

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلقايد – تلمسان-

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID



كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie



قسم الري

Département d'Hydraulique

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du Diplôme
de Master En Hydraulique :

Option : Technologie de traitement des eaux,

**Comparaison qualitative entre filtration sur sable et filtration sur
charbon actif « application aux eaux usées épurées de la STEP de
Ain El Houtz »**

Soutenu le : 06/2015

Par : M^{elle} BOUCHENAK KHELLADI RACHA MEDJDA

Devant les membres du Jury :

M^r: BENMANSOUR A.

Président

M^r: BOUMEDIENE M.

Examineur

M^r: HABI A.

Examineur

M^r: CHIBOUB FELLAH A.

Encadreur

PROMOTION: 2014 – 2015

Remerciement

Je tiens à remercier avant tout « Dieu » le tout puissant de m'avoir guidé durant toutes ces années en me donnant la force, la patience et la volonté pour réaliser ce mémoire comme il se doit.

*Je remercie tout particulièrement **Mr CHIBOUB FELLAH Abdelghani** d'avoir accepté de diriger mon travail, pour sa disponibilité, ses conseils ainsi que pour sa judicieuse orientation qui m'ont été un grand secours*

*Mes vifs remerciements vont à **Mr BENMANSOUR ABDEL HALIM** qui m'a honoré en acceptant de présider le jury.*

*Je tiens également à remercier **Mr HABI M.** et **Mr BOUMEDIENE Maamar** d'avoir bien voulu examiner mon travail.*

*Je suis particulièrement reconnaissante à **Mr TABET HELLAL** de m'avoir permis d'effectuer des analyses au sein de son laboratoire.*

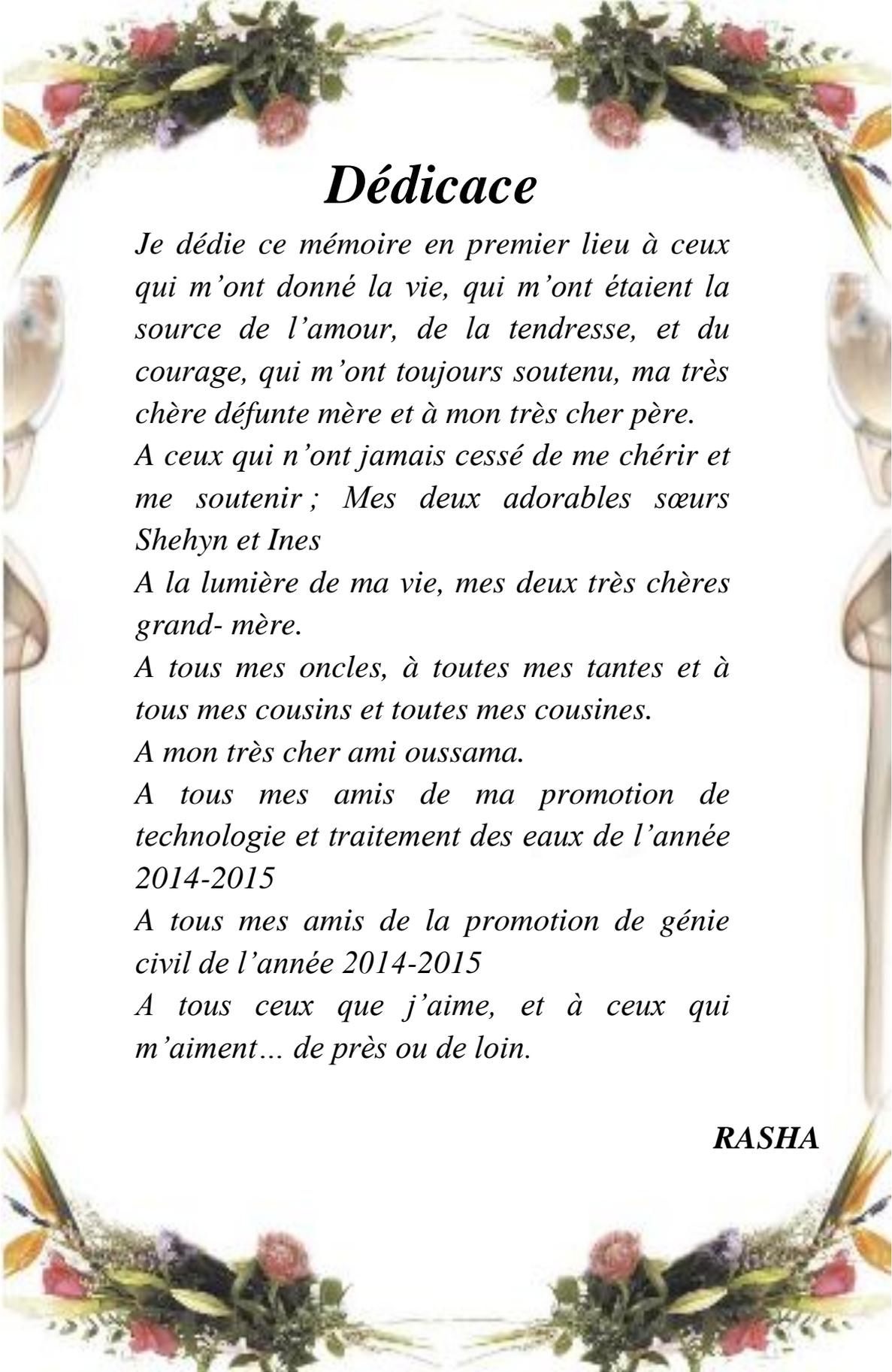
*Je remercie tout particulièrement **Mme HASSAINE HAFIDA** de m'avoir permis de faire des analyses microbiologiques au sein de son laboratoire.*

Je tiens aussi à exprimer ma vive reconnaissance envers tous les enseignants de département d'hydraulique ainsi que tous ceux qui ont participé à ma formation.

Je remercie aussi les responsables du laboratoire de traitement et épuration des eaux qui m'ont beaucoup aidé au cours des expériences.

Mes remerciements vont également à tout le personnel de : la STEP d'AÏN EL HOUTZ, le laboratoire de l'ADE, laboratoire d'analyses de l'université de TLEMCEM.

Et enfin, Je tiens à exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont permis de mener à bien ce travail.



Dédicace

Je dédie ce mémoire en premier lieu à ceux qui m'ont donné la vie, qui m'ont été la source de l'amour, de la tendresse, et du courage, qui m'ont toujours soutenu, ma très chère défunte mère et à mon très cher père.

A ceux qui n'ont jamais cessé de me chérir et me soutenir ; Mes deux adorables sœurs Shehyn et Ines

A la lumière de ma vie, mes deux très chères grand- mère.

A tous mes oncles, à toutes mes tantes et à tous mes cousins et toutes mes cousines.

A mon très cher ami oussama.

A tous mes amis de ma promotion de technologie et traitement des eaux de l'année 2014-2015

A tous mes amis de la promotion de génie civil de l'année 2014-2015

A tous ceux que j'aime, et à ceux qui m'aiment... de près ou de loin.

RASHA

Résumé

Les eaux usées posent de grands problèmes environnementaux et sanitaires lorsqu'elles sont rejetées sans aucun traitement, car ces dernières contiennent une quantité importante de polluants, les stations d'épuration ont pour rôle de réduire cette pollution (chimique, physique et microbiologique) pour permettre un rejet sans danger pour l'homme et l'environnement.

Vu que l'eau de bonne qualité se fait de plus en plus rare et que les régions arides et semi-arides souffrent de sécheresse, ces eaux usées épurées peuvent être aussi réutilisées pour combler ce déficit hydrique, mais lorsque cette réutilisation est destinée à l'irrigation, l'eau doit subir un traitement poussé pour éviter tout dommage envers la plante, le sol, et le consommateur.

L'objectif de ce travail consiste en une comparaison entre une filtration sur sable et une filtration sur charbon actif des eaux usées épurées de la STEP de Ain El Houtz, et voir si ce traitement peut être appliquée comme un traitement complémentaire du fait que la STEP fait une réutilisation pour l'irrigation. Les résultats obtenus sont assez satisfaisant du point de vue physico-chimique et microbiologique ce qui nous permet de dire que la filtration peut améliorer la qualité de l'eau épurée.

Mots clés : station d'épuration, filtration sur sable, filtration sur charbon actif, eaux usées.

Abstract

Waste water raises big environmental and sanitary problems when they are rejected without any treatment, because the latter contain an important quantity of pollutants, water-treatment plants have for role to reduce this pollution (chemical, physical and microbiological) to allow a rejection without danger for the man and the environment. Given that the good quality water becomes increasingly scarce and given that dry and semi-arid regions suffer from drought, this purified waste water can be also re-used to cover this hydric deficit, but when this re-use is intended for the irrigation, the water has to undergo a pushed treatment to avoid any damage to the plants, the ground and the consumer.

The aim of this work consist of a comparison between a sand filtration and a activated charcoal filtration of purified waste water of the WWTP of Ain El Houtz, to see if this kind of treatment can be applied as a complementary treatment for the fact that the WWTP makes a re-use for the irrigation. The obtained results are rather satisfactory from the physical, chemical and microbiological parameters what allows us to say that the filtration can improve the quality of the purified water.

Keywords: water treatment plant, sand filtration, activated charcoal filtration, waste water.

الملخص

مياه الصرف الصحي تشكل مشاكل بيئية وصحية كبيرة إذا تم الإفراج عنهم دون أي علاج، لأنها تحتوي على كمية كبيرة من الملوثات. محطات معالجة مياه الصرف الصحي لديها وظيفة للحد من هذا التلوث (الكيميائية والفيزيائية والميكروبيولوجية) للسماح بصرفها بطريقة آمنة للإنسان والبيئة.

نوعية المياه على نحو متزايد النادرة و المناطق القاحلة وشبه قاحلة تعاني من الجفاف، مياه الصرف الصحي المعالجة يمكن إعادة استخدامها لسد العجز الماء، ولكن عندما يكون هذا الغرض لإعادة استخدامها في الري يجب أن تخضع لعلاج مكثفة لمنع الأضرار التي تصيب النباتات والتربة والمستهلك.

والهدف من هذا العمل هو المقارنة بين الترشيح بالرمل و الترشيح بالكربون المنشط لمياه الصرف الصحي المعالجة من محطة معالجة مياه الصرف بعين الحوت ، ومعرفة ما إذا كان هذا العلاج يمكن تطبيقها كعلاج تكميلي لأن حطة معالجة مياه الصرف بعين الحوت تجعل إعادة الاستخدام لأغراض الري. وكانت النتائج مرضية تماما من الوجة الفيزيائية والكيميائية والميكروبيولوجية الذي يسمح لنا أن نقول أن الترشيح يمكن تحسين نوعية مياه الصرف الصحي المنقاة

الكلمات المفتاحية: محطة معالجة مياه الصرف الصحي، الترشيح الرمل، الترشيح بالكربون المنشط، مياه الصرف الصحي.

Sommaire

Introduction générale	1
CHAPITRE I : Généralités sur les eaux usées	
I.1. Introduction	3
I.2. Origine des eaux usées	3
I.2.1. Les eaux pluviales.....	3
I.2.2. Les eaux domestiques	3
I.2.3. Les eaux usées urbaines	3
I.2.4. Les eaux usées industrielles	4
I.2.5. Les eaux usées agricole.....	4
I.3. Pollution des eaux.....	4
I.3.1. Définition de la pollution	4
I.3.2. Principaux types de pollutions.....	5
I.3.2.1. Pollution minérale	5
I.3.2.2. Pollution organique	5
I.3.2.3. Pollution microbiologique.....	6
I.3.2.4. Pollution thermique	6
I.4. Composition des eaux usées	6
I.4.1. Microorganismes contenus dans les eaux usées	6
I.4.1.1. Virus	6
I.4.1.2. Bactéries	7
I.4.1.3. Protozoaires	8
I.4.1.4. Les helminthes	8
I.4.2. Eléments traces ou micropolluants	9
I.4.2.1. Micropolluants inorganiques.....	9
I.4.2.2. Micropolluants organiques.....	9
I.4.2.3. Micropolluants organométalliques.....	9
I.4.3. Les substances nutritives	10
I.4.3.1. Azote	10
I.4.3.2. Phosphore	10
I.4.3.3. Potassium	10
I.4.4. Salinité	11

I.5. Caractéristiques des eaux usées	11
I.5.1. Paramètres physiques	11
I.5.1.1. Matières en suspension	12
I.5.1.2. Matière colloïdale	12
I.5.1.3. Matières décantables	12
I.5.1.4. La turbidité	12
I.5.1.5. La température	12
I.5.1.6. Matières grasses	13
I.5.1.7. Le débit	13
I.5.2. Paramètres chimiques	13
I.5.2.1. Potentiel hydrogène (PH)	13
I.5.2.2. Conductivité	13
I.5.2.3. Demande biochimique en oxygène (DBO)	14
I.5.2.4. La demande chimique en oxygène (DCO)	14
I.5.2.5. La biodégradabilité	15
I.5.2.6. Oxygène dissous	15
I.5.2.7. Carbone organique total (COT)	15
I.5.2.8. Azote	16
I.5.2.9. Phosphore total PT	16
I.5.3. Paramètres bactériologique (Indices de contamination fécale)	16
I.5.3.1. Les germes totaux	16
I.5.3.2. Coliformes totaux	16
I.5.3.3. Coliformes fécaux	16
I.5.3.4. Streptocoques fécaux	17
I.5.3.5. Clostridium sulfito- réducteur	17
I.6. Normes de rejets	17
I.7. Conclusion	17

CHAPITRE II : Procédés d'épuration des eaux usées

II.1. Introduction	18
II.2. Les stations d'épuration (STEP) :	18
II.3. Objectif de l'épuration	19
II.4. Paramètres essentiels pour le choix d'une technologie de traitement des eaux Usées	19
II.5. Traitement des eaux usées	19

II.5.1.Prétraitement.....	19
III.5.1.1.Dégrillage	19
II.5.1.2.Dilacération.....	20
II.5.1.3.Tamissage	21
II.5.1.4.Le dessablage	21
II.5.1.5.Degraissage-déshuilage	21
II.5.2.Traitement primaire	22
II.5.2.1.Décantation	22
II.5.2.2.Flottation	23
II.5.2.3.Traitement biologique (traitement secondaire).....	24
II.5.2.4.Traitement tertiaires	31
II.6.Traitement des boues.....	33
II.6.1.Origine des boues	33
II.6.2.Les propriétés des boues.....	34
II.6.3.Filières de traitement des boues	34
II.6.3.1.L'épaississement.....	35
II.6.3.2.Digestion et stabilisation des boues	35
II.6.3.2.La déshydratation.....	35
II.6.4.Valorisation des boues.....	36
II.6.4.1.Valorisation agricole	36
II.6.4.2.Valorisation énergétique	36
II.7. Possibilités de réutilisation des eaux usées traitées.....	37
II.7.1.Réutilisation en agriculture.....	37
II.7.2.Réutilisation en zone urbaine	38
II.7.3.Réutilisation industrielle.....	38
II.7.4.Production de l'eau potable.....	38
II.7.5.La recharge de nappe.....	38
II.7.6.Le soutien d'étéage	39
II.8.Risques liés à la réutilisation des eaux usées épurées	39
II.8.1.Risque microbiologique.....	39
II.8.2.Risque chimique	39
II.8.3.Risque environnemental	40
II.9.Conclusion.....	40

CHAPITRE III : Filtration sur sable et sur charbon actif

III.1.Introduction.....	41
III.2.Caractéristiques des matériaux filtrants.....	41
III.2.1.Diamètre effectif et coefficient d'uniformité.....	41
III.2.2.Densité relative du sable.....	41
III.2.3.Granulométrie du solide.....	42
III.2.4.Masse unitaire sèche.....	42
III.2.5.Forme et caractéristiques des particules solides.....	42
III.2.6.Porosité.....	42
III.2.6.Surface spécifique de la phase solide.....	43
III.3.Théorie de la filtration.....	43
III.3.1.Masse poreuse.....	43
III.3.2.Support.....	44
III.4.Pertes de charge dans un filtre.....	44
III.5.Différents types de filtres.....	45
III.5.1.Filtration lente.....	45
III.5.1.1.Principe de fonctionnement.....	46
III.5.1.2.Mécanismes de la filtration lente.....	47
III.5.1.3.Mécanismes de transport.....	47
III.5.1.4.Mécanismes de fixation.....	47
III.5.1.5.Mécanisme de purification.....	47
III.5.1.6.Nettoyage du filtre.....	48
III.5.2.Filtration rapide.....	49
III.5.2.1.Traitement préalable.....	49
III.5.2.2.Fonctionnement d'un filtre à sable rapide.....	49
III.5.2.3.Lavage des filtres rapides.....	51
III.5.2.4.Types de filtres rapides.....	51
III.5.3.Filtration sur charbon actif.....	53
III.6.Conclusion.....	54

CHAPITRE IV : Matériel et méthodes

IV.1. Objectif de l'étude.....	55
IV.2.Description et fonctionnement du pilote TE 400.....	55

IV.2.1.Procédure de la filtration sur sable.....	57
IV.2.2.Procédure de lavage du sable.....	58
IV.3. Protocoles expérimentaux.....	60
IV.3.1. Analyses physico-chimiques.....	60
IV.3.1.1.Matières en suspension par la méthode par filtration sur fibre de verre	60
IV.3.1.2.Alcalinité par la méthode titrimétrique de dosage du TA et du TAC	61
IV.3.1.3.Dureté ou titre hydrotimétrique (TH) par titrimétrie à l'EDTA.....	62
IV.3.1.4.Calcium par la méthode titrimétrique à l'EDTA.....	63
IV.3.1.5. Détermination du magnésium	64
IV.3.1.6.Chlorure par la méthode de Mohr	64
IV.3.1.7.Demande chimique en oxygène (DCO)	65
IV.3.1.8.Conductivité	66
IV.3.1.9.pH.....	67
IV.3.1.10.Température	67
IV.3.1.11.Dioxyde de carbone dissous (CO ₂ dissout)	67
IV.3.1.12.Turbidité	67
IV.3.2.Analyses microbiologiques	68
IV.3.2.1.Dénombrement de la flore microbienne.....	69
IV.3.2.2.Recherche et dénombrement des coliformes et d'E. Coli présumé.....	70
IV.3.2.3.Dénombrement des Enterococcus	70
IV.3.2.4.Recherche et dénombrement des bactéries sulfito-réductrices et de leurs spores (clostridium).....	71
IV.3.2.5.Recherche des Salmonella.....	72
IV.3.3.Caractéristiques du matériau filtrant utilisé	72
IV.3.3.1.Analyse granulométrique	73
IV.3.3.2.Diamètre effectif (DE) et du coefficient d'uniformité (Cu).....	73
IV.3.3.3. Masse volumique apparente	73
IV.3.3.4. Masse volumique réelle.....	73

CHAPITRE V : Résultats et interprétations

V.1.Résultats des caractéristiques du sable	75
V.1.1. Analyse granulométrique	75
V.1.2.Diamètres effectifs et coefficients d'uniformité.....	80
V.1.3. Détermination des masses volumiques	81

V.1.3.1. Masse volumique apparente	81
V.1.3.2. Masse volumique réelle	81
V.1.3.3. Densité réelle	81
V.2. Etude de la filtration sur sable	82
V.2.1. Etude des pertes de charge	82
V.2.1.1. Influence des différentes positions des vannes	83
V.2.1.2. Influence des différents niveaux d'eau	86
V.2.1.3. Influence des différents débits	89
V.2.1.4. Influence des MES	92
V.2.1.4. Influence des concentrations	94
V.2.1.5. Influence de la granulométrie du sable	96
V.2.2. Etude de la turbidité	99
V.2.2.1. Influence des différentes concentrations	99
V.2.2.2. Influence de la granulométrie du sable	102
V.2.2.3. Influence de la taille des MES	106
V.3. Etude de la filtration sur sable appliquée sur les eaux usées épurées de la STEP de Ain El Houtz	107
V.3.1. Etude des pertes de charge en fonction du temps	107
V.3.2. Résultats des analyses physico-chimiques	109
V.3.2.1. Conductivité	109
V.3.2.2. Température	109
V.3.2.3. pH	110
V.3.2.4. Turbidité	111
V.3.2.5. chlore, calcium, CO ₂ dissous, MES, DCO, dureté, TA, TAC, magnésium	111
V.3.3. Résultats des analyses microbiologiques	113
V.4. Etude de la filtration sur charbon actif appliquée sur les eaux usées épurées de la STEP de Ain El Houtz	115
V.4.1. Résultats des analyses physico-chimiques	116
V.4.2. Résultats des analyses microbiologiques	118
V.5. Comparaison entre filtration sur sable et filtration sur charbon actif	120
V.6. Conclusion	123
Conclusion générale	125

Références bibliographiques

Annexes

Liste des tableaux

Tableau I. 1: regroupe les principaux virus pathogènes potentiellement présents dans les eaux usées	7
Tableau I. 2: Principales bactéries pathogènes présentes dans les eaux usées	7
Tableau I. 3: Principaux protozoaires présents dans les eaux usées	8
Tableau I. 4: Principaux helminthes présents dans les eaux usées	8
Tableau I. 5: Quelques éléments chimiques présents dans les eaux usées urbaines	10
Tableau I. 6: Relation entre la conductivité et la minéralisation	14
Tableau I.7 : Les normes de rejets de l'OMS et celles de l'ALGÉRIE	17
Tableau II. 1: Efficacité épuratoire de la décantation	23
Tableau II. 2: Teneurs limites dans les boues et dans les sols en substances chimiques (règlementation française)	37
Tableau III. 1: Rendement de filtres lents sur sable	48
Tableau V. 1: Résultats de l'analyse granulométrique du sable N°1	75
Tableau V. 2: Résultats de l'analyse granulométrique du sable N°2	75
Tableau V. 3: Résultats de l'analyse granulométrique du sable N°3	76
Tableau V. 4: Vitesses de filtration pour chaque débit utilisé	79
Tableau V. 5: Rendement épuratoire de la filtration sur sable sur les éléments chimiques ...	108
Tableau V. 6: Résultats des analyses microbiologiques après filtration sur sable	109
Tableau V. 7: Rendement épuratoire de la filtration sur sable sur les micro-organismes	113
Tableau V. 8: Rendement épuratoire de la filtration sur CAG sur les éléments chimiques	111
Tableau V. 9: résultats des analyses microbiologiques après filtration sur sable et sur CAG	114
Tableau V. 10: Rendement épuratoire de la filtration sur sable et sur CAG	115
Tableau V. 11: Comparaison des rendements épuratoire sur les micro-organismes entre filtration sur sable et sur CAG	117
Tableau V. 12: Comparaison des rendements épuratoires de la filtration sur sable et sur CAG	119

Liste des photos

Photo II. 1: Dessableur rectangulaire	21
Photo IV. 1: Pilote TE400	56
Photo IV. 2: Balance de précision	61
Photo IV. 3: Etuve	61
Photo IV. 4: Dispositif de filtration sous vide	62
Photo IV. 5: Réactifs pour la mesure de la DCO	66
Photo IV. 6: Appareil de mesure de la DCO	66
Photo IV. 7: Appareil qui mesure la conductivité, la température et le pH	67
Photo IV. 8: Turbidimètre	68
Photo IV. 9: Appareil de filtration sur membrane	69
Photo V. 1: Représentation des 3 niveaux de la colonne	85

Photo V. 2: Echantillons avant incubation.....	111
Photo V. 3: Echantillons après incubation.....	111
Photo V. 4: Echantillon avant incubation	116
Photo V. 5: Echantillon après incubation	116

Liste des figures

Figure II. 1: Dégrileur	20
Figure II. 2: Décanteur rectangulaire à pont	23
Figure II. 3: Flottation	23
Figure II. 4: Composition de la boue activée.....	25
Figure II. 5: Epuration biologique par boue activée	25
Figure II. 6: Lit bactérien	26
Figure II. 7: Schéma de principe d'un disque biologique	27
Figure II. 8: Lagunage naturel	29
Figure II. 9: Filtre à écoulement horizontal	30
Figure II. 10: Filtre à écoulement vertical	30
Figure II. 11: Système drainé sur sol en place	31
Figure II. 12: Système drainé avec un massif.....	31
Figure III. 1: Filtration lente sur sable	46
Figure III. 2: Filtre à sable rapide	50
Figure III. 3: filtre sous pression (en coupe).....	52
Figure III. 4: Transfert du soluté lors de son adsorption sur charbon activé	53
Figure IV. 1: Filtration sur membrane	69
Figure V. 1: Influence des positions des vannes sur les pertes de charge pour le sable N°2, Q=30l/h, c (bentonite)=0.5g/l, niveau2	80
Figure V. 2: Influence des positions des vannes sur les pertes de charge pour le sable N°2, Q=30l/h, c (chaux)=0.5g/l, niveau3	80
Figure V. 3: Influence des positions des vannes sur les pertes de charge pour le sable N°1, Q=50l/h, c (bentonite)=0.5g/l, niveau3	80
Figure V. 4: Influence des positions des vannes sur les pertes de charge pour le sable N°1, Q=50l/h, c (chaux)=0.3g/l, niveau3	81
Figure V. 5: Influence des positions des vannes sur les pertes de charge pour le sable N°3, Q=30l/h, c (bentonite)=0.5g/l, niveau1	81
Figure V. 6: Influence des positions des vannes sur les pertes de charge pour le sable N°3, Q=30l/h, c (chaux)=0.5g/l, niveau1	81
Figure V. 7: Influence des positions niveaux sur les pertes de charge pour le sable N°1, Q=30l/h, c (bentonite)=0.5g/l, VA4O, VA3O	82
Figure V. 8: Influence des positions niveaux sur les pertes de charge pour le sable N°1, Q=50l/h, c (chaux)=0.5g/l, VA4O, VA3O	83
Figure V. 9: Influence des positions niveaux sur les pertes de charge pour le sable N°2, Q=80l/h, c (chaux)=0.3g/l, VA4O, VA3O	83
Figure V. 10 : Influence des positions niveaux sur les pertes de charge pour le sable N°2, Q=80l/h, c (chaux)=0.5g/l, VA4O, VA3O.....	83

Figure V. 11: Influence des positions niveaux sur les pertes de charge pour le sable N°3, Q=30l/h, c (bentonite)=0.5g/l, VA4O, VA3O	84
Figure V. 12: Influence des positions niveaux sur les pertes de charge pour le sable N°3, Q=50l/h, c (chaux)=0.3g/l, VA4O, VA3O	84
Figure V. 13. : Influence des débits sur les pertes de charge pour le sable N°1, niveau3, VA4O, VA3O, c (bentonite)=0.5g/l,	86
Figure V. 14: Influence des débits sur les pertes de charge pour le sable N°1, niveau3, VA4O, VA3O, c (chaux)=0.3g/l,.....	86
Figure V. 15: Influence des débits sur les pertes de charge pour le sable N°2, niveau3, VA4O, VA3O, c (bentonite)=0.1g/l,	86
Figure V. 16: Influence des débits sur les pertes de charge pour le sable N°2, niveau3, VA4O, VA3O, c (chaux)=0.5g/l,.....	87
Figure V. 17: Influence des débits sur les pertes de charge pour le sable N°3, niveau3, VA4O, VA3O, c (bentonite)=0.5g/l,	87
Figure V. 18: Influence des débits sur les pertes de charge pour le sable N°1, niveau3, VA4O, VA3O, c (chaux)=0.5g/l,.....	87
Figure V. 19: Influence des type MES sur les pertes de charge pour le sable N°1, niveau3, VA4O, VA3O, C=0.5g/l, Q=30 l/h	88
Figure V. 20: Influence des type MES sur les pertes de charge pour le sable N°2, niveau3, VA4O, VA3O, C=0.5g/l, Q=30 l/h	89
Figure V. 21: Influence des type MES sur les pertes de charge pour le sable N°3, niveau3, VA4O, VA3O, C=0.5g/l, Q=30 l/h	89
Figure V. 22: Influence des concentrations sur les pertes de charge pour le sable N°1, niveau3, VA4O, VA3O, bentonite, Q=30 l/h	90
Figure V. 23: Influence des concentrations sur les pertes de charge pour le sable N°1, niveau3, VA4O, VA3O, chaux, Q=30 l/h.....	90
Figure V. 24: Influence des concentrations sur les pertes de charge pour le sable N°2, niveau3, VA4O, VA3O, bentonite, Q=30 l/h	91
Figure V. 25: Influence des concentrations sur les pertes de charge pour le sable N°2, niveau3, VA4O, VA3O, chaux, Q=30 l/h.....	91
Figure V. 26: Influence des concentrations sur les pertes de charge pour le sable N°3, niveau3, VA4O, VA3O, bentonite, Q=30 l/h	91
Figure V. 27: Influence des concentrations sur les pertes de charge pour le sable N°3, niveau3, VA4O, VA3O, chaux, Q=30 l/h.....	92
Figure V. 28 : Influence de la granulométrie du sable sur les pertes de charge pour le niveau3, VA4O, VA3O, Q=30 l/h, c (bentonite)=0.1g/l,	92
Figure V. 29: Influence de la granulométrie du sable sur les pertes de charge pour le niveau3, VA4O, VA3O, Q=30 l/h, c (bentonite)=0.3g/l,	93
Figure V. 30: Influence de la granulométrie du sable sur les pertes de charge pour le niveau3, VA4O, VA3O, Q=30 l/h, c (bentonite)=0.5g/l,	93
Figure V. 31: Influence de la granulométrie du sable sur les pertes de charge pour le niveau3, VA4O, VA3O, Q=30 l/h, c (chaux)=0.1g/l,.....	93
Figure V. 32: Influence de la granulométrie du sable sur les pertes de charge pour le niveau3, VA4O, VA3O, Q=30 l/h, c (chaux)=0.3g/l,.....	94

Figure V. 33: Influence de la granulométrie du sable sur les pertes de charge pour le niveau3, VA4O, VA3O, Q=30 l/h, c (chaux)=0.5g/l,.....	94
Figure V. 34: Influence de la concentration sur la turbidité pour sable N°1, VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, bentonite,.....	95
Figure V. 35: Influence de la concentration sur la turbidité pour sable N°2, VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, bentonite,.....	96
Figure V. 36: Influence de la concentration sur la turbidité pour sable N°3, VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, bentonite,.....	96
Figure V. 37 : Influence de la concentration sur la turbidité pour sable N°1, VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, chaux,	96
Figure V. 38: Influence de la concentration sur la turbidité pour sable N°2, VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, chaux,	97
Figure V. 39: Influence de la concentration sur la turbidité pour sable N°3, VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, chaux,	97
Figure V. 40: Influence de la granulométrie du sable pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c (bentonite)=0.1g/l	98
Figure V. 41 : Influence de la granulométrie du sable pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c (bentonite)=0.3g/l	98
Figure V. 42: Influence de la granulométrie du sable pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c (bentonite)=0.5g/l	99
Figure V. 43: Influence de la granulométrie du sable pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c (chaux)=0.1g/l	99
Figure V. 44: Influence de la granulométrie du sable pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c (chaux)=0.3g/l	99
Figure V. 45: Influence de la granulométrie du sable pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c (chaux)=0.5g/l	100
Figure V. 46: Influence des types de MES sur la turbidité pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c=0.1g/l, sable N°1	101
Figure V. 47: Influence des types de MES sur la turbidité pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c=0.1g/l, sable N°2.....	101
Figure V. 48: Influence des types de MES sur la turbidité pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c=0.1g/l, sable N°3	101
Figure V. 49: Influence des types de MES sur la turbidité pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c=0.3g/l, sable N°1	102
Figure V. 50: Influence des types de MES sur la turbidité pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c=0.3g/l, sable N°2.....	102
Figure V. 51: Influence des types de MES sur la turbidité pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c=0.3g/l, sable N°3.....	103
Figure V. 52: Evolution des pertes de charges du filtre au cours du temps.....	104
Figure V. 53: Evolution de la conductivité au cours de la filtration sur sable.....	105
Figure V. 54: Evolution de la température au cours de la filtration sur sable	106
Figure V. 55: Evolution du pH au cours de la filtration sur sable	106
Figure V. 56: Evolution de la turbidité au cours de la filtration sur sable.....	107
Figure V. 57: Evolution de quelques paramètres au cours de la filtration sur sable	108

Figure V. 58: Comparaison des analyses microbiologique de la filtration sur sable avec les normes de l'OMS	110
Figure V. 59: Evolution de quelques paramètres au cours de la filtration sur sable et sur CAG.....	112
Figure V. 60: Evolution de quelques paramètres au cours de la filtration sur sable et sur CAG.....	113
Figure V. 61 : Comparaison des analyses microbiologique de la filtration sur sable avec les normes de l'OMS	115
Figure V. 62: Comparaison microbiologique entre filtration sur sable et filtration sur charbon actif	117
Figure V. 63: Comparaison physico-chimique entre filtration sur sable et sur charbon actif	118
Figure V. 64: Comparaison entre filtration sur sable et filtration sur charbon actif (suite)....	118

Liste des annexes

Annexe 1: Tableau des valeurs limites des paramètres de rejet dans un milieu récepteur (Journal Officiel de la République Algérienne, 2006)
Annexe 2: Concentrations maximales en éléments traces minéraux recommandées dans les eaux d'irrigation
Annexe 3: Tableau des normes extrêmes limitées aux eaux d'irrigation
Annexe 4: l'arrêté interministériel du 8 Safar 1433 correspondant au 2 Janvier 2012 fixant les spécifications des eaux usée utilisées à des fins d'irrigation
Annexe 5: Courbe granulométrique du sable N°1
Annexe 6: Courbe granulométrique du sable N°2
Annexe 7 : Courbe granulométrique du sable N°3
Annexe 8: nombre le plus probable et intervalle de confiance
Annexe 9: Normes microbiologiques de l'OMS sur les eaux usées épurées pour l'irrigation
Annexe 10: Tableaux des pertes de charges de la filtration par le sable N°1
Annexe 11: Tableaux des pertes de charges de la filtration par le sable N°2
Annexe 12: Tableaux des pertes de charges de la filtration par le sable N°3
Annexe 13: Tableau de la turbidité après filtration avec le sable N°1
Annexe 14: Tableau de la turbidité après filtration avec le sable N°2
Annexe 15: Tableau de la turbidité après filtration avec le sable N°3
Annexe 16: tableau des pertes de charge pour la filtration sur sable des eaux usées épurées de la STEP de Ain El Houtz
Annexe 17: Tableau des résultats des analyses de l'eau usée épurée avant et après filtration sur sable
Annexe 18: Tableau des résultats d'analyses de l'eau usées épurées avant et après filtration sur sable (suite)
Annexe 19: Tableau des résultats d'analyses de l'eau usées épurées avant et après filtration sur sable et sur CAG

Annexe 20: Tableau des résultats d'analyses de l'eau usées épurées avant et après filtration sur sable et sur CAG (suite)

Annexe 21: Tableau de comparaison entre filtration sur sable et filtration sur CAG

Annexe 22: Tableau de comparaison entre filtration sur sable et sur CAG (suite)

Annexe 23: Tableau de comparaison entre filtration sur sable et filtration sur CAG (suite)

Liste des abréviations

PCB : PolyChloroBiphényles

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

MES : Matière en suspension

MVS : Matière volatile sèche

MMS : Matière minérale sèche

pH : Potentiel hydrogène

DBO : Demande biochimique en oxygène

DCO : Demande chimique en oxygène

COT : Carbone organique total

PT : Phosphore total

OMS : Organisation mondiale de la santé

NTK : Azote de KJELDAL

STEP : Station d'épuration

Norg : Azote organique

UV : Ultra violet

EUT : Eau usées traitée

DE : Diamètre effectif

CU : Coefficient d'uniformité

CAG : Charbon actif en grain

PVC : Polychlorure de vinyle

DN : Diamètre nominal

VR : Vanne de réglage du débit
VD : Vanne de distribution
VA : Vanne d'arrêt
TA : Titre alcalimétrique simple
TAC : Titre alcalimétrique complet
TH : Titre hydrotimétrique
EDTA : Ethylène diamine tétra-acétique
NPP : Nombre le plus probable
VAF : Vanne A fermée
VAO : Vanne A ouverte
UFC : Unité formant colonie
NTU : Nephelometric turbidity unit

Liste des symboles

y_s : Densité relative du sable.
 m_e : Masse d'eau (g).
 m_s : Masse du sable sec (g).
 m_{es} : Masse du mélange d'eau et de sable (g).
 B_s : Volume des solides
 B_v : Volume des vides
 B_t : Volume total du matériau
 R_e : Nombre de Reynolds
 e : porosité du média
 Φ : facteur de forme
 g : accélération gravitationnelle (9,81 m/s²)
 d : diamètre du média (m)
 U : vitesse superficielle (m/s)

H_L : Perte de charge (m)

k_p : perméabilité hydraulique (m/s)

L : profondeur du média (m).

f₁ : coefficient de friction

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

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

V : Volume d'eau utilisé

c : Concentration en milliéquivalents par litre de la solution d'EDTA.

v₁ : Volume en ml de la solution d'EDTA.

v₂ : Volume d'échantillon

V₀: Volume de sulfate de fer et d'ammonium (II) nécessaire au dosage (ml).

V₁ : Volume de sulfate de fer et d'ammonium (II) nécessaire à l'essai à blanc (ml).

T : Titre de la solution de sulfate de fer (II) et d'ammonium (en mol/L).

V_{NaOH}: Nombre de millilitres versés de NaOH.

ρ_{apparente} : Masse volumique apparente

ρ_{réelle} : Masse volumique apparente

Pt : Pourcentage des tamisât cumulés

Pr : Masse des Pourcentage des refus cumulés

Mc : Refus cumulés(g)

Mi : Masse des refus (g)

Q : Débit

V_i : Vitesse de passage

S : Section

D : Diamètre

C : Concentration de MES

T : Température

Introduction générale

L'eau est source de vie. Elle est essentielle à l'ensemble des êtres et écosystèmes vivants.

L'humanité se trouve devant une croissance alarmante de la pollution des eaux par des matières organiques diverses, des pesticides, des détergents, des métaux lourds, et autres substances toxiques.

La qualité de l'eau distribuée au robinet du consommateur dépend de la qualité de l'eau de la rivière, ou de la nappe souterraine dans laquelle cette eau est prélevée et des traitements effectués après ce prélèvement. Cette pollution engendre des difficultés de l'alimentation en eau potable dont son obtention est une opération de plus en plus onéreuse. Les effets de la pollution des cours d'eau, des lacs, des mers, sont souvent spectaculaires. Les eaux usées quand elles sont en excès, les déchets industriels, les pesticides, les détergents, et autres polluants, détruisent la flore et la faune aquatiques [1] [2].

Les chiffres publiés par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) en 2004 révèlent que chaque année 1.8 million de personnes dont 90% d'enfants de moins de cinq ans, vivants pour la plupart dans les pays en voie de développement, meurent de maladies diarrhéiques. Or, à l'échelle mondiale, 88% des maladies diarrhéiques sont imputables à la mauvaise qualité de l'eau de boisson et à un assainissement insuffisant des eaux usées. L'eau est devenue un enjeu stratégique mondial dont la gestion doit impérativement s'intégrer dans une perspective politique de développement durable.

Certains affirment en effet qu'elle sera, au troisième millénaire, un enjeu de guerres comme le pétrole l'a été et l'est encore aujourd'hui.

L'épuration des eaux usées s'est donc imposée pour préserver la qualité des milieux naturels et notamment les eaux de surface et souterraines. L'eau épurée est actuellement en majorité rejetée [3].

Les eaux usées épurées peuvent être considérées comme une source en eau non négligeable pour être réutilisées par l'homme dans différents domaines (l'irrigation, l'industrie). Elles peuvent constituer en même temps une solution pour diminuer l'exploitation intensive des ressources limitées et mal réparties de la terre et par conséquent, protéger les cours d'eau, les plans d'eau, voire les eaux souterraines [4].

L'utilisation des eaux résiduaires traitées est souvent confrontée à un certain nombre d'obstacles, notamment d'ordres sanitaire et chimique. Pour ces raisons, l'amélioration de la qualité des effluents traités est nécessaire avant leur réutilisation.

La filtration lente sur sable est le plus ancien mode de traitement des eaux. En effet, la première installation de filtration à l'échelle industrielle date de 1829 en Angleterre. L'efficacité de ce procédé est reconnue comme moyen de prévention contre les épidémies d'origine hydrique et des études bactériologiques ont démontré son pouvoir d'élimination des germes pathogènes. La filtration sur sable est une technique très souple, raison pour laquelle elle a été retenue par l'ONU lors de la décennie de l'eau (1980-1990) comme technique de choix pour le traitement de l'eau dans les pays en voie de développement [3].

Le but de notre travail est de comparer la filtration sur sable et la filtration sur charbon actif sur les eaux épurées de la STEP d' AÏN EL HOUTZ et voir comment cette méthode peut améliorer son rendement épuratoire en vue d'une réutilisation agricole.

Pour atteindre cet objectif on a utilisé le pilote de filtration sur sable TE400 disponible dans notre faculté.

Nous avons décomposé notre travail en deux parties :

1) Partie bibliographique qui comporte:

Chapitre I : Généralités sur les eaux usées

Chapitre II : Procédés d'épuration des eaux usées (avec une partie sur la réutilisation des eaux usées épurées)

Chapitre III : Notions sur la filtration sur sable et sur charbon actif

2) Partie expérimentale qui comporte :

Chapitre IV : présentation du matériel et les méthodes analytiques utilisés

Chapitre V : donne les résultats expérimentaux trouvés ainsi que leurs interprétations.

Une conclusion est donnée pour clore notre étude.

I.1. Introduction:

Les eaux usées sont toutes les eaux des activités domestiques, agricoles et industrielles chargées en substances toxiques qui parviennent dans les canalisations d'assainissement [5].

Elles sont généralement chargées de débris de matières minéralisées dissoutes et de produits organiques en suspension, ainsi que de nombreux micro-organismes pathogènes, menaçant la qualité de l'environnement dans son ensemble.

Les eaux usées représentent une faible fraction du volume des ressources en eau utilisable mais leur qualité très médiocre exige leur collecte et acheminement par un réseau d'égout vers une usine de dépollution pour éliminer toutes les substances nuisibles avant leur rejet dans le milieu naturel [6].

I.2. Origine des eaux usées :

Il existe généralement différents types d'eaux résiduelles en fonction de leur origine ou de leur mode de collecte qui influence beaucoup leur composition et leurs caractéristiques [6].

I.2.1. Les eaux pluviales :

Ce sont des eaux de ruissellement qui se forment après une précipitation. Elles peuvent être particulièrement polluées surtout en début de pluie par deux mécanismes :

- Le lessivage des sols et des surfaces imperméabilisées.
- La remise en suspension des dépôts des collecteurs par temps sec [7].

I.2.2. Les eaux domestiques :

Elles se répartissent en deux catégories : les eaux ménagères des salles de bain et des cuisines qui sont généralement chargées de substances biodégradables, de détergents, polluants cosmétiques et médicamenteux. La deuxième catégorie d'eaux usées domestiques sont les «eaux vannes » comprenant les rejets de toilettes. Ces dernières sont chargées de diverses matières organiques azotées et de germes fécaux [8].

I.2.3. Les eaux usées urbaines :

Les eaux usées urbaines comprennent les eaux usées domestiques et les eaux de Ruissellement. Les eaux qui ruissellent sur les toitures, les cours, les jardins, les Voies

publiques et les marchés entraînent toutes sorte de déchets minéraux et organiques : de la terre, des limons, des déchets végétaux et toutes sortes de micropolluants (hydrocarbures, pesticides) [9].

I.2.4. Les eaux usées industrielles :

La composition des eaux résiduaires industrielles présente une extrême diversité selon le type d'industrie concernée (chimique, pétrochimique, pharmaceutique, minière, ...) [10]. En plus des matières organiques, azotées ou phosphorées, elles sont chargées en différentes substances chimiques organiques et métalliques (graisses, hydrocarbures, métaux, acides, bases, matières. Avant d'être rejetées dans les réseaux de collecte, les eaux usées industrielles doivent faire l'objet d'un traitement. Elles ne sont mélangées aux eaux domestiques que lorsqu'elles ne présentent plus de danger pour les réseaux de collecte et ne perturbent pas le fonctionnement des stations d'épurations [5].

I.2.5. Les eaux usées agricole :

Le secteur agricole reste le plus grand consommateur des ressources en eau. Les pollutions dues aux activités agricoles sont de plusieurs natures :

- Apport des eaux de surface de nitrate et de phosphate utilisés comme engrais
- Apport de pesticides chlorés ou phosphorés de désherbants d'insecticides
- Apport de sulfate de cuivre de composés arsenicaux destinés à la protection de vignes en région viticole [7].

I.3. Pollution des eaux :

I.3.1. Définition de la pollution :

La pollution est due à toute substance physique, chimique ou biologique rejetée dans une eau naturelle qui perturbe l'équilibre de cette eau, induit d'importantes nuisances (mauvaise odeur, fermentation) et qui se répercute, à court ou à long terme, sur notre organisme à travers, la chaîne alimentaire de laquelle nous dépendons [11]. La pollution de l'eau connaît différentes origines : naturelle, domestique, industrielle et agricole.

L'origine naturelle implique un phénomène tel que la pluie, lorsque par exemple l'eau de ruissellement passe à travers des terrains riches en métaux lourds ou encore lorsque les précipitations entraînent les polluants de l'atmosphère vers le sol.

L'origine domestique concerne les eaux usées ménagères (salle de bains, cuisine, ...etc.), les eaux vannes (WC...etc.), ainsi que les eaux rejetées par les hôpitaux, commerces,...etc.

Quant à **l'origine agricole et industrielle**, elle concerne par exemple les eaux surchargées par des produits issus de l'épandage (engrais, pesticides) ou encore les eaux contaminées par des résidus de traitement métallurgique, et de manière plus générale, par des produits chimiques tels que les métaux lourds, les hydrocarbures...etc [9].

I.3.2.Principaux types de pollutions :

I.3.2.1.Pollution minérale :

La pollution minérale des eaux peut provoquer le dérèglement de la croissance végétale ou trouble physiologique chez les animaux. Le polluant minéral ce sont principalement les métaux lourds et les éléments minéraux nutritifs.

- **Les métaux lourds** : Ces éléments (mercure, zinc, chrome), bien qu'ils puissent avoir une origine naturelle (roches du sous-sol, minerais), proviennent essentiellement de la contamination des eaux par des rejets d'activités industrielles diverses (traitements de surface, industries minières).
- **Les éléments minéraux nutritifs** : Nitrates et phosphates : provenant pour l'essentiel de l'agriculture et des effluents domestiques, il est à l'origine du phénomène d'eutrophisation.

I.3.2.2.Pollution organique :

C'est les effluents chargés de matières organiques fermentescibles (biodégradables), fournis par les industries alimentaires et agroalimentaires (laiteries, abattoirs, sucreries...), et par les effluents domestique (déjections humaines, graisses), La première conséquence de cette pollution consommation d'oxygène dissous de ces eaux. Les polluants organiques ce sont principalement les détergents, les pesticides et les hydrocarbures.

- **Les détergents** : Sont des composés tensioactifs synthétiques dont la présence dans les eaux est due aux rejets d'effluent urbains et industriels [9].
- **Les hydrocarbures** : Ils sont contenus dans certains effluents industriels et produits par le lessivage des sols urbains, des routes.
- **Les produits phytosanitaires (pesticides)** : Désherbants, insecticides et fongicides, ils sont composés de molécules fortement actives sur les organismes [12].

I.3.2.3.Pollution microbiologique :

Les eaux usées contiennent tous les microorganismes excrétés avec les matières fécales. Cette flore entérique normale est accompagnée d'organismes pathogènes. L'ensemble de ces organismes peut être classé en quatre grands groupes, par ordre croissant de taille : les virus, les bactéries, les protozoaires et les helminthes.

I.3.2.4.Pollution thermique :

Les eaux rejetées par les usines utilisant un circuit de refroidissement de certaines installations (centrales thermiques); l'élévation de température qu'elle induit diminue la teneur en oxygène dissous. Elle accélère la biodégradation et la prolifération des germes [9].

I.4.Composition des eaux usées :

I.4.1.Microorganismes contenus dans les eaux usées :

I.4.1.1.Virus :

Les virus sont des parasites intracellulaires de très petite taille (10 à 350 nm) qui ne peuvent se multiplier que dans une cellule hôte. Leur concentration dans les eaux usées urbaines est comprise entre 10^3 et 10^4 particules par litre. Leur isolement et leur dénombrement dans les eaux usées sont difficiles, ce qui conduit vraisemblablement à une sous-estimation de leur nombre réel [13].

Tableau I.1 : regroupe les principaux virus pathogènes potentiellement présents dans les eaux usées [13]

<i>Agent pathogène</i>	<i>Symptômes, maladie</i>	<i>Mode(s) de contamination</i>
Virus de l'hépatite A	Hépatite A	Ingestion
Virus de l'hépatite E	Hépatite E	Ingestion
Parvovirus	Vomissement, diarrhée	Ingestion
Reovirus	Affection respiratoire bénigne et diarrhée	Ingestion
Rotavirus	Vomissement, diarrhée	Ingestion
Calicivirus	Vomissement, diarrhée	Ingestion
Coronavirus	Vomissement, diarrhée	Ingestion/Inhalation
Astrovirus	Vomissement, diarrhée	Ingestion
Virus de Norwalk	Vomissement, diarrhée	Ingestion
Coxsackie	Méningite, maladie respiratoire, ...	Ingestion
Echovirus	Méningite, diarrhée, ...	Ingestion
Adenovirus	Maladie respiratoire, conjonctivite, diarrhée, ...	Ingestion

I.4.1.2. Bactéries :

Les eaux usées urbaines contiennent environ 10^6 à 10^7 bactéries/100 ml dont 10^5 proteus et entérobactéries, 10^3 à 10^4 streptocoques et 10^2 à 10^3 clostridium. Parmi les plus communément rencontrées, on trouve les salmonelles dont on connaît plusieurs centaines de sérotypes différents, dont ceux responsables de la typhoïde, des paratyphoïdes et des troubles intestinaux [9].

Tableau I.2 : Principales bactéries pathogènes présentes dans les eaux usées [13]

<i>Agent pathogène</i>	<i>Symptômes, maladie</i>	<i>Mode(s) de contamination</i>
<i>Salmonella</i> (différents sérotypes ⁴)	Salmonellose	Ingestion
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Gastro-entérite	Ingestion
<i>Leptospira spp.</i>	Leptospirose	Cutanée/Ingestion/Inhalation
<i>Legionella</i>	Légionellose	Inhalation
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastro-entérite	Ingestion
<i>Listeria monocytogènes</i>	Listériose	Ingestion
<i>Escherichia coli</i> (certains sérotypes dont O157:H7) ⁵	Syndrome Hémolytique et Urémique ⁶ (SHU)	Ingestion
<i>Shigella</i> ⁷	Dysenterie bacillaire	Ingestion
<i>Salmonella Typhi</i> ⁷	Fièvre typhoïde	Ingestion
<i>Vibrio cholerae</i> ⁷	Choléra	Ingestion
<i>Mycobacterium</i> ⁷	Tuberculose	Inhalation

I.4.1.3. Protozoaires :

Les protozoaires sont des organismes unicellulaires, plus complexes et plus gros que les bactéries. La plupart des protozoaires pathogènes sont des organismes parasites c'est à dire qui se développent aux dépens de leur hôte. Certains protozoaires adoptent au cours de leur cycle de vie une forme de kyste. Cette forme peut résister généralement aux procédés de traitement des eaux usées [11].

Tableau I.3: Principaux protozoaires présents dans les eaux usées [13]

Agent pathogène	Symptômes, maladie	Mode(s) de contamination
<i>Entamoeba histolytica</i>	Dysenterie amibienne	Ingestion
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiase	Ingestion
<i>Balantidium coli</i>	Dysenterie balantidienne	Ingestion
<i>Cryptosporidium parvum</i>	Diarrhée, fièvre	Ingestion
<i>Toxoplasma gondii</i>	Toxoplasmose	Ingestion / Inhalation
<i>Cyclospora</i>	Diarrhée, légère fièvre	Ingestion
<i>Microsporidium</i>	Diarrhée	Ingestion
<i>Naegleria</i>	Méningite	Inhalation
<i>Enterocytozoon spp.</i>	Diarrhée chronique, problèmes rénaux, musculaires, pulmonaires et oculaires	Ingestion

I.4.1.4. Les helminthes :

Les helminthes sont des vers multicellulaires. Tout comme les protozoaires, ce sont majoritairement des organismes parasites. Les œufs d'helminthes sont très résistants et peuvent notamment survivre plusieurs semaines voire plusieurs mois sur les sols ou les plantes cultivées. La concentration en œufs d'helminthes dans les eaux usées est de l'ordre de 10 à 10^3 œufs/l [14].

Tableau I.4: Principaux helminthes présents dans les eaux usées [13]

Agent pathogène	Symptômes, maladie	Mode(s) de contamination
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariase	Ingestion
<i>Ancylostoma duodenale</i>	Ancylostomiase	Ingestion/Cutanée
<i>Ancylostoma spp.</i>	Anémie	Ingestion/Cutanée
<i>Necator americanus</i>	Necatoriose	Cutanée
<i>Strongyloides stercoralis</i>	Strongyloïdase	Cutanée
<i>Trichuris trichuria</i>	Trichuriase	Ingestion
<i>Taenia spp.</i>	Diarrhée, douleurs musculaires	Ingestion
<i>Enterobius vermicularis</i>	Enterobiase	Ingestion
<i>Hymenolepis</i>	Nervosité, troubles digestifs, ...	Ingestion
<i>Toxocara</i>	Fièvre, douleur abdominale	Ingestion
<i>Echinococcus granulosus</i>	Hydatidose	Ingestion

I.4.2.Eléments traces ou micropolluants:

Les micropolluants sont des éléments présents en quantité infinitésimale dans les eaux usées. La voie de contamination principale, dans le cas d'une réutilisation des eaux usées épurées, est l'ingestion [9].

I.4.2.1. Micropolluants inorganiques :

Les eaux usées d'origine urbaine peuvent contenir des éléments minéraux (toxiques ou non) et notamment des éléments traces métalliques. Ces micropolluants proviennent essentiellement :

- Des produits consommés par la population ;
- De la corrosion des matériaux utilisés dans les réseaux
- Des eaux pluviales dans le cas de réseau unitaire ;
- Des rejets industriels raccordés au réseau [13].

I.4.2.2.Micropolluants organiques :

Ils proviennent de l'utilisation domestique de détergents, pesticides, solvants, et également des eaux pluviales mais aussi de rejets industriels quand ceux-ci sont déversés dans les égouts [9].

Parmi les micropolluants organiques, on peut citer les PCB (PolyChloroBiphényles), les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques), ou les produits phytosanitaires (pesticides par exemple) [13].

I.4.2.3.Micropolluants organométalliques :

Les micropolluants organométalliques sont des molécules mixtes dans lesquelles union métallique est lié à un groupement organique (méthyle de mercure) [14].

Tableau I.5: Quelques éléments chimiques présents dans les eaux usées urbaines [13]

<i>Concentration totale (µg/L)</i>	<i>Eléments</i>
< 1	Cadmium, Antimoine, Uranium, Mercure ^a
[1 ; 10]	Lithium, Cobalt, Arsenic, Sélénium, Molybdène, Etain, Plomb
[10 ; 100]	Titane, Chrome, Nickel, Cuivre, Rubidium, Baryum
[100 ; 1 000]	Bore, Fer, Zinc
[1 000 ; 2 000]	Aluminium

I.4.3. Les substances nutritives :

Les nutriments sont utiles et nécessaires à la production agricole et à la gestion des paysages, et se trouvent en grande quantité dans l'eau usée. Les éléments les plus fréquents dans les eaux usées sont l'azote, le phosphore et parfois le potassium, le zinc, le bore et le soufre [14].

I.4.3.1. Azote :

L'azote est un macronutriment nécessaire aux végétaux que l'on trouve dans les eaux usées sous forme de nitrate, d'ammoniaque, d'azote et de nitrite [15]. L'azote provient des eaux usées domestiques, des effluents industriels (agro-alimentaires, papeteries) et principalement du lessivage des engrais et effluents d'élevage dans les zones agricoles [12].

I.4.3.2. Phosphore :

Le phosphore est un macronutriment végétal, rarement présent dans les sols sous une forme bio disponible pour les plantes. Les eaux usées contiennent normalement de faibles quantités de phosphore, ce qui rend leur utilisation pour l'irrigation bénéfique et n'entraîne pas d'impact négatif sur l'environnement [15]. Il provient des eaux usées domestiques, des effluents industriels, de l'érosion des sols enrichis en phosphore par les engrais et les effluents d'élevage [12].

I.4.3.3. Potassium :

Le potassium est un macronutriment présent à forte concentration dans les sols, mais il n'est pas bio disponible, car il est lié à d'autres composés. Les eaux usées contiennent de faibles concentrations de potassium. L'utilisation d'eaux usées en agriculture n'entraîne normalement pas d'impact négatif sur l'environnement lié à l'apport de potassium [15].

I.4.4. Salinité :

On estime que la concentration en sels de l'eau usée excède celle de l'eau du réseau d'alimentation en eau potable de quelques 200 mg/l, sauf dans le cas de pénétration d'eaux saumâtres dans les réseaux d'assainissement ou lors de collecte d'eaux industrielles [14].

L'accroissement de la salinité des sols peut-être l'effet négatif sur l'environnement le plus important de l'utilisation d'eaux usées en agriculture [15].

✚ **Chlore et sodium** : Quand le résiduel en chlore est trop élevé au moment de l'irrigation, les cultures peuvent souffrir si elles sont arrosées par aspersion. Une concentration en chlore résiduel inférieure à 1 mg/L est sans danger pour le feuillage, mais une concentration supérieure à 5 mg/L serait dommageable.

✚ **Sodisation** : Le phénomène d'accumulation de sodium dans les sols s'appelle la sodisation. Ceci est dû au fait que le sodium présent dans le sol en forme échangeable remplace les ions calcium et magnésium adsorbés sur les argiles de sol et cause la dispersion des particules dans le sol. 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 [13].

I.5. Caractéristiques des eaux usées :

Selon leurs origines, les eaux usées se caractérisent par une grande variabilité de débits, mais aussi de composition. Elles peuvent contenir de concentrations variables :

- Des matières en suspension plus ou moins facilement décantables ou coagulables
- Des matières colloïdales ou émulsionnées (argiles, microorganismes, graisses)
- Des matières en solution de nature organique ou minérale, ou de gaz dissous.

Ces différents constituants des eaux usées présenteront des comportements spécifiques vis-à-vis des modes de traitement auxquels ils seront soumis avant leur rejet dans le milieu naturel. Ces comportements sont liés d'une part à la taille des particules présentes et à leur état physique mais ils dépendent également pour une large part de leur aptitude à la biodégradation, l'oxydation ou encore à l'adsorption [10].

I.5.1. Paramètres physiques :

I.5.1.1. Matières en suspension :

Elles représentent les matières qui ne sont ni à l'état soluble ni à l'état colloïdal, donc retenues par un filtre. Les MES, qui comportent des matières organiques (MVS) et minérales (MMS) constituent un paramètre important qui marque bien le degré de pollution d'un effluent urbain ou même industriel [16].

Les MES s'expriment par la relation suivante : $MES = 30\% MMS + 70\% MVS$

Dans le milieu récepteur, les MES peuvent entraîner des perturbations de l'écosystème par une diminution de la clarté de l'eau, limitant la photosynthèse végétale [7].

I.5.1.2. Matière colloïdale :

Les colloïdes minéraux (argile, gels et silice) qui sont responsable de la turbidité de taille comprise entre 0,1 et 1 à 2 microns, ayant une surface spécifique considérable et chargée électro-négativement, pour pouvoir les filtrer on doit faire appel à des anticoagulants minéraux (sels d'aluminium ou de fer) dont la dissolution dans l'eau libère des charges électropositives susceptible de neutraliser les charges négatives des colloïdes [6].

