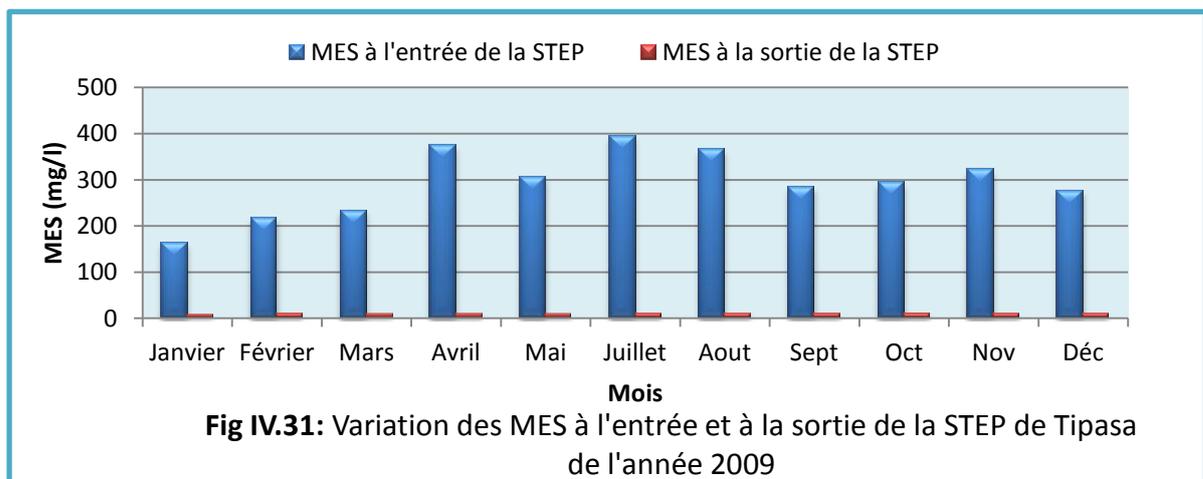
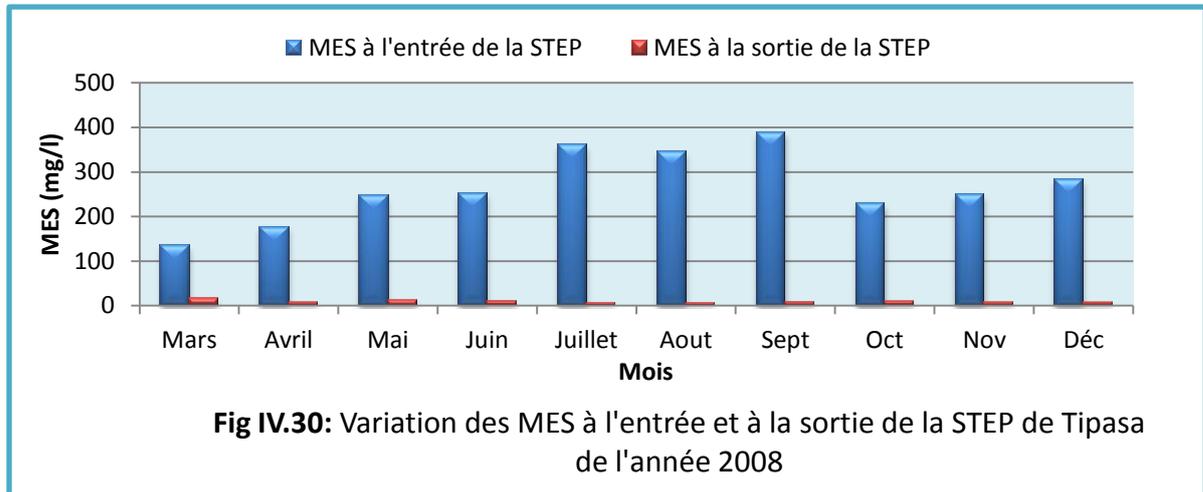
D'après les courbes, on constate que les pH à l'entrée de la STEP sont légèrement inférieurs aux pH à la sortie pour les trois années. Par conséquent ces valeurs sont dans les normes.

■ **Courbes des conductivités électriques :**



On constate que les valeurs de la conductivité électrique des trois premiers mois de l'année 2008 sont insignifiantes, cela est peut être dû à un mauvais étalonnage du conductivimètre. De plus on constate que la conductivité électrique à la sortie de la STEP dépasse souvent 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

■ Courbes des MES (matières en suspension) :



On constate que les valeurs des MES à la sortie de la STEP ne dépassent pas les normes.

III. Mesures des principales caractéristiques du sol apporté :

III.1) Les caractéristiques physiques :

1) La texture : Elle est déterminée par analyse granulométrique, les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Granulométrie du sol

Argile+limon	Argile	Limon fin	Limon grossier	Sable fin	Sable grossier	la texture
83%	42,7%	40,3%	3,61%	5,13%	8,26%	Limono-Argileuse

2) La structure : Le sol se présente sous une structure fragmentaire, car il est riche en matière organique, c'est ce qui favorise la qualité de la structure.

3) La conductivité électrique de l'extrait dilué du sol : (pour une dilution 1/2), déterminée par un conductivimètre (Fig IV.37) : $CE_{1/2} = 644 \mu S/cm$

4) La densité réelle : Mesurée au laboratoire par la méthode du volume déplacé, elle est égale à : $d_r = 2,5$

5) La densité apparente: Mesurée par la méthode du cylindre, les échantillons ont été prélevés in situ.

Tableau IV.2: Résultats de la densité apparente prélevée in situ

d_{a1}	d_{a2}	d_{a3}	d_a (moyenne)
1,33	1,45	1,23	1,34

6) La porosité totale : sachant que $P_t = 1 - d_a/d_r$ d'où : $P_t = 46,4\%$

7) Mesure de la teneur en humidité : Afin d'établir les courbes pF, on doit mesurer tout d'abord les humidités pondérales et les transformer en humidité volumique. Pour cela la marmite de Richards, mesure la teneur en humidité d'un sol placé sur une plaque poreuse et soumise à différentes pression.



Fig IV. 33 : Marmite de Richards.

8) Mesure de la conductivité hydraulique à saturation :

Nous avons mesuré la conductivité hydraulique à saturation au laboratoire par la méthode de Henin. Le principe de cette méthode repose essentiellement sur l'expérience de Darcy où l'on a : $Q = K \cdot S \cdot I$ avec : $I = \frac{H+H'}{H}$ et $K =$ coefficient de perméabilité exprimé en m/s

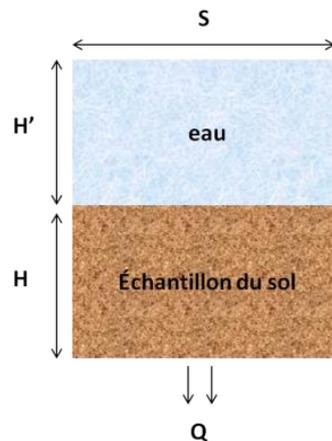


Fig IV.34 : Mesure de la conductivité hydraulique par la méthode Henin.

III.2) Les caractéristiques chimiques :

1) **L'acidité du sol** : On emploie un pH mètre à électrode de verre, qu'on étalonne (Fig IV.36). On obtient :

- $pH_{\text{eau}} = 7,93$
- $pH_{\text{KCl}} = 7,19$

Le pH-eau mesure l'acidité de la solution du sol. Le pH-KCl mesure l'acidité en réserve sur le complexe argilo-humique (les ions H^+ du complexe sont remplacés par des ions potassium K^+). Le pH-KCl est donc toujours inférieur au pH eau.

2) **Dosage du calcaire** : Le dosage du calcaire total a été mesuré au laboratoire d'agropédologie à l'aide du calcimètre de Bernard (Fig IV.35). Résultat: $\% CaCO_3 = 17,3 \%$, Cela signifie que nous avons un sol calcaire.



Fig IV.35 : Mesure du calcaire total à l'aide du calcimètre de Bernard.

IV. Mesure des principaux paramètres physico-chimiques des eaux apportées et témoin :

Les paramètres physico-chimiques qu'on a pu déterminer au laboratoire d'agro pédologie sont : le pH, la conductivité électrique (CE).

Les matières en suspension (MES) ont été analysées au laboratoire de chimie des eaux de l'Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer de Dely Brahim.

Les éléments minéraux majeurs (Ca, Mg, Na, K, Cl, ... etc) ont été analysés au laboratoire des eaux de l'ANRH de Blida.

Tableau IV.3: Résultats des paramètres physico-chimique des eaux apportées

Origine de l'eau	PH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	MES (mg/l)
Eau du robinet Témoin	8,35	465	0
Eau épurée Beni Messous	8,10	1488	29
Eau épurée Chenoua	7,74	1674	22

■ Les appareils de mesures :



Fig IV.36 : Mesure du pH de l'eau.



Fig IV.37: Mesure de la conductivité électrique.



Fig IV.38 : Mesure des MES par filtration.

Conclusion :

Après avoir déterminé la qualité des eaux usées traitées et témoin, nous avons effectué après chaque arrosage, un suivi régulier du pH et de la conductivité électrique des eaux drainées. Ce qui n'a pas été le cas pour les éléments minéraux majeurs vu le nombre important d'échantillons qu'il aurait fallu analyser à l'ANRH. Pour cela nous avons décidé de suivre ces éléments au début et à la fin de l'expérimentation. Les résultats de la qualité de l'eau seront discutés dans le chapitre V (résultats et interprétation).

Le sol utilisé est de texture limono-argileuse, riche en calcaire et en matière organique, cette qualité qui lui est conférée nous permet d'apprécier l'évolution dans le temps de ces propriétés physico-chimiques et physico-hydriques.

La teneur en humidité a été mesurée sur les échantillons de sol témoin et sur les échantillons de sol des colonnes B car l'eau usée épurée de la STEP de Beni Messous est la plus chargée en MES.

La méthode de Henin pour la conductivité hydraulique à saturation a été choisie car elle a donné des résultats plus concrets par rapport aux autres méthodes (double anneaux, méthode de Porchet...etc.).

Chapitre V

Résultats et Interprétation

Introduction :

Dans ce chapitre nous avons étudié les résultats obtenus lors de nos mesures. Rappelons que l'impact de l'irrigation est étudié sur un seul type de sol dont les principales caractéristiques sont présentés dans le chapitre IV.

Cette étude nous permettra de voir les conséquences directement liés à la qualité des eaux usées épurées, et d'apprécier l'effet de la durée de l'irrigation sur la qualité du sol.

I. Qualité des eaux usées épurées et de l'eau témoin :

Le tableau V.1 regroupe les résultats concernant les paramètres physico-chimiques et les analyses des éléments chimiques effectuées aux laboratoires de l'ANRH et d'agro-pédologie de l'ENSH.

Tableau V.1: Qualité physico-chimique des eaux usées épurées et de l'eau témoin

Paramètres	Eau de la STEP de Beni Messous	Eau de la STEP de Tipasa	Eau Témoin
pH	8,10	7,74	8,35
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1488	1674	465
MES (mg/l)	29	22	-
Ca ²⁺ (mg/l)	62	58	62
Mg ²⁺ (mg/l)	71	73	18
Na ⁺ (mg/l)	230	235	13
K ⁺ (mg/l)	17	19	1
Cl ⁻ (mg/l)	197	190	20
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	191	189	42
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	226	390	177
CO ₃ ²⁻ (mg/l)	0	0	0
NO ₃ ⁻ (mg/l)	85	14	3

I.1) Classification des EUE et eau témoin selon le diagramme de Riverside :

Tableau V.2 : Principaux paramètres pour la classification des eaux

N°		Na ⁺ (meq/l)	Ca ²⁺ (meq/l)	Mg ²⁺ (meq/l)	SAR	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
1	Eau T	0,56	3,1	1,5	0,37	465
2	Eau B	10	3,1	5,9	4,71	1488
3	Eau C	10,2	2,9	6	4,84	1674

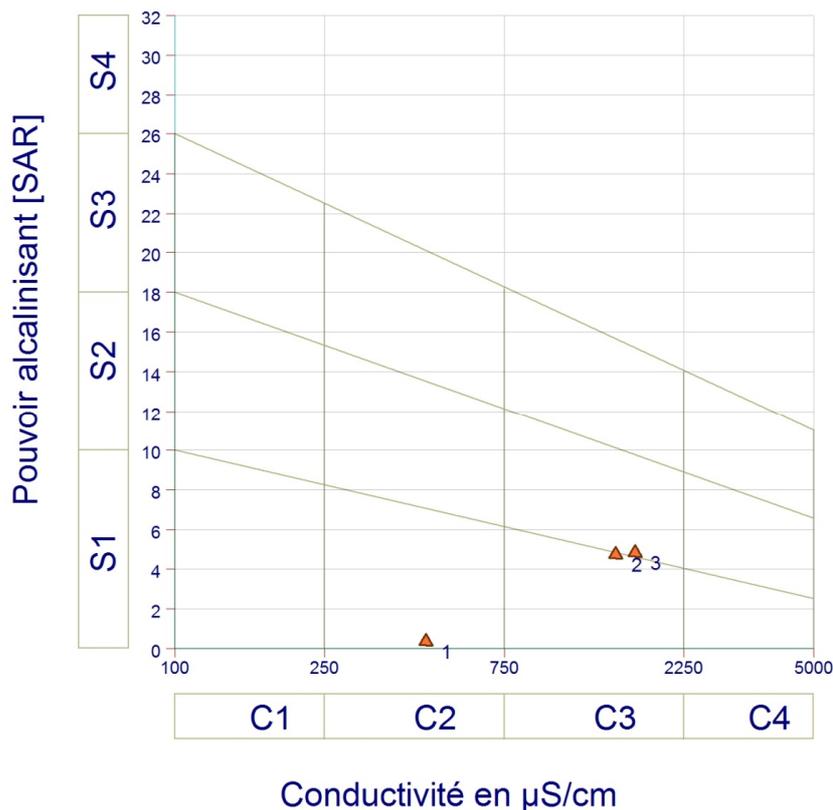


Fig V.1 : Classification des eaux selon le diagramme de Riverside.

La représentation graphique de ces trois échantillons montre que :

1. Eau T est classée en S1.C2, c'est une eau à salinité moyenne avec une faible quantité de sodium.
2. Eau B est classée en S2.C3, c'est une eau à forte salinité et contenant une quantité moyenne de sodium.
3. Eau C est classée en S2.C3, c'est une eau à forte salinité et contenant une quantité moyenne de sodium.

I.1.1) Carbonates et bicarbonates:

$$\text{Carbonate de Sodium Résiduel (RSC)} = (\text{CO}_3^- + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{+2})$$

Tableau V.3: Paramètres pour la détermination des risques liés aux carbonates et bicarbonates

N°		CO ₃ ⁻ (meq/l)	HCO ₃ ⁻ (meq/l)	Ca ²⁺ (meq/l)	Mg ⁺² (meq/l)	RSC (meq/l)
1	Eau T	0	2,9	3,1	1,5	1,7
2	Eau B	0	3,7	3,1	5,9	5,3
3	Eau C	0	6,39	2,9	6	2,51

1. Pour l'eau témoin on constate que le RSC varie entre [1,25-2,5] meq/l, c'est une eau qui peut être utilisé en irrigation
2. Pour l'eau de la STEP de Beni Messous on constate que le RSC > 2,5 meq/l, c'est une eau qui ne convient pas à l'irrigation.
3. Pour l'eau de la STEP de Tipasa on constate que le RSC > 2,50 meq/l, c'est une eau qui ne convient pas à l'irrigation.

I.1.2) Détermination du SAR_{ajusté}:

En présence de bicarbonates, le SAR devient insuffisant pour déterminer les risques d'alcalinisation, pour cela nous déterminons en plus le SAR_{ajusté} de formule :

$$SAR_{ajusté} = SAR * [1 + (8,4 - pH_C)]$$

Tableau V.4 : Résultats du SAR ajusté

N°		pH _C	SAR	SAR _{ajusté}	Remarque
1	Eau T	7,36	0,37	0,75	SAR _{ajusté} > SAR, l'eau a tendance à précipiter le CaCO ₃
2	Eau B	7,16	4,71	10,55	SAR _{ajusté} > SAR, l'eau a tendance à précipiter le CaCO ₃
3	Eau C	6,92	4,85	12,04	SAR _{ajusté} > SAR, l'eau a tendance à précipiter le CaCO ₃

I.2) Classification selon le diagramme de Piper:

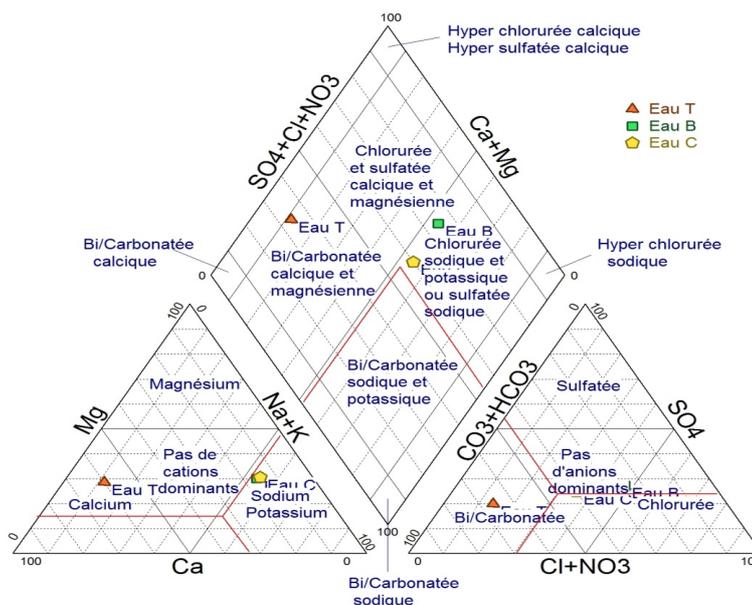


Fig V.2: Classification chimique des eaux selon le diagramme de Piper

D'après la figure V.2 , le point représentatif de l'eau témoin sur le diagramme losangique montre que le faciès chimique dominant est bicarbonaté calcique et magnésienne.

Les points représentatifs des EUE sur le diagramme losangique montre que le faciès chimique dominant est chlorurée sodique et potassique ou sulfaté sodique.

I.3) Classification selon le diagramme de Schoeller Berkaloff:

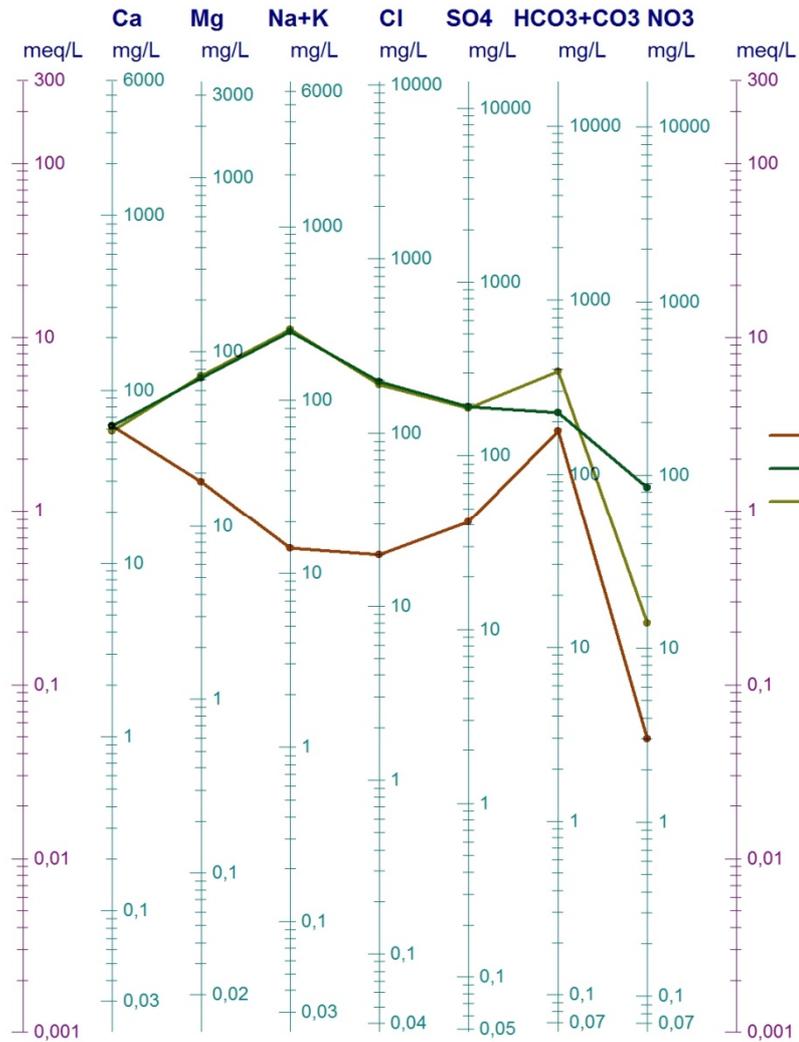


Fig V.3 : Classification chimique selon le diagramme de Schoeller Berkaloff.

