



THÈSE DE DOCTORAT

En Génie des procédés

Modélisation de la filtration biologique des eaux usées sur sable de dune de la région de Ouargla

Par : Youcef TOUIL

Soutenu publiquement le 24 octobre 2016 devant le jury composé de :

AOUABED Aï	Professeur	U. Blida 1	Président
HADJ MAHAMMED Mahfoud	Professeur	U. Ouargla	Examineur
BOUALEM Salah	Professeur	ENSH/Blida	Examineur
NACEUR Mohamed Wahib	Professeur	U. Blida 1	Examineur
ISSAADI Rachid	Professeur	U. Blida 1	Directeur de thèse
AMRANE Abdeltif	Professeur	U. Rennes1 (France)	Co-Directeur de thèse

Blida 2016

Remerciements

J'exprime mes gratitude à la compassion du dieu, qui me donne la volonté, la patience et le courage pour réaliser ce travail.

Ce travail a été réalisé au laboratoire Bio géochimie des milieux désertique (université Kasdi Merbah Ouargla) Sous la direction de Monsieur Rachid ISSAADI Professeur à l'université Saad Dahlab à Blida et Monsieur Abdeltif AMRANE Professeur à l'université Rennes1.

Qu'il me soit permis de les remercier très sincèrement et de leurs exprimer ma profonde gratitude pour l'aide précieuse, les conseils et les encouragements qu'ils m'ont sans cesse prodigué afin de mener à terme ce travail.

J'exprime mes profondes remerciements à Monsieur Ali AOUABED Professeur à l'université Saad Dahlab à Blida d'avoir accepté de présider le jury de ma thèse.

Que Messieurs Haj Mahammad Mahfoud, Professeur à université Kasdi Merbah Ouargla, Boualem SALAH Professeur à l'école nationale superieur de l'hydraulique de Blida et Mohammed Wahib NACEURS Professeur à l'université Saad Dahlab à Blida que me font, l'honneur d'accepter de participer au jury de cette thèse, je trouve ici toute l'expression de ma gratitude et ma reconnaissance pour leurs aimable collaboration et les suggestions qu'ils ont bien voulu apporter à ce travail.

Je tiens à remercier très vivement tous les membres du laboratoire de Bio-géochimie des milieux désertique pour ses encouragements amicaux, sa sympathie et les services rendus. Je me réjouis de cet esprit d'équipe que nous avons su créer qui rend le cadre de travail très agréable. Je leur exprime tous ma reconnaissance pour tout ce qu'ils m'ont apporté.

Je remercie vivement L. SEKRIFA, H. MESSROUK, Y. GHERAIRI, F. GHERAIRI, K. KHENGAOUI, M. S. NEFSI et Z. BADLIS (membres de l'équipe traitement des eaux de notre laboratoire) pour leurs aides très précieuses.

Je suis heureux de témoigner ma gratitude à mon tuteur Monsieur H. BESSALAH professeur pour son soutien morale et physique ces précieux conseil durant toute ma formation.

Merci également à Monsieur Le Lannic du CMEBA de l'Université de Rennes 1, qui m'a aidé à analyser au microscope électronique à balayage (MEB)

Un grand remerciement à tous mes enseignants de la première année primaire à la poste graduation, qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance et de mes remerciements.

Je remercie infiniment mes amis E. AGOUN, F.KHELFAOIUI, A. DJEZAR, A. F. AMMOUR, S. HOULI F. DERNOUNI, MEBARKI, A. SEDRATI. M. A. DADEN, A. SEDRATI, L. FAKIH pour leur soutien moral.

Mes remerciements vont particulièrement à mon père, qui m'a élevé avec ce grand goût de dépassement, tout le temps me posant la question « *quads est ce que tu termine tes études pour reposer tes yeux malades* ». J'adresse des remerciements de même ordre à ma mère, qui m'a constamment encouragée et soutenue tout au long de ces années. Je ne saurai passer sous silence l'apport inestimable des autres membres de ma famille (frères, sœurs) qui m'ont soutenue, de près ou de loin durant mes études. C'est également le moment d'exprimer ma gratitude à mes enfants Abdelouahab, Ahmed Rafik, Mohammed Yacine et Amina pour l'amour qu'ils me témoignent et pour la part certaine qu'ils ont joué dans la réalisation de cette thèse.

Les mots me manquent pour remercier, à sa juste valeur, mon épouse KHADIDJA, pour ses soutiens moral et psychologique indispensables pour maintenir ce projet à flot au travers des aléas de la vie.

Résumé

Bien que l'éventail des techniques d'épuration et de traitement des eaux usées soit très diversifié dans le monde, nous nous sommes proposé d'étudier et d'évaluer la filtration biologique en exploitant un matériau local, tout en prenant en considération les deux aspects économique et environnemental. Le sable des dunes, comme filtre biologique, s'avère être intéressant à investir pour l'épuration des eaux usées dans le sud algérien.

Après la réalisation d'une étude cartographique, et le choix du matériau adéquat et sa caractérisation par la diffraction aux rayons X (DRX), en l'occurrence le sable de N'Goussa (région de Ouargla), nous avons entre autres constaté qu'il est formé principalement d'oxyde de silicium SiO_2 . L'analyse au microscope électronique à balayage (MEB) a montré que tous les sables sont des grains de forme anguleuse et la quasi totalité des grains visualisés sont en quartz enrobé par une couche d'argile mélangée avec des oxydes de fer.

Les carrières testées (09 sur 21 caractérisées), pour la filtration biologique des eaux usées, ont conduit à de très bons résultats en termes de l'abattement de la DCO et de la DBO_5 , ainsi que de l'élimination de bactéries.

Les résultats obtenus pour notre dispositif épuratoire (fosse septique et colonne de filtration), s'avèrent très intéressants, puisque les rendements dépassent les 80%, dès les premiers jours et jusqu'à 72 jours de fonctionnement.

L'étude sur le colmatage des différents filtres confectionnés, a fait apparaître trois types de colmatage : mécanique, organique et physique. L'évaluation de ce colmatage est réalisée à travers les mesures de la porosité de chaque couche, de la DCO et de la DBO_5 .

Du point de vue bactériologique, le rendement épuratoire en termes de l'élimination des germes totaux a atteint une valeur de 99,55%. Notons que pour les streptocoques totaux et fécaux, le rendement a atteint la valeur optimale de 99,99%.

Une étude de modélisation mathématique qui consiste en une interpolation polynomiale entre le temps de fonctionnement et les rendements d'abattement de la DCO et de la DBO_5 a montré une bonne adéquation des fonctions avec les résultats expérimentaux.

Mots clés : filtration lente, biofiltration, sable de dune, eau usée, pollution, épuration des eaux et modélisation

Abstract

Although the range of techniques of purification and treatment of wastewater is very diversified in the world, we propose to study and evaluate biological filtration using a local material, while taking into account the economic and environmental aspects. The sand dunes, as biological filter turns out be interesting to invest for the purification of wastewater in southern Algeria.

After conducting a mapping study, and the choice of the right material and its characterization by diffraction to rays X (DRX), in this case the sand is of N'Goussa (Ouargla region), we found among other things that it is made mainly of SiO₂ Silicon oxide. The scanning electron microscope analysis (SEM) showed that all the sands are angular grains and almost all of the visualized grains are quartz coated by a layer of clay mixed with iron oxides.

Tested careers (09 on 21 characterized), for the biological filtration of wastewater, have led to very good results in terms of the reduction of COD and BOD₅, as well as the elimination of bacteria.

The results for our purification device (septic tank and filtration column), prove to be very interesting, since yields rise above 80%, of the first days and up to 72 days of operation. The study on different made-up filters clogging, did appear three types of sealing: mechanical, organic, and physical. The assessment of this clogging is carried out through measures of the porosity of each layer, DCO and BOD₅.

From the bacteriological point of view, the purification performance in terms of the elimination of the total seeds reached 99,55%. Note that for total streptococci and fecal, performance has reached the optimum value of 99.99%.

A study of mathematical modeling that consists of a polynomial interpolation between the operating time and returns to the DCO and the BOD₅ reduction, showed a good fit of the functions with the experimental results.

Key words : Slow filtration, biofiltration, sand of dunes, wastewater, pollution, wastewater treatment and modeling.

الملخص

من المعلوم أن تقنيات تنقية ومعالجة مياه الصرف الصحي متنوعة جداً و معروفة في العالم، اقترحنا في دراستنا هذه تقييم طريقة الترشيح البيولوجي باستخدام مواد محلية، مع الأخذ بعين الاعتبار الجوانب الاقتصادية والبيئية. استعمال الكثبان الرملية، كعامل التنقية البيولوجية، محفزا للاستثمار في مجال تنقية مياه الصرف الصحي في جنوب الجزائر.

بعد إتمام دراسة الخرائط و اختيار عينة الرمل المناسبة و معايرتها باستعمال التحليل الطيفي (DRX) لرمال منطقة نقوسة (بمنطقة ورقلة)، تبين أنه يتكون أساسا من ثاني أكسيد السيليسيوم SiO_2 . و أبرز التحليل بالمجهر الإلكتروني (MEB) أن جميع الرمال عبارة عن حبيبات من الشكل الزاوي، و أغلبها، من الكوارتز المطلي بطبقة من الطين مختلطة مع أكاسيد الحديد. اختبار مصادر الرمل (09 من 21 المدروسة)، بالتنقية البيولوجية لمياه الصرف الصحي، قد أدت إلى نتائج جيدة جداً من حيث DCO و BOD_5 ، فضلا عن القضاء على البكتيريا.

كرس الجزء الأول من عملنا لدراسة فعالية الترشيح البيولوجي، باستخدام نظام لمعالجة مياه الصرف الصحي تتكون من خزان وعمود يحتوي على الرمل من كثبان منطقة نقوسة. نتائج العملية من الأيام الأولى وصولاً إلى 72 يوماً، مثيرة جداً للاهتمام لأن مردود التنقية تجاوز 80%. وكخطوة ثانية، شرعنا في إجراء دراسة انسداد مختلف المرشحات، من خلال تقييم الكثافة الظاهرة لكل طبقة من عمود الترشيح مع افتراض أن الكثافة الفعلية ثابتة. وهكذا وجدنا ظهور ثلاثة أنواع من الانسداد، وهي: الانسداد الميكانيكي (بسبب وزن الرمال وتدفق المياه) والانسداد العضوي (بسبب ترسب المواد العضوية) والانسداد المادي سببه ترسب المواد الصلبة العالقة. قد تم تقييم هذا الانسداد من خلال قيم المسامية لكل طبقة، DCO و BOD_5 .

من الناحية البكتريولوجية، كشف التعداد، لمجموعات مختلفة من الكائنات الحية الدقيقة، انخفاض عددها متغيراً من نوع إلى آخر. وصل مردود التنقية من حيث القضاء على الجراثيم، إلى القيمة 99.55%. مع الملاحظة أن لمجموع العقديات والبراز، تحصلنا على مردود أقصى قيمته 99.99%.

وقد حاولنا في الجزء الثالث من هذا العمل، القيام بنمذجة رياضية تتمثل في استيفاء متعدد الحدود بين وقت التشغيل والمردود حسب DCO و BOD_5 ، للعينات الخمسة و الستة للرمل، مع متعدد الحدود من الدرجة الرابعة. حصلنا بذلك على تناسب جيد للوظائف مع النتائج التجريبية.

الكلمات المفتاحية: الترشيح البطيء، الترشيح البيولوجي، رمل الكثبان، مياه مستعملة، التلوث، تنقية المياه و النمذجة.

Liste des tableaux

Tableau I. 1	Composition moyenne d'un effluent domestique	11
Tableau I. 2	Normes de rejet (Directives Européennes N°91/271/CEE du 21 mai 1991)	14
Tableau I. 3	Valeurs guides pour l'eau d'irrigation en Californie	15
Tableau I. 4	Niveau de qualité sanitaire des eaux usées traitées	16
Tableau II. 1	Propriétés physiques des matériaux filtrants	31
Tableau III. 1	Tableau représentant les paramètres physiques du sable des carrières sélectionnées	50
Tableau III. 2	La densité réelle	52
Tableau III. 3	La densité apparente	53
Tableau III. 4	Valeurs des paramètres chimiques des sables	55
Tableau IV. 1	Les dimensions des fosses septiques préparées	81
Tableau IV. 2	Caractéristiques du milieu filtrant (sable de dunes)	82
Tableau IV. 3	Mesure de la température, la conductivité électrique et le pH	85
Tableau IV. 4	Résultats des analyses bactériologiques : (germe/100ml) et les rendements d'élimination	91
Tableau IV. 5	caractéristiques de l'eau épurée	91
Tableau V. 1	Caractéristiques des filtres à sable	96
Tableau V. 2	Caractéristiques de l'eau usée utilisée	97
Tableau V. 3	Variation du pH et de la conductivité électrique en fonction de temps	98
Tableau VI. 1	Valeurs de la porosité après le fonctionnement des filtres	111
Tableau VI. 2	Les écarts types entre les valeurs de la porosité	112
Tableau VI. 3	Les valeurs du colmatage	114
Tableau VI. 4	Matière organique (%) en fonction de la profondeur et du temps de fonctionnement des filtres	116
Tableau VI. 5	Les valeurs du colmatage mécanique en (%) en fonction de la profondeur et du temps de fonctionnement des filtres	118
Tableau VI. 6	Les valeurs du colmatage organique en (%) en fonction de la profondeur et du temps de fonctionnement des filtres	119

Tableau VI. 7	les valeurs du colmatage physique en (%) en fonction de la profondeur et du temps de fonctionnement des filtres	120
Tableau VII. 1	Dénombrement des germes totaux	125
Tableau VII. 2	Dénombrement des streptocoques totaux et les rendements d'élimination	128
Tableau VII. 3	Le dénombrement des streptocoques fécaux et les rendements	129
Tableau VII. 4	Le dénombrement des coliformes totaux et le rendement	133
Tableau VIII. 1	Estimation des paramètres DCO sable de N'Goussa	146
Tableau VIII. 2	Estimation des paramètres DCO sable de Hassi Sayah	147
Tableau VIII. 3	Estimation des paramètres DCO sable de In Salah	148
Tableau VIII. 4	Estimation des paramètres DCO sable de Alia	149
Tableau VIII. 5	Estimation des paramètres DCO sable de Hassi Ben Abdellah	150
Tableau VIII. 6	Estimation des paramètres DBO ₅ du sable de N'Goussa	152
Tableau VIII. 7	Estimation des paramètres DBO ₅ du sable de Hassi Sayah	153
Tableau VIII. 8	Estimation des paramètres DBO ₅ du sable de In Salah	154
Tableau VIII. 9	Estimation des paramètres DBO ₅ du sable de Alia	155
Tableau VIII. 10	Estimation des paramètres DBO ₅ du sable de Hassi Ben Abdellah	156

Liste des figures

Figure I. 1	Epuration biologique aérobie	18
Figure I. 2	Cycles Biologiques d'une lagune	22
Figure I. 3	photo (a) : bord d'une lagune aéré photo (b) : aérateurs de surface amarrés	23
Figure III. 1	Carte représentant la délimitation du Sahara Septentrional	44
Figure III. 2	Courbes granulométriques des différentes carrières	47
Figure III. 3	Spectres du sable de N'Goussa	57
Figure III. 4	Analyse par MEB de 16 sables de carrières différentes (forme des grains)	60
Figure III. 5	Détail des grains	68
Figure IV. 1	Schéma de principe de la fosse septique toute eaux (FS _{TE})	73
Figure IV. 2	Le principe du séparateur de graisse	74
Figure IV. 3	Les dimensions d'une fosse septique	75
Figure IV. 4	Filière de traitement traditionnelle	77
Figure IV. 5	Filière de traitement autonome (actuellement utilisée)	77
Figure IV. 6	Photos du dispositif de traitement	80
Figure IV. 7	Schéma d'un répartiteur dans le filtre	83
Figure IV. 8	Variation du rendement d'abattement des MES en fonction du temps	87
Figure IV. 9	Variation du rendement d'abattement de la DCO en fonction du temps	88
Figure IV. 10	Variation du rendement d'abattement de la DBO ₅ en fonction du temps	89
Figure V. 1	Schéma représentant le pilote filtrant	95
Figure V. 2	Variation de la conductivité électrique en fonction du temps	99
Figure V. 3	Suivi hebdomadaire des rendements de réduction de la DCO pour différentes carrières	100
Figure V. 4	Suivi hebdomadaire des rendements de réduction de la DBO ₅ pour différentes carrières	101
Figure VI. 1	Photo du dispositif expérimental pour l'étude du colmatage	105

Figure VI. 2	Dispositif de filtration	106
Figure VI. 3	Schéma du pilote de filtration	110
Figure VI. 4	Variation de la porosité en fonction du temps pour les différentes couches	113
Figure VI. 5	Taux de colmatage en fonction du temps pour chaque couche	114
Figure VI. 6	Evolution de la teneur en MO en fonction du temps de fonctionnement	117
Figure VII. 1	Recherche et dénombrement des Germes totaux	124
Figure VII. 2	Recherche et dénombrement des Streptocoque totaux et fécaux	127
Figure VII. 3	Recherche et dénombrement des Coliformes fécaux	132
Figure VII. 4	Etat des grains après filtration	137

Table des matières

REMERCIEMENTS	i
RESUME.....	iii
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES.....	viii
INTRODUCTION.....	1
PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE	
CHAPITRE I : Généralités sur le traitement des eaux usées.....	4
1. Introduction.....	5
2. Définition et origines des eaux usées.....	5
3. Les différents types d'eaux usées.....	6
3.1. Les eaux usées domestiques (urbaines).....	6
3.2. Les eaux usées pluviales.....	6
3.3. Les eaux usées agricoles.....	7
3.4. Les eaux usées industrielles.....	7
4. Nature et composition des eaux usées.....	8
4.1. Température.....	8
4.2. Le pH.....	8
4.3. La conductivité électrique (CE).....	8
4.4. Les matières en suspension MES.....	9
4.5. Matières organiques.....	9
4.6. Matières azotées.....	10
4.7. L'aspect bactériologique des eaux usées.....	11
4.8. L'indice e biodégradabilité.....	13
5. Les normes.....	14
5. 1. Les normes de rejet.....	14
5.2. Les normes d'eau d'irrigation.....	15
6. Techniques de traitement des eaux usées.....	16
6.1. Traitement chimique.....	17
6.2. Traitement biologique.....	17
6.2.1. Traitement par les boues activées.....	19
6.2.2. Traitement par biofiltration.....	21
6.2.3. Traitement par lagunage.....	22
CHAPITRE II : Généralités sur la filtration.....	
1. Historique.....	26
2. Définition.....	27
3. Description de la filtration.....	27
4. Vitesse de filtration.....	29
5. But de filtration.....	29
6. Différents types de filtre.....	30

6.1. Filtres à sable rapides	30
6.2. Les filtres lents à sable.....	32
6.2.1. Caractéristiques des filtres lents.....	33
6.2.2. Avantages des filtres lents.....	34
6.2.3. Inconvénients des filtres lents.....	34
6.3. Filtres sous pression.....	34
6.4. Micro tamisage.....	35
7. Théorie de la filtration lente.....	35
7.1. Introduction.....	35
7.2. Purification dans un filtre lent.....	36
7.3. Mécanisme de la filtration lente.....	37
7.3.1. Mécanismes de transport.....	37
7.3.2. Mécanismes de fixation.....	38
7.3.3. Mécanisme de purification.....	38
8. Hydraulique de la filtration.....	39
9. Colmatage du filtre à sable.....	40
9.1. Définition.....	40
9.2. Types de colmatage.....	40
9.2.1. Colmatage physique.....	40
9.2.2. Colmatage chimique.....	40
9.2.3. Le colmatage biologique.....	40
PARTIE EXPERIMENTAL	
CHAPITRE III. Caractérisation des matériaux utilisés (support filtrant).....	
1. Introduction.....	43
2. Echantillonnage.....	43
2.1. Site d'échantillonnage.....	43
2.2. Méthode d'échantillonnage.....	43
3. Caractérisation des sables.....	45
3.1. Caractéristiques des particules élémentaires.....	45
3.2. L'analyse granulométrique.....	45
3.3. La surface spécifique.....	51
3.4. La porosité.....	51
3.4.1. La densité réelle P_r	52
3.4.2. La densité apparente P_a	52
3.5. La perméabilité.....	53
3.6. Le pH.....	54
3.7. La conductivité électrique.....	54
3.8. La teneur en matière organique (MO).....	54
3.9. La composition minéralogique.....	56

3.9.1. L'analyse de sable à la diffraction au rayon X (DRX)).....	56
3. 9.2. L'analyse des sables à la microscopie à balayage électronique (MEB)	57
4. Conclusion.....	70
CHAPITRE IV: Dispositif expérimental de traitement des eaux usées domestiques	71
1. Introduction.....	72
2. Définition.....	72
2. 1. Ouvrage de prétraitement.....	72
2. 1. 1. Définition de la fosse septique.....	73
2. 1. 2. Fonctionnement de la fosse septique.....	74
2. 1. 3. Dimensionnement de la fosse septique.....	75
2. 1. 4. Différents types des fosses septiques.....	75
2. 2. Ouvrage de traitement.....	77
2. 2.1. Epanchage sous terrain sur sol naturel.....	77
2. 2.2. Filtre à sable vertical non drainé.....	78
2. 2.3. Filtre à sable vertical drainé.....	78
2. 2.4. Filtre à sable horizontal.....	78
2. 2.5. Terre d'infiltration drainée.....	78
2. 2.6. Terre d'infiltration non drainée.....	78
2. 2.7. Dimensionnement des ouvrages de traitement.....	78
2. 3. Ouvrages d'évacuation.....	79
3. Conception du dispositif de traitement.....	79
3. 1. Ouvrage d'alimentation.....	79
3. 2. Ouvrage de prétraitement (fosse septique).....	79
3. 3. Ouvrage de traitement (filtre à sable).....	81
3. 4. Réseau hydraulique	82
4. Fonctionnement du dispositif.....	83
5. Suivie d'élimination des paramètres analytiques.....	84
5. 1. Les paramètres physiques.....	84
5. 2. Les matières en suspension (MES).....	86
5. 3. Elimination de la demande chimique en oxygène (DCO).....	87
5. 4. Elimination de la demande biologique en oxygène (DBO ₅).....	89
5. 5. Elimination bactériologique.....	90
5. 6. Caractéristiques des eaux après traitement.....	91
6. Conclusion.....	92
CHAPITRE V : Comparaison entre l'efficacité de filtration des différents sables.....	
1 Introduction.....	94
2 Préparation des pilotes.....	94
3. Fonctionnement des pilotes.....	96
4 Suivie des paramètres.....	97

4. 1. Paramètres physiques.....	97
4. 2. Suivie des paramètres chimiques.....	100
4. 2.1. Détermination et suivie de la DCO.....	100
4. 2.2. Détermination et suivie de la DBO ₅	101
5. Conclusion.....	102
Chapitre VI- Etude de colmatage des filtres.....	
1. Introduction.....	104
2. Conception du dispositif de traitement.....	104
3. Fonctionnement du dispositif.....	107
3. 1. Calcul des débits.....	107
3. 2. Qualité des eaux usées.....	108
3. 3. Mise en marche de dispositif.....	108
3. 4. Méthode de prélèvement.....	109
4. Détermination de la porosité.....	110
4.1. La détermination de la densité réelle.....	111
4.2 La détermination de la densité apparente.....	111
5. Evolution du colmatage.....	113
6. Evolution da la matière organique.....	115
7. Détermination des différents types de colmatage.....	118
7. 1. Colmatage mécanique.....	118
7. 2. Colmatage biologique.....	118
7. 3. Colmatage physique.....	119
7. 4. Interprétation des résultats de calcul des différents types de colmatage.	120
8. Conclusion.....	121
CHAPITRE VII : Elimination bactériologique.....	
1. Introduction.....	123
2. Dénombrement des germes totaux.....	123
2.1. Matériel et méthode.....	123
2.2. Résultats et discussion.....	125
3. Dénombrement des streptocoques totaux et fécaux.....	126
3.1. Matériels et méthode.....	126
3.2. Résultats et discussion.....	128
4. Dénombrement des coliformes totaux.....	130
4.1. Matériels et produits.....	130
4.2. Résultats et discussion.....	133
5. Analyse microscopique.....	133
6. Conclusion.....	137
CHAPITRE VIII : Modélisation de la filtration biologique.....	138
1. Introduction.....	139

2. Définition de la modélisation	139
3. Les différents modèles	139
3. 1. Les modèles de connaissance.....	140
3. 2. Les modèles “boîte noire”.....	140
3. 3. Les modèles “boîte grise”.....	140
4. Les étapes de la conception d’un modèle.....	141
5. Approximation au sens des moindres carrés.....	141
5. 1. Détermination du polynôme.....	141
5. 2. Pondération des données.....	142
5. 3. Choix du degré du polynôme.....	143
5. 4. Justesse « algébrique » du polynôme.....	144
6. Approximation des résultats expérimentaux.....	145
6. 1. Résultat d’approximation des rendements d’élimination de la DCO.....	145
6. 2. Résultat d’approximation des rendements d’élimination de la DBO_5	151
7. Conclusion.....	157
CONCLUSION.....	158
BIBLIOGRAPHIE.....	161

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les eaux usées constituent l'ensemble des déchets liquides produits par l'homme pour ses propres besoins et au cours de ses activités domestiques, agricoles et industrielles [1][2][3]. Les matières polluantes qui y sont contenues sont diverses; elles nécessitent des traitements différents et appropriés.

Malgré le développement des moyens techniques d'épuration, leur exploitation reste insatisfaisante et ne présente aucune rationalité. Ce qui exige une réorientation sensible vers la recherche d'une cohérence entre les impératifs économiques, sociaux et environnementaux.

L'utilisation des filtres à sable pour le traitement des eaux usées domestiques est connue depuis très longtemps, vers la fin de l'année 1900; Cette méthode est largement utilisée dans le traitement des eaux usées municipales des petites agglomérations et des zones isolées avec des petits débits d'eau usée [4][5].

Les filtres à sables sont des milieux naturels qui peuvent servir de supports filtrants dans l'épuration des eaux usées en assurant un double rôle : rétention des MES et fixation de la biomasse qui se développe autour des grains. Cette biomasse assure la biodégradation des composés organiques, carbonatés, phosphorés et azotés

L'utilisation d'un matériau local, tel que le sable des dunes, comme filtre biologique peut être une technique prometteuse pour l'épuration des eaux usées en Algérie.

En effet, le Sahara algérien couvre une superficie de plus de deux millions de kilomètres carrés, 84 % de la surface de l'Algérie et 25 % de la totalité du désert saharien et s'étend de l'atlas saharien et des Aurès jusqu'aux frontières maliennes, nigériennes et libyennes. Il regroupe 264 communes pour une population évaluée à trois millions et demi d'habitants localisés en majorité dans des petites agglomérations [6][7][8]. Le Sahara est un grand désert formé de vastes étendues sablonneuses. Trois reliefs distincts caractérisent ce vaste territoire : i : Les Ergs, formés par d'immenses zones couvertes de dunes, ii : Les Regs qui sont des étendues caillouteuses formés de graviers et de galets, iii : Les Hamadas qui sont recouvertes de plateformes rocheuses regroupées dans quatre grandes entités, à savoir : 1. Chott Melrhir. 2. Sahara septentrional. 3. Hoggar et Tassili. 4. Saoura [9].

Le Sahara septentrional d'une superficie d'un million de kilomètres carrés est très riche en gisements de sable dunaire tels que l'erg oriental et l'erg occidental qui présente environ 20% de sa surface avec des hauteurs dépassant 250m [10][11].

Notre travail est divisé en deux parties. La première sera consacrée à une synthèse bibliographique se divisée en deux chapitre : le premier s'articulant sur les caractéristiques des eaux usées et les techniques de traitements utilisée en Algérie et en particulier au Sahara. Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la filtration en particulier la filtration biologique et son utilisation dans le traitement des eaux usées, ainsi que les paramètres régissant le colmatage des filtres.

La seconde partie est consacrée à l'étude expérimentale. La caractérisation de quelques carrières de sables de dunes du Sahara septentrional (partie Algérienne) est présentée dans le troisième chapitre. Un dispositif de traitement des eaux usées domestiques constitué d'un ouvrage de prétraitement (une fosse septique toute eau) et d'un ouvrage de traitement (un filtre à sable à l'état naturel) est décrit dans le chapitre quatre ; puis l'évolution de quelques paramètres de pollution à savoir pH, CE, DCO et DBO₅ est observée afin de confirmer son efficacité dans les régions d'étude. Une étude comparative de l'efficacité de différents sables de la région d'étude est présentée dans le chapitre cinq.

L'un des problèmes majeur de cette technique de traitement est le colmatage. Une étude de ce phénomène est menée afin de voir leurs différents aspects et son mécanisme. Le chapitre sept qui suit est consacré à l'étude de l'efficacité de la filtration sur sable de dune en matière d'élimination bactériologique comme principale paramètre de pollution à contrôler après traitement des eaux usées pour valider leur utilisation.

Le dernier chapitre sera consacré à une contribution à la modélisation des rendements épuratoires de l'abattement des deux paramètres de pollution à savoir la DCO et la DBO₅ ; nous allons rechercher une relation mathématique entre les deux paramètres (le rendement en fonction du temps de travail du filtre).

Une conclusion synthétisant tous les résultats obtenus ainsi que des perspectives et quelques recommandations pour poursuivre ces travaux sont présentés en fin de manuscrit.

PARTIE 1

CHAPITRE 1

I. Généralités sur le traitement des eaux usées

I.1.Introduction

Le propre de l'activité humaine est de consommer et donc de produire et de rejeter des déchets. Les déchets solides ou liquides ont une propension naturelle à aller de haut en bas et de rejoindre tôt ou tard un ruisseau, une rivière, un fleuve et enfin la mer ou les zones humides ou encore les nappes d'eau souterraines. Ils constituent alors la pollution de l'eau ou des sols pour les pollutions diffuses les plus pernicieuses [12].

Le terme (traitement d'eau) englobe tout à la fois l'épuration des eaux de rejets et la purification de l'eau pour la rendre propre à la consommation humaine. C'est un domaine d'importance croissante depuis de nombreuses années puisque l'eau potable est une ressource vitale et fragile.

Un procédé de traitement est choisi en fonction de la nature et de l'origine de la pollution visée, autrement dit des propriétés physico-chimiques des polluants contenus dans l'effluent traité et de leur concentration. En effet, un procédé efficace contre une pollution donnée peut s'avérer inadapté contre une autre pollution. Par exemple, la non-biodégradabilité voire la toxicité de certains polluants peut proscrire l'utilisation d'un traitement par boues activées. De plus, la concentration de matières organiques et le débit de l'effluent sont des facteurs importants à prendre en considération [13].