5.1.3. Matières décantables :

De nombreuses particules peuvent constituer des impuretés d'une eau. Les techniques analytiques nécessaires à leurs déterminations dépendent des dimensions de ces particules. Les matières décantables sont les matières des grandes tailles, entre 40 micromètres et 5 millimètre et qui se déposent sans traitement physique et chimique [9].

I.5.1.4. La turbidité :

La turbidité est inversement proportionnelle à la transparence de l'eau, elle est de loin le paramètre de pollution indiquant la présence de la matière organique ou minérale sous forme colloïdale en suspension dans les eaux usées. Elle varie suivant les matières en suspension (MES) présentes dans l'eau [5].

I.5.1.5. La température :

Elle joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissociation des sels dissous donc sur la conductivité électrique, dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et des mélanges éventuels. Elle agit aussi comme un

facteur physiologique agissant sur le métabolisme de croissance des micro-organismes vivant dans l'eau [9].

I.5.1.6. Matières grasses :

Les matières grasses présentes dans les réseaux d'assainissement proviennent des eaux usées domestiques et des rejets des activités (restaurants, commerces alimentaires). En trop grande quantité, elles viennent, en se figeant, réduire la section de passage des collecteurs et, en arrivant à la station d'épuration, nuire à la bonne oxygénation de l'effluent [16].

I.5.1.7. Le débit : Le principal intérêt de la mesure du débit est le fait qu'il permet de quantifier la pollution rejetée par l'intermédiaire de «équivalent habitant» qui exprime le volume d'eau usée moyen déversé par habitant et par jour [7].

I.5.2. Paramètres chimiques :

I.5.2.1. Potentiel hydrogène (PH) :

Le PH représente l'acidité ou l'alcalinité d'une solution. Le PH d'une eau domestique ou urbaine se situe généralement entre 6.8 et 7.8, au-delà, c'est l'indice d'une pollution industrielle [11].

Les organismes sont très sensibles aux variations du pH, et un développement correct de la faune et de la flore aquatique n'est possible que si sa valeur est comprise entre 6 et 9 [5].

I.5.2.2. Conductivité :

La mesure de la conductivité électrique, est probablement l'une des plus simples et des plus importantes pour le contrôle de la qualité des eaux usées. Elle permet d'évaluer, approximativement la minéralisation globale de l'eau [11].

Tableau I.6 : Relation entre la conductivité et la minéralisation [11]

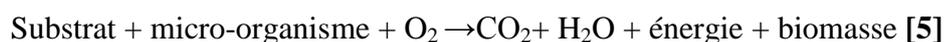
Conductivité (μS/cm)	Appréciation
Conductivité < 100μS/cm	Minéralisation très faible
100 μS/cm < conductivité <200 μS/cm	Minéralisation faible
200μS/cm < conductivité <333 μS/cm	Minéralisation moyenne
333 μS/cm < conductivité <666 μS/cm	Minéralisation moyenne accentué
666 μS/cm < conductivité <1000 μS/cm	Minéralisation importante
conductivité <1000 μS/cm	Minéralisation élevée.

I.5.2.3. Demande biochimique en oxygène (DBO) :

Elle représente la quantité d'oxygène dépensée par les phénomènes d'oxydation chimique, d'une part, la dégradation des matières organiques par voie aérobie, nécessaire à la destruction des composés organiques, d'autre part. En effet, dans un effluent complexe, ces deux types d'oxydation se superposent, d'où l'emploi du terme biochimique. Dans les eaux usées domestiques, ce sont les phénomènes biologiques qui prédominent.

Cette analyse repose sur le fait qu'un échantillon en flacon fermé, abandonné à lui-même, va consommer rapidement l'oxygène dissous qu'il contient sous l'action des micro-organismes présents. Ceux-ci utilisent l'oxygène pour dégrader les matières organiques contenues dans l'eau. Pour mesurer la DBO, il faut ajouter de l'oxygène en surplus et quantifier au bout de cinq jours l'oxygène restant. Cela représente approximativement le phénomène naturel qui se produirait en cas de rejet d'une eau polluée dans une rivière bien oxygénée [16].

Elle se résume à la réaction chimique suivante :

**I.5.2.4. La demande chimique en oxygène (DCO):**

La demande chimique en oxygène est la quantité d'oxygène consommée par les matières existant dans l'eau et oxydables dans des conditions opératoires définies. En fait la mesure correspond à une estimation des matières oxydables présentes dans l'eau,

quelle que soit leur origine organique ou minérale (fer ferreux, nitrites, ammonium) [10].

I.5.2.5. La biodégradabilité :

La biodégradabilité traduit l'aptitude d'un effluent à être décomposé ou oxydé par les micro-organismes qui interviennent dans le processus d'épuration biologique des eaux.

La biodégradabilité est exprimée par un coefficient : $K = DCO/DBO_5$

Si:

- $K < 1.5$ l'effluent est biodégradable.
- $K < 2.5$ l'effluent est moyennement biodégradable.
- $K > 2.5$ l'effluent n'est pas biodégradable.

La valeur du coefficient K détermine le choix de la filière de traitement à adopter, si l'effluent est biodégradable on applique un traitement biologique, sinon on applique un traitement physico-chimique [7] [5] [11].

I.5.2.6. Oxygène dissous :

La concentration en oxygène dissous est un paramètre essentiel dans le maintien de la vie des micro-organismes, et donc dans les phénomènes de dégradation de la matière organique et de la photosynthèse [9].

La teneur de l'oxygène dans l'eau ne dépasse rarement 10 mg/l. Elle est en fonction de l'origine de l'eau ; l'eau usée domestique peut contenir de 2 à 8 mg/l [11].

I.5.2.7. Carbone organique total (COT) :

Le carbone organique est constitué d'une grande diversité de composés organiques à plusieurs états d'oxydation, dont certains sont susceptibles d'être oxydés par des procédés chimiques ou biologiques. Le principe consiste en la combustion des matières organiques de l'effluent, dans un four à 950°C. sous un courant d'oxygène. Le gaz carbonique est dosé par infrarouge, après condensation de la vapeur d'eau. Le carbone minéral, contenu dans les carbonates, est éliminé par des manipulations particulières [16] [9].

I.5.2.8. Azote :

Exprimé en mg/l, ce paramètre devient de plus en plus important. C'est la somme d'azote des formes réduites (organiques et ammoniacal) est appelé azote de KJELDAL et l'azote des formes oxydées (NO_2^- , NO_3^-) [17].

$$\text{Azote Kjeldahl} = \text{Azote ammoniacal} + \text{Azote organique} [9]$$

I.5.2.9. Phosphore total PT :

Le phosphore se trouve dans les ERI sous formes:

- D'ortho phosphate, soluble PO_4H_2
- De poly phosphate qui a tendance à s'hydrolyser en orthophosphate;
- De phosphore non dissous.

La somme de ces diverses formes constitue le phosphore total, dont chaque forme peut être mesurée indépendamment des autres par spectrométrie [17].

I.5.3. Paramètres bactériologique (Indices de contamination fécale) :**I.5.3.1. Les germes totaux :**

Ce paramètre permet de mesurer les conditions de désinfection, une faible valeur est le témoin de l'efficacité du traitement et de l'intégrité du système de traitement [7].

I.5.3.2. Coliformes totaux :

La pertinence de ce groupe comme indicateur est aujourd'hui fortement contestée du fait que toutes les espèces incluses dans les coliformes totaux ne sont pas spécifiques de la flore intestinale des animaux à sang chaud. En effet, certaines espèces sont d'origine tellurique ou aquatique et sont capables de se développer dans l'environnement aquatique [3].

I.5.3.3. Coliformes fécaux :

Appelés aussi coliformes thermotolérants. Ils constituent un sous-groupe des coliformes totaux capables de se développer à 44 °C.

Ce groupe est majoritairement constitué d'*Escherichia coli* mais comprend aussi des *Klebsiella*, des *Enterobacter* et des *Citrobacter* [3].

I.5.3.4. Streptocoques fécaux :

Ce groupe n'est généralement pas considéré comme pathogène, tout fois leur recherche associée celle des coliformes fécaux consiste un bon indice de contamination fécale car les streptocoques étaient un meilleur témoin que les coliformes fécaux pour des pathologies infectieuses [7].

I.5.3.5. Clostridium sulfito- réducteur :

Les spores de clostridies, ce bacille à Gram positif, anaérobie, sporogène, se rencontre normalement dans les matières fécales humaines et animales ; ses spores peuvent survivre dans l'eau et dans l'environnement pendant plusieurs mois, elles ne seraient pas toujours inactivées par le chlore et par les rayons ultraviolets [3].

I.6. Normes de rejets :

Les normes de rejets de l'OMS et celle de L'ALGERIE sont notées dans le tableau:

Tableau I.7 : Les normes de rejets de l'OMS et celles de l'ALGÉRIE [7]

Paramètre	Normes de l'OMS	Normes algériennes
T(c°)	25 -30	30
PH	6.9 -9	5.5 -8.5
MES (mg/l)	30	30
DBO5 (mg O2 /l)	30	40
DCO (mg O2 /l)	90	120
NTK (mg/l)	50	40
Phosphate (mg/l)	2	2
Huiles et graisses	20	20

I.7. Conclusion :

On a pu voir que les eaux usées contenaient différents éléments (chimiques, minérales, microbiologiques...) provenant des activités humaines (domestiques, industrielles, agricoles) lesquels à forte concentrations peuvent altérer l'environnement et atteindre la santé humaine, pour ces raisons un traitement spécifique doit être mis en place pour éliminer la pollution qu'elle contient ou plus ou moins la réduire afin de préserver l'environnement et la santé publique.

II.1.Introduction :

Une personne consomme en moyenne 150 à 200 litres d'eau potable par jour. Une fois utilisée, il est nécessaire d'évacuer cette eau dans de bonnes conditions afin de protéger notre environnement. De nombreuses substances sont déversées dans les eaux utilisées qui deviennent des eaux usées. Leur pollution est produite par des matières minérales et organiques, indésirables ou toxiques qui sont en suspension, en solution ou en émulsion [18].

Le rejet direct des eaux usées domestiques dans le milieu naturel perturbe l'équilibre aquatique en transformant les rivières en égouts à ciel ouvert. Les déséquilibres qui s'y produisent ont non seulement des effets immédiats sur les utilisations de l'eau, mais aussi des effets à long terme, parfois irréversibles dans le domaine de la vie humaine. Il faut retirer des eaux usées un maximum de déchets, avant de les rejeter dans l'environnement, pour que leur incidence sur la qualité de l'eau, en tant que milieu naturel aquatique, soit la plus faible possible [9] [19].

II.2.Les stations d'épuration (STEP) :

Elles constituent une autre voie d'élimination des eaux usées dans la mesure où celles-ci y subissent toute une batterie de traitements avant leur déversement dans le milieu naturel. Une STEP, généralement placée à l'extrémité aval d'un réseau est conçue pour épurer les eaux usées et limiter l'apport en excès de matière organique et dans certains cas, de substances minérales telles les nitrates et les phosphates dans les milieux récepteurs [9].

Une station d'épuration se compose de plusieurs étapes de traitement que nous regroupons en trois catégories :

- la chaîne de traitement de l'eau : elle regroupe la chaîne des procédés qui dépolluent l'eau usée,
- la chaîne de traitement des boues : elle conditionne les boues en vue de leur élimination et de leur valorisation éventuelle,
- les procédés annexes : ce sont les procédés qui ne traitent ni l'eau, ni les boues mais qui ajoutent une qualité de service à l'usine d'épuration [20].

II.3.Objectif de l'épuration :

L'objet du traitement étant de ramener les teneurs de corps indésirables en dessous des valeurs fixées par les normes de qualité choisies, le traitement ne portera pas sur l'eau elle-même mais sur les corps qui s'y trouvent en suspension vraie ou colloïdale et en solution. Il s'agira de procéder à une élimination totale ou partielle. Il faudra, par conséquent, utiliser séparément ou conjointement des méthodes assurant:

- l'extraction : un transfert de masse solide-liquide, liquide-liquide ou gaz-liquide, c'est-à-dire: le dégrillage; le tamisage; la sédimentation; la filtration; la flottation; l'adsorption;
- la modification d'état ou de structure : précipitation des colloïdes; transformation des ions en sels solides ou en gaz; destruction des micro-organismes.
- la combinaison de la modification d'état ou de structure et de l'extraction [21].

II.4.Paramètres essentiels pour le choix d'une technologie de traitement des eaux Usées :

Les paramètres essentiels qui doivent être pris en compte pour le choix d'une technologie de traitement doivent tenir compte :

- Des exigences du milieu récepteur.
- Des caractéristiques des eaux usées, (DBO, DCO, MES)
- Des conditions climatiques (température, évaporation, vent)
- De la disponibilité du site.
- Des conditions économiques (coût de réalisation et d'exploitation).
- Des facilités d'exploitations, de gestion et d'entretien [11].

II.5.Traitement des eaux usées :

II.5.1.Prétraitement :

Le prétraitement a pour objectif de séparer les matières les plus grossières et les éléments susceptibles de gêner les étapes ultérieures du traitement [16].

III.5.1.1.Dégrillage :

Le dégrillage, premier poste de traitement, consiste à retenir les gros déchets solides au moyen de grilles à barreaux verticaux dont l'écartement varie entre 3 et 100 mm en fonction de l'efficacité voulue. Sont ainsi éliminés les bois, plastiques, papiers, bouteilles, qui sont susceptibles de provoquer des dégâts aux conduites et machines des différentes unités de l'installation. Ces éléments sont ensuite éliminés avec les ordures ménagères [22] [23].

La qualité de l'opération peut être définie de la façon suivante :

- Pré dégrillage : pour grille à barreaux espacés de 30 à 100 mm.
- Dégrillage moyen : pour grille à barreaux espacés de 10 à 25 mm.
- Dégrillage fin : pour grille à barreaux espacés de 3 à 10 mm [24].

Pour le dimensionnement hydraulique, on se base sur la vitesse de passage à travers la grille, qui doit être suffisante pour obtenir l'application des matières sur la grille, ne pas entraîner un colmatage en profondeur des barreaux ou un départ des matières avec l'effluent. Généralement les vitesses moyennes de passage admises sont de l'ordre de 0,6 m/s à 1,40 m/s au débit de pointe [18].

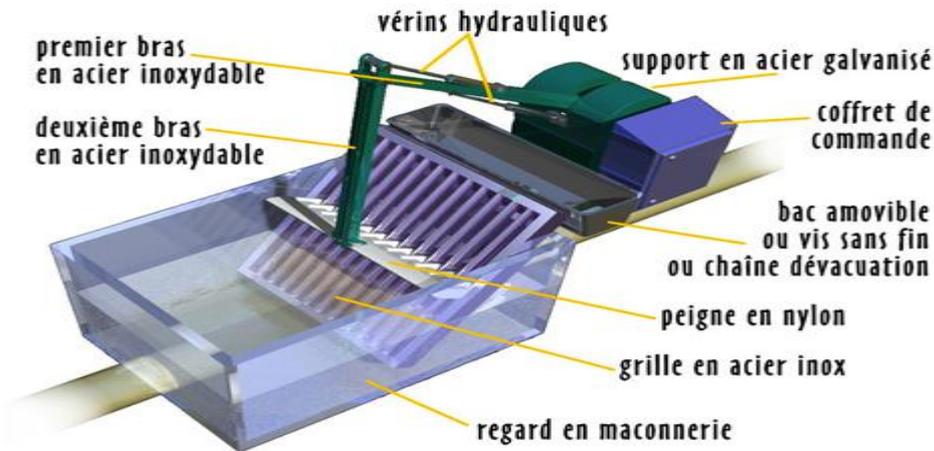


Figure II.1 : Dégrilleur [25]

II.5.1.2. Dilacération :

A pour but de déchiqueter ou de désintégrer les matières solides décanbles fines qui peuvent continuer à suivre le circuit de l'eau vers les stades de traitement ultérieurs. En revanche, il y a un risque de bouchage des pompes et des tuyauteries dû à l'agglomération en masses de fibres végétales ou textiles broyées associées à des graisses . Enfin, on peut voir l'apparition d'un chapeau de boue d'épaisseur excessive

dans les digesteurs anaérobies, et la teneur en résidus solides peut augmenter dans les stations d'épuration [16].

II.5.1.3. Tamisage :

Cette technique de filtration sur toile, tôle perforée ou sur treillis métallique est peu utilisée dans les traitements classiques en eau urbaine. Cependant les configurations nouvelles de type décantation physico-chimique, bio filtre peuvent justifier son emploi, pour éviter le colmatage trop rapide de l'étage de bio filtration, Il existe un macro-tamisage (mailles > 0.3mm) et un tamisage (mailles < 100 μ m) [26] [27].

II.5.1.4. Le dessablage :

Le dessableur est un ouvrage dans lequel les particules denses, dont la vitesse est inférieure à 0,3 m/s, vont pouvoir se déposer. Il s'agit principalement des sables et les particules minérales de granulométrie supérieure à 100 μ m [16] [18].



Photo II.1 : Dessableur rectangulaire [22]

II.5.1.5. Dégraissage-déshuilage :

Les opérations de dégraissage et de déshuilage consistent en une séparation des huiles et graisses, produits de densité légèrement inférieure à l'eau, de l'effluent brut. Les graisses et les huiles sont issues non seulement des habitations, mais aussi des restaurants, des garages, des chaussées, des usines, des abattoirs, etc [16].

Le déshuilage est une opération de séparation liquide-liquide, alors que le dégraissage est une opération de séparation solide-liquide (à la condition que la température de l'eau soit suffisamment basse, pour permettre le figeage des graisses). Le dégraissage s'effectue par flottation. L'injection d'air au fond de l'ouvrage permet la remontée en

surface des corps gras, les graisses sont raclées à la surface, puis stockées avant d'être éliminées [23] [5].

II.5.2.Traitement primaire :

Les procédés de traitement primaire sont physiques, comme la décantation plus ou moins poussée, éventuellement physico-chimiques. Les déchets ainsi recueillis constituent ce qu'on appelle les boues primaires. Ces procédés permettent d'éliminer, d'une part, 50 à 60 % des matières en suspension décantables dans l'eau et, d'autre part, de réduire les caractéristiques dimensionnelles aval d'élimination de la pollution carbonée [16].

II.5.2.1.Décantation :

La base de ces procédés de séparation solide-liquide est la pesanteur. L'élimination des matières en suspension se fait en maintenant l'eau en repos ou en la faisant s'écouler lentement à travers un bassin. Du fait de la lenteur de l'écoulement, la turbulence sera nulle ou négligeable, et les particules ayant une densité (poids spécifique) plus élevée que celle de l'eau pourront décanter. Ces particules se déposeront sur le fond du bassin où elles formeront une couche de boues. A la sortie du bassin l'eau sera claire [28].

Divers types de matières décantables sont à distinguer :

- **les particules grenues** décanteront indépendamment les unes des autres avec chacune une vitesse de chute constante,
- **les particules plus ou moins floculées** ont des tailles et des vitesses de décantation variables. Lorsque la concentration est faible, la vitesse de chute augmente au fur et à mesure que les dimensions du floc s'accroissent par suite de rencontres avec d'autres particules, c'est la **décantation diffuse**.

Pour des concentrations plus élevées, l'abondance des floccs crée une décantation d'ensemble freinée, le plus souvent caractérisée par une interface nettement marquée entre la masse boueuse et le liquide surnageant: c'est la **décantation en piston** [22].

Dans certaines conditions, le traitement primaire simple est insuffisant. L'amélioration du rendement d'épuration de la décantation se fait alors par ajout de réactifs de coagulation floculation (sulfate d'alumine, chlorure ferrique, sulfate ferreux). Pour certains effluents industriels, la flottation peut être utilisée [26].

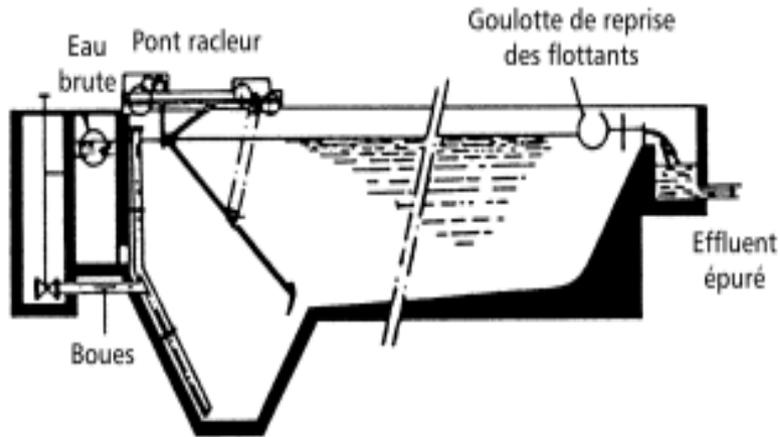


Figure II.2 : Décanteur rectangulaire à pont [29]

Tableau II.1 : Efficacité épuratoire de la décantation [17]

Paramètres	MES	DCO	DBO5	NTK	Hydrocarbures	Pb
Réduction de la pollution (%)	80 à 90	60 à 90	75 à 90	40 à 70	35 à 90	65 à 80

II.5.2.2.Flottation :

Par opposition à la décantation, la flottation est un procédé de séparation solide-liquide ou liquide-liquide qui s'applique à des particules dont la masse volumique est inférieure à celle du liquide qui les contient [22]. Dans les eaux à forte charge en matières organiques, les matières solides sont rassemblées à la surface par insufflation d'air, sous forme d'écume qui est ensuite retirée par raclage à la surface de l'eau. Les bulles d'air fines s'accrochent aux particules fines à éliminer [16].

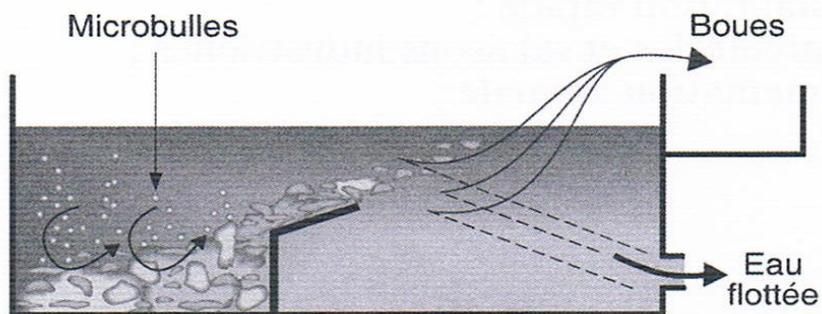


Figure II.3 : Flottation [16]

II.5.2.3. Traitement biologique (traitement secondaire):

Il s'agit d'un traitement biologique dont l'objectif est l'élimination de la pollution carbonée, azotée et phosphorée [20].

L'épuration biologique des eaux résiduaires est basée sur les mêmes phénomènes que ceux de l'autoépuration naturelle des cours d'eau (rivières, lacs, barrages, mer) sous l'action des microorganismes aquatiques. Dans les ouvrages d'épuration biologique, tous les processus sont intensifiés à cause des conditions artificielles plus favorables à la dégradation de la pollution organique [30].

II.5.2.4.1. Procédés intensifs :

Le principe de ces procédés est de localiser sur des surfaces réduites et d'intensifier les phénomènes de transformation et de destruction des matières organiques que l'on peut observer dans le milieu naturel.

Trois grands types de procédés sont utilisés :

- les lits bactériens et disques biologiques ;
- les boues activées ;
- les techniques de biofiltration ou filtration biologique accélérée [31].

II.5.2.4.1.1. Boues activées (culture libre) :

Le procédé réside dans une intensification des processus d'autoépurations que l'on rencontre dans les milieux naturels et consiste à provoquer le développement d'une culture bactérienne dispersée sous forme de flocons (boues activées), dans un bassin d'aération en présence d'air ou d'oxygène, suivi d'un décanteur secondaire ou clarificateur qui a la double fonction de clarifier l'eau en traitement et de concentrer les boues activées pour en permettre le recyclage continu en amont du bassin d'aération [5] [32].

Les matières organiques polluantes vont être captées par ces flocons et former des boues activées qui sont brassées et assurent l'épuration des eaux usées dans le bassin. [33]

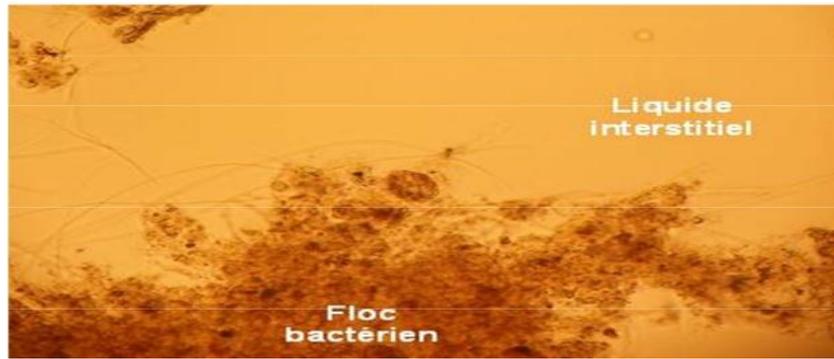


Figure II.4: Composition de la boue activée [5]

Une station de traitement par boues activées comprend dans tous les cas :

- Un bassin dit d'aération dans lequel l'eau à épurer est mise en contact avec la masse bactérienne épuratrice.
- Un clarificateur dans lequel s'effectue la séparation d'eau épurée et de la culture bactérienne.
- Un dispositif de recirculation des boues assurant le retour vers le bassin d'aération des boues biologique récupérées dans le clarificateur, cela permet de maintenir la quantité de micro-organisme constante pour assurer le niveau d'épuration recherché.
- Un dispositif de fourniture d'oxygène à la masse bactérienne présente dans le bassin d'aération.
- Un dispositif de brassage afin d'assurer au mieux le contact entre le micro-organisme et la nourriture, d'éviter les dépôts de favoriser la diffusion de l'oxygène [24].

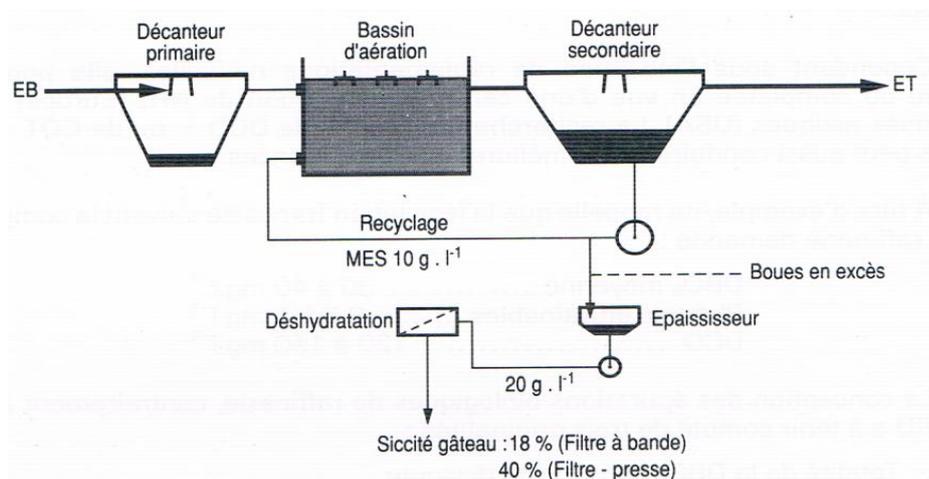


Figure II.5: Epuration biologique par boue activée [32]

II.5.2.4.1.2.Lits bactériens (culture fixe):

Le principe de fonctionnement d'un lit bactérien consiste à faire ruisseler les eaux usées, sur une masse de matériaux poreux ou caverneux qui sert de support aux micro-organismes (bactéries) épurateurs [31].

Comme matériaux constitutifs des lits, on emploie les pierres non gélives, les pouzzolanes, ou des matières plastiques. Il importe que le matériau de remplissage soit exempt de sable; il doit dès lors être soigneusement lavé [34].

Une aération est pratiquée, le plus souvent par tirage naturel et quelquefois, par ventilation forcée. Cette aération a pour but d'apporter l'oxygène nécessaire au maintien des bactéries aérobies en bon état de fonctionnement [16].

Les substances contenues dans l'eau usée qui ruisselle sur le garnissage sont piégées par le biofilm puis dégradées par la biomasse fixée. Périodiquement, des plaques de biofilm se détachent du garnissage et sont entraînées avec l'eau. En sortie du lit bactérien, l'eau passe dans un clarificateur où elle est séparée des boues, constituées des fractions détachées de biofilm, par décantation [20].

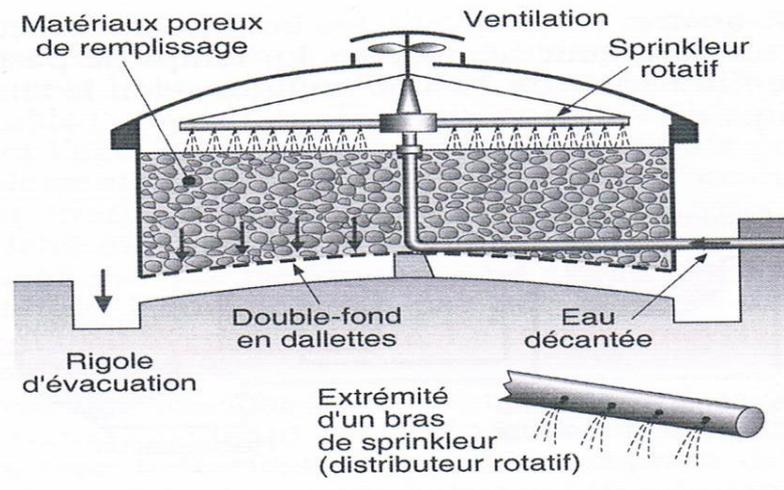


Figure II.6: Lit bactérien [16]

II.5.2.4.1.3.Disques biologiques (culture fixe):

L'eau usée, préalablement décantée, alimente un ouvrage dans lequel des disques fixés sur un axe sont mis en rotation à vitesse lente. Sur ces disques biologiques en plastique se développe alors un film bactérien. Lors de leur émergence, ces bactéries prélèvent

l'oxygène nécessaire à leur respiration et lors de l'immersion, elles absorbent la pollution dissoute dont elles se nourrissent. La masse biologique retenue par les disques représente 120 g de MES par m², lorsqu'elle atteint 5 mm d'épaisseur, elle se détache et tombe au fond de la cuvette puis l'évacuation se fait par le décanteur secondaire sans recyclage des boues [24] [16].

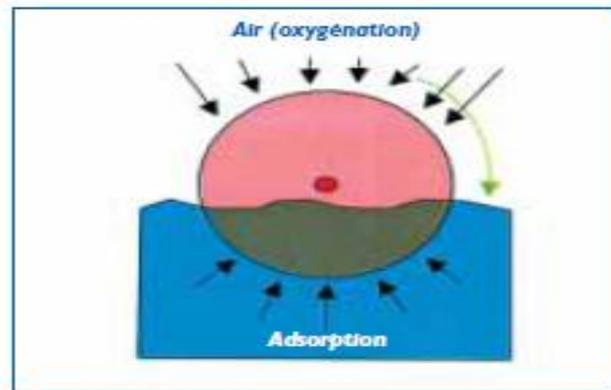


Figure II.7: Schéma de principe d'un disque biologique [31]

II.5.2.4.1.4. Biofiltration (cultures fixées) :

Ils reposent sur l'action de micro-organismes aérobies fixés sur un support granulaire immergé dans un bassin. C'est une technique qui consiste à réaliser simultanément, dans le même ouvrage, la réaction biologique aérobie de dégradation de la pollution par la biomasse épuratrice et la clarification par filtration de l'effluent traité.

L'avantage des biofiltres est de pouvoir traiter les matières polluantes carbonées et éventuellement azotées, dans un volume beaucoup plus faible que dans le cas de procédés à cultures libres, avec des rendements similaires [18] [16].

II.5.2.4.2. Procédés extensifs :

En pratique, ils se présentent sous trois aspects et peuvent servir de traitements complémentaires des effluents d'une station d'épuration biologique artificielle, afin de parfaire l'élimination de substances indésirables comme l'azote et le phosphore. Ils comprennent l'épandage sur le sol, le bassin de lagunage et la filtration par le sol [18] [31].

II.5.2.4.2.1. Lagunage :

Ce procédé d'épuration des eaux usées consiste en un lent écoulement de l'eau dans un ou plusieurs réservoirs peu profonds (de 0,5 à 1,5 m) où prolifèrent des bactéries et

autres organismes vivants au détriment des matières organiques et des sels minéraux contenus dans les eaux. Le lagunage permet également l'élimination de la pollution microbienne, ce qui est un avantage par rapport aux autres techniques d'épuration.

Les boues vont se concentrer sur le fond des lagunes, intervenir dans la biologie du système et ne devront pas être évacuées avant 5 ou 10 ans [33].

II.5.2.4.2.1.1. Lagunage naturel ou bassin de stabilisation (cultures libres) :

Les étangs de stabilisation sont des bassins peu profonds qui utilisent des facteurs naturels comme la biodégradation, la lumière du soleil, la température, la sédimentation, la prédation et l'adsorption pour traiter les eaux usées [35].

La pollution organique est dégradée par les bactéries qui libèrent des composés azotés, phosphorés et du CO₂. Les algues utilisent ces substances minérales et la lumière pour se développer en produisant de l'oxygène. L'oxygène dissout est repris par les bactéries clôturant ainsi un cycle symbiotique. L'oxygène est aussi introduit dans l'eau grâce à l'action du vent.

Les solides décantés sont décomposés en régime anaérobie au fond de l'étang produisant des minéraux et des composés à odeurs désagréables (H₂S, acides organiques). Ces derniers sont repris et oxydés en zone aérobie évitant ainsi leur émission dans l'atmosphère. Les étangs permettent d'obtenir une réduction de la DBO de l'ordre de 85% [31].

Ils sont classés selon leur type d'activité biologique :

- ✚ **Etangs aérobie** : conçus de façon à avoir un milieu bien oxygéné.
- ✚ **Etangs facultatifs (aérobie-anaérobie)** : Une partie supérieure aérobie, le fond siège de fermentations anaérobies.
- ✚ **Etangs anaérobie** : Les bactéries anaérobies décomposent les matières organiques en produits gazeux tels que le dioxyde de carbone et le méthane.

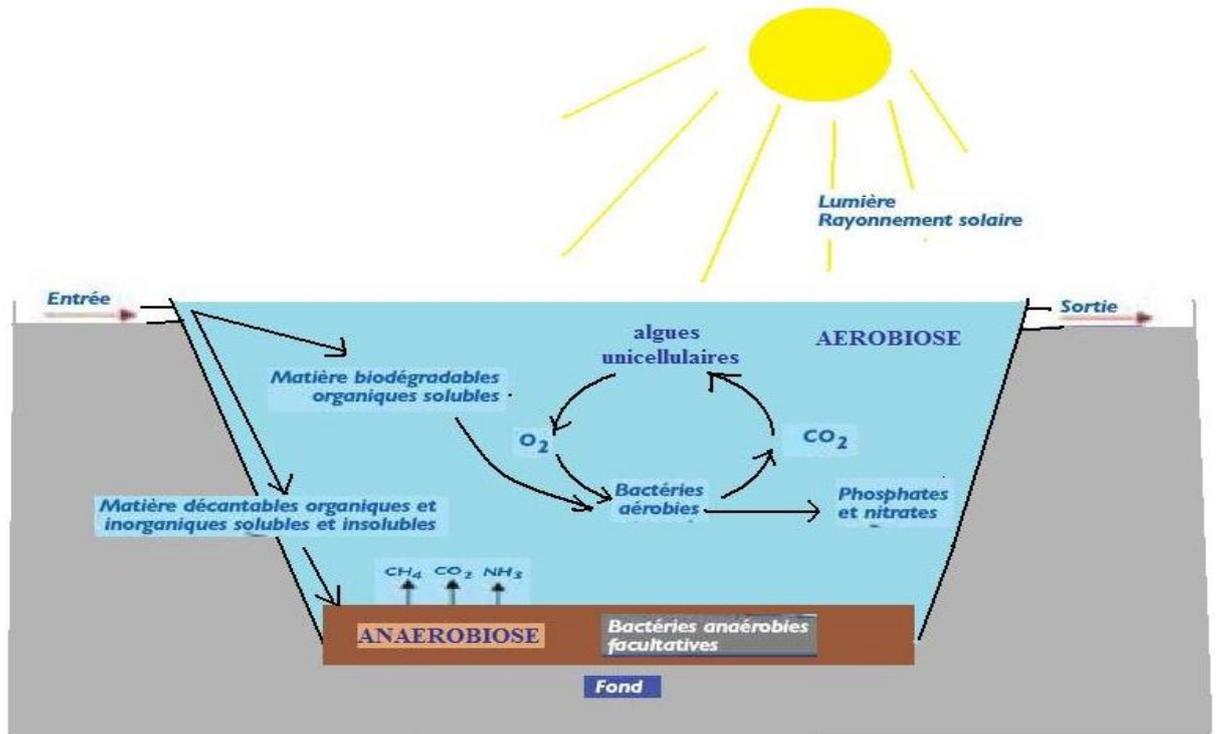


Figure II.8 : Lagunage naturel [36]

II.5.2.4.2.1.2.Lagunage aéré :

Une lagune aérée utilise le même principe que le lagunage simple dans lequel, l'apport d'oxygène est augmenté par la mise en place d'aérateurs mécaniques. Une lagune aérée fonctionne selon le principe des boues activées à très faible charge. Il existe deux types de lagunes aérées:

- Les lagunes aérobies dans laquelle on maintient une concentration en oxygène dissous dans tout le bassin.
- Les lagunes facultatives dans laquelle l'oxygène n'est maintenu que dans la partie supérieure du bassin. Une zone anaérobie est donc présente au fond du bassin [37].

II.5.2.4.2.1.3.Lagunage à macrophytes :

Les lagunages à macrophytes sont des installations mettant en œuvre des bassins dans lesquelles des macrophytes (végétaux ou algues) sont utilisés pour assurer des fonctions complémentaires de dépollution [38]. Ces macrophytes et plus particulièrement les

roseaux ont la particularité de développer un tissu racinaire et un réseau de galeries qui drainent, oxygènent et servent de support aux bactéries épuratrices (aérobies) [1].

- ✚ **filtres plantés de roseaux à écoulement horizontal** : le massif filtrant est quasi-totalement saturé en eau par un apport permanent d'effluent ayant obligatoirement subi un traitement primaire. Le filtre est anoxique ou anaérobie, on y trouve des bactéries anaérobies qui nitrifient et dénitrifient les composants azotés [1] [31] [38].

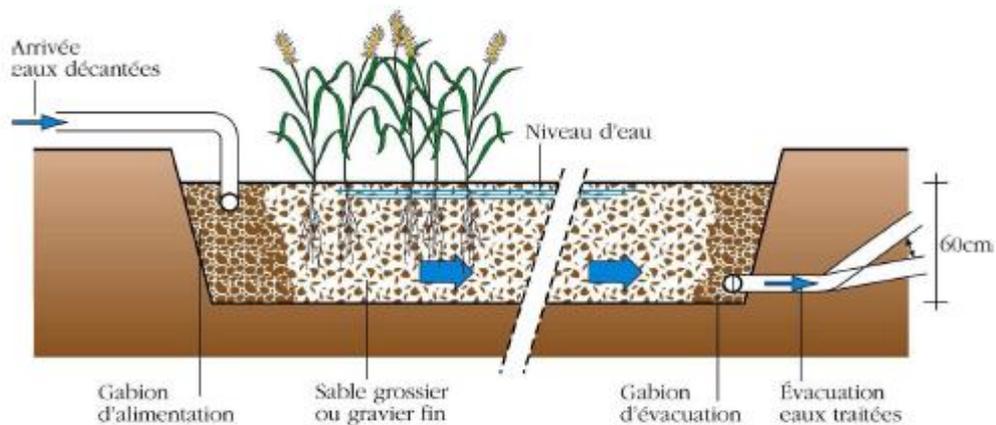


Figure II.9 : Filtre à écoulement horizontal [39]

- ✚ **filtres plantés de roseaux à écoulement vertical** : L'eau s'étend sur toute la surface du bassin, s'y infiltre et ressort par le fond. Le fonctionnement est aérobie et l'infiltration rapide [38] [1].

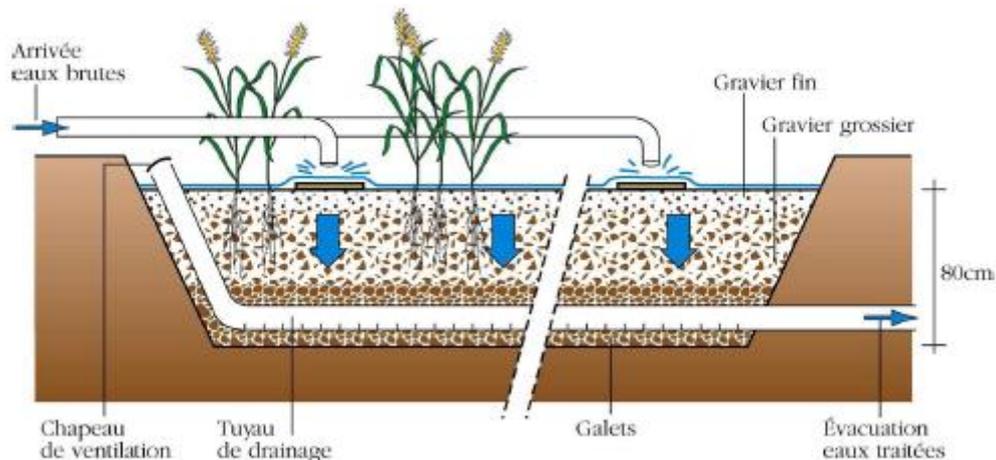


Figure II.10 : Filtre à écoulement vertical [39]

II.5.2.4.2.1.4.L'infiltration-percolation sur sable :

La filtration ou percolation consiste à traiter l'eau par l'intermédiaire du sol ou d'un massif filtrant. On filtre les effluents à raison de quelques centaines de litres d'effluent par mètre carré de massif filtrant et par jour. Ces systèmes traitent les effluents primaires ou secondaires [5] [35].

Les techniques de filtration-percolation permettent l'élimination des « gros » micro-organismes (protozoaires et helminthes) par filtration/adsorption au début du massif filtrant.

L'élimination des virus et des bactéries est fonction du milieu poreux, de la vitesse de percolation, de l'épaisseur du massif filtrant et du niveau d'oxydation de l'eau filtrée [5].

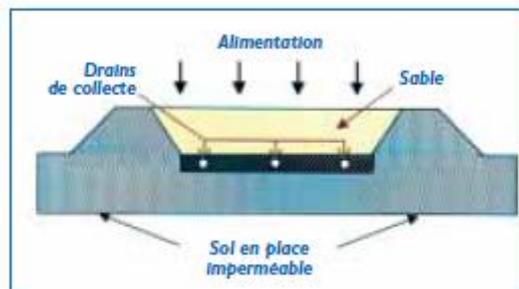


Figure II.11: Système drainé sur sol en place [31]

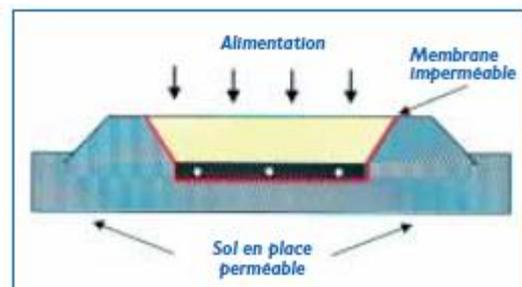


Figure II.12: Système drainé avec un massif [31]

II.5.2.4.Traitement tertiaires :

Les traitements tertiaires regroupent toutes les opérations physiques, chimiques ou biologiques qui complètent les traitements primaires et secondaires. Les traitements tertiaires sont nombreux et peuvent constituer une chaîne complexe; les opérations qui les composent dépendent de l'usage que l'on fera de l'eau traitée. Dans le cas des rejets en rivière, ils se limitent à la désinfection, l'élimination de l'azote et du phosphore. Si l'eau traitée est destinée à un recyclage, alors les opérations sont plus nombreuses et plus complexes [30].

II.5.2.4.1.Elimination de l'azote :

Dans les eaux usées urbaines l'azote se présente essentiellement sous la forme d'azote organique Norg (urines, protéines) et d'azote ammoniacal NH_4^+ . Il est rejeté 13 à 15g d'azote par habitant et par jour, dont deux tiers sous la forme ammoniacale et un tiers sous forme organique [18].

L'élimination de l'azote fait intervenir quatre processus:

- **Ammonification** : transformation de l'azote organique en azote ammoniacal par des bactéries banales;
- **Assimilation** : utilisation d'une partie de l'azote ammoniacal et éventuellement organique pour la synthèse bactérienne;
- **Nitrification** : oxydation de l'azote ammoniacal en nitrites et en nitrates. Cette réaction fait intervenir des bactéries très particulières : Nitrosomonas pour l'oxydation de NH_4 en NO_2 , Nitrobacter pour l'oxydation de NO_2 en NO_3 ;
- **Dénitrification** : réduction des nitrates en azote gazeux N_2 qui retournera dans l'atmosphère. Cette réaction fait intervenir des bactéries banales, abondantes dans le milieu naturel [26].



II.5.2.4.2. Elimination du phosphore :

La quantité de phosphore rejeté dans les eaux urbaines est de l'ordre de 3 à 4g par habitant et par jour (soit une concentration de l'ordre de 25 mg/l pour le phosphore total) [18].

- ✚ **La déphosphatation chimique** : se fait grâce à l'utilisation de réactifs (tels que les sels de fer et d'aluminium ou la chaux) qui donnent naissance à des précipités ou complexes insolubles séparés de l'eau par des techniques de séparation solide-liquide [33].
- ✚ **La déphosphatation biologique** : la masse bactérienne est soumise à un stress continu par l'alternance de phases aérobies et anaérobies. Durant la phase anaérobie, le phosphore est relargué. Cependant lors de la phase aérobie, le phosphore précédemment relargué est réassimilé en quantité supérieure,

permettant ainsi une surconsommation biologique du phosphore, qui est extrait avec les boues en excès. La déphosphatation biologique peut atteindre des rendements de 60 à 70 % [20].

II.5.2.4.3. Désinfection :

Les eaux usées urbaines, parce qu'elles représentent les déchets de la vie individuelle et collective des agglomérations, contiennent des micro-organismes pathogènes susceptibles d'être à l'origine de maladies (bactéries, virus, parasites). La désinfection a pour but de détruire les micro-organismes pathogènes [33].

Il existe différentes techniques (désinfection au chlore, au brome, par l'ozone, par rayonnement UV ou par lagunage) [18].

II.5.2.4.4. Traitement des odeurs :

La collecte et le traitement des eaux résiduaires urbaines et industrielles génèrent des produits malodorants. En effet, ces eaux usées chargées en matières organiques particulières et dissoutes en composés azotés (dont l'ammoniac) peuvent induire directement ou indirectement, par l'intermédiaire de leurs sous-produits d'épuration (graisses, boues), la formation d'odeurs désagréables suivant un processus biologique de fermentation. La perception des odeurs est subjective et son seuil varie selon la sensibilité de l'individu [16]. Pour éviter ces nuisances, les ouvrages sensibles seront couverts et munis d'un système de ventilation ainsi que d'une unité de traitement biologique des odeurs.

On distingue généralement deux types de traitement biologique des odeurs : les biofiltres et les biolaveurs. Dans les premiers, la biomasse est supportée par un plancher spécifique et l'air traverse le massif (souvent de la tourbe). Les seconds réalisent un deuxième filtre grâce à une suspension. La biomasse est libre, et l'épuration se produit dans un réacteur [18].

NB : Les normes de rejet des eaux usées sont en annexe de ce travail.

II.6. Traitement des boues :

Les boues constituent des déchets volumineux puisqu'elles contiennent généralement entre 95 et 99 % d'eau. Elles sont génératrices de nuisances dans la mesure où elles sont

constituées par des matières organiques fermentescibles et peuvent renfermer des substances toxiques.

Le traitement des boues vise deux objectifs :

- + Réduction du pouvoir fermentescible (par voie biologique ou chimique) des boues urbaines afin de limiter, voire annulé, les nuisances olfactives.
- + Réduction du volume des boues, afin de faciliter leur manutention et diminuer les frais en vue de leur élimination finale [40].

II.6.1. Origine des boues :

❖ Boues primaires :

Ce sont des Boues obtenues par simple décantation primaire des eaux usées. Elles sont constituées de matières minérales (sable, terre) et de matières organiques qui peuvent évoluer.

❖ Boues biologiques ou secondaires :

Ce sont les boues issues du traitement biologique. Elles sont essentiellement constituées de bactéries et sont très organiques et peu concentrées [27].

II.6.2. Les propriétés des boues :

+ Les éléments nutritifs :

Il s'agit des teneurs en azote total, phosphore (exprimé en P_2O_5) et potassium (exprimé en K_2O). Il s'agit de substances qui favorisent la croissance des plantes et donc qui ont une très grande importance pour l'utilisation agricole des boues soit par épandage direct soit par compostage avec les ordures ménagères.

+ Les micropolluants organiques :

Ce sont des substances qui peuvent avoir une action néfaste pour le traitement des boues ou pour leur utilisation en agriculture. Il s'agit généralement de produits chimiques de synthèse qui sont utilisés dans la vie courante et qui se retrouvent dans les eaux usées domestiques.

+ Les micropolluants minéraux :

Les boues contiennent de nombreux éléments minéraux dont certains ont une action positive sur les plantes ou sur la nourriture des animaux mais d'autres ont une action

négative sur l'utilisation ultérieure des boues, ce sont par exemple le bore ou le cuivre [41].

II.6.3.Filières de traitement des boues :

Les procédés de traitement des boues peuvent varier suivant leurs natures et la taille de la station d'épuration.

II.6.3.1.L'épaississement :

C'est le premier stade de réduction du volume des boues à traiter [22]. L'épaississement vise à augmenter la siccité des boues (teneur en matière sèche) sans pour autant modifier le caractère liquide de la boue [33].

Il permet de concentrer la boue à des valeurs qui en fonction de l'origine et du procédé employé varie de 3 à 10% en siccité. Les moyens les plus classiques sont :

- La décantation;
- La flottation;
- L'égouttage sur table perforée.
- La centrifugation [26].

II.6.3.2.Digestion et stabilisation des boues :

La digestion des boues est une fermentation contrôlée, dont le rôle essentiel est de détruire une partie des matières organiques des boues et de stabiliser ces dernières [19].

Elle peut se faire:

- En présence d'air : c'est la digestion aérobie.
- En absence d'air : c'est la digestion anaérobie.
- Par adjonction de chaux : c'est la stabilisation chimique [27].

II.6.3.2.La déshydratation :

La déshydratation est nécessaire pour évacuer une partie de l'eau libre contenue dans les boues. Les traitements comprennent généralement en première étape un conditionnement chimique de la boue pour faciliter l'évacuation de l'eau de la boue

grâce à un changement de structure. Les principales technologies de déshydratation sont :

- Les lits de séchage;
- La filtration sur bande pressante (siccité de 15 à 35%);
- La filtration sous pression (siccité de 35 à 55%);
- La centrifugation (siccité de 15 à 40%) [26].

II.6.4. Valorisation des boues :

II.6.4.1. Valorisation agricole :

L'épandage consiste à apporter sur une parcelle agricole les boues. Il constitue une valorisation agronomique et un recyclage de matière par l'apport au sol d'éléments fertilisants (Sébastien Renou). Elles contiennent en effet des éléments fertilisants naturels comme l'azote et le phosphore, des oligo-éléments comme le zinc et le cuivre, des matières organiques et peuvent jouer un rôle d'amendement lorsqu'elles sont chaulées [27].

II.6.4.2. Valorisation énergétique :

L'incinération conduit non seulement à l'élimination totale de l'eau interstitielle mais également à la combustion des matières organiques des boues [22].

L'incinération présente plusieurs intérêts :

- Destruction de la boue
- Réduction du volume de déchets
- Hygiénisation totale de la boue
- Valorisation possible de la chaleur des fumées en chaleur et/ou en électricité [20].

Tableau II.2: Teneurs limites dans les boues et dans les sols en substances chimiques (règlementation française) [42]

	Teneur limite dans les boues (mg/kg MS)	Apports maximaux totaux cumulés sur 10 ans (g/ha)		Teneur limite dans les sols (mg/kg MS)
		sols de pH > 6	pâturages ou sols de pH < 6	
cadmium	10	150	150	2
chrome	1 000	15 000	12 000	150
cuivre	1 000	15 000	12 000	100
mercure	10	150	120	1
nickel	200	3 000	3 000	50
plomb	800	15 000	9 000	100
sélénium	-	-	1 200 ***	-
zinc	3 000	45 000	30 000	300
Cr + Cu + Ni + Zn	4 000	60 000	40 000	-
PCB (somme des 7)	0,8	12	12	-
fluoranthène	5 **	75	60	-
benzo[b]fluoranthène	2,5	40	40	-
benzo[a]pyrène	2 **	30	20	-

MS : matières sèches ; ** 4 mg/kg de fluoranthène et 1,5 mg/kg de benzo[a]pyrène dans le cas de prairies ; *** pour les pâturages uniquement.

II.7. Possibilités de réutilisation des eaux usées traitées :

Devant l'augmentation des besoins en eau, la multiplication démographique et l'amélioration du niveau de vie des populations ; la réutilisation des eaux usées est la meilleure solution pour faire face à la pénurie en eau. Cette réutilisation connaît une grande extension dans les pays à climat aride et semi aride même dans les pays industrialisés [43].

II.7.1. Réutilisation en agriculture :

L'irrigation de cultures ou d'espaces verts est, de très loin, le mode le plus répandu de réutilisation des eaux usées urbaines.

Dans le cas spécifique de l'irrigation, les bénéfices 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 des oligoéléments (fer, cuivre, manganèse, zinc) 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 [44].

II.7.2.Réutilisation en zone urbaine :

Les usages les plus courants sont l'irrigation d'espaces verts (parcs, golfs, terrains sportifs), l'aménagement paysager (cascades, fontaines, plans d'eau), le lavage des rues ou des véhicules et la protection contre l'incendie. Une autre application importante est le recyclage en immeuble, par exemple l'utilisation de l'eau ménagère traitée pour le lavage [43]. La réutilisation des eaux usées épurées en zone urbaine nécessite un réseau double qui permet de distribuer séparément les eaux épurées et l'eau potable [3].

II.7.3.Réutilisation industrielle :

Pour les pays industrialisés, l'eau recyclée fournit 85 % des besoins globaux en eau. Les centrales thermiques et nucléaires (eau de refroidissement) sont parmi les secteurs qui utilisent les eaux usées en grande quantité.

Les préoccupations que pose la qualité de l'eau dans la réutilisation et le recyclage industriels touchent l'entartrage, la corrosion, la formation de bactéries, et les effets sur la santé des travailleurs [17].

II.7.4.Production de l'eau potable :

La production d'eau potable est l'aboutissement le plus extrême de la réutilisation des eaux usées épurées. Elle a lieu essentiellement dans les zones arides ou semi-arides, et peut être directe ou indirecte :

- La réutilisation est directe quand l'eau ne revient jamais dans le milieu naturel ; les eaux épurées sont directement acheminées de la station d'épuration à l'usine de traitement pour l'eau potable [3].
- La réutilisation est indirecte quand elle consiste à rejeter des effluents de station 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 [44].

II.7.5.La recharge de nappe :

Le dispositif de la recharge de nappe consiste à faire infiltrer ou percoler les EUT dans le sous sol. On poursuit de la sorte plusieurs objectifs :

- La restauration d'une nappe surexploitée par excès de pompage.
- 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 (autoépuration du sol).

II.7.6.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 [45].

NB : Les normes de réutilisation des eaux usées épurées sont en annexe de ce travail.

II.8.Risques liés à la réutilisation des eaux usées épurées :

II.8.1.Risque microbiologique :

Dans le cas de l'agriculture, les microorganismes se retrouvent à la surface des plantes et sur le sol. Les feuilles et la plante créent un endroit frais, humide (évapotranspiration) et à l'abri du soleil. Une contamination peut donc avoir lieu au moment de la croissance des végétaux ou même de la récolte [13]. Les risques à la santé liés à ces agents sont principalement des infections entériques. Certains agents microbiens peuvent causer des infections respiratoires, cutanées, oculaires ou encore plus sévèrement, occasionner une hépatite. [3]

II.8.2.Risque chimique :

La contamination chimique est liée aux éléments traces. Les faibles concentrations en micropolluants dans les eaux usées traitées peuvent être un frein à la recharge d'aquifère, ces éléments présentent des risques de toxicité humaine à court terme et de maladies à plus long terme [13]. En cas d'usage agricole, La seule voie de contamination préoccupante pour ces éléments traces est la consommation des plantes cultivées, dans lesquelles ils s'accumulent [6].

II.8.3.Risque environnemental :

Ce risque est 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 [44].

L'épandage d'eau en excès par rapport aux besoins des plantes entraîne des infiltrations de 50–70 % de l'eau utilisée en agriculture. Les aquifères situés au-dessous des champs agricoles présentent souvent de fortes concentrations de nitrates car l'utilisation d'eaux usées et d'engrais artificiels introduit de l'azote dans le sol plus vite que les plantes ne peuvent l'absorber et cet azote est ensuite éliminé par l'eau comme tout autre élément d'un sel.

Si d'importantes quantités de matières organiques biodégradables pénètrent dans les eaux de surface, elles peuvent épuiser l'oxygène dissous, ce qui a des conséquences négatives sur les organismes aquatiques et entraîne des nuisances olfactives [15].

II.9.Conclusion :

Les eaux usées doivent obligatoirement subir différents traitement (physico-chimique, biologique) avant qu'elles soient rejetées dans les milieux récepteurs (lacs, oued, rivières, ...) afin de protéger ces derniers contre la pollution et préserver la vie aquatique y demeurant.

Les procédés d'épuration se basent essentiellement sur l'utilisation des micro-organismes (bactéries) pour dégrader la matière organique, cette masse épuratrice pourra effectuer la dégradation soit en étant libre dans des bassins ou fixées sur un support, par la suite les eaux usées épurées pourront subir un traitement plus poussé pour améliorer leur qualité (désinfection, désodorisation) pour une éventuelle réutilisation (agriculture, industrie).

Les boues issues des décanteurs doivent subir un traitement de déshydratation pour pouvoir être valorisées pour son épandage sur des terrains agricoles.

III.1.Introduction :

La filtration consiste dans le passage de la suspension à travers un milieu filtrant adéquat capable de retenir par action physique, et plus rarement chimique, les particules solides. Le milieu filtrant est constitué par des particules solides, elles-mêmes déposées sur un support qui peut être, selon les cas, des toiles métalliques, du sable, des gravières [29].

Au cours d'une filtration un grand nombre de processus peut intervenir (la contribution de chacun de ces processus à l'action filtrante dépend du type de filtre):

- La retenue mécanique, principalement dans la couche supérieure de la masse filtrante;
- Absorption et adhésion aux grains de la masse filtrante et aux matières déjà retenues;
- Epuration biologique par les bactéries qui se fixent à la surface des grains [46].

III.2.Caractéristiques des matériaux filtrants :

Le matériau filtrant doit vérifier certaines caractéristiques : il doit être insoluble, chimiquement inerte vis-à-vis des eaux agressives et il doit subir sans s'effriter, le frottement intense au cours des lavages [47]. Les principales caractéristiques d'un matériau filtrant sont:

III.2.1.Diamètre effectif et coefficient d'uniformité :

Le diamètre effectif correspond à la grosseur des mailles du tamis qui laissent passer 10 % de la masse de l'échantillon. Ainsi, si on connaît D_E , on sait que 90 % (en masse) des grains de l'échantillon ont un diamètre supérieur à D_E .