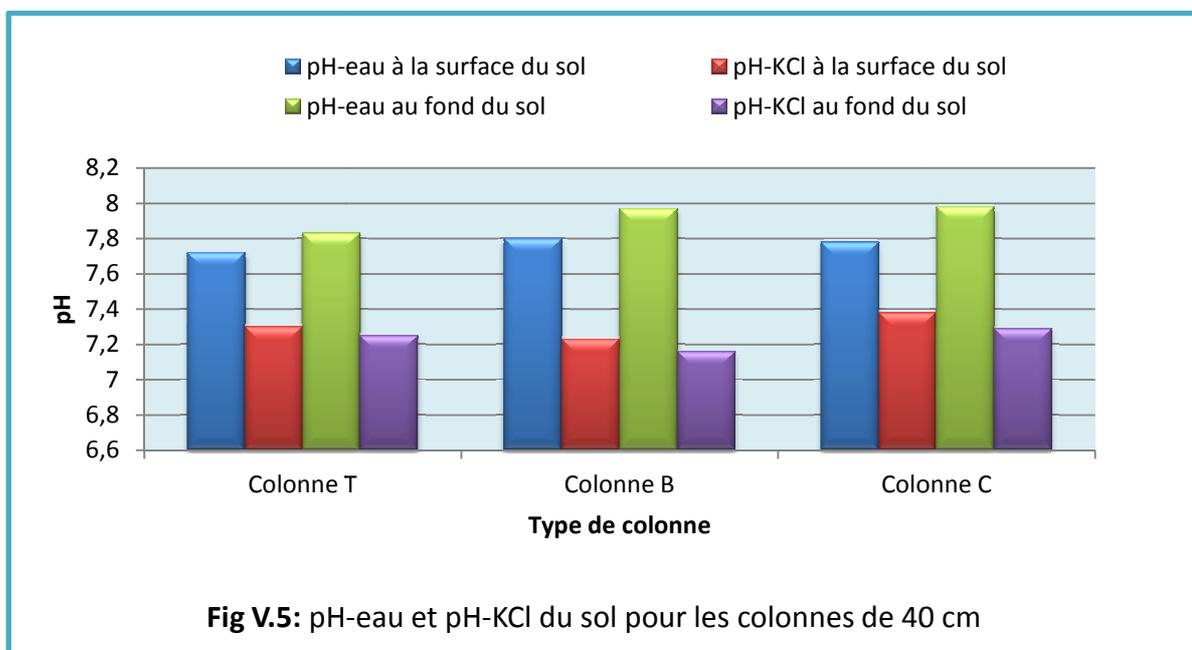
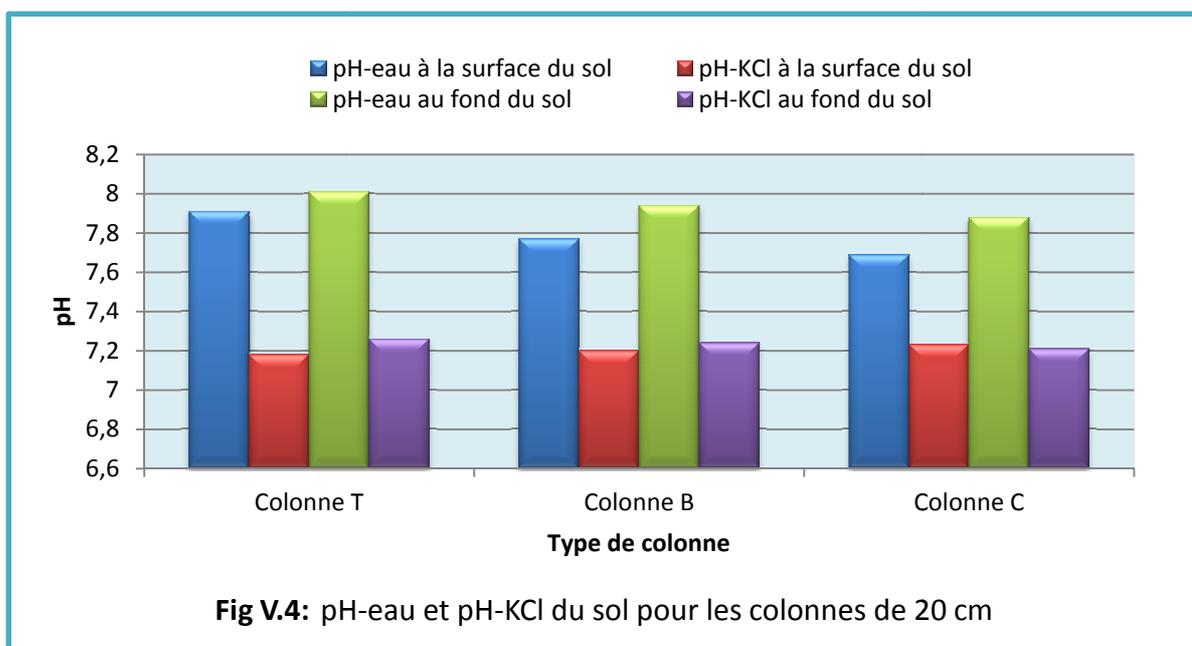
Cette représentation nous permet de mettre en évidence l'hétérogénéité de la qualité des EUE (eau B et Eau C) et de l'eau témoin (Eau T), on constate que les lignes brisées des eaux usées épurées suivent le même chemin jusqu'à ce qu'elles s'éloignent à cause d'une variation de la concentration en carbonate et bicarbonate et se croisent pour une concentration plus élevée en nitrate dans l'eau de la STEP de Beni Messous. Pour l'eau témoin la ligne brisée a le même point de départ mais elle diverge des deux autres lignes et à tendance à se rapprocher pour une concentration plus élevée en bicarbonate.

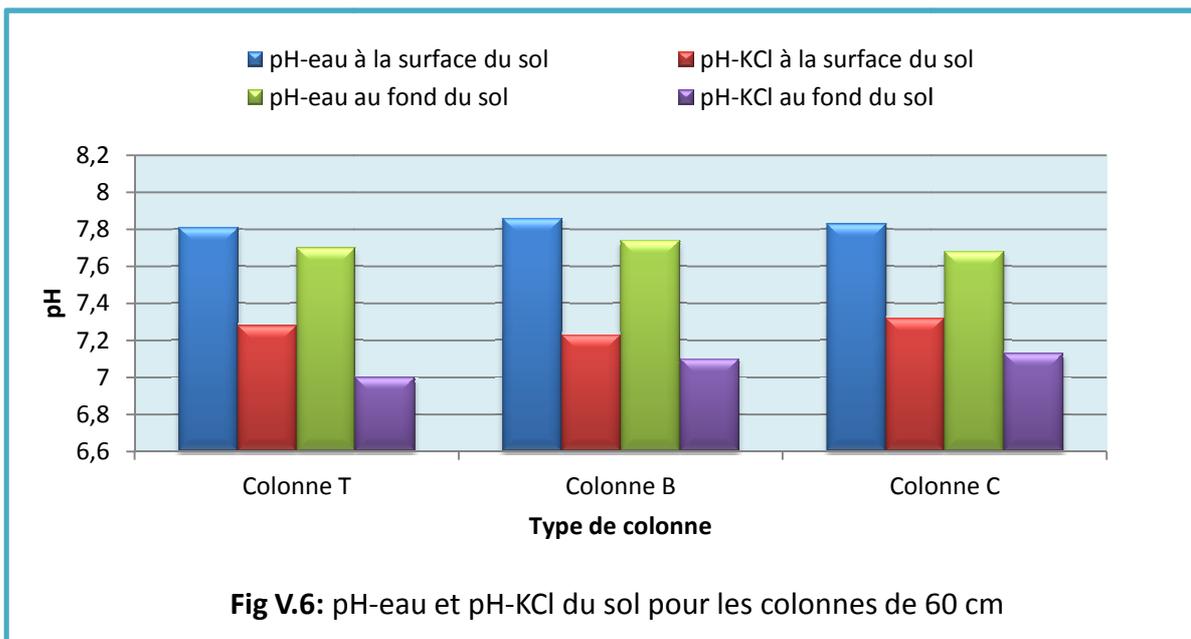
II. Caractérisation physico-chimique du sol

Les résultats des analyses physico-chimiques du sol pour les colonnes T, B et C sont représentés graphiquement, les valeurs sont données en annexe 3.

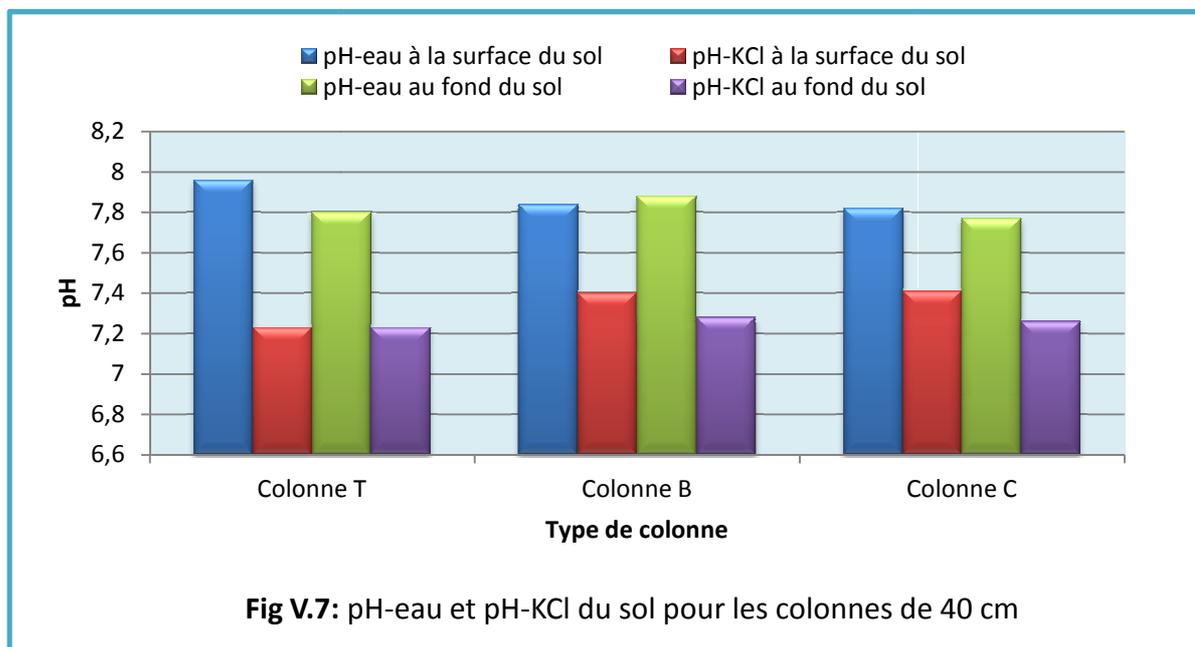
II.1) pH du sol

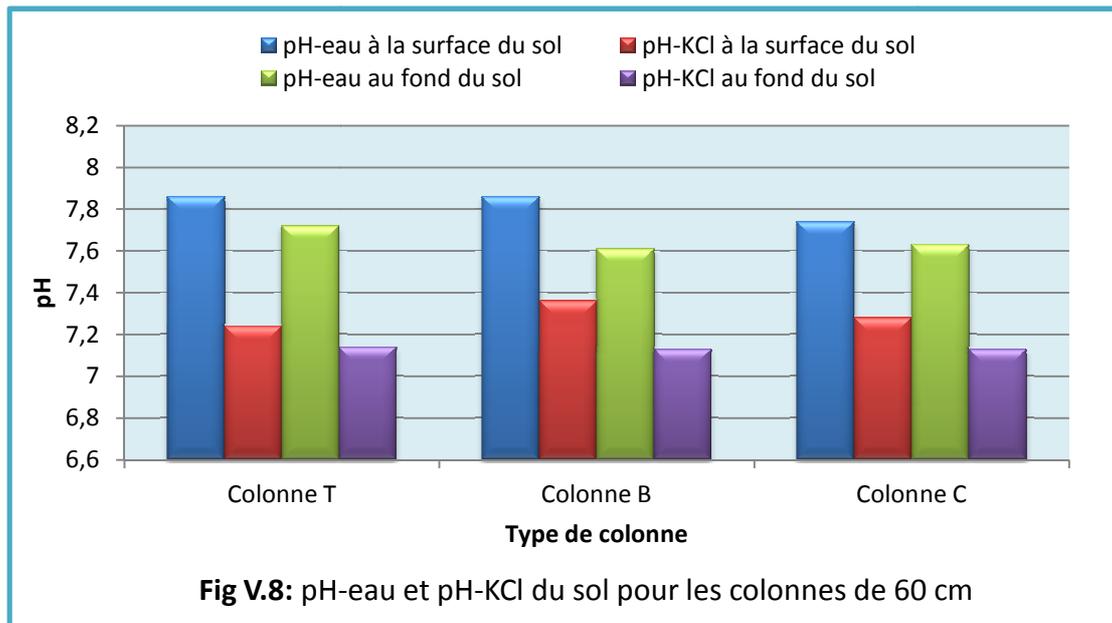
■ Résultats de mesure du pH-eau et pH-KCl prélevés après 4 irrigations :





■ Résultats de mesure du pH-eau et pH-KCl après 5 irrigations



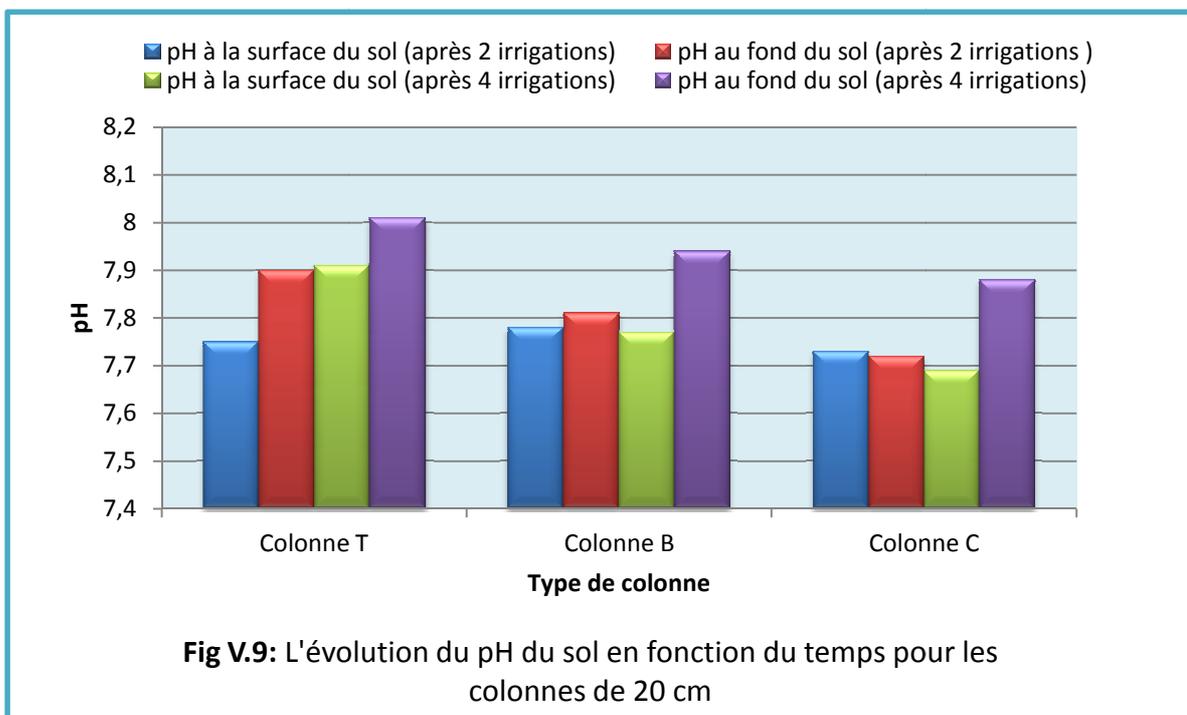


D'après les résultats, on constate que les différences entre le pH-eau et pH-KCl dépassent en moyenne 0,5 avec un pic de 0,81 au fond du sol pour la colonne B de 60 cm.

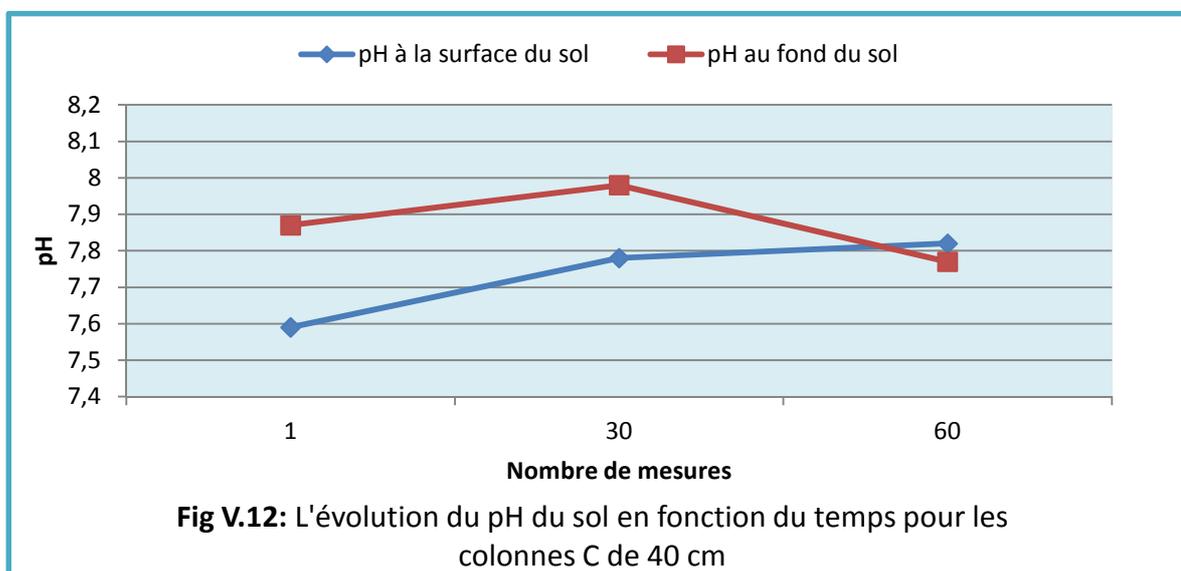
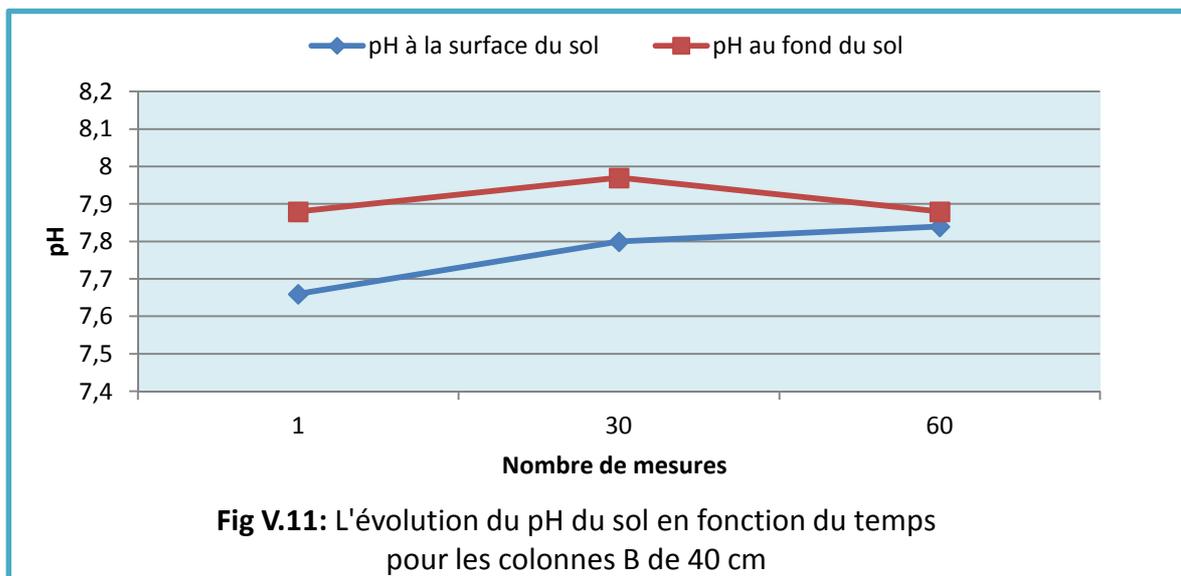
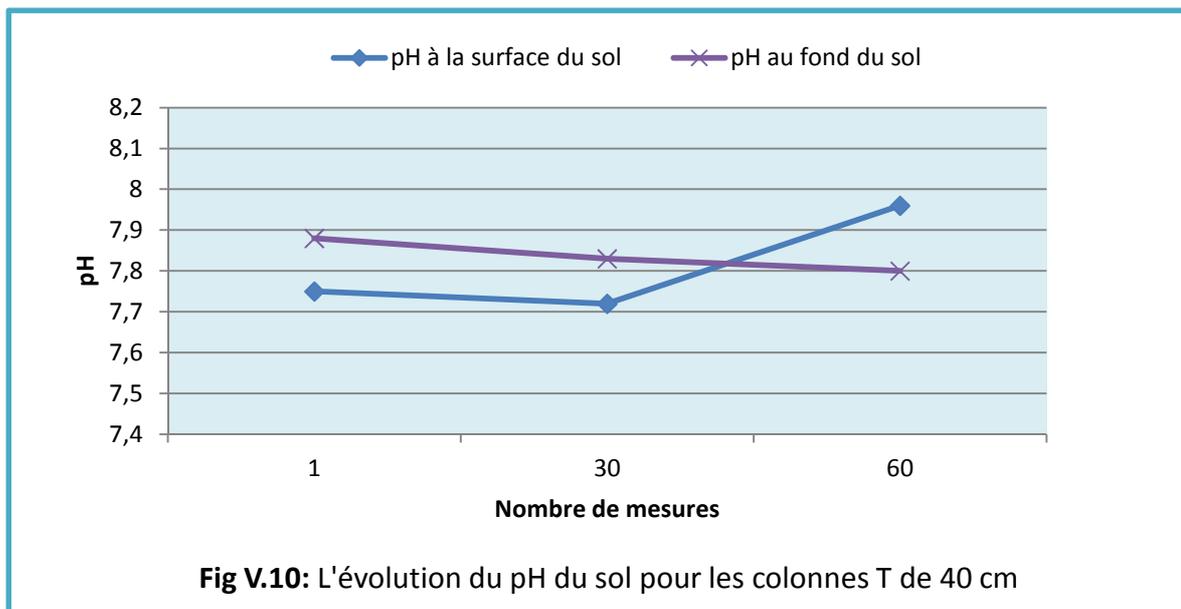
■ **Courbes de l'évolution du pH du sol:**