I. 2. Définition et origines des eaux usées

Les eaux usées résiduaires urbaines (ERU), ou eaux usées, dans les réseaux d'égouts comme leur nomination indique ; sont les eaux déjà utilisées, elles constituent d'un mélange de déchets liquides, de matières solides, de débris et de polluants chimiques provenant essentiellement de l'activité humaine. (Résidentielle, institutionnelle, commerciale et industrielle). Du fait de cette charge polluante, il est important d'épurer ces eaux, au niveau de stations d'épuration, avant de les rejeter dans l'environnement ou le milieu récepteur. En effet, ce rejet peut avoir des conséquences néfastes pour le milieu récepteur, en particulier pour les organismes vivants qu'il héberge, mais également pour l'homme ou pour les activités qu'il réalise au niveau de ce milieu [1] [2] [3].

I.3. Les différents types d'eaux usées

Les charges polluantes contenues dans les eaux usées ont des origines diverses. On s'accorde à considérer l'industrie comme le principal agent polluant.

Les 3 principales catégories de pollueurs sont : l'industrie, l'agriculture, et l'urbanisation. Le rejet de ces eaux dans le milieu naturel est la principale pollution qui affecte nos cours d'eaux et plus généralement tout le milieu naturel [14].

I.3.1. Les eaux usées domestiques (urbaines):

Ce sont les eaux usées issues des habitations ou des sanitaires des entreprises, Elles constituent généralement l'essentiel de la pollution et se composent :

- Des eaux ménagères qui contiennent des matières en suspension provenant du lavage des substances alimentaires et des produits détergents utilisés pour le lavage et ayant pour effet la solubilisation des graisses ;
- Des eaux de salle de bains chargées en produits utilisés pour l'hygiène corporelle, généralement des matières grasses hydrocarbonées;
- Des eaux de vannes qui proviennent des sanitaires, très chargées en matières organiques hydrocarbonées, en composés azotés, phosphorés et en microorganismes.
- Des eaux des activités particulières [2] [14].

I.3.2. Les eaux usées 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. Les déchets solides ou liquides déposés, par temps sec, sur ces surfaces sont entraînés dans le réseau d'assainissement par les premières précipitations qui se produisent ;
- La remise en suspension des dépôts des collecteurs. Par temps sec, l'écoulement des eaux usées dans les collecteurs du réseau est lent, ce qui favorise le dépôt de matières décantables. Lors d'une précipitation, le flux d'eau plus important permet la remise en suspension de ces dépôts.

Elles sont de même nature que les eaux usées domestiques, avec en plus, des métaux lourds et des éléments toxiques provenant essentiellement de la circulation automobile [3][14].

I.3.3. Les eaux usées agricoles :

Provenant de l'élevage, dont les fumiers et lisiers, riches en matières organiques azotées, mais dont certains composés, les nitrates par exemple, peuvent être entraînés, en raison de leur grande solubilité, par les eaux de lessivage et de percolation [14] [15]. L'utilisation sans cesse croissante des engrais et des pesticides pour atteindre et maintenir des rendements plus élevés contribue à la pollution des eaux [16].

I.3.4. Les eaux usées industrielles :

Avec le développement rapide de diverses industries, une énorme quantité d'eau douce est utilisée comme matière première, comme un moyen de production (eau de process), une deuxième à des fins de refroidissement. De nombreux types de matières premières, produits intermédiaires et les déchets sont amenés dans l'eau lorsque l'eau passe à travers le processus industriel. Donc, en fait, l'eau usée est un «sous-produit essentiel" de l'industrie moderne, et il joue un rôle majeur en tant que sources de pollution dans la pollution de l'environnement de l'eau [17]. Leur composition est liée au type d'industrie implantée dans la commune. Elle dépend d'une multitude de paramètres (type d'industrie, production, nettoyage,...), les différentes étapes du procédé industriel, l'état des équipements,...etc. Par ailleurs, il existe des caractéristiques communes entre les effluents de la même industrie.

En termes de volume et type de polluants, les effluents industriels présentent le plus souvent une charge importante et un risque de dysfonctionnement structurel et fonctionnel des réseaux d'assainissement et des dispositifs de traitement des eaux usées. Ces risques sont d'autant plus grands que les industries sont localisées en amont du réseau d'assainissement.

Parmi les polluants transitant dans les eaux usées d'origine industrielle nous pouvons citer les métaux, les toxines organiques, les huiles et graisses, les hydrocarbures, ...etc [2] [15][18].

I. 4. Nature et composition des eaux usées

Les matières polluantes contenues dans les eaux usées urbaines sont diverses; suivant leur nature, elles n'entraînent pas le même type de nuisance et nécessitent des traitements différents et appropriés. La composition et la quantité des eaux usées sont liées aux modes de vie. Elles proviennent essentiellement des activités domestiques et industrielles. La composition des eaux usées est étudiée par le biais de diverses mesures physiques, chimiques et biologiques [19].

I.4.1. Température

Il est primordial de connaître la température d'une eau. En effet, elle joue un rôle très important dans la solubilité des sels et surtout des gaz, et la détermination du pH.

La mesure de la température est très utile pour les études limnologiques et le calcul des échanges. Elle agit aussi comme un facteur physiologique agissant sur le métabolisme de croissance des micro-organismes vivant dans l'eau [20].

I.4.2. Le pH

Le pH mesure la concentration des ions H^+ dans l'eau. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibres physico-chimiques. La valeur du pH peut altérer la croissance et la reproduction des micro-organismes existants dans une eau. La plupart des bactéries peuvent croître dans une gamme de pH comprise entre 5 et 9, l'optimum est situé entre 6,5 et 8,5, des valeurs de pH inférieures à 5 ou supérieures à 8,5 affectent la croissance et survie des micro-organismes aquatiques selon l'organisation Mondiale de la Santé (OMS) [20].

I.4.3. La conductivité électrique (CE)

La mesure de la conductivité de l'eau nous permet d'apprécier la quantité des sels dissous dans l'eau (chlorures, sulfates, calcium, sodium, magnésium...). Les matières organiques et colloïdales n'ont que peu de conductivité. Dans les eaux résiduaires cette mesure ne donnera pas forcément une idée immédiate de la charge du milieu. Elle est plus importante lorsque la température de l'eau augmente. La conductivité électrique d'une eau usée dépend essentiellement de la qualité de l'eau potable utilisée et du régime alimentaire de la population et des activités industrielles [20].

1.4.4. Les matières en suspension MES

La pollution d'une eau peut être associée à la présence d'objets flottants, de matières grossières et de particules en suspension 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 et minérales, constituent un paramètre important qui marque bien le degré de pollution d'une eau usée. Cette pollution particulière est à l'origine de nombreux problèmes comme ceux liés au dépôt de matières, à leur capacité d'adsorption physico-chimique ou aux phénomènes de détérioration du matériel (bouchage, abrasion, ...). Leur principal effet est de troubler l'eau, diminuant ainsi le rayonnement lumineux indispensable pour une bonne croissance des végétaux au fond des cours d'eau : c'est la turbidité

Il existe deux grands types de méthode de détermination des MES:

- Les méthodes gravimétriques résultant d'une séparation physique des MES de l'eau par filtration ou centrifugation;
- Les méthodes optiques qui mesurent l'absorption ou la réfraction d'un rayonnement lumineux par les particules en suspension. Cette détermination est réalisée par turbidimétrie.

Les MES sont exprimées en milligramme par litre [2] [21].

1.4.5. Matières organiques

La Demande Biochimique en Oxygène (DBO) est la quantité d'oxygène nécessaire à la dégradation de la matière organique biodégradable d'une eau par le développement des micro-organismes, pendant 5 jours à 20 °C, on parle alors de la DBO₅. Elle est très utilisée pour le suivi des effluents urbains. Elle est exprimée en mg O₂/l.

La Demande Chimique en Oxygène (DCO) est la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder la matière organique (bio- dégradable ou non) d'une eau à l'aide d'un oxydant, le bichromate de potassium. Ce paramètre offre une représentation plus ou moins complète des matières oxydables présente dans l'échantillon. Elle est exprimée en mg O₂/l. Généralement la DCO est 1,5 à 2 fois la DBO₅ pour les eaux usées urbaines et de 1 à 10 pour tout l'ensemble des eaux résiduaires industrielles. La relation empirique de la matière organique (MO) en fonction de la DBO₅ et la DCO est donnée par l'équation suivante [21] [22]

$$MO = (2 DBO_5 + DCO)/3$$

Le carbone organique total COT représente la teneur en carbone lié à la matière organique, et repose sur une mesure de CO_2 après oxydation complète. Il est mesuré par le COT mètre et exprimé en $mg.L^{-1}$ [20]

I.4.6. Matières azotées:

L'azote rencontré dans les eaux usées peut avoir un caractère organique ou minéral, il se présente sous quatre formes:

- L'azote organique se transforme en azote ammoniacal.
- L'azote ammoniacal (NH_4) traduit un processus d'ammonification de la matière organique azotée. Les ions ammoniums subissent une nitrification par action des bactéries nitrifiantes.
- L'azote nitreux (NO_2^-) provient d'une oxydation incomplète de l'azote ammoniacal ou par une réduction des nitrates par dénitrification. Les nitrites sont instables et sont rapidement transformés en nitrates.
- L'azote nitrique (NO_3^-) est produit par nitrification de l'azote ammoniacal. Il joue un rôle important dans le développement des algues et participe au phénomène d'eutrophisation.

Dans les eaux usées, l'azote se trouve principalement sous forme ammoniacale. Les concentrations des formes oxydées de l'azote sont faibles.

La qualité des eaux usées se détermine par des analyses et des mesures physicochimiques et biologiques bien déterminées. Pour une eau usée domestique, les caractéristiques physicochimiques sont représentées dans le tableau I. 1 [22].

Tableau I. 1 : Composition moyenne d'un effluent domestique

Paramètres	valeur
pH	7,5 à 8,5
DBO ₅	100 à 500 mg O ₂ /L
DCO	300 à 1000 mg O ₂ /L
<i>MES</i>	100 à 400 mg /L
<i>NK</i>	30 à 100 mg /L
<i>N-NH₄</i>	20 à 80 mg /L

I.4.7. L'aspect bactériologique des eaux usées:

Les eaux usées contiennent tous les micro-organismes excrétés avec les matières fécales. Cette flore entérique normale est accompagnée d'organismes pathogènes. L'ensemble de ces organismes peut être classé dans les grands groupes suivants : virus, bactéries, protozoaires, vers et champignons. La recherche de l'ensemble de ces germes pathogènes est impossible et serait beaucoup trop onéreuse ; les espèces sont nombreuses (Salmonella, Shigella..) de leur recherche est souvent complexe et laborieuse.

Les micro-organismes pathogènes véhiculés par l'eau étant pour la plupart d'origine fécale il est donc suggéré de retenir comme principe de contrôler la recherche de certaines espèces ou groupe de bactéries comme témoins indicateurs de contamination ou pollution fécale. Ces germes tests sont des bactéries commensales qui sont naturellement présentes dans les intestins des hommes et des animaux à sang chaud, et excrétées régulièrement en abondance dans les matières fécales [23].

- **Les bactéries**

Les bactéries sont des organismes unicellulaires dont les dimensions sont de l'ordre du micromètre; on doit donc utiliser un microscope pour les observer. La concentration en bactéries pathogènes est de l'ordre de 10⁴/l, parmi les plus communément rencontrées.

Le caractère pathogène est le propre de certains types de bactéries ; toutefois il existe des germes habituellement dénués de virulence, qui peuvent manifester une certaine pathogénicité quand les conditions du milieu leur sont favorables ou qu'ils pénètrent, par accident, dans une voie biologique inhabituelle. Le contrôle systématique de la qualité microbiologique des eaux dont le but serait de vérifier l'absence de tous germes pathogènes, procède le plus souvent par voie indirecte en vérifiant seulement l'absence de germes tests de contamination fécale [24], parmi les bactéries on peut citer :

Les coliformes :

Les coliformes sont des bacilles à Gram-, non sporulé, aérobies ou anaérobies facultatif. Les coliformes sont intéressants car un très grand nombre d'entre eux vivent dans le tube digestif de l'homme et des animaux a sang chaud [24].

A partir de leur habitat, on peut définir en effet deux catégories de coliformes :

Coliformes d'origine fécale : rencontrés dans les matières fécales humaines ou animales, les eaux usées et les eaux de surfaces polluées. Leur température optimale de croissance se situe à 37°C, mais ils sont capables de se multiplier à des températures élevées, jusqu'à 44°C : Ce sont des coliformes thermo tolérants [24]

Coliformes saprophytes : Rencontrés dans les eaux naturelles et les sols incultes ces espèces nouvellement mise en évidence, sont largement répandues dans les eaux de distribution et peuvent donc être confondues avec les coliformes fécaux. Par contre leur température optimale de croissance se situe entre 30 °C et 34 °C, elles sont incapables de se multiplier à 44° C : Ce sont des coliformes psychrotrophes qui ne font pas partie de la flore fécale des animaux à sang chaud [25].

Les streptocoques fécaux : Les streptocoques fécaux sont des bactéries à Gram-, sphériques à ovoïdes formant des chaînettes, non sporulées, se cultivant en anaérobiose à 44°C et à pH 9,6. La recherche de streptocoques fécaux ne doit être considérée que comme un complément à celle des coliformes et en particulier des coliformes thermo tolérants. La présence de streptocoques fécaux doit s'accompagner de la présence de coliformes thermo tolérants pour être le signe d'une contamination fécale [25].

Le clostridium sulfito- réducteur :

Les clostridiiums sulfito-réducteur sont des bacilles a Gram+ anaérobies sporogènes. Ils se rencontrent normalement dans les matières fécales humaines et

animales. Leur spores peuvent survivre dans l'eau et l'environnement pendant plusieurs mois elles ne seraient pas toujours inactivées par les rayons ultraviolets. Les germes réduisent le sulfite de sodium en sulfure [24].

Les germes pathogènes :

Les salmonelles :

Les salmonelles sont les agents de gastro-entérites d'origines alimentaires. Salmonelles typhi, est responsable de la fièvre typhoïde [26]

Les salmonella peuvent êtres strictement adaptées à un hôte, elles peuvent aussi être ubiquistes, c'est - à- dire rencontrées dans un grand nombre d'espèces animales [24].

Vibron cholérique :

Les vibrons cholériques sont des bactéries sporulées à Gram- incurvées en virgule et mobiles par une ciliature polaire le plus souvent monotriche en milieu liquide. Les vibrons sont aëro-anaérobies présentant des réactions oxydase positif généralement nitrate réductase.

L'homme se contamine par ces bactéries par la voie orale à partir d'une eau souillée par les selles de malades cholériques ou porteurs sains [23].

I.4.8. L'indice de biodégradabilité

La détermination du procédé d'épuration à appliquer se fait sur la base du coefficient de biodégradabilité «K» défini par le rapport:

$$K = \frac{DCU}{DB\zeta}$$

En général si:

- $K = 1$ toute la matière organique est biodégradable;
- $1 < K < 2.5$ l'épuration biologique s'effectue normalement;
- $2.5 < K < 3$ traitement biologique associé à un traitement physicochimique;
- $K > 3$ un traitement physicochimique est envisagé [20].
-

I.5. Les normes :

I. 5. 1. Les normes de rejet :

La directive européenne n° 91/271/CEE du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux résiduaires urbaines, transposée en droit français par l'arrêté du 22 décembre 1994, fixe des niveaux de rejet différenciés en fonction du milieu récepteur, et du volume d'eau usée rejeté par habitant est résumé dans le tableau I. 2

Tableau I. 2 : Normes de rejet (Directives Européennes N°91/271/CEE du 21 mai 1991)

	Capacité en EH	Paramètre	Concentration maximale	Rendement minimum
Zones normale	2.000 à 10.000	DBO5 (1)	25 mg/l	70.00%
	> 10.000		25 mg/l	80.00%
	Toutes	DCO (1)	125 mg/l	75.00%
	Toutes	MES (1)	35 mg/l	90.00%
Zone sensible	10.000 à 100.000	NGL (2)	15 mg/l	70.00%
	> 100.000		10 mg/l	70.00%
	10.000 à 100.000	PT (2)	2 mg/l	80.00%
	> 100.000		1 mg/l	80.00%

(1) A respecter sur échantillon moyen journalier.

(2) A respecter en moyenne annuelle, en complément des exigences définies en zone normale [27][28].

I. 5.2. Les normes d'eau d'irrigation.

Les normes ont pour principal objectif la limitation voire l'élimination des risques sanitaires. Ainsi, pour l'irrigation sans restriction, c'est-à-dire toutes cultures autorisées et sans limitation d'irrigation, la pollution microbiologique selon l'OMS doit être de 1000 coliformes fécaux/100ml et de moins de 1 œuf d'helminthe. Dans certains pays, les normes sont encore plus sévères concernant les eaux usées traitées et destinées à l'irrigation des légumes consommés crus ; une eau de qualité potable est exigée pour une telle application.

Les normes américaines sont encore plus restrictives en ce sens qu'elles préconisent une absence totale de germes tests et moins de 2,2 coliformes totaux/100ml. A titre d'exemple, le tableau I. 3 présente les valeurs utilisées dans l'Etat de Californie et le tableau I. 4 nous donne le niveau de qualité sanitaire des eaux usées traitées en France.

Tableau I. 3 : Valeurs guides pour l'eau d'irrigation en Californie [29]

Paramètre	Valeur limite
Température (°C)	35
pH	6.5 à 8.4
Conductivité (CE) en ms/cm à 25 °C	12
Matière en suspension	
Azote nitrique (N-NO ₃) (mg/l)	30
Sulfate (SO ₄ ⁻²)(mg/l)	250
Salinité STD (mg/l)	7680
Coliformes fécaux	1000/100ml
Salmonelle	Absence dans 5l
Vibron cholérique	Absence dans 450ml

Tableau I. 4 : Niveau de qualité sanitaire des eaux usées traitées Modifié par ARRÊTÉ du 25 juin 2014 [30]

Paramètres	Niveau de qualité sanitaire des eaux usées traitées			
	A	B	C	D
Matières en suspension (mg/L)	< 15	Conforme à la réglementation des rejets d'eaux usées traitées pour l'exutoire de la station hors période d'irrigation		
Demande chimique en oxygène (mg/L)	< 60			
Escherichia coli (UFC/100mL)	≤ 250	≤ 10 000	≤ 100 000	-
Entérocoques fécaux (abattement en log)	≥ 4	≥ 3	≥ 2	≥ 2
Phages ARN F-spécifiques (abattement en log)	≥ 4	≥ 3	≥ 2	≥ 2
Spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices (abattement en log)	≥ 4	≥ 3	≥ 2	≥ 2

I.6. Techniques de traitement des eaux usées :

L'épuration consiste à éliminer les matières minérales et organiques en suspension et en solution, ainsi qu'un certain nombre de déchets divers afin d'obtenir une eau épurée conforme aux normes de rejet. Une grande majorité de ces polluants est transférée de la phase liquide vers une phase concentrée boueuse. Une station d'épuration comporte donc des installations de traitement des eaux et des dispositifs de traitement des boues produites.

D'une manière générale dans le domaine du Traitement des Eaux, les procédés naturels ont souvent été « imités » par « l'homme de l'Art ». Très souvent, ce dernier n'a fait qu'améliorer ces processus naturels en les rendant plus performants.

On peut ici citer le cas de la plupart des procédés de base de l'épuration des eaux :

1. La décantation mise en œuvre dans la clarification naturelle des eaux de lacs,
2. La coagulation-floculation, processus naturel de clarification lié au mélange des eaux douces turbides des rivières avec l'eau de mer au niveau des estuaires,
3. La filtration par le sol clarifiant les eaux de nappes ou de source,
4. L'évaporation, processus également naturel participant au cycle de l'eau en donnant à l'eau de pluie une très grande pureté,
5. La dégradation biologique des polluants assurant l'auto épuration des rivières.

Tous ces procédés naturels constituent aujourd'hui encore les procédés les plus importants du traitement et de l'épuration des eaux [14][31].

Il existe plusieurs techniques de traitement des eaux usées. On peut les classer comme suit :

I.6.1. Traitement chimique

Lorsqu'un effluent contient des toxiques, il ne doit pas être introduit dans un traitement biologique car il limiterait, de fait, l'activité des micro-organismes et donc la capacité d'épuration de l'écosystème dépolluant. La plupart des effluents rejetés par l'industrie chimique et l'industrie des métaux contiennent des toxiques et font l'objet, si ce n'est d'un traitement particulier, au moins d'un prétraitement. Les réactifs utilisés sont adaptés à la nature de chaque substance toxique à neutraliser [32].

I. 6.2. Traitement biologique

Le traitement biologique des eaux usées est le procédé qui permet la dégradation des polluants grâce à l'action de micro-organismes. Ce processus existe spontanément dans les milieux naturels tels que les eaux superficielles suffisamment aérées. Une multitude d'organismes est associée à cette dégradation selon différents cycles de transformation. Parmi ces organismes, on trouve généralement des bactéries, des algues, des champignons et des protozoaires. Cette microflore, extrêmement riche, peut s'adapter à divers types de polluants qu'elle consomme sous forme de nourriture (substrats). Il est ainsi possible d'utiliser systématiquement cette microflore dans un processus contrôlé pour réaliser l'épuration des eaux résiduaires.

La pollution des eaux résiduaires urbaines et industrielles peut se caractériser selon son état (solide, colloïdal ou en suspension) et sa nature (minérale ou organique).

L'élimination de la pollution organique sous forme finement colloïdale ou en solution, est essentiellement le fait de procédés d'épuration biologiques. Dans l'état actuel de nos connaissances, la voie biologique constitue, en raison de son efficacité et de sa rusticité, le mode le plus utilisé d'épuration secondaire des eaux résiduaires urbaines et de certaines eaux industrielles.

Son principe est de provoquer en présence ou non d'oxygène une prolifération plus ou moins contrôlée de micro-organismes capables de dégrader les matières organiques apportées par l'effluent. Il s'agit en fait d'un véritable transfert d'une forme non accessible de la pollution (matières colloïdales et dissoutes) en une forme manipulable (suspension de microorganismes).

Les micro-organismes responsables de l'épuration s'agglomèrent sous forme de floes et se développent en utilisant la pollution comme substrat nécessaire à la production d'énergie vitale et à la synthèse de nouvelles cellules vivantes (Figure I. 1). Une partie des éléments polluants qui n'est pas dégradée biologiquement peut être adsorbée et incorporée aux floes de boues [33][34].

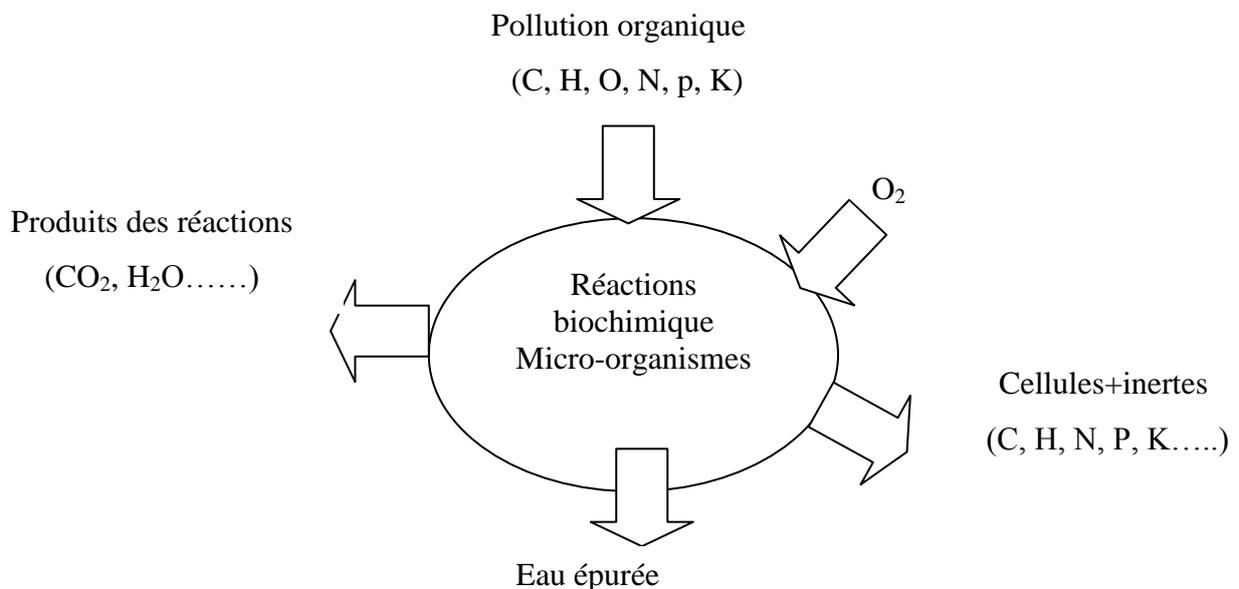


Figure I. 1 : Epuration biologique aérobie [03][34]

I. 6.2.1. Traitement par les boues activées [33]

Les boues activées sont utilisées comme épuration biologique dans le traitement des eaux usées. La boue activée, composée essentiellement de micro-organismes flocculant, est mélangée avec de l'oxygène dissous et de l'eau usée. C'est ainsi que les micro-organismes de la boue activée entrent constamment en contact avec les polluants organiques des eaux résiduaires, ainsi qu'avec l'oxygène, et sont maintenus en suspension.

L'aération des eaux résiduaires a lieu dans des bassins en béton qui ont une forme appropriée en fonction du système d'aération, du mode d'introduction des eaux et de la boue activée. On appelle ces bassins des bassins d'aération ou bassins à boues activées. Afin de maintenir une biomasse suffisante, la boue est recyclée par pompage dans le bassin de décantation secondaire.

Il existe de nombreux systèmes différents pour l'aération dans le procédé à boues activées. Le choix dépend de la composition de l'eau résiduaire, ainsi que des conditions de construction et d'exploitation de l'installation au point de vue technique et économique. Les trois modes essentiels sont : pneumatique (aération sous pression), mécanique (uniquement aération de surface) et aération combinée

Principe physico-chimique

Par des processus biologiques, les matières organiques contenues dans l'eau résiduaire sont ingérées par cette faune microscopique et transformée en biomasse vivante, c'est-à-dire oxydées par respiration.

De cette façon, les matières organiques présentes dans l'eau résiduaire sous forme dissoute et colloïdale sont transformées en une matière corpusculaire, ce qui la rend sédimentable dans des bassins de décantation secondaire.

La boue activée se compose principalement d'organismes hétérotrophes, c'est-à-dire qui utilisent des matières organiques et acquièrent de l'énergie par oxydation ou respiration. Ces organismes prélèvent alors dans la solution les matières ayant des caractéristiques nutritives. Ils construisent des substances organiques à partir de substances inorganiques et libèrent de l'oxygène. Ce dernier est utilisé pour la dégradation par oxydation de substances organiques en substances inorganiques.

Outre les impuretés organiques contenant du carbone, les composés azotés peuvent aussi être oxydés, jusqu'au stade du nitrate. En effet, on s'efforce aujourd'hui de diriger et

maîtriser les phénomènes de nitrification-dénitrification qui se déroulent d'une façon plus ou moins fortuite et incontrôlée dans des phases aérobies d'épuration. Le procédé des boues activées est ici particulièrement approprié : le nitrate, produit obligatoirement en même temps dans les installations de boues activées à faible charge, y est éliminé par dénitrification. Grâce à la dénitrification biologique, les nitrites et nitrates peuvent aussi être éliminés des eaux résiduaires qui ne sont pas d'origine biologique.

L'eau résiduaire pré clarifiée est introduite dans le bassin d'aération, où elle est aérée pendant environ quatre heures jusqu'à l'obtention des exigences minimales pour le rejet dans l'émissaire ou pour passer à la phase de traitement tertiaire. L'aération est théoriquement de 1 à 3 g/l. L'eau résiduaire traverse le bassin de décantation secondaire où la boue se dépose. Une partie de la boue déposée est réintroduite dans le bassin à boues activées. La boue excédentaire produite est pompée hors du bassin de décantation secondaire et amenée vers le traitement des boues.

Performance

Le procédé à boues activées est actuellement le procédé le plus valable d'épuration biologique des eaux résiduaires. Ses grands avantages sont :

- sécurité en ce qui concerne le degré d'épuration des eaux traitées, du fait que les facteurs d'influence les plus importants, par exemple apport d'eau résiduaire, et de masse bactérienne (boue activée), sont contrôlables,
- une plus grande efficacité qu'avec les lits bactériens, du fait que ce procédé est beaucoup moins dépendant de la température,
- une phase de démarrage plus courte (moins de deux semaines) par rapport aux lits bactériens (4 à 6 semaines),
- absence totale d'odeurs et de mouches.

b. Traitement biologique par les bioréacteurs.

La bioréaction vise à accélérer la production de biogaz. Elle consiste à récupérer les lixiviats pour les réinjecter dans la masse des déchets. Apportant humidité et nutriments aux bactéries à l'œuvre dans le massif, ils accélèrent le processus de dégradation facilitant ainsi la récupération du méthane utilisable à des fins énergétiques. La combustion du méthane offre un avantage à la fois écologique et économique : elle réduit son effet de serre et elle constitue une ressource énergétique non négligeable [03][34][35]

I. 6.2.2. Traitement par biofiltration

Les biofiltres sont des procédés biologiques de traitement des eaux. Ils font partie des procédés dits "à biomasse fixée". Historiquement, ce sont les premiers procédés utilisés pour le traitement des eaux, bien avant l'invention des procédés de "boues activées". Ils ont connus une recrudescence d'usage dans les années 80-90, et sont aujourd'hui en concurrence avec les procédés à biomasse attachée et à lit mobile.

L'élément central du réacteur est une couche de matériau granulaire (de type sable, charbon actif, argile, billes de polystyrène, etc.), plus ou moins épaisse (de 50 cm à 1,5 m, pour les usages les plus courants) à travers laquelle l'eau à traiter est injectée. Cette couche de matériau filtrant est appelée lit filtrant.

Dans ce type de procédés, l'élimination de la pollution est accomplie par le couplage de deux effets distincts : - l'effet physique de filtration : les matières particulaires en suspension s'accumulent à la surface des grains du matériau filtrant au fur et à mesure qu'ils traversent le lit. On parle de filtration en profondeur (par opposition à la filtration de type membranaire). - l'effet biologique : dans des conditions favorables (présence de substrat pour la croissance des microorganismes), un biofilm se développe à la surface du matériau filtrant. Les microorganismes constituant le biofilm participent à l'élimination de la pollution soluble présente dans l'eau à traiter, ainsi qu'à la dégradation (hydrolyse puis assimilation) des matières particulaires qui se sont déposés à la surface du matériau granulaire par filtration.

Selon les usages et les objectifs de traitement, les conditions d'exploitation des biofiltres sont aérobie (présence de dioxygène, O_2), anoxiques (absence dioxygène, présence de nitrates, NO_3^{2-}) ou anaérobie (absence de dioxygène et de nitrates).