Le coefficient d'uniformité est le rapport entre le diamètre qui laisse passer 60 % des particules et celui qui en laisse passer 10 %, soit D_{60}/D_{10} [48].

La répartition des grains suivant leurs diamètres peut être obtenue par tamisage du matériau. On le fait passer à travers des tamis à mailles de plus en plus fines et on détermine le poids des fractions retenues par les tamis respectifs. Le résultat est ensuite représenté graphiquement. [46], on peut alors estimer le diamètre effectif, D_E , et le coefficient d'uniformité, CU du matériau filtrant mis à l'épreuve [48].

III.2.2.Densité relative du sable :

On peut calculer expérimentalement la densité relative du sable, Y_s en divisant sa masse par celle de l'eau qu'il déplace. On procède de la façon suivante:

- On pèse un certain volume d'eau (on obtient m_e);
- On pèse le sable sec (on obtient m_s);
- On ajoute le sable à l'eau (l'eau déplacée déborde du récipient)

- On pèse le mélange d'eau et de sable (on obtient m_{es}) [48].

$$\gamma_s = \frac{\text{masse du sable}}{\text{masse de l'eau déplacée}} = \frac{m_s}{m_c + m_s - m_{es}} \quad \text{.....III.1. [48]}$$

III.2.3. Granulométrie du solide :

La granulométrie du solide conditionne le choix de la couche filtrante (texture et porosité), la structure de la couche de précipité et sa capacité de filtration, ainsi que l'humidité résiduelle du sédiment. Les dimensions des particules constituant la suspension peuvent varier entre $1\mu\text{m}$ et approximativement 1 mm . Les suspensions avec un contenu important en particules fines ou colloïdales vont colmater rapidement la couche filtrante, aboutissant à un gâteau compact et peu perméable; ainsi la vitesse de filtration diminuera fortement [29].

III.2.4. Masse unitaire sèche :

Pour mesurer la masse unitaire sèche minimale, on verse le sable, dans un récipient de volume et de masse connus, selon une technique qui permet d'éviter tout compactage. On pèse ensuite le récipient plein pour déterminer la masse de sable par unité de volume. Pour mesurer la masse unitaire sèche maximale, on fait vibrer le récipient pour obtenir un compactage maximal du sable, puis on pèse le récipient plein pour déterminer la masse de sable par unité de volume [48].

III.2.5. Forme et caractéristiques des particules solides :

Les particules de forme sphéroïdales ou aciculaires, permettent d'obtenir un sédiment caractérisé par une très bonne perméabilité donc une grande vitesse de filtration. Les particules élastiques de forme plate se comportent comme des soupapes; l'augmentation de la pression de travail fait diminuer la vitesse de filtration.

La déformation des particules conduit à un tassement du lit poreux (donc de la porosité) surtout à la surface de la toile, ce qui implique le colmatage de la toile. Il est possible de mélanger des agents de floculation à la suspension, afin de procéder à l'agglomération des fines particules colmatantes, alors plus facilement filtrables [29].

III.2.6. Porosité :

On calcule la porosité, e , d'un matériau en divisant le volume des vides dans ce matériau par le volume total du matériau [48].

Sachant que :

B_s = volume des solides

B_v = volume des vides

B_t = volume total du matériau

on peut écrire :

$$e = \frac{B_V}{B_T} \quad \dots\dots\dots\text{III.2. [48]}$$

$$B_T = B_V + B_S \quad \dots\dots\dots\text{III.3. [48]}$$

III.2.6.Surface spécifique de la phase solide :

La surface spécifique de la phase solide influence l'agglomération des particules solides en suspension, ainsi que les phénomènes d'adsorption par le sédiment de l'eau (donc l'humidité du sédiment) ou d'absorption des impuretés (donc la pureté du sédiment et l'efficacité de lavage) [29].

III.3.Théorie de la filtration :

Tout d'abord, lorsqu'une particule de grande taille (5 à 25 μm) s'approche d'un collecteur, la particule aura tendance à décanter puisque sa densité est supérieure à celle de l'eau. Pour une particule de taille moyenne (1 et 5 μm), si sa ligne d'écoulement passe à une distance égale ou inférieure à son rayon près du collecteur, elle sera interceptée par ce dernier. Finalement, les petites particules (moins de 1 μm) sont influencées par le mouvement Brownien, c'est-à-dire qu'elles suivent une trajectoire aléatoire qui dévie des lignes d'écoulement, dû au phénomène de diffusion. Plus la particule est petite et la température est élevée, plus la diffusion sera grande. Plus la valeur de ce paramètre est élevée, plus le filtre sera efficace en terme de rétention de particules [49].

Il existe deux techniques de filtration suivant la constitution de la surface filtrante :

III.3.1.Masse poreuse :

La surface filtrante est constituée d'une masse poreuse formée par un lit de sable ou gravier ou d'autres particules agglomérées sous différentes formes. Bien que les espaces entre les grains soient supérieurs aux dimensions des particules en suspension, l'expérience montre que, pendant leur trajet, ces particules vont s'accrocher progressivement dans les interstices de la masse poreuse. De cette manière, il s'ensuit un colmatage progressif du lit. Il s'agit de la filtration en profondeur ou dans la masse. La masse filtrante est caractérisée par :

- Sa granulométrie qui est comprise entre 0,3 et 2,5 mm, en fonction du but recherché;
- Sa hauteur (0.6 à 1 m), car à chaque granulométrie correspond une hauteur optimale qui permet de collecter le meilleur filtrat sous une perte de pression minimale.

Cette technique est le plus souvent utilisée pour des suspensions peu chargées en particules solides, généralement des impuretés.

III.3.2.Support :

La barrière est constituée d'un support (toile, grille, membrane) qui est une surface filtrante comportant de très nombreux orifices et sur laquelle les particules solides vont se déposer sous la forme d'un lit filtrant ou gâteau d'épaisseur croissante. On l'emploie habituellement pour les suspensions fortement chargées en matières solides.

Au fur et à mesure que les particules de matière solide sont retenues par la surface filtrante, les canaux disponibles pour le passage du liquide se réduisent en nombre et en dimension. Il se produit ce que l'on appelle un « colmatage » du filtre. La perte de charge de la suspension traversant le filtre croît progressivement jusqu'à devenir inacceptable. Le matériau filtrant doit alors être soit lavé, soit remplacé [29].

III.4.Pertes de charge dans un filtre :

La perte de charge à travers un milieu filtrant est une caractéristique importante de la filtration. Elle est de l'ordre de 0,5 à 0,75 m lorsque le filtre est propre, elle augmente au fur et à mesure que le filtre s'encrasse. L'équation de Carman-Kozeny ou l'équation de Rose permettent de calculer la perte de charge dans un filtre propre lorsque l'écoulement a lieu par gravité. (Des jardins) [45]

$$\text{Équation de Carman - Kozeny: } H_L = f_1 \frac{L}{\Phi d} \frac{1-e}{e^3} \frac{U^2}{g} \quad \dots \text{III.4. [48]}$$

$$\text{Loi de Darcy : } H_L = \frac{UL}{k_p} \quad \dots \text{III.5. [48]}$$

Où:

$$f_1 = 150 \frac{1-e}{Re} + 1,75 \quad \dots \text{III.6. [48]}$$

R_e : Nombre de Reynolds

e : porosité du média

Φ : facteur de forme

g : accélération gravitationnelle (9,81 m/s²)

d : diamètre du média (m)

U : vitesse superficielle (m/s)

H_L : Perte de charge (m)

k_p : perméabilité hydraulique (m/s)

L : profondeur du média (m).

f_1 : coefficient de friction

Le développement des pertes de charges dans un filtre dépend beaucoup du média en place et de sa granulométrie. Mais aussi d'un autre facteur important qui est la qualité de l'eau brute. Si cette eau est très chargée en particules, il y aura une accumulation de saleté dans le filtre qui fera augmenter rapidement les pertes de charges.

Dans un filtre gravitaire, la perte de charge opérationnelle maximale disponible correspond à la hauteur d'eau au-dessus du média. Cette perte de charge ne comprend pas à celle du filtre propre. Lorsque cette limite est atteinte, il faut procéder au rétro-lavage du filtre.

Par exemple, pour un filtre ayant une épaisseur de 0,75 m et une submergence de 1,8 m, on limitera la perte de charge à moins de 2,20 m alors que la charge maximale disponible est en fait de 2,55 m.

Pour un filtre pressurisé, la tête d'eau disponible ne correspond plus au niveau d'eau au-dessus du média mais à la pression que peut fournir le système. Toutefois, il n'est pas recommandé de dépasser 5 psi de perte de charge puisque au-dessus de cette valeur, le média se compacte et il y a formation de d'agrégats de particules de plusieurs centimètres de diamètres appelés « mudballs ». Ces agrégats sont très difficile à dissoudre lors du lavage du filtre et crée des pertes de charges supplémentaires lorsque le filtre est remis en marche. Cette recommandation semble cependant très conservatrice car l'avantage principal d'un filtre pressurisé est d'avoir une charge maximale disponible très élevée ce qui permet d'allonger les durées de cycle et d'acheminer l'eau vers des réservoirs en altitude. [49]

III.5. Différents types de filtres :

Les types de filtres sont classés suivant la vitesse de filtration:

- Filtres lents : 1 à 2 m/h;
- Filtres rapides : 4 à 25 m/h; Il en existe deux catégories:
 - Les filtres ouverts ou filtres rapides gravitaires où la force poussante est la pression hydrostatique de la couche d'eau surnageante;
 - Les filtres sous pression

En outre, on peut varier la nature du matériau de remplissage [46] [30].

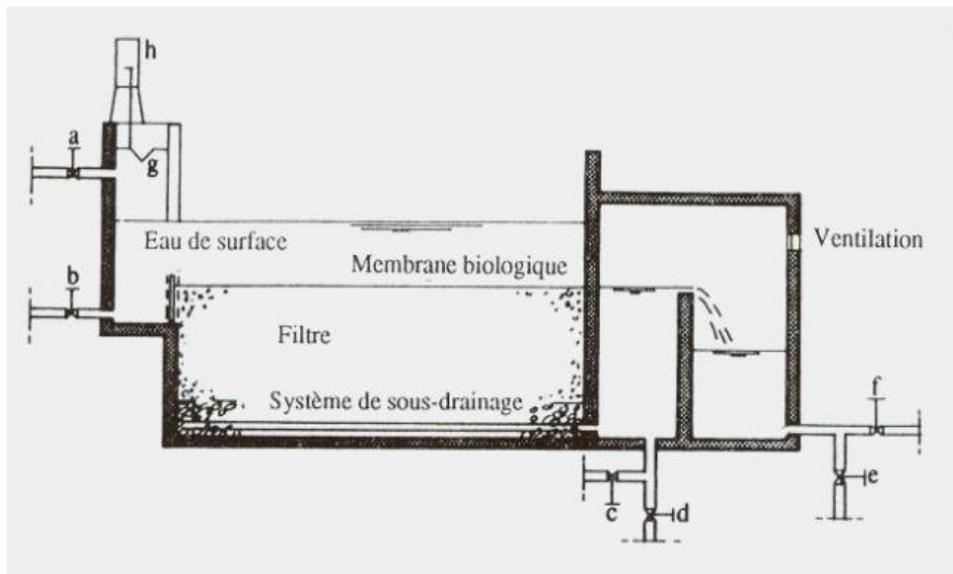
III.5.1. Filtration lente :

Les filtres à sable lents doivent être construits de telle sorte que l'eau traverse lentement une couche de sable fin et que les particules les plus grosses soient arrêtées près de la surface du sable. Ces particules forment une couche poreuse très fine, dont la surface totale de veinules ou de pores est très grande, ce qui facilite l'adsorption des impuretés par cette couche ou par le sable sous-jacent. Cette couche poreuse est constituée de bactéries, d'algues et de protozoaires [48].

Le but principal de la filtration lente sur sable est l'élimination des organismes pathogènes contenus dans l'eau brute, en particulier les bactéries et les virus. Si on applique le processus de filtration lente sur sable à une eau brute légèrement contaminée, les filtres lents sur sable produiront une eau bactériologiquement pure [28].

III.5.1.1.Principe de fonctionnement :

Le filtre lent consiste en un bassin à ciel ouvert, le plus souvent rectangulaire, contenant du sable servant de matériau filtrant. Le bassin contient du sable fin calibré formant une couche de 0,80 m à 1,20 m reposant soit directement sur des dalles de béton maigre poreux soit sur des couches superposées de sable plus grossier (0,30 m) et de gravier (0,35 m à 0,50m); dans le dernier se trouve noyé un système de drains collectant l'eau filtrée. Le sable de filtration proprement dit est calibré de la façon la plus homogène possible autour des diamètres efficaces de 0,25 mm et 0,35 mm [21] [50].



- a. Vanne d'amenée d'eau non-filtrée
- b. Vanne de vidange pour l'évacuation de l'eau surnageante
- c. Vanne pour recharger le lit filtrant en eau propre
- d. Vanne de vidange pour drainer le lit filtrant et la chambre de sortie
- e. Vanne régulation de la vitesse de filtration
- f. Vanne de chasse pour vider le réservoir d'eau filtrée
- g. Vanne de sortie vers le réservoir principal du réseau de distribution
- h. Déversoir
- i. Mesure de Débit

Figure III.1 : Filtration lente sur sable [51]

III.5.1.2.Mécanismes de la filtration lente :

L'ensemble des forces et des processus physiques et biologiques intervenant dans l'épuration par les filtres lents peuvent être groupés dans trois types de mécanismes :

III.5.1.3.Mécanismes de transport :

Les particules contenues dans l'eau sont mises en contact avec le sable selon les processus suivants :

- ✚ **Criblage ou tamisage** : Il consiste en la rétention des particules dont le diamètre est supérieur à l'espace laissé par les grains entre eux. Ce tamisage est d'autant plus poussé que les grains sont de petite taille et de forme anguleuse [50].
- ✚ **Sédimentation** : Un effet de sédimentation élimine les solides fins en suspension qui se déposent à la surface du lit filtrant. L'efficacité de la décantation sera alors telle que même les très petites particules peuvent être complètement éliminées. Cette action s'exerce également essentiellement dans la partie supérieure du filtre; seule la matière organique de faible densité descendra plus profondément dans le lit [28].

III.5.1.4.Mécanismes de fixation :

Une fois qu'elles sont en contact avec les grains, les particules sont maintenues en place par les forces suivantes :

- ✚ **Attraction électrostatique (forces de Coulomb)** : Le sable quartz porte une charge négative et attire par conséquent des anions comme les cristaux de carbonate et les flocons d'hydroxyde de fer et d'aluminium. Par contre, les particules colloïdales d'origines animales, y compris les bactéries de charges négatives, sont repoussées. On comprend donc la raison pour laquelle un filtre à sable propre ne les élimine pas [50].
- ✚ **Adhérence** : A la maturation du filtre, les particules d'origine organique retenues à la surface du filtre créent un terrain de prolifération d'organismes produisant un matériau connu sous le nom de "zooglee", composé de bactéries actives, de leurs déchets, de leurs cellules mortes et des matières organiques partiellement assimilées sur lequel les particules provenant de l'eau adhèrent [50].

III.5.1.5.Mécanisme de purification :

Plusieurs jours après la mise en service d'un nouveau lit filtrant on constate une maturation du filtre, il se forme dans les couches supérieures du sable une accumulation de particules organiques et minérales, dans laquelle règne une vie biologique intense. Ces associations biologiques recouvrent les grains de sable, raison pour laquelle on parle de membrane ou de film biologique [46].

C'est sous l'influence de la lumière solaire, que des algues poussent et absorbent les nutriments contenus dans l'eau brute (nitrates, dioxyde de carbone, phosphates) en les transformant en parois cellulaires et en oxygène. Ce dernier se dissolvant au fur et à mesure de sa formation dans l'eau pour agir sur les impuretés organiques. Parvenu à maturité, il se forme à la surface de sable un mince film visqueux en grande partie d'origine organique, appelé "membrane biologique" ou "peau filtrante".

En traversant cette membrane, les composés azotés se trouvent oxydés et les nitrites dégradés. La couleur est partiellement éliminée et une proportion très importante des particules en suspension sont retenues. L'eau pénètre ensuite dans le lit filtrant qu'elle traverse en percolant par les interstices entre les grains [50].

Tableau III.1 : Rendement des filtres lents sur sable [51]

<i>PARAMETRES DE LA QUALITE DE L'EAU</i>	<i>EFFET D'EPURATION DE LA LFILTRATION LENTE SUR SABLE</i>
Couleur	Réduction de 30 à 100%
Turbidité	La turbidité est généralement réduite jusqu'à moins 1 UNT
Coliformes fécaux	Réduction de 95 à 100% et souvent de 99 à 100%
Cercaires	Elimination presque complète des cercaires de schistosomes, cystes et oeufs
Virus	Elimination complète
Matières organiques	Réduction de 60 à 75%
Fer et manganèse	Elimination en grande partie
Fers lourds	Réduction de 30 à 95%

III.5.1.6. Nettoyage du filtre :

La méthode de nettoyage d'un filtre lent sur sable consiste en un raclage du sable en surface sur une épaisseur de 1,5 à 2 cm avec des pales à main pour éliminer la couche supérieure polluée.

L'intrusion des impuretés dans un lit filtrant se limite presque exclusivement aux couches supérieures. Le raclage de celles-ci supprime la majeure partie des éléments colmatant mais certaines impuretés restent dans les couches profondes du lit. Ces dépôts s'accumulent petit à petit et pénètrent graduellement plus profondément dans le lit filtrant. Ceci peut provoquer des problèmes si le sable reste longtemps en place. Lorsque, après plusieurs raclages, l'épaisseur minimale du lit filtrant est atteinte, il conviendra d'éliminer du filtre une couche de 0,3 m de sable avant de mettre en place du nouveau sable. La couche de sable éliminée contient tous les organismes nécessaires au

fonctionnement biochimique correct du filtre lent et doit être remplacée au-dessus du nouveau sable afin d'accélérer le processus de maturation [28].

III.5.2.Filtration rapide :

Pour la filtration rapide, le sable est communément utilisé comme matériau filtrant mais le processus est complètement différent de la filtration lente sur sable. Ainsi, une grande quantité de sable grossier est utilisée avec une taille effective de grain de 0,4 à 1,2 mm, et le débit de filtration est très élevé, généralement entre 5 et 15 m³/m²/h. Etant donné le sable grossier utilisé, les pores du lit filtrant seront relativement importants et les impuretés contenues dans l'eau brute pénétreront en profondeur dans le lit [28].

La couche d'eau surmontant le sable et provoquant la percolation est d'une hauteur de 0,8 à 2 m et exceptionnellement de 3 m. Le filtrat est recueilli au fond par l'intermédiaire de systèmes de drainage. Le nom de "filtres rapides" vient de l'importance des vitesses d'environ 20 à 50 fois plus élevées que celles des filtres lents. Ces vitesses de 2 à 25 m/h. engendrent des durées de traversée du matériau filtrant trop courtes pour permettre d'autres phénomènes d'épuration que de type physique. Il en découle une réduction de la surface de filtration, donc de la grandeur des ouvrages [50].

III.5.2.1.Traitement préalable :

L'emploi de filtres rapides implique, dans la plupart des cas, et sauf quelques exceptions, la mise en oeuvre des prétraitements de coagulation qui ont été décrits précédemment et, très fréquemment, d'ouvrages de décantation ou de clarification partielle préalables [21].

Un filtre à sable rapide est peu efficace lorsqu'il doit traiter une eau n'ayant pas bénéficié d'une coagulation et d'une floculation. Un tel filtre élimine en effet difficilement les particules non absorbées par le floc, et ce même s'il est constitué d'une épaisse couche de sable fin.

Le diamètre des particules de floc qui arrivent sur un filtre varie de 0,1 à 2 mm. La grosseur des interstices dans un milieu filtrant constitué de sable (diamètre effectif: 0,5 mm) varie de 0,1 à 0,2 mm. Les grosses particules de floc sont donc arrêtées à la surface du filtre, tandis que les particules plus petites pénètrent dans le filtre avant d'être arrêtées, la plupart des particules de floc sont arrêtées dans les 10 cm supérieurs du filtre [48].

III.5.2.2.Fonctionnement d'un filtre à sable rapide :

Les filtres rapides reçoivent généralement de l'eau prétraitée provenant de décanteurs pour achever l'opération entamée par ces derniers [50].

L'élimination globale des impuretés de l'eau réalisée dans une filtration rapide, résulte de la combinaison de plusieurs processus différents :

- ✚ **Le tamisage** des impuretés dans un filtre rapide est très limité étant donné les pores relativement grands des matériaux du lit.
- ✚ **La sédimentation** ne sera pas très efficace étant donné l'importance des débits. Spécialement les couches supérieures du lit filtrant seront de loin les moins efficaces et il y aura une profonde pénétration des impuretés dans tout le lit du filtre rapide.
- ✚ **L'adsorption** des impuretés ayant une charge électrique sur les grains du lit filtrant affectés d'une charge électrique opposée est l'effet de purification de loin le plus important dans la filtration rapide. Les particules chargées sont arrachées aux grains du lit filtrant, ce qui les laisse avec une charge opposée. L'effet électrocinétique renforce de manière importante l'action d'adsorption.
- ✚ **L'activité bactériologique et biochimique** d'un filtre rapide sera généralement insuffisante pour produire une eau saine bactériologiquement. Un traitement ultérieur sera nécessaire à la production d'une eau exempte de germes pathogènes.

Dans un filtre lent sur sable, l'eau demeure plusieurs heures; avec la filtration rapide, l'eau passe en quelques minutes seulement [28], Il s'ensuit un très rapide colmatage des pores laissés par les grains de sable entre eux, une augmentation des pertes de charge à tel point que le débit désiré n'est plus obtenu. Pour remédier à ces conséquences, on procède à une régénération ou recyclage (décolmatage par élimination des particules) du lit filtrant [50].

Les eaux filtrées sont recueillies en utilisant l'une des deux méthodes suivantes:

- La couche filtrante peut reposer directement sur des dalles de béton maigre, qui sont soit poreuses soit munies de bougies poreuses ou de buselures à fentes;
- La deuxième méthode consiste à recueillir l'eau filtrée au moyen de tuyaux perforés qui sont noyés dans une couche de sable fin [46].

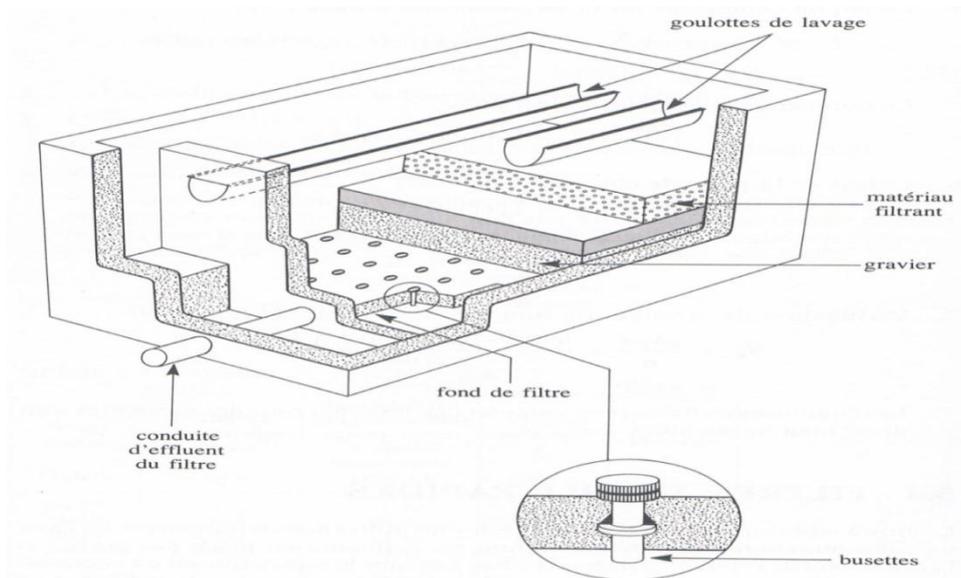


Figure III.2: Filtre à sable rapide [48]

III.5.2.3. Lavage des filtres rapides :

Lorsque la perte de charge, la turbidité ou les deux atteignent leurs valeurs maximales, on lave le filtre.

Pour nettoyer un lit filtrant rapide, il n'est pas suffisant de racler la couche supérieure. Dans la plupart des cas, la régénération ou recyclage se fait par un envoi simultané d'air et d'eau déjà filtrée sous pression en contre-courant (de bas en haut) après arrêt de l'entrée d'eau brute et de la sortie de l'eau filtrée. C'est par l'intermédiaire du système de drainage que remontent ces deux fluides assurant l'un le brassage du sable, l'autre son rinçage. La fréquence de lavage d'un lit de filtre rapide à sable va de deux fois par jour à une fois par trois jours, ou même une fois par semaine selon la qualité de l'eau à filtrer [28] [48] [50].

Lorsque l'eau de lavage est injectée par le fond, le milieu filtrant prend de l'expansion et libère les particules arrêtées par le filtre. Ces particules, beaucoup moins denses que les grains de sable, sont aisément entraînées vers les goulottes de lavage. Le niveau maximal du sable en expansion atteint 8 à 30 cm au-dessus de son niveau au repos [48].

III.5.2.4. Types de filtres rapides :

Les filtres rapides sont la plupart du temps construits sans couverture, l'eau s'écoulant dans le filtre par gravité. Pour certaines conditions de fonctionnement, il est préférable d'utiliser d'autres types de filtres rapides. Les plus importants sont : [28]

III.5.2.4.1. Les filtres sous pression :

Les filtres sous pression fonctionnent selon les mêmes principes que les filtres à sable rapides, sauf que leurs couches de sable et de gravier, ainsi que leur réseau de drainage, sont situés dans des cylindres horizontaux ou verticaux, lesquels sont conçus pour supporter des pressions de l'ordre de 1000 kPa. On peut ainsi filtrer de l'eau sous pression et la distribuer sans recourir au double pompage. Cet avantage ne compense toutefois pas les difficultés auxquelles on se heurte lorsque les filtres sont précédés d'unités de coagulation, de floculation et de décantation. En effet, pour éviter le double pompage, il faut alors que toutes ces unités de traitement fonctionnent sous pression [48].

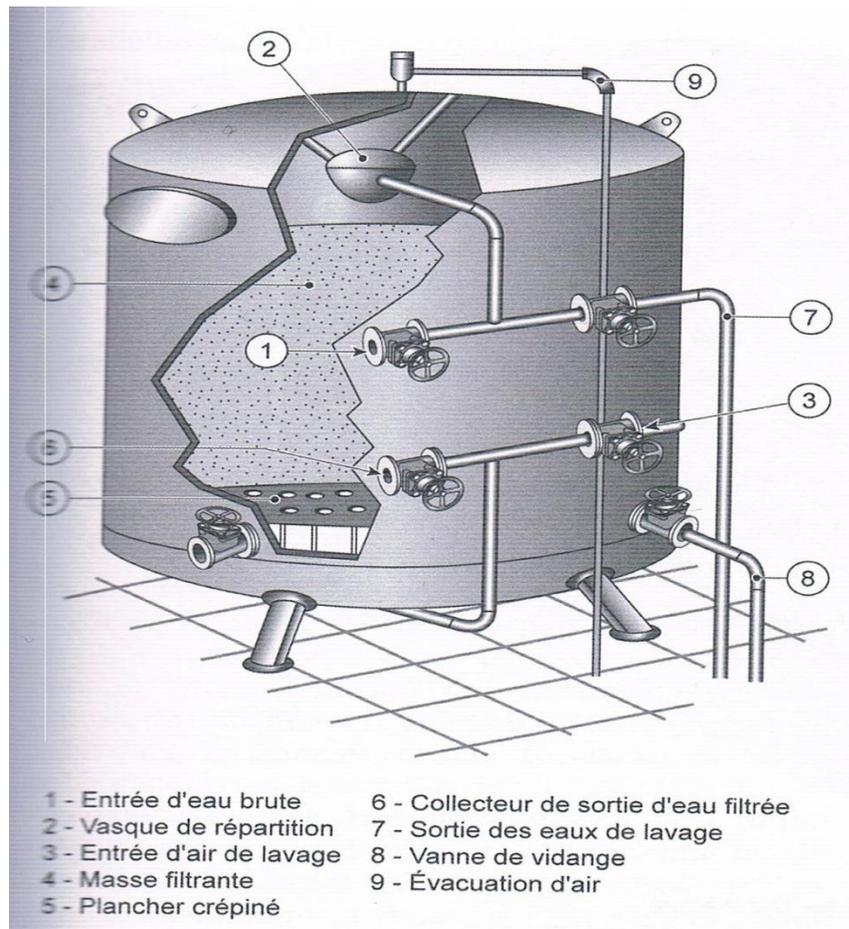


Figure III.3: filtre sous pression (en coupe) [16]

III.5.2.4.2. Les filtres à courant ascendant :

Les filtres à courant ascendant peuvent être utilisés pour un processus de filtration allant d'une filtration grossière à une filtration fine. La couche inférieure du fond des lits filtrants constituée du sable grossier élimine la majeure partie des impuretés en suspension, même dans une eau brute turbide, sans augmenter la résistance du lit filtrant, du fait de l'importance des pores. Les couches fines situées au-dessus ont des pores plus petits, mais la résistance du filtre au niveau de ces couches n'augmentera que lentement, car il ne reste alors plus beaucoup d'impuretés à filtrer. Dans les filtres ascendants, le sable est utilisé comme seul milieu filtrant [28].

III.5.2.4.3. Les filtres à couches multiples :

Les filtres à couches multiples fonctionnent par gravité, avec un courant dirigé de haut en bas traversant plusieurs couches de matériaux différents allant, dans le sens de l'écoulement, du plus grossier au plus fin. Pour les filtres rapides de petite taille, il est courant de n'utiliser que deux matériaux : une sous-couche du sable de 0,3 à 0,5 m avec une dimension de grains de 0,4 à 0,7 mm, recouverte par une couche de 0,5 à 0,7 m d'anthracite pierre ponce ou coques brisées de noix de coco de 1,0 à 1,6 mm. Employés comme traitement final les filtres à couches multiples peuvent donner d'excellents

résultats et, lorsque les matériaux convenables sont localement disponibles, ils peuvent être conseillés pour de petites stations de traitement [28].

III.5.3. Filtration sur charbon actif :

Le charbon actif n'est autre que du charbon de bois traité industriellement de façon à augmenter son pouvoir adsorbant naturel. La structure poreuse du charbon se trouve, de ce fait, considérablement développée [52].

Rappelons que la capacité d'adsorption est fonction du rapport surface/poids du corps adsorbant. Un charbon de bonne qualité doit présenter une surface adsorbante supérieure à 1 000 m²/g. Les pores formés ont des dimensions très variables, ce qui permet de retenir un grand éventail de contaminants [49] [52].

Les filtres à charbon activé sont identiques des points de vue construction et fonctionnement aux filtres rapides à ciel ouvert. Comme milieu filtrant, ils combinent l'avantage des processus d'épuration normaux des filtres et le pouvoir adsorbant exceptionnel du charbon activé [50].

Le charbon actif en grain est surtout utilisé pour enlever des composés organiques dissous responsables des odeurs dans l'eau, des pesticides, et autres composés émergents ainsi que des composés inorganiques comme l'arsenic. Toutefois, il n'est pas très efficace pour adsorber des colloïdes. Le CAG peut être utilisé en mode biologique ; lorsque le milieu est propice au développement de bactéries sur les grains, ce qui permet de dégrader les composés biodégradables de la matière organique [49].

On peut donc considérer le procédé de filtration sur charbon granuleux comme un procédé de finition particulièrement bien adapté à l'élimination d'un apport continu et modéré de matières polluantes adsorbables [21].

- 1 : Transfert de la particule de la couche externe d'hydratation vers l'intérieur :
- 2 : Déplacement de l'eau liée jusqu'au contact de l'adsorbant ;
- 3 : Diffusion à l'intérieur de l'adsorbant sous l'influence du gradient de concentration ;
- 4 : Adsorption dans un micropore

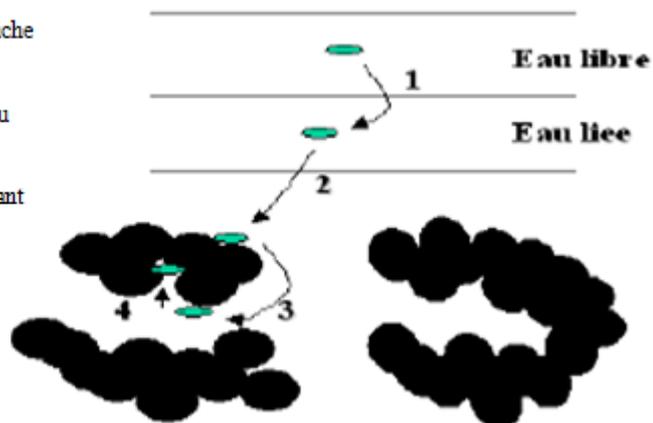


Figure III.4 : Transfert du soluté lors de son adsorption sur charbon activé [17]

III.6. Conclusion :

Il existe différentes méthodes de filtration sur sable qui est relative à la vitesse de passage de l'eau à travers le matériau filtrant (filtration lente, filtration rapide).

Une filtration sur sable peut être effectuée sur les eaux usées épurées afin d'améliorer leur qualité physico-chimique et microbiologique (cas de la filtration lente), car cette filtration permettra d'éliminer les MES qui n'ont pas été éliminées par les filières précédentes.

On peut aussi envisager la filtration sur charbon actif afin d'éliminer certains éléments (pesticides, odeurs, arsenic) par adsorption.

IV.1. Objectif de l'étude :

Cette étude a pour but de montrer l'influence que peut avoir une filtration sur sable accompagnée d'une filtration sur CAG sur la qualité des eaux usées épurées.

Pour atteindre cet objectif, on a tout d'abord fixé les conditions optimales de fonctionnement du pilote TE400 sur lequel on va procéder à la filtration, ensuite on a ramené les eaux usées épurées issues de la STEP de Ain El Houtz qu'on a fait passer à travers le sable ensuite à travers le CAG.

Pour voir et comprendre cette influence des analyses physico-chimiques et microbiologiques ont été effectuées.

IV.2. Description et fonctionnement du pilote TE 400:

Le pilote de filtration TE 400 est composé essentiellement de:

- Une cuve d'alimentation en PVC transparent, cylindrique d'une capacité utile de 150 L avec une vanne de vidange de type à boisseau sphérique en PVC et joint d'étanchéité en viton, DN 10;
- Une colonne de filtration en altuglas d'un diamètre intérieur de 100 mm et d'une hauteur de 1000 mm contenant le matériau filtrant qui est le sable et deux grilles de support et d'arrêt de sable en laiton d'une maille de 0.5 mm;
- Deux robinets manuelle de réglage, un pour le réglage du débit d'entrée VR2 et l'autre pour le réglage du débit de sortie ou filtrat VR1. Les deux vannes sont de type à membrane, en PVC et membrane en viton, DN 10;
- Charpente de support en tube carré en acier inoxydable 304 L;
- Multitubes piézométriques de mesure de la pression dans la colonne du filtre à différentes hauteurs, en altuglas, diamètre 8 mm, hauteur 500mm;
- Débitmètre à flotteur du circuit de sortie du filtrat de la colonne en PVC transparent DN 10; échelle variable de 20 à 200l/h avec une précision de plus ou moins 5%;
- Pompe d'alimentation de la suspension composée d'un corps et d'aubages en PVC, d'un débit de 10 m³/h pour une pression de 7.5 m de colonne d'eau, moteur électrique monophasé, 220 v, 50 Hz, 207 A. un filtre à panier à l'aspiration de la pompe; Autre vannes à usages différents [53].

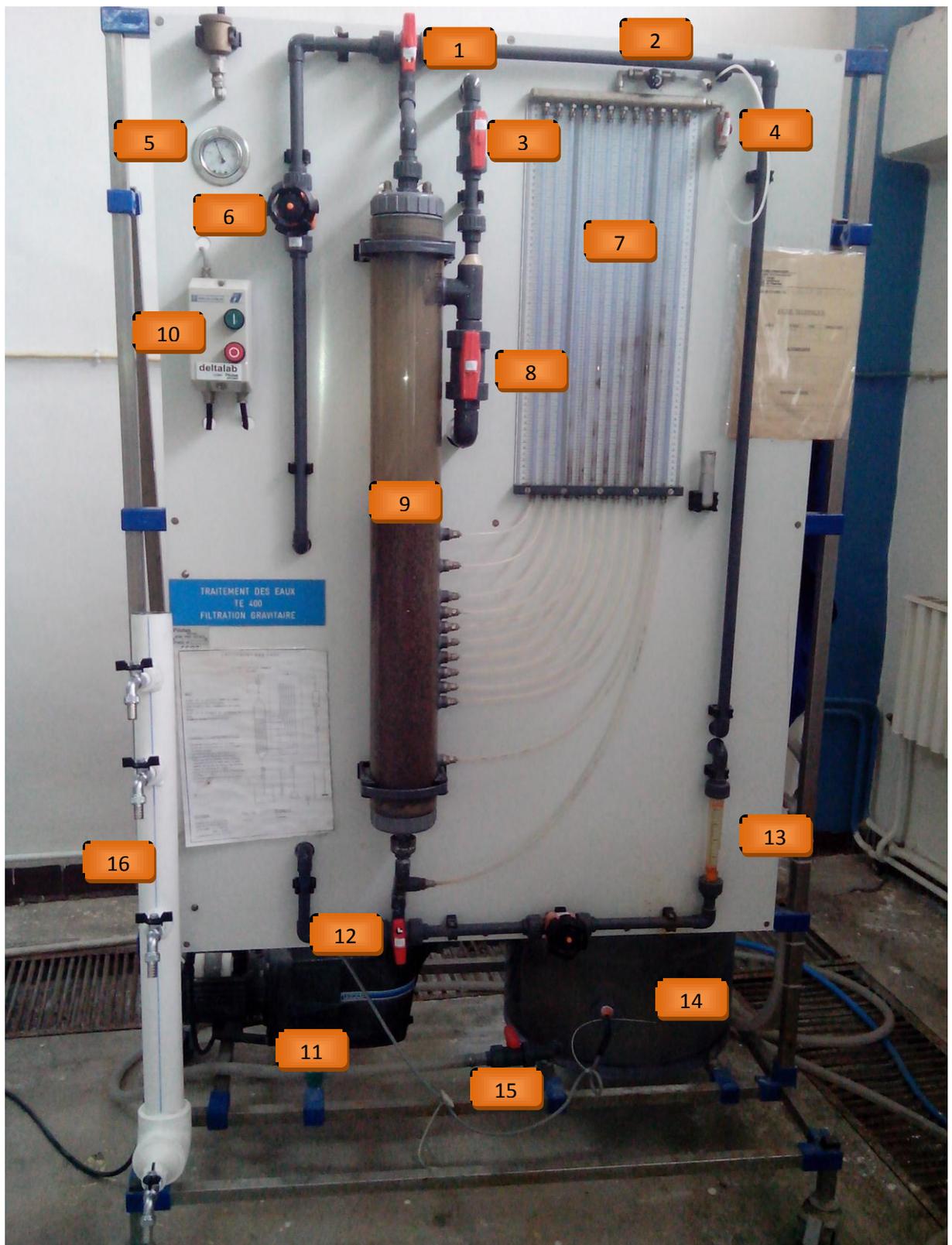


Photo IV.1: Pilote TE400

Légende :

1 : VD₁ : vanne manuelle de distribution haut filtre ;

- 2 : VA₁ : vanne manuelle d'isolation collectrice multi-manomètre ;
- 3 : VA₄ vanne manuelle d'arrêt mise à l'atmosphère ;
- 4 : VA₂ : vanne manuelle d'arrêt pompe à vélo multi-manomètre ;
- 5 : Manomètre de pression;
- 6 : VR₂ : vanne de réglage du débit d'entrée;
- 7 : Multitubes piézométriques ;
- 8 : VA₃ : vanne manuelle d'arrêt retour bac alimentation ;
- 9 : Colonne de sable ;
- 10 : Bouton marche/arrêt ;
- 11 : Pompe d'alimentation ;
- 12 : VD₂ : vanne manuelle de distribution basse filtre;
- 13: Débit mètre;
- 14: Cuve d'alimentation ;
- 15 : VR₁ : vanne de réglage du débit de sortie (filtrat) ;
- 16 : Colonne de charbon actif ne faisant pas partie du pilote.

IV.2.1. Procédure de la filtration sur sable :

Les expériences ont été effectuées en écoulement gravitaire de l'eau. Dans ce mode de manipulation, le mode opératoire qu'on a suivi est le suivant:

- Mettre en marche le pilote;
- Remplir la cuve d'alimentation d'eau épurée;
- Mettre en marche la pompe d'alimentation;
- Maintenir l'agitation pendant 10 minutes, tout en s'assurant que la solution est exempte de produits solides ayant des volumes très importants au risque de voir le filtre s'encrasser très rapidement.
- Positionner la vanne de distribution basse de la colonne de filtration VD₂;
- Positionner la vanne de haut de la colonne de filtration VD₁;
- Ouvrir la vanne d'isolation VA₁.
- Fermer la vanne d'arrêt VA₂.
- Ouvrir la vanne d'arrêt du retour VA₃.
- Ouvrir la vanne d'arrêt de mise à l'atmosphère VA₄.
- Le débit de filtration à l'entrée est réglé (choisi arbitrairement) à : 30, 50, 80, 120, et 150 l/h.

- Noter les niveaux des tubes piézométriques pendant des intervalles de temps, en maintenant tout au long de la manipulation, le même niveau d'eau dans la colonne de filtration à l'aide de la vanne de réglage VR2 et le même débit à l'aide de la vanne VR1;
- Prendre des échantillons du filtrat pour faire les analyses ;
- Lorsque le filtre commence à s'encrasser, il faudrait régler la vanne VR1 de manière à maintenir le débit de soutirage du filtrat constant;
- Lorsque toutes les mesures ont été prises, la manipulation est finie, il convient donc d'arrêter le pilote et faire un lavage du filtre [47] [53].

IV.2.2.Procédure de lavage du sable:

Lors du colmatage du filtre, on a procédé à son lavage en suivant les étapes suivantes:

- Fermer les vannes de réglage de sortie du filtrat VR1 et du débit d'alimentation des suspensions VR2;
- Arrêter la pompe d'alimentation de la suspension par le bouton «ARRET/MARCHE» sur la position « ARRET »;
- Vidanger la cuve d'alimentation avec la vanne VS2;
- Fermer la vanne d'isolation du collecteur de prise de pression VA1 de manière à empêcher le jaillissement de l'eau lors de la phase de lavage;
- Fermer la vanne d'arrêt de la pompe à vélo sur le collecteur de prises de pression VA2;
- Positionner la vanne de distribution basse de la colonne de filtration VD2 de manière à alimenter la colonne par le bas (L orienté à gauche);
- Positionner la vanne de distribution haute de la colonne de filtration VD1 de manière à évacuer l'eau de lavage par le haut (L orienté à droite);
- Fermer la vanne d'arrêt du retour de la suspension vers le bac d'alimentation VA3;
- Ouvrir la vanne d'alimentation générale d'eau de lavage de manière à alimenter la colonne;
- Vérifier que l'eau monte bien lentement dans les tubes de prise de pression de la colonne de filtration;
- Si les produits filtrés ne s'évacuent pas bien, il convient d'augmenter le débit d'alimentation d'eau de lavage du média filtrant;

-
- Lorsque le produit filtré a été éliminé, il convient de vidanger la colonne de filtration;
 - Fermer la vanne d'alimentation générale d'eau de lavage ;
 - Positionner la vanne de distribution basse de la colonne de filtration VD2 de manière à éliminer le liquide contenu dans la colonne par le bas (L orienté à droite);
 - Ouvrir la vanne d'isolation du collecteur de prises de pression VA1;
 - Ouvrir la vanne de réglage de débit de sortie du filtrat VR1;
 - Ouvrir la vanne d'arrêt de mise à l'atmosphère de la colonne de filtration VA4;
 - Laisser vidanger la colonne par gravité;
 - Laver la cuve d'alimentation de la suspension avec de l'eau propre;
 - Fermer la vanne de vidange de la cuve d'alimentation de la suspension VS2;
 - Fermer la vanne de réglage de sortie du filtrat VR1;
 - Fermer la vanne d'isolation du collecteur de prises de pression VA1 ;
 - Fermer la vanne d'arrêt de mise à l'atmosphère de la colonne de filtration VA4;
 - Positionner la vanne de distribution basse de la colonne de filtration VD2 de manière à alimenter la colonne par le bas (L orienté à gauche);
 - Ouvrir la vanne d'alimentation générale d'eau de lavage de manière à alimenter la colonne;
 - Vérifier que l'eau monte bien lentement dans les tubes de prise de pression de la colonne de filtration;
 - Lorsque la colonne est à nouveau remplie d'eau propre, la colonne est prête pour une nouvelle manipulation;
 - Fermer la vanne d'alimentation générale d'eau de lavage;
 - Ouvrir la vanne d'arrêt du collecteur des prises de pression VA1 de manière à relier à l'air libre toutes ces prises de pression;
 - Ouvrir la vanne d'arrêt de mise à l'atmosphère de la colonne de filtration VA4;
 - Fermer la vanne d'arrêt du retour de la suspension vers le bac d'alimentation VA3;
 - Positionner la vanne de distribution basse de la colonne de filtration VA2 de manière à éliminer le filtrat de la colonne par le bas (L orienté à droite);
 - Positionner la vanne de distribution haute de la colonne de filtration VD1 de manière à alimenter la colonne par le haut (L orienté à gauche);
-

- Ouvrir la vanne d'arrêt de la pompe à vélo sur le collecteur de prises de pression VA2 [14] [53].

IV.3. Protocoles expérimentaux :

IV.3.1. Analyses physico-chimiques :

IV.3.1.1. Matières en suspension par la méthode par filtration sur fibre de verre :

+ Principe :

L'eau est filtrée et le poids de matières retenues par le filtre est déterminé par pesée différentielle.

+ Matériel spécial :

- Dispositif de filtration sous vide ou sous pression
- Disques filtrants en fibres de verre

+ Mode opératoire :

Laver le disque de filtration à l'eau distillée, le sécher (105 °C) jusqu'à masse constante, puis le peser à 0,1 mg près après passage au dessiccateur.

Le mettre en place sur l'équipement de filtration. Mettre en service le dispositif d'aspiration ou de pression. Verser l'échantillon (V) sur le filtre.

Rincer la fiole ayant contenu l'eau à analyser avec 10 ml d'eau permutée.

Faire passer sur le filtre cette eau de lavage.

Laisser essorer le filtre, sécher à 105 °C. Laisser refroidir au dessiccateur et peser à 0,1 mg près, jusqu'à masse constante [10].

+ Expression des résultats :

La teneur de l'eau en matières en suspension (mg / L) est donnée par l'expression

$$\frac{M_1 - M_0}{V} \times 1\,000 \quad \text{.....IV.1. [10]}$$

M_0 = masse du disque filtrant avant utilisation (mg).

M_1 = masse du disque filtrant après utilisation (mg).

V = volume d'eau utilisé (ml).

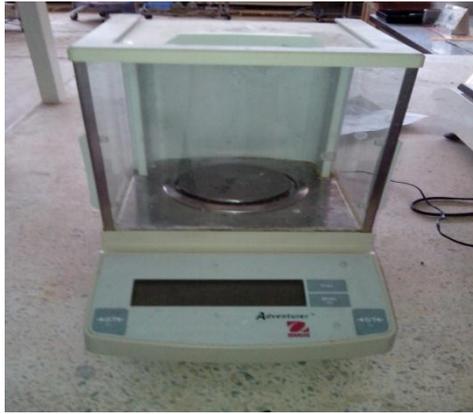


Photo IV.2: Balance de précision



Photo IV.3: Etuve



Photo IV.4: Dispositif de filtration sous vide

IV.3.1.2. Alcalinité par la méthode titrimétrique de dosage du TA et du TAC :

À l'inverse de l'acidité, l'alcalinité d'une eau correspond à la présence de bases et de sels d'acides faibles.

On distingue comme pour la mesure de l'acidité, deux titres qui sont le titre alcalimétrique ou titre alcalimétrique simple (TA) et le titre alcalimétrique complet (TAC).

✚ Principe :

Ces déterminations sont basées sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué, en présence d'un indicateur coloré.

✚ Mode opératoire :**➤ Détermination du TA :**

Prélever 100 ml d'eau à analyser dans une fiole conique. Ajouter 1 à 2 gouttes de solution alcoolique de phénol phtaléine. Une coloration rose doit alors se développer. Dans le cas contraire le TA est nul, ($\text{pH} < 8,3$). Verser ensuite doucement l'acide dans la fiole à l'aide d'une burette, en agitant constamment, et ceci jusqu'à décoloration complète de la solution ($\text{pH} 8,3$).

Soit V le volume d'acide utilisé pour obtenir le virage.

➤ Détermination du TAC :

Utiliser l'échantillon traité précédemment ou le prélèvement primitif s'il n'y a pas eu de coloration. Ajouter 2 gouttes de solution de vert de bromocrésol et de rouge de méthyle et titrer de nouveau avec le même acide jusqu'à disparition de la coloration bleu verdâtre et apparition de la couleur rose ($\text{pH} 4,5$). Le dosage doit être effectué rapidement pour réduire les pertes de CO_2 qui pourraient entraîner une élévation du pH de virage (voir ci-dessus).

Soit V' le volume d'acide 0,02 N versé depuis le début du dosage.

✚ Expression des résultats :

1) TA :

– $V/5$ exprime le titre alcalimétrique (TA) en milliéquivalents par litre.

– V exprime le titre alcalimétrique en degrés français (1°f correspond à 10 mg de carbonate de calcium ou à 0,2 mEq/l).

2) TAC :

– $V'/5$ exprime le titre alcalimétrique complet (TAC) en milliéquivalents par litre.

– V' exprime le titre alcalimétrique complet en degrés français [10].

IV.3.1.3. Dureté ou titre hydrotimétrique (TH) par titrimétrie à l'EDTA :

La dureté ou titre hydrotimétrique d'une eau correspond à la somme des concentrations en cations métalliques à l'exception de ceux des métaux alcalins et de l'ion hydrogène. Dans la plupart des cas la dureté est surtout due aux ions calcium et magnésium auxquels s'ajoutent quelquefois les ions fer, aluminium, manganèse, strontium.

✚ Principe :

Les alcalinoterreux présents dans l'eau sont amenés à former un complexe du type chélate par le sel disodique de l'acide éthylènediamine tétracétique à $\text{pH} 10$. La disparition des dernières traces d'éléments libres à doser est décelée par le virage d'un

indicateur spécifique, le noir ériochrome. En milieu convenablement tamponné pour empêcher la précipitation du magnésium, la méthode permet de doser la somme des ions calcium et magnésium.

Mode opératoire :

Introduire 50 ml d'eau à analyser dans une fiole conique de 250 ml, ajouter 4 ml de solution tampon et trois gouttes de solution de noir ériochrome T. La solution se colore en rouge foncé ou violet, le pH doit être de 10. En maintenant une agitation, verser la solution d'EDTA rapidement au début puis goutte à goutte lorsque la solution commence à virer au bleu. Vérifier que la coloration ne change plus par l'addition d'une goutte supplémentaire d'EDTA [10].

Expression des résultats :

La concentration totale en calcium et magnésium, exprimée en milliéquivalents par litre, est donnée par l'expression :

$$1\ 000 \times \frac{c \times V_1}{V_2} \dots\dots\dots\text{IV.2. [10]}$$

c = Concentration en milliéquivalents par litre de la solution d'EDTA.

v₁ = Volume en ml de la solution d'EDTA.

v₂ = Volume d'échantillon.

IV.3.1.4. Calcium par la méthode titrimétrique à l'EDTA :

Principe :

Le principe est identique à celui de la méthode titrimétrique décrite pour la dureté totale. Toutefois, comme le dosage se fait à un pH élevé (12-13), le magnésium est précipité sous forme d'hydroxyde et n'intervient pas.

Mode opératoire :

Dans une fiole conique de 250 ml, introduire successivement : eau à analyser 50 ml, solution d'hydroxyde de sodium 2 ml, indicateur 0,2 g environ.

Ajouter la quantité de solution d'EDTA nécessaire pour avoir un virage au bleu. Soit y le nombre de millilitres versés.

Effectuer le dosage une deuxième fois. Prendre la moyenne des deux résultats. Soit V le volume ainsi déterminé [10].

Expression des résultats :

Pour une prise d'essai de 50 ml, la teneur en calcium est égale à :

$$\text{Ca (mg/L)} = \frac{V \times f \times 0,4008 \times 1000}{50} \quad \dots\dots\dots\text{IV.3. [10]}$$

La teneur en carbonate de calcium est égale à :

$$\text{CaCO}_3 \text{ (mg/L)} = \frac{V \times f \times 1000}{50} \quad \dots\dots\dots\text{IV.4. [10]}$$

IV.3.1.5. Détermination du magnésium :

Dureté ou titre hydrotimétrique (TH) est égale à la somme de la concentration du calcium et du magnésium, donc si on connaît la dureté et la concentration en calcium on peut tirer celle du magnésium.

$$[\text{TH}] = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] \quad \dots\dots\dots\text{IV.5} \quad , \quad [\text{Mg}^{2+}] = [\text{TH}] - [\text{Ca}^{2+}] \quad \dots\dots\dots\text{IV.6.}$$

Avec: [TH], [Ca²⁺], [Mg²⁺] en meq/l

$$\text{Pour convertir } [\text{Mg}^{2+}] \text{ en mg/l: } [\text{Mg}^{2+}] \text{ (meq/l)} = [\text{Mg}_2^+] * 24/2 \text{ (mg/l)} \quad \dots\dots\dots\text{IV.7}$$

IV.3.1.6. Chlorure par la méthode de Mohr :

✚ Principe :

Les chlorures sont dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium. La fin de la réaction est indiquée par l'apparition de la teinte rouge caractéristique du chromate d'argent.

✚ Mode opératoire :

Introduire 100 ml d'eau à analyser (préalablement filtrée si nécessaire).

Ajouter 2 à 3 gouttes d'acide nitrique pur puis une pincée de carbonate de chaux et 3 gouttes de solution de chromate de potassium à 10 %.

Verser alors au moyen d'une burette la solution de nitrate d'argent jusqu'à apparition d'une teinte rougeâtre, qui doit persister 1 à 3 minutes.

Soit V le nombre de millilitres de nitrate d'argent 0,1 N utilisés [10].

✚ Expression des résultats :

Pour une prise d'essai de 100 ml :

$$V \times 10 \times 3,55 \quad \dots\dots\dots\text{IV.8. [10]}$$

Donne la teneur en chlorures, exprimée en milligrammes de Cl⁻ par litre d'eau.

$$V \times 10 \times 5,85 \quad \dots\dots\dots\text{IV.9. [10]}$$

Donne la teneur en chlorures exprimée en milligrammes de NaCl par litre d'eau.

IV.3.1.7. Demande chimique en oxygène (DCO) :

Dans des conditions définies, certaines matières contenues dans l'eau sont oxydées à l'ébullition (150 °C) par un excès de dichromate de potassium, en milieu acide et en présence de sulfate d'argent jouant le rôle de catalyseur d'oxydation et de sulfate de mercure (II) permettant de complexer les ions chlorure. L'excès de dichromate de potassium est dosé par le sulfate de fer et d'ammonium. Les matières oxydables (et en particulier les matières organiques) de l'échantillon sont oxydées par le dichromate de potassium dans les conditions précitées.

Mode opératoire :

Dans un tube de réaction introduire 10,0 ml d'échantillon. Si la DCO de l'échantillon est supérieure à 800 mg/L O₂, une dilution appropriée devra être réalisée.

Ajouter 5,00 ml de la solution de dichromate de potassium (0,040 mol/L).

Ajouter, lentement et avec précaution, 15 ml de la solution d'acide sulfurique contenant le sulfate d'argent, en agitant soigneusement le tube.

Mettre 1 à 2 gouttes d'acide sulfurique sur le col rodé du tube pour le lubrifier et relier le réfrigérant au tube de réaction. S'assurer que le réfrigérant tourne facilement dans le rodage du tube (sinon ajouter une goutte d'acide supplémentaire).

Placer le tube dans le bloc chauffant et porter à ébullition (150 °C ± 5 °C) pendant 2 heures.

Arrêter le chauffage. Retirer les tubes avec leurs réfrigérants. Les laisser refroidir, puis rincer avec précaution le réfrigérant en recueillant les eaux de lavage dans le tube de réaction. Ôter le réfrigérant. Transvaser le contenu du tube dans un erlenmeyer de 250 ml, rincer et diluer avec environ 75 ml d'eau. Ajouter 2 à 3 gouttes de ferroïne et titrer avec la solution de sulfate de fer (II) et d'ammonium.

➤ **Essai à blanc :**

Procéder de la même manière en remplaçant l'échantillon par 10,0 ml d'eau déionisée.

La consommation de dichromate de potassium lors de cet essai doit être très faible et ne pas excéder 0,5 ml. Des valeurs plus élevées peuvent trouver leur origine dans une propreté insuffisante de la verrerie ou dans des erreurs de concentrations des réactifs.

➤ **Essai témoin avec la solution de référence :**

Procéder de la même manière en remplaçant l'échantillon par 10,0 ml de la solution de référence à 0,066 g/l. On doit obtenir pour cette solution une DCO égale à 100 ± 18 mg/L d'oxygène [10].

✚ Expression des résultats

La demande chimique en oxygène (DCO) exprimée en milligrammes d'oxygène par litre est égale à :

$$\frac{8\,000(V_0 - V_1)T}{V} \dots\dots\dots\text{IV.10. [10]}$$

V_0 = Volume de sulfate de fer et d'ammonium (II) nécessaire au dosage (ml).

V_1 = Volume de sulfate de fer et d'ammonium (II) nécessaire à l'essai à blanc (ml).

T = Titre de la solution de sulfate de fer (II) et d'ammonium (en mol/l).

V = Volume de la prise d'essai (en ml).

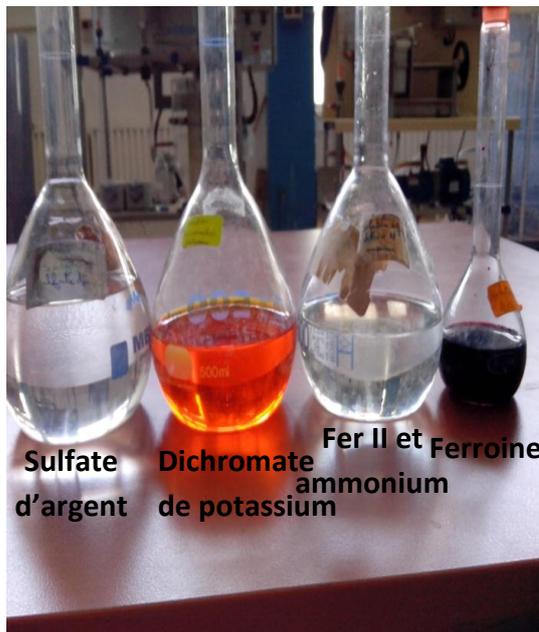


Photo IV.5: Réactifs pour la DCO



Photo IV.6 : Appareil de mesure de la DCO

IV.3.1.8. Conductivité :

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm² de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm [10].

Après avoir rincé la sonde avec de l'eau distillée, on la plonge dans la solution à analyser et on procède à la lecture.