1. Colonnes de 20 cm

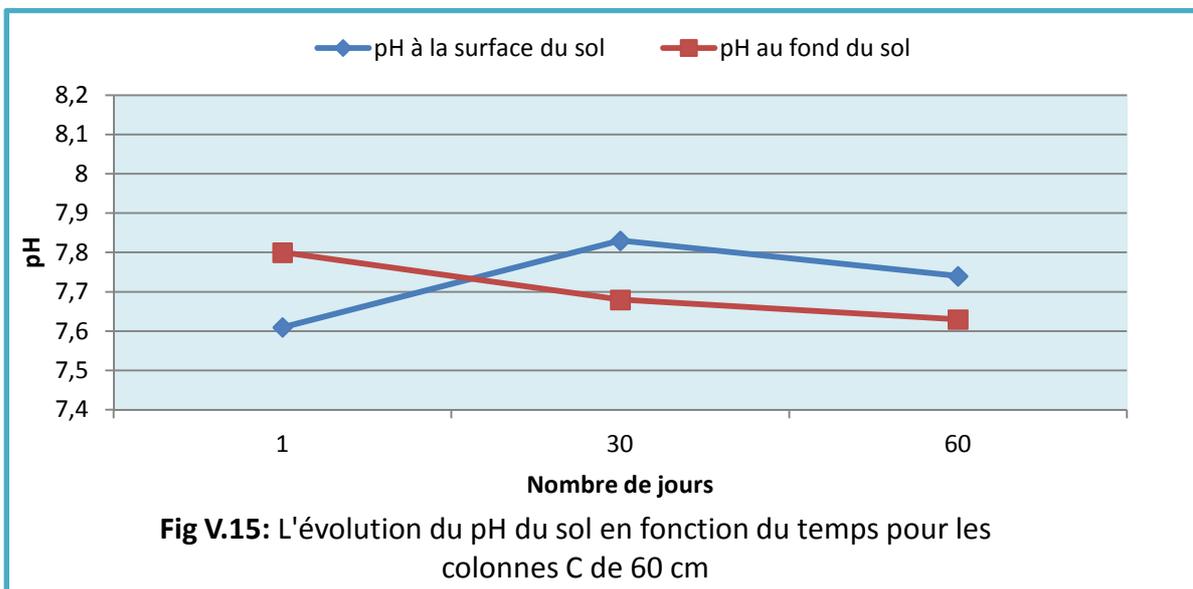
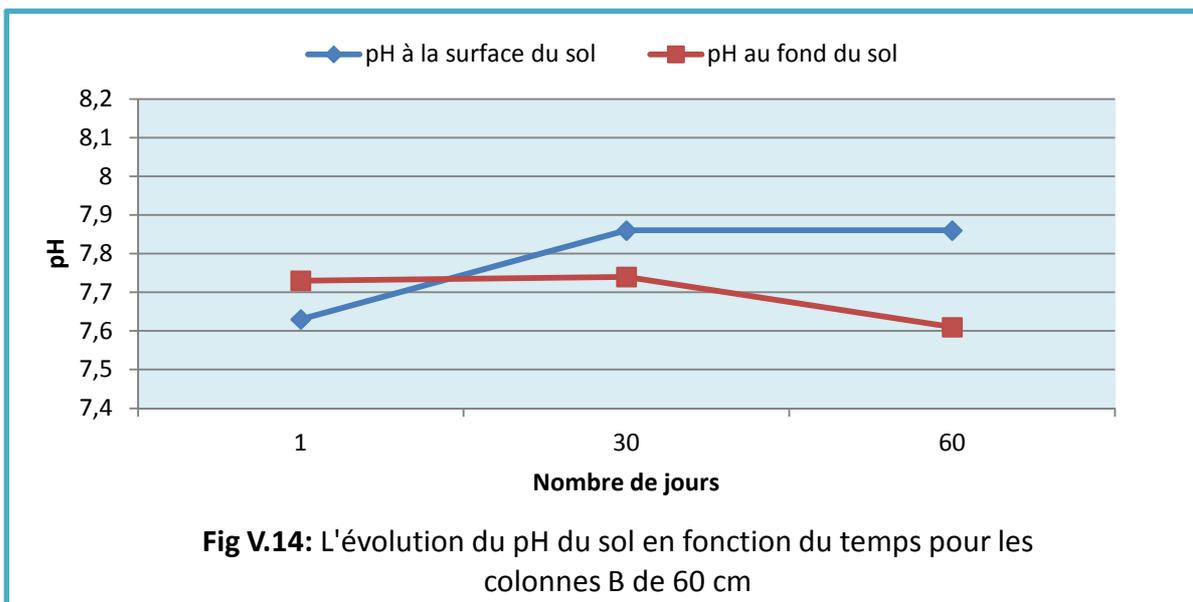
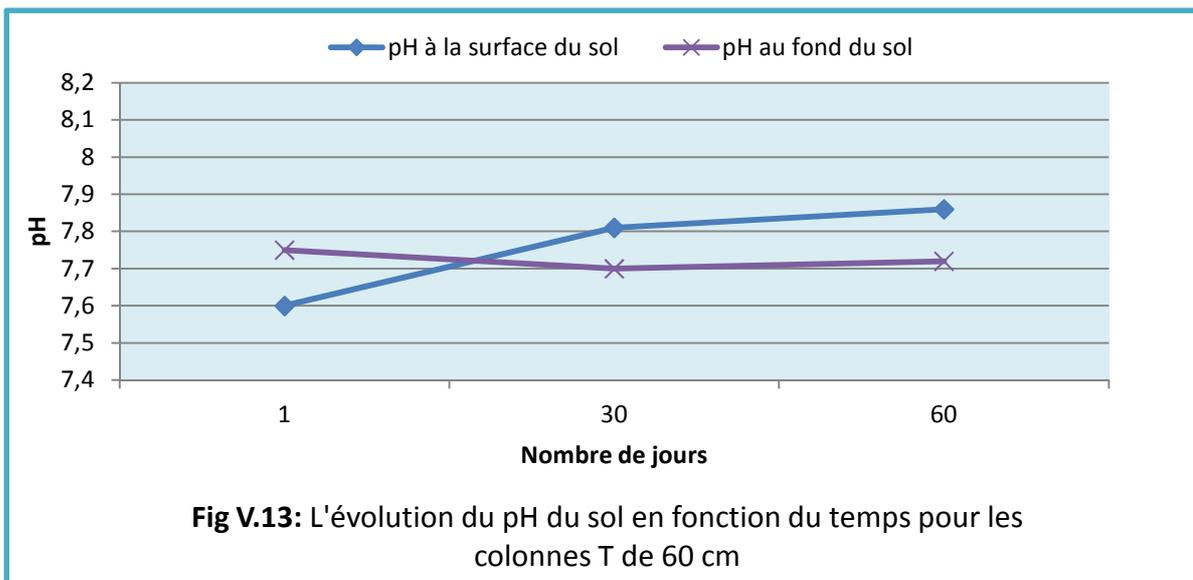
Pour ces colonnes, nous avons utilisé les histogrammes car il n'y a eu que deux mesures.



2. les colonnes de 40 cm



3. les colonnes de 60 cm



D'après les graphes, pour les colonnes de 20 cm, on observe une augmentation du pH dans la colonne T à la surface et au fond du sol. Cependant, le pH à la surface du sol dans la colonne B reste en moyenne constant et à tendance à augmenter au fond du sol. Dans la colonne C le pH a tendance à diminuer légèrement à la surface du sol et à augmenter au fond du sol (Fig V.9). De plus, on remarque que le pH dans la colonne T est plus basique que les pH des colonnes B et C.

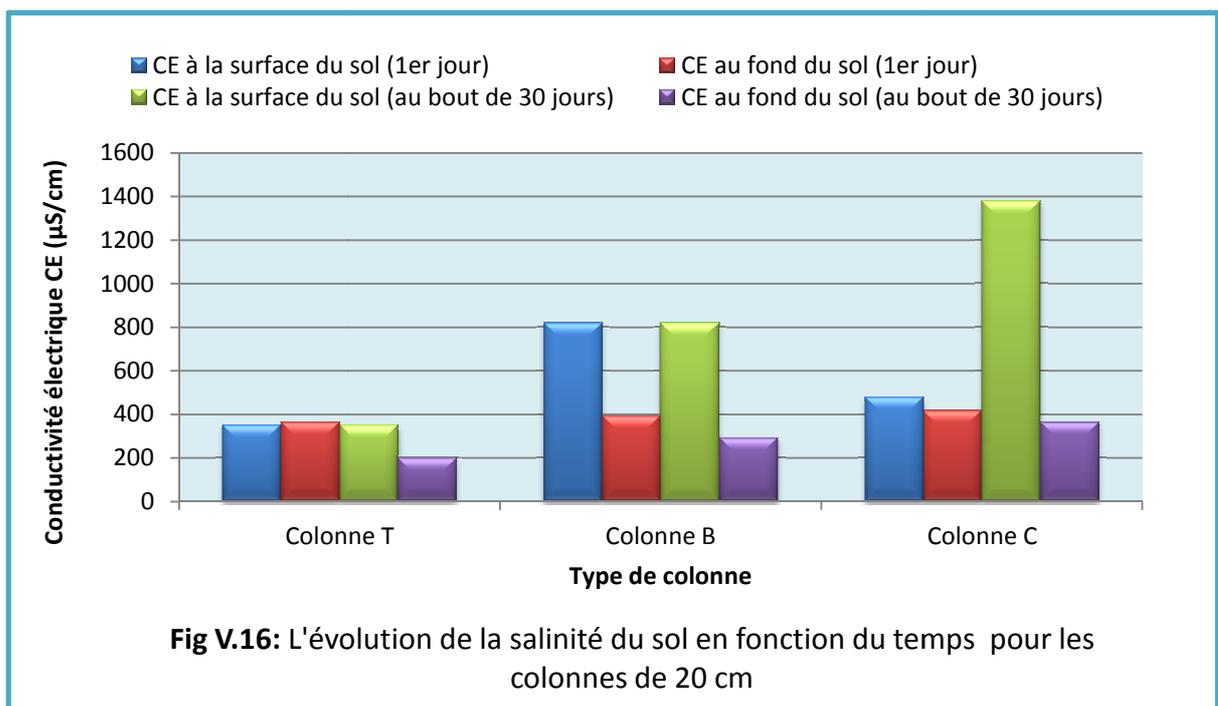
Pour les colonnes de 40 cm, le pH à la surface du sol varie de 7,75 à 7,96 dans la colonne T, de 7,6 à 7,84 dans la colonne B, de 7,59 à 7,82 dans la colonne C. Cependant, le pH au fond du sol varie de 7,88 à 7,8 dans la colonne T, de 7,88 à 7,97 au bout de 30 jours dans la colonne B et redescend à 7,88 au bout de 60 jours, et enfin de 7,87 à 7,74 dans la colonne C (voir page 96).

On constate pour ces colonnes que les pH ont tendance à augmenter à la surface du sol et à diminuer au fond du sol. Néanmoins les pH au fond sont plus basique qu'à la surface du sol.

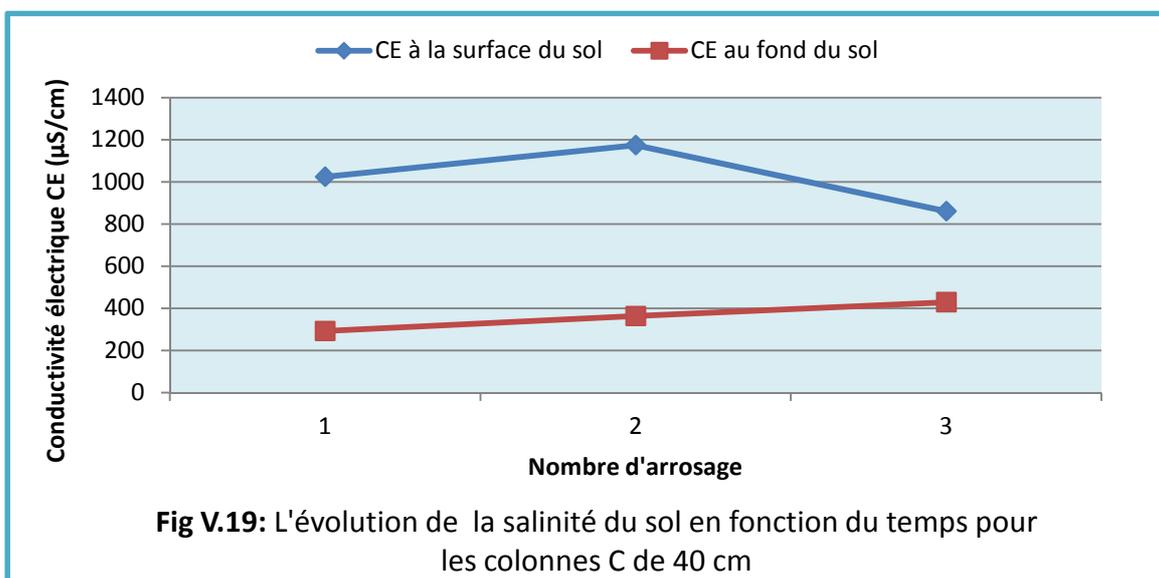
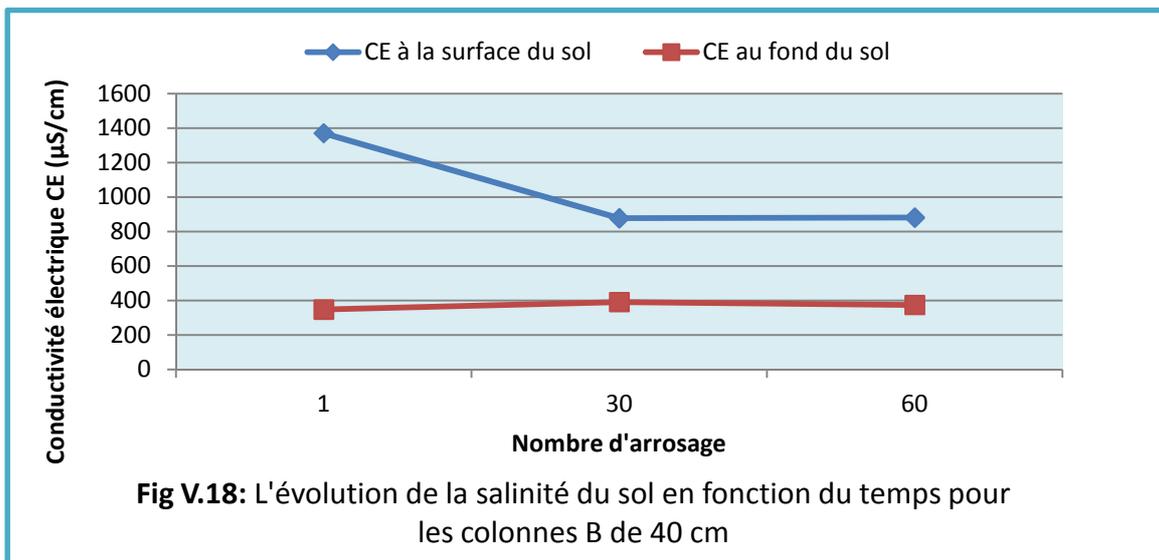
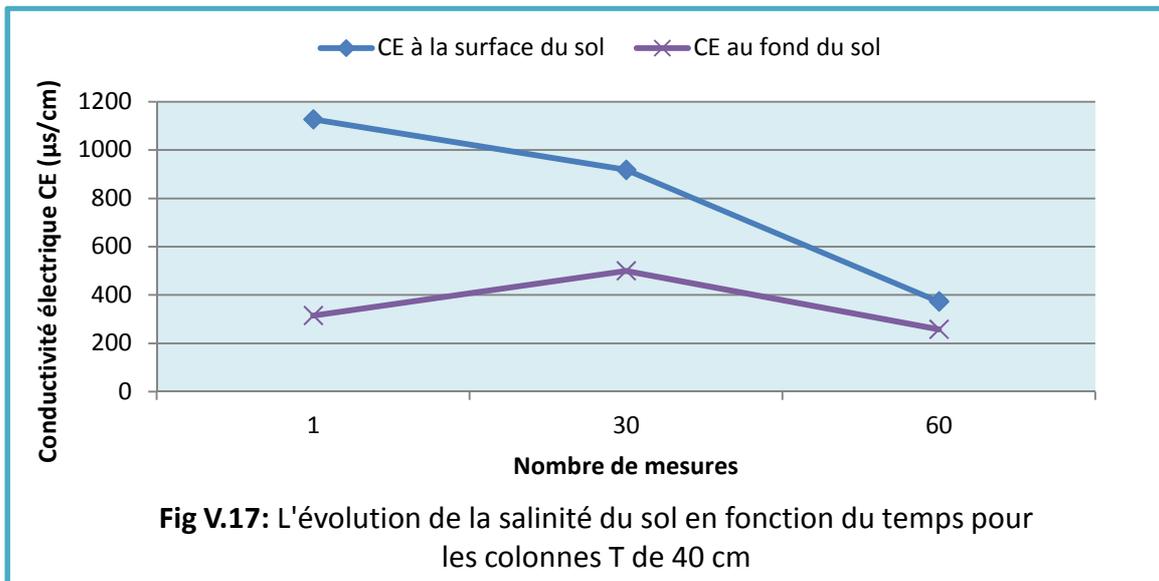
Pour les colonnes de 60 cm, le pH à la surface du sol varie de 7,60 à 7,86 dans la colonne T, de 7,63 à 7,86 dans la colonne B, de 7,61 à 7,74 dans le colonne C. Au fond du sol les pH varie de 7,75 à 7,72 dans la colonne T, de 7,73 à 7,61 dans la colonne B, de 7,8 à 7,63 dans la colonne C (voir page 97).