L'aération nécessaire au maintien de conditions aérobies peut être i) passive : le lit filtrant n'est pas saturé en eau, l'aération se fait naturellement quand l'eau rigole à travers le lit filtrant, ou ii) active, le lit filtrant étant saturée en eau, l'air est insufflée dans le filtre grâce à des suppresseurs.

Selon son usage, un biofiltre doit être lavé de manière plus ou moins régulière pour éviter son colmatage par un excès de matières accumulées dans le filtre ou un excès de croissance de la biomasse. Les problèmes de colmatage des biofiltres sont à l'origine des problèmes d'exploitation les plus récurrents. Pour ces raisons, les biofiltres sont des procédés relativement sensibles et nécessitent une attention particulière. La biofiltration est

une technique biologique ayant fait l'objet de nombreuses applications industrielles pour la dépollution des gaz ou de l'eau. Cette technique consiste à forcer le passage du gaz ou de l'effluent à traiter au travers un matériau granulaire sur lequel sont fixés les micro-organismes épurateurs. L'installation est appelée biofiltre [03][34].

I. 6.2.3. Traitement par lagunage

C'est une technique biologique d'épuration des eaux où le traitement est assuré par une combinaison de procédés aérobies et anaérobies impliquant un éventail de microorganismes : algues et bactéries. Le lagunage nécessite une succession de bassins (minimum 2) peu profond et généralement rectangulaires où l'eau s'écoule gravitairement de lagune en lagune. L'action naturelle du soleil, qui fournit chaleur et lumière, favorise une croissance rapide des microorganismes aérobies et anaérobies qui consomment la DBO. Les premiers bassins sont des bassins à micro-organisme, où est dégradée la matière organique contenue dans les eaux usées. On trouve dans ces bassins un écosystème constitué de végétaux qui, par photosynthèse produisent de l'oxygène qui nourrit le phytoplancton qui à son tour nourrit le zooplancton (voir figure I. 2).

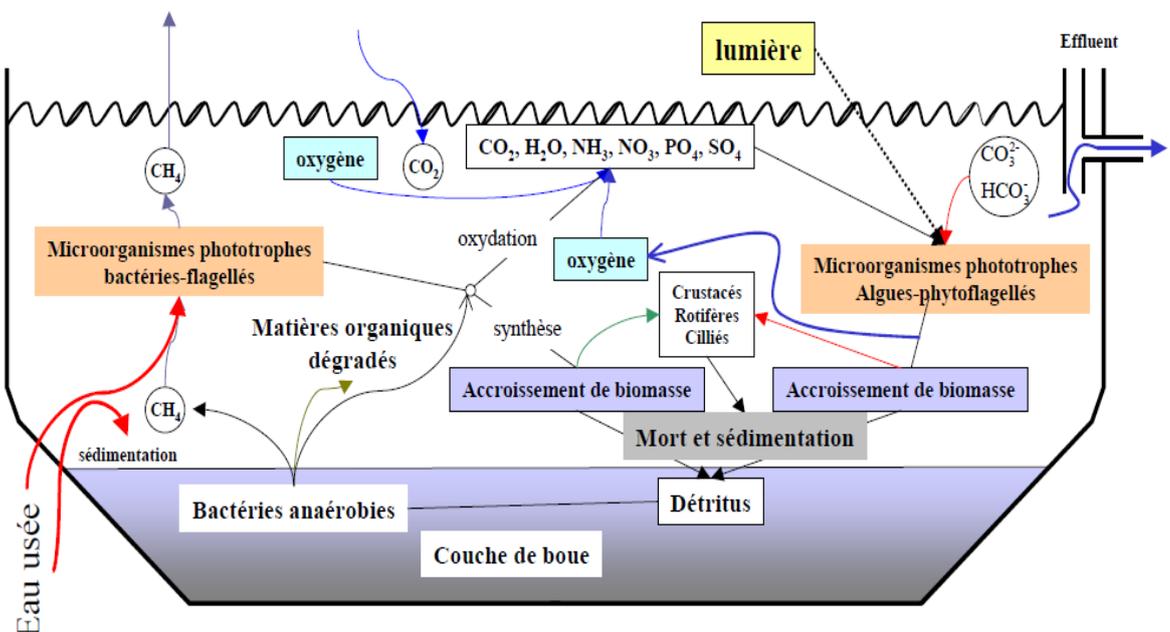


Figure I. 2 : Cycles Biologiques d'une lagune [03][34]

Les différents types de lagunage :

a. Le lagunage naturel:

D'une profondeur de 1.2 à 1.5 m au maximum et de 0.8 m au minimum (afin d'éviter le développement de macrophytes), avec un temps de séjour de l'ordre du mois, ces bassins fonctionnent naturellement grâce à l'énergie solaire. On peut obtenir un rendement d'épuration de 90 %. Ces procédés sont très sensibles à la température et sont peu applicables aux régions froides. Leur dimensionnement est généralement basé, pour un climat tempéré, sur une charge journalière de $50 \text{ Kg DBO}_5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$, soit environ 10 m^2 par habitant. La teneur en matière en suspension dans l'effluent traité reste élevée (de 50 à 150 mg L^{-1}). Aussi la DBO_5 en sortie est souvent supérieure à 50 mg L^{-1} .

b. Le lagunage aéré:

En fournissant l'oxygène par un moyen mécanique, on réduit les volumes nécessaires et on peut accroître la profondeur de la lagune. La concentration en bactéries est plus importante qu'en lagunage naturel. Le temps de séjour est de l'ordre de 1 semaine et la profondeur de 1 à 4 m. Le rendement peut être de 80 % et il n'y a pas de recyclage de boues. L'homogénéisation doit être satisfaisante pour éviter les dépôts (voir figure I.3).



Figure I. 3 : photo (a) : bord d'une lagune aérée photo (b) : aérateurs de surface amarrés

Certains rejets industriels sont traités par ce procédé qui reste valable pour les produits organiques très lentement biodégradables. Ces rejets sont caractérisés par de faibles teneurs en MES et avec des DBO_5 dans la gamme 300 - 1500 ppm (Conserverie, Industrie Chimique (Phénols)). Le brassage est effectué par des turbines fixées sur des flotteurs amarrés au centre du bassin [03][34].

c. Le lagunage anaérobie:

Il n'est applicable que sur des effluents très concentrés et, le plus souvent comme prétraitement avant un étage aérobie. La couverture de ces lagunes et le traitement des gaz produits sont nécessaires vu les risques de nuisances élevés (odeurs).

Les temps de séjour sont souvent supérieurs à 50 jours. Les charges organiques appliquées sont de l'ordre de $0.01 \text{ Kg DBO}_5 \text{ m}^{-3} \text{ J}^{-1}$ Une profondeur importante (5 à 6 m) est en principe un élément favorable au processus.

Le lagunage naturel présente de nombreux avantages par rapport aux procédés traditionnels :

- Excellente élimination de la pollution microbologique.
- Faibles coûts d'investissement et de fonctionnement.
- Très bonne intégration paysagère.
- Valorisations aquacole et agricole de la biomasse planctonique produite et des effluents épurés

Inconvénients

Contraintes possibles s'il y a la nécessité d'imperméabiliser le sol.

- Variation saisonnière de la qualité de l'eau en sortie.
- N'apprécie pas les grandes pollutions ponctuelles et les pollutions chimiques.
- En cas de mauvais fonctionnement, risque de mauvaises odeurs.

Besoin d'une superficie importante [03][34].

CHAPITRE 2

II. Généralités sur la filtration

II.1. Historique

La filtration est l'une des techniques les plus anciennes et de loin la plus appliquée dans les opérations de traitement de l'eau, qu'elle soit à usage industriel ou domestique.

C'est en 1804 qu'un écossais, du nom de John Gibb, a conçu et construit pour la première fois un filtre à sable expérimental pour sa blanchisserie de Daisley. Produisant plus d'eau traitée qu'il n'en avait besoin, il commença à en vendre le surplus à la population. Par la suite, lui-même et d'autres techniciens perfectionnèrent cette méthode, à tel point qu'en 1829 fut construite pour la première fois une installation de filtration de l'eau, destinée à la consommation de la ville de Londres, sous la direction d'un nommé James Simpson. Depuis, cette méthode de traitement commença à se proliférer dans le monde industrialisé de l'Europe de l'époque. Elle a prouvé son efficacité par suite de nombreuses épidémies qui ont ravagé certaines populations consommant de l'eau non filtrée et épargnant pendant la même période d'autres populations consommant la même eau, mais filtrée. C'est le cas de l'épidémie de choléra de 1892, dont près de la moitié de la population de Hambourg a été victime, consommant les eaux de l'Elbe à l'état brut, et dont est sortie indemne la population d'Altona, procédant à la filtration de ces eaux [36].

Des suites des découvertes de Pasteur et autres, des examens biologiques sur plusieurs échantillons ont donné des résultats confirmant l'amélioration de la qualité bactériologique de l'eau après filtration. Cette technique fut alors largement adoptée comme moyen de "traiter" l'eau avant consommation, et gagna du terrain tout en s'améliorant au fil du temps grâce aux progrès techniques. Il s'en est suivi la naissance des filtres rapides et la transformation dans la plupart des cas de la filtration seulement en une étape du traitement de l'eau après la décantation et d'autres stades de prétraitement et avant la stérilisation et d'autres stades de post-traitement. De nos jours encore, la filtration demeure une étape indispensable dans une chaîne de traitement d'eau potable, à l'exception d'eau souterraine captée en forages, puits ou sources, et jugée de qualité assez bonne pour se passer de celle-là.

L'utilisation du "filtre biologique" ou "filtre à sable lent" pour obtenir de l'eau de haute qualité n'est toujours pas dépassée. Des villes comme Amsterdam, Anvers, Londres,

Springfield (USA) et diverses agglomérations de Suède et du Japon, continuent à utiliser ces filtres datant de longtemps ou d'époque récente, ou même en construisent.

En Suisse, les villes de Zurich et St. Gall utilisent toujours leurs filtres lents construits à la fin du siècle dernier comme éléments de leur chaîne de traitement d'eau potable [37][38].

II. 2. Définition

La filtration est une méthode qui consiste à séparer les particules solides du milieu liquide à l'aide d'une matière poreuse. Il existe divers systèmes de filtration qui épurent les eaux en les faisant passer à travers un milieu filtrant.

Les filtres peuvent être faits de sable, de tourbe, de charbon activé, de terre à diatomées ou d'autres matériaux utilisés séparément ou en combinaison pour filtrer l'eau et retenir les particules ou pour promouvoir la croissance des micro-organismes qui décomposent les polluants. [4] [39][40]

II. 3. Description de la filtration

Dans les processus de traitement de l'eau, la filtration intervient au dernier stade des traitements physiques, c'est-à-dire après la coagulation et décantation si elles existent. Elle a pour but d'arrêter les particules trop petites pour décanter. Nous ne considérerons que la filtration en volume, opération au cours de laquelle les matières en suspension sont retenues à l'intérieur de la masse poreuse. Cela implique que ces matières en suspension aient des dimensions inférieures à celles des pores du filtre, sinon elles seraient retenues à la surface et on observait une filtration dite en surface ou en gâteau, procédé couramment utilisé en génie chimique mais qu'on ne rencontre en hydraulique urbaine que dans les procédés de traitement des boues par lit de séchage ou par filtration sous vide.

Les chercheurs admettent cependant tous que la filtration doit être abordée en considérant deux phénomènes distincts : le transport et la filtration. Le premier terme désigne tous les processus qui déplacent les particules dans les pores de masse filtrante les amenant au contact d'un grain solide ou d'un dépôt antérieur sur elles pourront se fixer. Le second terme désigne les mécanismes qui font qu'une particule en suspension et retenue au sein de la masse filtrante.

On ne distingue pas moins de six mécanismes de transport différents susceptibles d'amener une particule en suspension en contact avec la structure fixe du milieu filtrant.

- Interception directe il y a un choc entre la particule et un grain fixe;
- Diffusion, les particules les plus petites sont soumises à un mouvement brownien qui peut les amener au contact d'un grain; ce phénomène dépend de la température de l'eau et de la taille des particules, il n'a d'importance que pour les particules inférieures au micron;
- Tamisage, les particules les plus grosses, elles, peuvent être éliminées par tamisage à l'entrée d'un pore une faible proportion des particules est ainsi arrêtée; si cette proportion était importante, cela signifierait que la décantation, si elle existe est insuffisante, ou qu'un micro tamisage mécanique en amont des filtres constituerait une bonne forme de prétraitement;
- inertie, l'inertie de la particule la pousse à continuer en ligne droite quand bien même le courant d'eau qui l'entraîne s'incurve pour contourner un grain; ce phénomène a une grande importance en filtration d'air ou toute augmentation de la vitesse améliore le rendement de la filtration ;son importance est beaucoup plus limitée dans le cas de la filtration de l'eau où, nous le verrons, les nombres de Reynolds qui traduisent le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité sont toujours très faibles ;
- Décantation, l'effet de gravité sur une particule peut l'amener à prendre une trajectoire différente des lignes d'eau et venir au contact d'un grain; l'importance de ce phénomène se caractérise par le rapport de la vitesse de Stokes à la vitesse de filtration; ce rapport est très faible mais l'effet de décantation a peu - être mis en évidence expérimentalement;
- Hydrodynamique, les particules sont soumises sous l'action de diverses forces d'origine hydrodynamique à des mouvements de rotation.

Bien entendu, ces mécanismes de transport ne sont pas exclusifs les uns des autres; la diffusion joue un rôle important pour les particules les plus petites, la décantation pour les plus grosses et les plus denses, le tamisage pour les plus grenues et les effets hydrodynamiques pour les particules les plus dissymétriques.

La simple description des phénomènes permet de voir que pour tous, la vitesse de filtration dont la définition exacte est donnée ci-après joue un rôle important: plus elle est élevée plus les mécanismes énumérés perdent de leur efficacité. La plupart des chercheurs expliquent la fixation des particules sur le milieu filtrant par des forces physico – chimiques, type force de Van der Waals [41][42].

II. 4. Vitesse de filtration

On désigne par U et on appelle vitesse de filtration le quotient du débit Q passant dans un filtre par la surface de ce filtre. Cette vitesse est effectivement la vitesse de l'eau dans la couche qui surmonte le matériau filtrant. Cette définition rappelle d'ailleurs la notion de vitesse ascensionnelle de l'eau dans les décanteurs. Elle n'a aucune réalité physique à l'intérieur de la masse filtrante où la vitesse moyenne réelle de l'eau est sa vitesse interstitielle, soit en début de filtration :

$$u_f = \frac{u}{f}$$

En appelant n la porosité initiale du milieu,

Au cours de la filtration la vitesse de filtration sera égale à:

$$u'_f = \frac{u}{n - \frac{q}{\rho}}$$

q : étant la masse des dépôts accumulés, par unité de volume et ρ la masse volumique de ces dépôts [4] [43][44]

II. 5. But de filtration

La filtration est un procédé physique destiné à clarifier un liquide qui contient des matières solides en suspension en le faisant passer à travers un milieu poreux. Les solides en suspension ainsi retenus par le milieu poreux s'y accumulent; il faut donc nettoyer ce milieu de façon continue ou de façon intermittente.

La filtration habituellement précédée des traitements de coagulation, de floculation et de décantation, permet d'obtenir une bonne élimination des bactéries, de la couleur, de turbidité et indirectement, de certains goûts et odeurs [42].

II.6. Différents types de filtre

Il existe plusieurs types de filtres de qui concerne le traitement des eaux d'une façon générale, on distingue :

II.6.1. Filtres à sable rapides

Le filtre à sable rapide est le type de filtre le plus utilisé dans le traitement des eaux de consommation. Ils sont constitués de bassins à ciel ouvert, contenant le sable filtrant sur une épaisseur d'environ 0,7 m. à 1,5 m. C'est un sable gabarié d'une granulométrie assez uniforme, avec un coefficient d'uniformité des grains voisin de 1, ou en tout cas inférieur à 1,8 et une taille effective variant de 0,4 mm à 1,2 mm selon le degré de traitement désiré et la qualité de l'affluent. Le sable doit être choisi avec grand soin, exempt d'argiles, de poussière, de racines et autres impuretés. L'utilisation de sable tout-venant comme dans le cas de la filtration lente donc est exclue. 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. Les vitesses courantes sont de 2 à 10 m/h. Lorsque la vitesse est plus élevée, on utilise surtout le vocable de "filtres dégrossissants" ou "dégrossisseurs" étant donné la limitation de leur efficacité. Ils servent dans ce cas d'ouvrages de prétraitement [43].

Les principaux éléments d'un filtre rapide sont:

Fond de filtre: le fond de filtre est la structure qui sépare le milieu filtrant de l'eau filtrée. Il doit donc être suffisamment solide pour supporter le milieu filtrant (1 m de sable et de gravier) et l'eau située au-dessus du milieu filtrant (2 m d'eau). Il permet en outre:

- De collecter et d'évacuer les eaux filtrées.
- De distribuer uniformément l'eau de lavage [43].

Gravier de support: le gravier de support, situé immédiatement au-dessus du fond de filtre, permet de:

- De retenir le sable du milieu filtrant;
- D'améliorer la répartition de l'eau de lavage dans le filtre.

L'épaisseur et les caractéristiques granulométriques de la couche de gravier de support dépendent des caractéristiques du fond de filtre et de celles du milieu filtrant.

Milieu filtrant: les matériaux filtrant les plus utilisés sont le sable et l'antracite. Le tableau II.1 représente les principales propriétés physiques des matériaux filtrants.

Tableau II. 1 : Propriétés physiques des matériaux filtrants [43].

Matériau	Forme	Densité	Dureté (moh)	Porosité (%)	Diamètre effectif (mm)
Sable de silice	arrondie	2,6	7	42	0,4 – 1,0
Sable de silice	non arrondie	2,6	7	44	0,4 – 1,0
Quartz	anguleuse	2,6	7	53	0,4 – 1,0
Anthracite	anguleuse	1,5	3	55	0,4 – 1,4
Anthracite	arrondie	1,5	3	50	0,5 – 1,0

Les filtres rapides reçoivent généralement de l'eau prétraitée provenant de décanteurs pour achever l'opération entamée par ces derniers. Ils jouent alors un rôle essentiellement de tamisage éliminant les flots résiduels. Dans certains cas, ils servent même de lits de contact pour achever la coagulation et la clarification de l'eau avant qu'elle n'atteigne le fond du filtre lorsque cette opération a été médiocrement faite dans les ouvrages précédents. Il s'ensuit un très rapide colmatage des pores laissés par les grains de sable entre eux, une diminution progressive de la vitesse apparente d'écoulement, mais une augmentation de la vitesse réelle, d'où une augmentation des pertes de charge à tel point que le débit désiré n'est plus obtenu. Il peut arriver que l'adhésion des particules de colmatage soit très faible et que l'augmentation des pertes de charge, créant aussi un accroissement des effets de frottement, provoque l'arrachement de ces particules, qui descendent en aval de proche en proche pour se retrouver dans le filtrat. Pour remédier à ces différentes conséquences, on procède à une régénération ou recyclage (dé-colmatage par élimination des particules) du lit filtrant.

Lavage des filtres rapides :

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. Pour cela, le système de drainage est très souvent constitué de plancher en béton équipé de busulures recueillant par leur tête de forme cylindrique et munie de rainures l'eau filtrée et la restituant par leur queue au bassin d'eau filtrée. C'est aussi par la queue que remonte l'eau de lavage qui est diffusée par les têtes des busulures. 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.

II.6.2. Les filtres lents à sable

C'est la première technique de filtration qui fut mise en œuvre. On utilise la filtration lente sur sable depuis le début des années 1900. Cette méthode est toujours largement utilisée pour le traitement des eaux usées municipales. Des études et d'autres observations ont montré que la filtration lente sur sable permet d'éliminer efficacement les bactéries coliformes des eaux usées et constitue un procédé de traitement innovateur et rentable qui exige peu d'entretien. Ce système est le plus efficace dans le cadre d'une approche comportant des traitements multiples [43].

Le filtre lent consiste en un bassin à ciel ouvert, le plus souvent rectangulaire, contenant du sable servant de matériau filtrant. La couche de sable, d'épaisseur allant de 0,7 m à 1,5 m, est surmontée d'une couche d'eau de 0,7 m à 3 m, s'écoulant en traversant le sable sous l'action de la pesanteur. L'eau filtrée est recueillie au fond du bassin à l'aide d'un système de drainage. Le nom de "filtre lent" vient du fait que la vitesse de percolation est très faible, de l'ordre de 0,1 à 0,5 m/h, par opposition aux filtres rapides. Le diamètre des grains de sable va de 0,10 mm à 2,0 mm et même plus dans certains cas avec une granulométrie assez étalée. Il est donc possible d'utiliser le sable de la plupart des carrières sans tri. La taille réduite des grains et la faiblesse des vitesses dans ces filtres font qu'ils ne sont pas seulement de simples tamis destinés à retenir les particules dont les dimensions excèdent les pores laissés entre les grains, mais ils éliminent aussi les particules colloïdales, les substances dissoutes, les bactéries et autres germes, ainsi que les goûts et odeurs. On obtient ainsi de l'eau d'une qualité physico-chimique et bactériologique pure.

Cette qualité est obtenue grâce à un développement simultané de phénomènes physiques et d'épuration biologique à la surface et dans le lit filtrant; d'où le nom de "filtre biologique" souvent donné à ces filtres [45]. Ces phénomènes seront examinés plus en détail dans la suite.

II.6.2.1. Caractéristiques des filtres lents

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 fines, dont la surface totale de veinule ou de pores est très grande, ce qui facilite l'absorption des impuretés par cette couche ou par le sable sous-jacent. Cette couche poreuse est constituée de bactéries, d'algues et de protozoaires. La filtration lente combine donc les effets de processus physiques et de processus biologiques.

Les filtres à sable lents fonctionnent principalement grâce à l'activité biologique mais également au captage de particules dans le filtre à sable.

Les caractéristiques fondamentales des filtres à sable biologiques sont :

- Le sable fin.
- La vitesse de filtration lente.

A mesure que l'eau passe à travers le filtre, un film constitué de poussière, de débris et de micro-organismes vivants et en décomposition s'accumule à la surface du sable. Il s'agit du film biologique. La poussière, les particules et les micro-organismes naturels s'accumulent dans cette pellicule et contribuent à la filtration mais ils ralentissent le débit; par conséquent les filtres de ce type sont de plus grande taille que les filtres rapides, la lenteur du débit de filtration (0,1 à 0,3m/h) et le film biologique rendent ce type de filtre très efficace pour extraire les minuscules particules de l'eau; les micro-organismes qui se développent dans le film biologique et dans les premières centimètres de la couche du sable captent et décomposent d'autres micro-organismes, minéraux ou nutriment, notamment le fer. Le filtre laisse passer certains organismes et matières solubles.

Pour remédier à l'obstruction, il faut enlever le film biologique et gratter les premiers centimètres de sable. Les filtres à sable lents ne fonctionnent pas bien si l'eau brute est trop sale ou trouble [46].

II.6.2.2. Avantages des filtres lents

1. Les filtres lents permettent de ne pas recourir à la coagulation.
2. Les matériaux de construction de ces filtres sont simples ; on peut donc les trouver sur place dans la nature.
3. On peut aisément se procurer du sable sur place.
4. La surveillance du fonctionnement de ces filtres est simple.
5. Leur effluent est moins corrosif et de qualité plus constante que celui des filtres rapides, lesquels exigent un traitement chimique.
6. Ils éliminent bien les bactéries [43].

II.6.2.3. Inconvénients des filtres lents

1. Les filtres lents occupent une grande superficie : ils exigent donc une installation de grandes dimensions, un volume de sable important et des travaux coûteux.
2. Leur exploitation manque de souplesse.
3. Leur mise en exploitation et leurs lavages requièrent de longues périodes de temps, au cours desquelles ils sont inutilisables.
4. Leur utilisation est coûteuse lorsque la turbidité des eaux brutes dépasse 30 unités néphélométriques pendant de longues périodes de temps, sauf lorsqu'on fait préalablement sédimenter les impuretés de manière à abaisser suffisamment le degré de turbidité de ces eaux.
5. Ils décolorent médiocrement les eaux colorées.
6. Ils donnent de mauvais résultats lorsque les eaux sont riches en algues et qu'elles n'ont pas été préalablement prétraitées [43].

II.6.3. Filtres sous pression

Contrairement aux deux premiers cas de filtres énumérés (écoulement gravitaire dans des bassins à ciel ouvert), les filtres sous pression sont constitués de coques d'acier fermées, équipées de systèmes de drainage et dans lesquelles est chargé le sable filtrant. Elles sont horizontales ou verticales et fonctionnent avec une pression de l'ordre de 10 atm. La vitesse de filtration étant du même ordre de grandeur que pour les filtres dits "rapides", la perte de charge est quasiment négligeable. Ce qui fait que le système de pompage double (avant et après traitement) peut être évité. Le traitement se limite pratiquement à une opération de tamisage. C'est pourquoi il n'est généralement utilisé que dans l'industrie [37].

II.6.4. Micro tamisage

Les micro-tamis sont différents des autres types de filtre, en ce sens que la filtration ne se fait pas par traversée d'une couche de matériau poreux mais de tamis à fils d'acier inoxydables et mailles très fines (0,025 mm environ). Cependant, ils réduisent considérablement la turbidité, éliminent les matières en suspension grossières et même les micro-organismes. En exemple, le plancton peut être réduit de 50 à 95 %. Ils sont constitués d'unités cylindriques préfabriquées, variant de 0,75 m de diamètre pour 0,6 m de long à 3 m de diamètre pour 3 m. de long et peuvent traiter de 7 à 45 m³ d'eau par jour avec une perte de charge de 15 cm. environ. Leur nettoyage se fait par pulvérisation continue d'eau sous 0,3 atm à 0,7 atm et dans certains cas jusqu'à 2 atm de pression avec un volume d'eau à peine égal à 2 % du volume traité [43].

II.7. Théorie de la filtration lente

II.7.1. Introduction

Un filtre lent est composé des éléments suivants :

- Un réservoir d'eau brute (surnageant) : maintenant une charge et une réserve d'eau au-dessus du matériau et assurant la pression nécessaire à la percolation à travers le filtre.
- Un lit de milieu filtrant : assurant les processus de traitement. Ce milieu, le plus souvent du sable, peut être aussi du concassé ou tout autre matériau grenu.
- Un système de drainage de l'eau filtrée : par la base du filtre, et qui sert en même temps de support au matériau.
- Un système de commandes (vannes par exemple) : servant à régler la vitesse de l'écoulement, la maintenance du niveau de l'eau brute à une valeur donnée pour la qualité du fonctionnement, etc.

Les trois premiers éléments sont réunis en un seul bassin filtrant à ciel ouvert de section souvent rectangulaire avec 2 à 4 m. de profondeur à parois verticales ou rarement inclinées. Ces parois peuvent être faites en béton ou en maçonnerie selon les conditions en présence.

Le système de drainage par la base peut être fait d'un faux plancher en béton poreux ou de drains jointes, entourés et couverts de gravier gabarié supportant le matériau filtrant et retenant les grains fins.

II.7.2. Purification dans un filtre lent

La filtration lente sur sable diffère des autres types de filtration par le fait qu'elle doit assurer à l'eau une qualité physiquement et bactériologiquement saine et cela souvent sans faire appel à d'autres stades de traitement. Elle ne consiste donc pas seulement en une opération de tamisage à travers le sable, mais aussi en une épuration biologique et biochimique. L'échantillon d'eau brute qui entre dans le bassin filtrant subit d'abord une opération de sédimentation de certaines des particules qui le chargent et une agglomération d'autres lors de son séjour de 3 à 12 h. dans l'eau surnageant avant pénétration dans le lit filtrant. Il fonctionne donc comme un décanteur. Sous l'influence de la lumière solaire, des algues poussent et absorbent les nutriments contenus dans l'eau brute tels que les nitrates, le dioxyde de carbone, les 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". Ce film, extrêmement actif, est composé d'algues filamenteuses, protozoaires, rotifères, bactéries et autres formes de vie animale ou végétale. C'est ce film qui, par les divers organismes qui le composent, piège, digère et désagrège les matières organiques contenues dans l'eau. Les algues mortes de l'eau qui surmonte le lit et les bactéries vivantes de l'eau brute sont les unes et les autres consommées à l'intérieur de ce film. Il se forme des sels minéraux simples. 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. Cette percolation se faisant avec une vitesse extrêmement faible permet la rétention des particules en suspension ou colloïdales qui ont résisté jusqu'ici, par des phénomènes physiques de tamisage et d'adsorption par les grains.

L'opération de dégradation biologique due aux micro-organismes se nourrissant des impuretés et les uns des autres, commencée sur la " membrane biologique " se poursuit et se complète dans la partie supérieure de la couche de sable. A mesure que la profondeur augmente, la nourriture de ces microorganismes devient rare et par conséquent leur population diminue. Aux environs de 40 cm de profondeur, il ne subsiste plus que quelques bactéries utilisant l'oxygène dissous dans l'eau pour extraire les ultimes nutriments existants à l'état de solutés. Ainsi, après environ 50 à 60 cm de profondeur, l'eau se trouve

débarrassée de presque toutes les matières en suspension, colloïdales ou dissoutes et ne contient plus que quelques sels minéraux simples relativement inoffensifs en solution. Non seulement tous les organismes nuisibles sont éliminés, mais aussi les nutriments dissous qui pourraient favoriser leur développement. L'eau ainsi traitée peut être pauvre en oxygène et riche en dioxyde de carbone; inconvénient auquel on peut remédier en l'aérant [47].

II.7.3. Mécanisme de la filtration lente

Suivant les caractéristiques des particules à retenir et du matériau filtrant mis en œuvre, et 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 principaux suivants: transport, fixation et purification [23].

II.7.3.1. Mécanismes de transport [47]

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

a. Tamisage mécanique

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. Dans le cas d'un sable uniforme de diamètre effectif 150 μm , les tailles les plus petites des interstices sont de l'ordre de 20 μm . Le tamisage ne permet donc pas la rétention des colloïdes (diamètre $\leq 1 \mu\text{m}$) ni des bactéries (taille $\leq 15\mu\text{m}$). Dans la pratique, le tamisage est amélioré par la " membrane biologique " et aussi par l'agglomération des colloïdes rendue possible par la faiblesse de la vitesse [43].

b. Dépôt sur le matériau filtrant:

La particule en suspension suit dans le liquide une ligne de courant; sa taille, comparée à celle des pores, pourrait lui permettre de traverser le matériau filtrant sans être arrêtée. Différents phénomènes entraînent cependant un changement de trajectoire et le contact avec le matériau.

On distingue en particulier:

- L'interception directe par frottement.

- La diffusion par mouvement brownien.
- L'inertie de la particule.
- La décantation: par leur poids les particules peuvent se déposer sur le matériau filtrant quel que soit le sens de filtration.

Ces différents mécanismes de capture interviennent principalement dans la filtration en profondeur [43].