Photo IV.7: Appareil qui mesure la conductivité, la température et le pH

IV.3.1.9.pH :

Le pH a été mesuré par l'appareil sur la photo, après avoir rincer la sonde avec de l'eau distillée, on la plonge dans la solution à analyser et on procède à la lecture.

IV.3.1.10.Température :

La température a été mesurée à l'aide de l'appareil de la photo, on introduit la sonde dans la solution à analyser après avoir rincer la sonde à l'eau distillée, et on effectue la lecture.

IV.3.1.11.Dioxyde de carbone dissous (CO₂ dissout) :

Les eaux dont le pH est compris entre 4,5 et 8,3 contiennent le plus souvent du dioxyde de carbone à une concentration non négligeable et donc mesurable.

✚ Mode opératoire :

Dans une fiole conique de 250 ml, introduire successivement : eau à analyser 25 ml, 1 à 2 gouttes de phénolphaléine (0.1%), si une coloration rose apparait absence de CO₂ dans le cas contraire titrer avec la solution d'hydroxyde de sodium jusqu'à coloration rose. Soit V_{NaOH} le nombre de millilitres versés.

Effectuer le dosage une deuxième fois. Prendre la moyenne des deux résultats. Soit V le volume ainsi déterminé [10].

✚ Expression des résultats :

$$\text{CO}_2 \text{ (mg/l)} = V_{\text{NaOH}} * 40 \quad \dots\dots\dots\text{IV.11. [10]}$$

IV.3.1.12.Turbidité :

La turbidité d'une eau est due à la présence des particules en suspension, notamment colloïdales (argiles, limons, grains de silice, matières organiques)

Appareils de mesure

Le turbidimètre comprend un faisceau lumineux qui traverse la cuve de mesure. La lumière diffusée latéralement par les particules en suspension est reçue par une cellule de mesure décalée de 90°.

La lumière transmise est reçue par voie directe. Pour que les mesures comparatives d'un appareil à un autre soient satisfaisantes, un certain nombre de conditions doivent être respectées [10].



Photo IV.8: Turbidimètre

IV.3.2. Analyses microbiologiques :

Il n'est toujours pas possible de détecter de manière exhaustive, dans un échantillon d'eau, l'ensemble des microorganismes présents.

L'évaluation de la qualité microbiologique des eaux est par conséquent basée sur le concept de germes dits "indicateurs". Ces indicateurs (ou bactéries indicatrices de contamination) n'ont pas nécessairement par eux-mêmes un caractère pathogène, mais leur présence indique l'existence d'une contamination par des matières fécales et leur abondance est une indication du niveau de risque de présence de micro-organismes pathogènes.

Le principal objectif des études qualitatives et quantitatives sur la flore microbiologique des effluents urbains est de dénombrer les marqueurs de pollution fécale des eaux « les

coliformes totaux et fécaux, les streptocoques fécaux et les spores des bactéries sulfitoréductrices» [3].

IV.3.2.1. Dénombrement de la flore microbienne :

C'est la technique de concentration la plus utilisée au laboratoire. Le plus généralement, on procède à une filtration sur membranes en esters de cellulose, de porosité 0,22 μm ou 0,45 μm , susceptibles de retenir les bactéries.

- **Technique de la filtration sur membrane :**

Flamber la face supérieure de l'appareil. Fermer le robinet du support et mettre en marche la pompe à vide. Prélever une membrane stérile en la saisissant par son bord extérieur, avec une pince flambée et refroidie ; la déposer sur la plaque poreuse. L'entonnoir-réservoir flambé et refroidi est placé au-dessus de la membrane. Installer le dispositif de fixation.

Agiter soigneusement le flacon d'eau à analyser et verser l'eau, stérilement, dans le réservoir 100 ml. Ouvrir le robinet du support suffisamment pour laisser l'eau s'écouler lentement sous l'action du vide.

Dès que la membrane paraît sèche, fermer le robinet, enlever le dispositif de fixation et, avec la pince à creuset, le réservoir.

Prélever la membrane avec une pince flambée en la saisissant par son extrême bord, et l'introduire sur la boîte de pétri contenant le milieu de culture gélose nutritive, incubé 24h à 37 °C. Procéder au dénombrement des colonies qui apparaissent sur le filtre par le nombre le plus probable [10].

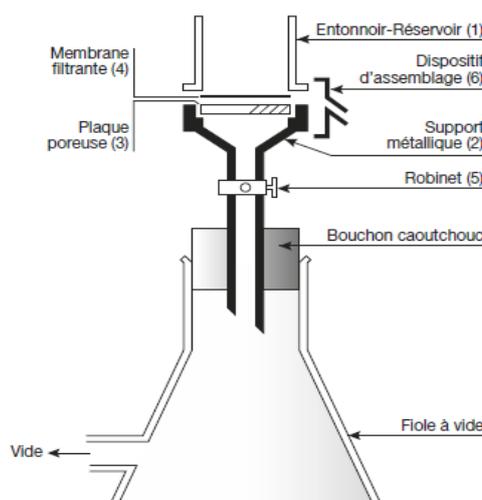


Figure IV. : Filtration sur membrane [10]



Photo IV.9 : Appareil de filtration sur membrane

IV.3.2.2. Recherche et dénombrement des coliformes et d'*E. Coli* présumé :

- **Première étape : inoculation :**

Inoculer 1ml d'eau à analyser dans des tubes avec cloches de Durham, Stérilisés 20 minutes à l'autoclave à 120 °C contenant 10 ml du milieu composé d'extrait de viande de bœuf, peptone, lactose, eau déionisée.

Après inoculation, agiter pour homogénéiser sans faire pénétrer d'air dans la cloche de Durham, et placer les tubes dans une étuve à 36 °C pendant 24 heures. Procéder à une première lecture après cette incubation.

Considérer comme « positifs » les tubes où il se produit simultanément un trouble dans toute la masse liquide et un dégagement de gaz dans la cloche.

Repiquer chaque tube positif dans le (ou les) milieu de confirmation.

Incuber à nouveau les tubes « négatifs » durant 24 heures. Lire à nouveau et procéder au repiquage des tubes devenus « positifs ».

- **Deuxième étape : repiquage sur milieu de confirmation :**

Utilisation d'un seul tube confirmatif (Dénombrement des *E. coli* présumés)

Le repiquage des tubes d'inoculation positifs est effectué sur un tube avec cloche de Durham Stérilisé à l'autoclave 10 minutes à 115 °C contenant un milieu de Schubert composé de tryptose , mannitol , monohydrogénophosphate de potassium, dihydrogénophosphate de potassium , chlorure de sodium, sulfate de sodium, eau déionisée et Réactifs d'Erlich-Kovacs pour recherche de l'indol

Dès leurs ensemencements, les tubes sont mis au bain d'eau à 44 °C durant 24 heures. Sont considérés comme positifs et pris en compte pour l'évaluation du NPP d'*E. Coli* présumés, les tubes où une pousse bactérienne est observée, avec dégagement de gaz dans la cloche de Durham et où la coloration rouge résultant de l'addition du réactif de Kovacs témoigne de la production d'indol.

- **Expression des résultats :**

Les résultats sont exprimés sous la forme : nombre le plus probable de coliformes, coliformes fécaux, *E. coli* présumés par 100 ml [10].

IV.3.2.3. Dénombrement des Enterococcus :

- **Test présomptif :**

Ensemencer sur le milieu de Rothe composé de peptone, glucose, chlorure de sodium, monohydrogénophosphate de potassium, dihydrogénophosphate de potassium, azide de

sodium, eau déionisée, veiller à ce qu'aucune évaporation ne se soit produite dans le milieu depuis sa préparation, car celle-ci entraînerait une concentration des produits inhibiteurs.

Homogénéiser soigneusement, par agitation, le contenu des tubes ; s'assurer, une fois celle-ci terminée, que la teinte du bouillon est uniforme en haut et en bas du tube, de façon à ce que la concentration en inhibiteur soit identique en tous points.

Incuber les tubes à 37 °C et les examiner après 24 et 48 heures. Les tubes présentant un trouble microbien pendant cette période sont présumés contenir un streptocoque fécal et sont soumis au test confirmatif.

- **Test confirmatif :**

Après agitation des tubes positifs, prélever sur chacun d'eux successivement 3 öses bouclées (de 3 mm de diamètre) ou quelques gouttes de pipette Pasteur, et les reporter dans des tubes du milieu de Litsky identique à celui de Rothe mais avec une solution d'éthyl violet de plus. Incuber à 37 °C pendant 24-48 heures.

L'apparition d'un trouble microbien confirme la présence d'un streptocoque fécal. Parfois, la culture s'agglomère au fond du tube en fixant le colorant et en formant une pastille violette de signification identique à celle du trouble.

- **Expression des résultats :**

Les résultats de dénombrement des streptocoques fécaux sont exprimés comme ceux d'*Escherichia coli* en nombre de germes par 100 ml [10].

IV.3.2.4. Recherche et dénombrement des bactéries sulfito-réductrices et de leurs spores (clostridium) :

Placer 25 ml d'eau à analyser dans un tube. Le porter au bain d'eau à 80 °C de façon à ce qu'il demeure dix minutes à cette température. Refroidir rapidement à environ 55 °C.

- **Préparation du milieu :**

Placer quatre tubes de milieu de culture (contenant chacun 20 ml de milieu) au bain d'eau bouillant pour assurer la fusion du milieu. Maintenir 10 minutes dans ce bain d'eau pour assurer l'élimination des gaz dissous.

Refroidir à 55 °C environ. Ajouter à chaque tube 1 ml de la solution de sulfite de sodium et 4 gouttes de la solution d'alun de fer. Mélanger sans faire de bulles.

- **Inoculation et incubation :**

Dans quatre tubes stériles, répartir 5 ml d'eau traitée pour détruire les formes végétatives. Couler dans chacun d'eux le contenu d'un tube de milieu, mélanger doucement sans incorporer d'air. Refroidir sous l'eau du robinet. Incuber à 37 °C. Faire une lecture après 24 heures ; une deuxième après 48 heures.

- **Lecture et expression des résultats :**

Considérer comme résultant d'une spore de bactérie anaérobie sulfite-réductrice toute colonie noire entourée d'un halo noir. Exprimer le résultat en nombre de spores par 100 ml.

IV.3.2.5. Recherche des *Salmonella* :

La recherche des *salmonella* comporte plusieurs étapes :

- **Pré-enrichissement** : ensemencement d'un milieu liquide non sélectif contenant peptone, chlorure de sodium, monohydrogénophosphate de sodium, dihydrogénophosphate de potassium, eau déionisée avec l'échantillon à analyser, puis incubation à 37 °C ;

- **Enrichissement** : ensemencement de deux milieux liquide sélectifs ; le premier est le milieu cystine-sélénite contenant de la peptone pancréatique de caséine, lactose, monohydrogénophosphate de sodium, cystine L, monohydrogénosélénite de sodium, eau déionisée et le second est le bouillon au tétrathionate avec de l'extrait de viande, peptone pancréatique de caséine, chlorure de sodium, carbonate de calcium, eau déionisée, à partir du bouillon de pré-enrichissement puis incubation à 37 °C ou 42 °C ;

- **Isolement** : ensemencement de deux milieux sélectifs solides le premier celui de la gélose *Salmonella-Shigella composé* de peptone pancréatique de caséine, extrait de viande, lactose, sels biliaires, citrate de sodium, citrate de fer ammoniacal, thiosulfate de sodium, rouge neutre, vert brillant, eau déionisée et le second contenant de l'extrait de viande de boeuf déshydraté, peptone pancréatique de caséine chlorure de sodium, monohydrogénophosphate de sodium, dihydrogénophosphate de sodium, agar-agar en poudre ou en paillettes , eau déionisée, à partir des bouillons d'enrichissement puis incubation à 37°C ;

- **Identification** : Identification des colonies présumées à l'aide de tests biochimiques ou sérologiques [10].

IV.3.3. Caractéristiques du matériau filtrant utilisé :

IV.3.3.1. Analyse granulométrique :

On pèse une certaine quantité de matériau filtrant préalablement débarrassée de toute humidité, puis on place cet échantillon sur une série de tamis dont les mailles sont de plus en plus petites. Pour favoriser le tamisage, on fait vibrer la série de tamis; on évite cependant les vibrations violentes lorsque les grains du matériau filtrant sont friables. On pèse ensuite la quantité de matériau filtrant retenue par chaque tamis; on en déduit ainsi le pourcentage de l'échantillon qui traverse chaque tamis, donc le pourcentage des grains dont le diamètre est inférieur au diamètre des mailles du tamis. On trace ensuite, sur papier semi-logarithmique, la variation du pourcentage de l'échantillon dont les grains ont un diamètre inférieur à D (échelle arithmétique) en fonction du diamètre, D (échelle logarithmique) [48].

IV.3.3.2. Diamètre effectif (DE) et du coefficient d'uniformité (Cu) :

La taille effective, exprimée en mm et notée DE, correspond à l'ouverture de maille laissant passer 10 % en poids de l'échantillon soumis à l'analyse.

Le coefficient d'uniformité est un nombre sans dimension, est égal au quotient de la diversité 60 % par la taille effective : $CU = D_{60}/DE$

La diversité 60 %, exprimée en mm est donnée par l'ouverture de maille laissant passer 60 % en poids de l'échantillon soumis à l'analyse [47].

IV.3.3.3. Masse volumique apparente :

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel, après passage à l'étuve à 105 ± 5 °C, exprimée en (g/cm³ ; kg/m³).

Le mode opératoire retenu pour déterminer ce paramètre est le suivant :

- 1- Mesurer le volume de l'éprouvette V.
- 2- Verser le sable sec dans l'éprouvette jusqu'au volume V.
- 3- Peser la quantité du sable obtenu dans l'éprouvette [54].

$$\rho_{\text{apparente}} = \frac{\text{masse de sable sec}}{\text{volume de l'éprouvette}} \quad \dots\dots\dots \text{IV.12. [54]}$$

IV.3.3.4. Masse volumique réelle :

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule, pores à l'intérieur des grains exclus), après passage à l'étuve à 105 °C, notée ρ et exprimée en (g/cm³, kg/m³). La masse volumique réelle des échantillons de sable a été effectuée au laboratoire par la méthode dite de l'éprouvette graduée. Cette méthode est très simple et très rapide. Son mode opératoire est le suivant :

- 1- Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau.
- 2- Peser un échantillon sec M_s de sable et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- 3- Le liquide monte dans l'éprouvette.
- 4- Lire le nouveau volume V_2 .

La masse volumique réelle peut se calculer à l'aide de l'expression suivante: [14]

$$\rho_{\text{réelle}} = \frac{M_s}{V_2 - V_1} \quad \dots\dots\dots\text{IV.13. [14]}$$

V.1.Résultats des caractéristiques du sable :

V.1.1. Analyse granulométrique :

Tableau V.1 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable N°1

ouverture des tamis (mm)	Masse des refus mi (g)	Masse des refus cumulés Mc(g)	Pourcentage des refus cumulés $Pr=(Mc/M).100(\%)$	Pourcentage des tamisât cumulés $Pt= (100-Pr) (\%)$
6,3	0	0	0	100
5	0	0	0	100
4	0	0	0	100
3,15	0	0	0	100
2,5	2	2	0,20	99,80
2	48	50	4,89	95,11
1,6	231	281	27,50	72,50
1,25	166	447	43,75	56,25
1	305	752	73,60	26,40
0,8	140	892	87,30	12,70
0,63	60	952	93,17	6,83
0,5	28	980	95,91	4,09
0,315	19	999	97,77	2,23
0,25	0	999	97,77	2,23

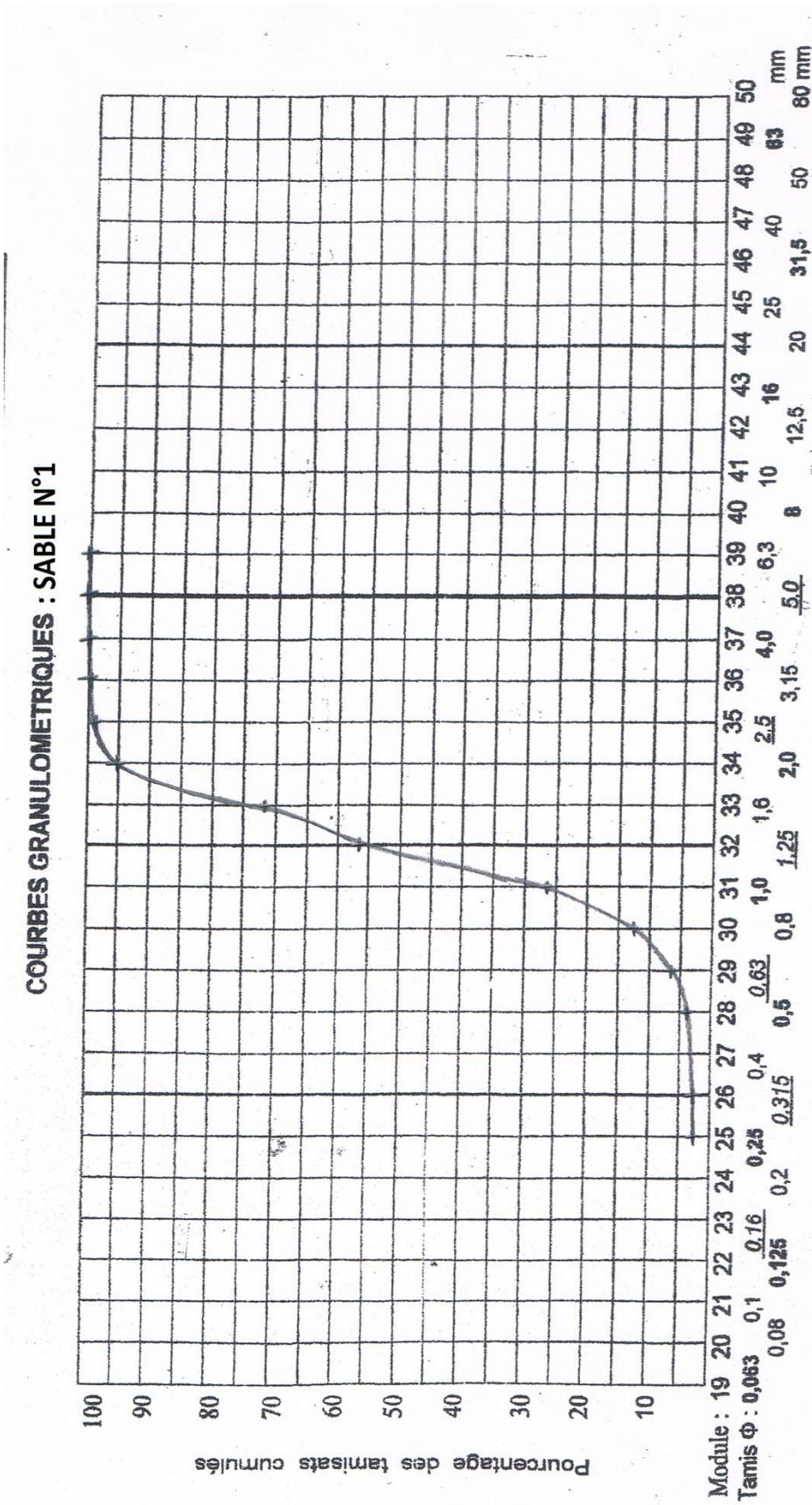
Tableau V.2 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable N°2

ouverture des tamis (mm)	Masse des refus mi (g)	Masse des refus cumulés Mc(g)	Pourcentage des refus cumulés $Pr=(Mc/M).100(\%)$	Pourcentage des tamisât cumulés $Pt= (100-Pr) (\%)$
6,3	0	0	0	100
5	0	0	0	100
4	0	0	0	100
3,15	0	0	0	100
2,5	0,17	0,2	0,02	99,98
2	14	14,2	1,37	98,63
1,6	338	352,2	34,04	65,96
1,25	158	510,2	49,30	50,70
1	190	700,2	67,67	32,33
0,8	123	823,2	79,55	20,45
0,63	91	914,2	88,35	11,65
0,5	34	948,2	91,63	8,37
0,315	40	988,2	95,50	4,50
0,25	0	988,2	95,50	4,50

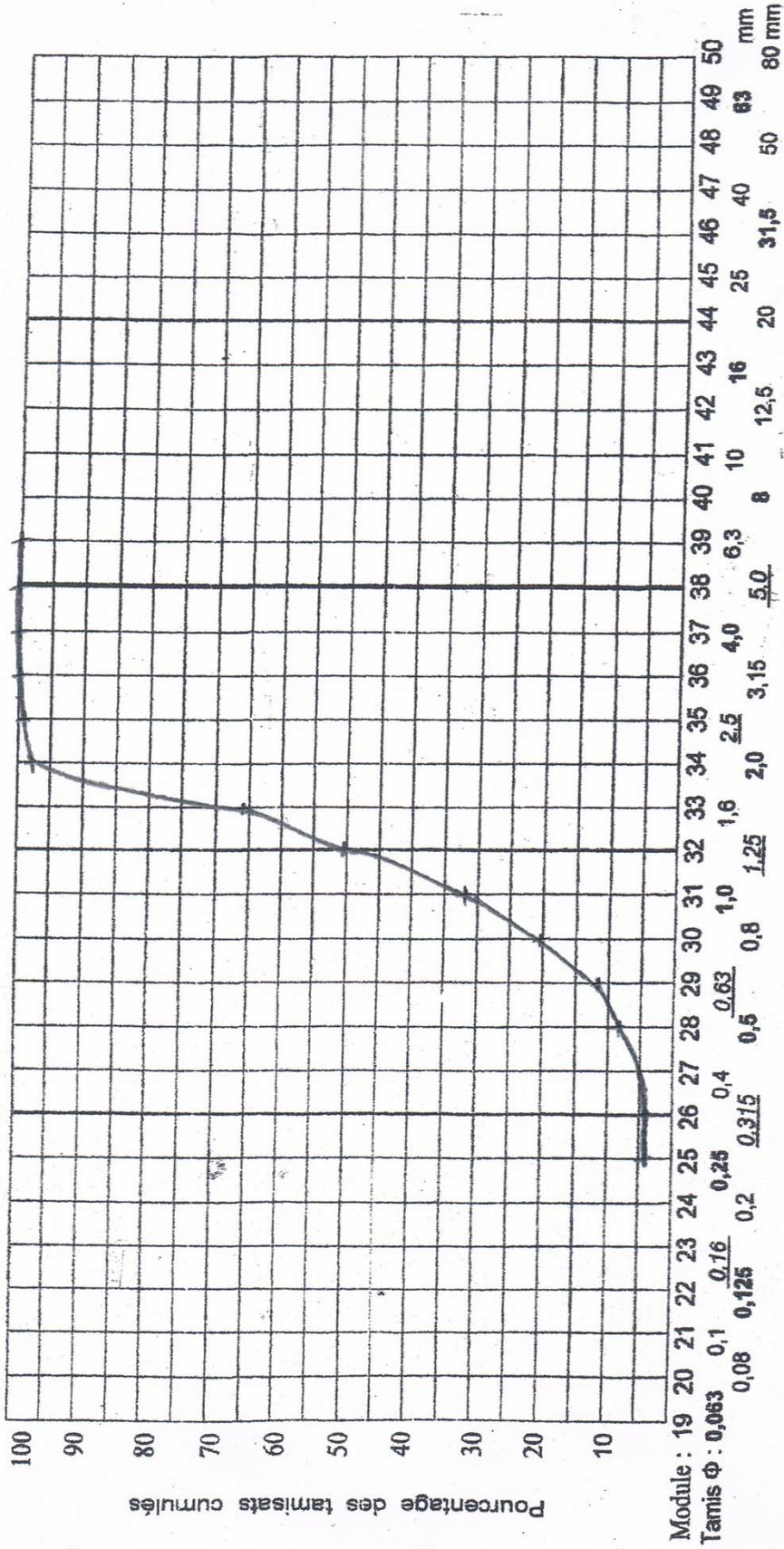
Tableau V.3 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable N°3

ouverture des tamis (mm)	Masse des refus mi (g)	Masse des refus cumulés Mc(g)	Pourcentage des refus cumulés $Pr=(Mc/M).100(\%)$	Pourcentage des tamisât cumulés $Pt= (100-Pr) (\%)$
6,3	0	0	0	100
5	0	0	0	100
4	0	0	0	100
3,15	0	0	0	100
2,5	0	0	0	100
2	0,2	0,2	0,02	99,98
1,6	290,4	290,6	29,21	70,79
1,25	315,2	605,8	60,88	39,12
1	230,8	836,6	84,08	15,92
0,8	107,4	944	94,87	5,13
0,63	49	993	99,80	0,20
0,5	1,8	994,8	99,98	0,02
0,315	0,2	995	100	0
0,25	0	995	100	0

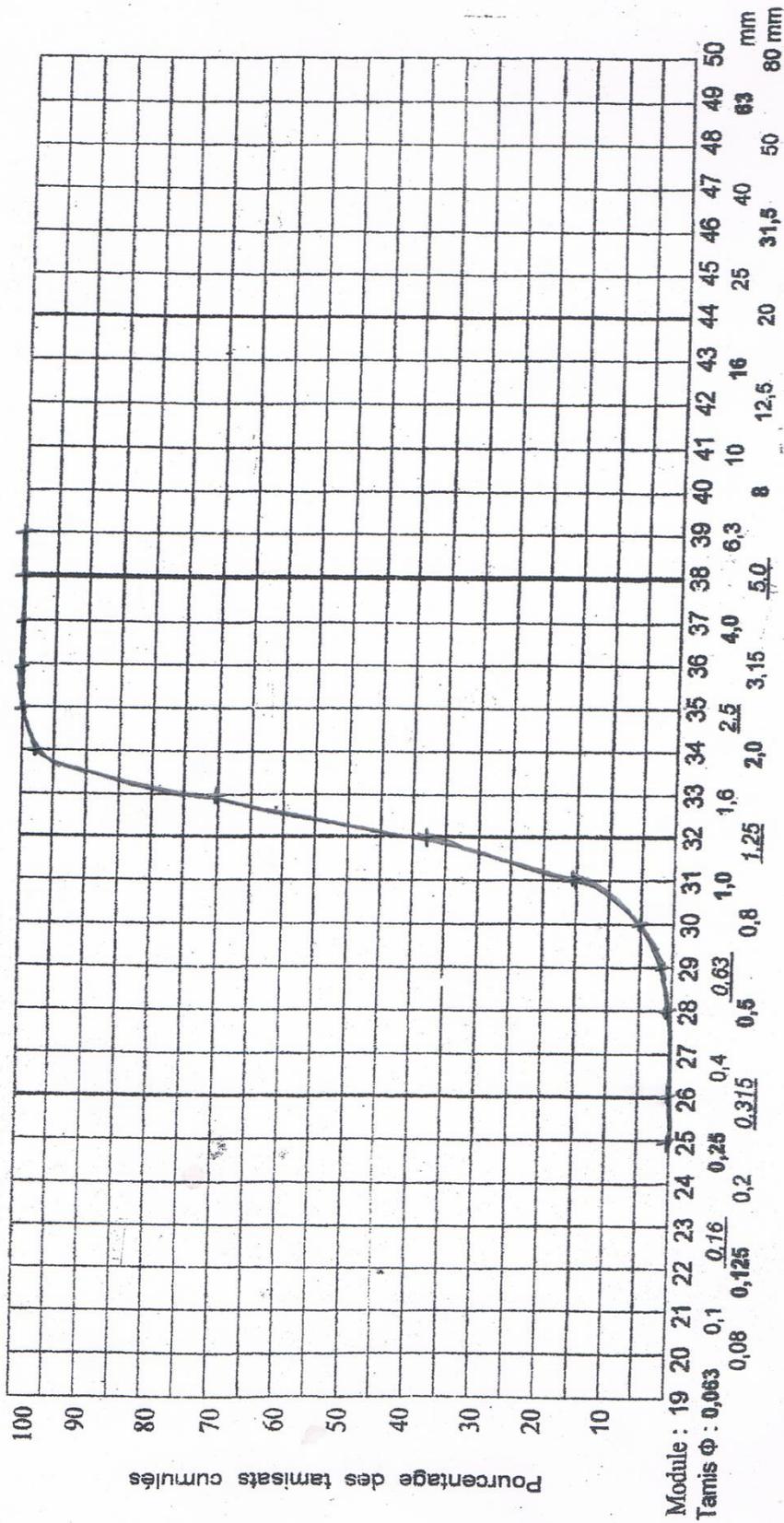
- Courbe granulométrique des trois sables



COURBES GRANULOMETRIQUES : SABLE N°2



COURBES GRANULOMETRIQUES : SABLE N°3



V.1.2. Diamètres effectifs et coefficients d'uniformité :

Le diamètre effectif et le coefficient d'uniformité des 3 sables ont été tirés à partir de leur courbe granulométrique. Les résultats trouvés sont les suivants :

- **Pour le sable N°1 :**

$$D_E = 0.73 \text{ mm ;}$$

$$D_{60} = 1.4 \text{ mm,}$$

$$Cu = D_{60}/D_E \quad Cu = 1.91$$

- **Pour le sable N°2 :**

$$D_E = 0.56 \text{ mm ;}$$

$$D_{60} = 1.42 \text{ mm,}$$

$$Cu = D_{60}/D_E \quad Cu = 2.53$$

- **Pour le sable N°3 :**

$$D_E = 0.97 \text{ mm ;}$$

$$D_{60} = 1.41 \text{ mm,}$$

$$Cu = D_{60}/D_E \quad Cu = 1.45$$

V.1.3. Détermination des masses volumiques :**V.1.3.1. Masse volumique apparente :**

$$\rho_{app} = m/v \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad \dots\dots\dots \text{V.1.}$$

✚ **Sable N°1 :** m=100g, v=58 ml

$$\rho_{app1} = 1724.13 \text{ kg/m}^3$$

✚ **Sable N°2 :** m= 100g, v=56 ml

$$\rho_{app2} = 1785.71 \text{ kg/m}^3$$

✚ **Sable N°3 :** m= 100g, v=52 ml

$$\rho_{app3} = 1923.07 \text{ kg/m}^3$$

V.1.3.2. Masse volumique réelle :

$$\rho_{réel} = m/ (v_2 - v_1) \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad \dots\dots\dots \text{V.2.}$$

✚ **Sable N°1 :** m=100g, v₁=100ml, v₂=135 ml

$$\rho_{réel1} = 2857.14 \text{ kg/m}^3$$

✚ **Sable N°2** : $m= 100\text{g}$, $v_1=100\text{ ml}$, $v_2=139\text{ ml}$
 $\rho_{\text{réel}2} = 2564.1\text{ kg/m}^3$

✚ **Sable N°3** : $m= 100\text{g}$, $v_1=100\text{ ml}$, $v_2=136\text{ ml}$
 $\rho_{\text{réel}3} = 2777.77\text{ kg/m}^3$

V.1.3.3.Densité réelle :

$$d = \rho_{\text{réel}} / \rho_{\text{eau}} \dots\dots\dots \mathbf{V.3.} \quad \text{Avec : } \rho_{\text{eau}} = 1000\text{kg/m}^3$$

✚ **Sable N°1** : $\rho_{\text{réel}1} = 2857.14\text{ kg/m}^3$
 $d_1 = 2.85$

✚ **Sable N°2** : $\rho_{\text{réel}2} = 2564.1\text{ kg/m}^3$
 $d_2 = 2.56$

✚ **Sable N°3** : $\rho_{\text{réel}3} = 2777.77\text{ kg/m}^3$
 $d_3 = 2.77$

V.2.Etude de la filtration sur sable :

Cette étude consiste à mettre en évidence les différents facteurs qui peuvent influencer sur les pertes de charges dans une colonne de filtration mais aussi sur la turbidité. Pour cela, cette étude a été divisée en deux parties ; la première consiste en une étude des pertes de charges, et la deuxième en une étude de la turbidité.

Les six paramètres choisis sont les suivants :

- Position des vannes : vanne A3 fermée et vanne A4 fermée, vanne A3 ouverte et vanne A4 fermée, vanne A3 ouverte et vanne A4 ouverte, vanne A3 fermée et vanne A4 ouverte.
- Débits de filtration: 30, 50, 80, 120, 150 l/h
- Niveaux d'eau dans la colonne : niveau 1, niveau 2, niveau 3.
- MES : chaux, bentonite
- Concentrations des MES : 0.1, 0.3, 0.5 g/l
- Sables de granulométries différentes: N°1, N°2, N°3

NB : Tous les résultats trouvés sont sur des tableaux en annexe de ce travail.

V.2.1. Etude des pertes de charge :

Dans cette partie les six paramètres choisis vont être variés à savoir : la position des vannes, le débit de filtration, le niveau d'eau, les MES et leurs concentrations ainsi que la granulométrie des sables, pour voir comment ces derniers influent sur les pertes de charges.

Pour tous les graphes on a tracé les pertes de charges en fonction des piézomètres correspondant.

✚ Calcul des vitesses de filtration :

Les vitesses de filtration vont être calculées pour les débits de 30, 50, 80, 120, 150 l/h.

On a le diamètre interne de la colonne qui est de 100 mm.

On sait que : $Q = V \cdot S$ V.4.

$$S = \pi \cdot D^2 / 4 \quad \text{.....V.5.}$$

Avec : Q : débit

V : vitesse de passage

S : Section

D : diamètre

Donc on peut écrire : $V = Q/S = 4 \cdot Q / (\pi \cdot D^2)$ V.6.

Après calcul voici le tableau obtenu :

Tableau V.4 : Vitesses de filtration pour chaque débit utilisé

Débit (l/h)	30	50	80	120	150
Vitesse (m/h)	3.82	6.36	10.19	15.28	19.1

On peut remarquer que pour les débits de 50 à 150 l/h, on a des vitesses de passage de l'eau comprise entre 6 et 19 m/h ce qui se traduit par une filtration rapide, par contre pour le

débit de 30 l/h avec une vitesse de filtration d'environ 4 m/h, on peut dire qu'on obtient une filtration plus ou moins lente.

V.2.1.1. Influence des différentes positions des vannes :

Pour voir l'influence des différentes positions des vannes, on a travaillé avec les 3 sables, les 5 débits de filtration, les 2 concentrations des MES (chaux, bentonite), et les 3 niveaux d'eau, et on a effectué une lecture sur les 12 piézomètres. Cette lecture a été faite plusieurs fois mais en fixant à chaque fois trois paramètres et en variant le quatrième et cela pour les quatre possibilités des positions des vannes. On a obtenu plusieurs graphes mais on a pas pu tous les présenter, donc voici quelques-uns.

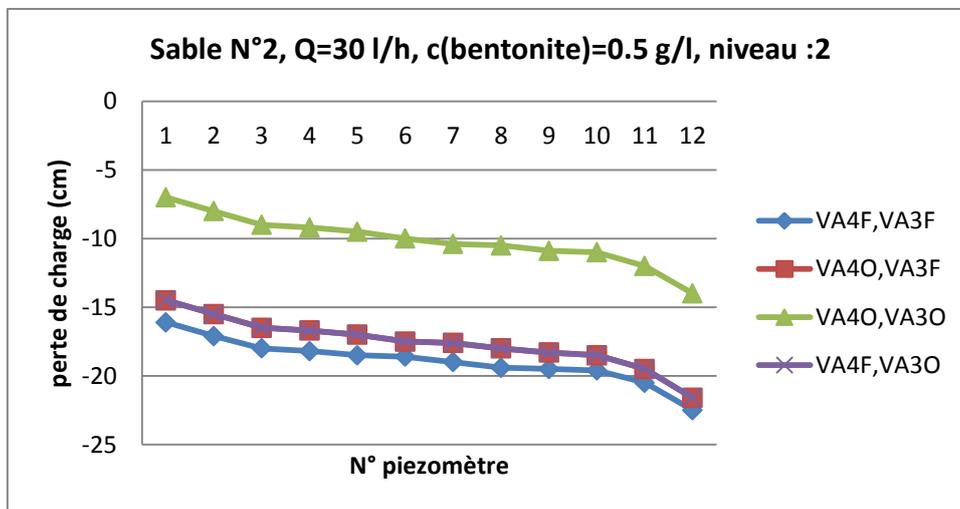


Figure V.1 : Influence des positions des vannes sur les pertes de charge pour le sable N°2, Q=30l/h, c (bentonite)=0.5g/l, niveau2

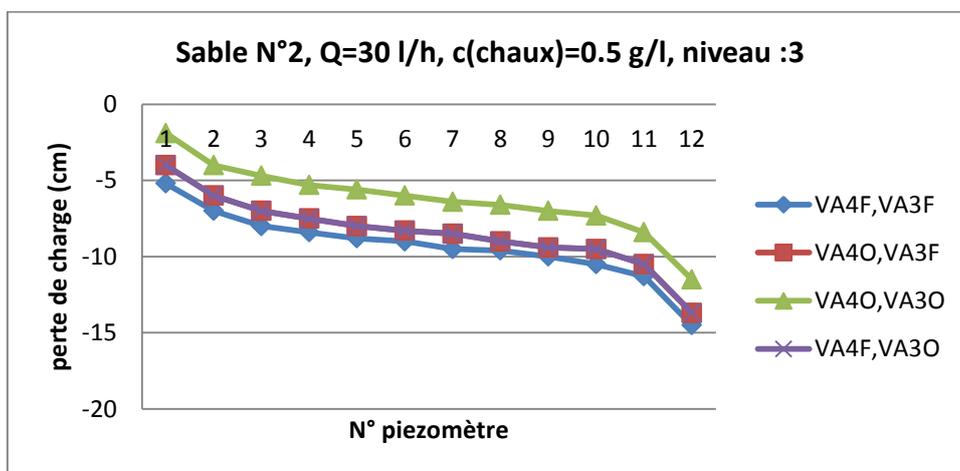


Figure V.2 : Influence des positions des vannes sur les pertes de charge pour le sable N°2, Q=30l/h, c (chaux)=0.5g/l, niveau3

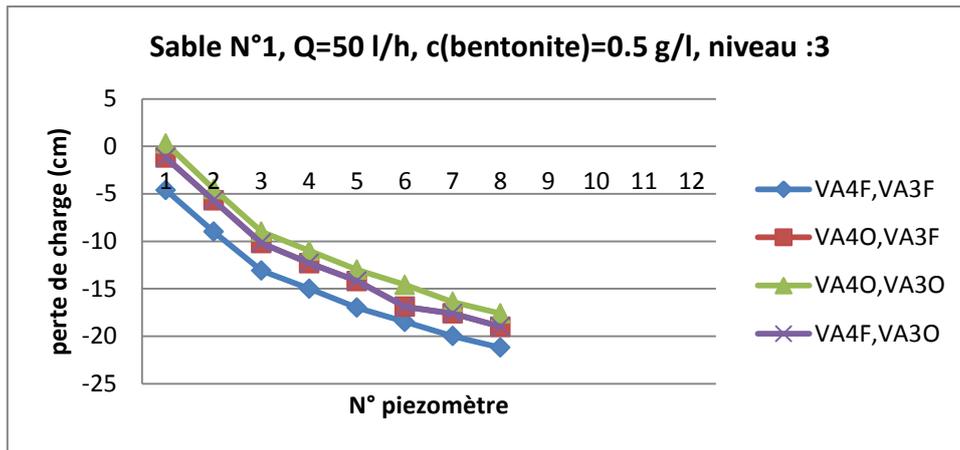


Figure V.3 : Influence des positions des vannes sur les pertes de charge pour le sable N°1, Q=50l/h, c (bentonite)=0.5g/l, niveau3

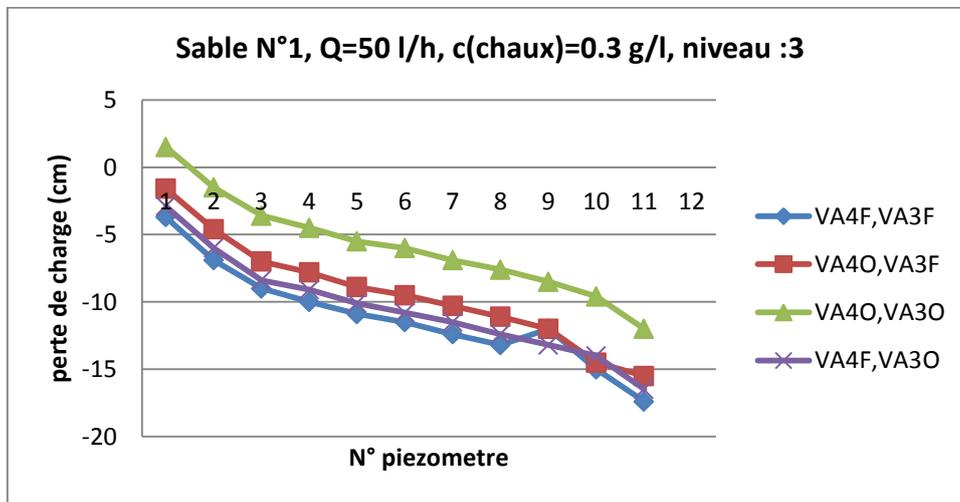


Figure V.4 : Influence des positions des vannes sur les pertes de charge pour le sable N°1, Q=50l/h, c (chaux)=0.3g/l, niveau3

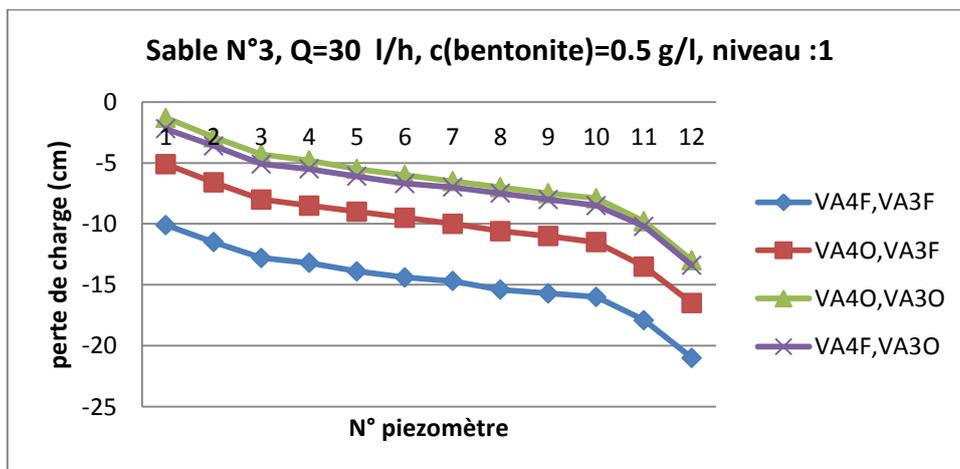


Figure V.5 : Influence des positions des vannes sur les pertes de charge pour le sable N°3, Q=30l/h, c (bentonite)=0.5g/l, niveau1

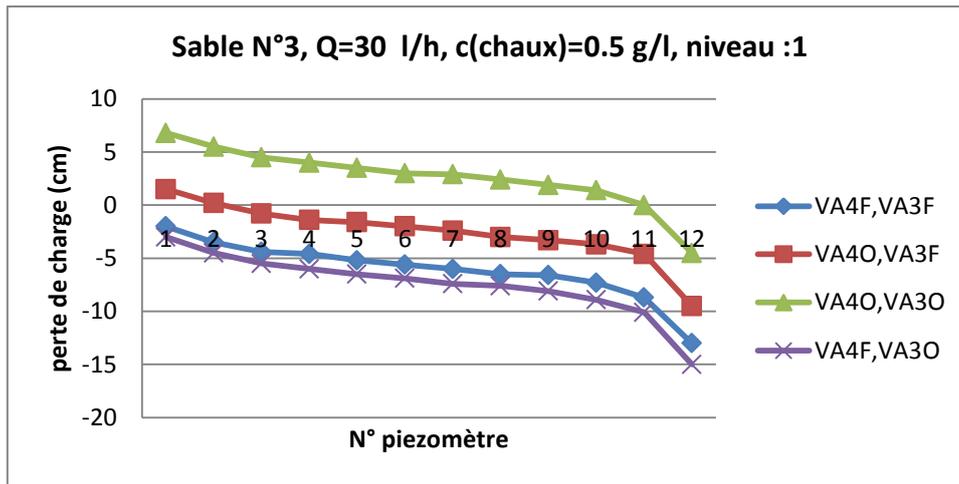


Figure V.6 : Influence des positions des vannes sur les pertes de charge pour le sable N°3, Q=30l/h, c (chaux)=0.5g/l, niveau1

NB : VA4F : vanne A4 fermée, VA4O : vanne A4 ouverte, VA3O : vanne A3 ouverte, VA3F : vanne A3 fermée.

A partir des graphes, on remarque que pour la position des vannes VA4O, VA3O on obtient les pertes de charges les plus faibles. Cela s'explique par le fait que lorsque les deux vannes sont ouvertes il y'a une mise en atmosphère c'est-à-dire que la pression qui règne au sein de la colonne c'est la pression atmosphérique ce qui donne de faibles pertes de charge par contre lorsque les vannes sont fermées il existe une pression au sein de la colonne, ce qui fait que la couche filtrante est soumise à cette pression qui fait augmenter les pertes de charges.

On conclue que plus la pression exercée sur un filtre est grande plus les pertes de charges augmentent.

V.2.1.2. Influence des différents niveaux d'eau :

En ce qui concerne l'influence des différents niveaux d'eau dans la colonne de filtration sur sable, on a travaillé avec les différents : sables, débits de filtration, concentrations des MES, a chaque fois on fixe deux paramètres et on varie le troisième en maintenant la position des vannes VA4O, VA3O qu'on a fixé précédemment, on fait tout cela pour les trois niveaux et on procède à la lecture. Voici quelques graphes qu'on a obtenus.

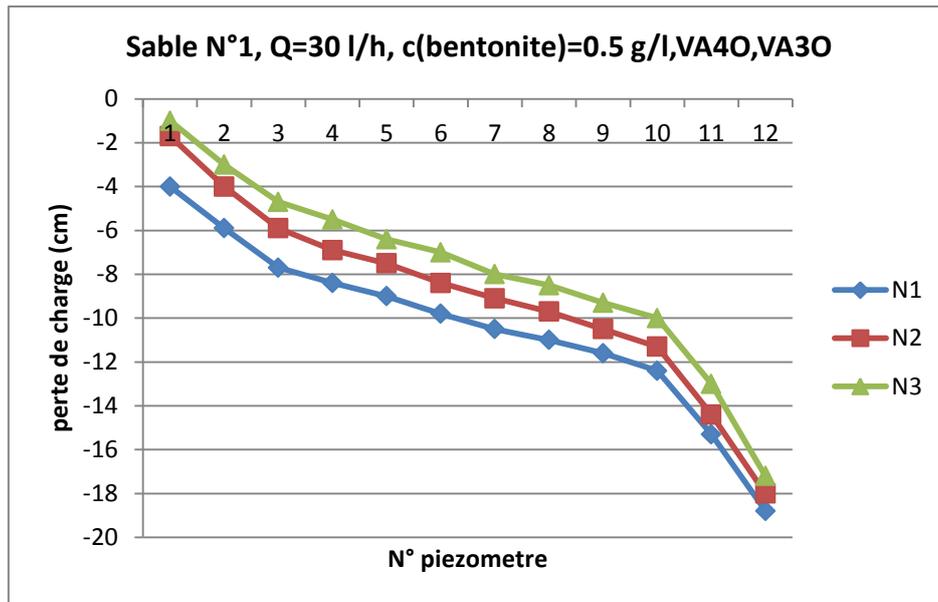


Figure V.7 : Influence des positions niveaux sur les pertes de charge pour le sable N°1, Q=30l/h, c (bentonite)=0.5g/l, VA40, VA30

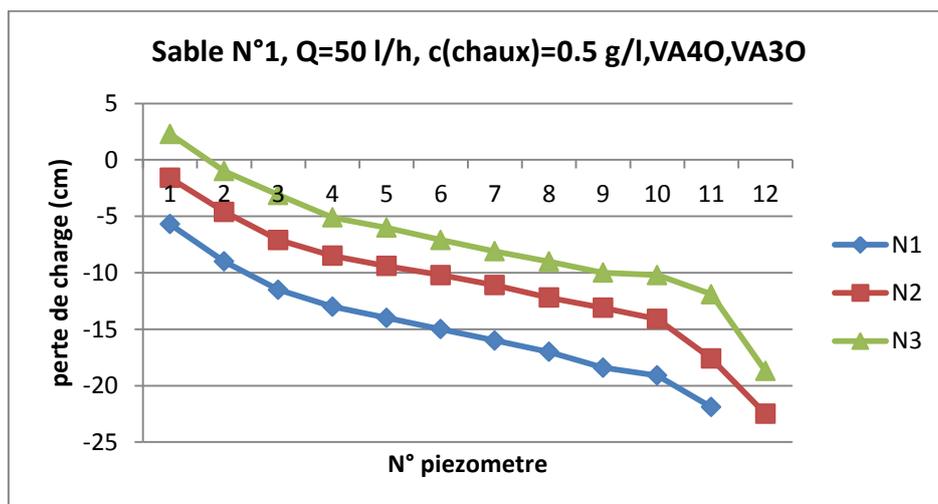


Figure V.8 : Influence des positions niveaux sur les pertes de charge pour le sable N°1, Q=50l/h, c (chaux)=0.5g/l, VA40, VA30

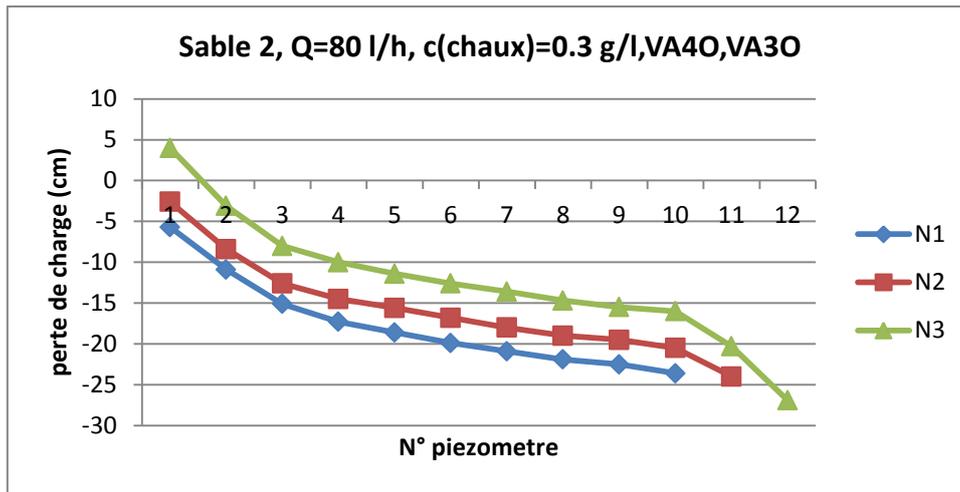


Figure V.9 : Influence des positions niveaux sur les pertes de charge pour le sable N°2, Q=80l/h, c (chaux)=0.3g/l, VA4O, VA3O

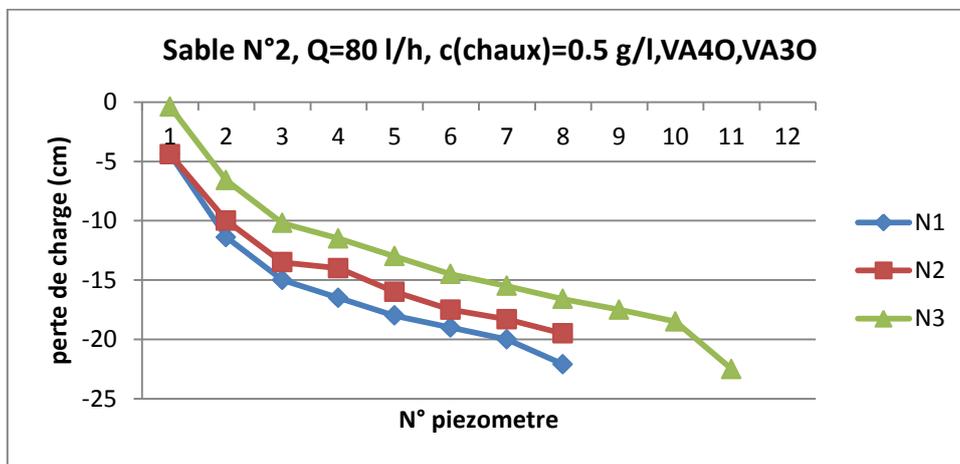


Figure V.10 : Influence des positions niveaux sur les pertes de charge pour le sable N°2, Q=80l/h, c (chaux)=0.5g/l, VA4O, VA3O

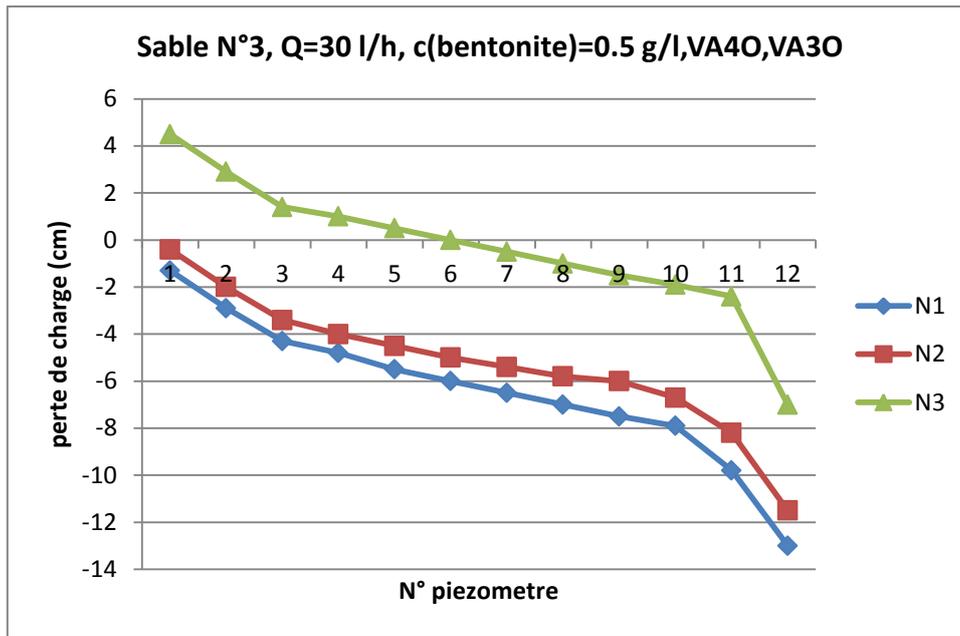


Figure V.11 : Influence des positions niveaux sur les pertes de charge pour le sable N°3, Q=30l/h, c (bentonite)=0.5g/l, VA4O, VA3O

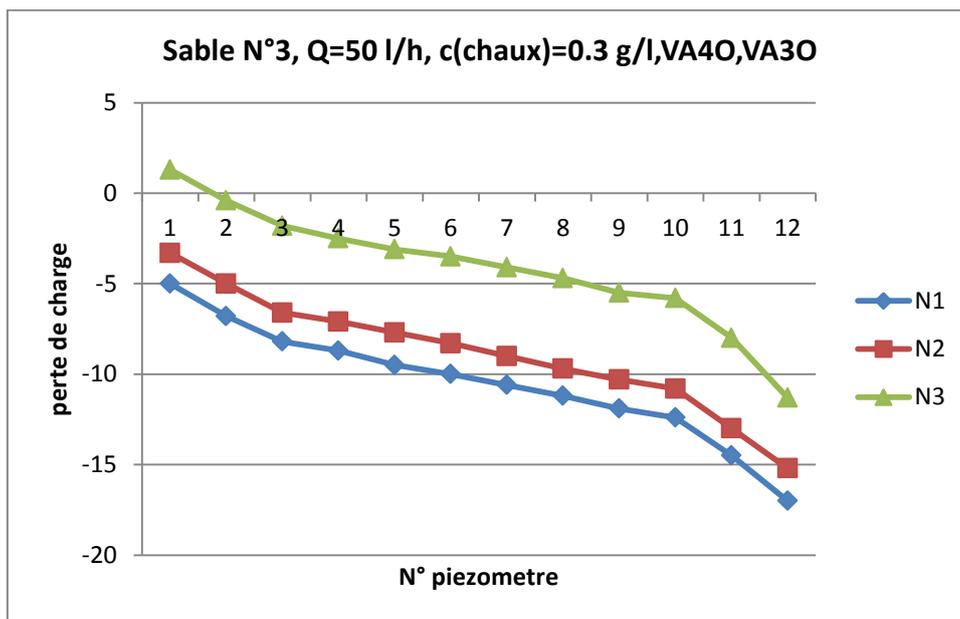


Figure V.12 : Influence des positions niveaux sur les pertes de charge pour le sable N°3, Q=50l/h, c (chaux)=0.3g/l, VA4O, VA3O

NB : N1 : niveau1, N2 : niveau2, N3 : niveau3

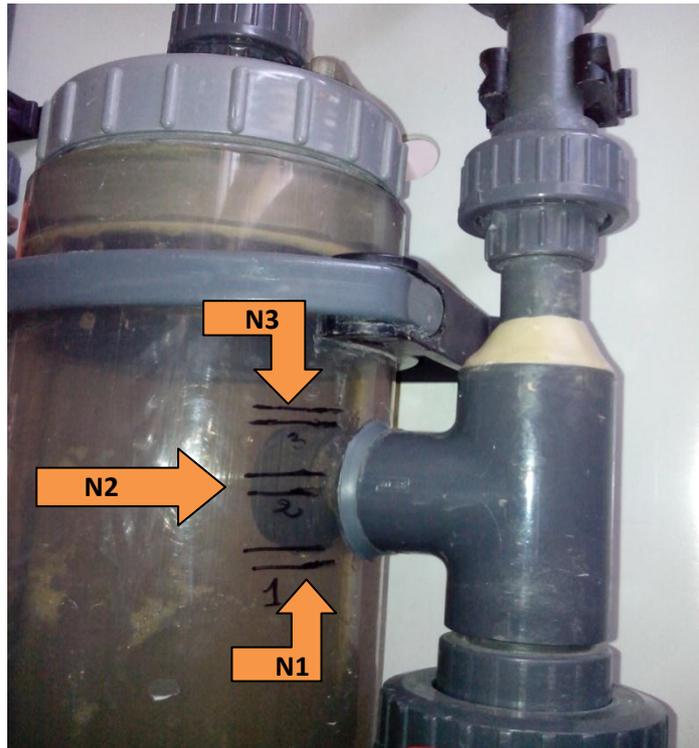


Photo V.1 : Représentation des 3 niveaux de la colonne

A partir de ces graphes, on remarque que le niveau 3 donne les pertes de charges les plus faibles, car lorsque la colonne de filtration est remplie jusqu'au niveau 3 et que la position des vannes est VA4O, VA3O (fixée précédemment), on a une partie de l'eau contenant une fraction de MES qui est évacuée par la vanne VA3, pour le niveau 2 on constate que les pertes de charges sont un peu plus élevée car on a l'évacuation d'une plus petite partie de l'eau VA3 car la conduite qui relie cette dernière se trouve qu'à moitié immergée et pour le niveau 1 on a l'eau qui ne s'évacue pas car la conduite qui est reliée à VA3 se trouve au-dessus du niveau d'eau ce qui engendre de grandes pertes de charge.

V.2.1.3. Influence des différents débits :

Pour ce cas, on utilise les différents sables et concentrations en MES, on fixe un paramètre et on fait varier le second tout en maintenant la même position des vannes VA4O, VA3O et le même niveau d'eau dans la colonne qui ont été fixés précédemment et cela pour les cinq débits de filtration (30, 50, 80, 120, 150 l/h) et on procède à la lecture. Ci-dessous quelques graphes obtenus.