II.2) Courbes de l'évolution de la salinité du sol:

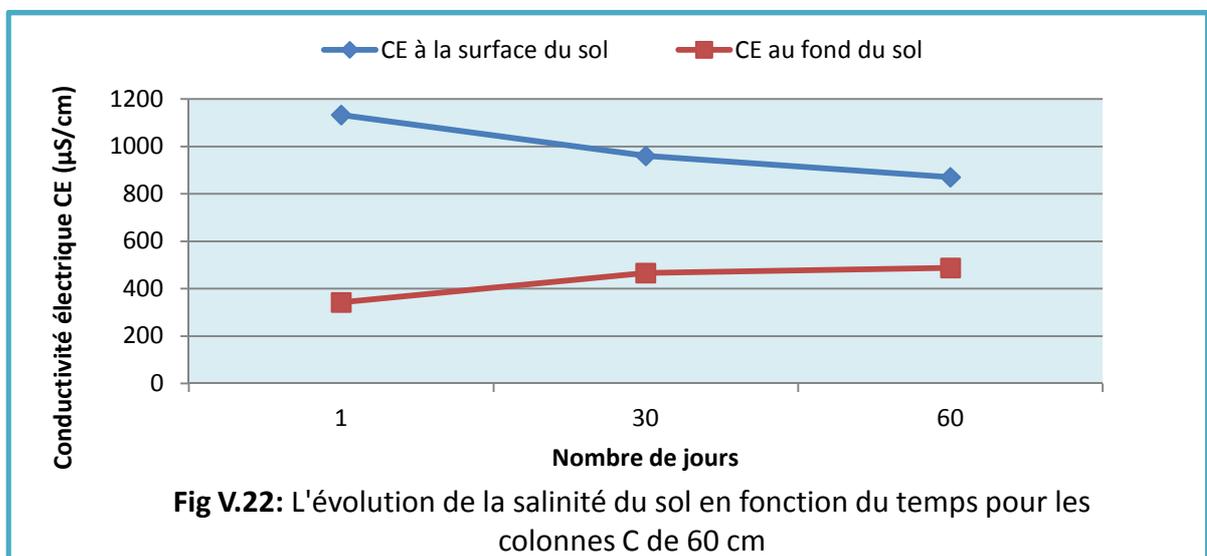
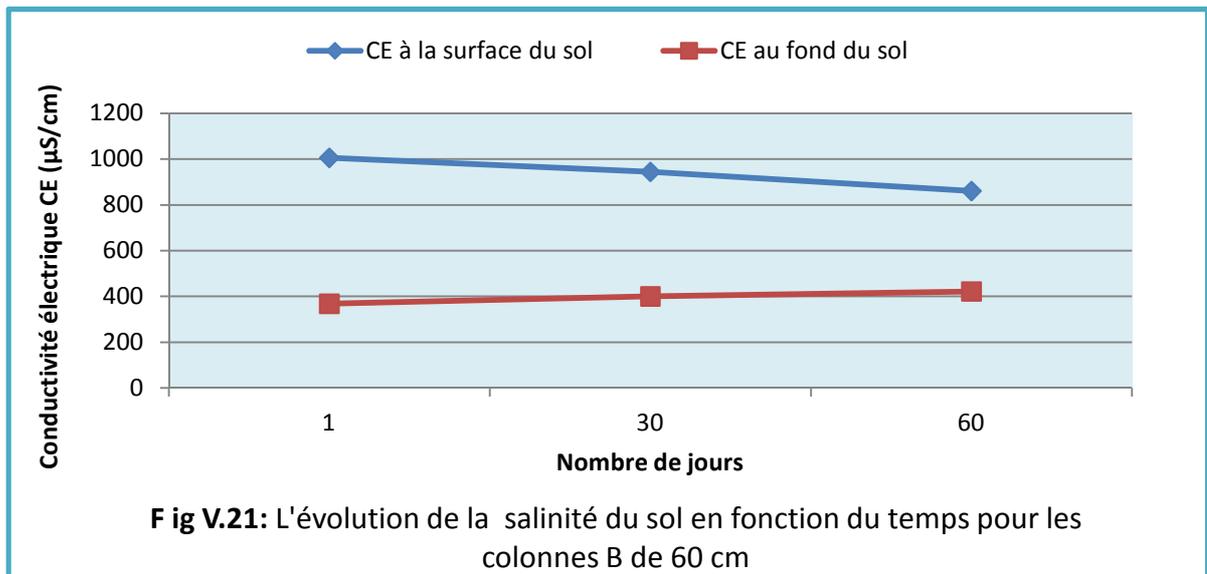
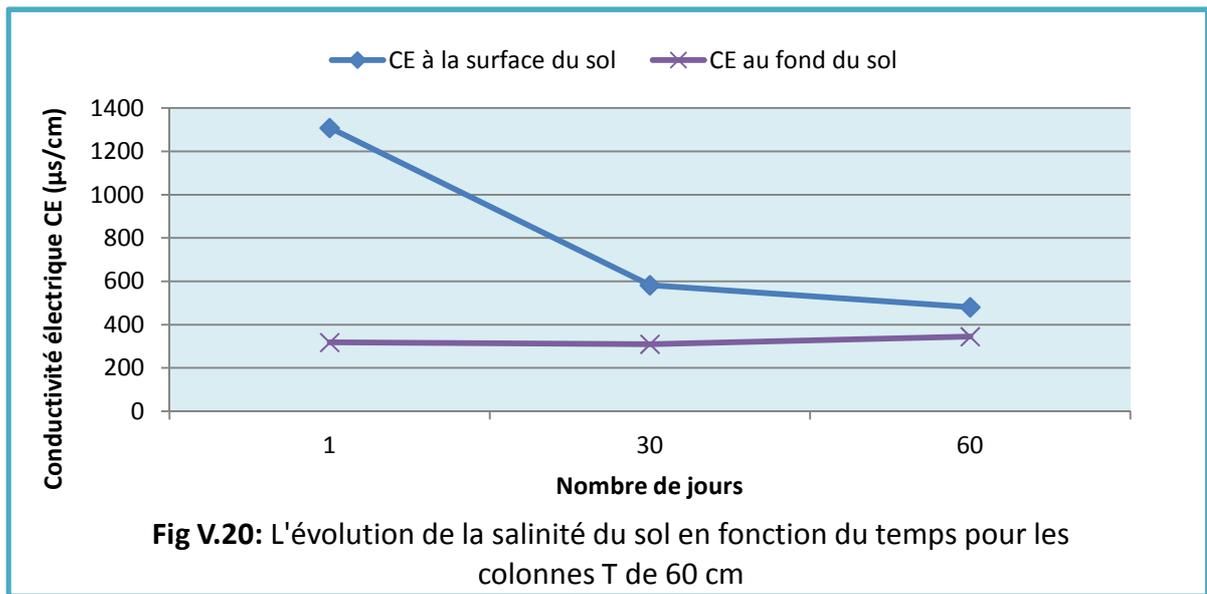
1. Les colonnes de 20 cm



2. Les colonnes de 40 cm



3. Les colonnes de 60 cm



D'après les courbes, pour les colonnes de 20 cm, la conductivité électrique de la colonne T varie de 351 à 331 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à la surface du sol et de 365 à 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au fond du sol. D'où on constate en moyenne une diminution de 54% par rapport à la conductivité électrique initiale du sol apporté ($CE_{\text{initiale}} = 644\mu\text{S}/\text{cm}$).

Cependant, la conductivité électrique de la colonne B varie de 820 à 850 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à la surface du sol avec en moyenne une augmentation de 30% par rapport à la CE_{initiale} , et de 393 à 293 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au fond du sol avec en moyenne une diminution de 47% par rapport à la CE_{initiale} . Dans la colonne C la conductivité électrique à la surface du sol varie de 480 à 1328 $\mu\text{S}/\text{cm}$, d'où une augmentation de 106% par rapport à la CE_{initiale} , et de 417 à 365 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au fond du sol, avec en moyenne une diminution de 40% par rapport à la CE initiale (Tableau V.5).

Pour les colonnes de 40 cm, la conductivité électrique à la surface du sol de la colonne T varie de 1127 à 373 $\mu\text{S}/\text{cm}$, d'où on constate une augmentation de 75% puis une diminution de 42% par rapport à la CE_{initiale} . Dans la colonne B, la conductivité électrique à la surface du sol varie de 1371 à 881 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec des augmentations de 113% et de 37% respectivement par rapport à la CE_{initiale} . Dans la colonne C, la conductivité électrique à la surface du sol varie de 1174 à 861 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec des augmentations de 82% et de 34% par rapport à la CE_{initiale} .

Cependant, la conductivité électrique au fond du sol dans la colonne T varie de 315 à 258 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec en moyenne une diminution de 37% par rapport à la CE initiale. Dans la colonne B, la conductivité électrique varie de 348 à 374 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une diminution en moyenne de 44% par rapport à la CE initiale. Dans la colonne C, la conductivité électrique varie de 292 à 429 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec en moyenne une diminution de 44% par rapport à la CE initiale (Tableau V.6).

Pour les colonnes de 60 cm, la conductivité électrique à la surface du sol de la colonne T varie de 1300 à 481 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec respectivement une augmentation de 100% et une diminution de 25% par rapport à la CE initiale. Dans la colonne B, la conductivité électrique varie de 1060 à 861 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec en moyenne une augmentation de 50% par rapport à la CE initiale. Dans la colonne C, la conductivité électrique varie de 1133 à 870 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec en moyenne une augmentation de 55% par rapport à la CE initiale.

Par ailleurs, la conductivité électrique au fond du sol dans la colonne T varie de 318 à 345 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec en moyenne une diminution de 58% par rapport à la CE initiale. Dans la colonne B, la conductivité électrique varie de 362 à 422 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec en moyenne une diminution de 39% par rapport à la CE initiale. Dans la colonne C, la conductivité électrique varie de 342 à 488 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec en moyenne une diminution de 36% par rapport à la CE initiale (Tableau V.7).

■ Résumé des résultats:

Tableau V.5

Colonnes de 20 cm	CE initiale ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CE à la surface du sol ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CE au fond du sol ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Colonne T	644	341	283
Colonne B	644	835	343
Colonne C	644	904	391

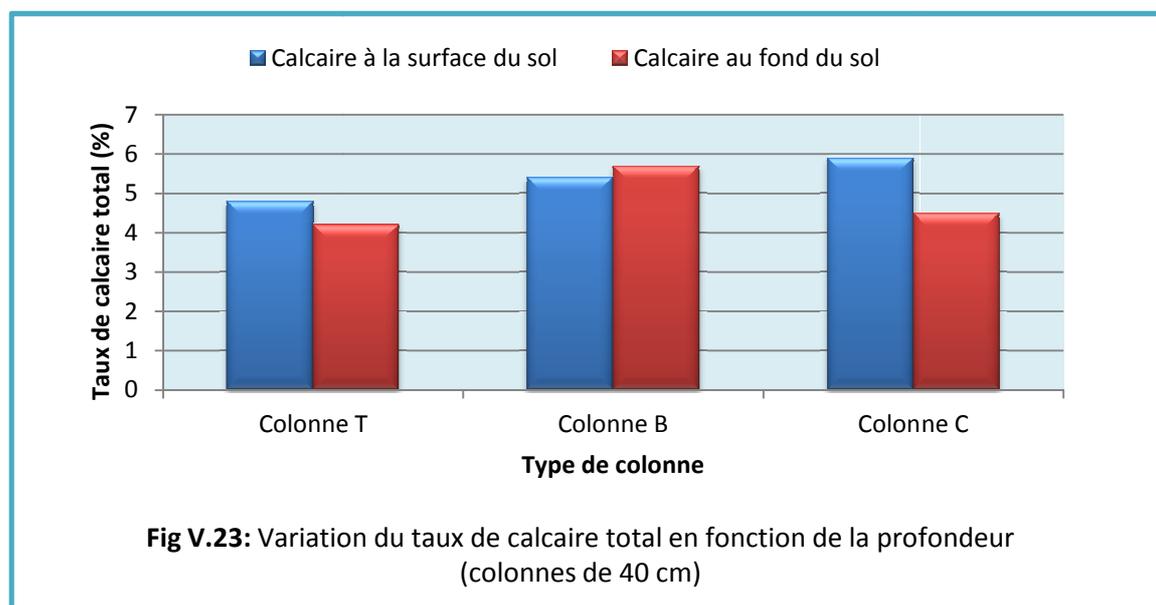
Tableau V.6

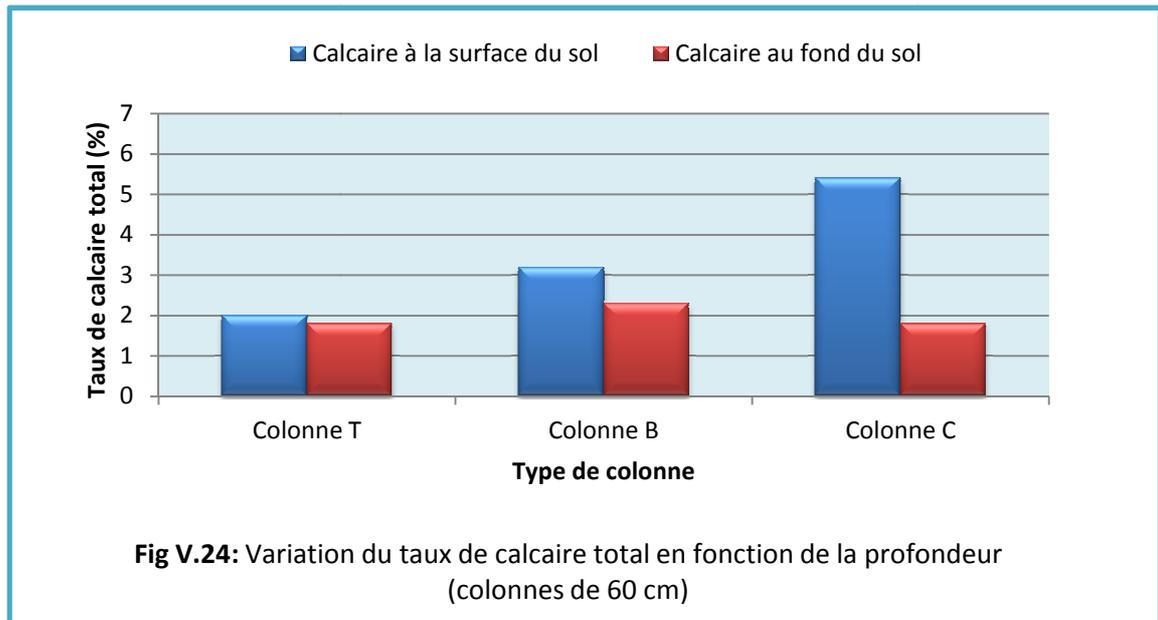
Colonnes de 40 cm	CE initiale ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CE à la surface du sol ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CE au fond du sol ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Colonne T	644	750	287
Colonne B	644	1126	361
Colonne C	644	1018	361

Tableau V.7

Colonnes de 60 cm	CE initiale ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CE à la surface du sol ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CE au fond du sol ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Colonne T	644	890	332
Colonne B	644	961	392
Colonne C	644	1002	415

II.3) le calcaire total:





D'après les histogrammes, les taux de calcaire total montrent tout d'abord une importante variabilité par rapport au taux de calcaire initial (17%) et une variabilité entre les différents niveaux et colonnes. Pour les niveaux de 0 à 40 cm, les teneurs varient de 4,8% à 4,2% dans la colonne T, de 5,4% à 5,7% dans la colonne B, de 5,9% à 4,5% dans la colonne C.

Pour les niveaux de 0 à 60 cm, les teneurs varient de 2% à 1,8% dans la colonne T, de 3,2% à 2,3% dans la colonne B, de 5,41% à 1,8% dans la colonne C.

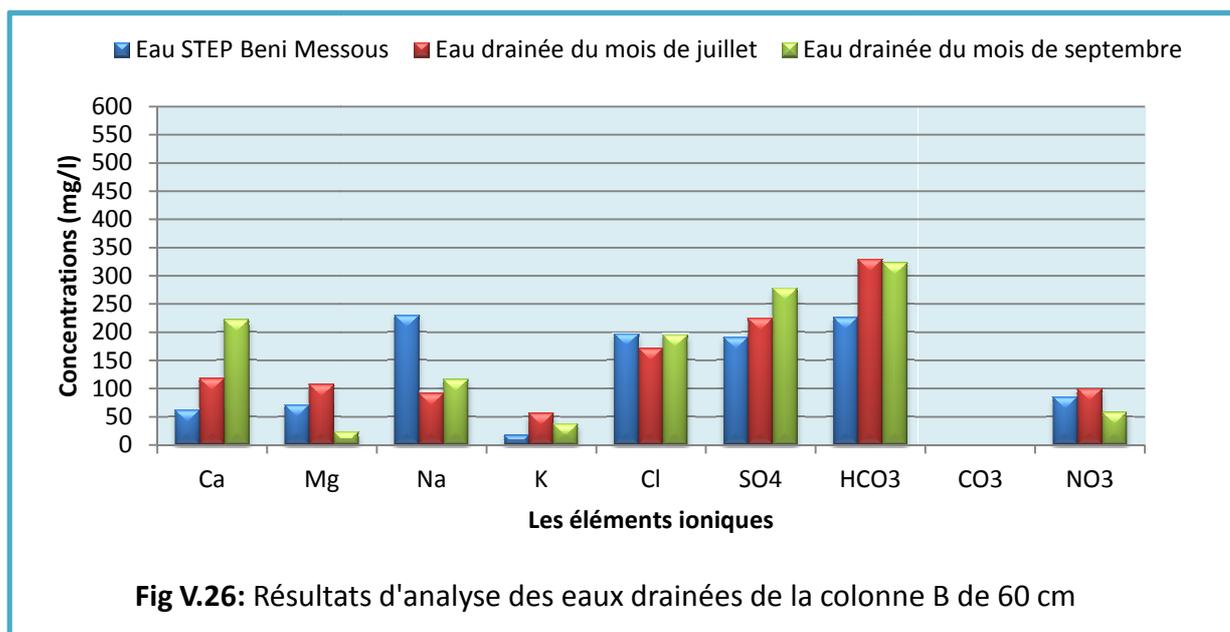
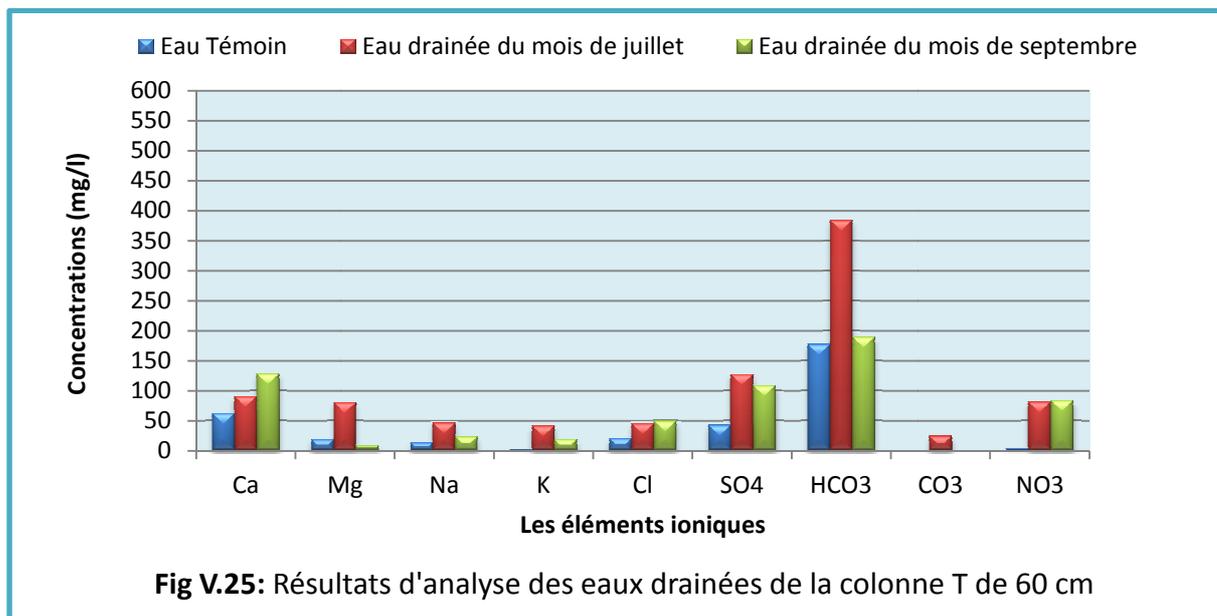
En résumé, on constate que le taux de calcaire total est plus important dans les colonnes de 40 cm et à la surface des colonnes B et C de 60 cm.