II.7.3.2. Mécanismes de fixation [47][48]

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

a. Attraction électrostatique (forces de Coulomb) :

Ce phénomène ayant son origine aux différences de charges électriques pouvant exister entre particules et grains de sable, est très complexe. Le sable quartz porte une charge négative en raison de sa structure cristalline et attire par conséquent des cations 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.

b. Adhérence :

A la maturation du filtre, les particules d'origine organique retenues à la surface du filtre et sur les grains pris individuellement dans la partie supérieure créent un terrain de prolifération d'organismes produisant un matériau visqueux connu sous le nom de "zooglé", composé de bactéries actives, de leurs déchets, de leurs cellules mortes et des matières organiques partiellement assimilées.

La zooglé forme un film gélatineux, visqueux, collant à la surface de la " membrane biologique " et des grains de sable, film sur lequel les particules provenant de l'eau adhèrent. Elles sont assimilées et deviennent une partie du film de la zooglé.

II.7.3.3. Mécanisme de purification

Il s'effectue en deux processus : Oxydation biologique et oxydation chimique.

Au sein de la " membrane biologique " et de la zooglé, les bactéries foisonnent sélectivement en se nourrissant de matières organiques déposées. Elles oxydent une partie

de leur nourriture pour obtenir l'énergie nécessaire à leur métabolisme (désassimilation), transforment une partie de cette nourriture en matériel cellulaire nécessaire à leur croissance (assimilation). Ainsi, les substances organiques mortes sont-elles converties en matières vivantes. Les produits de désassimilation sont entraînés par l'eau et serviront à plus grande profondeur à d'autres organismes.

L'activité bactérienne décroît à mesure qu'on va en profondeur, due à la rareté des matières organiques. A plus de 30 à 40 cm de profondeur, il se passe des activités biochimiques qui transforment les produits de dégradations microbiologiques, les amino-acides par exemple en ammoniac, nitrites, nitrates. Ces produits de nitrification sont ensuite dégradés par l'oxygène dissous. Ainsi, la totalité des matières organiques dégradables présentes dans l'eau brute est progressivement désagrégée et convertie en eau, dioxyde de carbone et sels minéraux simples. Dans un filtre lent, abondent à chaque profondeur des bactéries spécifiques avec effets bien donnés. Une variation soudaine de la vitesse ou de la charge d'eau tend à rompre cet équilibre et par conséquent à détériorer la qualité du filtrat. Si la teneur en oxygène est voisine de 0, il se produit une décomposition anaérobie engendrant la production de H₂S, NH₃ et d'autres substances génératrices de mauvais goûts et odeurs et aussi des sels de fer et de manganèse en solution. De faibles températures font tomber aussi l'activité des protozoaires et des nématodes qui dévorent les bactéries. Ainsi, la destruction des bactéries intestinales se ralentit et leur chance de survie et d'être entraînés dans l'effluent, augmente. A plus fortes températures, les micro-organismes sécrètent des substances qui agissent comme des poisons sur ces bactéries intestinales. Il s'en suit une réduction du nombre d'organismes pathogènes de 100 à 1000 fois [47].

II.8. Hydraulique de la filtration

Tous les processus (physiques, bactériologiques ou chimiques) qui interviennent dans l'épuration par filtration lente exigent pour un meilleur rendement des vitesses d'écoulement et des diamètres de grains faibles. L'écoulement de l'eau est laminaire et obéit donc à la loi de DARCY:

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta P / \eta \Delta H$$

Avec :

Q : le débit traversant la couche filtrante (m³/s)

K : le coefficient de perméabilité (m/s)

ΔP : la perte de charge à travers la couche filtrante (m)

ΔH : hauteur de la couche considérée (m)

η : viscosité dynamique de l'eau (Pa.s)

Donc l'écoulement à travers le filtre dépend à la fois, de caractéristiques du sol et du liquide [44][49].

II.9. Colmatage du filtre à sable

II.9.1. Définition

Le colmatage est l'obstruction progressive des interstices des matériaux filtrant, la vitesse du colmatage dépend de types de support filtrant et de la qualité de l'eau à filtré [23].

II.9.2. Types de colmatage

Le colmatage est classé suivant les facteurs mis en jeu dans ce phénomène, donc il est classé comme suit : [4]

II. 9. 2. 1. Colmatage physique

Il est dû au tassement de sable du filtre sous l'effet de son propre poids et l'écoulement de l'eau qui provoque le transport des particules fines en cours d'eau. La matière en suspension est aussi retenue par le matériau filtrant.

II. 9. 2. 2. Colmatage chimique

L'eau joue le rôle d'un catalyseur pour les réactions chimiques entre les ions existant dans la masse filtrante. Ces réactions seront plus affectant en présence de l'argile.

II. 9. 2. 3. Le colmatage biologique

Il est dû à l'accumulation de la matière organique dissoute et les micro-organismes sur les surfaces des grains.

PARTIE 2

CHAPITRE 3

III. Caractérisation des matériaux utilisés (support filtrant)

III. 1. Introduction

Dans la perspective d'avoir une première vue sur l'aptitude des sables à être utilisés comme support filtrant, il est nécessaire de réaliser leur caractérisation détaillée et complète. A cet effet, ce chapitre sera consacré à la caractérisation de quelques carrières de sable de dunes du Sahara septentrional.

III. 2. Echantillonnage

III. 2. 1. Site d'échantillonnage

Une étude cartographique a été faite pour localiser les différentes sources de sable de dunes. Dans notre travail nous avons ciblé les ergs du bassin septentrional. Ainsi nous avons dressé la carte qui représente la délimitation du Sahara septentrional et les sites de prélèvements choisis (figure **III. 1**).

Les carrières ciblées : A travers l'analyse de plusieurs cartes d'états major du Sahara septentrional et des prospections sur terrain de certaines zones, nous avons choisi les formations suivantes : ergs, siouf et dunes comme carrières d'études. Les carrières représentées dans la figure III.1 ont donc finalement été retenues.

III. 2. 2. Méthode d'échantillonnage

Les prélèvements des échantillons ont été réalisés par deux protocoles différents:

1- Pour la majorité des carrières, Un nombre de 6 à 18 prélèvements ont été réalisés en différents points de la carrière, pour chaque point nous avons pris un échantillon de la surface et un autre à une profondeur de 30 cm, qui sont ensuite mélangés afin d'obtenir un échantillon représentatif de la carrière considérée.

2- Pour les carrières d'accès difficile, nous nous sommes limités à un seul échantillon.

Pour chaque zone citée nous avons choisi entre quatre et huit points de prélèvement. Le sable utilisé est un mélange homogène entre les seize échantillons avec des quantités égales.

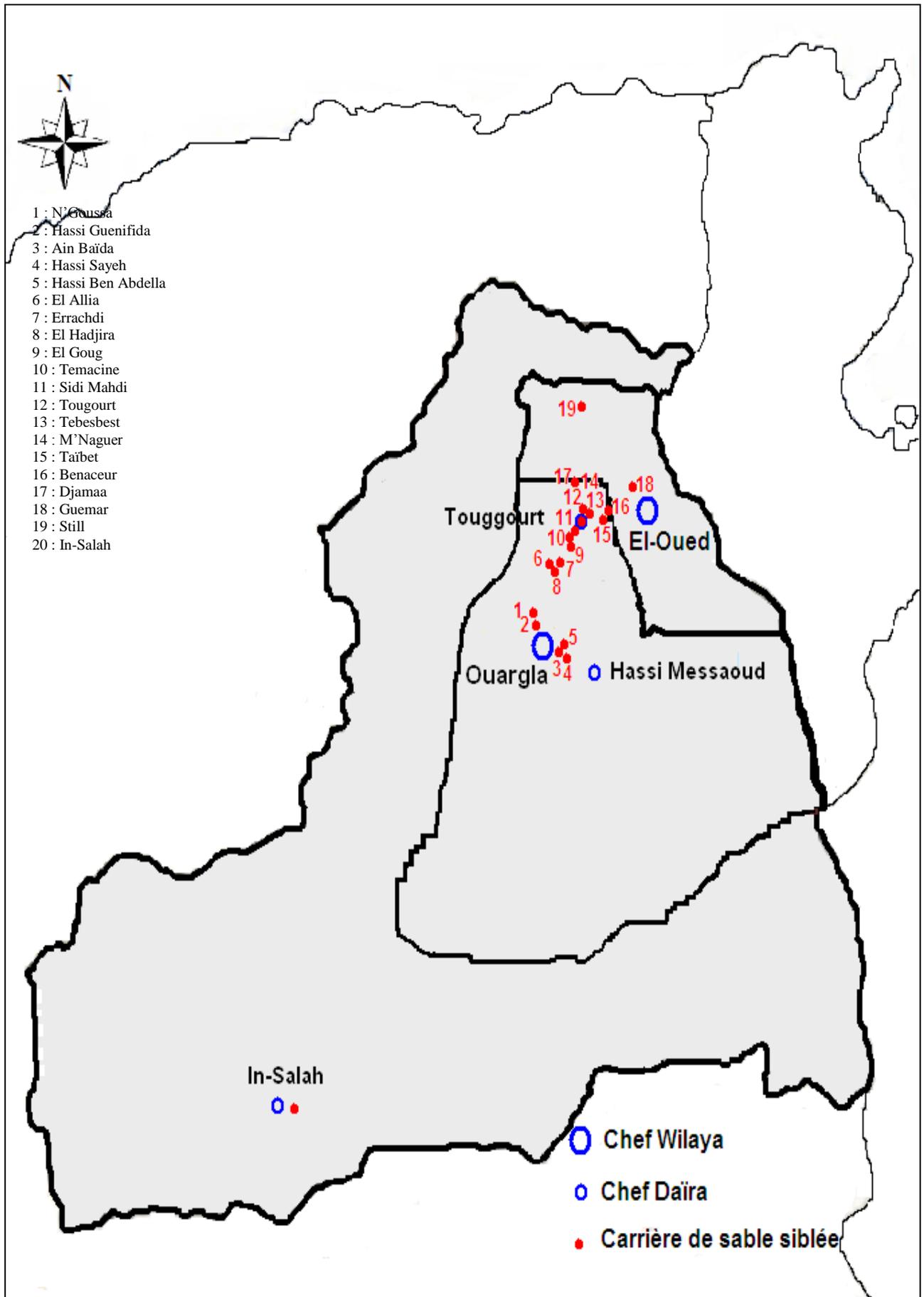


Figure III. 1 : Carte représentant la délimitation du Sahara septentrionale

III. 3. Caractérisation des sables

Les sables utilisés sont des sables de dune de la région de N’Goussa (Ouargla). Ces sables ont déjà été étudiés, ils ont une composition chimique très uniforme à forte prédominance siliceuse, avec une granulométrie homogène adéquate pour les utiliser comme un lit de filtration [50]. Les résultats sont décrits dans la suite de ce chapitre.

III. 3. 1. Caractéristiques des particules élémentaires

Une particule élémentaire est caractérisée par son diamètre D , sa densité spécifique P_s , sa forme, son état de surface et son poids. La masse spécifique des particules variera entre 2,3 et 2,9 suivant leur nature minéralogique, la moyenne est entre 2,5 et 2,6 pour les particules en quartz et calcaire.

La forme de la particule qui interviendra directement sur son diamètre sera très différente suivant son origine et le degré d'usure qu'elle a subi. Pour les particules grossières il est possible de définir leur diamètre par tamisage mécanique, ce diamètre étant différent de celui de la sphère qui aurait même poids et même densité que la particule et que l'on appellera diamètre nominal " D_n ".

III. 3. 2. L’analyse granulométrique

L’objectif de l’analyse granulométrique consiste donc à différencier par la taille les éléments minéraux du sol et à quantifier leur répartition pondérale, dans les classes de diamètres prédéfinies. Ces analyses sont effectuées au laboratoire sur des échantillons de sol. Il s'agit de faire passer l’échantillon du sol à travers une série de tamis de diamètres décroissants de haut vers le bas [43].

L'analyse granulométrique est faite selon les normes AFNOR (NF 1996). On a modifié la série de tamis en remplaçant le tamis de diamètre 0,64 mm par deux tamis, de diamètres 0,8 mm et 0,5 mm respectivement. En outre, afin de mieux représenter la distribution des grains, on a ajouté à la série d’AFNOR deux tamis de diamètre respectivement 0,125 mm et 0,2 mm. Ce qui fait que la série utilisée, est comme suit : 0,063 ; 0,08 ; 0,125 ; 0,16 ; 0,2 ; 0,315 ; 0,5 ; 0,8 ; 1 mm.

Une masse de 200 g de sable est prise et tamisée à travers la série de tamis indiquée ci-dessus [51]. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure III. 2

A partir des courbes granulométriques, les constatations qui peuvent être illustrées sont :

- * Les sables analysés sont des mélanges entre le sable fin et le sable grossier.

- * Le quasi totalité des grains a un diamètre inférieur à 1 mm.

Les courbes granulométriques nous ont permis de déduire et de calculer les paramètres suivants

a. Le diamètre effectif D_E

Le diamètre effectif correspond à la taille des mailles du tamis qui laissent passer 10% de la masse de l'échantillon. Il représente conventionnellement, le diamètre moyen des grains du sable [49] [52]. Celui-ci est habituellement compris entre 0,15 et 0,35 mm [53] [54], d'autres auteurs recommandent un possédant un diamètre effectif qui peut varier d'un minimum de 0,40 millimètre à près de 1,5 millimètre (exception faite des filtres à recirculation où le diamètre effectif peut aller à 4,0 mm) [55].

b. Le coefficient d'uniformité C_U

Le coefficient d'uniformité, représente l'homogénéité de la distribution des diamètres des grains dans l'échantillon. Ce coefficient est calculé par la formule suivante [42][51][55]:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Le sable doit avoir un coefficient d'uniformité inférieur à 3, mais il ya peu d'avantage à avoir un coefficient C_U de moins de 1,5 [53] [54], le coefficient d'uniformité devrait toujours être inférieur à 4,0, et de préférence inférieur à 2,0 pour d'autres auteurs [55].

c. Le coefficient de classement C_c

Il s'agit du rapport entre deux diamètres apparents définis de telle sorte que la taille de 75% et respectivement 25% des particules soit inférieure. Ce coefficient constitue un indice de variation relative de la pente de la courbe indice de dispersion de Trask, la courbe granulométrique bien classée :

$$C_c = \frac{d_{75}}{d_{25}}$$

La courbe granulométrique des sables bien classés ayant un indice inférieur à 2,5 et les sables mal classés supérieur à 3,5. Les sables normalement classés se localisent autour de $C_c = 3$.

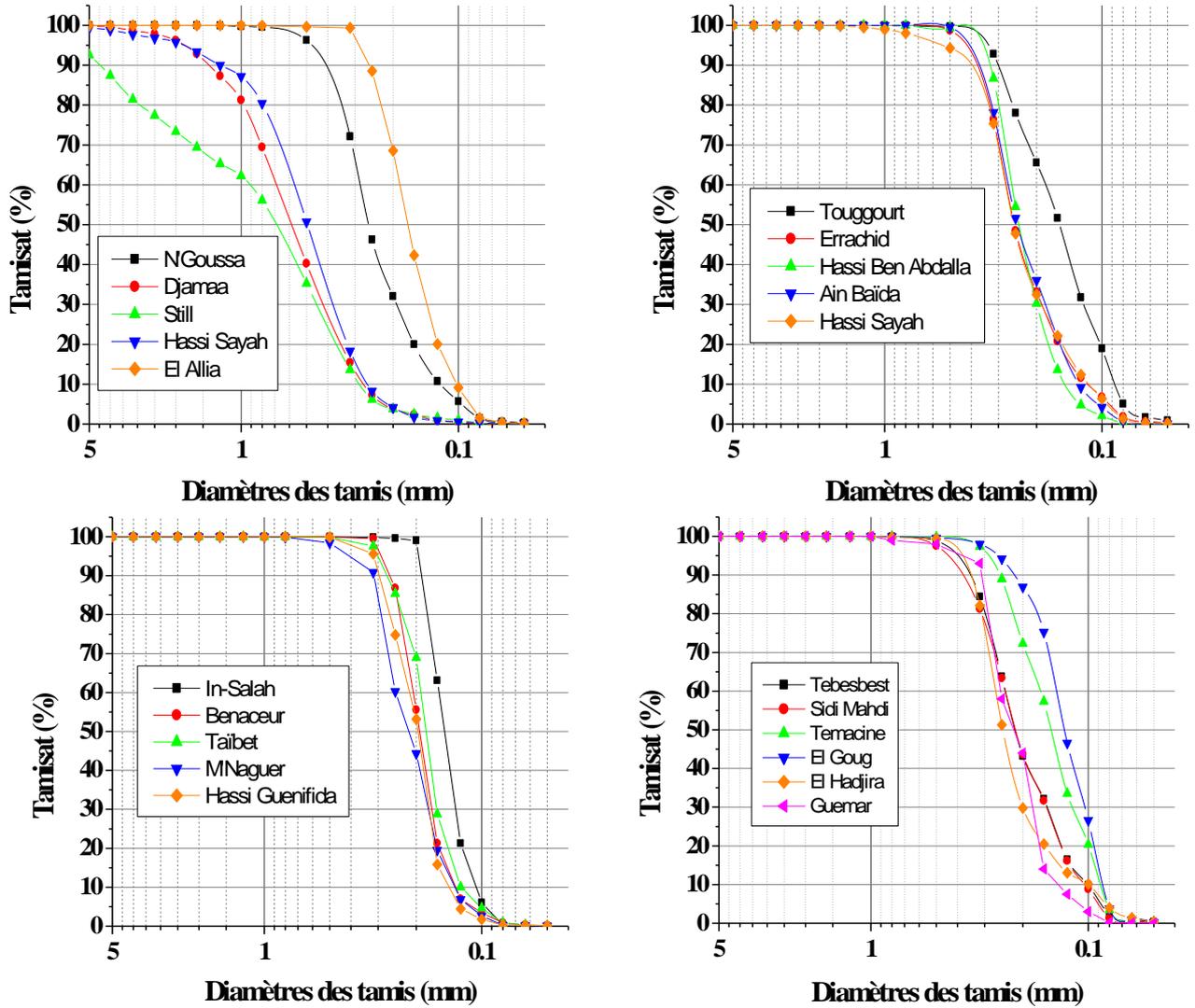


Figure III. 2 : Courbes granulométriques des différentes carrières

d. L'indice de dispersion de Trask S_o

$$S_o = \left(\frac{d_{75}}{d_{25}} \right)^{1/2}$$

Il donnera l'évasement de la courbe granulométrique ; des sables bien classés ; les sables normalement classés $S_o = 3$ ayant un indice de 2.5 et les sables mal classés supérieur à 3.5 [50].

e. L'indice d'asymétrie de SKEWNESS

Il traduit le degré de classement de la courbe granulométrique de part et d'autre de son diamètre moyen [50]

$$SK = \frac{d_{75} * d_{25}}{d_{50}}$$

Classement des différents sédiments

Les nomenclatures varient avec les auteurs et les pays et nous retiendrons celles dont les limites dimensionnelles principales correspondent à des limites physiques dans le comportement des sédiments et en classant les matériaux dans les trois ensembles correspondant aux rudites, arénites et lutites ou pélites

Rudites $0 > 2 \text{ mm}$: -blocs $0 > 200 \text{ mm}$ -galets $20 < 0 < 200 \text{ mm}$ -graviers $2 < 0 < 20 \text{ mm}$

- Arénites $0,065 < 0 < 2 \text{ mm}$:

- Sable très grossier $1 < 0 < 2 \text{ m}$

- Sable grossier $0,5 < 0 < 1 \text{ mm}$

- Sable moyen $,25 < 0 < 0,5 \text{ mm}$

- Sable fin $0,125 < 0 < 0,25 \text{ mm}$

Ssable très fin $0,064 < 0 < 0,125 \text{ mm}$

- Lutites ou pélites $0 < 64 \text{ micromètres}$

- Silts $4 < 0 < 64 \text{ l..Im}$

- Précolloïdes $0,12 < 0 < 4 \text{ l..Im}$

- Colloïdes $0 < 0,12 \text{ l..Im}$

Dans cette dernière catégorie des lutites, les limons, les argiles, les vases, les boues et les poudres pourront être constitués de différentes classes granulométriques .

On a admis que :

- Les silts avaient une granulométrie de 100 à 10 micromètres avec des grains restant bien individualisés de quartz, feldspaths ou calcites ,
- Les limons se rencontrent plus particulièrement dans les éléments fins fluviaux et ne comportent pratiquement pas d'éléments inférieurs à 2 microns ,
- Les argiles correspondent à une catégorie minéralogique bien définie et ont une granulométrie inférieure à quelques microns ($0 < 2 \mu\text{m}$)
- Les vases se présentent comme un matériau très fin poly-dispersé contenant un pourcentage élevé de précolloïdes et de colloïdes et des traces plus ou moins importantes de matières organiques. La fraction argileuse est élevée et des silts ou même des sables très fins peuvent se trouver mélangés dans ces matériaux. Les vases se rencontrent plus précisément dans les dépôts maritimes ou estuariens mais cette appellation est fréquemment étendue à tous les éléments très fins rencontrés en nature [50].

On peut également utiliser des courbes de distribution en particulier quand on utilise méthodes d'analyse discontinues, celles-ci faisant apparaître des classes définies par les diamètres. Ces courbes sont représentées par des histogrammes.

C'est-à-dire par une série de rectangles juxtaposés. Cette méthode fait parfois un peu mieux apparaître les différences que la comparaison de courbes cumulatives [57].

Les résultats de ces paramètres sont représentés dans le tableau III. 1

Tableau III. 1 : Tableau représentant les paramètres physiques du sable des carrières sélectionnées :

	Carrières	d ₁₀	d ₂₅	d ₃₀	d ₅₀	d ₆₀	d ₇₅	Cu	Cc	SK
1	N'Goussa	0,121	0,177	0,193	0,259	0,285	0,337	2,355	1,904	0,230
2	Hassi Sayah SG	0,261	0,353	0,382	0,496	0,595	0,745	2,280	2,110	0,530
3	In Salah	0,107	0,128	0,132	0,149	0,157	0,173	1,467	1,352	0,149
4	El Alia	0,102	0,133	0,141	0,172	0,187	0,216	1,833	1,624	0,167
5	Hassi Ben Abdellah	0,146	0,187	0,199	0,241	0,261	0,291	1,788	1,556	0,226
6	Errachdi	0,117	0,174	0,190	0,254	0,277	0,312	2,368	1,793	0,214
7	Meneguer	0,144	0,169	0,177	0,218	0,249	0,281	1,729	1,663	0,218
8	Taibat	0,125	0,153	0,161	0,181	0,191	0,218	1,528	1,425	0,184
9	Ben Nacer	0,132	0,164	0,170	0,194	0,207	0,231	1,568	1,409	0,195
10	Touggourt	0,087	0,112	0,122	0,157	0,184	0,238	2,115	2,125	0,170
11	Djamaa	0,272	0,386	0,424	0,600	0,703	0,894	2,585	2,316	0,575
12	Stil	0,284	0,412	0,455	0,713	0,927	2,206	3,264	5,354	1,275
13	Hassi Sayah SF	0,115	0,171	0,191	0,255	0,279	0,314	2,426	1,836	0,211
14	Ain Beida	0,127	0,169	0,183	0,245	0,271	0,307	2,134	1,817	0,212
15	Hassi Gnifida	0,142	0,170	0,175	0,197	0,216	0,251	1,521	1,476	0,217
16	Sidi Mahdi	0,104	0,145	0,156	0,216	0,242	0,292	2,327	2,014	0,196
17	Temacine	0,088	0,109	0,118	0,149	0,167	0,208	1,898	1,908	0,152
18	El Goug	0,085	0,099	0,104	0,129	0,141	0,160	1,659	1,616	0,123
19	Tebesbest	0,100	0,144	0,155	0,217	0,241	0,285	2,410	1,979	0,189
20	El Hadjira	0,100	0,179	0,201	0,247	0,268	0,300	2,680	1,676	0,217
21	Guemar	0,133	0,164	0,170	0,194	0,216	0,269	1,624	1,640	0,227

A travers ces résultats nous constatons que tous les sables analysés ont un coefficient d'uniformité inférieur à 4; le sable le plus uniforme est celui de In Salah. Concernant le diamètre effectif le sable Hassi Sayah SG, Djamaa et Still présentent des bons diamètres effectifs $d_{10} > 1,50$, les autres présentent des diamètres effectifs inférieurs. Tous les sables sont bien classés voir même très bien classés pour certains, mis à part le sable de Stil qui présente un coefficient de classement de 5,354 nettement supérieur à 3,5. L'indice de SKEWNESS nous montre le degré de classement de nos sables et nous constatons que le sable de Stil présente le plus grand coefficient d'asymétrie c'est à dire un mauvais degré de classement.

III. 3. 3. La surface spécifique

La surface spécifique, représente le rapport de la surface totale des grains, soit à l'unité de volume d'échantillon (surface volumique), soit à l'unité de masse (surface massique) du solide. Elle est le facteur principal des actions physico-chimique d'interface eau/sol; donc d'adsorption. La surface spécifique se calcule à partir de l'analyse granulométrique par la formule suivante : [52] [58]

$$S_v = \frac{60}{\Gamma} \sum_{i=1}^k \frac{m_i}{d_i^2}$$

k : Nombre de tamis utilisés

d_i : Diamètre de la maille du $i^{\text{ième}}$ tamis (mm)

m_i : Masse de tamisât récupéré entre le $i^{\text{ième}}$ et le $i+1^{\text{ième}}$ tamis (g)

M : Masse total de l'échantillon (g)

Γ : Facteur de forme qui a été estimé sur le sable entre 0.7 et 0.95

Pour le sable utilisé la surface spécifique est de 40.79 mm^{-1}

III. 3.4. La porosité

La porosité est le rapport entre le volume des pores V_p et le volume total V_t

$$V_t = V_p + V_s$$

D'où : V_s est le volume du squelette solide autrement dit :

$$n = \frac{V_p}{V_t}$$

On peut estimer la valeur de la porosité en fonction de la densité réelle et la densité apparente par la formule : [59][60][61]

$$n = 1 - \left(\frac{P_a}{P_r} \right)$$

P_a : la densité apparente et P_r : la densité réelle.

III.3. 4. 1. La densité réelle P_r

Elle est déterminée par la masse des grains solides M_s rapportée à leur volume réel V_s :

$$P_r = \frac{M_s}{V_{sr}} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)$$

La masse réelle d'un sol est déterminée par la nature de ses composants solides, et en particulier par leurs masses volumiques respectives ; la masse volumique des éléments constituant la fraction minérale varie selon le type de minéraux présent [60][61]; comme il est présenté dans le tableau III. 2.

Tableau III. 2 : La densité réelle [51]

Type de fraction	La densité réelle (kg/m ³)
Minéraux argileux	2000 à 2650
Quartz ou feldspath	2500 à 2600
Éléments métalliques	4900 à 5300
Fraction organique	1300 à 1400

III.3.4.2. La densité apparente P_a

Cette grandeur définie par le rapport de la masse des éléments solides au volume total apparent du sol constitue ainsi un critère plus global de différenciation des sols. [38]

$$P_a = \frac{M_s}{V_{sa}} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

La masse volumique apparente d'un sol est ainsi inférieure à sa masse volumique réelle, puisque la masse solide est rapportée ici au volume total apparent et non plus seulement au volume solide. Son ordre de grandeur pour divers types de sols est représenté dans le tableau III. 3 :

Tableau III. 3 : la densité apparente [56]

Type de sol	Densité apparente (kg /m ³)
Sols sableux	1400 à 1700
Sols argileux	1000 à 1500
Sols tourbeux	300 à 100

III. 3. 5. La perméabilité

La perméabilité, représente l'aptitude d'un sol à se laisser traverser par l'eau, sous l'effet d'un gradient hydraulique. Pour la détermination de la perméabilité des formules empiriques sont utilisées; tels que la formule de KOZENY-CARMAN, de HAZEN et la formule de BRETJENSKI. Les formules de HAZEN et de BRETJENSKI ont été utilisées car elles sont les plus simples à appliquer [56] [63].

- La formule de BRETJENSKI :

$$n = 0.117 \sqrt[3]{K} \quad (\text{mm/j})$$

Pour le sable utilisé la perméabilité est de ~~$K = 1210 \text{ m/s}$~~ Cette valeur désigne que le sable est de bonne perméabilité.

- La formule de HAZEN :

~~$$k = 100 d_{10}^2$$~~

Dans cette étude $d_{10} = 0,11 \text{ mm}$ donc $k = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ cm/s}$ qui donne $k = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

Donc les deux formules donnent la même valeur, qui indique que c'est un sable fin de bonne perméabilité [56][63].

III. 3. 6. Le pH

Le pH d'un échantillon du sol rend compte de sa teneur en ions H⁺. La mesure du pH est effectuée sur un extrait du sol avec de l'eau distillée; de rapport 1/10. Il s'exprime selon une échelle de 0 à 14. Les valeurs faibles indiquent une acidité, les valeurs supérieures à 7 correspondent à un caractère basique. Le pH est mesuré avec un pH-mètre, selon les normes AFES (AFES 1995) [51][64][65].

III. 3. 7. La conductivité électrique

La conductivité électrique représente l'aptitude d'une solution aqueuse pour conduire un courant électrique. Cette aptitude dépend de la teneur en sel d'un échantillon du sol. Elle est mesurée selon les normes AFES (AFES 1995) sur un extrait du sol (de même façon que le pH) [50][61][63][64].

III.3.8. La teneur en matière organique (MO)

Contrairement à la fraction minérale, la fraction organique n'est pas constituée de particules élémentaires dissociables selon leurs dimensions mais d'un ensemble de substances essentiellement caractérisées de manière qualitative par leur nature chimique.

L'étude de la fraction organique d'un point de vue purement quantitatif se limite dès lors à un critère géométrique global, soit son volume total relatif. Pour des raisons pratiques toutefois, la notion de volume est remplacée par celle de masse. Si bien que la fraction organique d'un sol est caractérisée par la teneur en matière organique pondérale de sa phase solide W_{org} , soit le rapport de la masse de la fraction organique ; M_{org} à la masse totale de la phase solide M_s [51][61][62]

$$W_{org} = \frac{M_{org}}{M_s}$$

Pour la mesure de cette grandeur; la méthode Anne est utilisée ; selon les normes AFNOR (X 31-109) se basé sur la décomposition des molécules organiques par une solution d'acide sulfurique additionnée de bichromate de potassium [50][52][61]. Pour le sable utilisé, le résultat obtenu en MO est de 79 mg/g de sol ce qui présente 0.079 %. On remarque que ce sable est pauvre en MO.

Les résultats des analyses chimiques sont présentés dans le tableau III. 4

Tableau III. 4 : Valeurs des paramètres chimiques des sables.