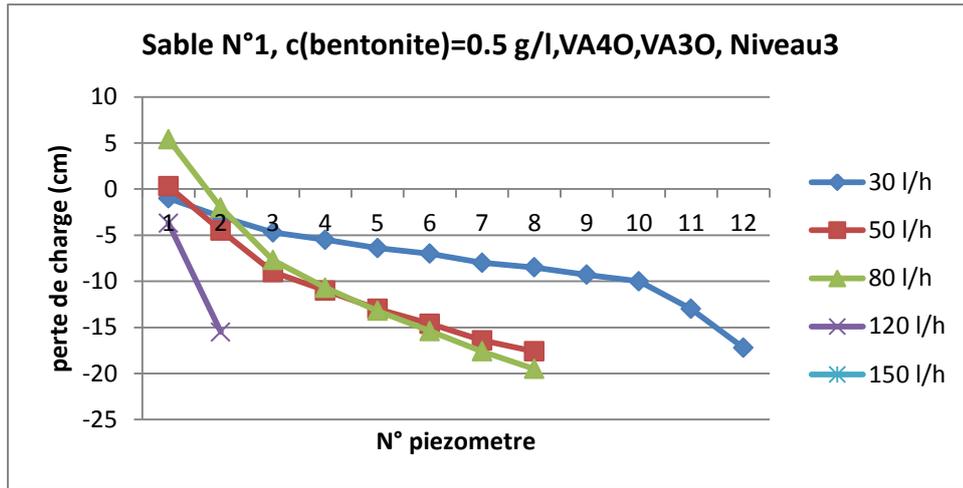


Figure V.13 : Influence des débits sur les pertes de charge pour le sable N°1, niveau3, VA40, VA30, c (bentonite)=0.5g/l,

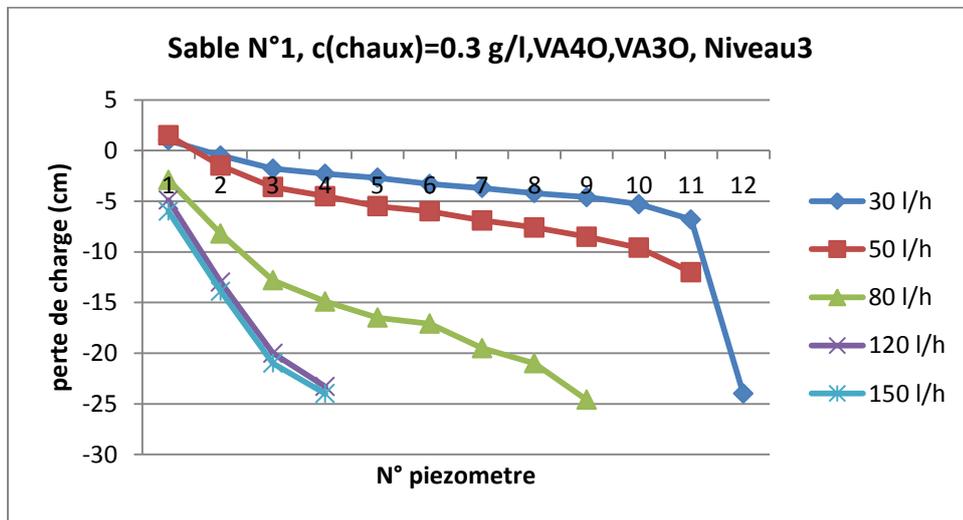


Figure V.14 : Influence des débits sur les pertes de charge pour le sable N°1, niveau3, VA40, VA30, c (chaux)=0.3g/l,

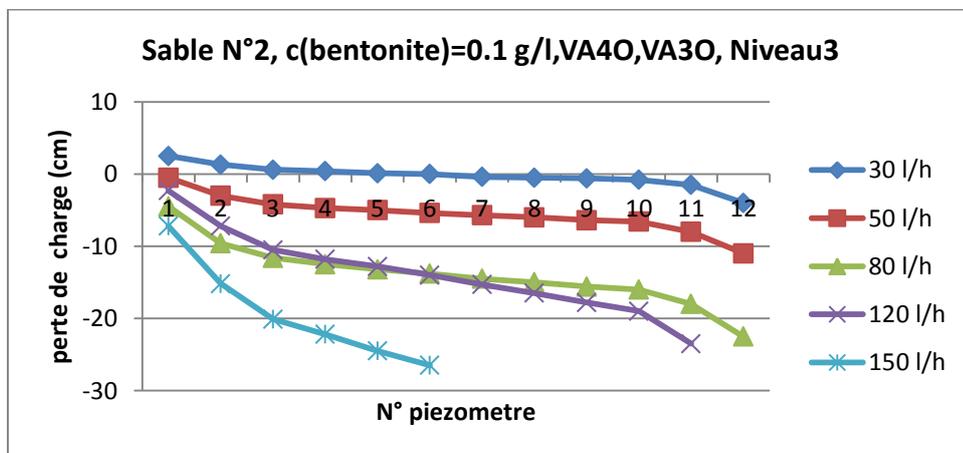


Figure V.15 : Influence des débits sur les pertes de charge pour le sable N°2, niveau3, VA40, VA30, c (bentonite)=0.1g/l,

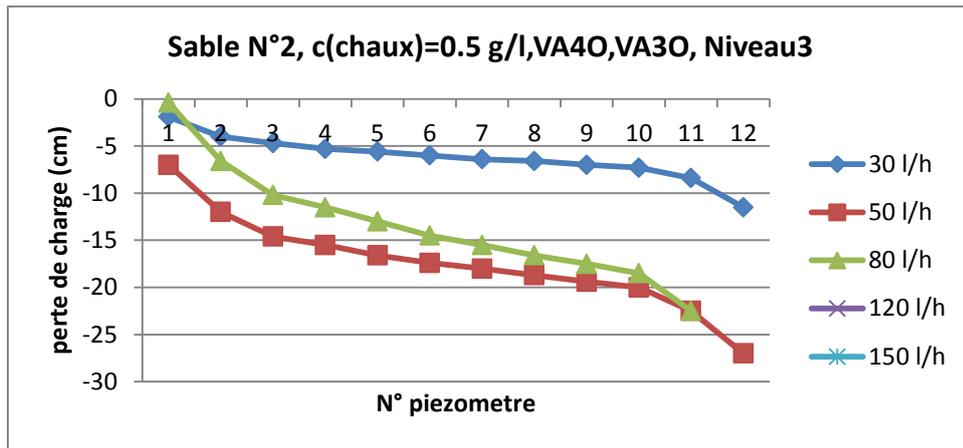


Figure V.16 : Influence des débits sur les pertes de charge pour le sable N°2, niveau3, VA40, VA30, c (chaux)=0.5g/l,

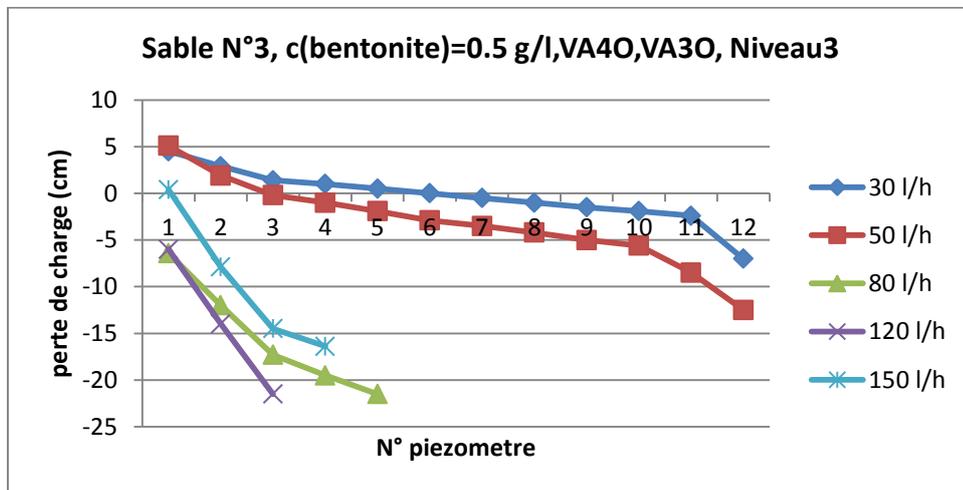


Figure V.17 : Influence des débits sur les pertes de charge pour le sable N°3, niveau3, VA40, VA30, c (bentonite)=0.5g/l,

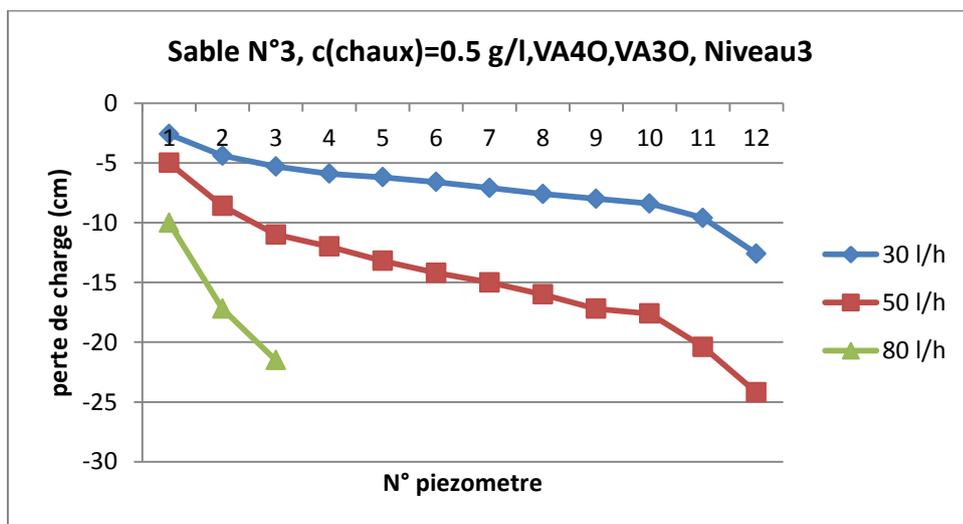


Figure V.18 : Influence des débits sur les pertes de charge pour le sable N°1, niveau3, VA40, VA30, c (chaux)=0.5g/l,

Suite à la lecture des graphes obtenus, on remarque que le débit de filtration de 30 l/h donne les meilleurs résultats c'est-à-dire des pertes de charges faibles. Lors de la filtration l'eau subit une petite pression pour le débit de 30 l/h et donc une faible vitesse de passage de l'eau à travers le milieu filtrant ce qui fait qu'on obtient de faibles pertes de charge, ce qui n'est pas le cas pour les débits de filtration plus grands car pour ces derniers leurs pertes de charges augmentent considérablement qui est dû aux grandes pressions exercées sur le sable et aux frottements sable/eau.

On conclue que plus les débits de filtration sont importants plus les pertes de charge augmentent.

V.2.1.4. Influence des MES :

On a voulu voir est ce que les types des MES influent sur les pertes de charges d'une façon identique ou non, donc on a fait cette expérience avec les 3 sables avec les 3 concentrations de la chaux et de la bentonite en laissant la position des vannes VA40, VA30, le niveau 3 et le débit de 30 l/h fixé précédemment. Voici les graphes obtenus.

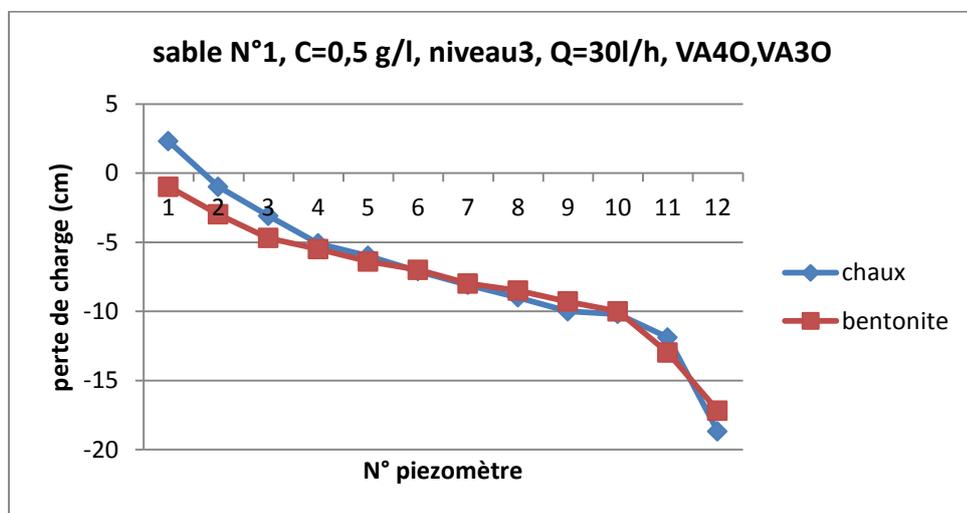


Figure V.19 : Influence des type MES sur les pertes de charge pour le sable N°1, niveau3, VA40, VA30, C=0.5g/l, Q=30 l/h

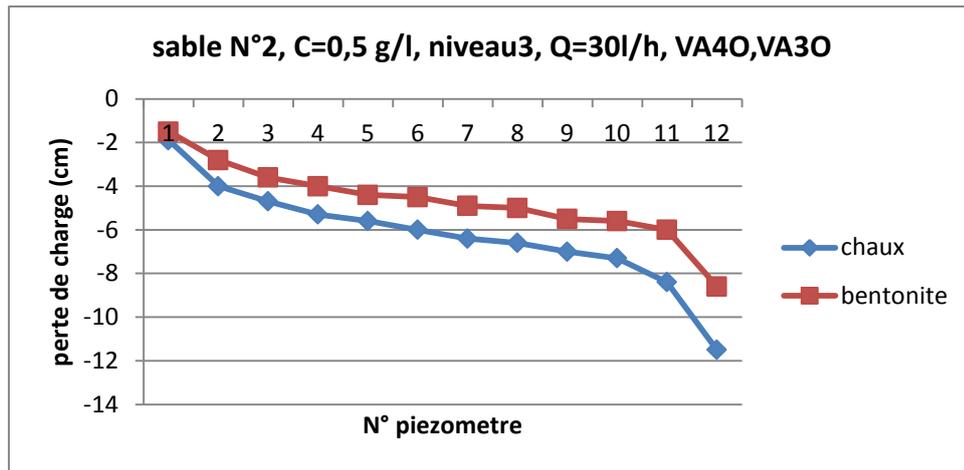


Figure V.20 : Influence des type MES sur les pertes de charge pour le sable N°2, niveau3, VA40, VA30, C=0.5g/l, Q=30 l/h

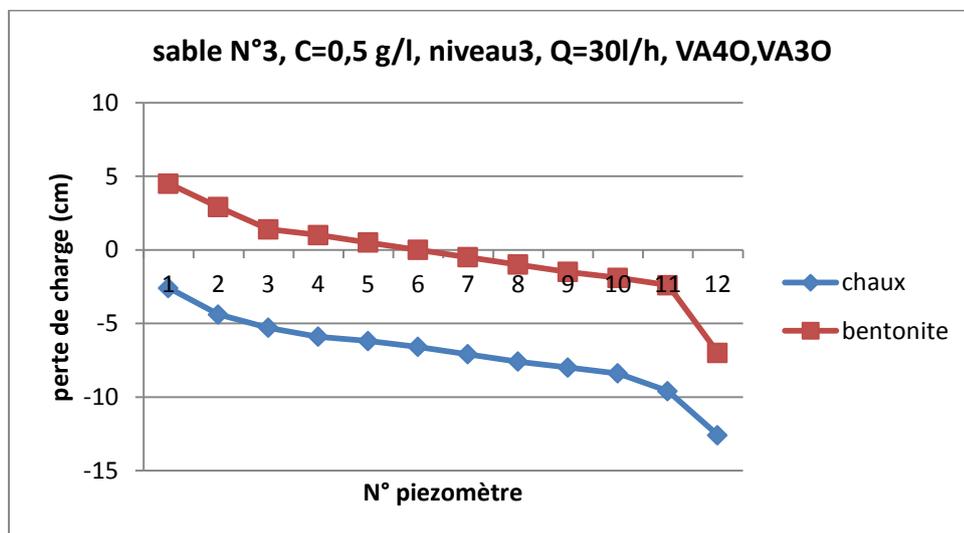


Figure V.21 : Influence des type MES sur les pertes de charge pour le sable N°3, niveau3, VA40, VA30, C=0.5g/l, Q=30 l/h

On remarque d'après les graphes ci-dessus, que la chaux et la bentonite ont une influence différentes sur les pertes de charges, vu que la bentonite est plus fine que la chaux en terme de taille donc, elle va passer plus rapidement à travers le milieu filtrant qui est dans notre cas le sable et qui ne va pas engendrer un colmatage important, par contre, en ce qui concerne la chaux qui est moins fine, lors de son passage à travers le filtre elle risque de passer difficilement ou même de le colmater et donc les pertes de charges vont augmenter.

On conclue que les caractéristiques des MES contenus dans une solution ont une grande influence sur les pertes de charges d'un filtre à sable, ces dernières augmentant avec l'augmentation de la taille des particules.

V.2.1.4. Influence des concentrations:

On a travaillé avec les 3 sables, la chaux et la bentonite et leurs différentes concentrations tout en laissant constant la vanne en position VA4O, VA3O, le niveau 3, le débit de 30 l/h, et on a procédé a la lecture. Les graphes obtenus sont les suivants :

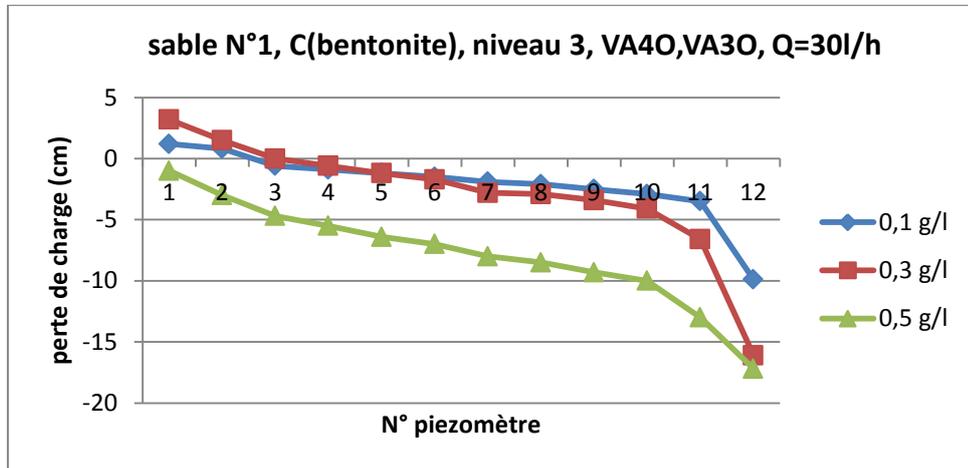


Figure V.22 : Influence des concentrations sur les pertes de charge pour le sable N°1, niveau3, VA4O, VA3O, bentonite, Q=30 l/h

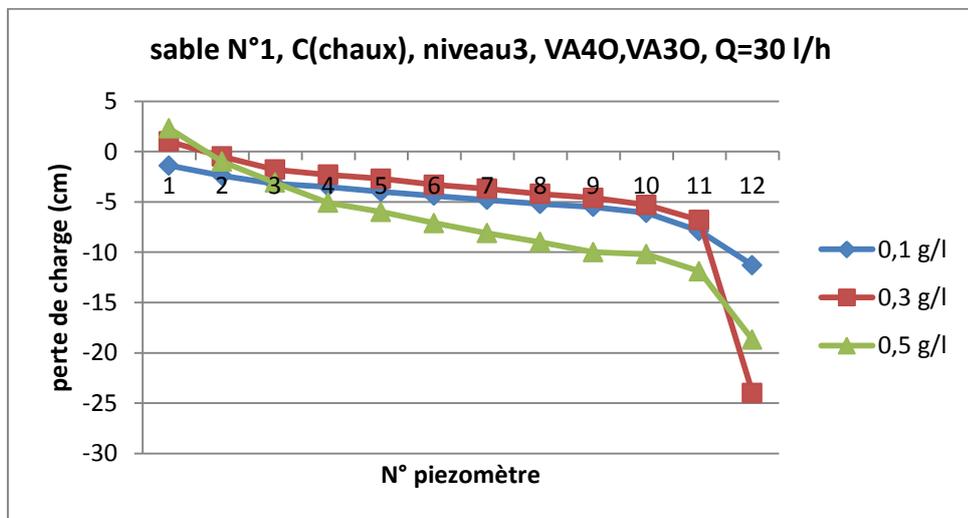


Figure V.23 : Influence des concentrations sur les pertes de charge pour le sable N°1, niveau3, VA4O, VA3O, chaux, Q=30 l/h

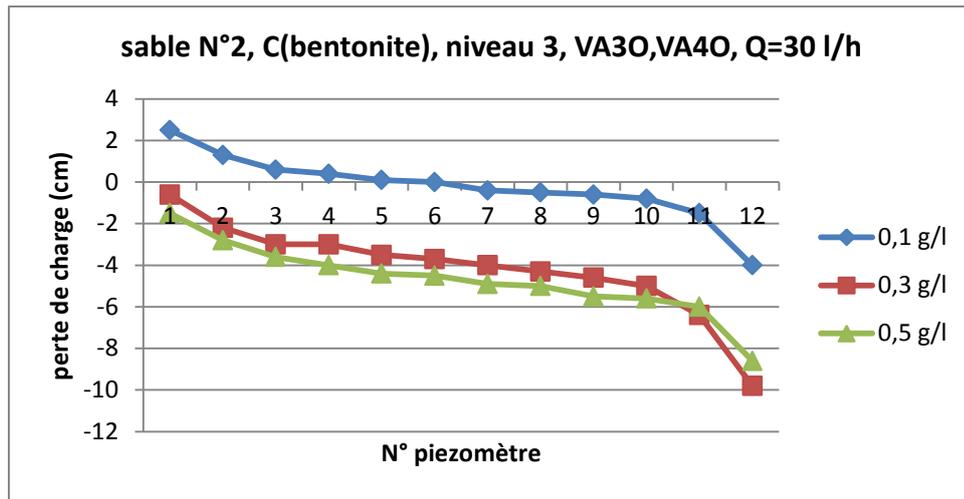


Figure V.24 : Influence des concentrations sur les pertes de charge pour le sable N°2, niveau3, VA40, VA30, bentonite, Q=30 l/h

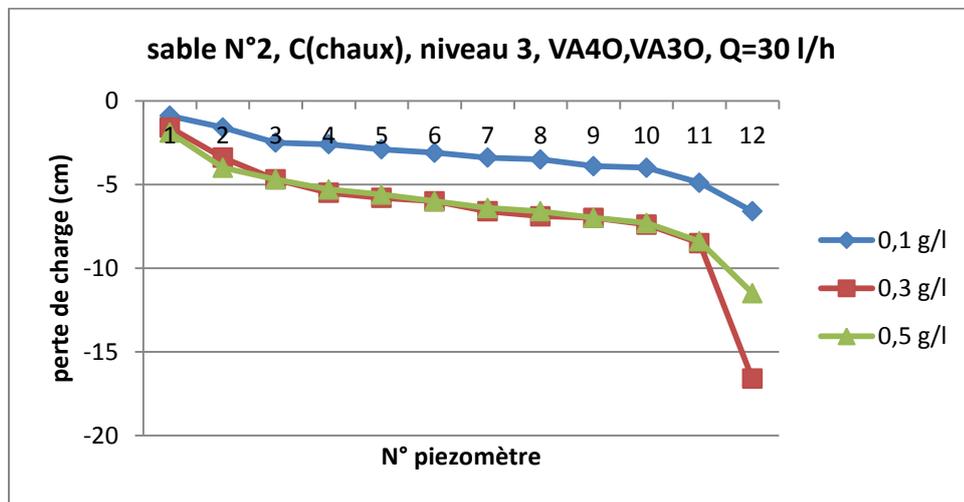


Figure V.25 : Influence des concentrations sur les pertes de charge pour le sable N°2, niveau3, VA40, VA30, chaux, Q=30 l/h

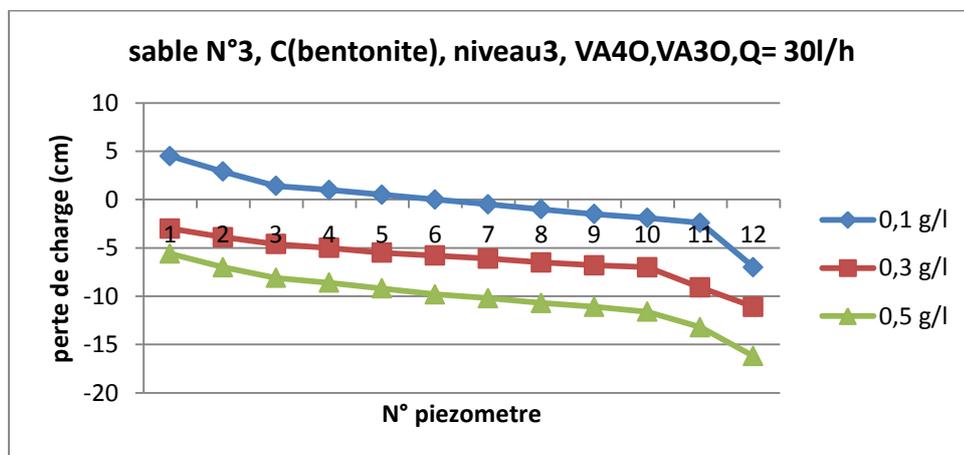


Figure V.26 : Influence des concentrations sur les pertes de charge pour le sable N°3, niveau3, VA40, VA30, bentonite, Q=30 l/h

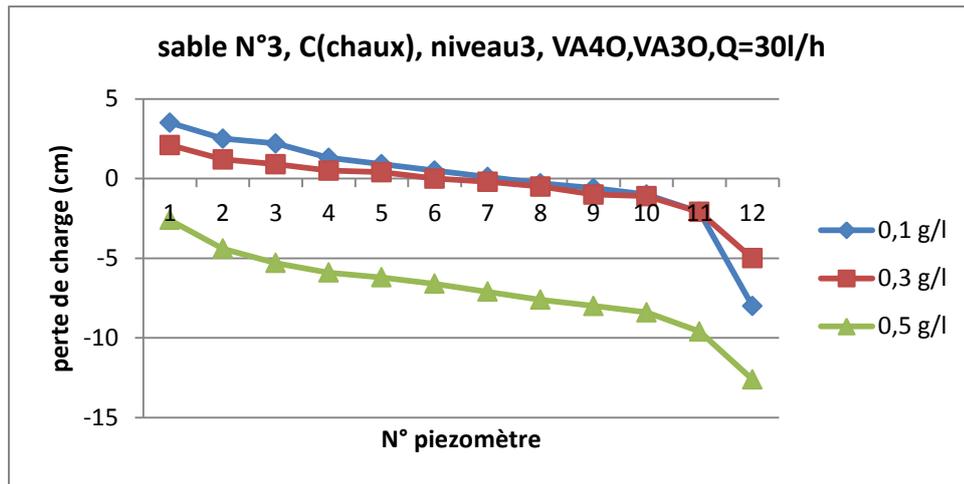


Figure V.27 : Influence des concentrations sur les pertes de charge pour le sable N°3, niveau3, VA40, VA30, chaux, Q=30 l/h

D’après les graphes, on remarque que pour la concentration de 0.1 g/l on a les pertes de charges les plus faibles, et cela est normale car plus la solution est concentrée plus on a l’accumulation de ces particules sur la couche filtrante et au bout d’un certain temps on aura un colmatage du filtre ce qui augmentera les pertes de charge.

On conclue, que les pertes de charges d’un filtre augmentent avec l’augmentation de la concentration de la solution qu’on doit filtrer, jusqu’à colmatage du filtre.

V.2.1.5. Influence de la granulométrie du sable:

Pour voir l’influence de la granulométrie du sable sur les pertes de charge on a tracé les graphes avec les différentes concentrations de bentonite et de chaux. Les graphes obtenus sont donnés ci-dessous.

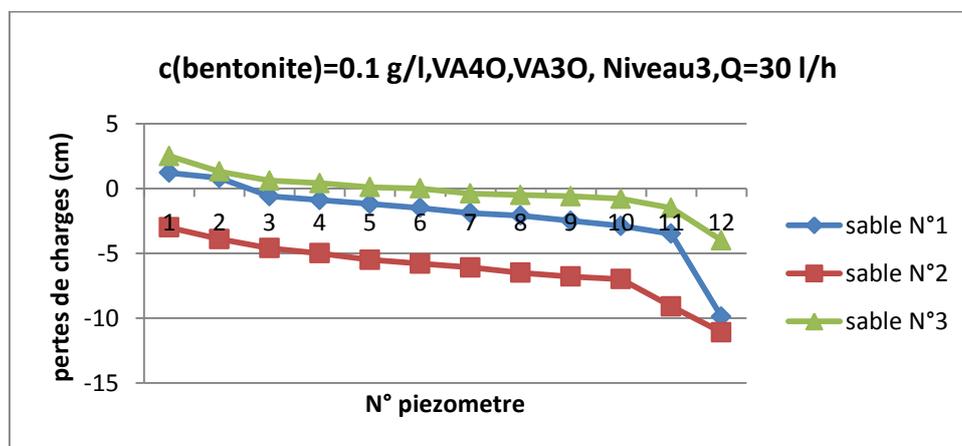


Figure V.28 : Influence de la granulométrie du sable sur les pertes de charge pour le niveau3, VA40, VA30, Q=30 l/h, c (bentonite)=0.1 g/l,

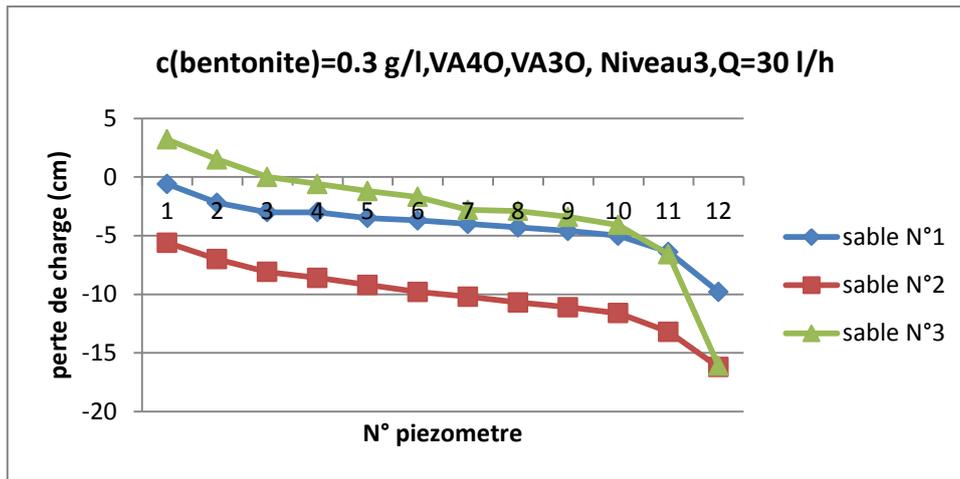


Figure V.29 : Influence de la granulométrie du sable sur les pertes de charge pour le niveau3, VA40, VA30, Q=30 l/h, c (bentonite)=0.3g/l,

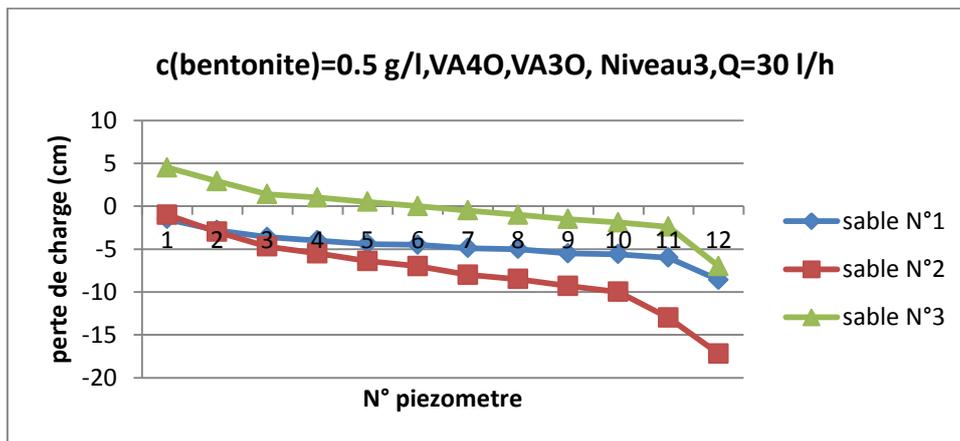


Figure V.30 : Influence de la granulométrie du sable sur les pertes de charge pour le niveau3, VA40, VA30, Q=30 l/h, c (bentonite)=0.5g/l,

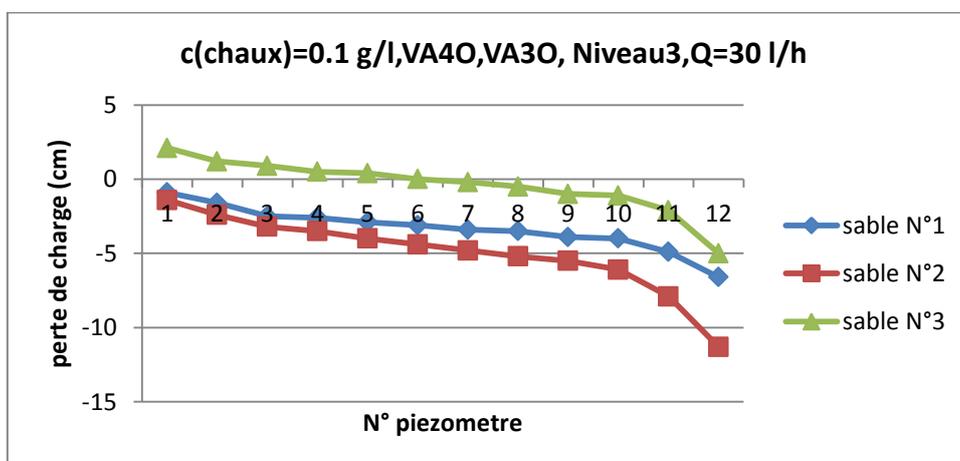


Figure V.31 : Influence de la granulométrie du sable sur les pertes de charge pour le niveau3, VA40, VA30, Q=30 l/h, c (chaux)=0.1g/l,

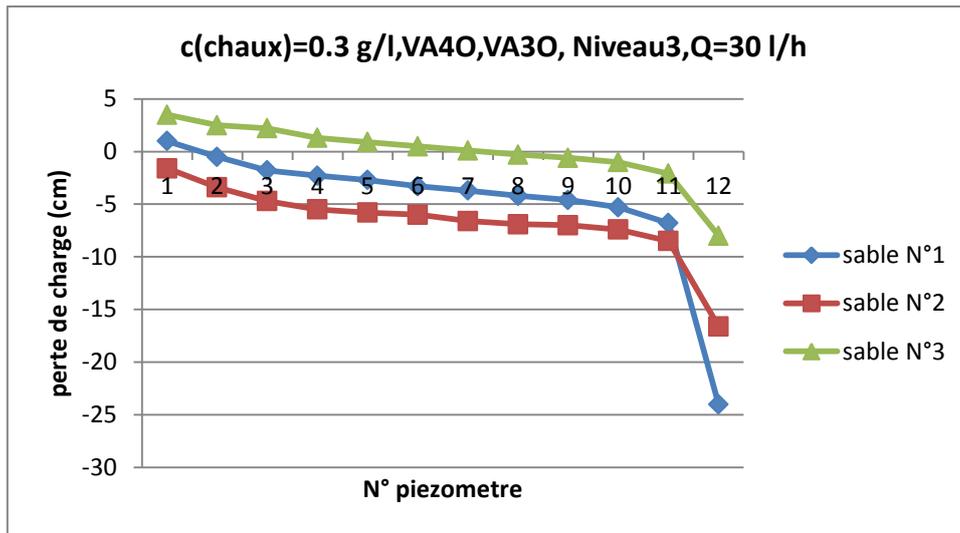


Figure V.32 : Influence de la granulométrie du sable sur les pertes de charge pour le niveau3, VA40, VA30, Q=30 l/h, c (chaux)=0.3g/l,

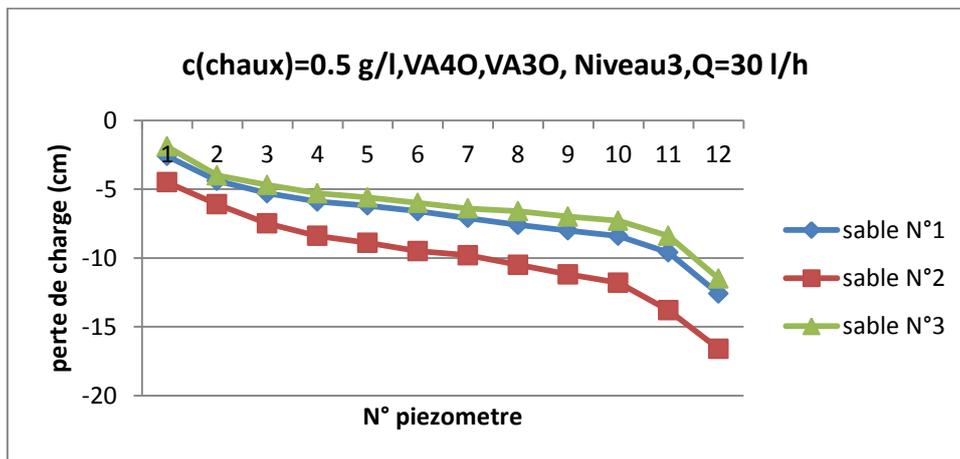


Figure V.33 : Influence de la granulométrie du sable sur les pertes de charge pour le niveau3, VA40, VA30, Q=30 l/h, c (chaux)=0.5g/l,

A partir des graphes obtenus, on remarque que le sable N°3 donne les pertes de charge les plus faibles, vient ensuite le sable N°1 et enfin le sable N°2, cela s'explique par leur granulométrie, vu que le sable N°3 a la granulométrie la plus élevée cela se traduit par une porosité élevée c'est-à-dire un grand espace des vides entre les grains du sable, donc lors de la filtration les particules contenues dans l'eau peuvent passer et donc engendrer de faibles pertes de charge, pour le sable N°1 ayant une granulométrie moins élevée que celle du sable N°3, les pertes de charge dans ce cas seront un peu plus élevées vu que l'espace entre les grains est plus petit donc certaines particules dont leurs diamètres est supérieure à l'espace entre les grains seront retenues, et pour le sable N°1 dont les diamètres de ses grains est la plus faible c'est-à-

dire un vide entre les grains très petit et donc des pertes de charge élevée car beaucoup de particules seront retenues par le filtre et donc un colmatage rapide fort possible.

On peut conclure que plus la granulométrie du sable est élevée, plus les pertes de charge sont faibles.

V.2.2. Etude de la turbidité :

Pour cette deuxième partie de l'étude, on s'est intéressé par les facteurs influant sur la turbidité. On choisit comme paramètres :

- Concentrations de la bentonite : 0.1, 0.3, 0.5 g/l
- Concentrations de la chaux : 0.1, 0.3, 0.5 g/l
- Granulométrie des sables : sable N°1, sable N°2, sable N°3
- Débits : 30, 50, 80, 120, 150 l/h
- Position des vannes : fixé VA40, VA30
- Niveau d'eau dans la colonne : fixé niveau3

Pour tous les graphes on a tracé la turbidité en fonction des débits.

V.2.2.1. Influence des différentes concentrations :

Pour montrer l'influence de la concentration sur la turbidité, on a tracé les graphes suivants pour plusieurs concentrations de bentonite et de chaux.

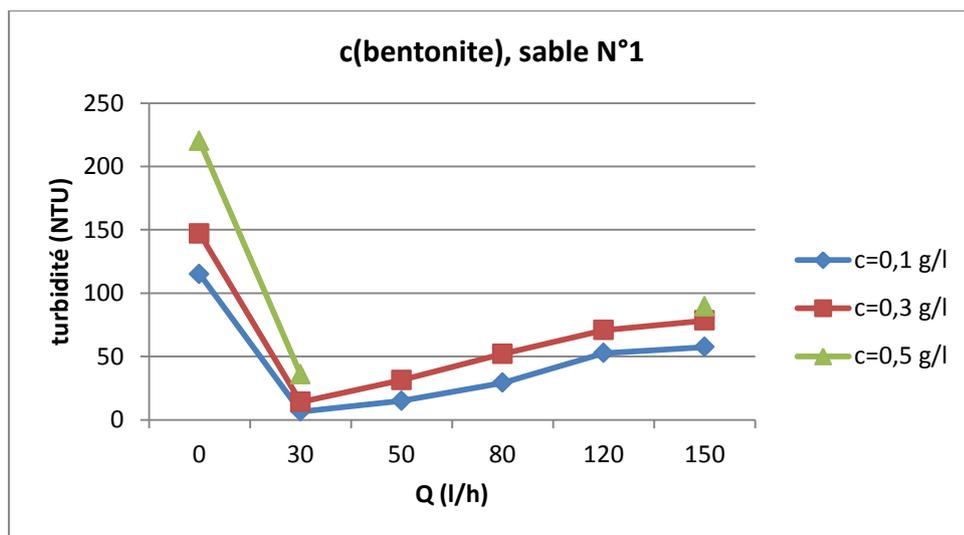


Figure V.34 : Influence de la concentration sur la turbidité pour sable N°1, VA40, VA30, Q=30 l/h, niveau3, bentonite,

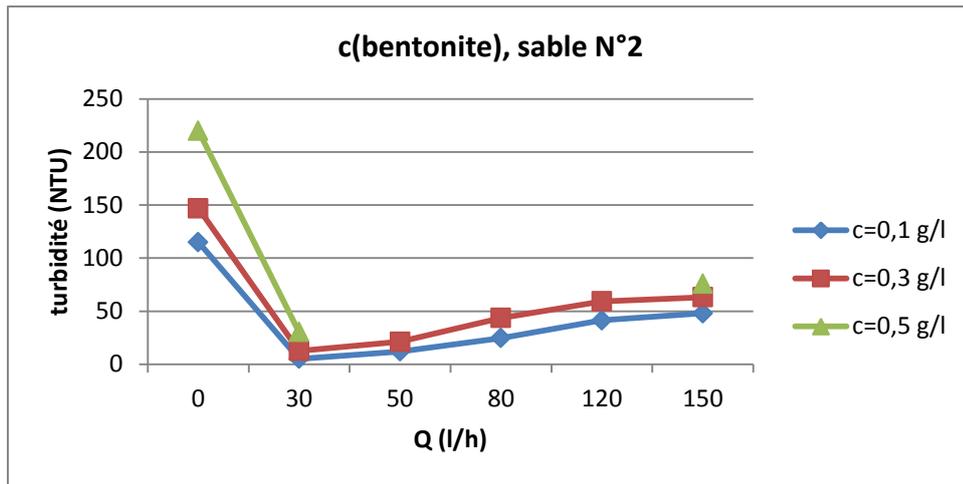


Figure V.35 : Influence de la concentration sur la turbidité pour sable N°2, VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, bentonite,

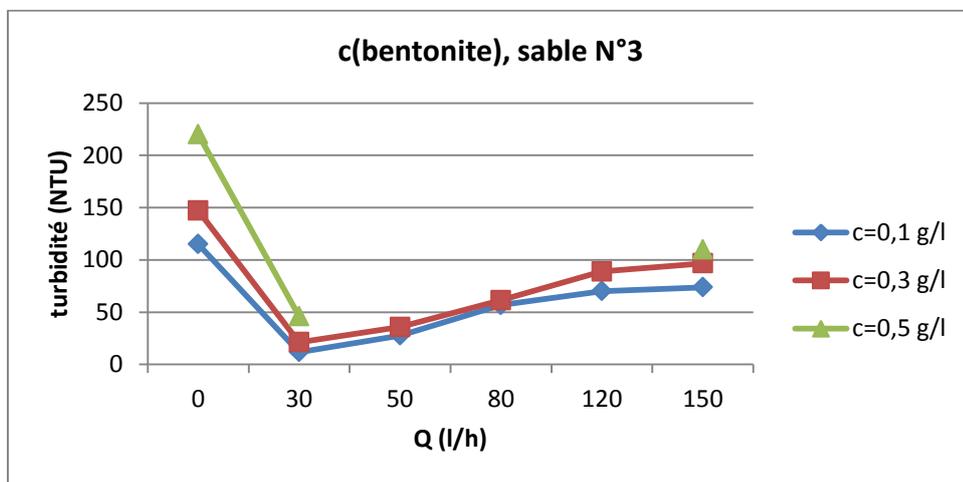


Figure V.36 : Influence de la concentration sur la turbidité pour sable N°3, VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, bentonite,

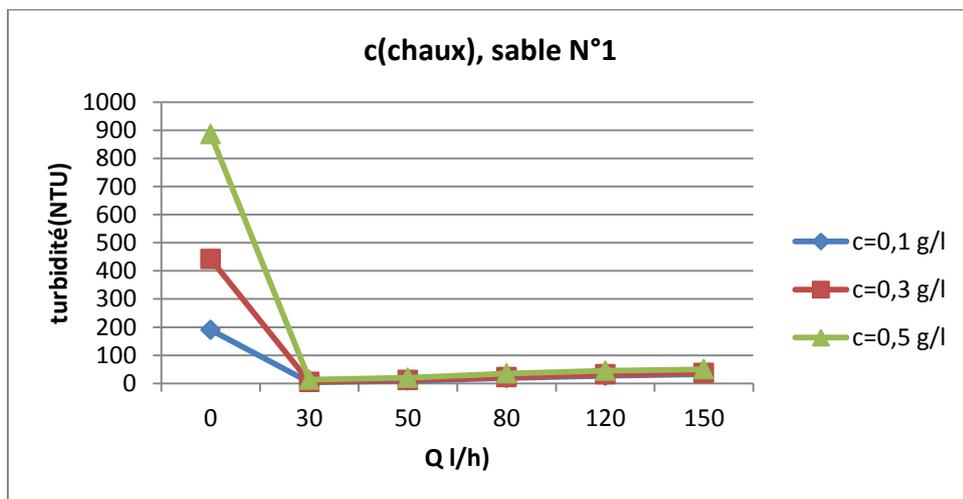


Figure V.37 : Influence de la concentration sur la turbidité pour sable N°1, VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, chaux,

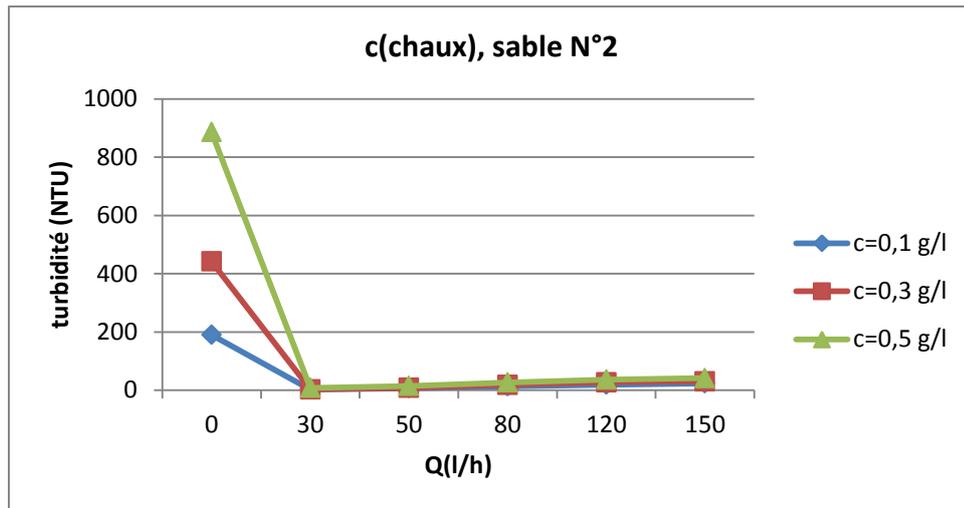


Figure V.38 : Influence de la concentration sur la turbidité pour sable N°2, VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, chaux,

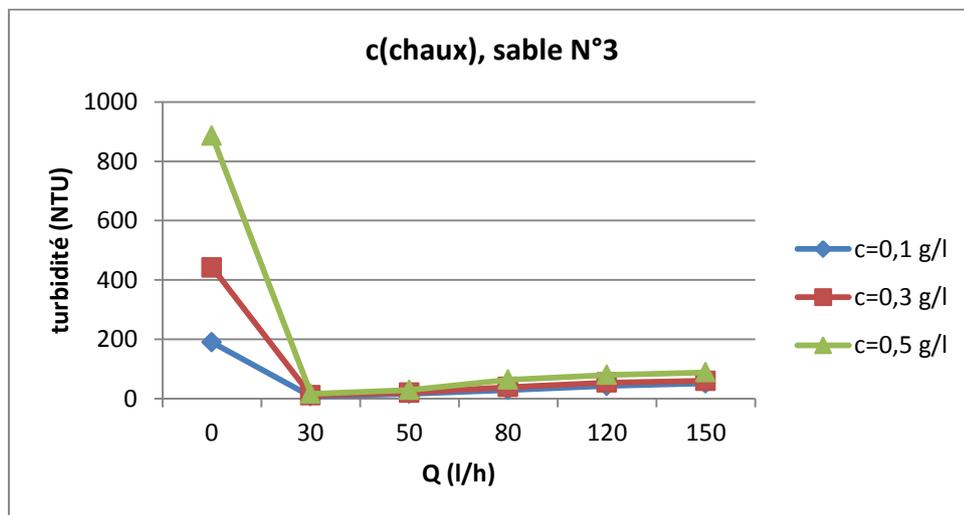


Figure V.39 : Influence de la concentration sur la turbidité pour sable N°3, VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, chaux,

D'après les graphes, on remarque que la turbidité baisse pour des faibles débits mais plus on augmente le débit plus la turbidité augmente car lors de la filtration pour des faibles débits les particules contenues dans l'eau passe lentement et ont le temps de s'adsorber ou s'arrêter sur la couche filtrante, tandis que pour de grands débits ces particules précédemment arrêtées se détachent de la couche filtrante et se remettent en suspension vu de la grande vitesse de passage de l'eau et à la pression exercée sur ces particules et sont donc entraînées avec l'eau vers la sortie du filtre. Ces particules sont l'origine de la turbidité.

En ce qui concerne l'influence de la concentration de bentonite et de chaux, on remarque que la concentration de 0.1 g/l donne la plus faible turbidité et 0.5 g/l donne la plus élevée, car

plus l'eau est concentrée plus le filtre a du mal à retenir toutes les particules liées à la turbidité de l'eau.

V.2.2.2. Influence de la granulométrie du sable:

On a procédé dans ce cas par le traçage des graphes (ci-dessous) avec les différentes concentrations de chaux et de bentonite pour les trois sables de granulométrie différentes.

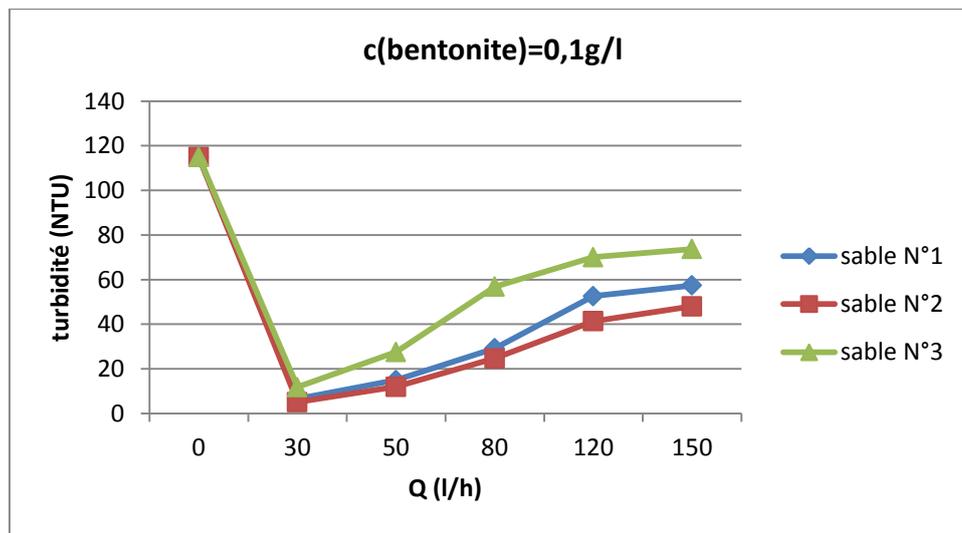


Figure V.40 : Influence de la granulométrie du sable pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c (bentonite)=0.1g/l

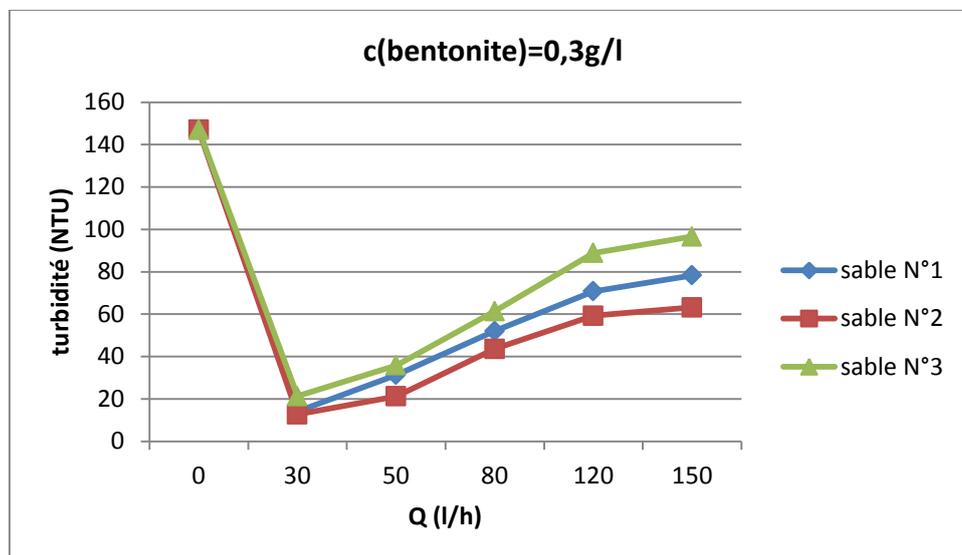


Figure V.41 : Influence de la granulométrie du sable pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c (bentonite)=0.3g/l

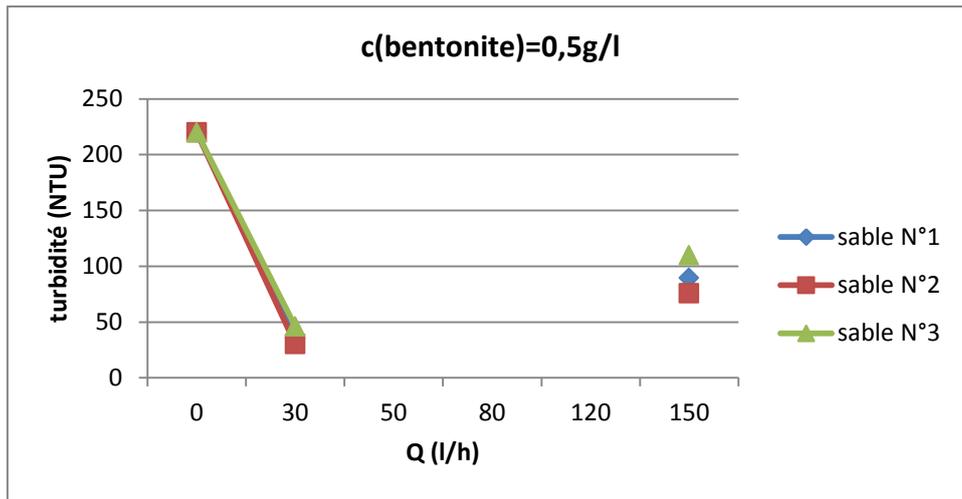


Figure V.42 : Influence de la granulométrie du sable pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c (bentonite)=0.5g/l

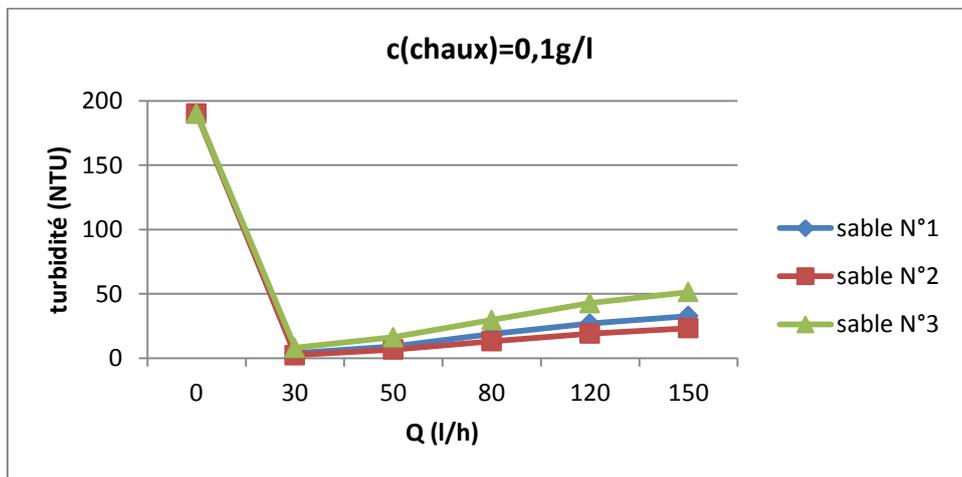


Figure V.43 : Influence de la granulométrie du sable pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c (chaux)=0.1g/l

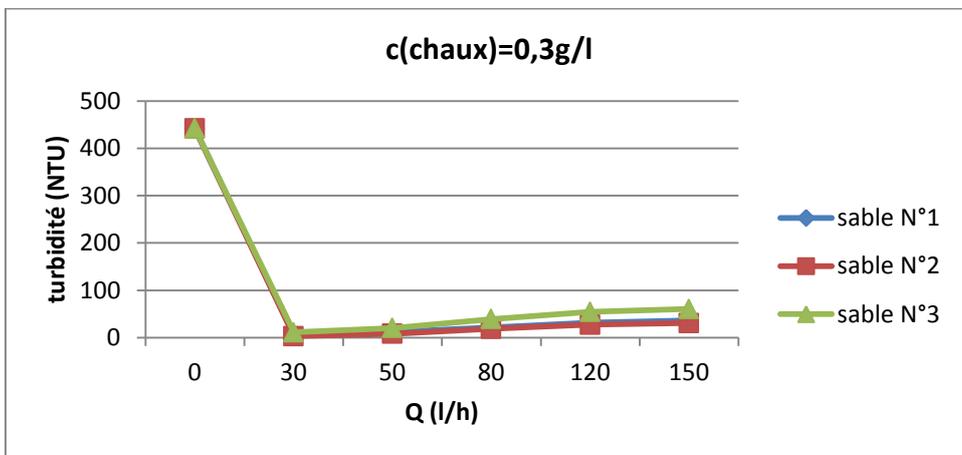


Figure V.44 : Influence de la granulométrie du sable pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c (chaux)=0.3g/l

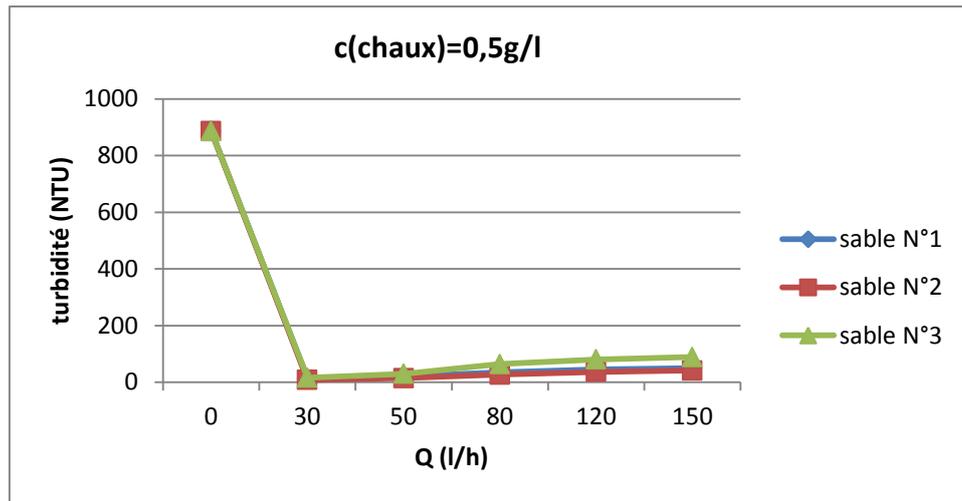


Figure V.45 : Influence de la granulométrie du sable pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c (chaux)=0.5g/l

On peut remarquer à partir des graphes que le sable N°2 donne les meilleurs résultats de la turbidité vient ensuite le sable N°1, et en dernier le sable N°3.