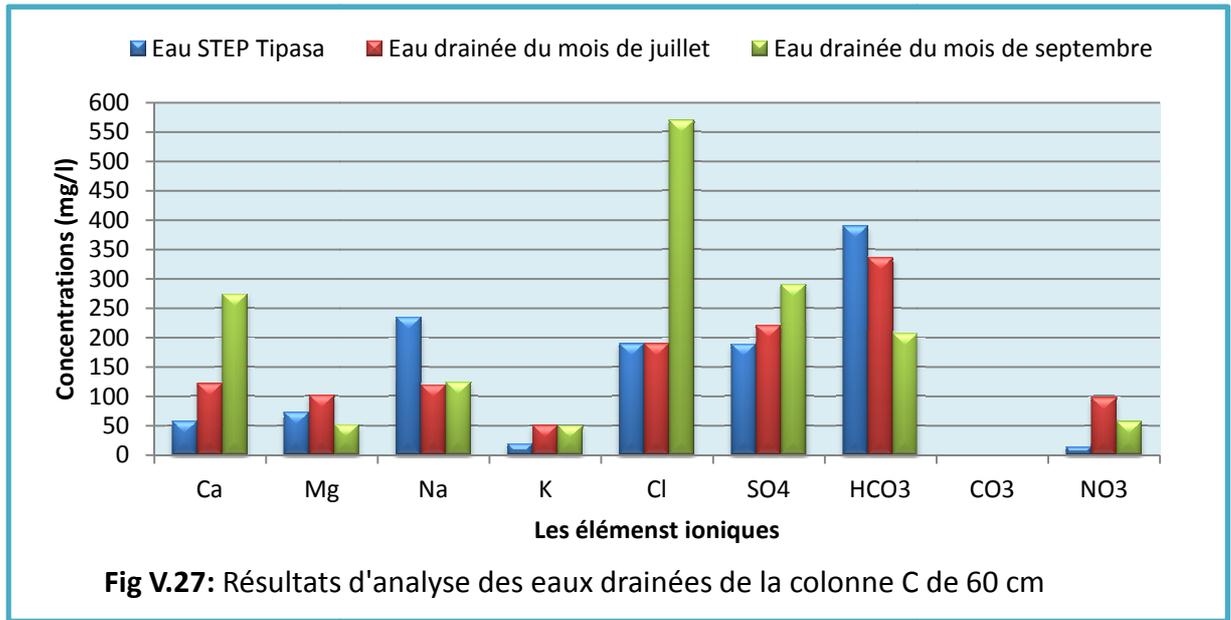
III. Qualité physico-chimique des eaux drainées:

III.1) Analyse des éléments minéraux:

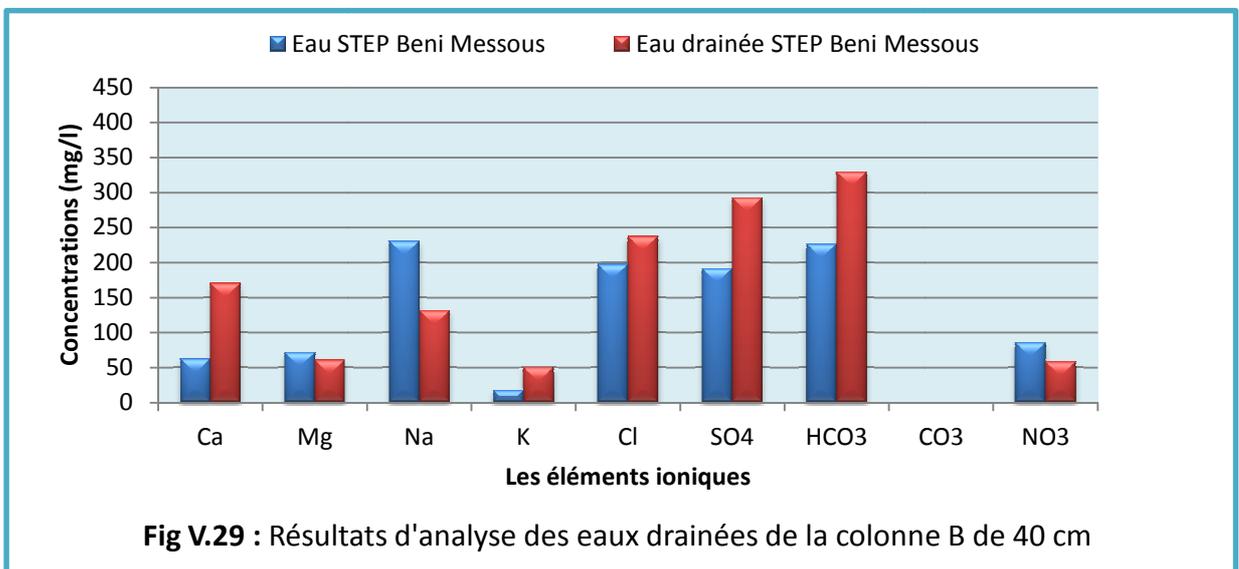
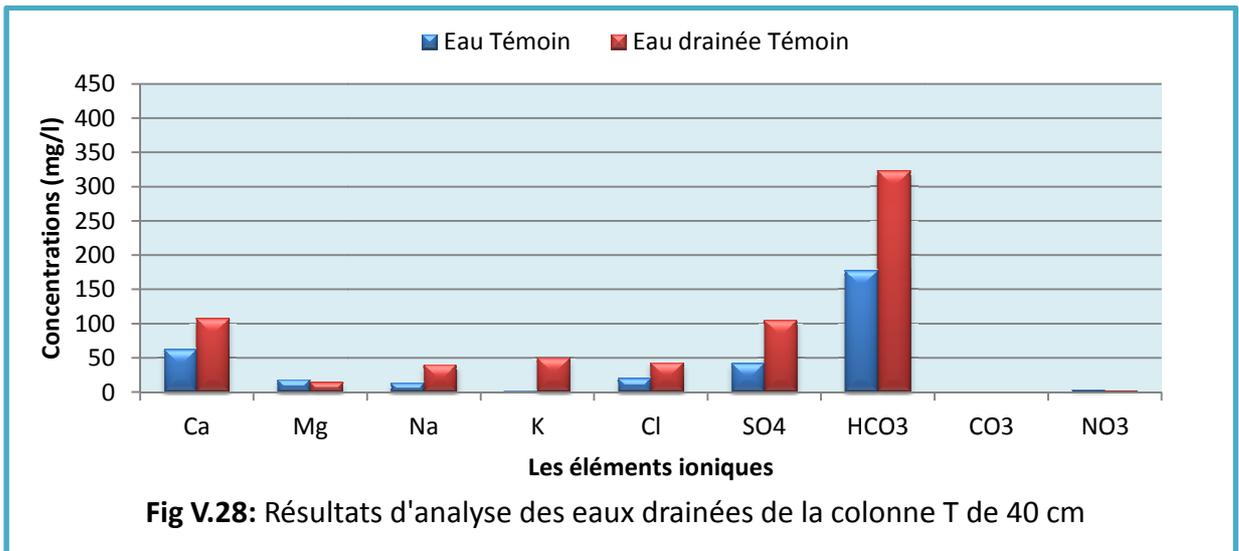
Deux analyses ont été effectuées, la première au mois de juillet pour les eaux drainées après deux irrigations, et dont les échantillons ont été prélevés des colonnes de 60 cm. La deuxième au mois de septembre pour les eaux drainées après quatre irrigations, et dont les échantillons ont été prélevés des colonnes de 40 cm et 60 cm.

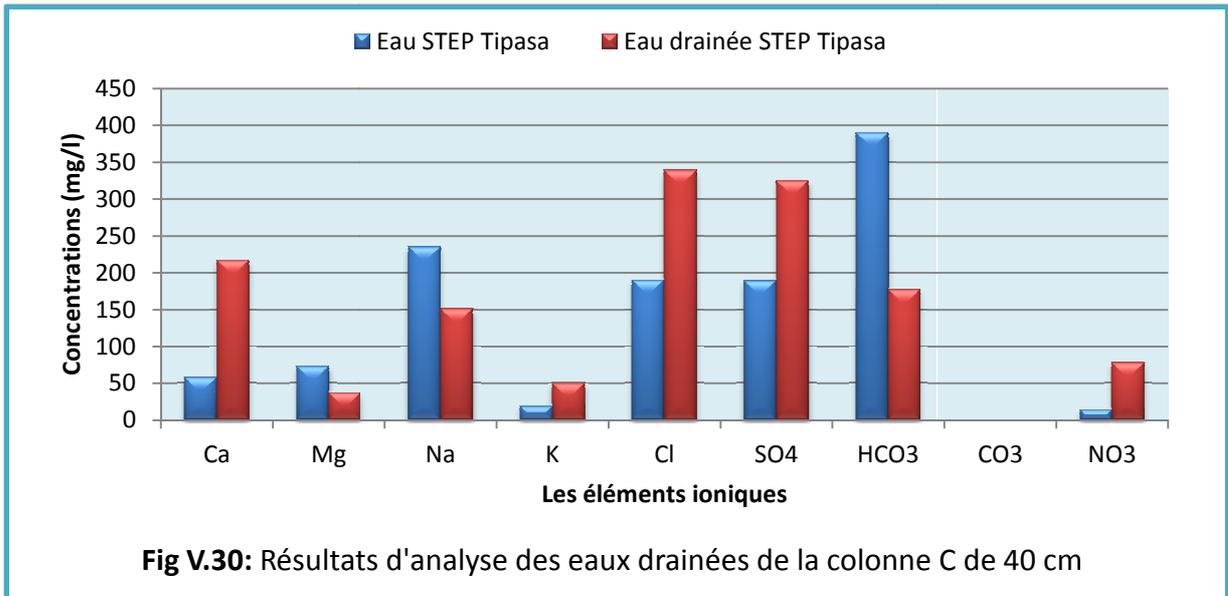
Les résultats des analyses du mois de juillet et de septembre sont donnés en annexe 1, ils sont représentés dans les histogrammes suivants :





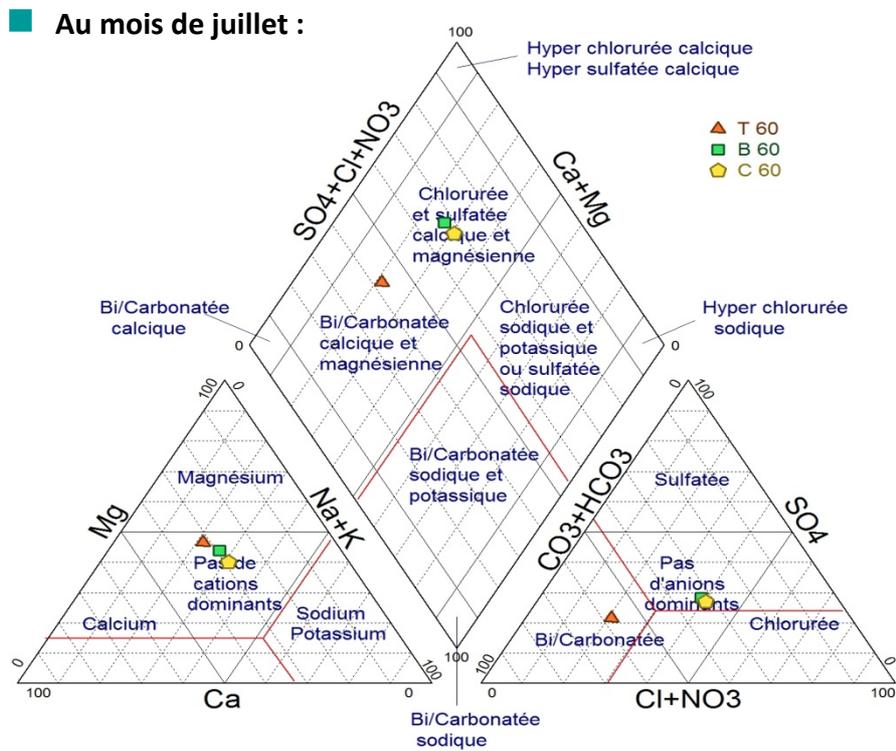
■ Résultats d'analyse des eaux drainées du mois de septembre pour les colonnes de 40 cm :





III.2) Faciès chimique des eaux drainées:

Afin de nous renseigner sur la qualité des eaux drainées, nous avons recouru au diagramme de Piper, les résultats sont les suivants :



■ Au mois de Septembre:

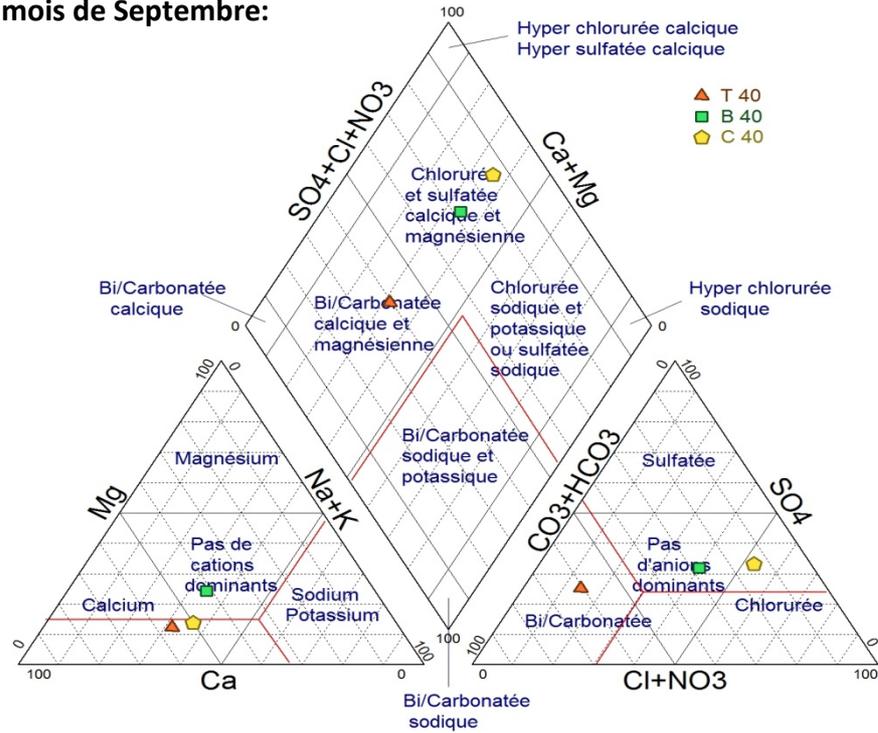


Fig V.32: Faciès chimique des eaux drainées des colonnes de 40 cm

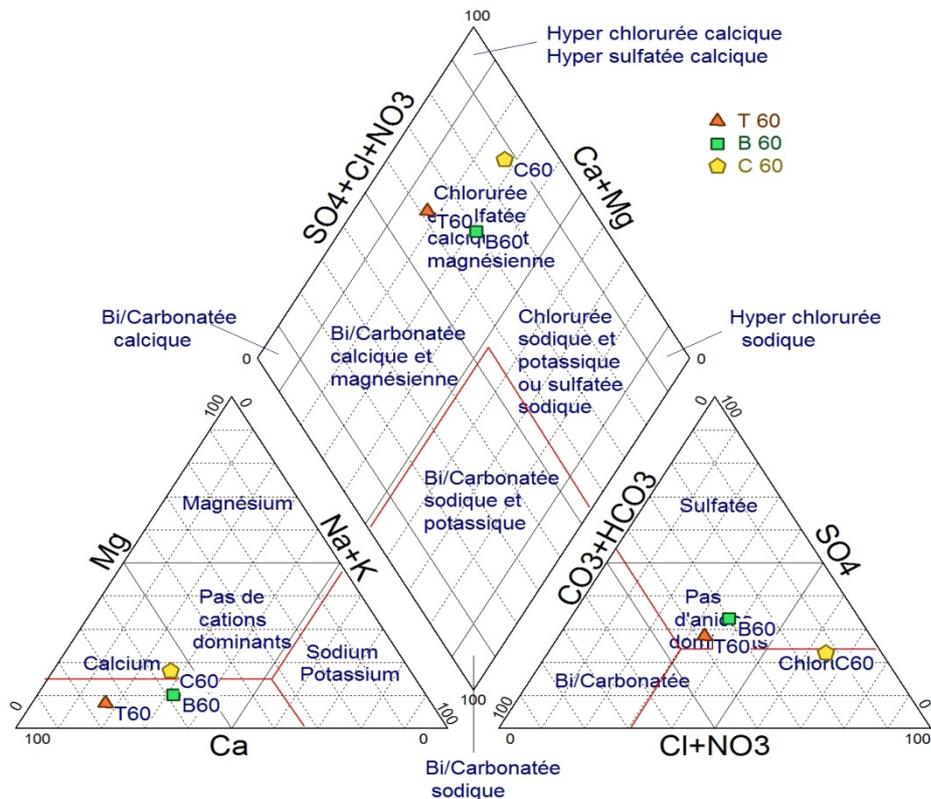


Fig V.33: Faciès chimique des eaux drainées des colonnes de 60 cm

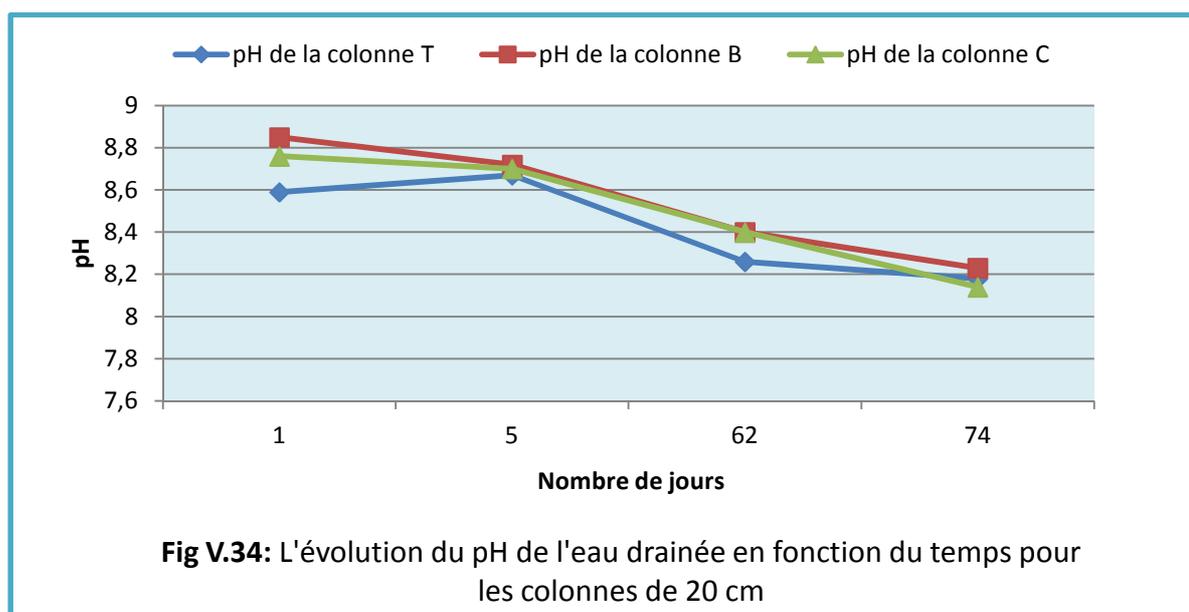
En résumé, pour le mois de juillet et pour les niveaux de 60 cm le faciès chimique des eaux drainées de la colonne T est bicarbonaté calcique et magnésienne, et le faciès chimique des eaux drainées des colonnes B et C est chlorurés et sulfaté calcique et magnésienne.

Pour le mois de septembre, et pour les colonnes de 40 cm le faciès chimique des eaux drainées de la colonne T est bicarbonaté calcique et magnésienne, et celui des colonnes B et C est chloruré et sulfaté calcique et magnésienne.

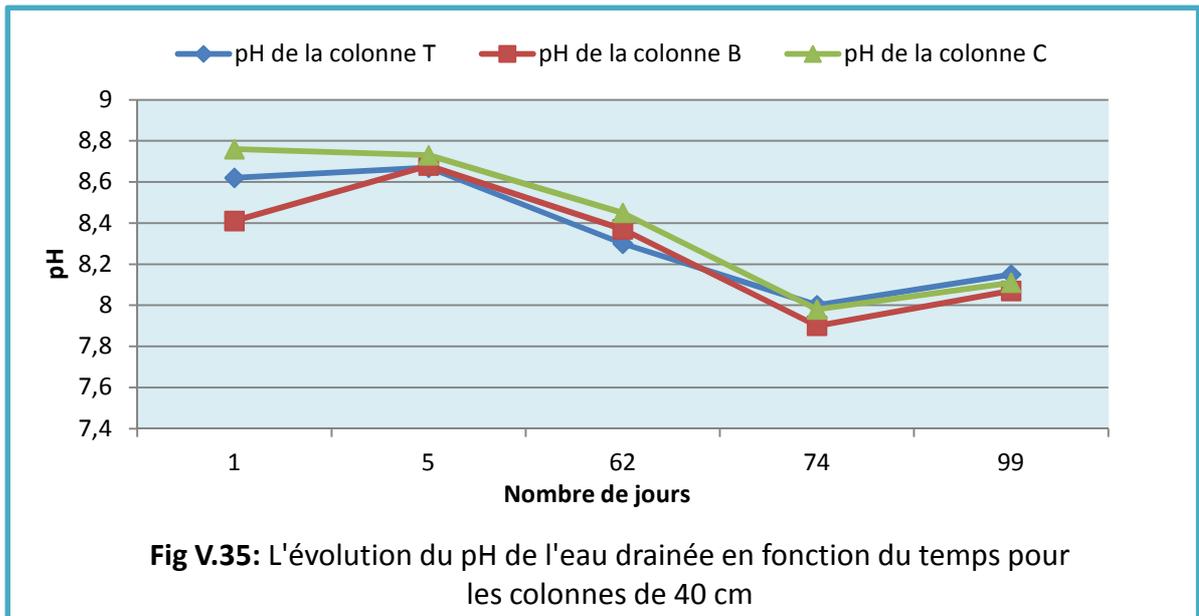
Pour les eaux drainées des colonnes T,B et C de 60 cm ont des faciès chimiques chloruré et sulfaté calcique et magnésienne.