	Carrières	MO %	pH	Sels %	CaCO ₃ %	Limon %	Argile %
1	N'Goussa	0,860	8,000	0,310	0,240	0,105	6,275
2	Hassi Sayah SG	1,204	8,680	0,019	0,170	1,075	4,650
3	In Salah	0,430	8,250	0,012	0,065	3,050	2,625
4	El Alia	0,258	8,300	0,022	0,280	0,150	4,925
5	Hassi Ben Abdellah	0,344	8,300	0,017	0,220	1,600	0,950
6	Errachdi	0,430	7,680	0,153	0,350	6,275	2,200
7	Meneguer	0,860	8,600	0,154	2,020	3,475	0,950
8	Taibate	0,950	8,800	0,019	1,820	1,050	4,150
9	Ben Naceur	0,940	8,950	0,007	1,480	0,175	2,050
10	Touggourt	0,688	8,400	0,247	1,340	1,750	7,375
11	Djamaa	1,376	8,150	0,066	0,300	2,500	2,700
12	Stil	2,752	8,400	0,234	4,990	1,800	4,925
13	Hassi Sayah SF	0,670	8,300	0,036	0,480	1,825	0,125
14	In Beida	0,172	8,230	0,139	0,570	0,850	4,325
15	Hassi Gnifida	1,720	8,300	0,007	0,430	1,450	5,375
16	Sidi Mehdi	1,204	7,970	0,160	3,170	1,200	9,450
17	Temacine	1,376	7,940	0,226	2,370	2,025	8,725
18	El Goug	1,548	8,000	0,173	3,190	1,350	3,950
19	Tebesbest	2,580	7,930	0,166	4,240	1,525	7,350
20	El Hadjira	1,376	8,210	0,032	1,420	0,400	5,150
21	Guemar	0,172	8,03	0,113	3,08	2,650	2,975

Les analyses des sables, montrent que tous les sables étudiés sont des sables pauvres en matière organique. Le sable le plus riche en matière organique est celui de Stil avec un taux de 2,752 % qui est considéré comme un taux faible. La salinité est aussi très faible pour l'ensemble des sables, la plus grande valeur est enregistrée par le sable de N'Goussa qui est de 0,3 %. Tous les sables sont alcalins et nous constatons que les sables de la région de Taibet Benaceur et Menagueur sont très basiques. La région de Touggourt et ces environs présente un taux de calcaire plus ou moins significatif par rapport aux autres sables de la région de Ouargla, à l'exception du sable de Hassi sayah Grossier, qui lui aussi caractérisé par un taux de calcaire remarquable. Les sables analysés contiennent une quantité non négligeable d'argile. 7 sables contiennent plus de 5 % d'argile et qui dépasse 9 % pour le sable de Sidi Mehdi.

III. 3.9. La composition minéralogique

III. 3.9.1.L'analyse du sable à la diffraction au rayon X (DRX))

Parmi les différents domaines d'applications de la diffraction de rayons X est la caractérisation de la structure cristallographique des échantillons et de mettre en évidence les différentes phases cristallines.

Le spectre de DRX est un enregistrement de l'intensité diffractée en fonction de l'angle 2θ , l'angle entre le faisceau incident et le faisceau diffracté. Les positions angulaires des raies de diffraction dans le spectre expérimental sont caractéristiques des paramètres du réseau cristallin de différentes phases de l'échantillon. Dans des bases de données les positions et les intensités des raies de diffraction de la plupart des matériaux connus ont été étudiées et répertoriées. La comparaison entre les positions angulaires de diffraction et les intensités correspondantes du spectre expérimental avec les données des bases de données permet d'identifier les phases constitutives de l'échantillon [66].

L'analyse vise à identifier la nature de sable utilisé comme support filtrant. Nous avons effectué cette analyse que sur le sable de N'Goussa en plusieurs essais et nous avons obtenu le spectre présenté dans la figure III. 3

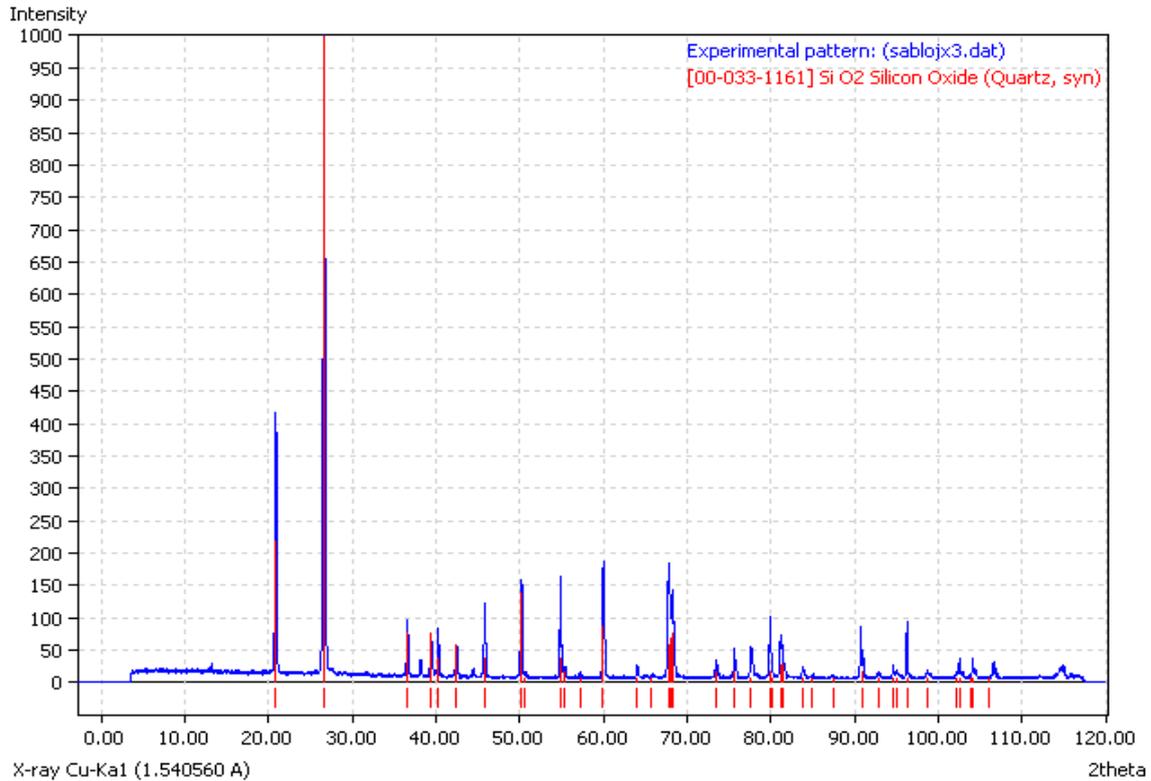


Figure III. 3 : Spectres du sable de N’Goussa

Le spectre de DRX enregistré sur le sable de N’Goussa montre qu’il est formé principalement d’oxyde de silicium SiO_2 .

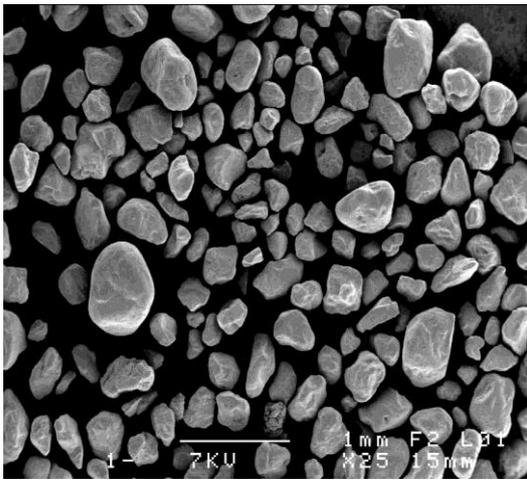
III. 3. 9. 2. L'analyse des sables à la microscopie à balayage électronique (MEB)

La microscopie électronique à balayage (MEB ou SEM pour Scanning Electron Microscopy en anglais) est une technique de microscopie fréquemment utilisée pour observer la surface de la pierre. Elle est utilisée pour évaluer les caractéristiques morphologiques des particules minérales ou organiques. A l’échelle du micron, elle fournit des informations sur la nature des particules et sur le caractère plus au moins hétérogène de leur surface. Elle est basée sur le principe des interactions électrons-matière. Un faisceau d’électrons balaie la surface de l’échantillon à analyser qui, en réponse, réémet certaines particules. Différents détecteurs permettent d’analyser ces particules et de reconstruire une image de la surface. Dans la pratique, au XXIe siècle, un grand nombre de constructeurs proposent des microscopes à balayage de série équipés de détecteurs d’électrons secondaires et dont la résolution se situe de 1nm à 20 nm [67][68].

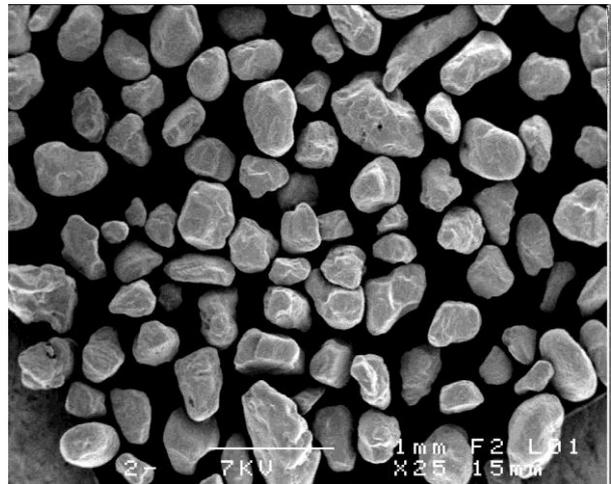
Les rayons de la microscopie à balayage électronique ne traverse que les 7 μm au maximum (1 à 7 μm) et la profondeur traversée dépend de la densité du produit par rapport au cuivre, elle augmente avec la diminution de la densité. Nous avons donc une analyse superficielle. Nous avons analysé 16 échantillons de sable par microscopie à balayage électronique et nous avons obtenu les résultats suivants :

La forme générale des grains:

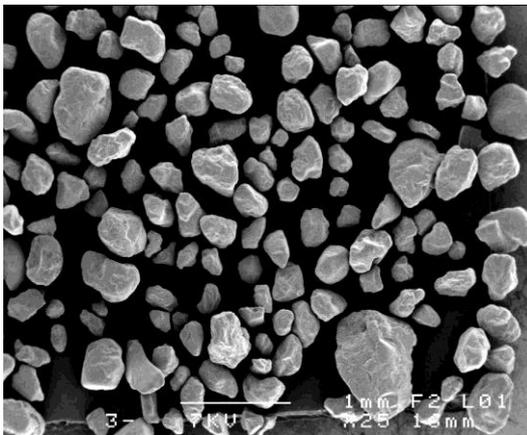
La figure III. 4 nous montre la forme des grains des 16 carrières de sable et une idée sur la granulométrie de ces différents sables



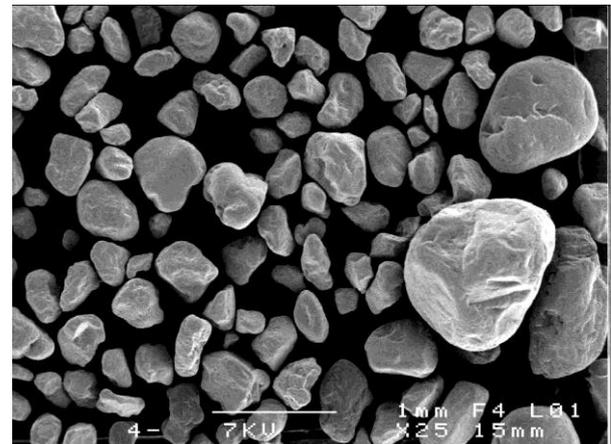
1 Ain Bieda



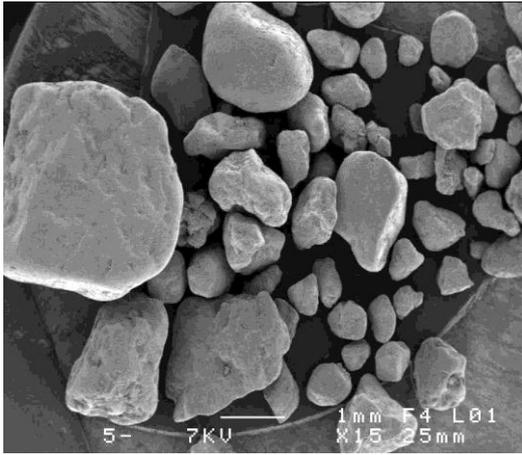
2 Hassi Guenifida



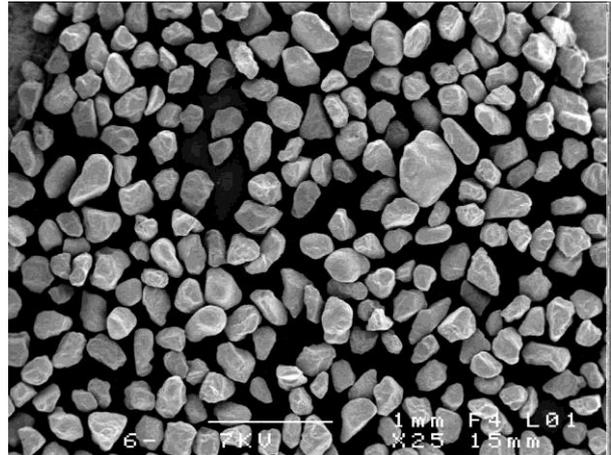
3 Hassi Ben Abdellah



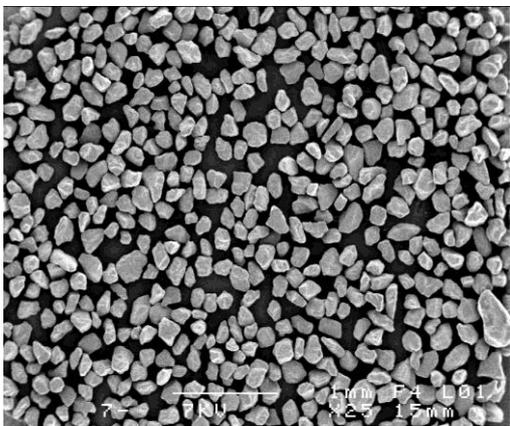
4 Hassi Sayah SF



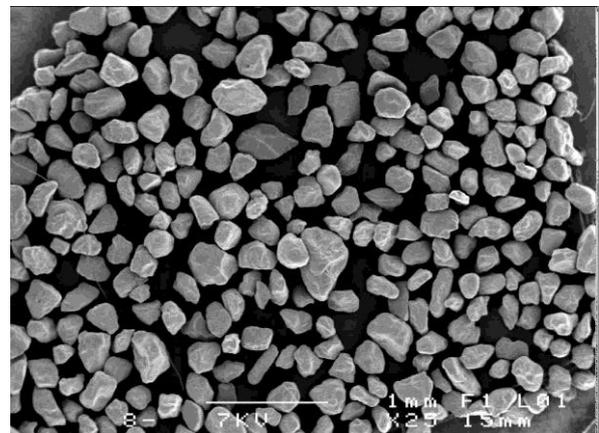
5 Hassi Sayah SG



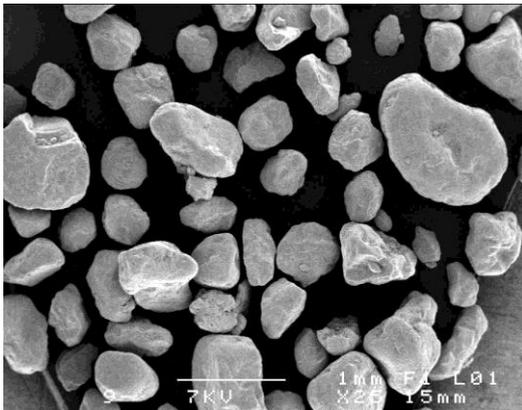
6 Benaceur



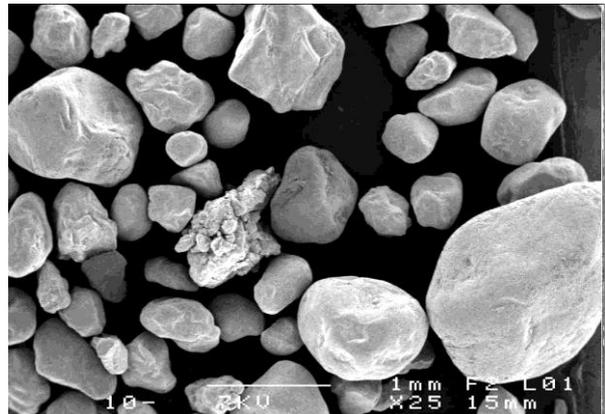
7 In Salah



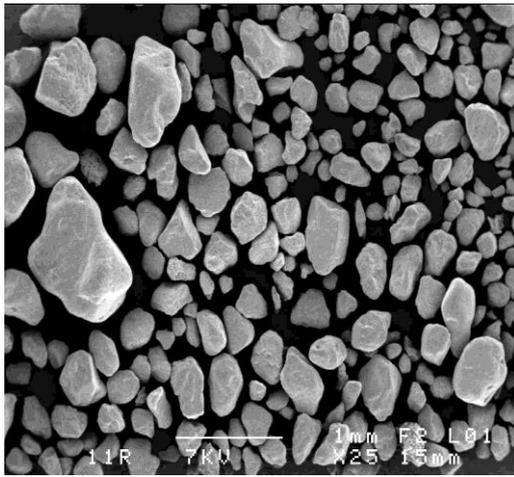
8 Taibat



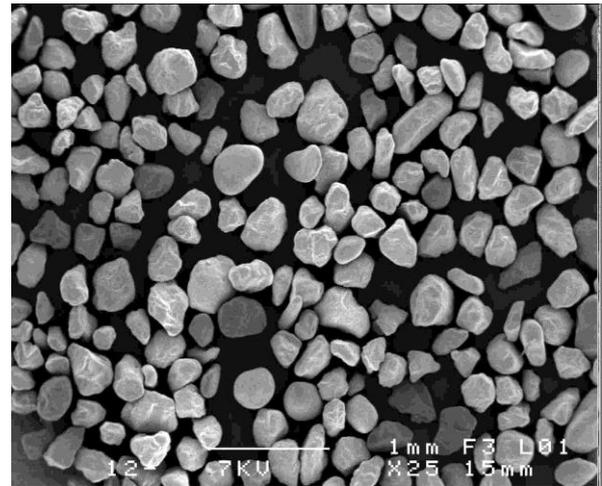
9 Stil



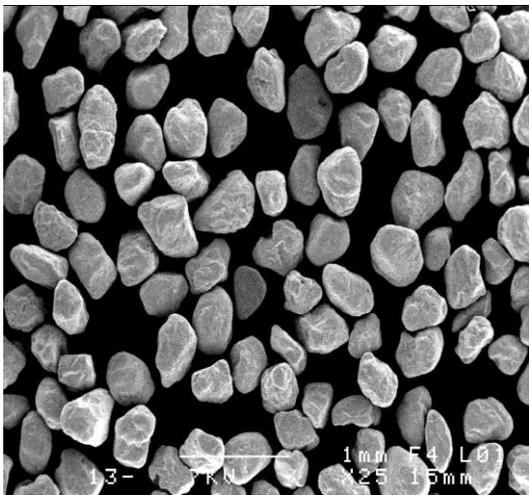
10 Djamaa



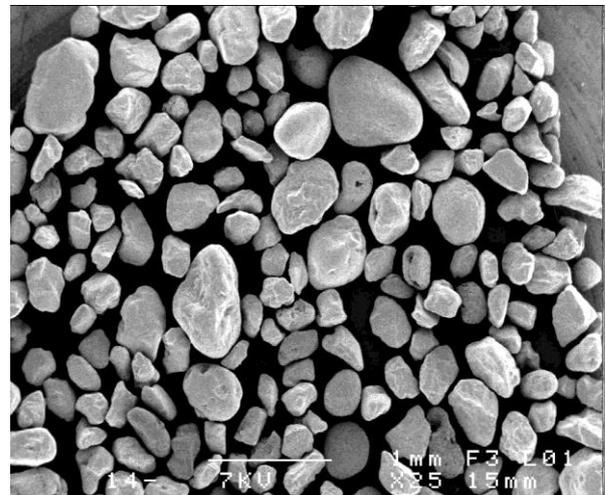
11 Errachidi



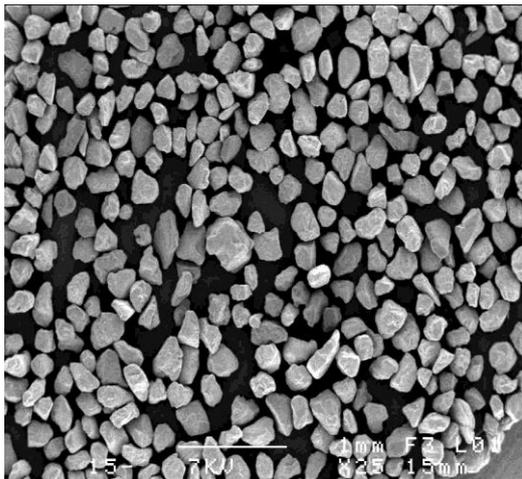
12 Kouinin



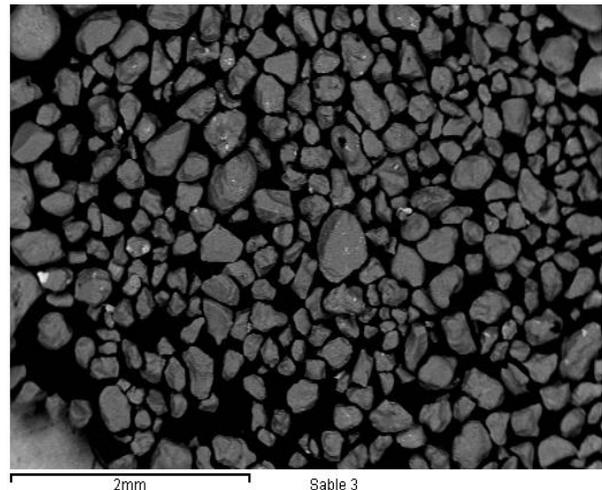
13 El Khobna



14 Sidi Mehdi



15 El Alia



16 N'Goussa

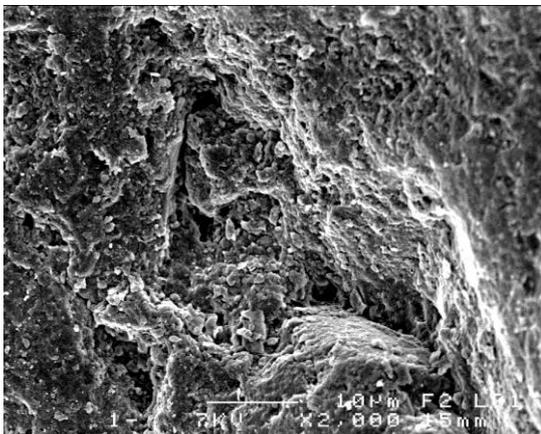
Figure III. 4 : Analyse par MEB de 16 sables de carrières différentes (forme des grains)

D'après la figure III. 4, nous constatons que la forme des grains de sable est aigue avec des différences légères, ce qui montre que ces sables ont subi les mêmes conditions naturelles et ont le même origine et la même composition.

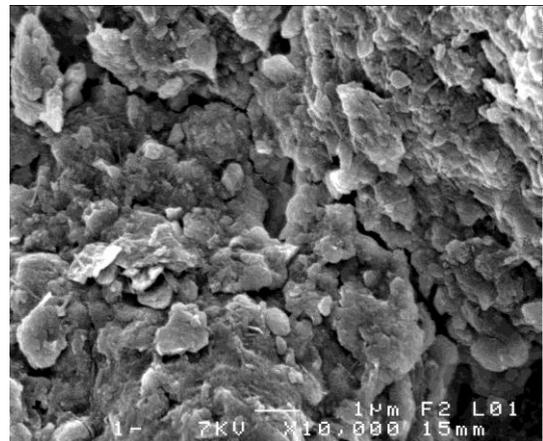
Détail des sables

Après avoir visualisé un ensemble de grain, nous allons procéder à la visualisation d'un seul grain de chaque carrière. Pour avoir une bonne représentativité, nous avons visualisé plusieurs grains et le grain représenté dans la figure III. 5 ressemble à la majorité des grains pour chaque sable.

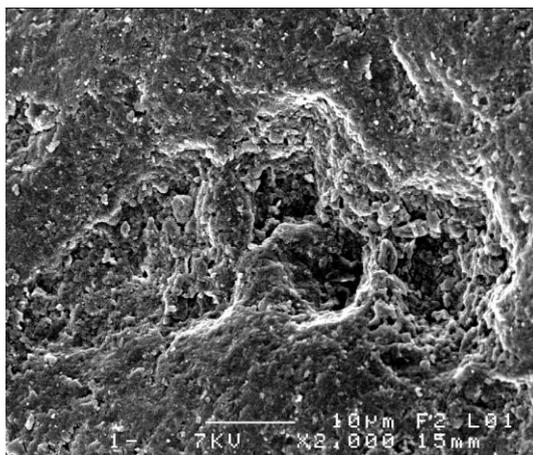
Sable de Ain Bieda



Photos 1

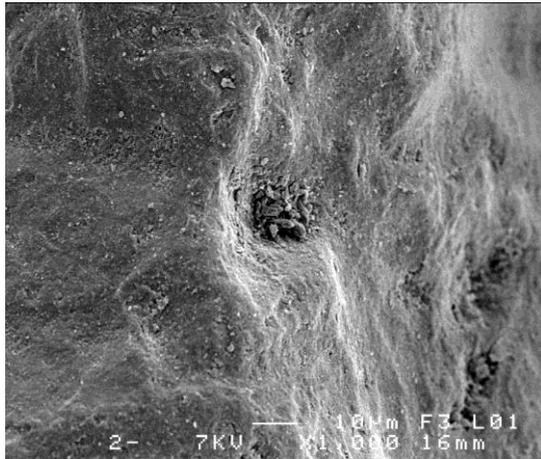


Photos 2

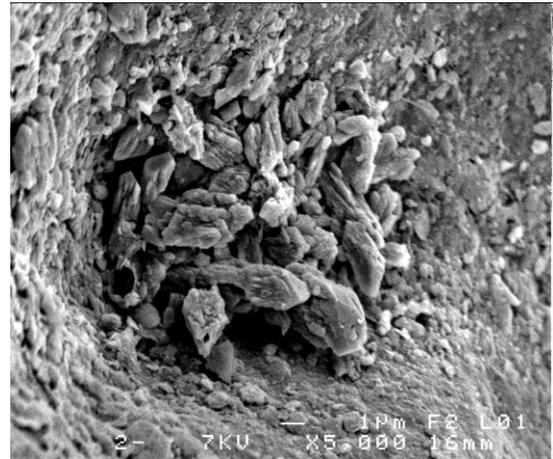


photos 3

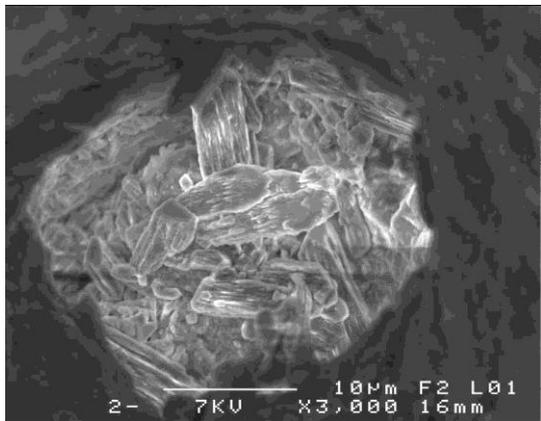
Sable de Hassi Guenifida



Photos 1

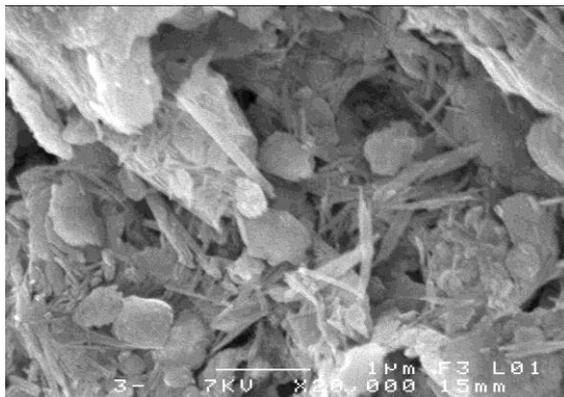


Photos 2

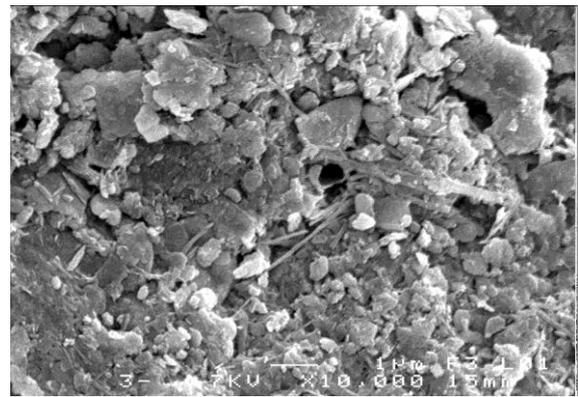


Photos 3

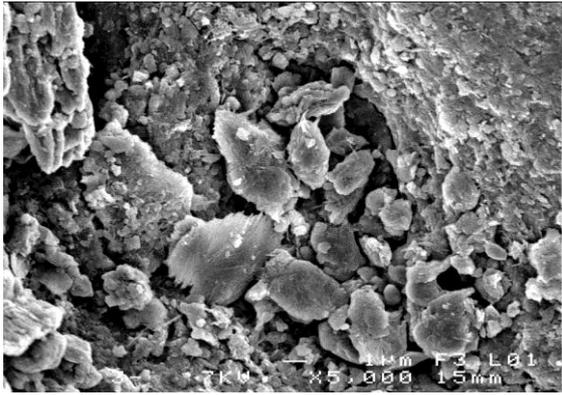
Sable de Hassi Ben Abdellah



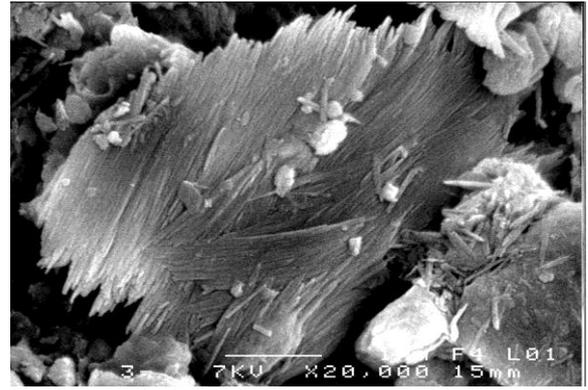
Photos 1



Photos 2

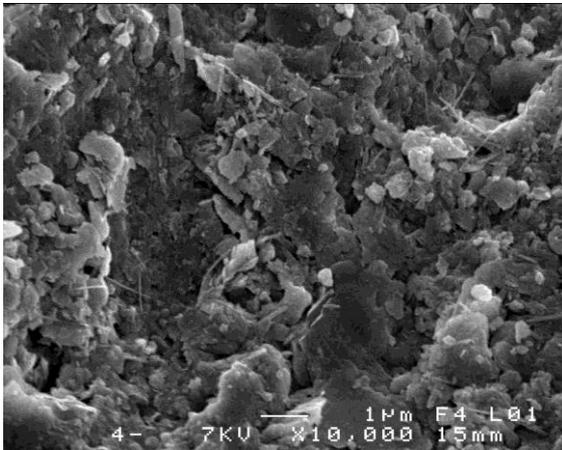


Photos 3

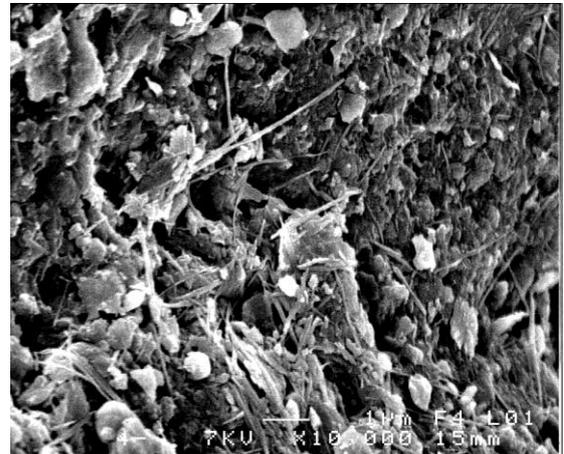


Photos 4

Sable Hassi Sayah (sable fin)