Le sable N°2 a donné les meilleurs résultats car il a la plus faible granulométrie et donc l'espace entre ces grains est faible, ce qui lui permet de retenir toutes les particules dont leurs diamètres est supérieur à l'espace entre les grains et donc de réduire la turbidité de l'eau, pour le sable N°1 qui a une granulométrie plus élevée que celle du sable N°2 et donc un espace entre les grains plus élevée, les particules seront moins retenues et pourront traverser la couche filtrante et donc augmenter la turbidité de l'eau filtrée et pour le sable N°3 ayant la plus grande granulométrie par rapport aux deux autres, le vide qui se crée entre ses grains est assez important et donc il pourra retenir que quelques particules, ce qui fait qu'à la sortie des filtres on récupérera une eau avec une assez importante turbidité.

On peut conclure que, la granulométrie joue un rôle essentiel dans la filtration, car c'est grâce à elle qu'on peut réduire la turbidité de l'eau, plus la granulométrie est faible plus on aura une turbidité faible.

V.2.2.3. Influence de la taille des MES:

Pour voir l'influence de la bentonite et de la chaux sur la variation de la turbidité, on a tracé la turbidité en fonction des débits de filtration pour les 3 sables et les 3 concentrations de chaux et de bentonite, voici quelques graphes obtenues.

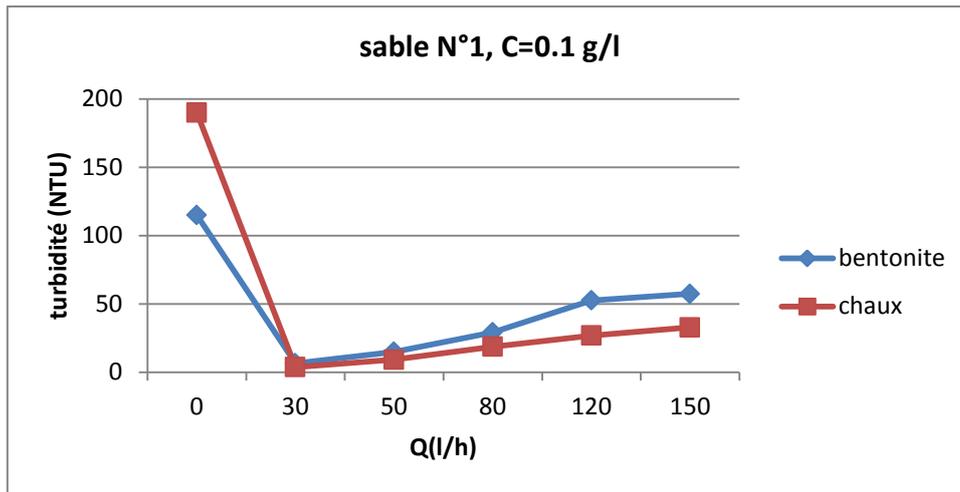


Figure V.46 : Influence des types de MES sur la turbidité pour VA40, VA30, Q=30 l/h, niveau3, c=0.1g/l, sable N°1

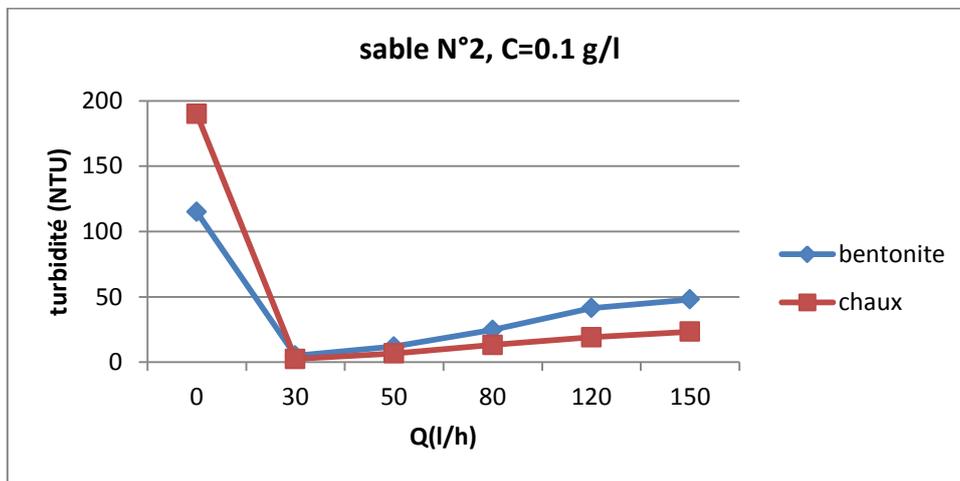


Figure V.47 : Influence des types de MES sur la turbidité pour VA40, VA30, Q=30 l/h, niveau3, c=0.1g/l, sable N°2

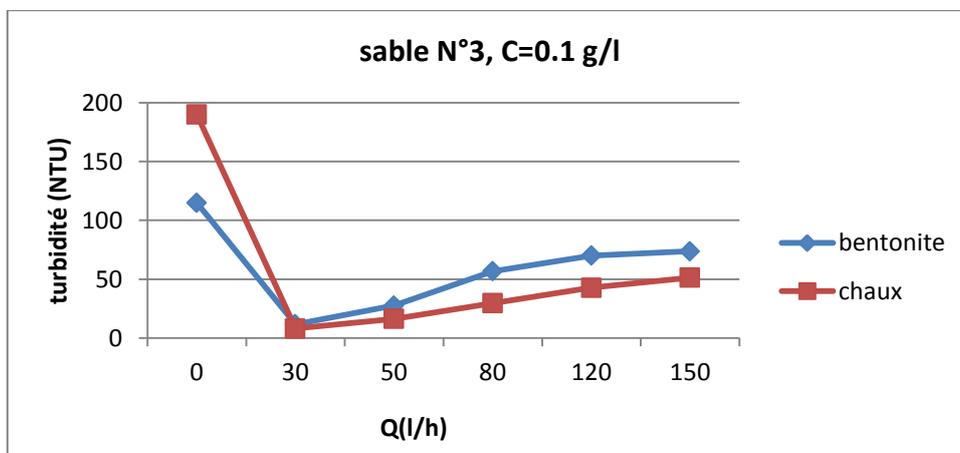


Figure V.48 : Influence des types de MES sur la turbidité pour VA40, VA30, Q=30 l/h, niveau3, c=0.1g/l, sable N°3

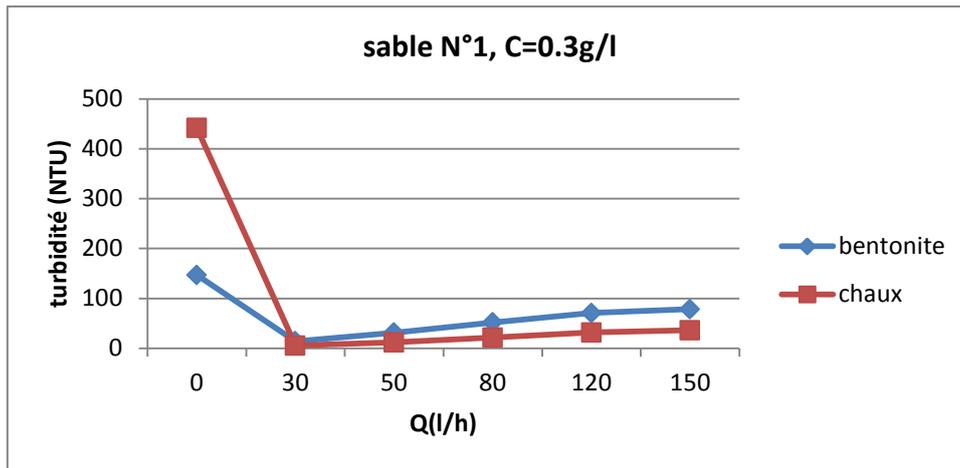


Figure V.49 : Influence des types de MES sur la turbidité pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c=0.3g/l, sable N°1

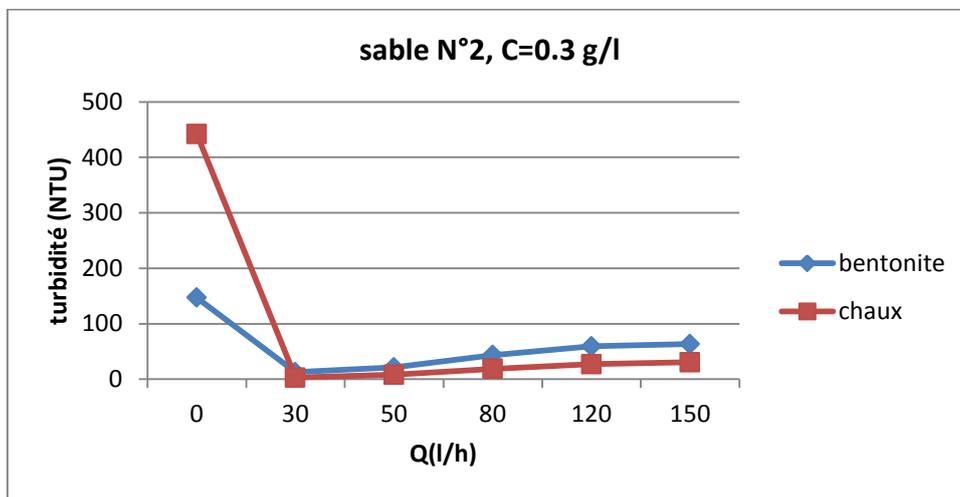


Figure V.50 : Influence des types de MES sur la turbidité pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c=0.3g/l, sable N°2

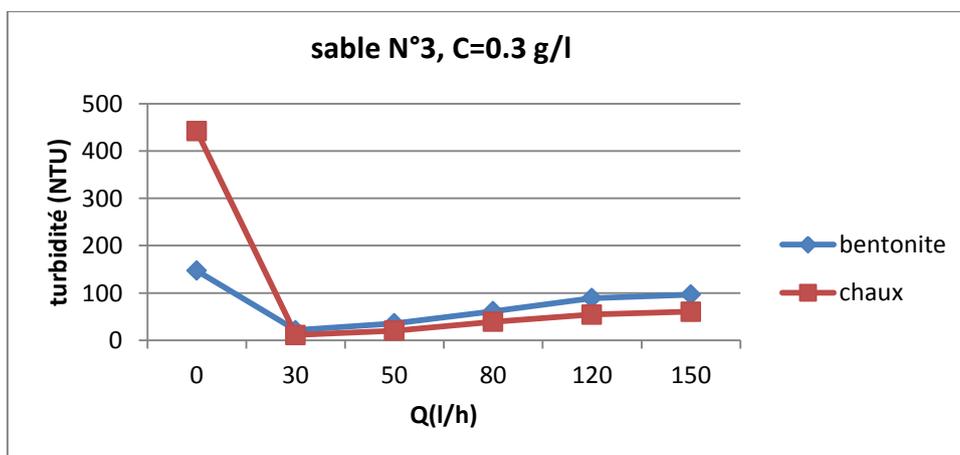


Figure V.51 : Influence des types de MES sur la turbidité pour VA4O, VA3O, Q=30 l/h, niveau3, c=0.3g/l, sable N°3

On remarque d'après les graphes tracés que la bentonite donne une plus grande turbidité que la chaux, cela est dû au fait que la bentonite a une taille inférieure à celle de la chaux ce qui engendre lors de la filtration le passage des particules des bentonites à travers le sable ce qui donne une plus grande turbidité par contre les particules de chaux, elles sont retenues par le filtre vu que leur taille est plus importante ce qui donne de faibles valeurs de la turbidité.

On conclue que plus les particules contenues dans l'eau sont fine moins il y'a de chance que les filtres à sables les retiennent.

V.3.Etude de la filtration sur sable appliquée sur les eaux usées épurées de la STEP de Ain El Houtz:

Après avoir ramené l'eau usée épurée de Ain El Houtz, on a procédé à une filtration sur sable avec les conditions optimales trouvées précédemment à savoir :

- Un débit de filtration de 30 l/h
- Une position des vannes VA4O, VA3O
- Le niveau 3 d'eau dans la colonne
- Sable N° 2 a donné des valeurs de turbidité faibles.

Cette étude s'est basée sur l'étude des pertes de charge en fonction du temps et sur les analyses physico-chimiques et microbiologiques avant et après filtration.

NB : Les résultats sont annexes de ce travail.

V.3.1.Etude des pertes de charge en fonction du temps :

La filtration à été faite pendant 120 minutes, et à chaque 5 minute on procédait à la lecture des pertes de charge sur les douze piézomètres. Ci-dessous le graphe obtenu.

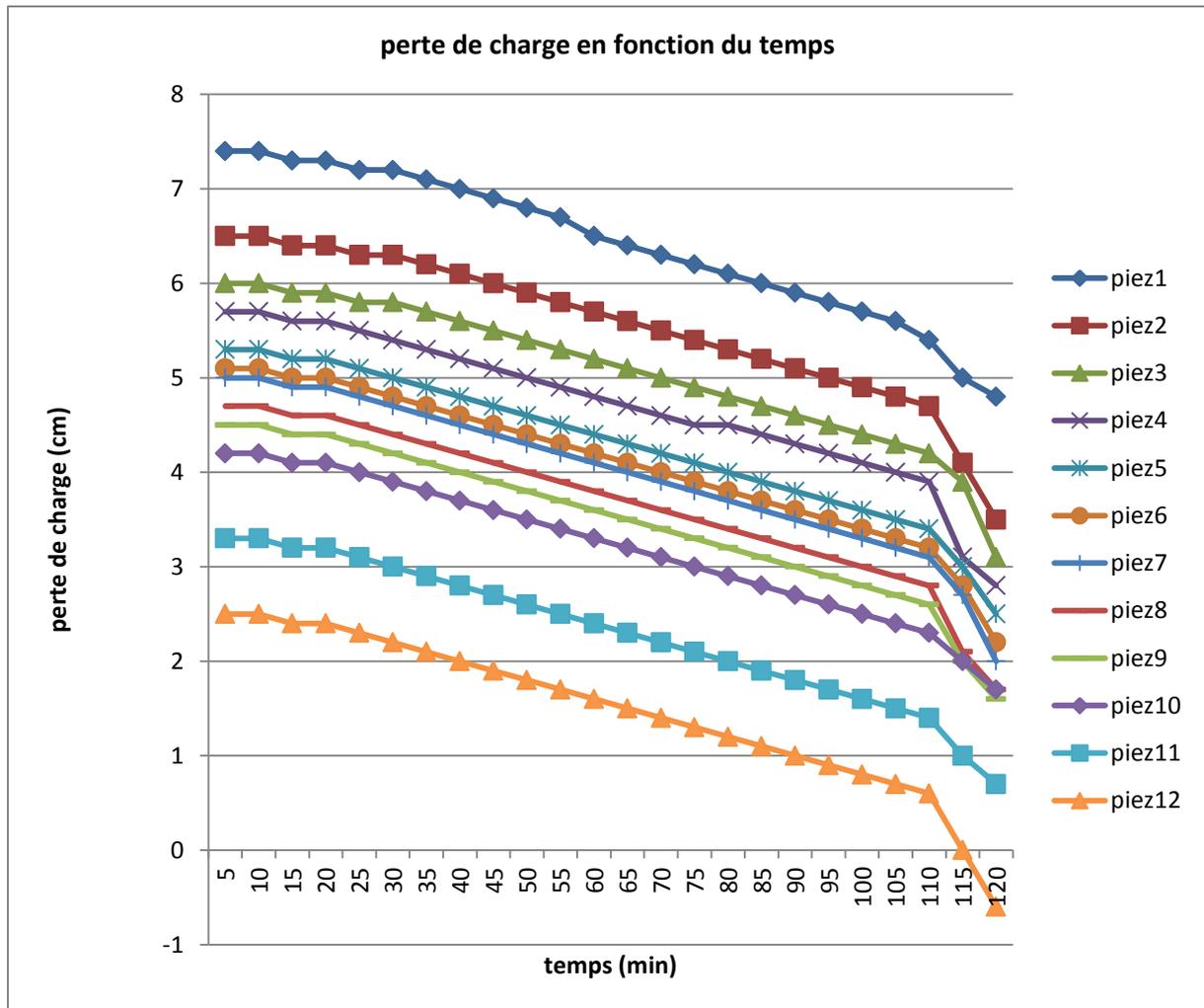


Figure V.52 : Evolution des pertes de charges du filtre au cours du temps

D'après le graphe, on remarque que plus on avance dans le temps plus les pertes de charges dans les piézomètres augmentent. Le rôle d'un filtre à sable est de retenir des particules dont leur taille est supérieure à celle des vides laissés par les grains de sable, l'accumulation et la rétention de ces particules sur la couche du sable va entraîner une diminution des pores du milieu filtrant et par conséquent d'autres particules plus fines seront aussi retenues et donc l'eau passera difficilement à travers ces pores ce qui engendrera d'importantes pertes de charges qui augmenteront au fur et à mesure que le filtre s'encrasse, l'augmentation des pertes de charge est le signe d'un colmatage du filtre.

On conclue que plus la durée de fonctionnement du filtre est grande plus les pertes de charges augmentent.

V.3.2. Résultats des analyses physico-chimiques :

Plusieurs analyses ont été effectuées sur les eaux usées épurées de Ain El Houtz avant et après filtration sur sable, ces analyses ont été portées sur : la conductivité, température, turbidité, chlore, calcium, magnésium, dureté, CO₂ dissous, pH, MES, DCO, TA, TAC.

V.3.2.1. Conductivité :

Les mesures de la conductivité ont été faites sur une durée de 120 minutes avec une prise d'échantillon toutes les 15 minutes, voici les résultats obtenus.

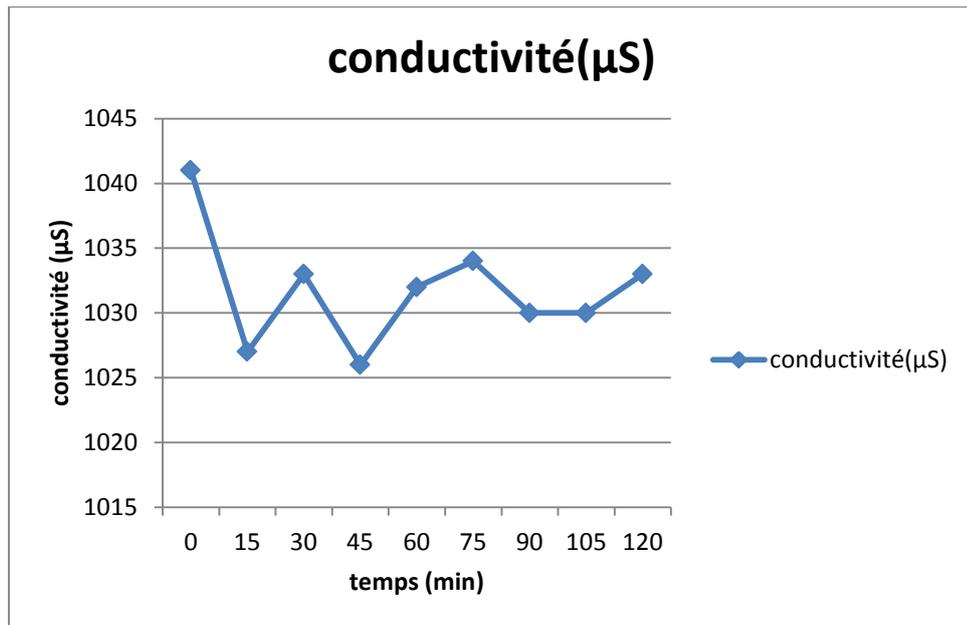


Figure V.53 : Evolution de la conductivité au cours de la filtration sur sable

D'après l'allure de la courbe obtenue, on remarque que la conductivité a une variation instable, ce qui veut dire que la filtration sur sable n'a pas d'effet sur la conductivité car le filtre ne peut éliminer les sels dissous.

V.3.2.2. Température :

La température a été mesurée toutes les 15 minutes pendant 120 minutes. Ci-dessous le graphe obtenu.

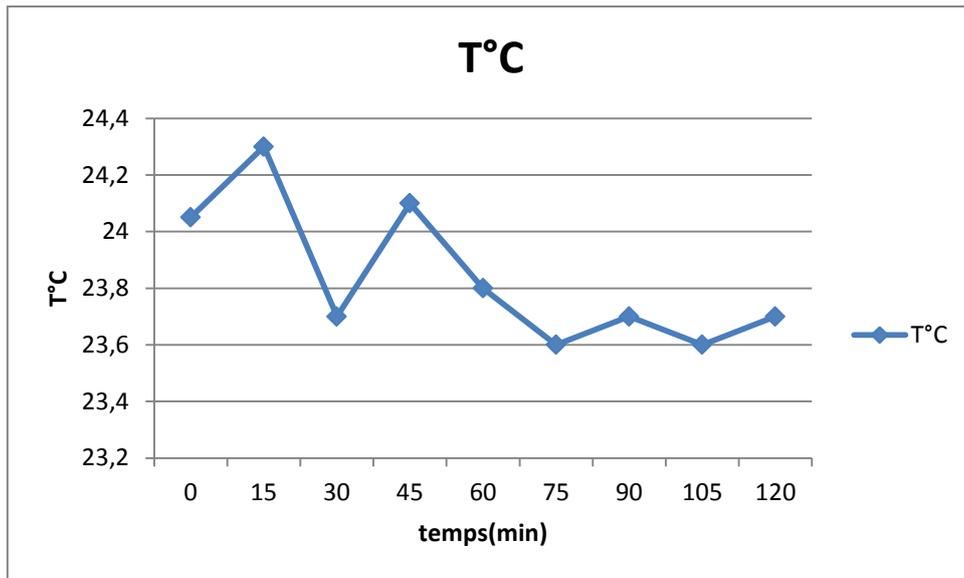


Figure V.54 : Evolution de la température au cours de la filtration sur sable

D'après le graphe, on remarque que l'évolution de la température au cours de la filtration est instable, on conclue que la filtration n'a pas d'influence sur la température.

V.3.2.3.pH :

Le pH a été mesuré après chaque 15 minutes sur une durée de 120 minutes. Voici le graphe obtenu.

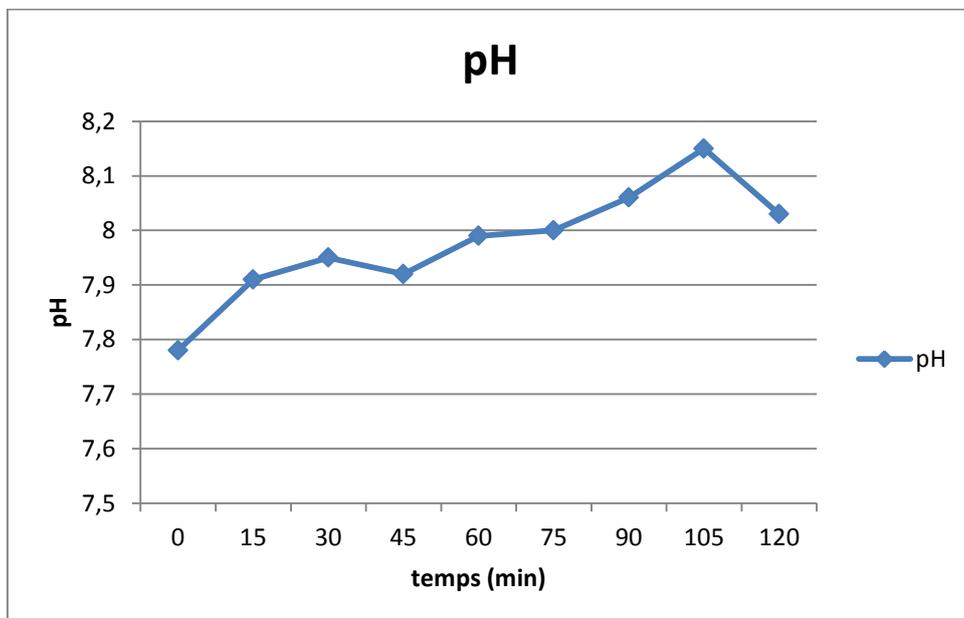


Figure V.55 : Evolution du pH au cours de la filtration sur sable

Le pH ne varie pas beaucoup d'après le graphe, on remarque que sa variation est de 7.8 à 8.1, on conclue que la filtration n'influe pas sur le pH.

V.3.2.4. Turbidité :

La turbidité elle aussi a été mesurée sur une durée de 120 minutes avec un intervalle de 15 minutes pour la prise d'échantillon. Le graphe obtenu est le suivant.

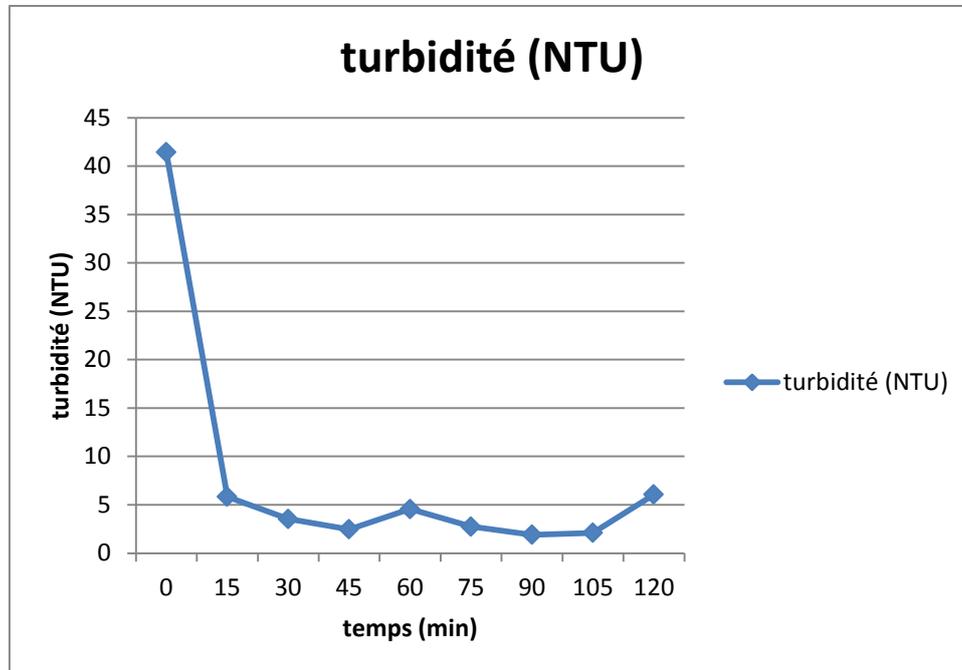


Figure V.56 : Evolution de la turbidité au cours de la filtration sur sable

D'après le graphe, on remarque une baisse considérable de la turbidité de 40 NTU, cela s'explique par le fait que l'eau contenant des particules créant la turbidité (MES, matières organique) lors de son passage à travers le filtre ces particules de taille plus au moins grande par rapport aux pores du milieu filtrant sont retenues par ces derniers ce qui fait diminuer la turbidité.

On conclue que la filtration sur sable contribue efficacement pour la réduction de la turbidité.

V.3.2.5. chlore, calcium, CO₂ dissous, MES, DCO, dureté, TA, TAC, magnésium :

Ces analyses ont été faites avant pour l'eau avant filtration, après 1h de filtration et après 2h de filtration. Voici les résultats regroupés dans un seul graphe.

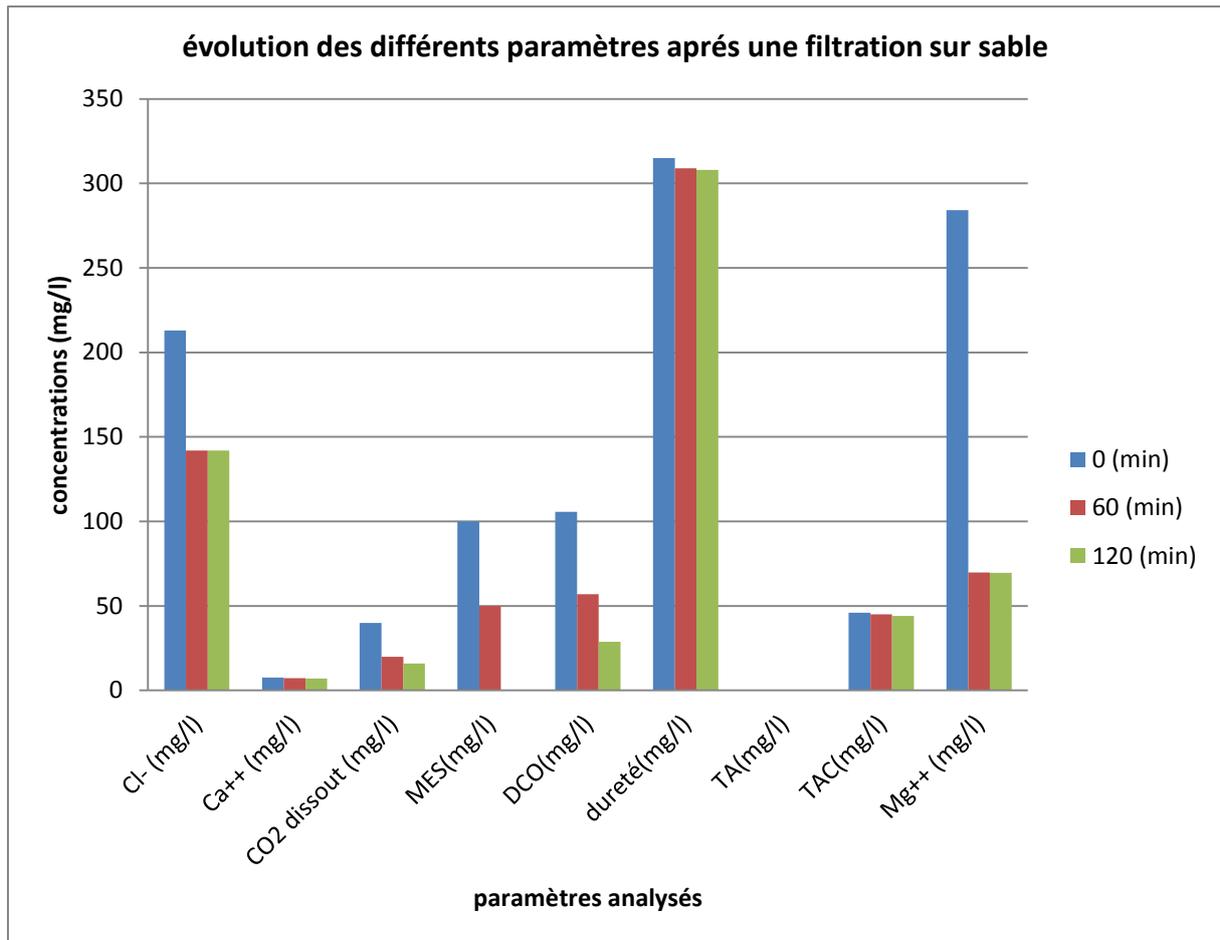


Figure V.57 : Evolution de quelques paramètres au cours de la filtration sur sable

Tableau V.5 : Rendement épuratoire de la filtration sur sable sur les éléments chimiques

Temps (min)	Cl ⁻	Ca ²⁺	CO ₂ dissout	MES	DCO	dureté	TAC	Mg ²⁺
60	33%	5%	50%	50%	46%	2%	2%	75%
120	33%	7%	60%	100%	73%	2%	4%	75%

D’après le graphe et les rendements on remarque que :

- Pour le chlore, on a une diminution de 100 mg/l et cela après 1h et 2h de filtration.
- Pour le calcium, on a une très faible diminution.
- Pour le CO₂ dissous, on a une baisse de moitié.
- Pour les MES, on remarque que qu’elles baissent de presque la moitié après 1h de filtration et s’annule après 2h de filtration.
- Pour la DCO, on remarque une diminution de plus que la moitié après 1h de filtration et du trois quart après 2h.

- Pour la dureté, il n'y a presque aucun changement.
- Pour le TA, nul avant filtration.
- Pour le TAC, presque aucun changement.
- Pour le magnésium, une baisse de 200 mg/l après 1h de filtration qui reste constante après 2h de filtration.

On conclue, que la filtration sur sable peut réduire de presque la moitié quelques éléments chimiques comme le chlore, le CO₂ dissous, DCO, magnésium et d'annuler la teneur en matières en suspension. Cette rétention est due au fait que le diamètre des pores du milieu est plus petit que celui des éléments retenus comme les MES et qu'au fur et à mesure que le filtre s'encrasse le diamètre des pores est réduit ce qui permet de retenir quelques autres éléments chimiques de taille plus ou moins petite, ces éléments chimiques peuvent aussi être éliminés avec les MES lorsque sur ces derniers ces éléments s'adsorbent.

V.3.3. Résultats des analyses microbiologiques :

Les résultats d'analyses des différents micro-organismes (coliformes, e.coli présumé, streptocoque, clostridium, salmonella) retrouvés dans les eaux usées épurées avant et après filtration sur sable sont regroupés dans le tableau suivant :

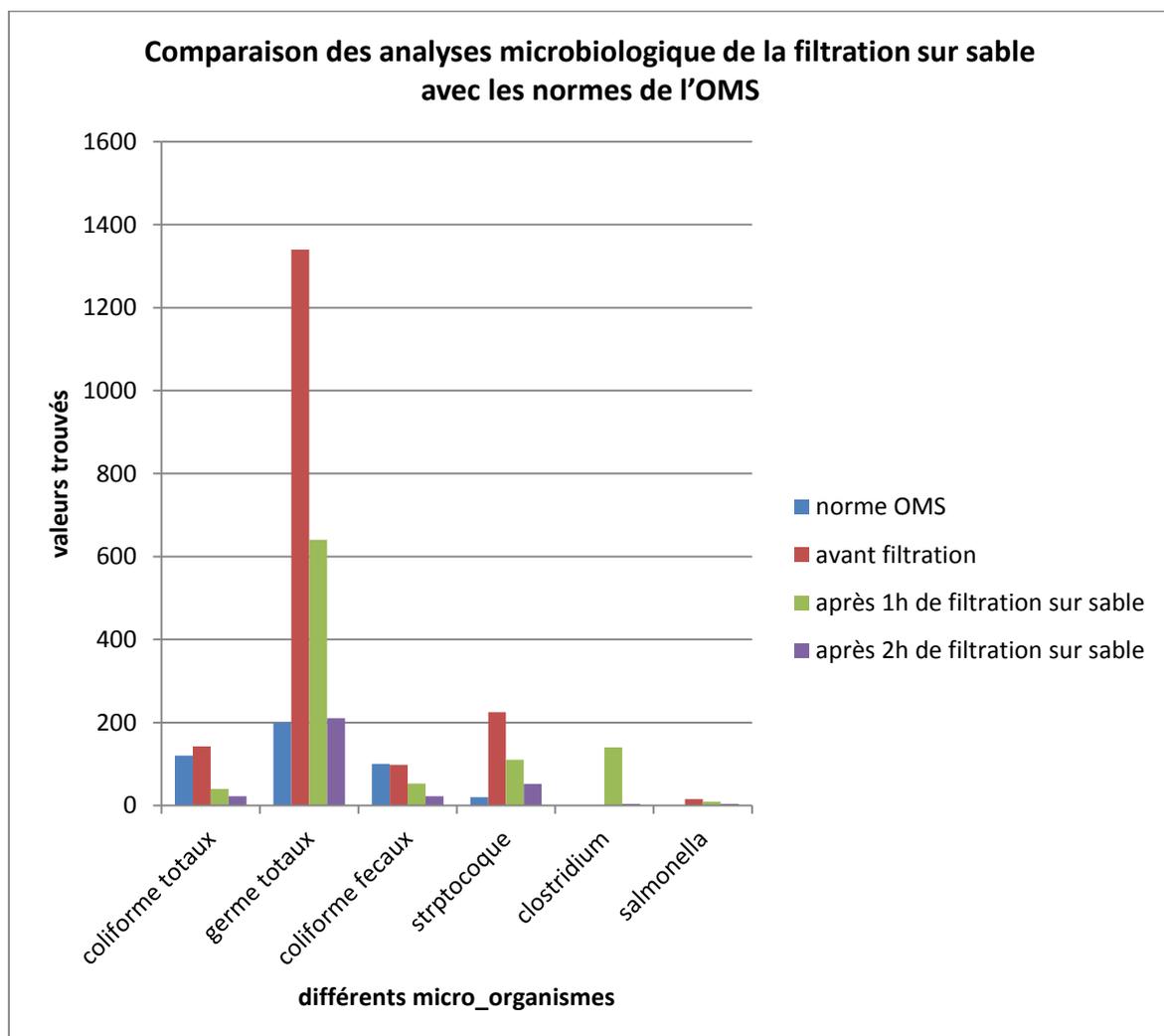
Tableau V.6 : Résultats des analyses microbiologiques après filtration sur sable

Type de micro-organisme	Avant filtration (UFC/100 ml)	Après 1h de filtration sur sable (UFC/100 ml)	Après 2h de filtration sur sable (UFC/100 ml)
Flore microbienne	Ind	Ind	Ind
Coliformes totaux	142	40	22
Germes totaux	1340	640	210
Coliformes fécaux	98	53	22
E.coli	90	36	15
Streptocoques	225	110	52
Clostridium (UFC/20ml)	Ind	140	4
Salmonella	15	9	4

NB : Ind veut dire indénombrable

Tableau V.7 : Rendement épuratoire de la filtration sur sable sur les micro-organismes

Type de micro-organisme	Après 1h de filtration sur sable	Après 2h de filtration sur sable
Coliformes totaux	72%	85%
Germes totaux	52%	84%
Coliformes fécaux	46%	78%
E.coli	60%	83%
Streptocoques	51%	77%
Clostridium	/	99%
Salmonella	40%	73%

**Figure V.58** : Comparaison des analyses microbiologique de la filtration sur sable avec les normes de l’OMS

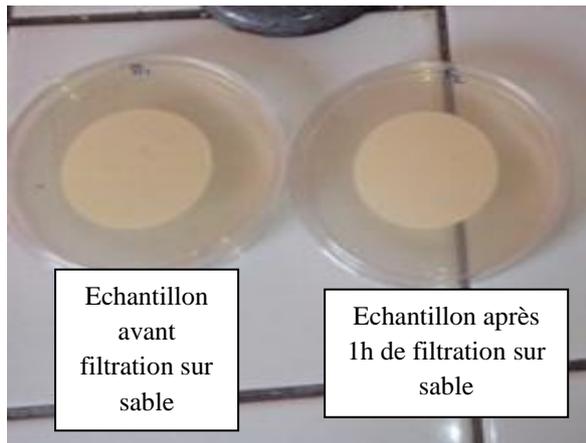


Photo V.2 : Echantillons avant incubation

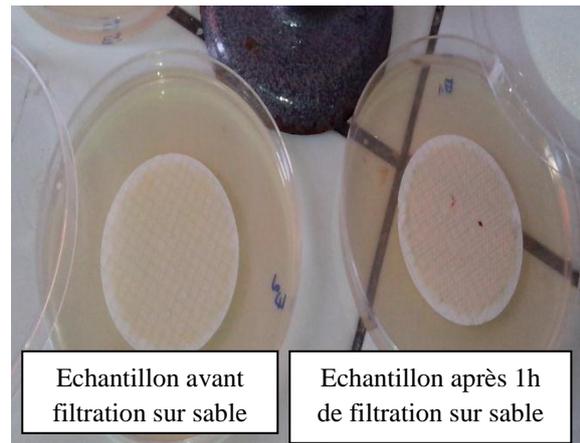


Photo V.3: Echantillons après incubation

D'après les tableaux, on remarque qu'après 1h de filtration sur sable on a la moitié des micro-organismes analysés qui sont éliminés et cette élimination se poursuit au trois quart après 2h de filtration sur sable, ceci s'explique par l'adsorption de ces micro-organismes sur la couche filtrante et aussi leur rétention entre les pores laissés par les grains de sable, la filtration sur sable peut donner de bon rendement d'élimination des micro-organismes qui peut atteindre 80%.

Malgré cette réduction de micro-organismes dans l'eau après filtration sur sable, si on regarde le graphe de comparaison avec les normes, on remarque que pour les strptocoques, clostridium et les salmonelles des taux qui ne respectent pas la norme par contre pour les coliformes totaux, germes totaux, et coliformes fécaux on remarque qu'ils sont bien en dessous de la norme.

V.4. Etude de la filtration sur charbon actif appliquée sur les eaux usées épurées de la STEP de Ain El Houtz:

Après avoir fait une filtration sur sable, on a voulu voir comment notre eau usée épurée filtrée réagirait si on l'a faisait passer sur du charbon actif en grain. Dans ce contexte là, on a prélevée deux échantillons d'eau filtrée ; le premier est issu d'une filtration sur sable de 1h qu'on a laissé pendant 1h dans une colonne remplie de CAG et le second est issu d'une filtration sur sable de 1h qu'on a laissé 20h dans la colonne de CAG, voici les résultats des analyses obtenues.

NB : Les résultats sont en annexes de ce travail.

V.4.1. Résultats des analyses physico-chimiques :

On a effectuée quelques analyses physico-chimiques qu'on a regroupées dans des graphes qui sont les suivants :

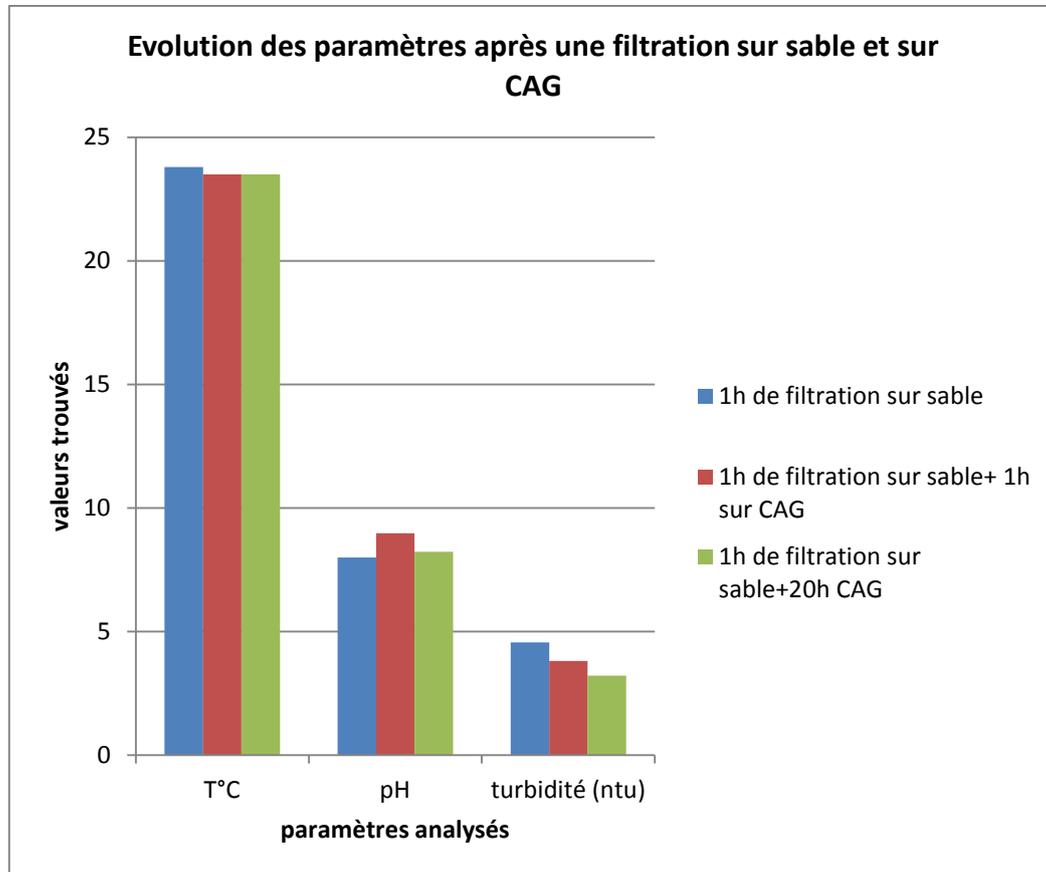


Figure V.59 : Evolution de quelques paramètres au cours de la filtration sur sable et sur CAG

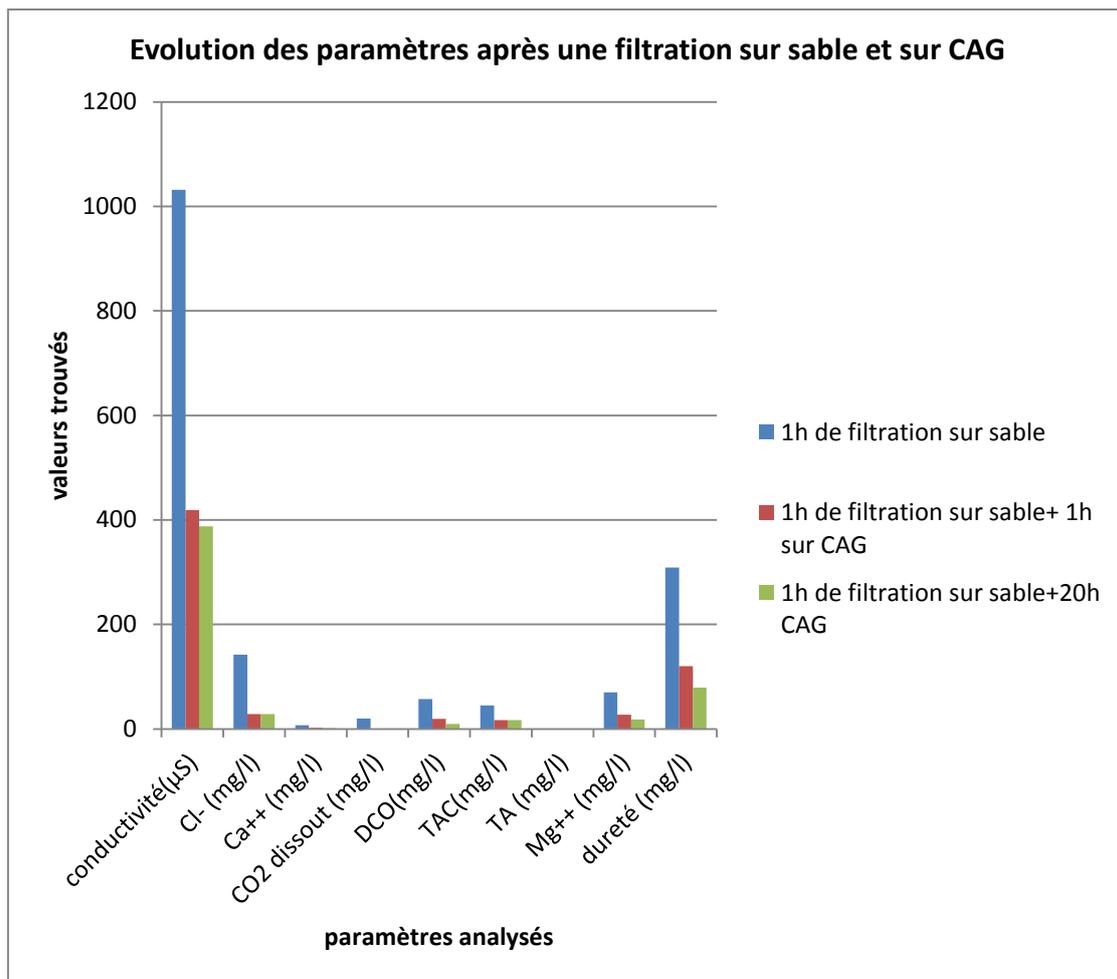


Figure V.60 : Evolution de quelques paramètres au cours de la filtration sur sable et sur CAG

Tableau V.8 : Rendement épuratoire de la filtration sur CAG sur les éléments chimiques

Temps de filtration	conductivité	Cl-	Ca ²⁺	CO ₂ dissous	DCO	TAC	Mg ²⁺	Dureté
1h filtration sur sable + 1h filtration sur CAG	59%	80%	66%	100%	66%	62%	61%	61%
1h filtration sur sable + 20h filtration sur CAG	62%	80%	79%	100%	83%	62%	74%	74%

On remarque d’après le graphe :

- Aucune influence de la filtration sur CAG sur la température et le pH.

- Presque aucune baisse de la turbidité.
- La conductivité qui baisse de plus que la moitié.
- Une bonne réduction du chlore.
- L'élimination totale du CO₂ dissous.
- Réduction du trois quart de la DCO.
- Une réduction de plus que la moitié du TAC.
- Une élimination du trois quart du magnésium.
- Une baisse du trois quart de la dureté.

On conclue, que la filtration sur CAG réduit de plus que la moitié les éléments chimiques du a sa grande surface spécifique qui permet une bonne adsorption de ces éléments, donc la filtration sur CAG est un bon moyen pour réduire les concentrations de certains éléments chimiques de faibles taille.

V.4.2. Résultats des analyses microbiologiques :

Les résultats des différents micro-organismes (coliformes, e.coli présumé, streptocoque, clostridium, salmonella) retrouvés dans les eaux usées épurées avant et après filtration sur sable sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau V.9 : résultats des analyses microbiologiques après filtration sur sable et sur CAG

Type de micro-organisme	Après 1h de filtration sur sable (UFC/100 ml)	Après 1h de filtration sur sable+ 1h de filtration sur CAG (UFC/100 ml)	Après 1h de filtration sur sable+ 20h de filtration sur CAG (UFC/100 ml)
Flore microbienne	Ind	Ind	Ind
Coliformes totaux	40	20	6
Germes totaux	640	202	92
Coliformes fécaux	53	19	7
E.coli	36	18	4
Streptocoques	110	49	18
Clostridium (UFC/20ml)	Ind	0	0
Salmonella	9	1	0

NB : Ind veut dire indénombrable

Tableau V.10 : Rendement épuratoire de la filtration sur sable et sur CAG

Types de micro-organismes	Après 1h de filtration sur sable+ 1h de filtration sur CAG	Après 1h de filtration sur sable+ 20h de filtration sur CAG
Coliformes totaux	50%	85%
Germes totaux	68%	86%
Coliformes fécaux	64%	87%
E.coli	50%	89%
Streptocoques	55%	84%
Clostridium	100%	100%
Salmonella	89%	100%

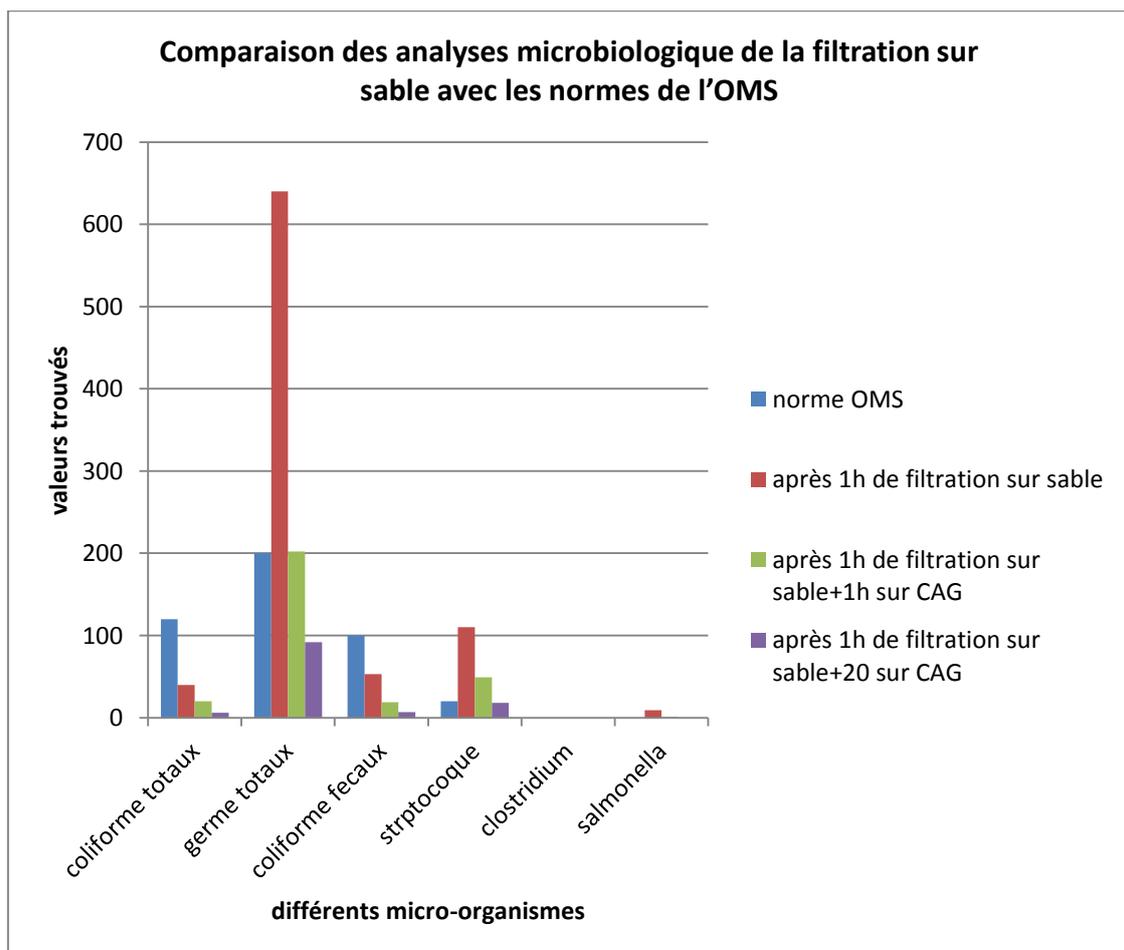
**Figure V.61**: Comparaison des analyses microbiologique de la filtration sur sable avec les normes de l’OMS



Photo V.4: Echantillon avant incubation



Photo V.5: Echantillon après incubation

D'après les résultats obtenus, on remarque qu'après 1h de filtration sur CAG on a rendement de 50 % d'élimination des micro-organismes pathogènes et pour 20h de filtration sur CAG on a un rendement qui frôle les 90%. On conclue que le CAG vu sa grande surface spécifique permet aux micro-organismes de d'adsorber à sa surface et donc d'être retenus.

A partir du graphe obtenu après comparaison des résultats avec la norme, on remarque que pour tous les micro-organismes analysés la norme est respectée.