III.3) pH des eaux drainées :

Les résultats sont représentés dans des courbes, afin de suivre l'évolution du pH des eaux drainées du premier jour jusqu'au 99^{ème} jours pour les colonnes de 40 et 60 cm et jusqu'au 74^{ème} jours pour les colonnes de 20 cm (car ces colonnes ont été défraîchi par la manipulation). Pour plus de détail voir annexe 2.

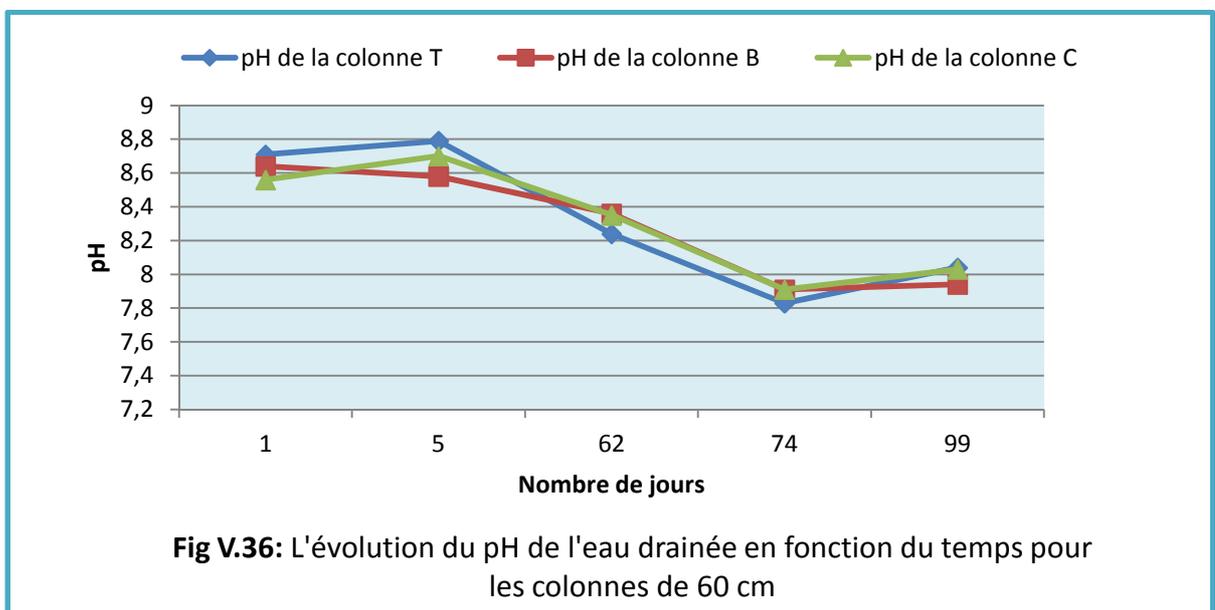


D'après les courbes, les pH ont tendance à diminuer dans le temps avec des valeurs indiquant un pH alcalin. Ces diminutions sont de l'ordre de 0,42 unité pour la colonne T, de 0,62 unité pour les colonnes B et C.



On remarque que le pH de la colonne C a tendance à diminuer de 0,78 au bout de 74 jours et augmenter légèrement de 0,13 au bout de 99 jours.

Pour le pH des colonnes T et B on constate une légère augmentation au bout de 5 jours de l'ordre de 0,05 et 0,27 respectivement, suivi d'une diminution du pH au bout de 74 jours de l'ordre de 0,67 et 0,78 respectivement. Néanmoins, au bout 99 jours on observe un accroissement de 0,15 et 0,17 respectivement.

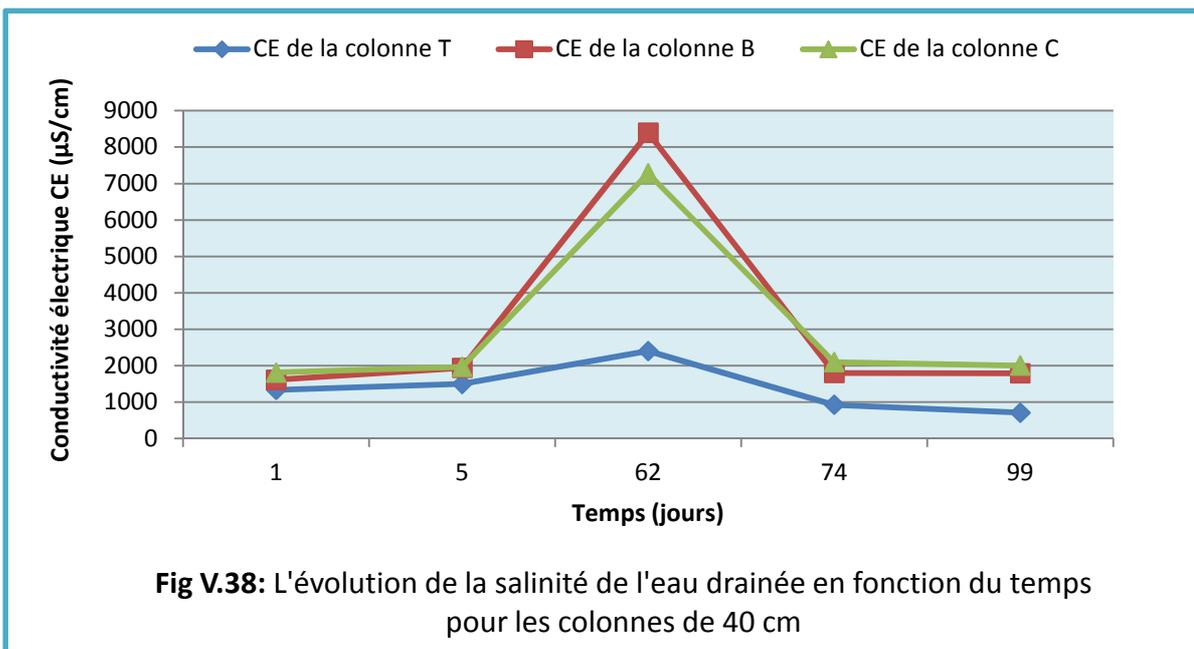
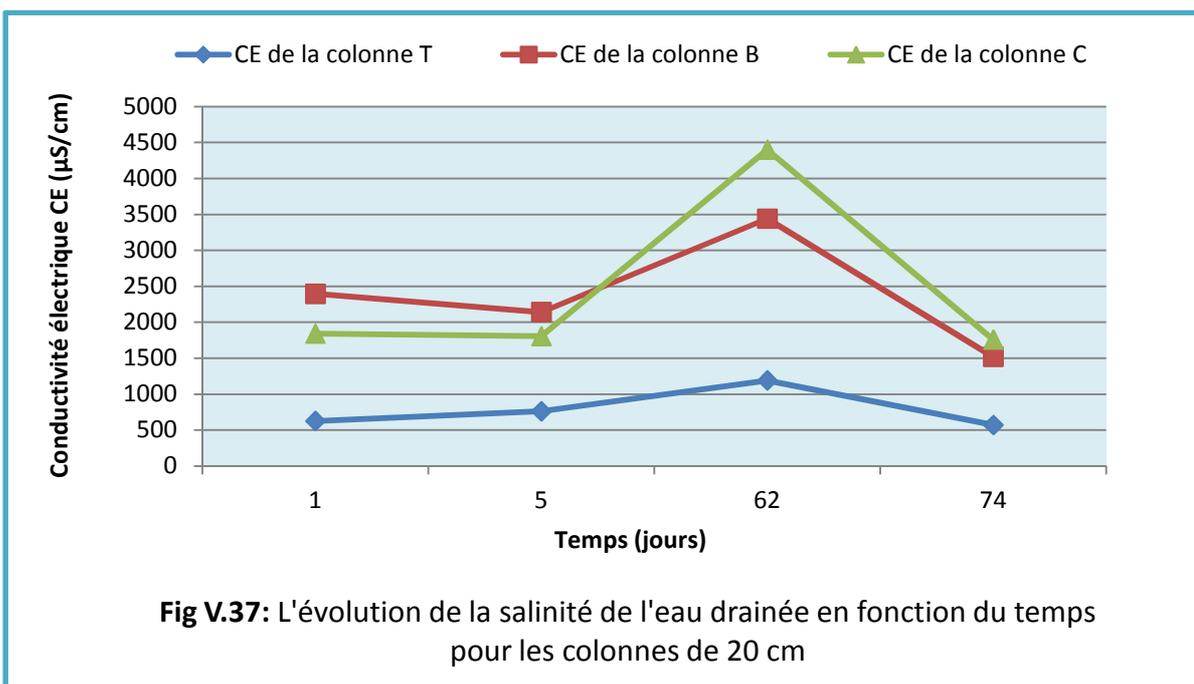


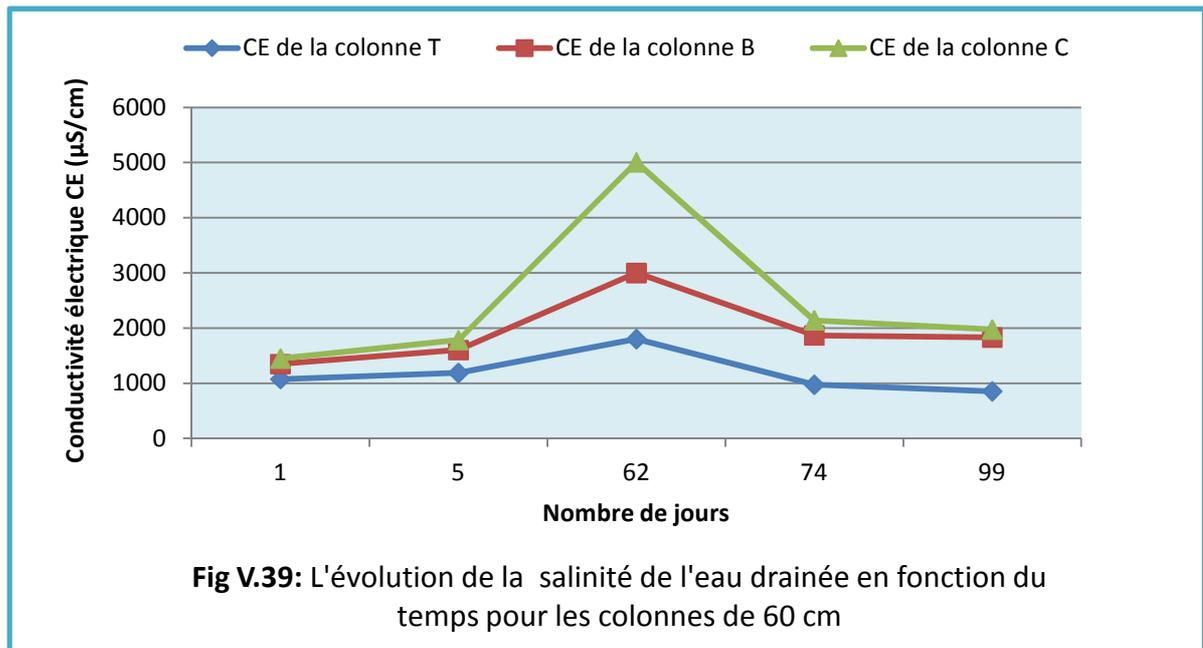
On remarque que le pH de la colonne B a tendance à diminuer de 0,7 au bout de 99 jours. Par ailleurs, le pH des colonnes T et C on constate une légère augmentation au bout de 5 jours de l'ordre de 0,08 et 0,14 respectivement, suivi d'une diminution du pH au bout de 74

jours de l'ordre de 0,96 et 0,79 respectivement. Néanmoins, au bout de 99 jours on observe un accroissement de 0,21 et 0,12 respectivement.

III.4) La conductivité électrique des eaux drainées :

De même pour la conductivité électrique, les résultats sont mis sous forme de courbes, où elles représentent l'évolution de la salinité des eaux drainées du premier jour jusqu'au 99^{ème} jours pour les colonnes de 40 et 60 cm et jusqu'au 74^{ème} jours pour les colonnes de 20 cm. Pour plus de détail voir annexe 2.





On constate que la conductivité électrique des eaux drainées des colonnes T de 20,40,60 cm ont tendance à augmenter jusqu'au 62^{ème} jours, puis à baisser au bout de 74 et 99 jours.

Néanmoins, ces valeurs restent moins importantes que celles indiquées dans les deux autres courbes des colonnes B et C. Ces dernières, on observe pour les niveaux de 20 cm une diminution de la CE des eaux drainées au bout du 5^{ème} et 74^{ème} jours, et un rebondissement important au 62^{ème} avec des valeurs dépassant les 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les eaux drainées de la colonne B, et les 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les eaux drainées de la colonne C.

Par ailleurs, on remarque pour les niveaux intermédiaires (40 cm) que la conductivité électrique des eaux drainées des colonnes B et C a tendance à augmenter jusqu'à atteindre au 62^{ème} jours des pics de l'ordre de 8390 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 7280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivement, et au bout de 99 jours on observe un abaissement de la courbe avec des valeurs qui se rapproche du premier et 5^{ème} jours.

Et enfin on constate pour les niveaux de 60 cm que la conductivité électrique des eaux drainées des colonnes B et C a tendance aussi à augmenter au bout de 62 jours avec des pics de l'ordre de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, et diminue au bout de 99 jours mais avec des valeurs supérieures au premier et 5^{ème} jours.

On remarque que les valeurs de la conductivité électrique obtenus au bout de 62 jours dans les colonnes B et C de 40 cm sont supérieures à celle des autres niveaux.

IV. Caractérisation physico-hydrrique du sol:

IV.1) L'évolution de la de porosité totale:

Afin de déterminer la porosité totale ,nous devons tout d'abord mesurer la densité apparente et la densité réelle pour chaque colonnes.. les résultats sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau V.8: Résultats de mesures de la porosité après 3 irrigations

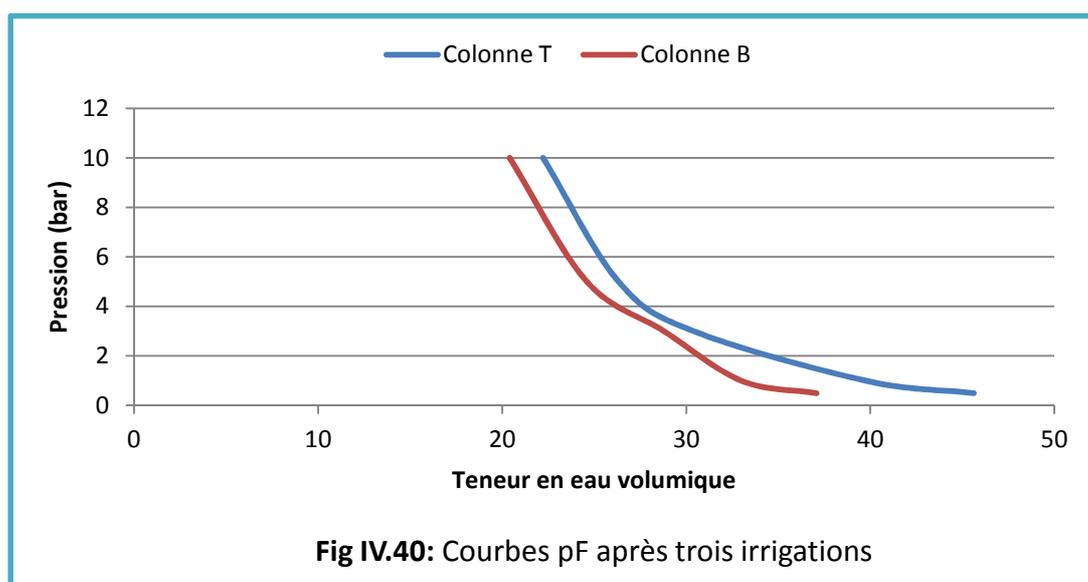
Après 3 irrigations	Densité apparente da	Densité réelle (dr)	Porosité totale %
Colonne T	1,17	2,5	53%
Colonne B	1,2	2,5	52%
Colonne C	1,19	2,5	52,4%

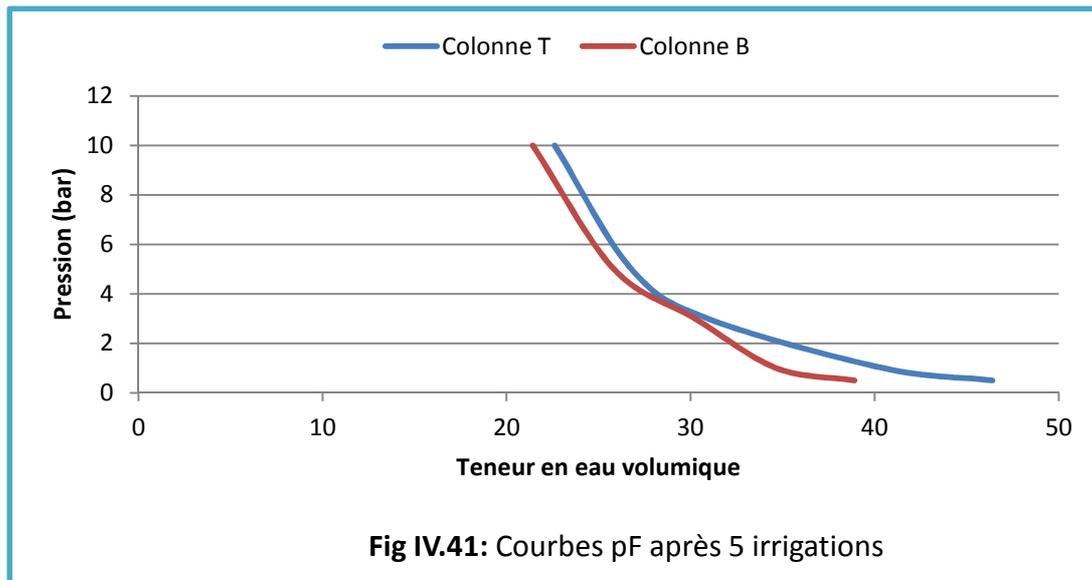
Tableau V.9: Résultats de mesures de la porosité après 5 irrigations

Après 5 irrigations	Densité apparente da	Densité réelle (dr)	Porosité totale %
Colonne T	1,19	2,5	52,4%
Colonne B	1,26	2,5	49,6%
Colonne C	1,24	2,5	50,8%

D'après les résultats, on constate dans les colonnes T, B et C une augmentation de la densité apparente respectivement de 1,7%, 5%, 4,2% après de 5 irrigations.

IV.2) Courbes pF :





D'après les courbes, on constate dans la colonne B une diminution de la teneur en eau volumique qui varie de 2% à 18% par rapport à la colonne T. Les valeurs sont données en annexe 5.

IV.3) Conductivité hydraulique à saturation :

La conductivité hydraulique à saturation a été mesuré par la méthode de Henin, elle donne les résultats suivants :

Tableau V.10: Résultats des conductivités hydrauliques

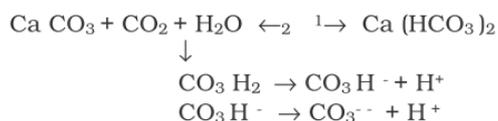
Colonnes	K (m/s) après 3 irrigations	K (m/s) après 5 irrigations
Colonne T	$6,28.10^{-6}$	$8,06.10^{-7}$
Colonne B	$2,78.10^{-6}$	$>10^{-7}$
Colonne C	$1,45.10^{-6}$	$>10^{-7}$

On constate dans la colonne T une diminution de la conductivité hydraulique de 87% après 5 irrigations. Cependant, dans les colonnes B et C on constate des diminutions supérieures à 87%.

V. Discussion des Résultats :

On déduit d'après les résultats, que la différence entre le pH-eau et le pH-KCl du sol nous donne en générale une acidité de réserve du complexe argilo-humique de moyenne à bonne, ces résultats témoignent d'un sol chargé en cations basiques échangeables.

Par ailleurs, les augmentations et diminutions du pH-eau du sol constatées, sont dûes à une réaction chimique réversible qui entraîne soit une précipitation soit une dissolution des carbonates :



Elle représente un équilibre qui peut être déplacé soit :

- Dans le sens 1, la dissolution (par augmentation de la pression partielle en dioxyde de carbone, ou par augmentation de la concentration en ions H⁺, donc diminution du pH) ;
- Dans le sens 2, la précipitation (par diminution de la pression partielle du CO₂, du fait de l'augmentation de la température par exemple, ou par diminution de la concentration en ions H⁺, donc élévation du pH).

En ce qui concerne la diminution du pH-eau du sol, elle n'est pas clairement associée qu'à une variation de la teneur en carbonates. Cette diminution du pH, notamment dans certains sols basiques, suite à une irrigation par les eaux usées épurées a été signalée par plusieurs auteurs[31]. Certains auteurs expliquent cette diminution par l'oxydation de la matière organique et par la nitrification de l'ammonium du sol. Ainsi, la variation du pH est en fonction des cations qui sont retenus sur le complexe adsorbant.