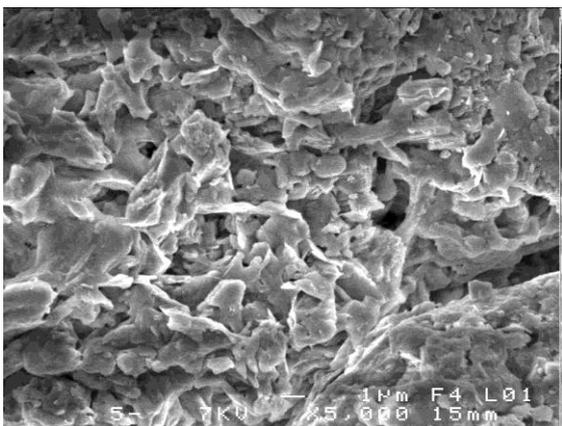


photos 1

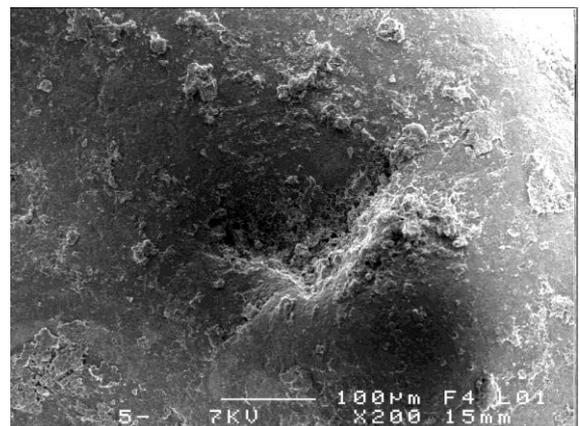


Photos 2

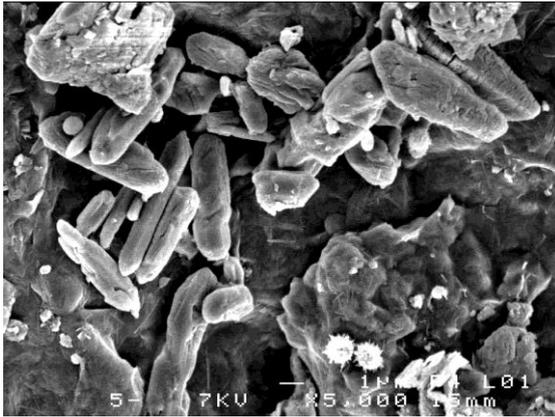
Sable Hassi Sayah (sable grossier)



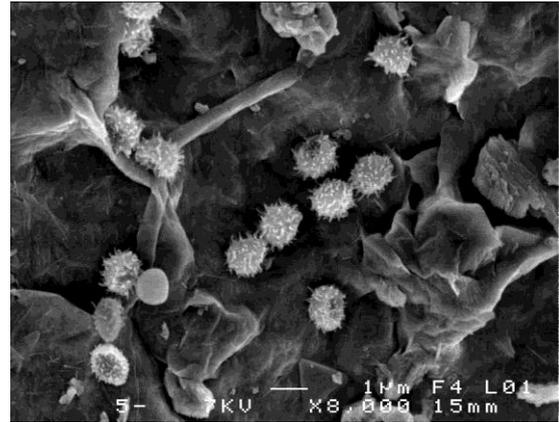
Photos 1



Photos 2

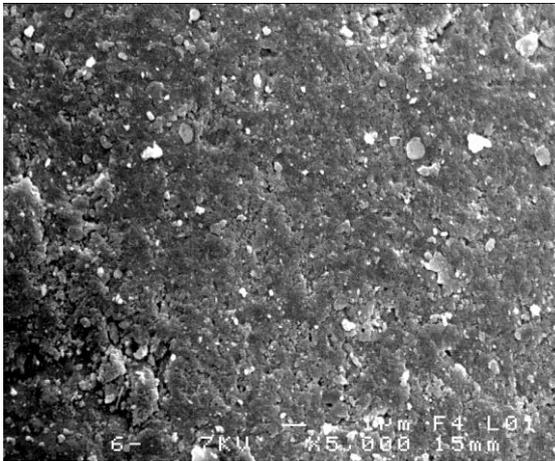


Photos 3



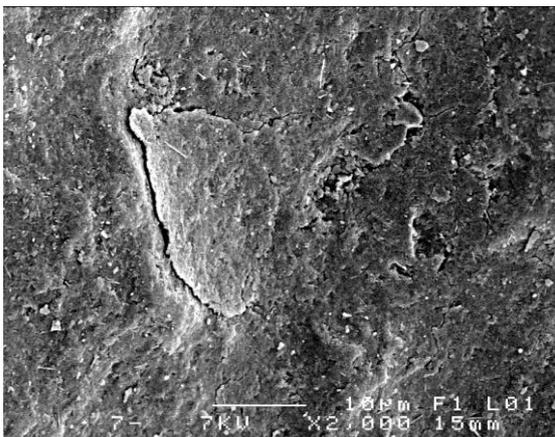
Photos 4

Sable de Benaceur

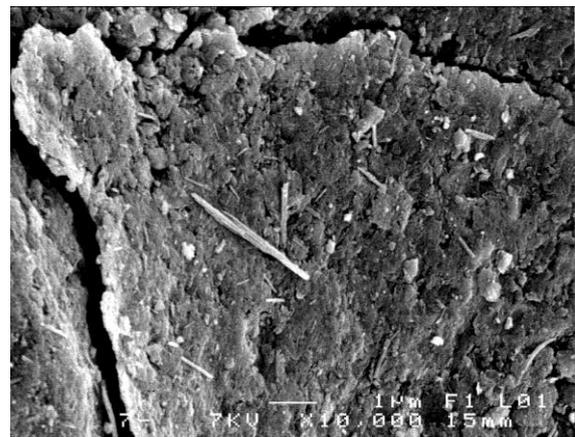


Photos 1

Sable de In Salah

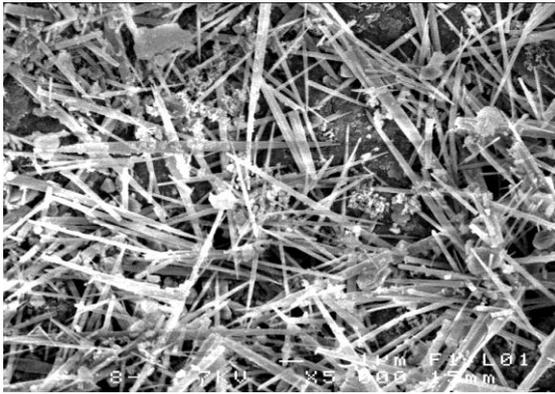


Photos 1



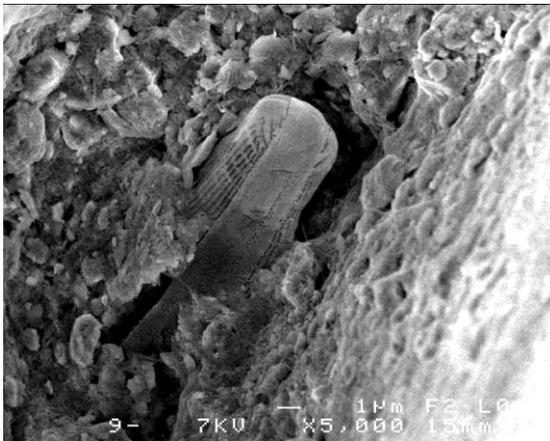
photos 2

Sable de Taibat

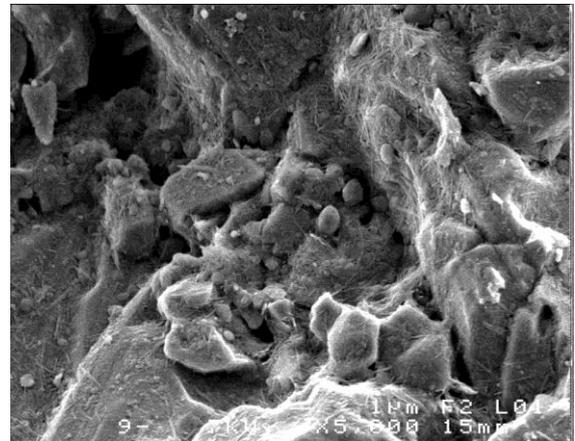


Photos 1

Sable de Stil

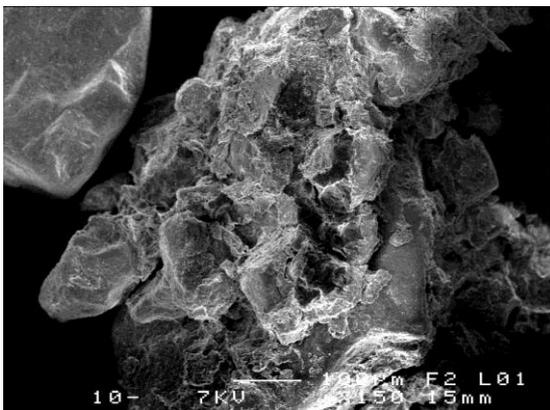


Photos 1



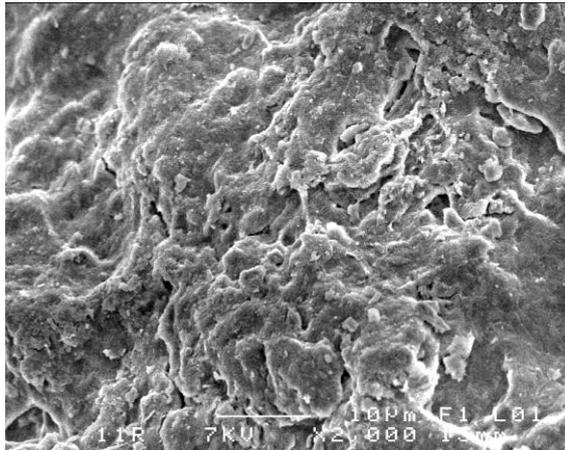
Photos 2

Sable de Djamaa

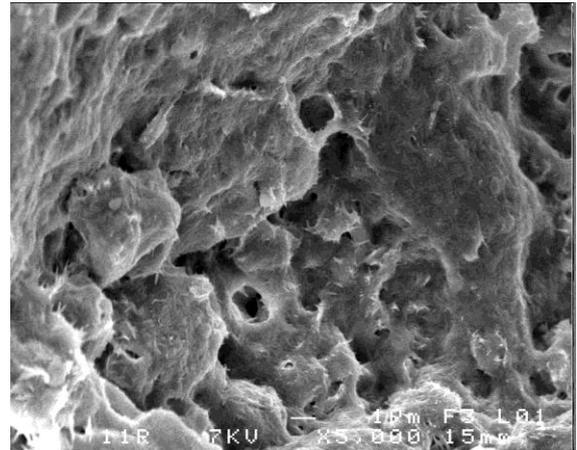


Photos 1

Sable d'Errachidi

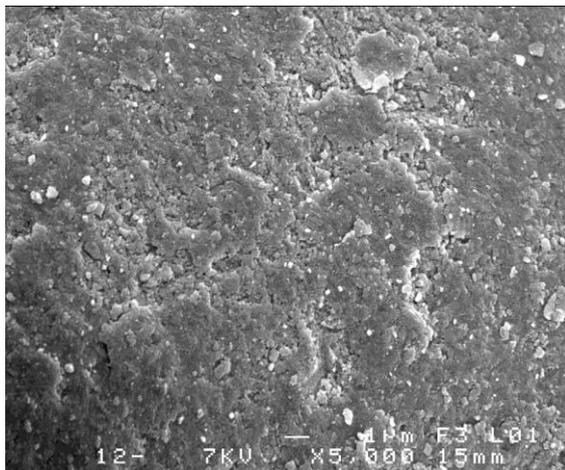


Photos 1

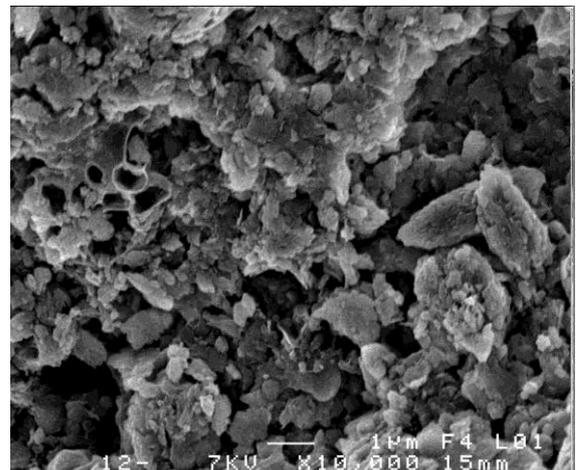


photos 2

Sable de Kouinine

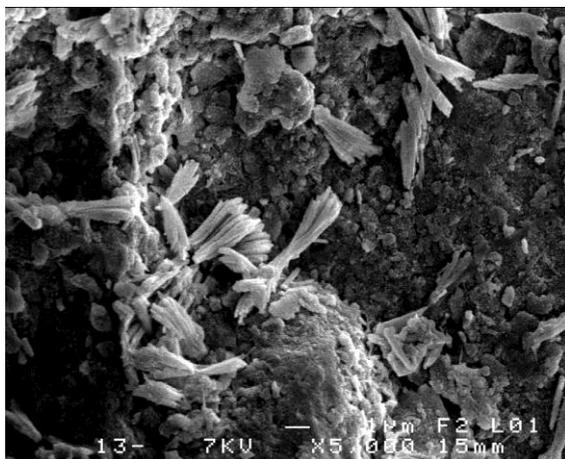


Photos 1

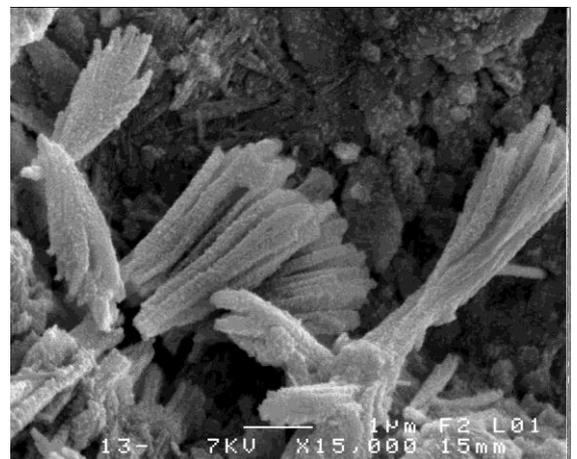


Photos 2

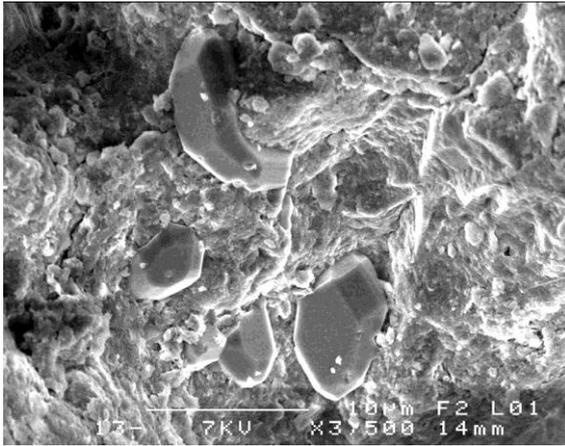
Sable d'El Khobna



Photos 1



Photos 2

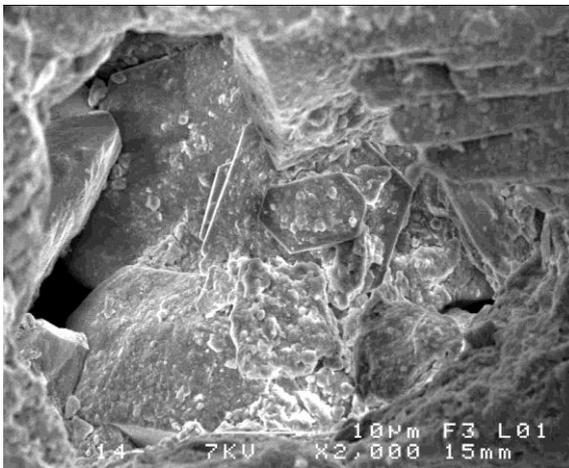


Photos 3

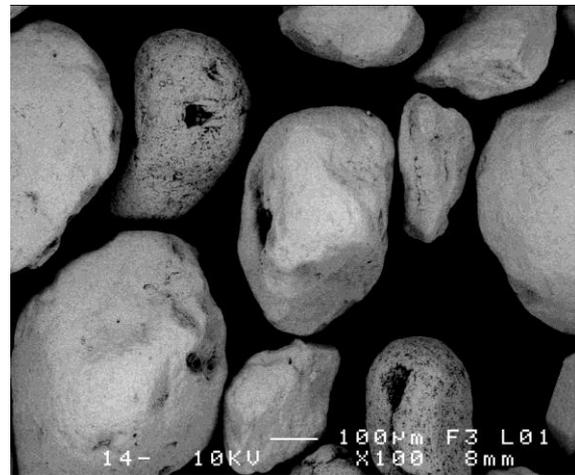


Photos 4

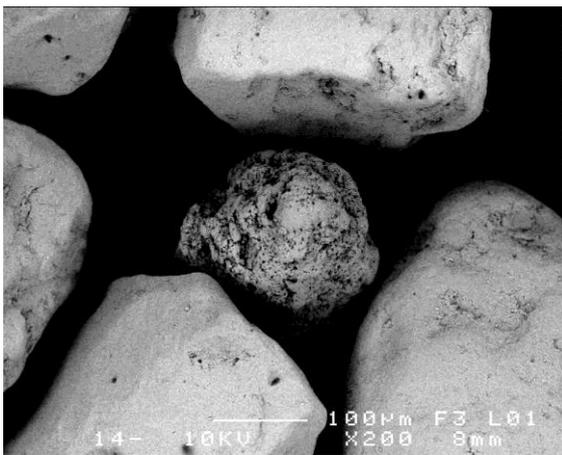
Sable de Sidi Mahdi



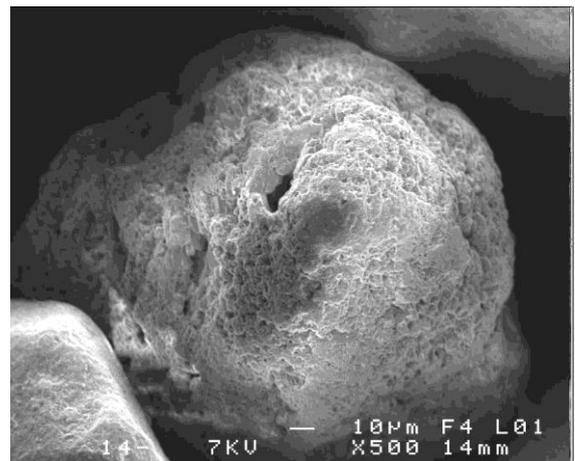
Photos 1



Photos 2

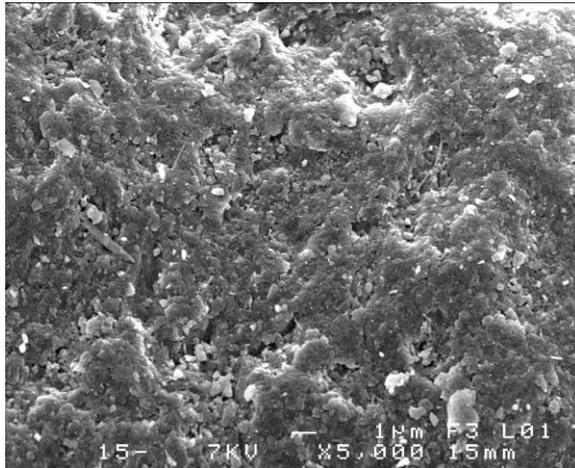


Photos 3

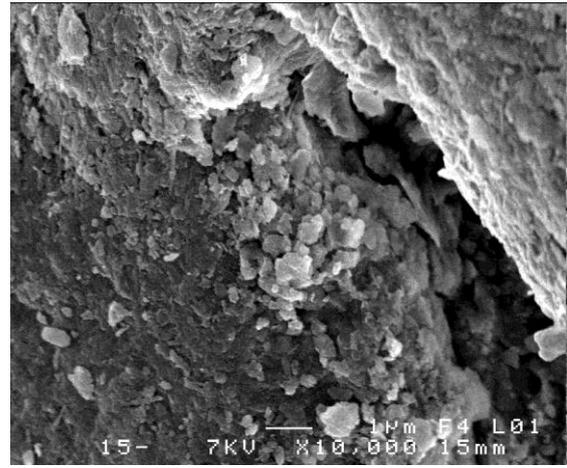


Photos 4

Sable d'El Alia



Photos 1



Photos 2

Figure III. 5 : Détail des grains

La chose commune est l'existence d'une pellicule d'argile et limon qui couvre les grains de sable. Cette pellicule peut contenir des oxydes de fer qui sont apparents sous forme d'aiguilles. Ces aiguilles sont remarquables pour les sables de la région de Ouargla et elles n'existent pas dans les sables de la région d'El oued (sable de Kouinine). Nous pouvons expliquer les détails de l'état de surface de chaque grain représentant une carrière comme suit :

- 1- Ain Bieda : Une accumulation ferreuse argileuse très apparente dans les creux du grain
- 2- Hassi guenifida : Sable très homogène, nous constatons une accumulation des cristaux qui peut être des sels dans une zone confinée du grain (planques cabossées) photos 1 et 2 ; la photo 3 nous montre une forme d'argile, probablement l'aloisite, qui se présente sous forme d'aiguilles et de tubes, une argile proche de la kaolinite.
- 3- Hassi Ben Abdellah : Il est plus hétérogène que Hassi guenifida, il ressemble beaucoup à celui de Ain beida du point de vue structure. Nous constatons très visiblement les aiguilles qui sont des oxydes de fer, c'est très visible sur les photos 3 et 4 où l'assemblage de ces aiguilles donne une forme marquée, il y a aussi présence de croûtes bien visibles sur la photo 2.
- 4- Hassi Sayah F : Plus hétérogène que les autres sables du point de vue structure. On observe la présence d'aiguilles très marquée surtout sur la photo 2, il y a moins de croûte que celui de Hassi Ben Abdellah.

5- Hassi Sayah G : La photo 1 nous montre les feuillets d'argile et leur arrangement. La photo 2 montre une croûte, et sur la photo 3, nous constatons une accumulation des cristaux avec des oxydes de fer. Par ailleurs, sur la photo 4, nous constatons la présence de matière organique caractérisée par des spores de champignons très visibles ainsi qu'un filament de champignons dans la partie gauche de la photo d'une longueur d'environ 10 μm .

6- Benaceur : La caractéristique particulière de ce sable est qu'il soit homogène avec la présence d'une accumulation de particules très fines formant avec des argiles, une pellicule couvrant les grains de quartz.

7- In Salah : C'est le sable le plus fin, nous remarquons la présence d'oxyde de fer très remarquable ; les deux photos nous montrent un décollement très visible d'une croûte d'argile. Cette constatation est remarquée dans tous les grains présentant l'échantillon d'analyse.

8- Taibet : Ce sable est très semblable à celui de Benaceur. Les quelques grains visualisés contiennent une cristallisation particulière comme le montre la photo 1 qui peut être des sulfates ou des carbonates.

9- Stil : C'est un sable très hétérogène ; nous constatons la présence d'oxyde de fer. La photo 1 nous montre le squelette d'une diatomée d'algue unicellulaire avec la présence de matière organique formant un bon collage de petits grains comme le montre la photo 2.

10- Djamaa : Ce sable contient de l'argile sous forme de boulettes, ce qui indique un apport alluvionnaire. La photo 1 nous montre l'épaisseur importante de la couche argileuse contenant des aiguilles constituant l'oxyde de fer.

11- Errachedi : C'est un sable très hétérogène ; les deux photos nous montrent un gang avec les oxydes de fer avec une densité importante mélangée avec des oxydes métalliques.

12- Kouinin : Nous constatons des grains bien entassés par des argiles. La photo 2 nous montre la présence de quelques cristaux et de la matière organique. Nous n'avons pas remarqué la présence des oxydes de fer.

13- El Khobna : Nous constatons que c'est un sable homogène qui contient des aiguilles indiquant la présence des oxydes de fer avec un mélange terreux argileux. Les photos 1 et 2 nous montrent une accumulation particulière de cristaux. La photo 3 nous montre une autre

accumulation de cristaux mélangés avec de la terre. La photo 4 est une photo retro diffusé qui peut nous montrer le contraste chimique. D'après cette photo, nous constatons que ces cristaux sont proches à l'élément essentiel des grains qui est la silice.

14- Sidi Mahdi : Sable hétérogène présentant des grains particuliers qui ne sont pas du quartz. En faisant des photos en retro diffusées à ces gains (photos 2 et 3) , nous constatons une certaine différence de contraste entre ces grains et les grains de quartz. La photos 1 nous montre des creux très marqués au niveau des grains particuliers. La photo 4 représente un grain de quartz qui est tout à fait différent au grain présenté sur les photos 2 et 3.

15- El Alia : C'est le sable le plus fin après celui de In Salah, il présente aussi des aiguilles qui sont des oxydes de fer. La photo 2 présente la couche d'argile très visible qui enrobe le grain.

III. 4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu révéler quelques caractéristiques des sables. Celles-ci peuvent intervenir d'une façon ou d'une autre dans le processus de la filtration. ; Comme nous avons constaté les différences qui existent entre un sable et autre d'une même région malgré leur ressemblance d'un point de vue analyse visuelle. Mis à part le sable de Sidi Mahdi, les autres sables ne présentent pas de grandes différences.

CHAPITRE 4

IV: Dispositif expérimental de traitement des eaux usées domestiques

IV. 1. Introduction

Cette partie de l'étude est basée sur l'utilisation de trois pilotes identiques constitués de la chaîne de traitement complet, utilisée dans le cas de l'assainissement autonome pour les petites agglomérations et les équipements isolés. Dans cette technique, il s'agit d'utiliser un ouvrage de prétraitement (fosse septique) et un ouvrage de traitement (filtre à sable). Il s'agit de tester cette technique à l'échelle de laboratoire en utilisant les sables de dunes à l'état naturel.

IV. 2. Définition

L'assainissement autonome consiste à collecter, évacuer, traiter et se débarrasser des eaux usées dans une surface très réduite par des ouvrages très simples. Cette technique d'assainissement est utilisée pour les zones rurales et les zones isolées avec des petits débits.

L'assainissement autonome se compose d'un ouvrage de prétraitement, d'un ouvrage de traitement et d'un ouvrage d'évacuation (dispersion).

IV. 2. 1. Ouvrage de prétraitement

L'ouvrage le plus utilisé dans le cas de cet assainissement assurant le prétraitement est la fosse septique qui est un ouvrage hydraulique qui permet un traitement préliminaire en assurant deux fonctions :

- Une fonction physique (décantation): rétention des matières solides donnant en sortie de fosse un effluent totalement liquide, évitant le colmatage de la filière à l'aval. Il s'agit d'une séparation gravitaire des particules solides entre flottation (formation d'un chapeau de graisses) et sédimentation (formation d'un lit de boues).
- Une fonction biologique (fermentation) : la fermentation des boues décantés et du liquide surnageant est due à l'activité des micro-organismes anaérobies contenus dans l'effluent brut, les micro-organismes utilisant les matières biodégradables, la fermentation se traduit par une liquéfaction partielle des boues et une diminution de leur volume et le dégagement des gaz [69][70].

IV. 2. 1.1. Définition de la fosse septique

La fosse septique est un appareil destiné au collectage et la liquéfaction des matières excrémentielles. Sa structure à une entrée et une sortie en différence de niveau permettant l'écoulement de l'eau. Elle se compose de deux ou trois compartiments en volumes différents dont l'un à 2/3 du volume total de la fosse destiné à la décantation des boues contenues dans l'effluent et leur fermentation et la rétention des matières flottantes, l'autre à 1/3 du volume de la fosse destiné à la décantation des boues restantes et l'évacuation des gaz (H_2S et CH_4) issues de la fermentation et un tampon de visite permettant le vidange de la fosse septique voir (figure IV. 1).