V.5.Comparaison entre filtration sur sable et filtration sur charbon actif :

Pour pouvoir faire une comparaison entre filtration sur sable et filtration sur charbon actif, on a pris deux échantillons identiques, l'un on lui a fait subir une filtration sur sable de 1h et l'autre une filtration sur charbon actif pendant 1h, les résultats sont donnés par le graphe suivant :

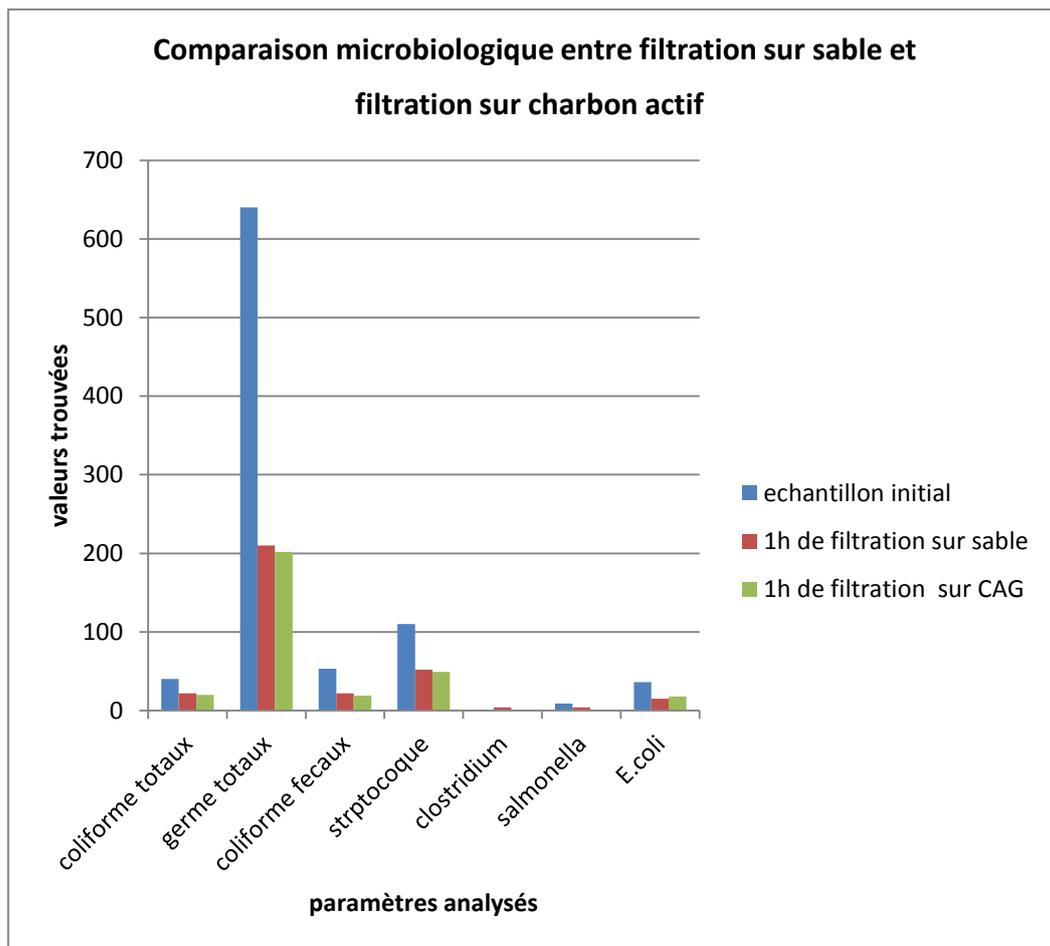


Figure V.62: Comparaison microbiologique entre filtration sur sable et filtration sur charbon actif

Tableau V.11 : Comparaison des rendements épuratoire sur les micro-organismes entre filtration sur sable et sur CAG

	coliforme totaux	germe totaux	coliforme fecaux	strptocoque	clostridium	salmonella	E.coli
1h de filtration sur sable	45%	67%	58%	53%	<100 %	56%	58%
1h de filtration sur CAG	50%	68%	64%	55%	100%	89%	50%

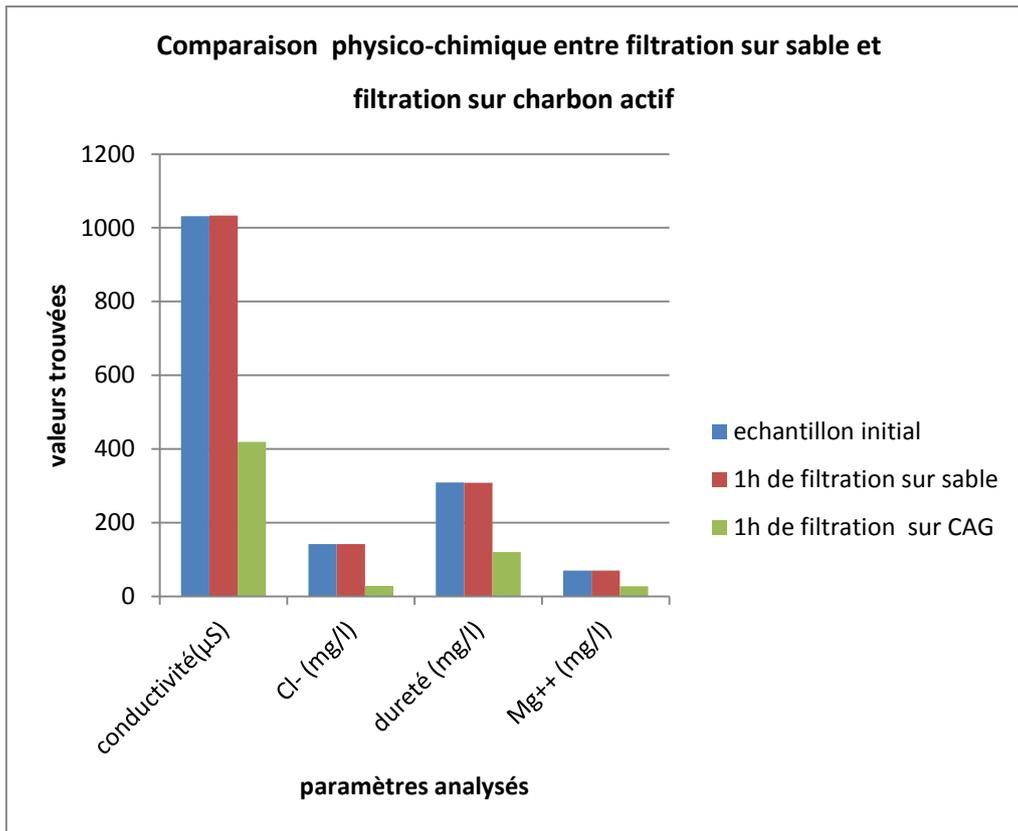


Figure V.63 : Comparaison physico-chimique entre filtration sur sable et sur charbon actif

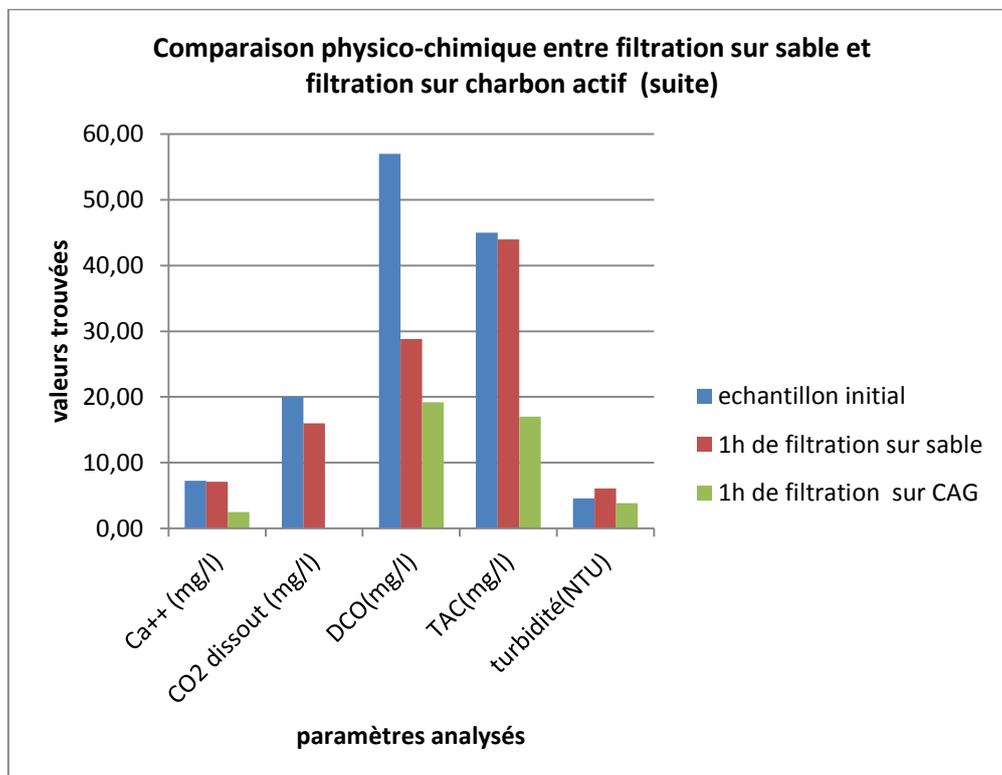


Figure V.64 : Comparaison entre filtration sur sable et filtration sur charbon actif (suite)

Tableau V.12 : Comparaison des rendements épuratoires de la filtration sur sable et sur CAG

Paramètres analysés	conductivité	Cl ⁻	dureté	Mg ²⁺	Ca ²⁺	CO ₂ dissous	DCO	TAC	Turbidité
1h de filtration sur sable	0%	0%	0%	0%	2%	20%	49%	2%	0%
1h de filtration sur CAG	59%	80%	61%	61%	66%	100%	66%	62%	16%

D'après les graphes et les tableaux ci-dessus, on remarque que:

- Pour la partie microbiologique les rendements épuratoire pour le sable et le CAG sont presque identique.
- Pour la partie physico-chimique les rendements épuratoires du CAG sont très importants par rapport à ceux du sable et qui peuvent atteindre les 100 %.

On peut conclure que pour les éléments chimiques le CAG est très efficace pour les éliminer car ces derniers vont s'adsorber sur le CAG vu sa grande surface spécifique.

V.6. Conclusion :

On peut dire que la filtration sur sable est influencée par plusieurs paramètres :

- Une pression exercée sur le filtre augmente les pertes de charge du filtre.
- Un débit important accroît les pertes de charge du filtre.
- Les MES fines diminuent les pertes de charges du filtre et augmentent la turbidité de l'eau filtrée.
- Une eau concentrée fait augmenter les pertes de charges et colmatent rapidement le filtre et donne une turbidité élevée au fur et à mesure que le filtre fonctionne.
- Plus les grains du sable utilisé pour la filtration sont fins plus les pertes de charges augmentent et la turbidité baisse.
- La filtration sur sable n'a aucune influence sur la conductivité, température et pH.
- La filtration sur sable donne de très bons résultats pour réduire la turbidité, les MES, et même les micro-organismes.
- Par contre la filtration sur sable réduit moyennement certains éléments chimiques.

En ce qui concerne la filtration sur CAG on peut dire que :

- La filtration sur CAG n'a aucun pouvoir sur la température, pH, mais peut réduire la conductivité de l'eau.
- La filtration sur CAG donne d'excellentes réductions de certains éléments physico-chimiques et même microbiologiques.

Conclusion générale

Le présent travail s'est basé sur une étude comparative entre une filtration sur sable et une filtration sur charbon actif des eaux usées épurées de la STEP de Ain El Houtz dans le but de voir comment cette filtration peut améliorer la qualité de cette eau épurée qui est destinée à l'irrigation de la plaine de Hennaya.

Dans la première partie de ce travail, on a parlé de quelques généralités sur les eaux usées et les différentes pollutions qui lui sont associées ainsi que leurs origines, on est passé ensuite aux procédés par lesquels cette eau usée va passer pour subir une épuration et donc une élimination de la pollution qu'elle contient, on a aussi présenté quelques domaines de réutilisation de ces eaux usées après une épuration ainsi que les risques qu'elle peut engendrer que cela soit pour l'homme ou l'environnement et enfin pour clore ce cette partie on introduit la filtration et ses différents types et avec toutes ses caractéristiques.

Dans la seconde partie, on a tout d'abord fait des essais en variant certains paramètres pour pouvoir choisir les paramètres optimaux comme le débit de filtration, le niveau ou la hauteur d'eau dans la colonne, et le meilleur sable, ce choix a été fait en se basant sur les paramètres qui donnent les perte de charges et les turbidités les moins élevées.

Après avoir fixé ces paramètres avec lesquels on va travailler, on a entamé notre étude proprement dite et cela en commençant par faire une filtration sur sable pendant 2h et en analysant au bout de chaque heure de filtration certains paramètres physico-chimiques et microbiologiques, on a obtenue une amélioration et une réduction de la turbidité, MES, DCO, et une légère baisse des éléments chimique comme le chlore, et le magnésium, mais aussi une bonne élimination des micro-organismes.

Ensuite, on a fait une filtration sur charbon actif qui nous permis d'atteindre les 80% jusqu'à 90 % d'élimination de tous les paramètres physico-chimiques ainsi que microbiologique mais qui reste non conforme aux normes de l'OMS.

La STEP de Ain El Houtz peut envisager une éventuelle inclusion de filtres à sables qui lui permettra d'améliorer la qualité physico-chimique et microbiologique de ses eaux épurées et de compléter ce traitement par une filtration sur charbon actif afin de pousser encore plus loin la qualité de ces eaux dans le but de protéger la fertilité des terrains

CONCLUSION GENERALE

agricoles et de la santé publique vu que ces eaux là seront par la suite réutilisées pour l'irrigation.

La STEP peut opter pour une filtration bicouche c'est-à-dire mettre du sable et du charbon actif dans un même filtre pour économiser l'espace et le coût de réalisation.

Par contre, la STEP de Ain El Houtz doit impérativement penser à rajouter une unité de désinfection de ces eaux comme une chloration, car vu la présence importante des micro-organismes dans les eaux épurées la filtration à elle seule ne peut tous les abaisser en dessous de la norme fixée par l'OMS.

Références bibliographiques

- [1] **Dupont Dominique** : « L'assainissement écologique des eaux usées domestiques vers un mode de gestion durable », ENSAL 2008
- [2] **Dafri Amel** : « Biodégradation des crésols par le microbiote des eaux usées de la ville de Constantine », Université Mentouri Constantine, option : Biotechnologies microbiennes, Juin 2008.
- [3] **Attab Sarah** : « Amélioration de la qualité microbiologique des eaux épurées par boues activées de la station d'épuration Haoud Berkaoui par l'utilisation d'un filtre à sable local », université kasdi Merbah-Ouargla, Novembre 2011
- [4] **Bechlaghem Aissa** : « Etude de la faisabilité de réutilisation des eaux usées issues de la STEP de Chlef à des fins agricoles », Faculté De Technologie, Département d'hydraulique, 2013
- [5] **Metahri Mohammed Said** : « Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées par des procédés mixtes : cas de la STEP Est de la ville de Tizi-Ouzou », thèse de doctorat, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Juin 2012.
- [6] **Berranem Ahlem**: « impact de l'irrigation par les eaux de la moyenne seybouse sur les sols et les rendements des cultures », université badji-mokhtar annaba, 2012
- [7] **Bezziou Assia et Mekkaoui Rima** : « essai de traitement biologique des eaux usées en utilisant des filtres bicouches », universite kasdi merbah ouargla, juin 2013
- [8] **Charlotte Picard** : « Transfert de matière dans un biofilm aéré sur membrane », université de Toulouse, Juillet 2012
- [9] **Dekhil Soror Wahiba et Zaibet Manel** : « traitement des eaux usées urbaines par boues activées au niveau de la ville de Bordj Bou Arreridj effectué par la station d'épuration des eaux usées ONA », juin 2013
- [10] **Rodier Jean, Legube Bernard, Merlet Nicole et Coll** : « l'analyse de l'eau », 9ème édition, Dunod, Paris, 2009
-

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[11] **Dahou Abderahim et Brek Adem** : « lagunage aéré en zone aride Performance épuratoires cas de la région d'Ouargla », université Kasdi Merbah Ouargla, Juin 2013

[12] **Laurent François et Dupont Nadia**: « l'eau dans le milieu», Juin 2011

[13] **Boutin Catherine, Héduit Alain, Helmer Jean-Michel** : « Technologies d'épuration en vue d'une réutilisation des eaux usées Traitées (reut) », convention de partenariat onema-cemagref, Novembre 2009

[14] **Bouakkaz Abdellatif** : « Contribution de la filtration sur sable dans l'amélioration de la qualité des eaux issues des stations d'épuration à boues activées: application sur les eaux épurées de la STEP d'Ain El Houtz », 2013

[15] **OMS** : « Directives oms pour L'utilisation sans risque des Eaux usées, des excréta Et des eaux ménagères, Utilisation des eaux usées en agriculture », Volume II, 2012

[16] **Bourier Régis, Satin Marc, Selmi Béchir** : «guide technique de l'assainissement », 4^{ème} édition, Paris 2010

[17] **Mekhalif Faiza**: « Réutilisation des eaux résiduaires industrielles épurées comme eau d'appoint dans un circuit de refroidissement », université du 20 Août 1955 Skikda, 2009

[18] **Deshayes Matthieu** : « Guide pour l'établissement des plans d'assurance de la qualité dans le cadre de la réalisation des stations d'épuration de type boues activées en lots séparés », Juin 2008

[19] **Vaillant J.r.**: « perfectionnement et nouveautés pour l'épuration des eaux résiduaires, eaux usées urbaines et eaux résiduaires industrielles », édition Eyrolles, Paris 1974

[20] **Renou Sébastien** : « Analyse de cycle de vie appliquée aux systèmes de traitement des eaux usées », École Nationale Supérieure des Industries Chimiques, Lorraine, 2006.

[21] **Gomella Cyril et Guerrée Henri** : « le traitement des eaux publiques, industrielles et privées », 2eme édition, Edition Eyrolles, Paris, 1978.

[22] **Degremont** : « Memento technique de l'eau», tome 1 et2.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [23] **Daloz Alexandre** : «L'épuration des eaux usées par les filtres plantés de roseaux», école nationale supérieur d'architecture de Lyon, 2007
- [24] **Allaoui Karima**: « Modélisation hydraulique d'un bassin d'aération des stations d'épuration des eaux usées », université Annaba, 2009
- [25] **Site** : <http://www.ergolev.fr>, consulté le 28/05/2015
- [26] **Lyonnaise des eaux** : « Traitement Des eaux usées urbaines », Guide ENGEES, Mai 2002
- [27] **Telli Sidi Mohamed** : « Etude sur la valorisation par séchage solaire des boues d'épuration des eaux urbaines – cas de la station d'office nationale d'assainissement (ONA)- Tlemcen », Septembre 2013
- [28] **Hofkes E. H.**: « Alimentation en eau des petites collectivités, technologies appropriées pour les petites installations d'alimentation en eau dans les pays en voie de développement », Août 1983
- [29] **Emilian koller** : « Aide-mémoire Génie chimique », l'usine nouvelle, Dunod, 3eme édition
- [30] **Ouali Mohand Said**: « Cours de procédés unitaires biologiques et traitement des eaux », office des publications universitaires, Alger, 2001
- [31] **Berland Jean-Marc et Boutin Catherine**:« Procédés extensifs d'épuration des eaux usées adaptés aux petites Et moyennes collectivités (500-5000 eq-hab) », 2001
- [32]**Berné F et Cordonnier J** : « Traitement des eaux », édition Technip, Paris 1996.
- [33] **Jardé Emilie**: «Composition organique de boues résiduaires de stations d'épuration » Université Henri Poincaré, Nancy1, Décembre 2002
- [34] **Imhoff Karl.r**: « Manuel de l'assainissement urbain », 5eme édition, Edition Dunod, Paris 1970,
-

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[35] **Drechsel Ray et al** : « L'irrigation avec des eaux usées et la santé, évaluer et atténuer les risques dans les pays à faibles revenus », presses de l'université du Québec, 2011

[36] **Site**: <https://sites.google.com/site/tpesurlaphytoremediationgroupe/la-depollution-des-nitrates>, consulté le 28/05/2015.

[37] **Gaid Abdelkader** : « Epuration biologique des eaux usées urbaines » Tome II, Alger 1984

[38] **Brouillet J.L., Picot B., et al** : « Ecotechniques d'assainissement des eaux usées domestiques : évolution et perspectives », XIIIe congrès mondial de l'eau, Montpellier – 1er au 4 septembre 2008 -

[39] **Iwema Arthur et al** : « Epuration des eaux usées domestique par filtres plantés de macrophytes », Juin 2005

[40] **Perez Fabiel Sergio**: « Etude de la biodégradabilité de boues secondaires soumises à un traitement Thermique à 65°C et du couplage digestion anaérobie et digestion thermophile Aérobie pour la réduction de boues », l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, 13 Février

[41] **Gamrasni, M.A** : « Utilisation agricole des boues d'origine urbaine », office international de l'eau, 1981

[42] **Déléry Laure, Gay Guillaume et al** : « Evaluation des risques sanitaires des filières d'épandage des boues de stations d'épuration », ADEME, SYPREA, FP2E, INERIS, Octobre 2007.

[43] **El Rhazi Ouissam et Habib Rachid**: « impact sanitaire de la réutilisation des eaux usées », Université Cadi Ayyad Marrakech, Juin 2007

[44] **Djeddi Hamsa** : « Utilisation des eaux d'une station d'épuration pour l'irrigation des essences forestières urbaines », université Mentouri Constantine, 2007

[45] **Rotbardt Alain** : « Réutilisation des eaux usées traitées – perspectives opérationnelles et recommandations pour l'action », agence Française de développement, Février 2011

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[46] **Kettab A:** « Traitement des eaux, les eaux potables », office des publications universitaire, Alger, 1992

[47] **Fecih Abla :** « L'influence de la filtration sur sable sur le traitement des eaux saumâtres », Octobre 2012

[48] **Des Jardins Raymond:** « Le traitement des eaux », 2eme édition revue et améliorée, éditions de l'école polytechnique de Montréal, 1997

[49] **Deziel Erika :** « Couplage de la filtration granulaire aux résines échangeuses d'ions pour le traitement des eaux de surface des petites communautés », université de Montréal,
Aout 2013

[50] **Amadou Hama Maiga :** « La filtration lente sur sable étudiée sur une installation pilote », école polytechnique fédérale de Lausanne, Novembre 1983

[51] **Site :** <http://www.oieau.fr>, consulté le 18/05/2015

[52] **Dupont André:** « Hydraulique urbaine, hydrologie-captage et traitement des eaux », Tome 1, 4ème édition, édition Eyrolles, Paris, 1978

[53] **Fiche technique TE400 :** « Manuel du pilote de filtration TE 400 »

[54] **Slimani Amaria et Touati Hassiba :** « filtration sur sable », université Abou Bakr Belkaïd ; département d'hydraulique, Juillet 2004.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

**Annexe 1: Tableau des valeurs limites des paramètres de rejet dans un milieu récepteur
(Journal Officiel de la République Algérienne, 2006) [3]**

Paramètres	Unités	Valeurs Limites
Température	°C	30
pH	-	6,5 à 8,5
MES	mg/l	35
Turbidité	UTN	50
DBO ₅	mg/l	35
DCO	mg/l	120
Azote Kjeldahl	mg/l	30
Phosphates	mg/l	02
Phosphore total	mg/l	10
Cyanures	mg/l	0,1
Aluminium	mg/l	03
Cadmium	mg/l	0,2
Fer	mg/l	03
Manganèse	mg/l	01
Mercuré total	mg/l	0,01
Nickel total	mg/l	0,5
Plomb total	mg/l	0,5
Cuivre total	mg/l	0,5
Zinc total	mg/l	03
Huiles et Graisses	mg/l	20
Hydrocarbures totaux	mg/l	10
Indice Phénols	mg/l	0,3
Fluor et composés	mg/l	15
Étain total	mg/l	02
Composés organiques chlorés	mg/l	05
Chrome total	mg/l	0,5
(*) Chrome III +	mg/l	03
(*) Chrome VI +	mg/l	0,1
(*) Solvants organiques	mg/l	20
(*) Chlore actif	mg/l	1,0
(*) PCB	mg/l	0,001
(*) Détergents	mg/l	2
(*) Tensioactifs anioniques	mg/l	10

(*) Valeurs fixées par le Décret exécutif n° 93-160 du 10 Juillet 1993

Annexe 2: Concentrations maximales en éléments traces minéraux recommandées dans les eaux d'irrigation [13]

<i>Elément</i>	<i>Concentration maximum recommandée (µg/L)</i>	<i>Remarques</i>
Al (Aluminium)	500	Peut entraîner une non-productivité si sol acide (pH<5.5) et précipite sur sol basique (pH>7), éliminant toute toxicité
As (Arsenic)	100	Toxicité très variable suivant la culture pratiquée
Be (Beryllium)	100	Toxicité très variable suivant la culture pratiquée
Cd (Cadmium)	10	Toxique pour les haricots, betteraves et les plantes potagères à de faibles concentrations (< 100 µg/L), pouvant s'accumuler dans les plantes et les sols
Co (Cobalt)	50	Toxique pour les plants de tomates, apparemment inactif sur des sols basiques et neutres (pH = 7.0)
Cr (Chrome)	100	N'étant pas reconnu comme indispensable aux végétaux
Cu (Cuivre)	200	Toxique pour beaucoup de plantes à de faibles concentrations (100 - 1 000 µg/L)
F (Fluor)	1 000	Inactivé par des sols basiques ou neutres
Fe (Fer)	5 000	Peut contribuer à l'acidification des sols et la perte en éléments essentiels aux plantes tels que le phosphore ou le molybdène
Li (Lithium)	2 500	Toléré par beaucoup de culture jusqu'à 5 mg/l mais toxique pour les citrons à faible concentration (< 75 µg/L) et est relativement mobile dans les sols
Mn (Manganèse)	200	Toxique pour les cultures sur les sols acides
Mo (Molybdène)	10	Non toxique pour les plantes pour des concentrations « raisonnables »
Ni (Nickel)	200	Toxique pour les plantes à des concentrations comprises entre 500 et 1 000 µg/L mais toxicité pouvant être réduite sur des sols neutres ou basiques
Pb (Plomb)	5 000	Peut inhiber la croissance des végétaux à haute concentration
Se (Sélénium)	20	Toxique pour les plantes à des concentrations (< 25 µg/l) mais indispensable aux animaux à très faible concentration
Sn (Étain) Ti (Titane) W (Tungstène)		Exclus par les plantes
V (Vanadium)	100	Toxique pour les plantes à faible concentration
Zn (Zinc)	2000	Toxique pour les plantes sur une large gamme de concentrations mais toxicité réduite pour des pH > 6.0

Annexe 3: Tableau des normes extrêmes limitées aux eaux d'irrigation [3]

Paramètres	Normes
pH	6.5 à 8.5
Conductivité électrique (ms/cm)	<3*
MES (mg/l)	<70*
DCO (mg/l)	<40*
DBO ₅	<30*
NO ₃ ⁻ (mg/l)	<50*
NO ₂ ⁻ (mg/l)	<1*
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	< 0.94*
HCO ₃ (mg/l)	500**
SO ₄ ²⁺ (mg/l)	400**
CL ⁿ (mg/l)	1065**
Ca ²⁺ (mg/l)	400**
Na ⁺ (mg/l)	920**
Mg ²⁺ (mg/l)	60.75**
Cd ²⁺ (mg/l)	0.01*
Pb ²⁺ (mg/l)	0.05*
Zn ²⁺ (mg/l)	2*
Cr ⁶⁺	0.1*
NH ₄ ⁺ (mg/l)	<2*

Source: *OMS (1989), ** FAO (2003)

Annexe 4: l'arrêté interministériel du 8 Safar 1433 correspondant au 2 Janvier 2012 fixant les spécifications des eaux usées utilisées à des fins d'irrigation : [14]

18

JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 41

25 Chaâbane 1433
15 juillet 2012

MINISTERE DES RESSOURCES EN EAU

Arrêté interministériel du 23 Chaâbane 1432 correspondant au 25 juillet 2011 portant déclaration d'utilité publique l'opération d'expropriation relative au renforcement en eau potable du centre de Sidi Khelifa, wilaya de Mila.

Le ministre de l'intérieur et des collectivités locales,
Le ministre des finances,
Le ministre des ressources en eau,

Vu le décret présidentiel n° 10-149 du 14 Joumada Ethania 1431 correspondant au 28 mai 2010 portant nomination des membres du Gouvernement ;

Vu le décret exécutif n° 93-186 du 27 juillet 1993, complété, déterminant les modalités d'application de la loi n° 91-11 du 27 avril 1991, complétée, fixant les règles relatives à l'expropriation pour cause d'utilité publique notamment son article 10 ;

Vu l'arrêté n° 1130 du 5 août 2007 du wali de la wilaya de Mila portant ouverture de l'enquête préalable à la déclaration d'utilité publique ;

Vu l'arrête n° 1566 du 24 septembre 2007 du wali de la wilaya de Constantine portant ouverture de l'enquête préalable à la déclaration d'utilité publique ;

Vu l'avis favorable de la commission d'enquête préalable de la wilaya de Mila ;

Vu l'avis favorable de la commission d'enquête préalable de la wilaya de Constantine ;

Arrêtent :

Article 1er. — Est déclarée d'utilité publique l'opération d'expropriation relative à la réalisation du projet de renforcement en eau potable du centre de Sidi Khelifa, wilaya de Mila.

Art. 2. — La superficie globale des biens à exproprier devant servir d'assiette à la réalisation de ce projet est de 28 266 m² répartis comme suit :

- commune de Ain Etine (wilaya de Mila) : 2681 m²,
- commune de Sidi Khelifa (wilaya de Mila) : 6244 m²,
- commune de Ibn Ziade (Wilaya de Constantine) : 19341 m².

Art. 3. — Le montant global de l'opération d'expropriation est évalué à trois millions de dinars (3.000.000,00 DA).

Art. 4. — Au titre de la consistance des travaux, la réalisation du projet de renforcement en eau potable du centre de Sidi Khelifa comporte les ouvrages suivants :

- réalisation de deux (2) stations de pompage,
- pose de conduites sur un linéaire de 5 250 ml.

Art. 5. — Le délai maximal imparti pour l'expropriation est fixé à quatre (4) années.

Art. 6. — Le présent arrêté sera publié au *Journal officiel* de la République algérienne démocratique et populaire.

Fait à Alger, le 23 Chaâbane 1432 correspondant au 25 juillet 2011.

Le ministre de l'intérieur
et des collectivités locales
Daho OULD KABLIA

Le ministre
des ressources en eau
Abdelmalek SELLAL

Pour le ministre des finances

Le secrétaire général
Miloud BOUTEBBA

-----★-----

Arrêté interministériel du 8 Safar 1433 correspondant au 2 janvier 2012 fixant les spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation.

Le ministre des ressources en eau,

Le ministre de l'agriculture et du développement rural,

Le ministre de la santé, de la population et de la réforme hospitalière,

Vu le décret présidentiel n° 10-149 du 14 Joumada Ethania 1431 correspondant au 28 mai 2010 portant nomination des membres du Gouvernement ;

Vu le décret exécutif n° 05-464 du 4 Dhou El Kaada 1426 correspondant au 6 décembre 2005 relatif à l'organisation et au fonctionnement de la normalisation ;

Vu le décret exécutif n° 07-149 du 3 Joumada El Oula 1428 correspondant au 20 mai 2007 fixant les modalités de concession d'utilisation des eaux usées épurées à des fins d'irrigation ainsi que le cahier des charges-type y afférent ;

Arrêtent :

Article 1er. — En application des dispositions de l'article 2 du décret exécutif n° 07-149 du 3 Joumada El Oula 1428 correspondant au 20 mai 2007, susvisé, le présent arrêté a pour objet de fixer les spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation conformément à l'annexe jointe.

Art. 2. — le présent arrêté sera publié au *Journal officiel* de la République algérienne démocratique et populaire.

Fait à Alger, le 8 Safar 1433 correspondant au 2 janvier 2012.

Le ministre
des ressources en eau
Abdelmalek SELLAL

Le ministre de l'agriculture
et du développement rural
Rachid BENAÏSSA

Le ministre de la santé, de la population
et de la réforme hospitalière

Djamel OULD ABBES

2. PARAMETRES PHYSICO - CHIMIQUES

PARAMETRES		UNITÉ	CONCENTRATION MAXIMALE ADMISSIBLE
Physiques	pH	—	$6.5 \leq \text{pH} \leq 8.5$
	MES	mg/l	30
	CE	ds/m	3
	Infiltration le SAR = o - 3 CE		0.2
	3 - 6		0.3
	6 - 12	ds/m	0.5
	12 - 20		1.3
	20 - 40		3
Chimiques	DBO5	mg/l	30
	DCO	mg/l	90
	CHLORURE (Cl)	meq/l	10
	AZOTE (NO ₃ - N)	mg/l	30
	Bicarbonate (HCO ₃)	meq/l	8.5
Eléments toxiques (*)	Aluminium	mg/l	20.0
	Arsenic	mg/l	2.0
	Béryllium	mg/l	0.5
	Bore	mg/l	2.0
	Cadmium	mg/l	0.05
	Chrome	mg/l	1.0
	Cobalt	mg/l	5.0
	Cuivre	mg/l	5.0
	Cyanures	mg/l	0.5
	Fluor	mg/l	15.0
	Fer	mg/l	20.0
	Phénols	mg/l	0.002
	Plomb	mg/l	10.0
	Lithium	mg/l	2.5
	Manganèse	mg/l	10.0
	Mercure	mg/l	0.01
	Molybdène	mg/l	0.05
	Nickel	mg/l	2.0
	Sélénium	mg/l	0.02
	Vanadium	mg/l	1.0
Zinc	mg/l	10.0	

(*) : Pour type de sols à texture fine, neutre ou alcalin.

Annexe 5: nombre le plus probable et intervalle de confiance

Nombre de tubes donnant une réaction positive sur			NPP dans 100 mL	Limites de confiance à 95 %	
3 tubes de 10 mL	3 tubes de 1 mL	3 tubes de 0,1 mL		Limite Inférieure	Limite supérieure
0	0	1	3	< 0,5	9
0	1	0	3	< 0,5	13
1	0	0	4	< 0,5	20
1	0	1	7	1	21
1	1	0	7	1	23
1	1	1	11	3	36
1	2	0	11	3	36
2	0	0	9	1	36
2	0	1	14	3	37
2	1	0	15	3	44
2	1	1	20	7	89
2	2	0	21	4	47
2	2	1	28	10	149
3	0	0	23	4	120
3	0	1	39	7	130
3	0	2	64	15	379
3	1	0	43	7	210
3	1	1	75	14	230
3	1	2	120	30	380
3	2	0	93	15	380
3	2	1	150	30	440
3	2	2	210	35	470
3	3	0	240	36	1 300
3	3	1	460	71	2 400
3	3	2	1 100	150	4 800

Annexe 6: Normes microbiologiques de l’OMS sur les eaux usées épurées pour l’irrigation (bouakkaz)

Micro-organismes	Germes totaux	Coliformes totaux	Coliformes fécaux	streptocoques	Clostridium (spore/20 ml)	Salmonelle (UFC/100 ml)
Normes (UFC/100ml)	200	120	100	20	0	0

Annexe 7: Tableaux des pertes de charges de la filtration par le sable N°1

NB : valeur maximale des pertes de charge, valeur minimale des pertes de charges

Sable N° 1, Q=30 l/h, c(bentonite)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-1,1	-0,5	-0,3	-0,5	-3	0,2	0,2	0,2	1	1	1,2	0,8
2	-2	-1,5	-1,1	-1,5	-3,7	-0,9	-0,9	-0,6	0	0	0,8	-0,1
3	-2,6	-2,2	-2,1	-2,2	-4,5	-1,6	-1,6	-1,5	-0,9	-0,9	-0,6	-1
4	-3	-2,5	-2,4	-2,5	-5	-2	-2	-1,9	-1	-1	-0,9	-1,2
5	-3,2	-2,9	-2,6	-2,9	-5,2	-2,2	-2,2	-2,2	-1,4	-1,4	-1,2	-1,5
6	-3,5	-3,1	-3	-3,1	-5,5	-2,5	-2,5	-2,5	-1,6	-1,6	-1,5	-1,9
7	-3,7	-3,5	-3,3	-3,5	-5,7	-2,7	-2,7	-2,6	-2	-2	-1,9	-2,1
8	-3,9	-3,6	-3,5	-3,6	-6	-3,1	-3,1	-3	-2,4	-2,4	-2,1	-2,4
9	-4	-3,7	-3,5	-3,7	-6,4	-3,5	-3,5	-3,4	-2,6	-2,6	-2,5	-2,8
10	-5	-4,6	-4,5	-4,6	-6,7	-3,9	-3,9	-3,8	-3	-3	-2,9	-3,1
11	-6	-6,5	-6	-6,5	-8,2	-5,6	-5,6	-5,4	-3,6	-3,6	-3,5	-3,7
12	-11	-11,5	-11,4	-11,5	-13,4	-10,6	-10,6	-10,5	-10	-10	-9,9	-10,1

Sable N° 1, Q=50 l/h, c(bentonite)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-16,4	-16,1	-2,6	-16,1	-3,1	-2,5	-1,6	-2,5	1	1	1,9	1,2
2	-18,5	-18,2	-4,6	-18,2	-5,5	-4,9	-4,1	-4,9	-1,5	-1,5	-0,6	-1,4
3	-20,2	-20	-6,5	-20	-7,4	-6,9	-6,1	-6,9	-3,5	-3,5	-3	-3,4
4	-21,5	-21	-7,5	-21	-8,5	-8	-7,2	-8	-4,5	-4,5	-4	-4,4
5	-22,2	-22	-8,4	-22	-9,4	-8,9	-8,1	-8,9	-5,3	-5,3	-4,9	-5,3
6	-23	-22,8	-9,2	-22,8	-10,2	-9,9	-9	-9,9	-6	-6	-5,7	-6
7	-24,2	-23,9	-10,1	-23,9	-11	-10,7	-10	-10,7	-7,1	-7,1	-6,6	-7,1
8	-24,5	-24,4	-10,8	-24,4	-12	-11,5	-10,7	-11,5	-7,8	-7,8	-7,4	-7,8
9	/	/	-11,8	/	-12,8	-12,5	-11,6	-12,5	-8,6	-8,6	-8,2	-8,6
10	/	/	-12,8	/	-13,7	-13,5	-12,6	-13,5	-9,6	-9,6	-9,5	-9,6
11	/	/	-16,7	/	-18	-17,6	-16,9	-17,6	-13,6	-13,6	-13,5	-13,6
12	/	/	-25,6	/	-27,1	-26,9	-25,9	-26,9	-22,7	-22,7	-22,6	-22,7

Sable N° 1, Q=120 l/h, c(bentonite)=0.3 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-5,5	-5	-1	-5	1,7	2,4	3	2,4	-7,4	-7,6	1,2	-8
2	-13,5	-13	-9	-13	-6,4	-6	-5,1	-6	-14,8	-15	-7,5	-16,4
3	-21,5	-20,6	-16,7	-20,6	-14	-13,6	-13	-13,6	-24	-24,2	-15,9	-24,5
4	-25	-24,5	-20,5	-24,5	-18,1	-17,9	-17,1	-17,9	/	/	-20,4	/
5	/	/	-24,1	/	-21,7	-21,2	-20,7	-21,2	/	/	/	/
6	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
7	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
8	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
9	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
11	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Sable N° 1, Q=130 l/h, c(bentonite)=0.3 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-5,2	-4,4	-4,4	-6	-11,8	-10,2	-0,5	-10,2	0,6	5,1	7	0,7
2	-14,3	-13,6	-13,6	-15,5	-22	-20,5	-11,1	-20,5	-8,5	-4,1	-3,6	-8,6
3	-22	-21,5	-21,5	-23,6	/	/	-19,5	/	-16	-11,4	-11	-16
4	/	/	/	/	/	/	/	/	-19,9	-15,5	-15,2	-20
5	/	/	/	/	/	/	/	/	-23,3	-19	-18,5	-23,4
6	/	/	/	/	/	/	/	/	-26,2	-22	-21,8	/
7	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-23,5	-23,4	/
8	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
9	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
11	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Sable N° 1, Q=30 l/h, c(bentonite)=0.5 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-4	-4,5	-4	-4,5	-3,6	-2,4	-1,7	-4,5	-1,5	-1,5	-1	-1,2
2	-5,9	-6,4	-5,9	-6,4	-5,5	-4,5	-4	-5,4	-3,4	-3,4	-3	-3
3	-7,7	-8	-7,7	-8	-7,1	-6,4	-5,9	-7	-5	-5	-4,7	-5
4	-8,4	-8,7	-8,4	-8,7	-8	-7,1	-6,9	-9,5	-5,9	-5,9	-5,5	-5,9
5	-9	-9,4	-9	-9,4	-8,7	-7,9	-7,5	-10,1	-6,8	-6,8	-6,4	-6,6
6	-9,8	-10	-9,8	-10	-9,5	-8,6	-8,4	-10,8	-7,5	-7,5	-7	-7,3
7	-10,5	-10,6	-10,5	-10,6	-10	-9,4	-9,1	-11,6	-8,3	-8,3	-8	-8,2
8	-11	-11,2	-11	-11,2	-10,6	-10	-9,7	-12,2	-8,9	-8,9	-8,5	-8,7
9	-11,6	-12	-11,6	-12	-11,3	-10,9	-10,5	-13	-9,5	-9,5	-9,3	-9,5
10	-12,4	-12,6	-12,4	-12,6	-12	-11,5	-11,3	-13,7	-10,3	-10,3	-10	-10,2
11	-15,3	-15,4	-15,3	-15,4	-15	-14,5	-14,4	-16	-13,3	-13,3	-13	-13,2
12	-18,8	-18,9	-18,8	-18,9	-18,2	-18,1	-18	-20,1	-17,4	-17,4	-17,2	-17,4

Sable N° 1, Q=30 l/h, c(chaux)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-1,4	-0,5	-0,5	-0,5	-5	-4,5	-0,7	-1,5	-1,9	-1,5	-1,4	-2
2	-2,1	-1,5	-1,5	-1,5	-5,8	-5,3	-1,5	-2,2	-2,8	-2,5	-2,4	-2,9
3	-2,9	-2,2	-2,2	-2,2	-6,7	-6,1	-2,5	-3,2	-3,5	-3,5	-3,2	-3,6
4	-3,5	-2,6	-2,6	-2,6	-7,1	-6,5	-2,7	-3,6	-4	-3,7	-3,5	-4,1
5	-3,7	-3	-3	-3	-7,5	-7	-3	-4	-4,4	-4,2	-4	-4,5
6	-4	-3,5	-3,5	-3,5	-8	-7,4	-3,5	-4,5	-4,7	-4,5	-4,4	-4,8
7	-4,5	-3,8	-3,8	-3,8	-8,3	-7,9	-4	-4,9	-5,2	-5	-4,8	-5,3
8	-4,9	-4,2	-4,2	-4,2	-8,7	-8,2	-4,5	-5,3	-5,5	-5,4	-5,2	-5,6
9	-5,4	-4,6	-4,6	-4,6	-9,2	-8,6	-4,8	-6,1	-6	-5,8	-5,5	-6,1
10	-5,7	-5	-5	-5	-9,6	-9,1	-5,2	-7,9	-6,5	-6,2	-6,1	-6,6
11	-7,5	-6,5	-6,5	-6,5	-11,3	-10,6	-6,7	-8,6	-8,1	-8	-7,9	-8,2
12	-10,5	-9,9	-9,9	-9,9	-14,4	-13,9	-10	-11,1	-11,5	-11,4	-11,3	-11,6

Sable N° 1, Q=50 l/h, c(chaux)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-5,1	-4,7	-4,7	-4,8	-4,7	-4,5	-4,5	-4,7	-0,7	-0,5	-0,5	-0,6
2	-6,7	-6,4	-6,4	-6,5	-6,5	-6,3	-6,3	-6,5	-2,5	-2,1	-2,1	-2,3
3	-8,3	-8	-8	-8,1	-8	-7,7	-7,7	-8	-4	-3,7	-3,7	-3,9
4	-9	-8,6	-8,6	-8,7	-8,6	-8,4	-8,4	-8,6	-4,6	-4,4	-4,4	-4,5
5	-9,5	-9,4	-9,4	-9,5	-9,1	-9	-9	-9,1	-5,1	-5	-5	-5
6	-10,2	-10	-10	-10,1	-10	-10	-10	-10	-5,9	-5,6	-5,6	-5,8
7	-10,9	-10,7	-10,7	-10,8	-10,5	-10,4	-10,4	-10,5	-6,5	-6,3	-6,3	-6,4
8	-11,7	-11,5	-11,5	-11,6	-11,2	-11	-11	-11,2	-7,3	-7	-7	-7,2
9	-12,5	-12,3	-12,3	-12,3	-11,9	-11,8	-11,8	-11,9	-8	-7,7	-7,7	-7,9
10	-13,1	-13	-13	-13,1	-12,6	-12,5	-12,5	-12,6	-8,6	-8,5	-8,5	-8,5
11	-15,5	-15,4	-15,4	-15,5	-15,3	-15,3	-15,3	-15,3	-11,2	-11	-11	-11,1
12	-20	-19,9	-19,9	-20	-20,6	-20,5	-20,5	-20,6	-12,9	-12,7	-12,7	-12,8

Sable N° 1, Q=80 l/h, c(chaux)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-4	-4	-3,5	-9,9	1	1	1,5	-4,8	-1,3	-1,3	-1,2	-1,3
2	-6,5	-6,5	-6,1	-12,5	-1,6	-1,6	-1,2	-7,5	-4,2	-4,2	-4,1	-4,2
3	-8,6	-8,6	-8,3	-14,6	-3,6	-3,6	-3,3	-9,6	-6,6	-6,6	-6,5	-6,6
4	-9,5	-9,5	-9,1	-15,5	-4,6	-4,6	-4,4	-10,5	-7,6	-7,6	-7,5	-7,6
5	-10,5	-10,5	-10	-16,3	-5,5	-5,5	-5,3	-11,5	-8,5	-8,5	-8,4	-8,5
6	-11,4	-11,4	-11	-17,3	-6,4	-6,4	-6,1	-12,5	-9,5	-9,5	-9,4	-9,5
7	-12,2	-12,2	-11,9	-18	-7,3	-7,3	-7,1	-13,4	-10,5	-10,5	-10,4	-10,5
8	-13	-13	-12,8	-19	-8,4	-8,4	-8,2	-14,2	-11,6	-11,6	-11,5	-11,6
9	-14	-14	-13,7	-20	-9,4	-9,4	-9,1	-15,4	-12,6	-12,6	-12,5	-12,6
10	-15	-15	-14,7	-21	-10,4	-10,4	-10,3	-16,4	-14	-14	-13,9	-14
11	-16,5	-16,5	-16,4	-23	-14,4	-14,4	-14,4	-20,5	-18,5	-18,5	-18,4	-18,5
12	-25,5	-25,5	-25,5	/	-15,4	-15,4	-15,3	-21,8	-19,5	-19,5	-19,4	-19,5

Sable N° 1, Q=120 l/h, c(chaux)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-5	-5	-4,4	-6,4	-1,5	-1,5	-0,6	-1,7	-4,8	-3	-0,2	-3,1
2	-9,3	-9,3	-8,7	-10,5	-6,4	-6,4	-5,6	-6,7	-9,5	-7,8	-5,2	-8
3	-13,5	-13,5	-13	-14,9	-11,1	-11,1	-10,5	-11,5	-13,8	-12	-9,5	-11,7
4	-15,3	-15,3	-14,9	-16,7	-13,4	-13,4	-13	-13,7	-15,8	-14,1	-11,6	-14,3
5	-17,3	-17,3	-17	-18,9	-15,4	-15,4	-15	-16	-17,4	-15,7	-13,4	-16
6	-19	-19	-18,7	-20,5	-17,3	-17,3	-17	-18	-18,7	-17,4	-14,5	-17
7	-20,9	-20,9	-20,7	-22,5	-19	-19	-18,8	-19,8	-21,3	-19,7	-17,3	-19,9
8	-22,9	-22,9	-22,5	-25,5	-20,9	-20,9	-20,5	-20,4	-23,1	-21,5	-19,3	-21,7
9	/	/	/	/	/	/	/	/	-23,2	-21,6	-21,2	-23,5
10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
11	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Sable N° 1, Q=150 l/h, c(chaux)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-5	-4	-3,6	-4	-1,9	-1,5	3	-10	-3,2	-2,8	-3,2	-2,9
2	-12,3	-11,5	-11,1	-11,5	-9	-8,8	-4,5	-17,4	-10,4	-10,1	-10,4	-10,3
3	-18,7	-18	-18	-18	-16	-15,6	-11,6	-24,2	-16,8	-16,6	-16,8	-16,7
4	-21,9	-21,4	-21,4	-21,4	-16,7	-16,5	-12,5	/	-19,9	-19,7	-19,9	-20
5	-24,6	-24,2	-24,2	-24,2	-20	-19,7	-16	/	-22,7	-22,5	-22,7	-22,5
6	/	/	/	/	-22,6	-22,5	-18,6	/	/	/	/	/
7	/	/	/	/	-23,5	-23,4	-19,9	/	/	/	/	/
8	/	/	/	/	/	/	-21	/	/	/	/	/
9	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
11	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Sable N° 1, Q=30 l/h, c(chaux)=0.3 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-3,7	-2,8	-2,8	-6,3	-1	-0,3	1,8	-11,5	0,9	0,9	1	0,9
2	-5,1	-4,2	-4,2	-7,6	-2,5	-2	-1	-13	-0,6	-0,6	-0,5	-0,6
3	-6,4	-5,7	-5,7	-8,9	-3,8	-3,4	-2,6	-14,3	-1,9	-1,9	-1,8	-1,9
4	-6,8	-6,1	-6,1	-9,4	-4,3	-3,9	-3,1	-14,8	-2,4	-2,4	-2,3	-2,4
5	-7,3	-6,7	-6,7	-9,8	-4,8	-4,5	-3,7	-15,4	-2,8	-2,8	-2,7	-2,8
6	-7,7	-7,1	-7,1	-10,3	-5,4	-5	-4,2	-15,9	-3,4	-3,4	-3,3	-3,4
7	-8,1	-7,5	-7,5	-10,7	-5,7	-5,2	-4,7	-16,4	-3,8	-3,8	-3,7	-3,8
8	-8,6	-8,1	-8,1	-11,2	-6,4	-6	-5,3	-16,7	-4,3	-4,3	-4,2	-4,3
9	-9	-8,6	-8,6	-11,7	-6,4	-6,5	-5,9	-17,5	-4,7	-4,7	-4,6	-4,7
10	-9,5	-9,1	-9,1	-12,3	-6,9	-6,9	-6,5	-17,8	-5,4	-5,4	-5,3	-5,4
11	-11,2	-11	-11	-13,7	-9	-8,8	-8,4	-19,5	-6,9	-6,9	-6,8	-6,9
12	/	/	/	/	-26,6	-26,4	-26	/	-24,1	-24,1	-24	-24,1

Sable N° 1, Q=150 l/h, c(chaux)=0.3 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-11,4	-8	-8	-11	-11	-11	-10,4	-12,5	-7,4	-6,5	-6	-6,8
2	-18,9	-15,9	-15,9	-18,8	-18,9	-18,9	-18,5	-20,5	-15	-14,1	-13,9	-14,5
3	-25,5	-22,3	-22,3	-25,1	/	/	/	/	-22	-21,3	-21	-21,7
4	/	/	/	/	/	/	/	/	-25,2	-24	-24	-24,7
5	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
6	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
7	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
8	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
9	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
11	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Sable N° 1, Q=30 l/h, c(chaux)=0.5 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-3	-2,6	-2,4	-2,5	-4	-4,2	0,7	-4,2	-5	-4,6	2,3	-5
2	-4,5	-4	-3,8	-4	-5,5	-5,7	-0,9	-5,7	-6,5	-6,2	-1	-6,5
3	-5,6	-5,3	-5	-5	-6,9	-7,1	-2,1	-7,1	-8	-7,6	-3,1	-8
4	-6,1	-5,9	-5,5	-5,6	-7,5	-7,7	-2,6	-7,7	-8,7	-8,5	-5,1	-8,7
5	-6,7	-6,2	-6	-6	-8	-8,1	-3,1	-8,1	-9,4	-9	-6	-9,4
6	-7,1	-6,9	-6,7	-6,8	-8,5	-8,7	-3,6	-8,7	-9,9	-9,6	-7,1	-9,9
7	-7,7	-7,3	-7,1	-6,9	-9	-9,2	-4,1	-9,2	-10,4	-9,9	-8,1	-10,4
8	-8,4	-7,8	-7,6	-7,5	-9,6	-9,7	-4,6	-9,7	-11	-10,6	-9	-11
9	-8,8	-8,3	-8,1	-8	-10	-10,2	-5,2	-10,2	-11,5	-11,3	-10	-11,5
10	-9,4	-8,8	-8,7	-8,4	-10,7	-10,8	-5,6	-10,8	-12	-11,9	-10,2	-12
11	-11,2	-10,6	-10,5	-10,2	-12,5	-12,9	-7,5	-12,9	-14,1	-13,9	-11,9	-14,1
12	-14,9	-14,4	-14,3	-13,7	-16,1	-16,4	-11,1	-16,4	-16,8	-16,7	-18,7	-16,8

Sable N° 1, Q=50 l/h, c(chaux)=0.5 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-6	-6	-5,7	-5,9	-1,6	-1,6	-1,6	-9,8	1,4	1,6	-4,5	-3,5
2	-9,1	-9,1	-9	-9	-4,6	-4,6	-4,6	-12,9	-1,6	-1,5	-6,1	-6,4
3	-11,9	-11,9	-11,5	-11,6	-7,1	-7,1	-7,1	-15,3	-4,1	-4	-7,5	-8,8
4	-13,2	-13,2	-13	-13	-8,5	-8,5	-8,5	-16,5	-5,5	-5,4	-8,4	-10
5	-14,1	-14,1	-14	-14	-9,4	-9,4	-9,4	-17,5	-6,5	-6,4	-8,9	-11
6	-15,4	-15,4	-15	-15,1	-10,2	-10,2	-10,2	-18,4	-7,5	-7,4	-9,5	-11,9
7	-16,2	-16,2	-16	-16	-11,1	-11,1	-11,1	-19,5	-8,5	-8,4	-9,8	-12,9
8	-17,4	-17,4	-17	-17,1	-12,2	-12,2	-12,2	-20,4	-9,5	-9,4	-10,5	-13,9
9	-18,5	-18,5	-18,4	-18,1	-13,1	-13,1	-13,1	/	-10,4	-10,3	-11,2	-14,9
10	-19,3	-19,3	-19,1	-19,2	-14,1	-14,1	-14,1	/	-11,5	-10,4	-11,8	-15,5
11	-21,9	-21,9	-21,9	-21,5	-17,6	-17,6	-17,6	/	-13	-11,9	-13,8	-19
12	/	/	/	/	-22,5	-22,5	-22,5	/	-19	-18,9	-16,6	-22,2

Annexe 8: Tableaux des pertes de charges de la filtration par le sable N°2

Sable N° 2, Q=30 l/h, c(bentonite)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-4.4	-3.6	-3.6	-3.6	-0,5	0	2	-1,4	-5,1	1,6	2,5	-9,8
2	-4.5	-4.5	-4.5	-4.5	-1,5	-1	1	-2,5	-6	0,5	1,3	-11,1
3	-5.7	-5	-5	-5	-2,1	-1,5	0,5	-3	-6,3	-0,2	0,6	-11,6
4	-6	-5.3	-5.2	-5.2	-2,4	-1,9	0	-3,3	-6,8	-0,5	0,4	-12
5	-6.1	-5.5	-5.5	-5.5	-2,6	-2	-0,1	-3,5	-7,4	-0,6	0,1	-12,1
6	-6.4	-5.6	-5.6	-5.6	-3	-2,2	-0,2	-3,7	-7,6	-0,8	0	-12,4
7	-6.5	-5.9	-5.8	-5.8	-3,1	-2,4	-0,3	-3,9	-7,8	-1	-0,4	-12,6
8	-6.7	-6	-6	-6	-3,3	-2,5	-0,4	-4,1	-7,9	-1,1	-0,5	-12,7
9	-7	-6.2	-6.1	-6.1	-3,5	-2,6	-0,7	-4,3	-8,2	-1,3	-0,6	-12,9
10	-7.1	-6.4	-6.2	-6.2	-3,6	-3	-1	-4,5	-8,3	-1,6	-0,8	-13
11	-7.6	-7	-7	-7	-4,2	-4	-1,5	-5	-9	-2,3	-1,5	-13,7
12	-10	-9,5	-9.4	-9.4	-6,3	-6,8	-4	-7,5	-11,5	-4,5	-4	-16,1

Sable N° 2, Q=50 l/h, c(bentonite)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-5,8	-3,3	-2,4	-5	-4,5	-4,6	-3	-4,5	-2,4	-2,6	-0,5	-12
2	-7,8	-5,5	-4,4	-7	-6,9	-6,9	-5,5	-7	-4,8	-5,1	-3	-14,1
3	-8,9	-6,5	-5,6	-8	-8	-8	-6,5	-8	-6	-6,2	-4,2	-15,2
4	-9,4	-7	-6	-8,4	-8,5	-8,4	-7	-8,5	-6,5	-6,6	-4,7	-15,5
5	-9,8	-7,3	-6,5	-8,7	-8,7	-8,7	-7,2	-8,8	-7,1	-7	-5	-16
6	-10	-7,6	-6,8	-9	-9	-9	-7,5	-9	-7,7	-7,5	-5,4	-16,3
7	-10,5	-8	-7,1	-9,5	-9,5	-9,5	-8	-9,5	-8,2	-7,7	-5,7	-16,5
8	-10,8	-8,4	-7,4	-9,8	-9,7	-9,7	-8,4	-9,7	-8,5	-8	-6	-16,9
9	-11,2	-8,6	-7,7	-10	-10	-10	-8,5	-10,1	-9,3	-8,4	-6,4	-17,1
10	-11,5	-9	-8	-10,3	-10,4	-10,2	-9	-10,4	-9,5	-8,6	-6,6	-17,5
11	-13	-10,3	-9,3	-11,5	-11,5	-11,5	-10	-11,5	-11	-9,8	-8	-18,5
12	-16,4	-13,5	-12,5	-14,7	-14,9	-14,9	-13,4	-14,9	-14,3	-13	-11	-21,6

Sable N° 2, Q=80 l/h, c(bentonite)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-7,5	-7,4	-7,2	-6,5	-12,5	-7,5	-7,3	-7	-7,6	-6,1	-4,5	-16,5
2	-11,8	-11,5	-11,4	-11	-15,6	-12	-11,7	-11,8	-12,4	-11,1	-9,6	-21,8
3	-13,6	-13,3	-13,1	-11,9	-18,5	-13,5	-13,6	-13,6	-14,3	-13,1	-11,6	-24
4	-14,4	-14	-14	-12,1	-18,9	-14,5	-14,5	-14,5	-15,2	-14,1	-12,5	-24,9
5	-15	-14,6	-14,5	-12,6	-20	-15	-15,1	-15,2	-15,8	-14,8	-13,2	-25,5
6	-15,5	-15,2	-15	-14,8	-20,5	-15,6	-15,6	-15,7	-16,4	-15,5	-13,8	-26
7	-16,1	-15,6	-15,6	-15,4	-21,1	-16,2	-16,1	-16,4	-16,9	-16	-14,5	/
8	-16,5	-16,2	-16	-16	-21,6	-16,6	-16,6	-16,8	-17,5	-16,5	-15	/
9	-16,9	-16,6	-16,5	-16,5	-22,1	-17,2	-17,2	-17,5	-18	-17	-15,6	/

10	-17,5	-17,1	-17	-17	-22,5	-17,6	-17,6	-17,9	-18,4	-17,4	-16	/
11	-19,5	-19,2	-19	-18,9	-24,5	-19,7	-19,6	-19,9	-20,4	-19,5	-18	/
12	-23,7	-23,5	-23,5	-23,1	/	-24	-24	-24,2	-24,5	-24	-22,5	/

Sable N° 2, Q=120 l/h, c(bentonite)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-5,5	-3,6	-1,2	-10,6	-4	-3,8	1,5	-1,2	-2,4	-2,4	-2,3	-6,1
2	-10,3	-8,3	-3,4	-15,4	-9	-7,5	-3,5	-5,6	-7,3	-7,3	-7,2	-11,5
3	-13	-11	-3,7	-18,5	-12,2	-10,9	-6,9	-9	-10,6	-10,6	-10,5	-14,9
4	-14,1	-12	-4,9	-19,7	-13,5	-12,3	-8,3	-10,3	-12	-12	-11,8	-16,2
5	-15,2	-13,2	-6	-21	-14,5	-13,2	-9,3	-11,6	-13,1	-13,1	-12,8	-17,3
6	-16,4	-14,4	-7,1	-22	-16,6	-14,5	-10,5	-12,6	-14,3	-14,3	-14	-18,5
7	-17,7	-15,5	-8,3	-23,3	-17,2	-16	-12	-14	-15,5	-15,5	-15,3	-19,9
8	-18,9	-16,6	-9,4	-24,4	-18,2	-17	-13	-15	-16,7	-16,7	-16,5	-21,1
9	-20,1	-18	-10,5	-25,5	-19,5	-18,3	-14,5	-16,3	-19	-19	-17,8	-22,3
10	-21,3	-19,3	-11,9	-27	-20,6	-19,5	-15,6	-17,5	-19,3	-19,3	-19	-23,5
11	-25,5	-23,5	-16,2	/	-25,3	-24	-20,2	-22	-23,7	-23,7	-23,5	-28
12	/	/	-21	/	/	/	-25,4	-26,6	/	/	/	/

Sable N° 2, Q=150 l/h, c(bentonite)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-19,5	-9,5	-7,2	-10,5	-3	-3	-1	-4	-18,9	-13,6	-7,2	-13,5
2	-26,9	-16,9	-14,3	-17,6	-8	-8	-8	-11	-27	-21,5	-15,2	-21,6
3	/	-21,9	-19	-22,4	-14,5	-14,5	-12,5	-15,6	/	-26,3	-20,1	-27,2
4	/	-23,5	-20,9	-24	-16,5	-16,5	-14,6	-17,6	/	/	-22,2	/
5	/	-25,5	-22,4	-25,6	-18,4	-18,4	-16,5	-19,6	/	/	-24,5	/
6	/	-27,1	-24	-27,4	-19,5	-19,5	-17,7	-21,5	/	/	-26,5	/
7	/	/	-25,6	/	-20,2	-20,2	-18,4	-23,5	/	/	/	/
8	/	/	-27,5	/	-22,9	-22,9	-21,3	-25,2	/	/	/	/
9	/	/	/	/	-25,5	-25,5	-24	-26,8	/	/	/	/
10	/	/	/	/	-26,3	-26,3	-24,5	/	/	/	/	/
11	/	/	/	/	-28	-28	-26,5	/	/	/	/	/
12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Sable N° 2, Q=30 l/h, c(bentonite)=0.3 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-12	-12,5	-4,6	-12,1	-7	-6,5	-0,5	-2	-7,5	-6	-0,6	-6
2	-13,5	-14	-6,2	-13,6	-8,5	-8	-2,2	-3,5	-9	-7,5	-2,2	-7,5
3	-14,2	-14,6	-7	-14,6	-9,5	-9,2	-3	-4,2	-9,5	-8,2	-3	-8,2
4	-14,5	-15	-7,3	-14,6	-9,7	-9,4	-3,5	-4,5	-9,7	-8,2	-3	-8,2
5	-15	-15,6	-7,5	-15,1	-10	-9,8	-3,6	-5	-10,1	-9	-3,5	-9
6	-15,2	-15,7	-8	-15,6	-10,2	-10	-4	-5,2	-10,5	-9,2	-3,7	-9,2
7	-15,6	-16	-8,2	-16	-10,5	-10,3	-4,5	-5,5	-10,7	-9,5	-4	-9,5
8	-16	-16,4	-8,5	-16,4	-11	-10,6	-4,6	-5,7	-11	-9,9	-4,3	-9,9
9	-16,5	-16,8	-9	-16,4	-11,3	-11	-5	-6	-11,4	-10,1	-4,6	-10,1