Toutefois les variations qui ont été observées, on remarque qu'il n'y a pas eu un changement brusque du pH car le pouvoir tampon du sol résiste aux variations de son pH. Plus un sol est riche en colloïdes argilo-humiques, plus le nombre d'ions en réserve sur le complexe est élevé et donc plus son pouvoir tampon est important.

Pour la conductivité électrique du sol, on constate pour la première mesure une conductivité électrique élevée à la surface du sol dans les colonnes T, B et C et surtout pour les colonnes de 40 et 60 cm car les échantillons de sol ont été prélevés juste après la période estivale où la demande évaporative était importante, ce qui a induit une augmentation de la concentration en sel par l'effet de capillarité.

Cependant, d'après les courbes de l'évolution de la salinité, on constate que les sels ont tendance à s'accumuler dans la partie superficielle du sol particulièrement dans les colonnes B et C, où au final la conductivité électrique a augmenté en moyenne de 36% .

Par ailleurs, on observe une diminution de la conductivité électrique dans la colonne T et au fond du sol pour les trois types de colonne (T,B,C) , cela est dûe soit à des réactions de précipitation soit au lessivage des sels dans le temps.

Bien entendu le lessivage des sels au niveau des sols irrigués est lié à la solubilité des sels déposés, l'intensité d'irrigation, la migration des ions (contrôlée par la capacité d'échange cationique du sol), la perméabilité du sol et d'autres facteurs [31].

D'après la qualité physico-chimique des eaux drainées, nous pouvons déduire que :

Le pH des eaux drainées des colonnes B et C est alcalin à cause de la concentration élevée en Ca, Mg,Na, K, Cl, SO₄, HCO₃. Néanmoins le pH ne dépasse pas 8,85 car certains de ces sels ont une tendance acide tels que les sulfates et les chlorures, c'est ce qui provoque l'abaissement du pH dans le temps. De plus on constate que les teneurs en sodium dans les eaux drainées sont inférieures à celles des eaux usées épurées, ce qui indique qu'ils ont été retenus dans le sol.

Les eaux drainées des colonnes T de 60 cm du mois de juillet et de 40 cm du mois septembre sont riche en bicarbonates et en calcium, d'où l'augmentation du pH. Cependant on constate dans la colonne de 60 cm du mois de septembre un faciès à prédominance chloruré et sulfaté calcique et magnésienne provoquant la diminution du pH de l'eau drainée dans le temps et témoignant d'une diminution de la teneur en bicarbonate.

Il est à signaler que les teneurs en nitrates dans les eaux drainées issues des colonnes T,B et C dépassent largement les 50mg/l, cela n'est pas forcément dûe à la qualité des eaux d'irrigations car nous remarquons pour l'eau témoin et pour l'eau usée épurée de la STEP de Tipasa des concentrations respectives de l'ordre de 3 mg/l et 14 mg/l .Pour les eaux usées épurées de la STEP de beni Messous on trouve des teneurs élevées en nitrate de l'ordre de 85 mg/l.

Par conséquent, l'augmentation de la teneur en nitrate dans les eaux drainées est dûe à la nitrification de l'ammonium du sol.

Quant à la salinité des eaux drainées, les pics observés au 64^{ème} jours surtout dans les colonnes B et C, sont dûs à l'arrêt des irrigations durant 45 jours, car pendant cette période la demande évaporative était importante, ce qui a induit une augmentation de la concentration en sel par l'effet de la capillarité. L'irrigation a provoqué le lessivage de ces sels, c'est ce qui explique les résultats obtenus.

Hormis les pics observés la tendance générale de la conductivité électrique des eaux drainées est à la diminution pour les colonnes T et à l'augmentation pour les colonnes B et C.

Le taux de calcaire total a fortement baissé à cause de sa dissolution, c'est ce qui explique la forte présence des bicarbonates et du calcium dans les eaux drainées au début de l'expérimentation et surtout dans la colonne T. Néanmoins on constate dans les colonnes

T,B et C de 40 cm des taux de calcaire relativement plus élevé par rapport aux colonnes de 60 cm.

L'augmentation de la densité apparente dans les colonnes B et C peut être dûe à une eau chargée en MES, cela peut se confirmer avec le temps. Sans oublier de prendre en compte le tassement. Par contre, la densité réelle n'a pas changer, d'où la diminution de la porosité.

Concernant les variations de la teneur en eau , à priori on constate de légères diminutions dans la colonne B, mais il reste à vérifier les résultats car il faudrait prendre plusieurs mesures, ce qui n'a pas été le cas à cause du temps que ça aurait pris et la difficulté à avoir les teneurs en eau à des pressions supérieures à 5 bars.

Et enfin on constate que la conductivité hydraulique mesurée au laboratoire par la méthode de Henin a nettement diminuer dans les colonnes T et surtout dans les colonnes B et C, cela est peut être dûe soit à la perturbation du sol pendant le prélèvement de l'échantillon ou à la vulnérabilité à la perte et à la désagrégation de la stucture du sol à cause d'une concentration relativement élevée en sel à la surface du sol, ou bouchage des pores par les MES . Tout ces facteurs sont à prendre en considération car ce paramètre est très délicat à mesurer.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail a été d'évaluer l'impact des eaux usées épurées sur les propriétés physico-chimiques et physico-hydrauliques d'un sol, d'où la nécessité d'étudier la qualité du sol, de l'eau entrante et drainée. Pour cela un dispositif expérimental a été mis en place.

Globalement, il résulte que l'irrigation avec les eaux usées épurées n'est pas sans conséquence sur les propriétés du sol. Les effets constatés sont:

La salinité des eaux usées épurées a fait augmenter la conductivité électrique du sol surtout en saison estivale marquée par une forte évaporation, et des eaux drainées. Par ailleurs nous avons constaté que les sels ont tendance à s'accumuler dans la partie superficielle du sol.

On note de légère variation de pH du sol, Cependant le pH des eaux drainées est plus alcalin que le pH du sol.

Le taux de calcaire total a nettement diminué après les irrigations, indiquant la dissolution du calcaire.

Les densités apparentes ont légèrement augmenté impliquant une légère diminution de la porosité, alors que la densité réelle n'a pas changé.

Les eaux usées épurées chargées en MES engendrent une diminution de la teneur en eau.

la conductivité hydraulique diminue pour plusieurs raisons : perturbation de la structure par la fixation du sodium sur le complexe absorbant, diminution de la porosité, perturbation de l'échantillon pendant la manipulation.

L'augmentation des teneurs en nitrates dans les eaux drainées prouve qu'ils sont facilement lessivable. Ainsi bien qu'on constate des teneurs élevées dans les eaux usées épurées de la STEP de Beni Messous cela pourrait être en réalité un risque de contamination des nappes phréatiques et des zones non saturées.

D'une manière générale, il n'est pas évident de prévoir le temps nécessaire pour que la destruction du sol commence à apparaître. Cependant, la salinisation des sols est un mécanisme irréversible. C'est pourquoi il convient donc à la fois de surveiller particulièrement ce paramètre à l'avenir et sans attendre les éventuels premiers symptômes sur la structure des sols. Ce phénomène dépend, en effet, de plusieurs facteurs tels que le type de sol, les conditions climatiques, le type des cultures, ainsi que le mode d'irrigation.

Par ailleurs, les cations échangeables acheminés par les EUE se comportent différemment selon le type de sol, en raison de leurs propriétés spécifiques. Ainsi, un sol de bonne perméabilité et de faible capacité d'échange (sol sableux par exemple), va lessiver par ces eaux apportées, les éléments nutritifs et les sels avec les eaux de drainage. Tandis qu'au

niveau d'un sol lourd (argileux par exemple), ces éléments seront accumulés dans les horizons de surface.

D'autre part les effets liés aux MES dans les eaux usées épurées doivent faire l'objet de toute une étude, afin d'évaluer et prévenir leurs impacts sur le sol et dans les systèmes d'irrigations.

Les recommandations qu'on pourrait apporter, c'est d'effectuer les labours profonds vers la fin de chaque saison culturale, cela va permettre d'homogénéiser l'horizon de surface, faire un lessivage-drainage pour évacuer l'excès de sel, apporter des amendements calciques et de la matière organique.

Le choix des cultures, doit être dès le départ bien adapté, que ce soit à la qualité des eaux usées épurées, au type de sol, comme à l'éventuelle salinisation des sols irrigués.

Etablir une carte de probabilité de la salinité des sols et des eaux souterraines, ainsi qu'une carte de risque de transfert de polluant par rapport au type de sol et des niveaux piézométriques des nappes.

En conclusion, étant une pratique particulière, l'irrigation avec les eaux usées épurées exige la maîtrise des paramètres liés à la qualité physico-chimique et microbiologique des effluents (micro-organismes pathogènes, éléments toxiques, salinité, matières en suspension, etc.).

A l'avenir, il serait plus judicieux d'étudier un cas réel de valorisation des EUE à des fins d'irrigation, dont l'intérêt est de fournir l'état actuel des sols irrigués avec une eau usée épurée et de permettre un contrôle régulier de la situation à long terme.

Le manque de moyens et la difficulté à effectuer certaines analyses et mesures, ne nous a malheureusement pas permis de compléter cette étude.

Ce travail a par ailleurs, mis en évidence que plusieurs facteurs sont impliqués dans la dégradation des sols et de l'environnement.

Bibliographie

- [1] Asano, T., 1998. " Wastewater reclamation and reuse". Water quality management library.
- [2] Aussel, H.,2004. " Besoin en épuration". Institut de recherche pour le développement.
- [3] Belaid, N.,2010."Evaluation des impacts de l'irrigation par les eaux usées traitées sur les plantes et les sols du périmètre irrigué d'EL Hajeb-Sfax". Thèse doctorat de l'université de Sfax.
- [4] Blumenthal U.J., 2000. " Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture: recommendations for revising WHO guidelines". Bull. World Health Organ.
- [5] Bovet, F.,2008." l'atlas de l'environnement". Armand Colin.
- [6] Bruand,A.,Bastet, G., 2002. " Estimation des propriétés hydrodynamiques des sols à l'aide des fonctions de pédotransfert". In: Modélisation des transferts de pesticides dans l'environnement, Club CRIN.
- [7] Calvet,R., 2003. " Le sol : propriétés et fonctions Tome 2". Dunod.
- [8] Cauchi, 1996,." Dossier: la réutilisation des eaux usées après épuration". Techniques, Sciences et Méthodes.
- [9] Chossat, J.C.,2005. " La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols". Lavoisier.
- [10] Crook J., MacDonald J.A., 1999. " Potable use of reclaimed water". Journal of the American water work association.
- [11] Ecosse, D., 2001. "Techniques alternatives en vue de subvenir à la pénurie d'eau dans le monde". Mém. D.E.S.S. « Qualité et Gestion de l'Eau », Fac. Sciences, Amiens.
- [12] Faby, J.A., Brissaud, F., 1997. "L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation". Office International de l'Eau.
- [13] FAO, 2003." L'irrigation avec des eaux usées traitées – Manuel d'utilisation".
- [14] Froese K.L., 1998. " Health effects associated with wastewater treatment, disposal, and reuse". Water environment research.
- [15] Germon, J-C.,1998. " les fonctions épuratrices du sol". Engref paris.
- [16] Journal officiel de la république Algérienne N°60, 2005.

- [17] Journal officiel de la république Algérienne N°35, 2007.
- [18] Lahlou, M., et al, 2000. " Intensification agricole et qualité des sols et des eaux". Séminaire Rabat.
- [19] Lunn, M., 2001. "The deliberate indirect wastewater reuse scheme at Essex & Suffolk Water". Colloque de Noirmoutier.
- [20] Ministère des ressources en eau, données.
- [21] OMS (2006), "WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater", volume II, Wastewater use in agriculture.
- [22] Perrono, P.,1999. "Les micropolluants métalliques des boues de stations d'épurations urbaines et l'épandage agricole. Mémoire de l'université de picardie, Amiens.
- [23] Rose J.B., Farrah S.R.,1999. "Public evaluation of advanced water for potable application". Water Science and Technology.
- [24] Rotbardt, A., 2011. " REUT- perspectives opérationnelles et recommandations pour l'action". Agence Française de développement.
- [25] Satin, M.,Selmi,B., 1999. "Guide technique de l'assainissement". Bourrier 2^{ème} édition.
- [26] Sheikh B., Cooper R.C., 1999. "Israel K.E. Hygienic evaluation of reclaimed water used to irrigate food crops – a case study". Water Science and Technology.
- [27] Smedema, .L.K, Rycroft, .D.W,1983. "Land Drainage". Abtsford Book.
- [28] US Environmental Protection Agency (USEPA), 1992. "Guidelines for Water Reuse".
- [29] Vitousek, P. M., 1991. "Howarth Nitrogen limitation on land and in the sea".
- [30] Xanthoulis, D., 2002. " Optimisation de la REUT" .Faculté universitaire des sciences agronomiques.
- [31] Yadav RK, Goyal B,2002. "Post-irrigation impact of domestic sewage effluent on composition of soils, crops and groundwater". Environmental International.

Sites internet :

- [32] <http://www.techniques-ingenieur.fr>
- [33] <http://www.sante-environnement-travail.fr>
- [34] <http://www.bretagne-environnement.org>
- [35] <http://www.terre-et-eau.univ-avignon.fr>

ANNEXE 1

Tableau I : Résultats d'analyses des eaux du mois de juillet

Éléments minéraux (mg/l)	Eau Témoin	Eau Témoin drainée à 60 cm	Eau STEP B	Eau STEP B drainée à 60 cm	Eau STEP C	Eau STEP C drainée à 60 cm
Ca	62	90	62	118	58	122
Mg	18	80	71	107	73	102
Na	13	46	230	91	235	119
K	1	41	17	56	19	51
Cl	20	45	197	171	190	190
SO4	42	127	191	224	189	221
HCO3	177	384	226	329	390	336
CO3	0	24	0	0	0	0
OH	0	0	0	0	0	0
NO3	3	81	85	100	14	98

Tableau II: Résultats d'analyses des eaux du mois de Septembre

Éléments minéraux (mg/l)	Eau Témoin	Eau Témoin drainée à 40 cm	Eau STEP B	Eau STEP B drainée à 40 cm	Eau STEP C	Eau STEP C drainée à 40 cm
Ca	62	107	62	170	58	217
Mg	18	14	71	60	73	37
Na	13	40	230	131	235	151
K	1	50	17	50	19	50
Cl	20	43	197	237	190	339
SO4	42	105	191	292	189	325
HCO3	177	323	226	329	390	177
CO3	0	0	0	0	0	0
OH	0	0	0	0	0	0
NO3	3	2	85	58	14	78

Tableau III: Résultats d'analyses des eaux du mois de Septembre

Eléments minéraux (mg/l)	Eau Témoin	Eau Témoin drainée à 60 cm	Eau STEP B	Eau STEP B drainée à 60 cm	Eau STEP C	Eau STEP C drainée à 60 cm
Ca	62	128	62	222	58	274
Mg	18	8	71	23	73	52
Na	13	23	230	116	235	124
K	1	18	17	37	19	50
Cl	20	49	197	195	190	570
SO4	42	108	191	278	189	290
HCO3	177	189	226	323	390	207
CO3	0	0	0	0	0	0
OH	0	0	0	0	0	0
NO3	3	83	85	58	14	57

ANNEXE 2

Tableaux et figures complémentaires de l'évolution du pH et CE des eaux drainées.

1. Premier arrosage du 13 juillet 2011 :

✓ Colonne B :

	colonne de 20 cm	colonne de 40 cm	colonne de 60 cm
PH	8,85	8,41	8,64
CE (dS/m)	2,395	1,610	1,348

✓ Colonne C :

	colonne de 20 cm	colonne de 40 cm	colonne de 60 cm
PH	8,76	8,76	8,56
CE (dS/m)	1,842	1,812	1,448

✓ Colonne T :

	colonne de 20 cm	colonne de 40 cm	colonne de 60 cm
PH	8,59	8,62	8,71
CE (dS/m)	0,626	1,333	1,075

Fig 1: Variation du pH de l'eau drainée en fonction de la profondeur

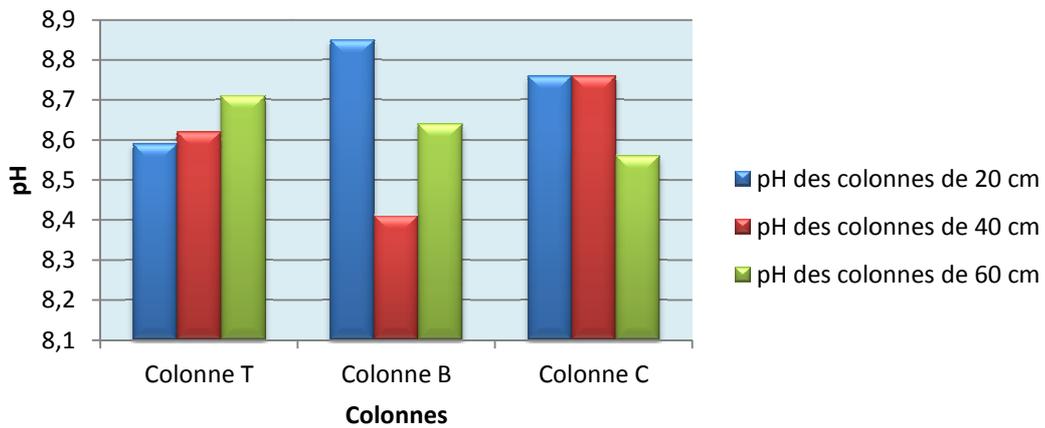
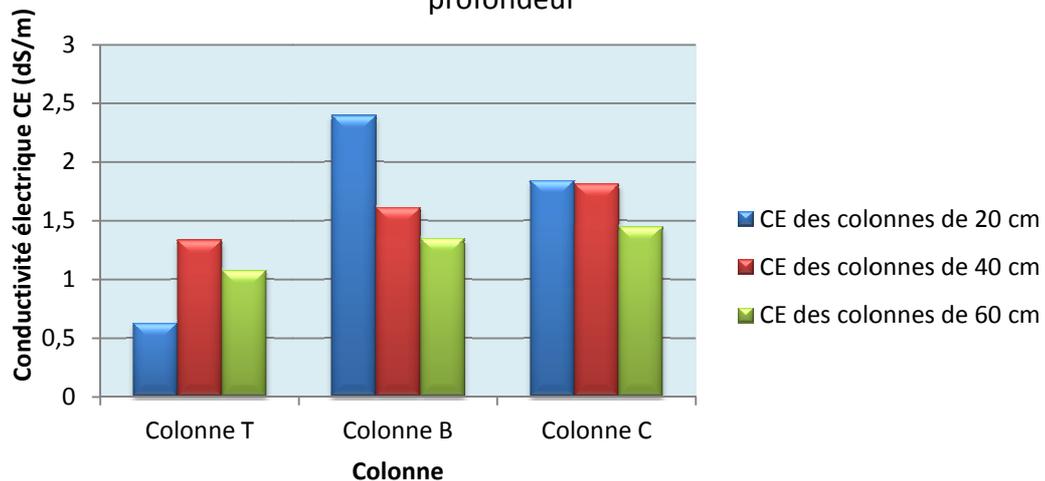