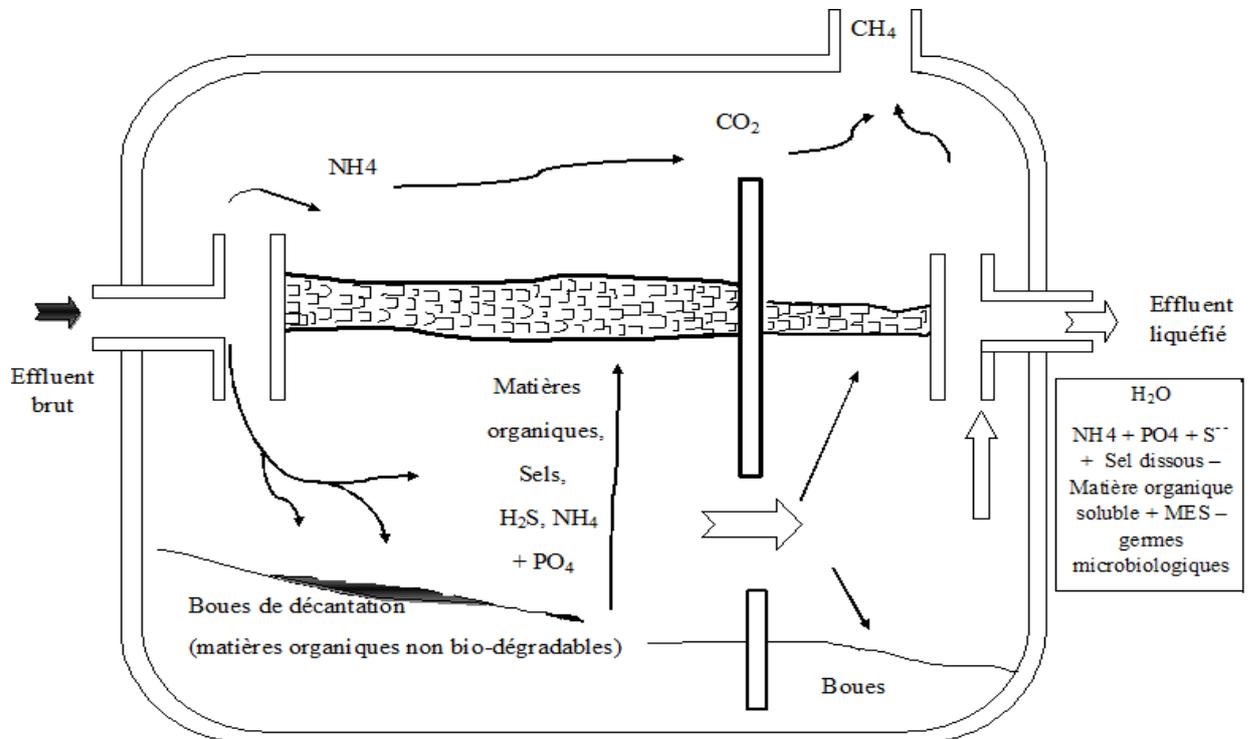


Figure IV. 1 : Schéma de principe de la fosse septique toute eaux (FS_{TE})

La fosse septique ne constitue qu'une étape dans le processus d'épuration des eaux usées domestiques. Elle doit obligatoirement être suivie d'un élément épurateur. Elle ne joue aucun rôle d'amélioration sanitaire des effluents, qui présentent les mêmes risques que l'effluent brut en entrée. Les matières solides arrivent dans la fosse et se présentent sous trois formes différentes :

- matières facilement décantables (matières fécales, papiers, débris divers....) qui vont former les boues au fond de la fosse.

Dispositif expérimental de traitement des eaux usées domestiques

- Matières solides flottantes : produits de digestion de boues, graisses qui forment un « chapeau » à la surface de la fosse.
- Matières solides en suspension : dont la densité proche de celle de l'eau, ne permet pas la décantation.
- En sortie de la fosse septique, les caractéristiques des effluents peuvent varier dans une fourchette assez large.

Dans certains cas, lorsque les effluents sont concentrés en matières grasses (provenant des restaurants, dégraissage des voitures,...), un ouvrage de prétraitement doit être placé avant la fosse septique afin de retenir les graisses qui s'accumulent en surface formant le chapeau, puis l'éliminer périodiquement [71][72].

IV. 2. 1.2. Fonctionnement de la fosse septique

L'eau usée domestique brute parcourt la fosse septique en passant par des ouvertures aménagées dans la partie médiane des cloisons séparatrices. (Figure IV. 2)

Cet effluent est réparti en trois zones :

- La première zone comporte les boues lourdes qui se déposent sur le radier.
- La deuxième zone comporte l'eau décantée qui se trouve dans la partie médiane.
- La troisième zone comporte les boues légères qui se rassemblent à la partie supérieure de la fosse et constituent un gâteau ou « chapeau » [73][74].

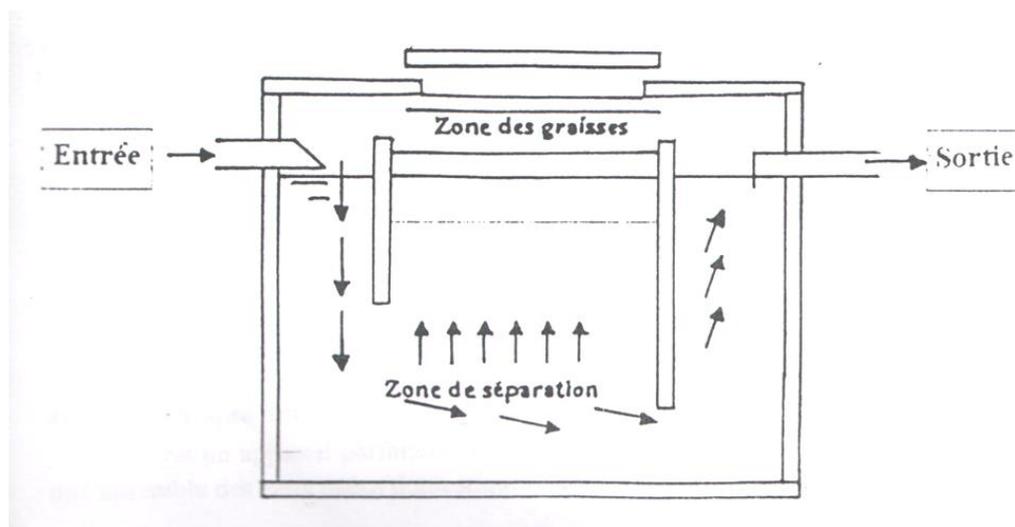


Figure IV. 2 : Le principe du séparateur de graisse

IV. 2. 1.3. Dimensionnement de la fosse septique

La fosse septique doit être conçue de façon à avoir des volumes adéquats pour le stockage des boues et des écumes tout en optimisant les conditions de décantation. Il est généralement reconnu qu'une superficie plus grande favorise une meilleure efficacité (Voir figure IV. 3)

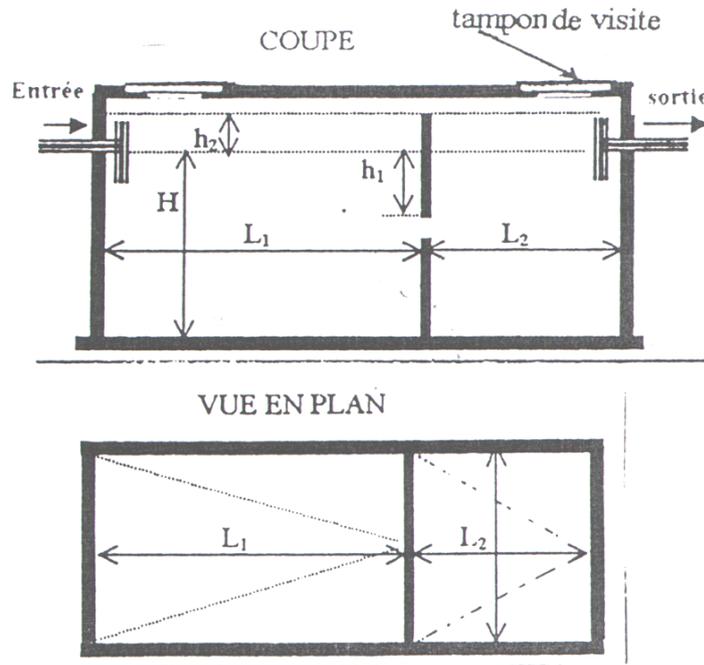


Figure IV. 3 : Les dimensions d'une fosse septique

Les rapports géométriques les plus fréquents pour des fosses septiques sont [69][75] :

- Volume ne dépassant pas $4,8\text{m}^3$;
- Hauteur liquide entre 0.8m et 1.8m ; $H_L = 0.8$ à 1.8 m.
- Largeur entre 1 et 2 fois la hauteur liquide ; $B = 1$ à $2 H_L$.
- Longueur entre 2 et 3 fois la largeur. $L = 2$ à $3B$
- Hauteur au-dessus du liquide $h_2 = 0.30$ m

IV. 2. 1.4. Différents types des fosses septiques :

a) Fosse septique des eaux de vannes ou (fosse septique traditionnelle) :

Ce dispositif ne prend pas en considération les eaux ménagères, car jusqu'à un certain temps, les usagers de cette fosse considéraient les eaux vannes plus polluées que

celles des eaux ménagères et que ces dernières ne constituaient aucun risque de pollution. Mais actuellement il s'est avéré que les eaux ménagères sont autant polluées que celles des eaux vannes (du point de vu DBO₅, DCO) [76].

b) Fosse chimique :

Il s'agit d'un appareil qui peut présenter un intérêt là ou l'on dispose de très peu d'eau et dans les locaux à occupation temporaire (caravanes, avions,...). Il assure la collecte, la liquéfaction et l'aseptisation des matières excrémentielles mais il ne faut pas jeter de l'eau dans une fosse chimique sauf quelques litres pour le lessivage périodique.

c) Fosse fixe :

L'utilisation de ces dispositifs est rare (en France l'utilisation est d'environ 1%). La fosse ne reçoit que les eaux vannes, car si elle recevait toutes les eaux, la multiplication des vidanges serait trop couteuse. Donc les eaux ménagères non admises peuvent être dirigées soit vers en caniveau soit vers un puisard [73].

d) Fosse septique toutes eaux :

C'est un appareil parfaitement étanche destiné à la collecte et à la liquéfaction de l'ensemble des eaux usées domestiques : eaux vannes et eaux ménagères.

e) Fosse de décantation:

Avec ce type de prétraitement, on recherche essentiellement une digestion des boues afin d'en réduire leur volume. Les boues ainsi digérées ont une teneur en eau beaucoup plus faible. Elles sont plus stables et le traitement final est facile.

De manière générale, la filière de traitement (phase de prétraitement) est représentée par les figures IV. 4 et IV. 5 [75].

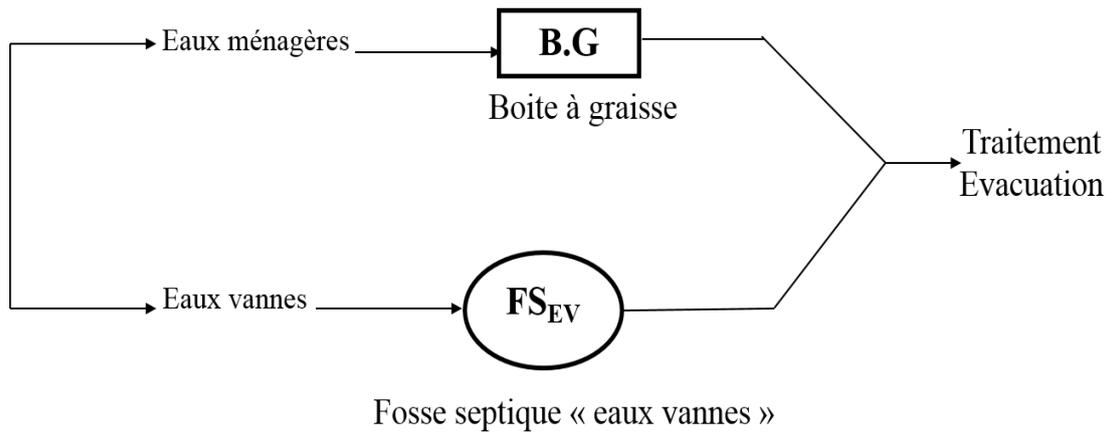


Figure IV. 4 : Filière de traitement traditionnelle.

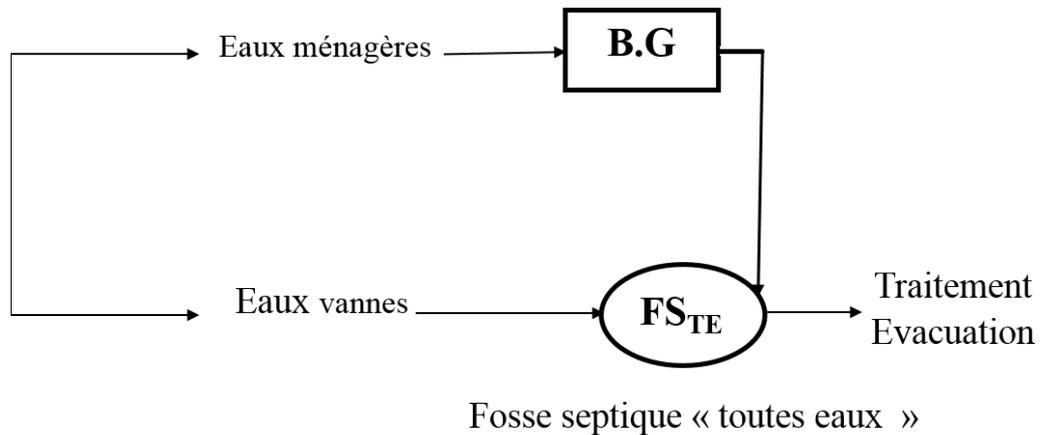


Figure IV. 5: Filière de traitement autonome (actuellement utilisée)

IV. 2. 2. Ouvrage de traitement

Ce sont des dispositifs fonctionnant en voie aérobie, ils reçoivent les eaux septiques prétraitées. Pour assurer un bon traitement des eaux, ils doivent avoir une quantité d'oxygène suffisante pour la dégradation des matières organiques existantes dans l'effluent.

IV. 2. 2.1. Epandage sous-terrain sur sol naturel

Ce système est utilisé lorsque les caractéristiques du sol en place sont aptes au traitement et dispersion des effluents. Les effluents septiques en passant du regard de dispersion vers les tuyaux d'épandages qui se trouvent au sein d'une couche de gravier en profondeur de 0,6 à 1m, elle se pose sur le sol nature entre le gravier et la terre végétale, on

place une feuille anti-contaminant pour protéger l'épandage contre l'entraînement des fines particules, le raccordement entre les regards et les tuyaux d'épandages, se fait par des tuyaux non perforés [76].

IV. 2. 2.2. Filtre à sable vertical non drainé

C'est un appareil destiné à assurer l'épuration d'un effluent après son passage dans la fosse septique. Un matériau d'apport granulaire se substituant au sol naturel est utilisé comme système épurateur et le sol comme un système d'évacuation [76].

IV. 2. 2.3. Filtre à sable vertical drainé

Ce dispositif est basé sur le principe de percolation de l'effluent provenant de fosse septique avant son rejet dans le milieu récepteur à travers une tranchée de sable. Ce dispositif est constitué par un système de drains disposé de graviers (10 à 20 cm). Il ne faut pas placer le filtre à sable sous voiries ni planter d'arbres ou arbustes sur le filtre, il faut éviter que les eaux de ruissellement ne viennent pas sur celui-ci [77].

IV. 2. 2.4. Filtre à sable horizontal

Ce système est basé sur l'épuration de l'effluent par cheminement horizontal dans une couche de sable.

IV. 2. 2.5. Terre d'infiltration drainée

Ce dispositif est mis en place lorsque le sol au-dessus de la roche mère est insuffisamment épais pour permettre la réalisation d'un système de drains surmontant une assez grande épaisseur du sol pour pouvoir épurer l'effluent.

IV. 2. 2.6. Terre d'infiltration non drainée

Une couche épuratoire (sol rapporté ou reconstitué) est mise en place sur le terrain naturel. Elle supporte un massif de gravier contenant un dispositif de dispersion identique à celui du lit d'infiltration (filtre horizontal, épandage.....).

IV. 2. 2.7. Dimensionnement des ouvrages de traitement

La surface des dispositifs de traitement dépend du nombre des habitants, mais en général on prend une surface de $(2\div 2,5) \text{ m}^2 / \text{éq hab.}$

IV. 2. 3. Ouvrages d'évacuation

Si les rivières et les fleuves sont couramment utilisés comme exutoires naturels pour les rejets relevant des stations d'épuration, il n'est pourtant pas forcément ainsi pour l'épuration autonome compte tenu de la grande dispersion de l'habitat.

Il y a lieu de rechercher les moyens pratiques, fiables et d'un entretien peu contraignant qui soit bien adapté à ce mode d'épuration. Parmi les procédés d'épuration des eaux usées, la technique basée sur l'utilisation de la fosse septique et le filtre à sable, apparait la plus adéquate dans les régions du sud.

IV. 3. Conception du dispositif de traitement :

Cette partie de l'étude est basée sur l'utilisation de trois pilotes identiques (figure IV.6) constitués d'ouvrage :

- D'alimentation.
- De prétraitement (fosse septique).
- De traitement (filtre à sable).
- De rejets (bouteille).

IV. 3.1. Ouvrage d'alimentation :

C'est une éprouvette gradué, car l'alimentation se fait manuellement chaque heure durant 12 heures par jour.

IV. 3.2. Ouvrage de prétraitement (fosse septique) :

Nous avons procédé à la récupération des trois fosses septiques identiques en plexis-glace, existantes au niveau du laboratoire. Les dimensions de ces fosses septiques sont basées sur les normes de l'OMS (AFNOR) avec quelques petites différences (voir tableau IV. 1). [4].

Dispositif expérimental de traitement des eaux usées domestiques



Photo 1 : les trois pilotes d'épuration des eaux usées



Photo 2 : le système de répartition d'eau dans le filtre



Photo 3 : Vue de coté du pilote montrant la fosse septique et le filtre

Figure IV. 6 ; Photos du dispositif de traitement.

Tableau IV. 1 : Les dimensions des fosses septiques préparées.

N° Fosse	L (mm)	B (mm)	H (mm)	Volume (L)
1	378	128	202	9,773
2	380	130	208	10,275
3	373	125	200	9,325

IV. 3.3. Ouvrage de traitement (filtre à sable) :

Notre filtre de sable est constitué du sable de dunes de N’Goussa. Il est composé de :

1. Un cylindre en PVC de hauteur 1 m, son diamètre extérieur est de 250mm, son diamètre intérieur est de 242 mm. Il est fermé par une plaque en plexi-glace pour éviter le contact de l’eau avec le support métallique.
2. Une couche de gravier de 10 cm de hauteur dans le fond du filtre pour permettre le drainage des eaux filtrées. Une autre couche de 5 cm de hauteur est placée en haut du sable pour permettre la répartition homogène des eaux. Les graviers ont un diamètre de 8 à 15 mm et plus ou moins homogènes.
3. Une couche de sable assure le processus d’épuration : élimination des matières en suspension et dégradation des matières organiques. La couche de sable à une hauteur de $h_s=70$ cm [78] et ses caractéristiques sont mentionnées dans le tableau IV. 3
4. Un support cylindrique en acier reposant sur trois pieds de diamètre $d=253$ mm.
5. Ouvrage de collecte : Dans notre cas nous avons utilisé des bouteilles en verre marron afin d’éviter les risques de dégradation de matière organique durant la collecte des eaux filtrées (figures IV. 6 et IV. 7).

Tableau IV. 2 : Caractéristiques du milieu filtrant (sable de dunes)

Paramètre	Valeur
pH	8,25
Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1750
Diamètre du sable en mm	0,08 à 1
Coefficient de perméabilité en mm/h K_s	2512,8
Densité réel D_r	2.5
Densité apparente D_{app}	1,48
Coefficient d'uniformité D_{60}/D_{10} C_u	2
Les chlorures	1,11 %
Les carbonates	0,87 %
Les sulfates	6,82 %
Insolubles	87,94 %

IV. 3.4. Réseau hydraulique :

Le réseau hydraulique se compose de :

- a) Conduite d'alimentation à l'entrée de la fosse septique assurant l'alimentation de pilote de diamètre de 15/21mm.
- b) Conduite de raccordement en PVC de diamètre 15/21mm assurant le raccordement entre la fosse septique et le répartiteur.
- c) Un répartiteur pour assurer une bonne répartition des eaux sortantes de fosse sur la surface de filtre à sable, il s'agit d'une conduite en PVC (15/21) sous forme d'une croix munie de plusieurs orifices de diamètres de 2 à 2.5 mm et d'un espacement de 3 cm. Les trois extrémités de ce dispositif sont bouchées et la 4^{ème} est raccordée à la conduite de raccordement avec un coude (figure IV. 8).

- d) Un tuyau flexible assurant l'évacuation des eaux traitées, placé au fond du filtre, de diamètre 15/21 mm et de longueur de 20 cm.

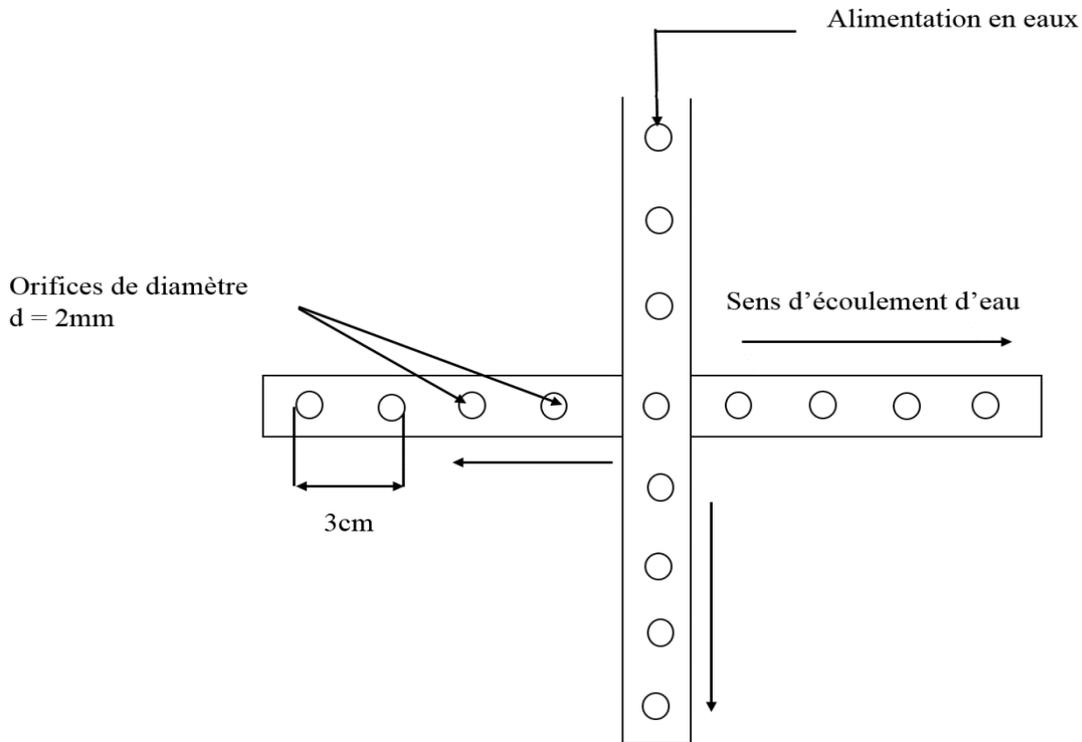


Figure IV. 7 : Schéma d'un répartiteur dans le filtre

IV. 4. Fonctionnement du dispositif

Au départ, nous avons rempli les trois fosses septiques avec l'eau de robinet.

L'alimentation de ces fosses septiques se fait avec des eaux ménagères prélevées des lavabos et de restauration de la cité universitaire de Ouargla.

Le débit d'alimentation dépend du temps de séjour, il est donné par la relation suivante :

$$Q=V/T \quad (l/j)$$

Où :

Q : le débit d'alimentation (l/j).

V : le volume d'eau (l).

T : le temps de séjour (jours).

Le temps de séjour est souvent choisi entre 2 à 5 jours, et dans notre cas nous avons pris la moyenne : $T=2,5$ jours, d'après le volume de notre fosse septique [4].

Alors :

$$Q=V/T$$

$$9,275/2,5=3,71 \text{ (l/j)}$$

Nous avons commencé l'injection de l'eau usée en 10 alimentations séparées et établies en 10 heures.

Après la stabilité de fonctionnement des dispositifs, et afin de suivre la variation qualitative de l'eau, nous déterminons le temps de prélèvement de chaque campagne en fonction du temps de séjour comme suit :

1. Entrée de la fosse (eau brute).
2. Après 2,5 jours de la sortie de la fosse.
3. Après 12 heures de la sortie du filtre.

Les analyses sont effectuées chaque semaine

IV. 5. Suivi d'évolution des paramètres analytiques :

Les prélèvements des échantillons se font au niveau de la sortie de chaque fosse et la sortie de chaque filtre, suivis des analyses physico-chimiques suivantes : pH, Conductivité électrique, DCO, DBO₅, MES, et bactériologiques.

Une étude de la variation du rendement en fonction du temps pour chaque paramètre (DCO, DBO₅, MES) et en suite entreprise. Cette évolution du rendement des pilotes a été suivie pendant 72 jours avec un pas de temps d'une semaine.

IV. 5. 1. Les paramètres physiques.

Les résultats de mesure des paramètres : température, pH et conductivité électrique, avant et après les différentes phases de traitement sont présentées dans le tableau IV. 3

Tableau IV. 3 : Mesure de la température, la conductivité électrique et le pH

		Température (° C)			C E (mS/cm)			pH		
N° de campagne	Nombre de Jours	Eau brute	Sortie Fosse	Sortie Filtre	Eau brute	Sortie Fosse	Sortie filtre	Eau brute	Sortie Fosse	Sortie Filtre
1	08 jours	24,2	21,1	21,2	4,65	4,53	5,95	6,40	6,77	7,01
			22,0	22,3		4,62	5,97		6,74	6,98
			22,4	22,2		4,63	5,95		6,76	6,99
2	13 jours	23,3	23,3	23,5	4,40	4,37	5,74	6,80	7,01	7,83
			23,2	23,5		4,33	5,74		7,54	7,84
			23,1	23,9		4,34	5,74		7,25	7,83
3	15 jours	23,7	24,9	24,6	4,23	4,33	5,66	6,45	7,12	7,61
			24,7	24,7		4,33	5,66		7,05	7,64
			25,1	24,7		4,33	5,63		7,20	7,62
4	20 jours	22,2	21,1	20,4	4,33	4,22	5,53	7,18	7,05	7,45
			21,1	20,4		4,24	5,57		7,18	7,53
			21,1	20,5		4,26	5,59		7,08	7,56
5	27 jours	28,2	25,5	24,4	5,46	5,07	6,62	7,22	7,36	7,70
			25,7	23,9		5,07	6,56		7,40	7,76
			25,7	24,0		5,07	6,56		7,52	7,90
6	35 jours	25,1	26,0	25,0	4,87	5,11	6,35	7,46	7,53	7,92
			26,0	24,9		5,12	6,48		7,53	7,91
			25,4	24,9		5,08	6,45		7,60	7,80
7	41 jours	26,0	26,2	24,8	5,09	5,10	6,32	8,70	8,72	8,81
			26,6	24,6		5,14	6,26		8,61	8,80
			26,4	24,9		5,11	6,28		8,64	8,83
8	48 jours	26,2	26,4	25,4	4,33	4,37	5,96	8,52	8,70	9,03
			26,9	25,4		4,40	5,76		8,57	9,10
			26,7	25,6		4,43	5,70		8,45	8,94
9	52 jours	26,6	28,2	28,6	4,21	4,23	5,56	8,16	8,46	8,87
			28,4	29,2		4,26	5,52		8,45	8,87
			27,9	28,8		4,25	5,51		8,50	8,87
10	57 jours	29,3	28,8	24,6	4,30	4,34	5,61	8,71	8,70	8,95
			28,7	24,6		4,35	5,61		9,21	8,97
			28,7	24,8		4,39	5,57		9,10	8,95
11	62 jours	28,6	28,9	24,3	4,18	4,10	5,36	7,23	8,41	8,88
			29,1	24,5		4,08	5,35		8,42	9,02
			29,1	24,6		4,09	5,34		8,48	8,81
12	72 jours	28,9	28,9	27,1	3,96	4,01	5,39	8,60	8,82	9,01
			29,1	27,1		3,98	5,39		8,74	8,99
			29,4	27,9		4,01	5,38		8,87	9,00

La température :

La température de l'eau sortante des fosses a subi une légère augmentation qui peut être expliquée par les réactions chimiques qui ont lieu dans la fosse septique (fermentation) ou bien dans le filtre à sable.

Le pH :

Nous constatons une légère augmentation du pH dans la majorité des points et pour les deux phases de traitement. Ceci est dû à la transformation de la matière organique en matière minérale et surtout en la formation probable des bicarbonates.

La conductivité électrique :

Nous constatons une augmentation après la fosse, causée par la transformation des matières organiques en sels. Après filtration, l'augmentation devient plus importante par effet de lessivage des sables et de la transformation de la matière organique.

IV. 5. 2. Les matières en suspension (MES) :

Après avoir mesuré les MES à l'entrée et à la sortie de chaque ouvrage, nous avons procédé à la détermination du rendement d'élimination de ces dernières. Les résultats sont illustrés par la figure IV. 9.

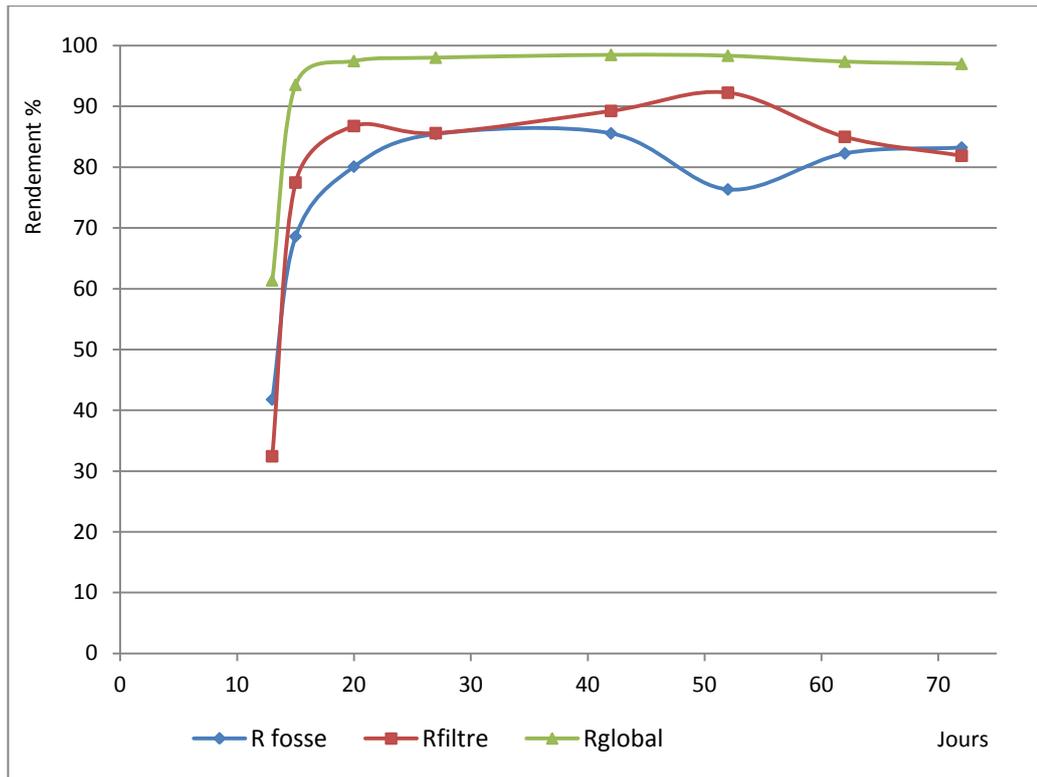


Figure IV. 8 : Variation du rendement d’abattement des MES en fonction du temps

Nous constatons que le rendement d’élimination des matières en suspension est faible dans les premiers jours, dû à la faible concentration de l’eau brute. Pendant la deuxième semaine, il y a une augmentation remarquable du rendement et après la deuxième semaine le rendement est légèrement perturbé suite à la variation de la charge d’eau. Après filtration, nous remarquons que le rendement dans les premiers jours est faible (non maturation du filtre). Nous observons ensuite une augmentation importante qui s’explique par l’élévation de la capacité de rétention, mais après 52 jours le rendement diminue légèrement suite au commencement de la saturation des filtres.