10	-17	-17,2	-9,3	-16,6	-11,6	-11,5	-5,3	-6,3	-11,5	-10,5	-5	-10,5
11	-18	-18,3	-10,5	-17,9	-13	-12,5	-6,5	-7,5	-12,7	-11,5	-6,4	-11,5
12	-22	-22,2	-14,2	-21,5	-16,8	-16,5	-10,2	-11,2	-16,5	-15,2	-9,8	-15,2

Sable N° 2, Q=50 l/h, c(bentonite)=0.3 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-4,3	-4	-4	-4	-10	-9,4	-3,5	-2,8	-10,4	-2,9	-2,5	-4,4
2	-7	-6,5	-6,5	-6,5	-12,5	-11,6	-5,9	-5,4	-12,5	-5,5	-5,3	-7,8
3	-8	-7,7	-7,7	-7,7	-13,5	-13	-7	-6,5	-14,3	-6,9	-6,5	-9,2
4	-8,6	-8,4	-8,4	-8,4	-14	-13,5	-7,5	-7	-14,5	-7,5	-7,2	-9,9
5	-9	-8,9	-8,9	-8,9	-14,5	-14	-8	-7,5	-15,4	-8	-7,8	-10,5
6	-9,5	-9,4	-9,4	-9,4	-15	-14,5	-8,5	-8	-15,9	-8,5	-8,2	-11
7	-10	-9,9	-9,9	-9,9	-15,5	-15	-9	-8,5	-16,3	-9	-8,8	-11,5
8	-10,5	-10,4	-10,4	-10,4	-16	-15,5	-9,5	-9	-16,7	-9,5	-9,3	-12,2
9	-11	-10,8	-10,8	-10,8	-16,6	-16	-10	-9,5	-17,4	-10	-9,8	-12,8
10	-11,6	-11,4	-11,4	-11,4	-17	-16,5	-10,5	-10	-17,9	-10,5	-10,3	-13,5
11	-13,5	-13,4	-13,4	-13,4	-19	-18,5	-12,4	-11,9	-19,9	-12,5	-12,4	-15,5
12	-18	-17,8	-17,8	-17,8	-23	-22,5	-16,4	-16	-23,5	-16,5	-16,3	-19,6

Sable N° 2, Q=80 l/h, c(bentonite)=0.3 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-5,5	-5,5	-2,2	-7,5	-13,4	-13,2	0	-7,4	-4,8	-4,8	-1,5	-5
2	-10,2	-10,2	-4,3	-12,5	-18,5	-18,3	-5,2	-12,5	-10,1	-10,1	-7	-11,1
3	-12,6	-12,6	-4,5	-15	-21,1	-20,8	-7,9	-15	-12,6	-12,6	-9,5	-13,8
4	-13,7	-13,7	-5,1	-16	-22,3	-22	-9	-16,4	-14	-14	-10,9	-15,2
5	-14,6	-14,6	-7	-17	-23,3	-23	-10	-17,3	-15	-15	-11,9	-16,4
6	-15,7	-15,7	-8	-18	-24,3	-24,1	-11	-18,3	-16	-16	-13	-17,5
7	-16,9	-16,9	-9	-19	-25,4	-25,3	-12	-19,4	-17	-17	-14,3	-18,7
8	-17,6	-17,6	-9,8	-19,9	-26	-26	-13	-20,1	-17,8	-17,8	-15,1	-19,6
9	-18,5	-18,5	-11	-20,6	-27,1	-27	-14	-21,1	-18,6	-18,6	-16,5	-20,5
10	-19,5	-19,5	-11,9	-21,5	/	-28	-15	-22	-19,5	-19,5	-17,5	-21,5
11	-22,9	-22,9	-15,1	-25,1	/	/	-15,2	-25	-23,2	-23,2	-21,4	-25,4
12	/	/	/	/	/	/	-24	/	/	/	-27,5	/

Sable N° 2, Q=120 l/h, c(bentonite)=0.3 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-5,4	-5,4	-3,8	-13,2	-5,7	-5,3	-5	-6,1	1	1	1,5	-7,5
2	-13,5	-13,5	-12	-21,5	-15,4	-15,1	-15	-16,1	-9	-9	-8,6	-19,1
3	-18,1	-18,1	-17	-26,5	-19,7	-19,5	-19,5	-21,5	-14,2	-14,2	-14	-25
4	-20,5	-20,5	-19,5	/	-23,4	-23,1	-23	-24	-16,6	-16,6	-16,5	-27,5
5	-22,4	-22,4	-21,5	/	-25,6	-25,4	-25,4	-25,5	-18,6	-18,6	-18,5	/
6	-24,5	-24,5	-23,5	/	-27,7	-27,4	-27,5	/	-20,7	-20,7	-20,5	/
7	-27,4	-27,4	-25,9	/	/	/	/	/	-22,7	-22,7	-22,5	/
8	/	/	-27,5	/	/	/	/	/	-24,8	-24,8	-24,6	/
9	/	/	/	/	/	/	/	/	-26,7	-26,7	-26,5	/

10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
11	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Sable N° 2, Q=130 l/h, c(bentonite)=0.3 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-11	-11	-5,3	-10,5	-11,1	-10,5	-8,8	-12	-10,5	-0,4	0	-18,1
2	-24,6	-24,6	-20,1	-24,5	-26,5	-25,5	-24	-27	-25,5	-16,1	-15,9	/
3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-23,2	-22,4	/
4	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-25,6	-25,4	/
5	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
6	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
7	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
8	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
9	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
11	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Sable N° 2, Q=30 l/h, c(bentonite)=0.5 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-13	-2,5	-2,5	-3	-16,1	-14,5	-7	-14,5	-11,5	-2	-1,5	-2
2	-13,5	-3,5	-3,5	-3,6	-17,1	-15,5	-8	-15,5	-12,5	-3,2	-2,8	-3,2
3	-14,2	-4	-4	-4,6	-18	-16,5	-9	-16,5	-13,5	-4	-3,6	-4
4	-14,5	-4,4	-4,4	-4,6	-18,2	-16,7	-9,2	-16,7	-13,6	-4,4	-4	-4,4
5	-14,6	-4,6	-4,6	-5	-18,5	-17	-9,5	-17	-14	-4,6	-4,4	-4,6
6	-15	-5	-5	-5,2	-18,6	-17,5	-10	-17,5	-14,1	-5	-4,5	-5
7	-15,1	-5,1	-5,1	-5,5	-19	-17,6	-10,4	-17,6	-14,5	-5,4	-4,9	-5,4
8	-15,5	-5,5	-5,5	-6	-19,4	-18	-10,5	-18	-14,6	-5,5	-5	-5,5
9	-15,6	-5,7	-5,7	-6,1	-19,5	-18,3	-10,9	-18,3	-15	-5,9	-5,5	-5,9
10	-15,9	-6	-6	-6,5	-19,6	-18,5	-11	-18,5	-15,2	-6	-5,6	-6
11	-16,5	-7	-7	-7,2	-20,5	-19,5	-12	-19,5	-16	-6,9	-6	-6,9
12	-19	-9,5	-9,5	-9,7	-22,5	-21,6	-14	-21,6	-18	-9	-8,6	-9

Sable N° 2, Q=50 l/h, c(bentonite)=0.5 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-21,1	-5,4	-5,4	-5,5	-14,2	-2	-2	-3,2	-4,5	-3,4	-2,1	-3,4
2	-22,7	-7	-7	-7,2	-16	-4	-4	-5,3	-6,4	-5,4	-4,7	-5,4
3	-24	-8,5	-8,5	-8,6	-17,3	-5,5	-5,5	-7	-7,5	-6,6	-6,5	-6,6
4	-24,5	-9	-9	-8,6	-18	-6,3	-6,3	-7,5	-8,1	-7,4	-7	-7,4
5	-25,2	-9,5	-9,5	-10	-18,5	-7	-7	-8	-8,6	-7,8	-7,7	-7,8
6	-25,7	-9,7	-9,7	-10,5	-19,5	-7,5	-7,5	-8,6	-9,2	-8,5	-8,5	-8,5
7	-26,1	-10,1	-10,1	-11	-20,4	-8	-8	-9,5	-9,7	-8,9	-9	-8,9
8	-26,6	-10,5	-10,5	-11,5	-20,9	-8,5	-8,5	-9,8	-10	-9,4	-9,6	-9,4
9	-27,1	-10,6	-10,6	-12	-21,4	-9	-9	-10,2	-10,5	-9,7	-10	-9,7

10	-27,5	-10,7	-10,7	-12,5	-21,9	-9,3	-9,3	-10,6	-10,9	-10,2	-10,5	-10,2
11	/	-12,5	-12,5	-14	-23,5	-11	-11	-12,2	-12,2	-11,5	-12	-11,5
12	/	-15,4	-15,4	-17,5	-26,5	-14,1	-14,1	-15,3	-15	-14,5	-15,5	-14,5

Sable N° 2, Q=80 l/h, c(bentonite)=0.5 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-4,1	-4,1	-2	-4,7	-8,5	-4,4	-4,4	-2,5	-19,5	-4,6	-4,6	-5
2	-7	-7	-5	-7	-11,3	-7,2	-7,2	-5,5	-23	-8,9	-8,9	-8,5
3	-9	-9	-7	-9,1	-13,2	-9,4	-9,4	-7,5	-25,2	-11,2	-11,2	-11
4	-10	-10	-7,9	-10,2	-14	-10,3	-10,3	-8,5	-26	-12,2	-12,2	-12
5	-10,9	-10,9	-8,5	-11	-14,6	-11	-11	-9,2	-26,9	-13,3	-13,3	-13
6	-11,5	-11,5	-9,2	-11,6	-15,5	-12	-12	-10	-27,5	-14	-14	-13,7
7	-12,4	-12,4	-10	-12,5	-16,3	-12,6	-12,6	-10,6	/	-15	-15	-14,6
8	-12,9	-12,9	-10,5	-13	-16,5	-13,1	-13,1	-11,2	/	-15,6	-15,6	-15,5
9	-13,5	-13,5	-11	-13,5	-17	-13,6	-13,6	-11,5	/	-16,3	-16,3	-16,1
10	-14	-14	-11,5	-14	-17,5	-14,1	-14,1	-12,3	/	-16,7	-16,7	-16,7
11	-16	-16	-13,5	-16	-19,5	-16,3	-16,3	-14,3	/	-19	-19	-19
12	-20,1	-20,1	-18	-20,4	-22	-19	-19	-18,4	/	-24,5	-24,5	-25,5

Sable N° 2, Q=120 l/h, c(bentonite)=0.5 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-7,9	-7,9	4,5	-7	-6,2	-6,2	-1,3	-8,5	-10,5	-10	-10	-10
2	-14	-14	-2	-13,4	-12,6	-12,6	-8	-15,4	-17,1	-16,5	-16,5	-16,5
3	-17,6	-17,6	-5,7	-17,3	-16,5	-16,5	-11,6	-20,4	-21,5	-20,9	-20,9	-20,9
4	-19,3	-19,3	-7,5	-18,8	-18,2	-18,2	-13,5	-22,1	-23,5	-22,9	-22,9	-22,9
5	-20,5	-20,5	-9	-20,3	-19,5	-19,5	-15	-23,5	-25,5	-24,5	-24,5	-24,5
6	-22,2	-22,2	-10,5	-21,7	-21	-21	-17	-25,3	-27,2	-26,5	-26,5	-26,5
7	-23,5	-23,5	-11,9	-23	-22,5	-22,5	-18,5	/	/	/	/	/
8	-24,5	-24,5	-13	-24,3	-23,5	-23,5	-19,9	/	/	/	/	/
9	-25,4	-25,4	-13,9	-25	-24,5	-24,5	-20,6	/	/	/	/	/
10	-26,1	-26,1	-14,7	-26	-25,5	-25,5	-21,5	/	/	/	/	/
11	/	/	-18,5	-26,5	/	/	-25,5	/	/	/	/	/
12	/	/	-27,5	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Sable N° 2, Q=150 l/h, c(bentonite)=0.5 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-12	-12	-8	-13,5	-18	-7,4	-7,4	-13	-5,4	-1	6,9	-5
2	-18,2	-18,2	-9,1	-22,2	-24,5	-14,5	-14,5	-20,5	-12,7	-8	-1	-13,2
3	-24,2	-24,2	-15,3	/	/	-19	-19	-25,2	-17,4	-12,4	-5	-18,9
4	-27	-27	-18,2	/	/	-21	-21	/	-19,4	-14,2	-7	-21
5	/	/	-20,5	/	/	-22,6	-22,6	/	-21	-15,6	-8,7	-23,5
6	/	/	-23,3	/	/	-24,5	-24,5	/	-22,5	-17,5	-10,6	-26
7	/	/	-25	/	/	-26	-26	/	-24	-19	-12,2	/
8	/	/	/	/	/	/	/	/	-25,5	-20,5	-13,5	/
9	/	/	/	/	/	/	/	/	-26,5	-21,5	-14,6	/

10	/	/	/	/	/	/	/	/	-27,9	-23,2	-16	/
11	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-21	/
12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-23	/

Sable N° 2, Q=30 l/h, c(chaux)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-6	-5,7	-2,5	-5,7	-0,4	0	0	-10,5	-11,2	-0,9	-0,9	-4,5
2	-6,9	-6,5	-3,3	-6,5	-1	-0,6	-0,6	-11,4	-12	-1,6	-1,6	-5,4
3	-7,5	-7,3	-4	-7,3	-1,7	-1,4	-1,4	-12	-12,3	-2,5	-2,5	-6,1
4	-7,6	-7,5	-4,2	-7,5	-2	-1,5	-1,5	-12,3	-13	-2,6	-2,6	-6,4
5	-8	-7,6	-4,5	-7,6	-2,4	-2	-2	-12,5	-13,2	-2,9	-2,9	-6,6
6	-8,3	-8	-4,6	-8	-2,5	-2,1	-2,1	-12,7	-13,4	-3,1	-3,1	-6,9
7	-8,5	-8,2	-4,9	-8,2	-2,6	-2,3	-2,3	-13	-13,6	-3,4	-3,4	-7
8	-8,7	-8,4	-5	-8,4	-2,9	-2,5	-2,5	-13,2	-13,9	-3,5	-3,5	-7,3
9	-9	-8,5	-5,3	-8,5	-3,2	-2,6	-2,6	-13,4	-14	-3,9	-3,9	-7,5
10	-9,3	-8,8	-5,5	-8,8	-3,4	-3	-3	-13,5	-14,2	-4	-4	-7,6
11	-10	-9,5	-6,3	-9,5	-3,6	-3,6	-3,6	-14,4	-15	-4,9	-4,9	-8,5
12	-11,6	-11,5	-8,2	-11,5	-6	-5,6	-5,6	-16,4	-16,7	-6,6	-6,6	-13,3

Sable N° 2, Q=50 l/h, c(chaux)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-14,6	-5,4	-4	-4,7	-1,1	1	2	-1,1	-8	-5,1	1	-7,6
2	-16,3	-7	-5,5	-6,5	-2,6	-0,6	-0,9	-2,6	-9,5	-6,9	-0,9	-9,4
3	-17,6	-8,4	-7	-7,9	-4,1	-2,1	-1	-4,1	-10,9	-8,1	-2,3	-11
4	-18,2	-9	-7,5	-8,4	-4,6	-2,6	-1,5	-4,6	-11,4	-8	-2,9	-11,5
5	-18,6	-9,4	-8	-8,9	-5	-3,1	-1,9	-5	-12	-8,4	-3,2	-11,8
6	-19	-9,6	-8,2	-9,2	-5,4	-3,5	-2,2	-5,4	-12,2	-8,5	-3,6	-12,1
7	-19,4	-10	-8,7	-9,5	-5,8	-3,9	-2,6	-5,8	-12,7	-8,7	-4	-12,5
8	-19,6	-10,5	-9,2	-10	-6,1	-4,2	-3	-6,1	-13	-8,9	-4,5	-13
9	-20,1	-11	-9,5	-10,5	-6,5	-4,6	-3,5	-6,5	-13,4	-9	-4,8	-13,4
10	-20,5	-11,4	-10	-10,8	-6,9	-5	-3,7	-6,9	-13,6	-9,2	-5	-13,6
11	-22	-13	-11,4	-12,3	-8,4	-6,5	-5,2	-8,4	-15	-9,5	-6,5	-15
12	-24,5	-15,6	-14,1	-15,1	-10,1	-8,1	-6,9	-10,1	-17,5	-13	-9	-17,5

Sable N° 2, Q=80 l/h, c(chaux)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-13,5	-12,5	-3,5	-12,5	-13,3	-5,9	3,5	-5,9	-3,9	-2,9	-2,9	-3,4
2	-16,5	-15,6	-6,5	-15,6	-16,4	-9,1	-0,5	-9,1	-6,9	-6	-6	-6,4
3	-19	-18,1	-9	-18,1	-18,9	-11,6	-2	-11,6	-9,2	-8,5	-8,5	-9
4	-19,9	-19	-9,9	-19	-19,6	-12,5	-3	-12,5	-10,1	-9,5	-9,5	-10
5	-20,5	-19,9	-10,6	-19,9	-20,5	-13,2	-3,6	-13,2	-10,9	-10,1	-10,1	-10,6
6	-21,1	-20,4	-11,2	-20,4	-21	-13,5	-4,1	-13,5	-11,4	-10,6	-10,6	-11,3
7	-21,9	-21	-12	-21	-21,6	-14,4	-5,2	-14,4	-12	-11,4	-11,4	-11,9
8	-22,5	-21,8	-12,5	-21,8	-21,7	-15	-5,5	-15	-12,6	-12	-12	-12,5
9	-23	-22,5	-13,2	-22,5	-21,8	-15,5	-6,1	-15,5	-13,1	-12,6	-12,6	-13

10	-23,5	-23	-13,9	-23	-22	-15,6	-6,5	-15,6	-13,5	-13,1	-13,1	-14,6
11	-26,1	-25,5	-16,1	-25,5	-25,6	-18	-9	-18	-16	-15,5	-15,5	-16
12	/	/	-20	/	/	-21	-12,6	-21	-19,6	-19,3	-19,3	-19,6

Sable N° 2, Q=120 l/h, c(chaux)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-5,5	-5,5	-1	-7,6	-17	-17	-7	-14,9	-7,4	-7,4	-1,1	-11,3
2	-10,2	-10,2	-5,6	-12,3	-22,6	-22,6	-13,5	-21	-13	-13	-7,5	-17,5
3	-14,5	-14,5	-10,5	-16,9	-27,7	-27,7	-19	-26	-18,4	-18,4	-12,9	-22,9
4	-16,2	-16,2	-12,2	-18,5	/	/	-21	/	-20,2	-20,2	-14,8	-24,9
5	-17,6	-17,6	-13,9	-20,1	/	/	-23,5	/	-21,6	-21,6	-16,4	-26,2
6	-19,1	-19,1	-15,3	-21,5	/	/	-25,4	/	-23	-23	-17,7	-27,5
7	-20,6	-20,6	-16,9	-23	/	/	-27,2	/	-24,5	-24,5	-19,5	/
8	-22	-22	-18,2	-23,4	/	/	/	/	-25,6	-25,6	-20,8	/
9	-23,4	-23,4	-20,4	-25,5	/	/	/	/	-26	-26	-21	/
10	-24,7	-24,7	-21	-27	/	/	/	/	-27,6	-27,6	-21,1	/
11	/	/	-26,5	/	/	/	/	/	/	/	/	/
12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Sable N° 2, Q=150 l/h, c(chaux)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-12,4	-10,8	-10,8	-11,6	-2,9	-2,9	-0,5	-7,8	-15,6	-13,9	-13,2	-13,9
2	-20	-18,5	-18,5	-18,6	-10,4	-10,4	-8,5	-15,5	-23,5	-22	-20,6	-22
3	-26,5	-25,4	-25,4	-27	-17	-17	-15,4	-22,4	/	/	-27,2	/
4	/	/	/	/	-19,5	-19,5	-18	-24,6	/	/	/	/
5	/	/	/	/	-22	-22	-20,5	-27	/	/	/	/
6	/	/	/	/	-23,9	-23,9	-22,5	/	/	/	/	/
7	/	/	/	/	-25,6	-25,6	-24,6	/	/	/	/	/
8	/	/	/	/	-27,5	-27,5	-26,5	/	/	/	/	/
9	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
11	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Sable N° 2, Q=30 l/h, c(chaux)=0.3 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-16,4	-14,5	-4,5	-14,5	-1	-1	-0,5	-1	-10,4	-1,6	-1,6	-2,4
2	-18	-16,3	-6,5	-16,3	-2,5	-2,5	-2	-2,6	-11,9	-3,4	-3,4	-4
3	-19,2	-17,8	-8	-17,8	-4	-4	-3,5	-4	-13,2	-4,7	-4,7	-5,5
4	-19,7	-18,5	-8,5	-18,5	-4,5	-4,5	-4,1	-4,6	-13,7	-5,5	-5,5	-6
5	-20,1	-19	-9	-19	-5	-5	-4,5	-5	-14,1	-5,8	-5,8	-6,4
6	-20,6	-19,4	-9,5	-19,4	-5,2	-5,2	-5	-5,4	-14,5	-6	-6	-6,8
7	-20,7	-19,5	-9,7	-19,5	-5,5	-5,5	-5,2	-5,6	-15	-6,6	-6,6	-7,1
8	-21,2	-20	-10	-20	-5,9	-5,9	-5,5	-6	-15,1	-6,9	-6,9	-7,4
9	-21,5	-20,5	-10,5	-20,5	-6,1	-6,1	-5,8	-6,3	-15,5	-7	-7	-7,6

10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
11	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Sable N° 2, Q=150 l/h, c(chaux)=0.3 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-12,7	-12,7	-11,4	-12,5	-11,8	-7,5	-7,2	-7,5	-14,5	-12,2	-11	-12,2
2	-23,4	-23,4	-22,4	-23,2	-23,5	-19,9	-18,4	-19,9	-23,7	-22,1	-20,7	-22,1
3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
4	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
5	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
6	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
7	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
8	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
9	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
11	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Sable N° 2, Q=30 l/h, c(chaux)=0.5 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-18,4	-5,1	-5,1	-7,9	-12	-1,9	-1	-1,9	-5,2	-4	-1,9	-4
2	-19,5	-6,5	-6,5	-9,2	-13,5	-3,5	-3	-3,5	-7	-6	-4	-6
3	-20,6	-7,5	-7,5	-10,1	-14,4	-4,5	-4,1	-4,5	-8	-7	-4,7	-7
4	-20,9	-7,7	-7,7	-10,6	-14,6	-4,9	-4,5	-4,9	-8,4	-7,5	-5,3	-7,5
5	-21	-8,2	-8,2	-11	-15	-5,1	-5	-5,1	-8,8	-8	-5,6	-8
6	-21,5	-8,5	-8,5	-11,4	-15,5	-5,5	-5,4	-5,5	-9	-8,3	-6	-8,3
7	-21,6	-8,9	-8,9	-11,5	-15,8	-5,8	-5,6	-5,8	-9,5	-8,5	-6,4	-8,5
8	-22	-9,1	-9,1	-12	-16	-6	-6	-6	-9,6	-9	-6,6	-9
9	-22,4	-9,5	-9,5	-12,2	-16,4	-6,5	-6,4	-6,5	-10	-9,4	-7	-9,4
10	-22,5	-9,7	-9,7	-12,5	-16,6	-6,6	-6,9	-6,6	-10,5	-9,5	-7,3	-9,5
11	-23	-10,1	-10,1	-13	-17,5	-7,6	-8	-7,6	-11,3	-10,5	-8,4	-10,5
12	/	-18,6	-18,6	-21,4	-20,2	-10,4	-11,1	-10,4	-14,5	-13,7	-11,5	-13,7

Sable N° 2, Q=50 l/h, c(chaux)=0.5 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-15,3	-5,2	-3,6	-5,2	-12	-2,6	-1	-2,6	-8,9	-7,5	-7	-8,9
2	-18,6	-9	-7,5	-9	-16	-6,8	-5	-6,8	-13,5	-12,5	-12	-13,5
3	-20,9	-11,3	-9,5	-11,3	-18	-9	-7	-9	-15,9	-15	-14,6	-15,9
4	-21,4	-12,1	-10,2	-12,1	-19	-9,7	-8	-9,7	-16,6	-15,7	-15,5	-16,6
5	-22,1	-13	-11	-13	-19,7	-10,6	-8,6	-10,6	-17,6	-16,7	-16,6	-17,6
6	-22,9	-13,5	-12	-13,5	-20,4	-11,3	-9,2	-11,3	-18,4	-17,5	-17,4	-18,4
7	-23,5	-14,1	-12,4	-14,1	-20,9	-11,9	-10	-11,9	-19	-18,2	-18	-19
8	-24	-14,6	-13	-14,6	-21,5	-12,5	-10,5	-12,5	-19,5	-19	-18,7	-19,5
9	-24,5	-15,3	-13,5	-15,3	-22	-13	-11	-13	-20,3	-19,6	-19,4	-20,3

Annexe 9: Tableaux des pertes de charges de la filtration par le sable N°3

Sable N° 3, Q=30 l/h, c(bentonite)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-0,9	-0,9	8,5	0	-6,1	-0,6	-0,6	-1	-3,2	-3,2	-3	-3,5
2	-1,5	-1,5	8	-0,6	-7	-1,5	-1,5	-2	-4,2	-4,2	-3,9	-4,3
3	-2,2	-2,2	7	-1,2	-8	-2,4	-2,4	-2,6	-4,9	-4,9	-4,6	-5
4	-2,6	-2,6	6,7	-1,5	-8,4	-2,6	-2,6	-3,1	-5,4	-5,4	-5	-5,5
5	-3	-3	6,4	-2	-8,6	-3	-3	-3,5	-5,7	-5,7	-5,5	-5,9
6	-3,5	-3,5	6	-2,2	-9	-3,3	-3,3	-3,9	-6	-6	-5,8	-6,1
7	-3,7	-3,7	5,6	-2,5	-9,5	-3,7	-3,7	-4,2	-6,4	-6,4	-6,1	-6,5
8	-4	-4	5,5	-2,9	-9,7	-4	-4	-4,6	-6,6	-6,6	-6,5	-6,9
9	-4,2	-4,2	5	-3	-10,2	-4,4	-4,4	-4,9	-7	-7	-6,8	-7,1
10	-4,6	-4,6	4,7	-3,4	-10,5	-4,5	-4,5	-5,2	-7,4	-7,4	-7	-7,4
11	-5,6	-5,6	3,5	-4	-11,6	-5,6	-5,6	-6,3	-8,5	-8,5	-9,1	-8,5
12	-8,3	-8,3	0,8	-6,9	-14,5	-8,5	-8,5	-9	-11,3	-11,3	-11,1	-11,5

Sable N° 3, Q=50 l/h, c(bentonite)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-2,1	-2	-2	-2	-10,5	-0,5	-0,5	-1,5	1,4	2	4	2,5
2	-3,8	-3,5	-3,5	-3,7	-12,4	-2,4	-2,4	-3,2	-0,3	0,4	1,1	-0,1
3	-5,4	-5,1	-5,1	-5,4	-14	-4	-4	-5	-1,5	-1,1	-0,5	-1,6
4	-6	-5,9	-5,9	-6	-14,5	-4,8	-4,8	-5,5	-2,2	-1,6	-1,2	-2,1
5	-6,6	-6,5	-6,5	-6,6	-15,3	-5,5	-5,5	-6,1	-2,9	-2,5	-2	-3,1
6	-7,4	-7	-7	-7,2	-16	-6,1	-6,1	-6,7	-3,5	-3	-2,6	-3,6
7	-8	-7,8	-7,8	-8	-16,6	-7	-7	-7,5	-4,1	-3,6	-3,4	-4,1
8	-8,6	-8,5	-8,5	-8,5	-17,3	-7,7	-7,7	-8,1	-4,5	-4,4	-4	-4,7
9	-9	-8,9	-8,9	-9	-17,6	-8,1	-8,1	-8,5	-5	-4,8	-4,5	-5,1
10	-9,6	-9,4	-9,4	-9,6	-18,5	-8,9	-8,9	-9,1	-5,5	-5,5	-5	-5,7
11	-11,7	-11,5	-11,5	-11,7	-20,5	-11,1	-11,1	-11,3	-7,5	-7,4	-7,1	-7,7
12	-15,5	-15,1	-15,1	-14,4	-24	-15	-15	-14,9	-11	-11	-10,8	-11,2

Sable N° 3, Q=80 l/h, c(bentonite)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-1	-1	4,7	-1,7	-9,1	-1,5	-1,5	-2,4	-1,3	-1,3	-0,7	-1,5
2	-3,5	-3,5	2	-4,5	-12,1	-4,4	-4,4	-5,5	-4,2	-4,2	-3,5	-4,5
3	-6	-6	-0,7	-7,1	-15	-7,1	-7,1	-8,4	-6,6	-6,6	-6,2	-7
4	-7,1	-7,1	-1,6	-8,1	-16,1	-8,4	-8,4	-9,6	-8	-8	-7,5	-8
5	-8,1	-8,1	-2,9	-9,3	-17,2	-9,4	-9,4	-11	-9	-9	-8,5	-9
6	-9	-9	-4	-10,4	-18,5	-10,5	-10,5	-12,2	-10	-10	-9,6	-10,1
7	-10,1	-10,1	-5,1	-11,5	-19,5	-11,6	-11,6	-13,5	-10,6	-10,6	-10,7	-11,4
8	-11,1	-11,1	-6,1	-12,4	-20,6	-12,7	-12,7	-14,5	-12,2	-12,2	-11,8	-12,5
9	-11,9	-11,9	-7	-13,2	-21,2	-13,5	-13,5	-15,5	-13	-13	-12,5	-13
10	-12,9	-12,9	-7,9	-14	-22,5	-14,5	-14,5	-16,5	-14	-14	-13,5	-14
11	-16	-16	-11,2	-17,5	-23,2	-17,9	-17,9	-20,2	-17,4	-17,4	-17	-17,5
12	-20,6	-20,6	-16	-22,4	-23,5	-22,6	-22,6	-25,9	-22,2	-22,2	-21,6	-22,1

Sable N° 3, Q=120 l/h, c(bentonite)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-5	-4,5	-2,6	-4,5	-8,5	-8	-8	-8,8	-9,5	-7,1	-1,6	-7,1
2	-9,5	-9,1	-7,5	-9,1	-13,6	-13,2	-13,2	-13,5	-14,5	-12,6	-6,4	-12,6
3	-13,6	-13	-11,5	-13	-18	-17,6	-17,6	-17,5	-18,9	-17,2	-11,4	-17,2
4	-15,5	-15	-13,5	-15	-19,8	-19,6	-19,6	-19,4	-22	-18,7	-13,6	-18,7
5	-17,3	-16,7	-15	-16,7	-21,6	-21,4	-21,4	-20,9	/	/	-15,5	/
6	-18,9	-18,5	-17	-18,5	-22,6	-22,4	-22,4	-22,5	/	/	-17	/
7	-20,5	-20	-18,5	-20	/	/	/	/	/	/	-19,2	/
8	-22,2	-21,6	-20	-21,6	/	/	/	/	/	/	-21	/
9	/	/	-21,2	/	/	/	/	/	/	/	-22,5	/
10	/	/	-23	/	/	/	/	/	/	/	-24	/
11	/	/	-28	/	/	/	/	/	/	/	/	/
12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Sable N° 3, Q=150 l/h, c(bentonite)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-5,7	-5,7	-5,1	-5,7	-20,1	-6	-4,6	-6	-19	-15	-1,9	-5,5
2	-12,6	-12,6	-12,1	-12,6	/	-13	-12	-13	/	-20,5	-6,6	-11,5
3	-18,6	-18,6	-18,2	-18,6	/	-19,5	-18,4	-19,5	/	/	-13,7	-17,1
4	/	/	/	/	/	-22,4	-21,6	-22,4	/	/	-16	-20
5	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-18,5	-22
6	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-22,5	/
7	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-23,6	/
8	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
9	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
11	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Sable N° 3, Q=30 l/h, c(bentonite)=0.3 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-12,8	-13,3	-12,3	-13,3	-9	-7,6	0,4	-7,6	-9,3	-8	-5,6	-7,5
2	-14	-14,4	-13,5	-14,4	-10	-9	-0,6	-9	-10,5	-9,2	-7	-8,9
3	-15	-15,3	-14,6	-15,3	-11	-10	-1,8	-10	-11,5	-10,5	-8,1	-10
4	-15,4	-15,7	-15,1	-15,7	-11,5	-10,5	-2,1	-10,5	-12	-11	-8,6	-10,6
5	-15,7	-16	-15,6	-16	-12	-11	-2,6	-11	-12,4	-11,5	-9,2	-11
6	-16,4	-16,7	-16,1	-16,7	-12,4	-11,5	-3,1	-11,5	-12,5	-12	-9,8	-11,5
7	-16,6	-16,9	-16,8	-16,9	-12,9	-12	-3,5	-12	-13,5	-12,5	-10,2	-12,1
8	-17	-17,3	-17,1	-17,3	-13,2	-12,3	-4	-12,3	-13,9	-12,9	-10,7	-12,5
9	-17,5	-17,7	-17,5	-17,7	-13,7	-12,7	-4,4	-12,7	-14,3	-13,2	-11,1	-13
10	-17,7	-17,9	-18	-17,9	-14	-13,1	-4,6	-13,1	-14,6	-13,8	-11,6	-13,4
11	-19,2	-19,4	-19,5	-19,4	-15,5	-14,6	-6,1	-14,6	-16	-15,3	-13,2	-15
12	-22,1	-22,3	-22,5	-22,3	-18,5	-17,8	-9,1	-17,8	-19	-18,3	-16,2	-18

Sable N° 3, Q=50 l/h, c(bentonite)=0.3 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-12	-2,3	-2,3	-3,3	-5,7	-4,6	0,7	-4,6	-5,7	-5,5	-5,5	-5,7
2	-14,1	-4,5	-4,5	-5,6	-8	-7	-3,4	-7	-7,7	-7,4	-7,4	-7,7
3	-15,8	-6,5	-6,5	-7,9	-9,9	-8,9	-5,6	-8,9	-9,4	-9	-9	-9,4
4	-16,7	-7,3	-7,3	-8,8	-11	-10	-6,5	-10	-10	-9,8	-9,8	-10
5	-17,4	-8,3	-8,3	-9,6	-11,6	-10,6	-6,7	-10,6	-10,9	-10,7	-10,7	-10,9
6	-18,2	-9	-9	-10,5	-12,1	-11,2	-8,6	-11,2	-11,6	-11,5	-11,5	-11,6
7	-18,9	-9,6	-9,6	-11,2	-13	-12,2	-9,5	-12,2	-12,4	-12,3	-12,3	-12,4
8	-19,5	-10	-10	-11,9	-13,8	-12,8	-10,2	-12,8	-13	-12,9	-12,9	-13
9	-20	-11	-11	-12,9	-14,5	-13,5	-11,2	-13,5	-13,6	-13,5	-13,5	-13,6
10	-20,7	-11,6	-11,6	-13,6	-15,1	-14,2	-12	-14,2	-14,4	-14,3	-14,3	-14,4
11	-23,1	-14,4	-14,4	-16,2	-17,5	-16,6	-14,6	-16,6	-16,7	-16,6	-16,6	-16,7
12	-27	-17,9	-17,9	-20,1	-20,5	-19,9	-18,2	-19,9	/	/	/	/

Sable N° 3, Q=80 l/h, c(bentonite)=0.3 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-2,5	-2,5	0,5	-0,5	-6	-6	-5	-7	1,4	1,9	2	1,6
2	-6,2	-6,2	-3,2	-4,5	-10,1	-10,1	-9,4	-11,4	-2,8	-2,5	-2,1	-2,6
3	-9,1	-9,1	-6,5	-7,8	-13,5	-13,5	-13	-14,8	-6,3	-6	-5,9	-6,1
4	-10,8	-10,8	-8	-9,5	-15,2	-15,2	-14,7	-16,5	-8	-7,6	-7,5	-8
5	-12	-12	-9,5	-11	-16,6	-16,6	-16,4	-17,8	-9,5	-9,4	-9,2	-9,5
6	-13,5	-13,5	-10,9	-12,4	-18,4	-18,4	-18	-19,8	-11	-10,9	-10,8	-11
7	-15	-15	-12,1	-14	-19,8	-19,8	-19,5	-21,4	-12,6	-12,5	-12,4	-12,5
8	-16	-16	-13,3	-15,1	-21,2	-21,2	-20,9	-22,5	-14	-13,8	-13,7	-13,8
9	-17,2	-17,2	-14,4	-16,4	-22,1	-22,1	-22	-24,4	-15,3	-15,2	-15	-15
10	-18,5	-18,5	-15,7	-17,6	-23,8	-23,8	-23,6	/	-16,6	-16,5	-16,5	-16,2
11	-23	-23	-20,4	-22,2	/	/	/	/	-22	-22	-22	-22
12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Sable N° 3, Q=30 l/h, c(bentonite)=0.5 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-10,1	-5,1	-1,3	-2,2	-11,5	-3	-0,4	-0,5	3,7	4	4,5	3,7
2	-11,5	-6,6	-2,9	-3,6	-12,9	-4,5	-2	-2,1	2,1	2,5	2,9	2,1
3	-12,8	-8	-4,3	-5,1	-14,2	-5,9	-3,4	-3,6	0,9	1	1,4	0,9
4	-13,2	-8,5	-4,8	-5,5	-14,5	-6,5	-4	-4,1	0,4	0,5	1	0,4
5	-13,9	-9	-5,5	-6,1	-15,2	-7,1	-4,5	-4,7	-0,2	0	0,5	-0,2
6	-14,4	-9,5	-6	-6,7	-15,5	-7,5	-5	-5,2	-0,6	-0,4	0	-0,6
7	-14,7	-10	-6,5	-7	-16	-8	-5,4	-5,7	-1,1	-1	-0,5	-1,1
8	-15,4	-10,6	-7	-7,5	-16,5	-8,5	-5,8	-6,2	-1,5	-1,4	-1	-1,5
9	-15,7	-11	-7,5	-8	-17	-9	-6	-6,5	-1,9	-1,8	-1,5	-1,9
10	-16	-11,5	-7,9	-8,5	-17,2	-9,3	-6,7	-7	-2,4	-2,3	-1,9	-2,4
11	-17,9	-13,5	-9,8	-10,2	-19	-11	-8,2	-8,9	-2,6	-2,5	-2,4	-2,6
12	-21	-16,5	-13	-13,4	-22	-14,1	-11,5	-11,8	-7,2	-7,1	-7	-7,2

Sable N° 3, Q=150 l/h, c(bentonite)=0.5 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-13,5	-13,5	-12	-13,5	-12	-10,9	-10,9	-11	0	0,4	0,4	0
2	-23	-23	-21,9	-22,9	-20,5	-19,4	-19,4	-19,5	-8	-7,9	-7,9	-8
3	/	/	/	/	/	/	/	/	-14,6	-14,5	-14,5	-14,6
4	/	/	/	/	/	/	/	/	-16,5	-16,4	-16,4	-16,5
5	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
6	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
7	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
8	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
9	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
11	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Sable N° 3, Q=30 l/h, c(chaux)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	1,9	1,9	9,3	-3,4	-5,4	0	0	-2	-6,4	-2	2,1	-2
2	1,2	1,2	8,7	-4,1	-5,9	-0,8	-0,8	-2,8	-7	-2,6	1,2	-2,6
3	0,8	0,8	7,9	-4,9	-6,5	-1,4	-1,4	-3,2	-7,5	-3,1	0,9	-3,1
4	0,3	0,3	7,8	-5	-6,9	-1,5	-1,5	-3,5	-7,8	-3,4	0,5	-3,4
5	0	0	7,5	-5,4	-7,2	-2	-2	-3,6	-8	-3,7	0,4	-3,7
6	-0,2	-0,2	7,4	-5,5	-7,4	-2,1	-2,1	-4	-8,1	-4,1	0	-4,1
7	-0,4	-0,4	7	-5,6	-7,6	-2,2	-2,2	-4,4	-8,5	-4,5	-0,2	-4,5
8	-0,6	-0,6	6,9	-6	-8	-2,5	-2,5	-4,5	-8,9	-4,7	-0,5	-4,7
9	-1	-1	6,5	-6,4	-8,1	-3	-3	-4,9	-9,1	-4,8	-1	-4,8
10	-1,3	-1,3	6	-6,5	-8,2	-3,2	-3,2	-5,1	-9,5	-5	-1,1	-5
11	-2,3	-2,3	5,5	-7,5	-9,3	-4,2	-4,2	-6,1	-11	-6	-2,1	-6
12	-5,4	-5,4	2,1	-10,6	-12	-7	-7	-9	-15,3	-8,9	-5	-8,9

Sable N° 3, Q=50 l/h, c(chaux)=0.1 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-12,5	-4,2	-3,5	-4,2	-14,5	-1,3	-1,3	-3	-10	-9	-1,1	-9
2	-13,6	-5,5	-4,8	-5,5	-15,8	-2,6	-2,6	-4,5	-11,5	-10,5	-2,5	-10,5
3	-14,7	-6,5	-5,8	-6,5	-16,5	-3,6	-3,6	-5,5	-12,5	-11,6	-3,4	-11,6
4	-15	-7	-6,1	-7	-17	-4	-4	-6	-12,8	-12,1	-3,9	-12,1
5	-15,5	-7,5	-6,7	-7,5	-17,5	-4,5	-4,5	-6,5	-13,3	-12,6	-4,5	-12,6
6	-16	-8	-7	-8	-18	-4,9	-4,9	-7	-13,6	-13,1	-4,6	-13,1
7	-16,5	-8,5	-7,5	-8,5	-18,5	-5,5	-5,5	-7,6	-14,4	-13,6	-5,1	-13,6
8	-17	-9	-8	-9	-18,7	-5,9	-5,9	-8,1	-14,8	-14,2	-5,6	-14,2
9	-17,4	-9,5	-8,5	-9,5	-19,5	-6,5	-6,5	-8,6	-15,4	-14,6	-6	-14,6
10	-17,9	-10	-9	-10	-19,7	-6,9	-6,9	-9,3	-15,8	-15,4	-6,5	-15,4
11	-19,7	-11,9	-10,9	-11,9	-21,4	-8,5	-8,5	-11,1	-16,2	-15,9	-9,4	-15,9
12	-23,4	-15,6	-14,4	-15,6	-24,8	-12	-12	-14,8	-24	-23,8	-17,5	-23,8

Sable N° 3, Q=30 l/h, c(chaux)=0.3 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-24	-22,5	-3,3	-3,6	-0,9	5,3	8,6	-2,9	3,2	3,2	3,5	3,2
2	-25	-23,7	-3,5	-3,8	-1,9	4	7,7	-3,9	2,4	2,4	2,5	2,4
3	-25,5	-24,4	-5	-5,3	-2,5	3,5	7,1	-4,6	2,1	2,1	2,2	2,1
4	-26	-25,1	-5,2	-5,5	-3	3	7	-4,9	1,2	1,2	1,3	1,2
5	-27	-25,8	-5,5	-5,7	-3,2	2,6	6,9	-5,1	0,6	0,6	0,9	0,6
6	-27,2	-26,4	-5,8	-6,1	-3,5	2,5	6,7	-5,4	0,3	0,3	0,5	0,3
7	/	/	-6,1	-6,5	-3,9	2	6,5	-5,8	-0,1	-0,1	0,1	-0,1
8	/	/	-6,5	-6,8	-4	1,8	6,1	-6	-0,5	-0,5	-0,3	-0,5
9	/	/	-6,9	-7,2	-4,5	1,2	5,8	-6,3	-0,7	-0,7	-0,6	-0,7
10	/	/	-7,1	-7,5	-4,9	0,9	5,6	-6,7	-1,2	-1,2	-1	-1,2
11	/	/	-8,5	-9,6	-6	-0,3	4,4	-7,9	-2,5	-2,5	-2,1	-2,5
12	/	/	-12,6	-12,9	-8,6	-3	1,9	-10,4	-8,4	-8,4	-8	-8,4

Sable N° 3, Q=50 l/h, c(chaux)=0.3 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-5,2	-5,2	-5	-5,2	-2	-2	-3,3	-1,6	-1	0,9	1,3	0,1
2	-7	-7	-6,8	-7	-3,7	-3,7	-5	-3,2	-2,5	-0,9	-0,4	-1,6
3	-8,4	-8,4	-8,2	-8,4	-5,2	-5,2	-6,6	-4,7	-3,9	-2,2	-1,8	-3,1
4	-9	-9	-8,7	-9	-5,8	-5,8	-7,1	-5,2	-4,5	-2,9	-2,5	-3,7
5	-9,6	-9,6	-9,5	-9,6	-6,4	-6,4	-7,7	-6	-5	-3,5	-3,1	-4,5
6	-10,2	-10,2	-10	-10,2	-7,1	-7,1	-8,3	-6,5	-5,5	-4,2	-3,5	-5,1
7	-10,8	-10,8	-10,6	-10,8	-7,7	-7,7	-9	-7,1	-6	-4,6	-4,1	-5,6
8	-11,4	-11,4	-11,2	-11,4	-8,3	-8,3	-9,7	-7,6	-6,6	-5,3	-4,7	-6,4
9	-12	-12	-11,9	-12	-9	-9	-10,3	-8,3	-7,2	-6	-5,5	-7
10	-12,5	-12,5	-12,4	-12,5	-9,5	-9,5	-10,8	-8,9	-7,8	-6,5	-5,8	-7,6
11	-14,6	-14,6	-14,5	-14,6	-11,7	-11,7	-13	-10,9	-9,6	-8,5	-8	-9,5
12	-17,4	-17,4	-17	-17,4	-13,8	-13,8	-15,2	-12,9	-12,9	-11,8	-11,3	-13

Sable N° 3, Q=80 l/h, c(chaux)=0.3 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-3	-3	-3	-3	-2,5	-2,3	-2,2	-2,5	-2	-1,5	-1,3	-2
2	-6	-6	-6	-6	-5,5	-5,3	-5,1	-5,2	-5	-4,5	-4,2	-5
3	-8,1	-8,1	-8,1	-8,1	-7,7	-7,5	-7,4	-7,5	-7,1	-6,9	-6,7	-7,1
4	-9,2	-9,2	-9,2	-9,2	-8,6	-8,6	-8,5	-8,9	-8,1	-7,8	-7,7	-8,1
5	-10,2	-10,2	-10,2	-10,2	-9,7	-9,6	-9,5	-9,5	-9,1	-9	-8,9	-9,1
6	-11,2	-11,2	-11,2	-11,2	-10,7	-10,6	-10,5	-10,4	-10,1	-9,9	-9,8	-10,1
7	-12,2	-12,2	-12,2	-12,2	-11,6	-11,5	-11,4	-11,4	-11,1	-10,8	-10,7	-11,1
8	-13,3	-13,3	-13,3	-13,3	-12,8	-12,6	-12,4	-12,3	-12,1	-11,8	-11,7	-12,1
9	-14,2	-14,2	-14,2	-14,2	-13,7	-13,6	-13,5	-13,2	-13,1	-12,9	-12,8	-13,1
10	-15,2	-15,2	-15,2	-15,2	-14,6	-14,5	-14,4	-14,1	-14,1	-14	-13,9	-14,1
11	-18,5	-18,5	-18,5	-18,5	-18,1	-17,9	-17,8	-17,5	-17,6	-17,5	-17,4	-17,6
12	-23,3	-23,3	-23,3	-23,3	-22,8	-22,7	-22,6	-22,2	-22,5	-22,4	-22,3	-22,5

Sable N° 3, Q=120 l/h, c(chaux)=0.3 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-3,5	-3,2	-3,2	-8	-2	-2	-1,4	-7,1	-3	-2	-1,8	-3,5
2	-8	-7,6	-7,6	-12,4	-6,4	-6,4	-5,7	-11,6	-7,5	-6,8	-6,5	-8,1
3	-11,5	-11,3	-11,3	-15,9	-9,7	-9,7	-9,5	-15,4	-11,5	-10,9	-10,5	-12,2
4	-13	-12,8	-12,8	-17,5	-11,3	-11,3	-10,9	-16,9	-13,2	-12,5	-12,1	-13,9
5	-14,7	-14,5	-14,5	-19,2	-12,7	-12,7	-12,5	-18,5	-14,7	-14,1	-13,9	-15,5
6	-16,4	-16,1	-16,1	-21	-14,4	-14,4	-14	-20	-16,6	-16	-15,6	-17,1
7	-17,7	-17,5	-17,5	-22,2	-15,7	-15,7	-15,5	-21,5	-18,3	-17,5	-17,1	-18,6
8	-19,4	-19,2	-19,2	-23,8	-17	-17	-16,8	-23	-20	-19	-18,9	-20,4
9	-20,5	-20,3	-20,3	/	-17,9	-17,9	-17,5	/	-20,4	-19,7	-19,6	-21
10	-22,3	-22,1	-22,1	/	-20	-20	-19,9	/	-23,3	-22,4	-22,3	-23,5
11	-27,5	-27,6	-27,6	/	-25,2	-25,2	-25	/	/	/	/	/
12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Sable N° 3, Q=150 l/h, c(chaux)=0.3 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-8,5	-8,5	-8,4	-9	-6,7	-6,3	-4,7	-7	-6	-5,5	-5,4	-5,6
2	-13,4	-13,4	-13,2	-14	-12,5	-12,4	-10,6	-13	-12,5	-11,9	-11,5	-12,2
3	-20	-20	-19,9	-20,5	-18,4	-18	-16,4	-18,7	-17,5	-16,8	-16,6	-17,1
4	/	/	/	/	-20,6	-20,3	-18,4	-21	-20	-19,1	-19	-19,4
5	/	/	/	/	-22,6	-22,5	-20,7	-23,1	/	/	/	-21,6
6	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-24
7	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
8	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
9	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
11	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Sable N° 3, Q=30 l/h, c(chaux)=0.5 g/l,												
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	NIVEAU 1				NIVEAU 2				NIVEAU 3			
1	-2	1,5	6,8	-3	-6,5	-7	-1,5	-6,5	-3,9	-3,5	-2,6	-3,9
2	-3,5	0,2	5,5	-4,5	-8	-8,4	-3	-8	-5,5	-5,2	-4,4	-5,5
3	-4,4	-0,8	4,5	-5,5	-9	-9,4	-4,1	-9	-6,7	-6,2	-5,3	-6,7
4	-4,6	-1,4	4	-6	-9,5	-9,7	-4,5	-9,5	-7	-6,7	-5,9	-7
5	-5,2	-1,6	3,5	-6,5	-10	-10,2	-5	-10	-7,5	-7,2	-6,2	-7,5
6	-5,6	-2	3	-6,9	-10,5	-10,6	-5,6	-10,5	-8,1	-7,3	-6,6	-8,1
7	-6	-2,4	2,9	-7,4	-10,8	-11	-6	-10,8	-8,5	-8,2	-7,1	-8,5
8	-6,5	-3	2,4	-7,6	-11,2	-11,6	-6,4	-11,2	-9	-8,6	-7,6	-9
9	-6,6	-3,3	1,9	-8,1	-11,8	-12	-6,8	-11,8	-9,4	-9	-8	-9,4
10	-7,3	-3,7	1,4	-8,9	-12	-12,3	-7,1	-12	-9,6	-9,5	-8,4	-9,6
11	-8,7	-4,6	0	-10,1	-13,5	-13,6	-8,5	-13,5	-11	-10,8	-9,6	-11
12	-13	-9,5	-4,5	-15	-20,5	-20,7	-15,5	-20,5	-14	-13,7	-12,6	-14

Annexe 10: Tableau de la turbidité après filtration avec le sable N°1

Débits	Bentonite			Chaux		
	C=0.1g/l	C=0.3g/l	C=0.5g/l	C=0.1g/l	C=0.3g/l	C=0.5g/l
Avant	115	147	220	190	442	886
30 l/h	6.51	14.1	35.7	3.8	5.4	13.1
50 l/h	15	31.3	/	9.2	11.9	19.8
80 l/h	29.2	52	/	18.7	21.4	35.2
120 l/h	52.6	70.8	/	26.9	31.8	44.7
150 l/h	57.4	78.3	89.4	32.8	36.1	49.8

Annexe 11: Tableau de la turbidité après filtration avec le sable N°2

Débits	Bentonite			Chaux		
	C=0.1g/l	C=0.3g/l	C=0.5g/l	C=0.1g/l	C=0.3g/l	C=0.5g/l
Avant	115	147	220	190	442	886
30 l/h	5.07	12.7	30.4	2.4	2.9	8.2
50 l/h	12	21.2	/	6.7	8.1	14.3
80 l/h	24.7	43.6	/	13.2	18.6	26.8
120 l/h	41.4	59.3	/	19.1	27.2	36.6
150 l/h	48	63.2	75.8	23.3	30.6	41.6

Annexe 12: Tableau de la turbidité après filtration avec le sable N°3

Débits	Bentonite			Chaux		
	C=0.1g/l	C=0.3g/l	C=0.5g/l	C=0.1g/l	C=0.3g/l	C=0.5g/l
Avant	115	147	220	190	442	886
30 l/h	11.8	21.3	46.1	8.1	11.2	16.3
50 l/h	27.6	35.8	/	16.3	20.3	29.7
80 l/h	56.8	61.4	/	29.7	39.2	63.8
120 l/h	70.1	88.9	/	42.8	54.4	80.2
150 l/h	73.7	96.6	109.8	51.4	60.3	88.6

**Annexe 13: tableau des pertes de charge pour la filtration sur sable des eaux usées
épurées de la STEP de Ain El Houtz**

Q= 30 l/h, niveau 3, VA30 VA40, sable N°2												
temps	Pertes de charges dans les piézomètres											
	piez1	piez2	piez3	piez4	piez5	piez6	piez7	piez8	piez9	piez10	piez11	piez12
5	7,4	6,5	6	5,7	5,3	5,1	5	4,7	4,5	4,2	3,3	2,5
10	7,4	6,5	6	5,7	5,3	5,1	5	4,7	4,5	4,2	3,3	2,5
15	7,3	6,4	5,9	5,6	5,2	5	4,9	4,6	4,4	4,1	3,2	2,4
20	7,3	6,4	5,9	5,6	5,2	5	4,9	4,6	4,4	4,1	3,2	2,4
25	7,2	6,3	5,8	5,5	5,1	4,9	4,8	4,5	4,3	4	3,1	2,3
30	7,2	6,3	5,8	5,4	5	4,8	4,7	4,4	4,2	3,9	3	2,2
35	7,1	6,2	5,7	5,3	4,9	4,7	4,6	4,3	4,1	3,8	2,9	2,1
40	7	6,1	5,6	5,2	4,8	4,6	4,5	4,2	4	3,7	2,8	2
45	6,9	6	5,5	5,1	4,7	4,5	4,4	4,1	3,9	3,6	2,7	1,9
50	6,8	5,9	5,4	5	4,6	4,4	4,3	4	3,8	3,5	2,6	1,8
55	6,7	5,8	5,3	4,9	4,5	4,3	4,2	3,9	3,7	3,4	2,5	1,7
60	6,5	5,7	5,2	4,8	4,4	4,2	4,1	3,8	3,6	3,3	2,4	1,6
65	6,4	5,6	5,1	4,7	4,3	4,1	4	3,7	3,5	3,2	2,3	1,5
70	6,3	5,5	5	4,6	4,2	4	3,9	3,6	3,4	3,1	2,2	1,4
75	6,2	5,4	4,9	4,5	4,1	3,9	3,8	3,5	3,3	3	2,1	1,3
80	6,1	5,3	4,8	4,5	4	3,8	3,7	3,4	3,2	2,9	2	1,2
85	6	5,2	4,7	4,4	3,9	3,7	3,6	3,3	3,1	2,8	1,9	1,1
90	5,9	5,1	4,6	4,3	3,8	3,6	3,5	3,2	3	2,7	1,8	1
95	5,8	5	4,5	4,2	3,7	3,5	3,4	3,1	2,9	2,6	1,7	0,9
100	5,7	4,9	4,4	4,1	3,6	3,4	3,3	3	2,8	2,5	1,6	0,8
105	5,6	4,8	4,3	4	3,5	3,3	3,2	2,9	2,7	2,4	1,5	0,7
110	5,4	4,7	4,2	3,9	3,4	3,2	3,1	2,8	2,6	2,3	1,4	0,6
115	5	4,1	3,9	3,1	3	2,8	2,7	2,1	2	2	1	0
120	4,8	3,5	3,1	2,8	2,5	2,2	2	1,7	1,6	1,7	0,7	-0,6

Annexe 14: Tableau des résultats des analyses de l'eau usée épurée avant et après filtration sur sable

temps (min)	Conductivité (μS)	pH	T°C	turbidité (NTU)
0	1041	7,78	24,05	41,45
15	1027	7,91	24,3	5,84
30	1033	7,95	23,7	3,54
45	1026	7,92	24,1	2,47
60	1032	7,99	23,8	4,56
75	1034	8	23,6	2,75
90	1030	8,06	23,7	1,91
105	1030	8,15	23,6	2,11
120	1033	8,03	23,7	6,07

Annexe 15: Tableau des résultats d'analyses de l'eau usées épurées avant et après filtration sur sable (suite)

Temp s (min)	Les unités sont en mg/l								
	Cl ⁻	Ca ²⁺	CO ₂ dissous	MES	DCO	dureté	TA	TAC	Mg ²⁺
0	213	7,61	40	100	105,6	315	0	46	284,14
60	142	7,21	20	50	57	309	0	45	69,83
120	142	7,09	16	0	28,8	308	0	44	69,66

Annexe 16: Tableau des résultats d'analyses de l'eau usées épurées avant et après filtration sur sable et sur CAG

Paramètres analysés	T°C	pH	Turbidité (NTU)	Conductivité (μS)
1h de filtration sur sable	23,8	7,99	4,56	1032
1h de filtration sur sable+ 1h sur CAG	23,5	8,97	3,81	419
1h de filtration sur sable+20h CAG	23,5	8,22	3,21	388

Annexe 17: Tableau des résultats d'analyses de l'eau usées épurées avant et après filtration sur sable et sur CAG (suite)

Paramètres analysés	Cl ⁻	Ca ²⁺	CO ₂ dissous	DCO	TAC	TA	Mg ²⁺
1h de filtration sur sable	142	7,21	20	57	45	0	69,83
1h de filtration sur sable+ 1h sur CAG	28,4	2,44	0	19,2	17	0	27,34
1h de filtration sur sable+20h CAG	28,4	1,48	0	9,6	17	0	18,07

Annexe 18: Tableau de comparaison entre filtration sur sable et filtration sur CAG

Paramètres analysés	Conductivité (µS)	Cl ⁻ (mg/l)	dureté (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
échantillon initial	1032	142	309	69,83
1h de filtration sur sable	1033	142	308	69,66
1h de filtration sur CAG	419	28,4	120	27,34

Annexe 19: Tableau de comparaison entre filtration sur sable et sur CAG (suite)

Paramètres analysés	Ca ²⁺ (mg/l)	CO ₂ dissout (mg/l)	DCO(mg/l)	TAC(mg/l)	turbidité(NTU)
échantillon initial	7,21	20	57	45	4,56
1h de filtration sur sable	7,09	16	28,8	44	6,07
1h de filtration sur CAG	2,44	0	19,2	17	3,81

Annexe 20: Tableau de comparaison entre filtration sur sable et filtration sur CAG (suite)

Paramètres analysés	coliforme totaux	germe totaux	coliforme fécaux	strptocoque	clostridium	salmonella	E.coli
échantillon initial	40	640	53	110		9	36
1h de filtration sur sable	22	210	22	52	4	4	15
1h de filtration sur CAG	20	202	19	49	0	1	18