Fig 2: Variation de CE de l'eau drainée en fonction de la profondeur



2. Deuxième arrosage du 17 juillet 2011 :

✓ **Colonne B :**

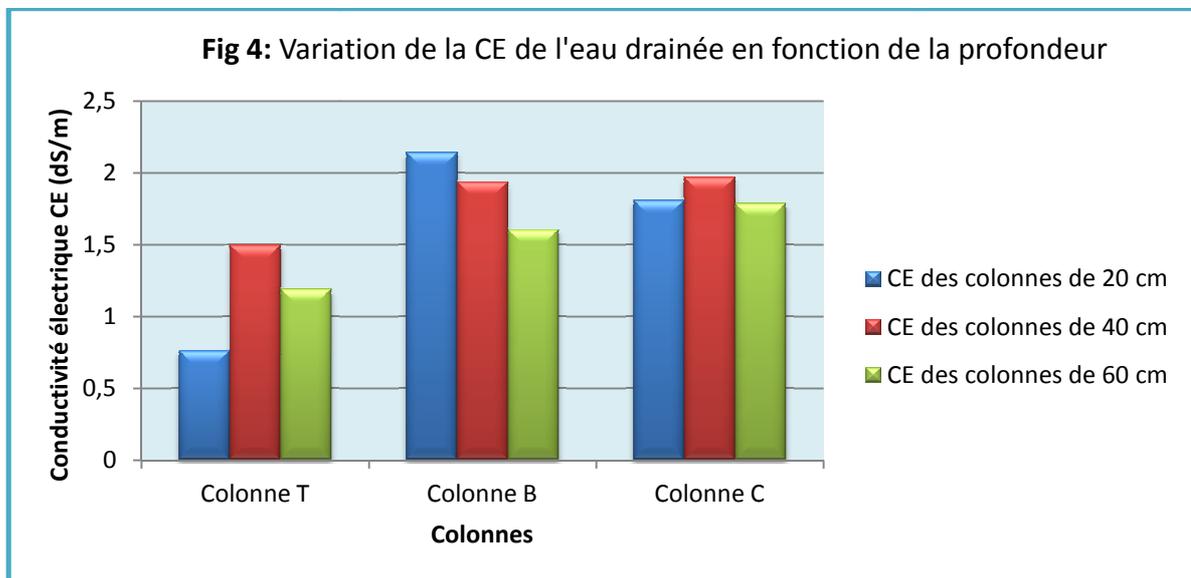
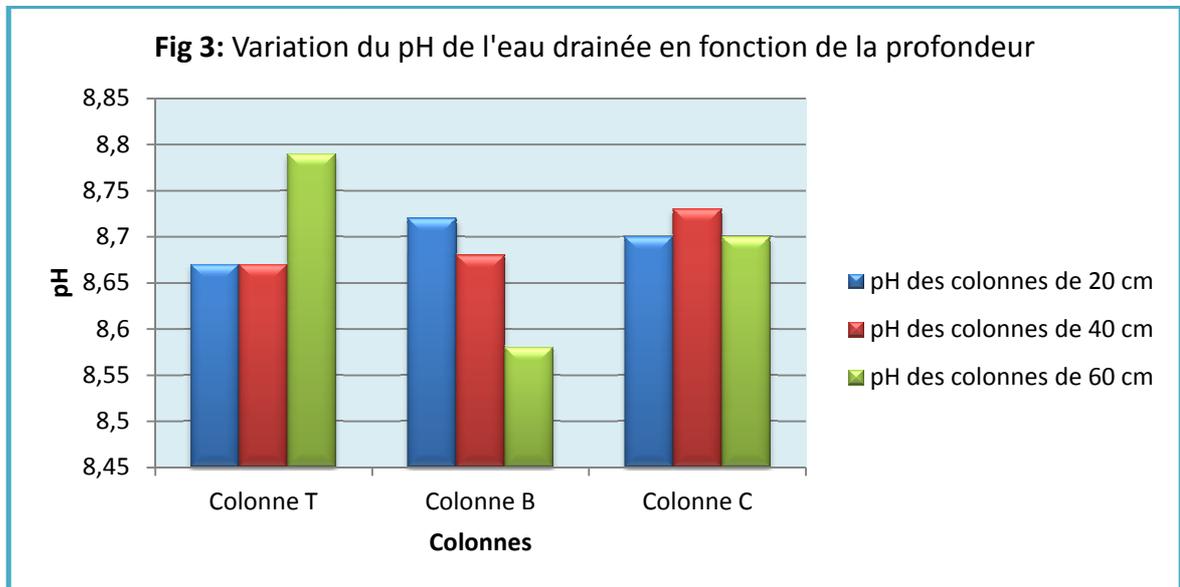
	colonne de 20 cm	colonne de 40 cm	colonne de 60 cm
PH	8,72	8,68	8,58
CE (dS/m)	2,14	1,936	1,603

✓ **Colonne C :**

	colonne de 20 cm	colonne de 40 cm	colonne de 60 cm
PH	8,70	8,73	8,70
CE (dS/m)	1,806	1,967	1,785

✓ Colonne T :

	colonne de 20 cm	colonne de 40 cm	colonne de 60 cm
PH	8,67	8,67	8,79
CE (ds/m)	0,761	1,497	1,189



3. Troisième arrosage effectué le dimanche 11/09/2011

✓ Colonne B

	colonne de 20 cm	colonne de 40 cm	colonne de 60 cm
PH	8,40	8,37	8,36
CE (dS/m)	3,44	8,39	3,01

✓ Colonne C

	colonne de 20 cm	colonne de 40 cm	colonne de 60 cm
PH	8,40	8,45	8,35
CE (dS/m)	4,4	7,28	5,07

✓ Colonne T

	colonne de 20 cm	colonne de 40 cm	colonne de 60 cm
PH	8,26	8,30	8,24
CE (dS/m)	1,19	2,4	1,8

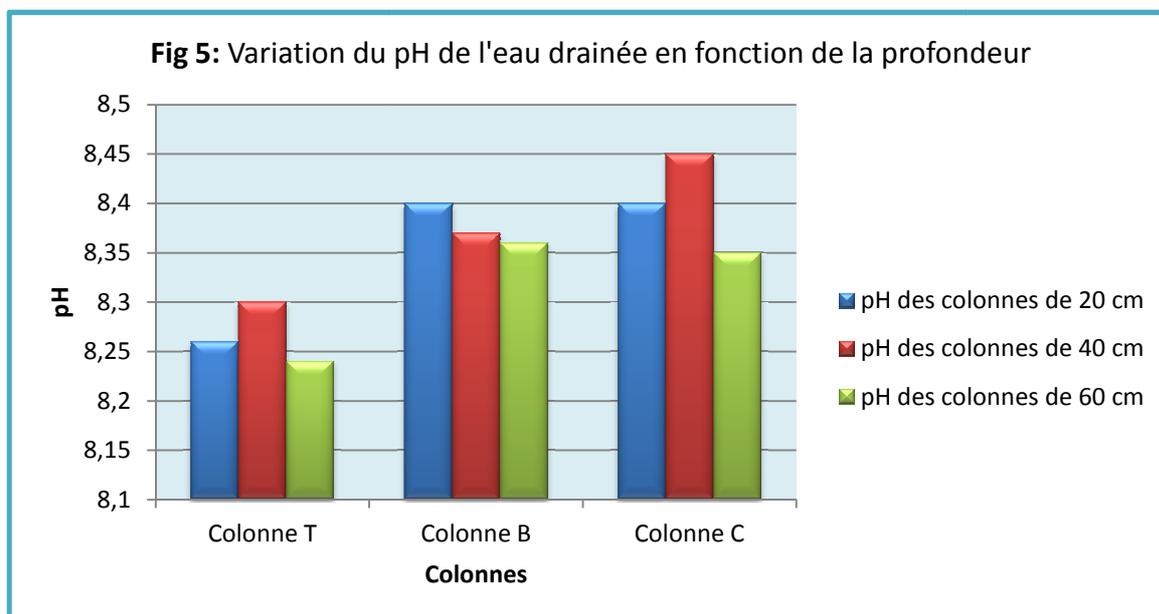
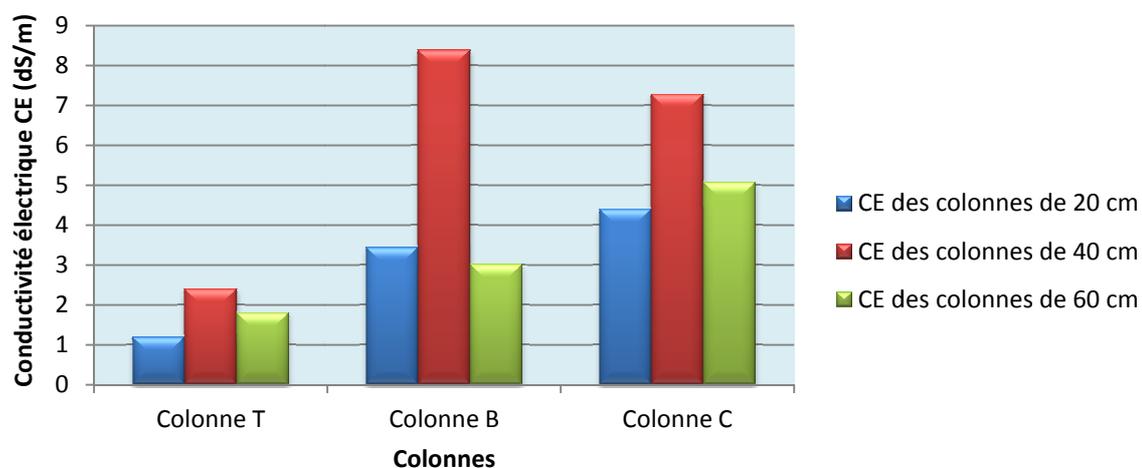


Fig 6 : Variation de la CE de l'eau drainée en fonction de la profondeur



4. Quatrième arrosage effectué le 22/09/2011

✓ Colonne T

	colonne de 20 cm	colonne de 40 cm	colonne de 60 cm
PH	8,18	8,00	7,83
CE (dS/m)	0,570	0,923	0,972

✓ Colonne B

	colonne de 20 cm	colonne de 40 cm	colonne de 60 cm
PH	8,23	7,9	7,84
CE (dS/m)	1,520	1,800	1,867

✓ Colonne C

	colonne de 20 cm	colonne de 40 cm	colonne de 60 cm
PH	8,14	7,98	7,91
CE (dS/m)	1,757	2,1	2,14

Fig 7 : Variation du pH de l'eau drainée en fonction de la profondeur

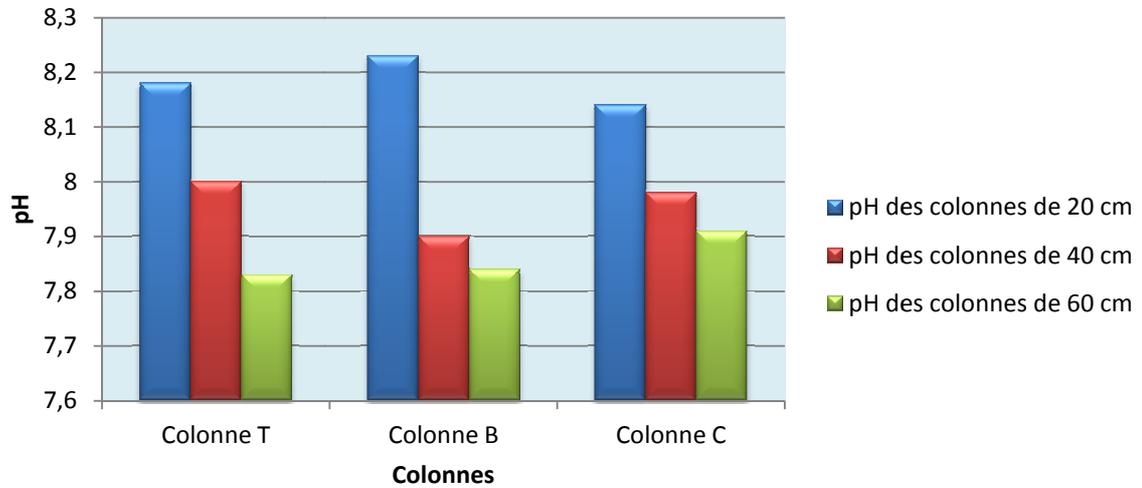
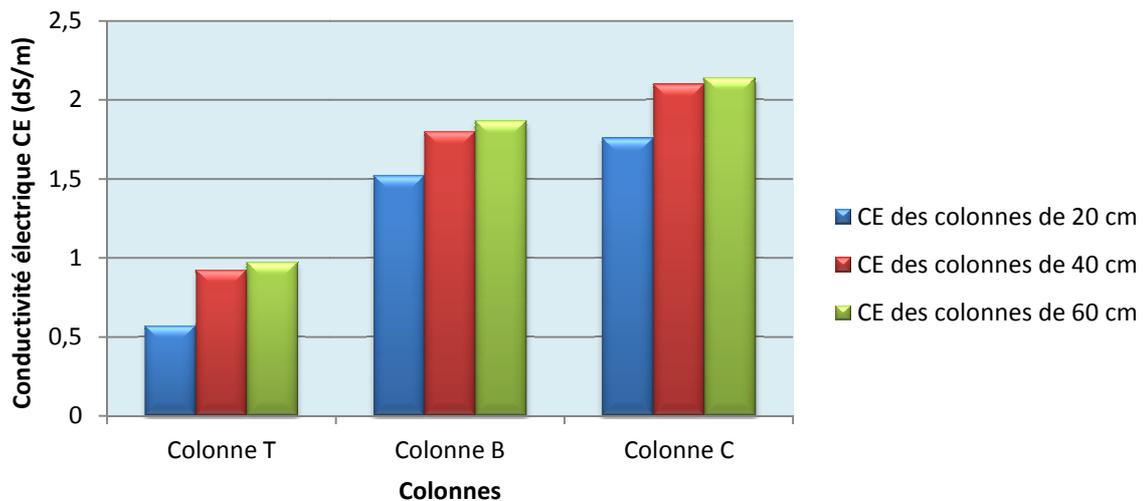


Fig 8: Variation de la CE de l'eau drainée en fonction de la profondeur



5. Cinquième arrosage effectué le 17/10/2011

✓ Colonne T

	colonne de 40 cm	colonne de 60 cm
PH	8,15	8,04
CE (µS/m)	707	854

✓ Colonne B

	colonne de 40 cm	colonne de 60 cm
PH	8,07	7,94
CE ($\mu\text{S}/\text{m}$)	1788	1832

✓ Colonne C

	colonne de 40 cm	colonne de 60 cm
PH	8,11	8,03
CE ($\mu\text{S}/\text{m}$)	2004	1974

Fig 9: Variation du pH de l'eau drainée en fonction de la profondeur

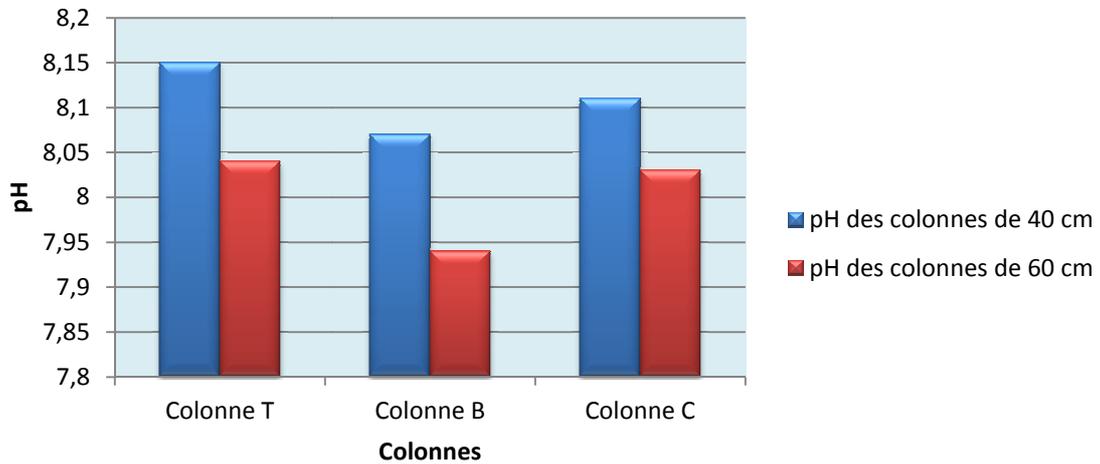
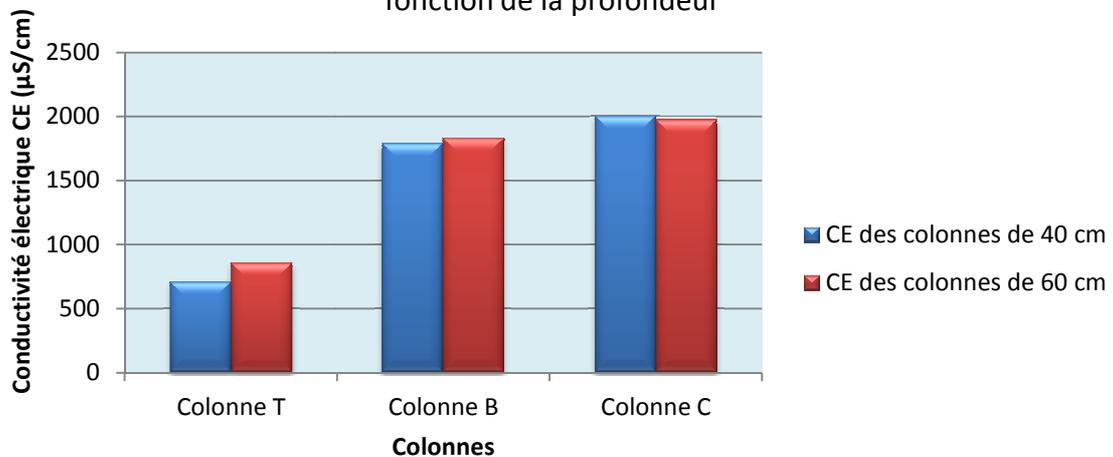


Fig 10: Variation de la conductivité électrique de l'eau drainée en fonction de la profondeur



ANNEXE 3

1. Conductivité électrique et le pH du sol mesuré le 10/09/2011

✓ Colonne Témoin

Colonne de 20 cm	pH	CE (dS/m)
à la surface	7,75	0,351
Au fond	7,9	0,365
Colonne de 40 cm		
à la surface	7,75	1,127
Au fond	7,88	0,315
Colonne de 60 cm		
à la surface	7,60	1,309
Au fond	7,75	0,318

✓ Colonne B

Colonne de 20 cm	pH	CE (dS/m)
à la surface	7,78	0,820
Au fond	7,81	0,393
Colonne de 40 cm		
à la surface	7,66	1,371
Au fond	7,88	0,348
Colonne de 60 cm		
à la surface	7,63	1,060
Au fond	7,73	0,368

✓ Colonne C

Colonne de 20 cm	pH	CE (dS/m)
à la surface	7,73	0,480
Au fond	7,72	0,417
Colonne de 40 cm		
à la surface	7,59	1,024
Au fond	7,87	0,292
Colonne de 60 cm		
à la surface	7,61	1,133
Au fond	7,80	0,342

2. Conductivité électrique et le pH du sol mesuré le 13/10/2011

✓ Colonne Témoin

Colonne de 20 cm	pH-eau	pH-KCl	CE ($\mu\text{S/m}$)
à la surface	7,91	7,18	331
Au fond	8,01	7,26	200
Colonne de 40 cm			
à la surface	7,72	7,30	918
Au fond	7,83	7,25	500
Colonne de 60 cm			
à la surface	7,81	7,28	583
Au fond	7,7	7	310

✓ Colonne B

Colonne de 20 cm	pH-eau	pH-KCl	CE ($\mu\text{S/m}$)
à la surface	7,77	7,2	850
Au fond	7,94	7,24	293
Colonne de 40 cm			
à la surface	7,80	7,23	877
Au fond	7,97	7,16	391
Colonne de 60 cm			
à la surface	7,86	7,23	944
Au fond	7,74	7,10	400

✓ Colonne C

Colonne de 20 cm	pH-eau	pH-KCl	CE ($\mu\text{S/m}$)
à la surface	7,69	7,23	1328
Au fond	7,88	7,21	365
Colonne de 40 cm			
à la surface	7,78	7,34	1174
Au fond	7,98	7,38	363
Colonne de 60 cm			
à la surface	7,83	7,32	960
Au fond	7,68	7,13	466

3. Conductivité électrique et le pH du sol mesuré le 27/10/2011

✓ Colonne T

Colonne de 40 cm	pH-eau	pH-KCl	CE ($\mu\text{S/m}$)
à la surface	7,96	7,23	373
Au fond	7,8	7,23	258
Colonne de 60 cm			
à la surface	7,86	7,24	481
Au fond	7,72	7,14	345

✓ Colonne B

Colonne de 40 cm	pH-eau	pH-KCl	CE ($\mu\text{S/m}$)
à la surface	7,84	7,4	881
Au fond	7,88	7,28	374
Colonne de 60 cm			
à la surface	7,86	7,36	861
Au fond	7,61	7,13	422

✓ Colonne C

Colonne de 40 cm	pH-eau	pH-KCl	CE ($\mu\text{S/m}$)
à la surface	7,82	7,41	861
Au fond	7,77	7,26	429
Colonne de 60 cm			
à la surface	7,74	7,28	870
Au fond	7,63	7,13	488

ANNEXE 4

✓ Norme de rejet selon l'organisation mondiale de la santé (OMS)

Paramètre de pollution	Unité	Valeurs
DBO ₅	Mg d'O ₂ /l	30
DCO	Mg d'O ₂ /l	90
MES	mg/l	30
Azote total	mg/l	50
Détergents	mg/l	1
Phosphore	mg/l	2
Température	°C	30

ANNEXE 5

Résultats de mesures des teneurs en eau après 3 irrigations

✓ Colonne T

Pressions (bars)	Humidité pondérale W%	Humidité volumique θ %
0,5	39	45,63
1	34	39,78
3	26	30,42
5	22,5	26,33
10	19	22,23

✓ Colonne B

Pressions (bars)	Humidité pondérale W%	Humidité volumique θ %
0,5	30,9	37,08
1	27,5	33
3	24	28,8
5	20,5	24,6
10	17	20,4

Résultats de mesures des teneurs en eau après 5 irrigations

✓ Colonne T

Pressions (bars)	Humidité pondérale W%	Humidité volumique θ %
0,5	39	46,4
1	34	40,46
3	26	30,94
5	22,5	26,78
10	19	22,61

✓ Colonne B

Pressions (bars)	Humidité pondérale W%	Humidité volumique θ %
0,5	30,9	38,9
1	27,5	34,65
3	24	30,24
5	20,5	25,83
10	17	21,42