Le taux moyen d’élimination de la MES durant la période de fonctionnement est de 31,64 g/m² j [79].

IV. 5. 3. Elimination de la demande chimique en oxygène (DCO) :

La DCO constitue l’un des paramètres les plus importants à suivre pour mettre en évidence l’efficacité de l’épuration ; la mesure de la DCO a été suivie durant la période du

travail des pilotes. La figure IV. 10 nous donne la variation des rendements d'abattement de la DCO en fonction du temps.

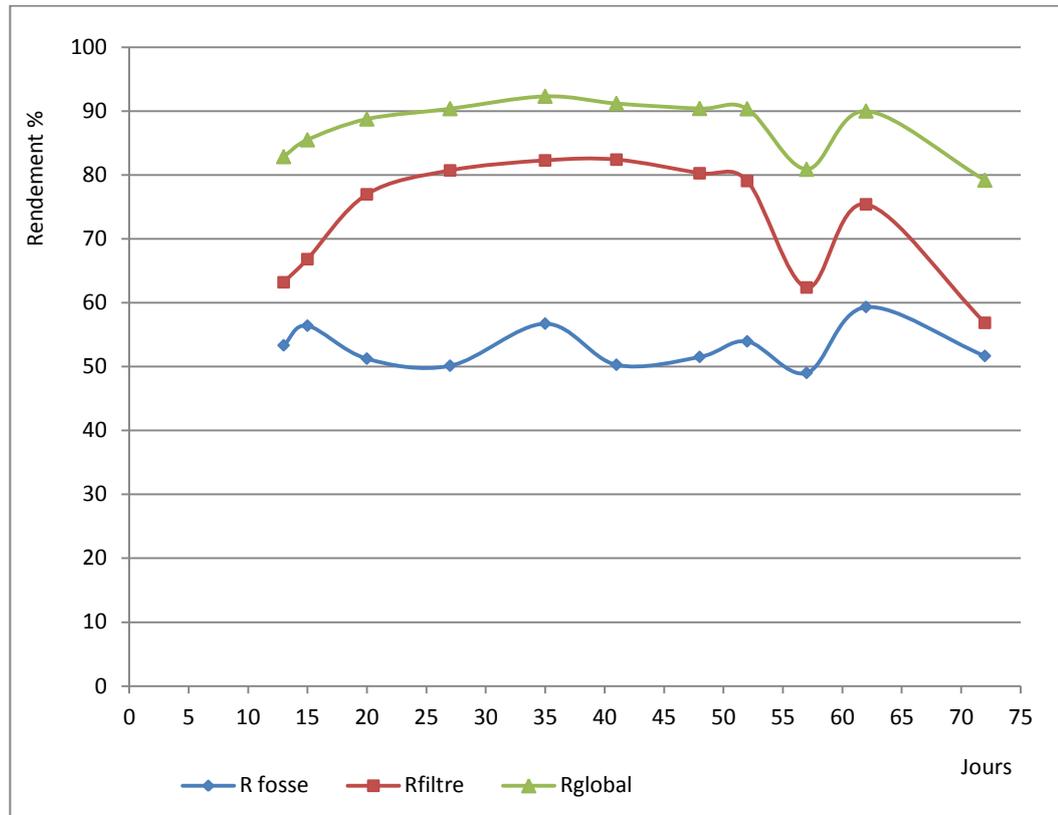


Figure IV. 9 : Variation du rendement d'abattement de la DCO en fonction du temps

Après la fosse, nous constatons qu'il y a une légère perturbation du rendement due à la variation qualitative de l'eau brute d'une journée à l'autre. Mais les valeurs du rendement restent toujours supérieures à 50 % à l'exception des quelques points mais proches de 50 %. Ceci est dû à la décantation, la flottation de certaines matières et à la fermentation d'autres éléments basées sur la transformation des matières organiques en sels.

Après filtration, nous constatons qu'il y a une augmentation remarquable du rendement épuratoire de la DCO dans les premiers jours de fonctionnement des filtres jusqu'à 35 jours, ce qui s'explique par la bonne maturation des filtres. La courbe se stabilise ensuite avec une légère perturbation jusqu'au 52ème jour. C'est à dire qu'une quantité de matières en suspension se décante au fur et à mesure de la dégradation de la matière organique par la biomasse ainsi le rendement augmente. A partir de 52 à 72 jours, le rendement diminue suite au début de saturation des filtres.

Le taux moyen d'élimination de la DCO durant la période de fonctionnement est de $97,61 \text{ g/m}^2 \cdot \text{j}$ [79].

IV. 5. 4. Elimination de la demande biologique en oxygène (DBO₅) :

La figure IV. 11 nous donne la variation du rendement d'abattement de la DBO₅ en fonction du temps.

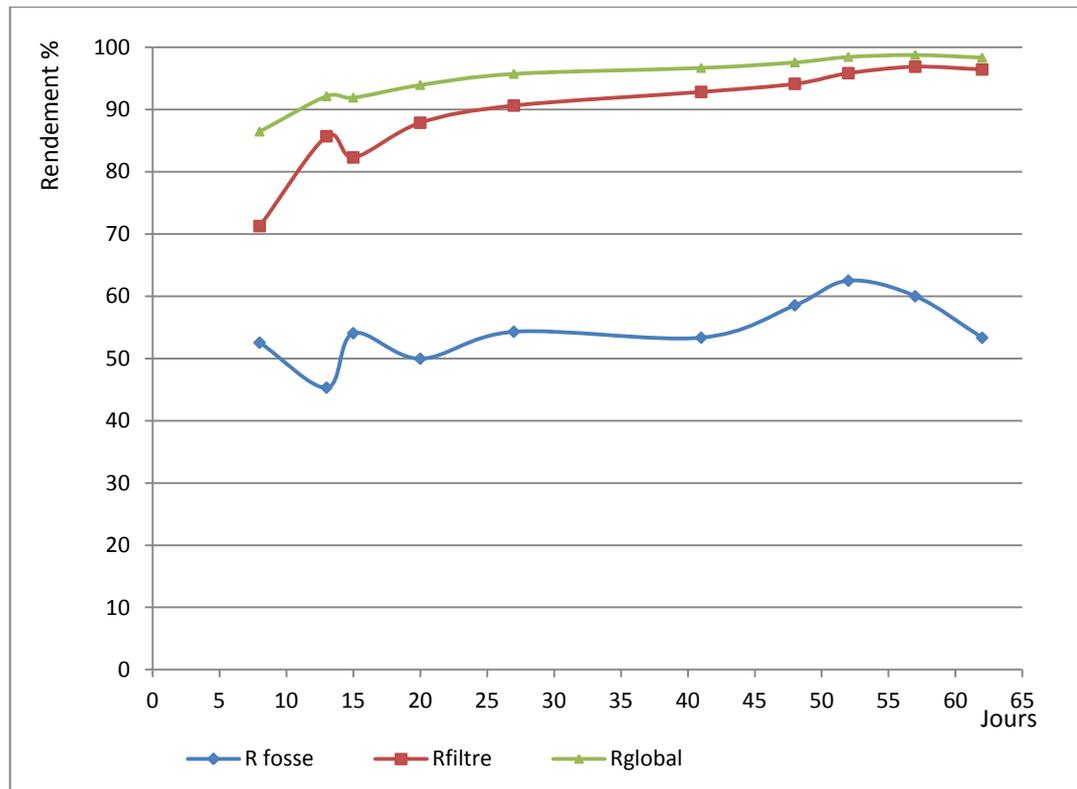


Figure IV. 10 : Variation du rendement d'abattement de la DBO₅ en fonction du temps

Après la fosse septique nous remarquons qu'il y a une légère augmentation du rendement de la DBO₅ due à la dégradation de la matière organique par les bactéries par voie anaérobie. Après 13 jours, le rendement diminue au vu de la diminution ponctuelle de l'activité bactérienne.

A la sortie du filtre à sable, nous observons qu'il y a une légère augmentation du rendement jusqu'au 57^{ème} jour, où commence une stabilisation, il dépasse les 80% et il dépasse 90% après 30 jours [80][81]. A 62 jours, on constate une diminution du rendement de l'abattement de la DBO₅ qui peut être justifiée par la diminution de la taille des pores

qui constitue un obstacle pour la matière organique et les matières en suspension en général.

Le taux moyen d'élimination de la DCO durant la période de fonctionnement est de 69,60 g/m².j

IV. 5. 5. Elimination bactériologique

Afin d'améliorer la qualité de l'eau traitée, nous avons réalisé une opération de désinfection suite à quoi une évaluation des paramètres bactériologiques est effectuée :

Les coliformes fécaux :

Les résultats obtenus montrent qu'il y a une bonne élimination de ces coliformes. Pour la désinfection, nous constatons une élimination de 96,25% qui représente un taux de 9 germes/100ml. Ce taux répond aux normes d'irrigation [26] (10 germes/100ml).

Les streptocoques :

Notre eau ne contient pas de streptocoques, vu la qualité des eaux utilisées (eaux ménagères).

Les germes totaux :

Nous pouvons dire qu'il y a une bonne élimination

Les colibacilles :

Concernant la désinfection, le rendement est supérieur à 97% et le taux de colibacilles est de l'ordre de 7 germes / 100 ml d'eau. Si on compare ces résultats avec les normes d'irrigation [29], on peut dire que notre eau peut être utilisée en irrigation. Le tableau IV. 4 nous donne les rendements d'élimination bactériologique pour différentes étapes de traitement.

Tableau IV. 4 : Résultats des analyses bactériologiques : (germe/100ml) et les rendements d'élimination

N° de campagne	Type des germes	L'eau brute	Sortie FS	R _{fosse} %	Sortie de filtre	R _{filtre} %	La desinfection	R Desinfection %
01	Coliformes fécaux	252.10 ⁴	2640	99,89	132	99,99	00	100
	Streptocoque	40	-----	-----	00	100	00	100
	Germes totaux	368.10 ⁸	392.10 ⁶	98,93	332.10 ⁶	99,12	300.10 ⁶	9,63
02	Coliformes fécaux	>240	>240	-----	35 28	>85,4 >88,3	09	96,25
	Colibacilles	>240	>240	-----	35 28	>85,4 >88,3	07	97,08
	Streptocoques	00	00	00	00	00	00	00

IV. 5. 6. Caractéristiques des eaux après traitement

Le tableau IV. 5 nous donne les caractéristiques des eaux traitées après désinfection pour quelques campagnes de mesures.

Tableau IV. 5 : caractéristiques de l'eau épurée

Les paramètres	Eau épurée Sortie des filtres	Après désinfection
Température (°C)	24,6	-----
pH	8,27	-----
C.E (ms/cm)	5,66	-----
MES (mg/l)	11,79	-----
DCO (mg/l)	606,24	234,5
DBO ₅ (mg/l)	22,5	9,4
Coliformes fécaux	65	4,5
Streptocoque	00	00
Germe totaux	332.10 ⁶	300.10 ⁶
Colibacilles	35	7

Si on compare nos résultats avec les normes de potabilité et les normes d'irrigation, nous constatons que notre eau peut être utilisée en irrigation sans aucun risque mais avec drainage pour vaincre le problème de salinité.

IV. 6. Conclusion

Il ressort de cette partie de l'étude que la qualité du sable des dunes assure une bonne filtration d'effluent. Leur structure permet la circulation de l'eau avec séparation des matières en suspension ce qui signifie qu'ils peuvent jouer un rôle filtrant.

L'utilisation des sables de dunes permet de résoudre le problème des eaux usées sans recours à des techniques très coûteuses et qui nécessitent des moyens de gestion très importants.

Les résultats obtenus par le prototype apparaissent satisfaisants. Les valeurs de la DBO₅ et de la DCO vont diminuer d'avantage si nous associons à cette installation une phase d'aération, ce qui permettra d'utiliser cette eau en irrigation après sa désinfection.

Par ailleurs, les premiers résultats d'analyse bactériologique sont très encourageants

CHAPITRE 5

CHAPITRE V : Comparaison de l'efficacité de filtration des différents sables

V. 1 Introduction

Dans cette partie du travail, nous allons faire une étude comparative entre quelques sables du Sahara septentrionale caractérisés dans le chapitre III. Le choix des six sables est basé sur la diversité des sables afin d'avoir différents types de sable existant dans le Sahara septentrional. Nous avons essayé d'avoir une représentativité des sables analysés. Nous avons pris le sable de N'Goussa comme sable de référence, le sable de Hassi Sayah grossier comme sable Alluvionnaire (c'est l'un des sables qui présente un taux d'éléments de taille supérieur 1 mm), le sable d'In Salah comme sable le plus fin par rapport aux sables caractérisés. Les autres sables le sable de Hassi Ben Abdellah, le sable d'Errachidi et le sable d'El Alia ont été choisis par rapport à la variabilité des caractéristiques des sables : taux de salinité, au taux de la matière organique, au taux de fer (détecté par la couleur) et du taux de calcaire.

V. 2 Préparation des pilotes

D'après les études ultérieures sur l'efficacité de sable de dune comme support filtrant (sable de N'Goussa), nous allons suivre la même mise en place des dispositifs cités en chapitre IV avec le même fonctionnement et les mêmes conditions de travail. nous avons par contre réduit le diamètre des colonnes et éliminé le prétraitement.

La colonne de filtration est un tube en PVC ouvert en haut et comportant dans sa partie inférieur une ouverture, lié à un petit tuyau qui sert à la récupération des eaux filtrées. La colonne a une hauteur de 65 cm et un diamètre intérieur de 76 mm, (Figure V. 1). Cette colonne est montée sur un support métallique.

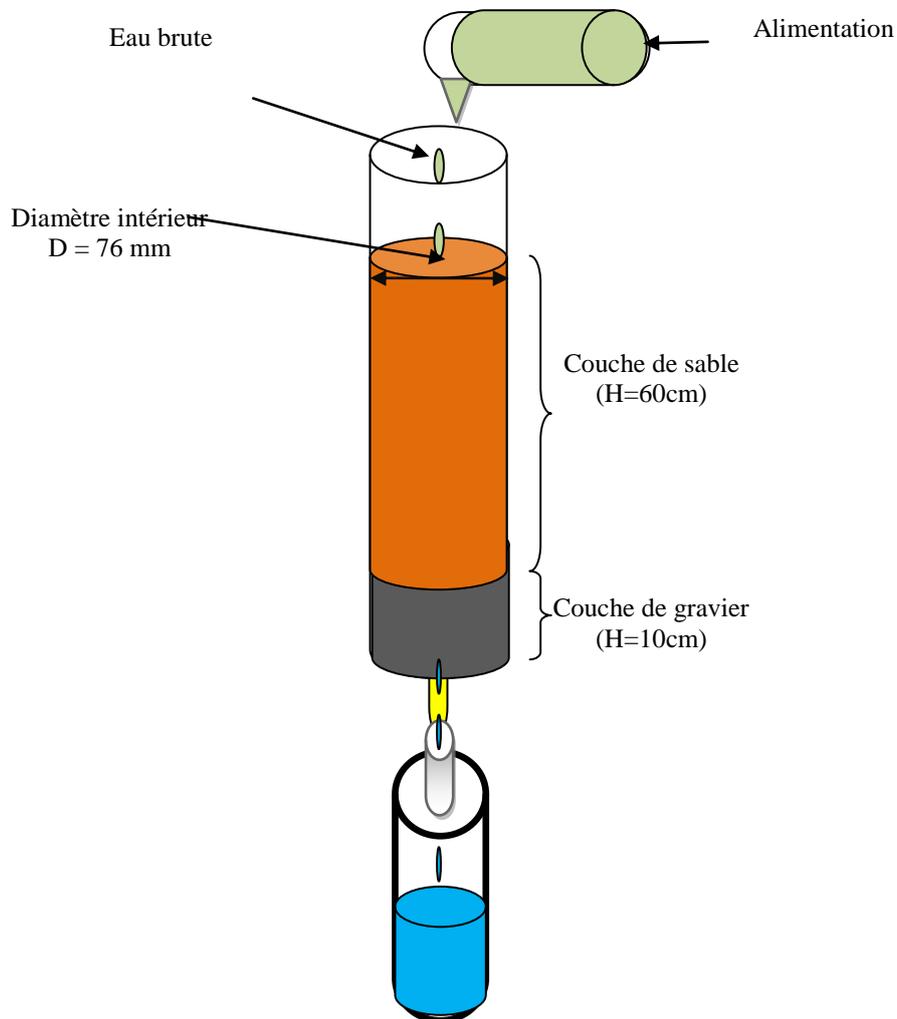


Figure V. 1 : Schéma représentant le pilote filtrant

Pour la préparation des colonnes, un film géotextile est placé au fond du pilote, qui est ensuite recouvert d'une couche de gravier de diamètre 4/8 mm et d'une épaisseur de 2 cm, qui a pour rôle de laisser passer l'eau mais de retenir les particules de sable. Les sables préparés précédemment sont ensuite ajoutés de manière à obtenir une couche de sable homogène de 60 cm d'épaisseur [81]. Plusieurs essais de mise en place ont été effectués avant d'arriver à une mise en place adéquate à la filtration (stabilisation de sable dans la colonne). Les données de chaque filtre sont présentées dans le tableau V. 1.

Tableau V. 1 : Caractéristiques des filtres à sable

Filtre	Poids (g)	Densité réelle (g/g)	Densité apparente (g/g)	Porosité n (%)
N'Goussa	4788	2,96	1,785	39,70
Hassi Sayeh (SG)	4960	2,76	1,822	33,99
In Salah	4629,5	2,64	1,700	35,61
Hassi Ben Abdellah	4975	2,65	1,828	31,02
El Allia	4505	2,57	1,655	35,60
Errachdi	4870	2,62	1,789	31,72

V. 3. Fonctionnement des pilotes.

Le débit d'alimentation est de 0,48 l/j calculé par la même méthode indiquée au chapitre IV. Ce débit est réparti en 12 alimentations manuelles avec un pas de temps d'une heure. Les volumes écoulés doivent être répartis sur les surfaces d'une façon homogène [3]. Ce débit correspond à 2 fois le débit d'alimentation nécessaire pour cette surface avec l'objectif d'accélérer les différentes étapes de fonctionnement du filtre et réduire ainsi le temps de la manipulation. Ce choix a été fait après plusieurs essais au laboratoire.

Nous avons fait fonctionner les colonnes pendant 11 semaines de travail suivant le mode de fonctionnement décrit ci-dessus.

L'eau usée utilisée est une eau synthétique qui présente les caractéristiques présentées dans le tableau V. 2. Notre objectif est d'avoir une eau usée de caractéristiques plus au moins stable durant toute la période de fonctionnement, contrairement à l'eau usée au niveau du réseau d'égout qui présente des variations qualitatives et quantitatives dans le temps et dans l'espace comme nous l'avons constaté dans le chapitre IV.

Tableau V. 2: Caractéristiques de l'eau usée utilisée [83] [84]

Parameters	DBO ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	DCO (mg O ₂ .L ⁻¹)	TKN (mg.L ⁻¹)	MES (mg.L ⁻¹)	pH
Concentration	200 ± 20	600 ± 10	36.4 ± 3	245 ± 15	6.94 ± 0.10

Nous procédons à des mesures hebdomadaires des paramètres physiques : la température T, la conductivité électrique (CE), le pH et les paramètres chimiques à savoir la DCO et la DBO₅ à l'entrée et à la sortie de chaque colonne pour chaque compagne.

V. 4 Suivre des paramètres

V. 4. 1. Paramètres physiques

Le pH et la CE :

Nous avons procédé aux mesures de la température, du pH et de la conductivité électrique avec les mêmes appareils utilisés dans les chapitres précédents. Les résultats sont représentés durant la période de fonctionnement dans le tableau V. 3.

Tableau V. 3 : Variation du pH et de la conductivité électrique en fonction de temps

Compagnes Par Semaine	Paramètres	Eau Usée	N'Goussa	Hassi Sayah G	In Salah	Alia	Hassi Ben Abdellah	Errac- hidi
1 T= 25.4°C	pH	7,70	8,00	7,87	7,80	7,80	8,10	7,90
	CE mS/cm	4,26	6,07	4,70	4,66	4,89	4,74	6,01
2 T=27.3°C	pH	8,11	8,14	8,11	8,16	8,14	8,21	8,15
	CE mS/cm	4,22	5,57	4,51	4,29	4,39	4,30	5,52
3 T=27.9°C	pH	7,58	8,31	8,31	8,26	8,25	8,19	8,19
	CE mS/cm	4,13	5,54	4,32	4,30	4,26	4,27	5,33
4 T=26.6°C	pH	8,03	8,24	8,27	8,19	8,13	8,18	8,24
	CE mS/cm	4,22	5,60	4,43	4,16	4,20	4,16	5,33
5 T=29.4°C	pH	7,42	7,96	8,07	8,14	7,86	8,04	8,14
	CE mS/cm	3,58	4,96	4,07	3,94	4,05	4,04	5,17
6 T=27.7°C	pH	7,72	8,03	8,06	8,16	8,01	7,97	8,06
	CE mS/cm	4,32	5,63	4,68	4,50	4,63	4,57	5,52
7 T=26.9°C	pH	7,71	8,10	8,20	8,30	8,15	8,28	8,29
	CE mS/cm	3,96	5,07	4,12	4,13	4,17	4,11	5,26
8 T=28.1°C	pH	7,63	8,03	8,22	8,27	8,20	8,19	8,21
	CE mS/cm	3,83	4,57	4,12	4,04	4,15	4,15	5,20
9 T=29.9°C	pH	7,04	8,33	8,37	8,25	8,25	8,17	8,32
	CE mS/cm	4,36	4,90	4,43	4,55	4,47	4,41	5,46
10 T=27.3°C	pH	6,73	7,42	7,55	7,53	7,40	7,26	7,47
	CE mS/cm	4,07	4,69	4,52	4,42	4,52	4,33	4,52

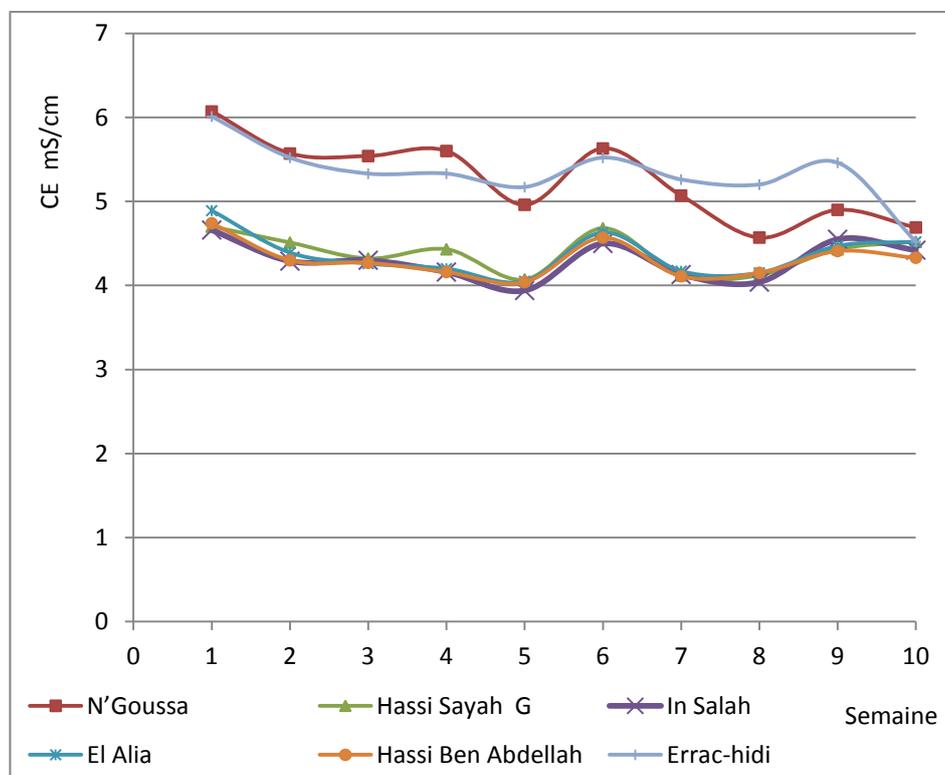
Le pH est alcalin (Tableau V. 2). On constate également une légère augmentation de ce dernier. Ceci est dû d'une part à la dissolution de certains sels existants dans le sable d'autre part, aux réactions chimiques produites à l'intérieur des filtres.

Une diminution très importante de la conductivité des eaux à la sortie à partir des 4 premiers jours surtout pour le sable de N'Goussa (une diminution remarquable jusqu'à une valeur de 7,88 ms/cm) et pour les autres filtres, une diminution comprise entre 4 et 7

ms/cm avec une diminution maximale de l'eau filtrée pour l'échantillon d'In Salah (4,55 ms/cm).

Ces valeurs sont très grandes au début du fonctionnement des filtres en raison de la teneur élevée des sels contenus dans le sable (début de lessivage des sels). Après le 4^{ème} jour, les valeurs de la conductivité électrique pour In Salah et Errachdi se stabilisent autour d'une valeur moyenne de 4,16 et 5,11 ms/cm. Ensuite, à partir du 7^{ème} jour, La valeur de la conductivité électrique de l'eau filtrée de N'Goussa commence à se stabiliser autour d'une valeur moyenne de 4,99 ms/cm. Par contre, les valeurs de la conductivité électrique pour Hassi Sayeh, Hassi Ben Abd Allah et El Allia commence à se stabiliser au 8^{ème} jour, pour des valeurs moyennes de 4,27 ; 4,23 et 4,10 ms/cm l'écart dans le temps de stabilisation est due probablement au type de sel (solubilité) contenue dans chaque sable.

Mais, on a toujours une augmentation de la conductivité électrique de l'eau de sortie (eau filtrée), qui résulte probablement de la transformation des matières organiques en matières minérales par exemple des composés azotés et phosphorés [86], et aussi par l'insolubilité complète des sels (teneur en sels) contenue dans le sable. La figure V. 2, nous montre la variation de la salinité des eaux des différents filtres.



La figure V. 2 : Variation de la conductivité électrique en fonction du temps

V. 4. 2. Suivre des paramètres chimiques

4. 2.1. Détermination et suivi de la DCO

Pour les mesures de la DCO, on utilise la méthode de Titrimétrie. [2]. Après mesure des valeurs de la DCO à l'entrée et à la sortie du filtre nous avons procédé au calcul des rendements qui sont présentés par la figure V. 3 pour les différents sables.

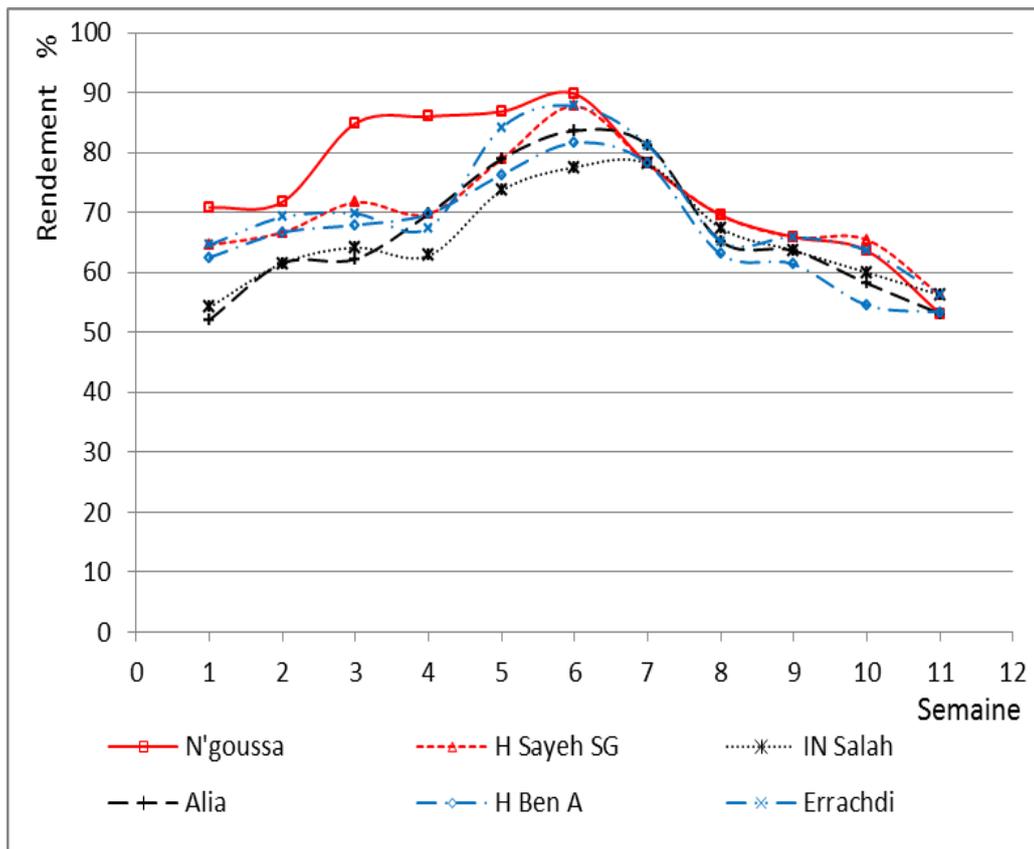


Figure V. 3 : Suivi hebdomadaire des rendements de réduction de la DCO pour différentes carrières

Les rendements de réduction de la DCO présentent un optimum. D'après la figure V. 2, le maximum de réduction (80 %) est observé pour l'eau filtrée de N'Goussa et le minimum diminution pour l'eau filtrée d'El Allia (50 %).

On remarque, que toutes les carrières ont atteints des valeurs maximales à partir de la sixième semaine, sauf la carrière d'In Salah où le rendement est maximal pendant la septième semaine (78%). Après la sixième semaine, les rendements diminuent pour la plupart des carrières.

Durant la première semaine, les rendements d'élimination de la DCO sont faibles en raison de la faible teneur en biomasse en début de fonctionnement [4].

Après une période de maturation durant laquelle il y a formation de la biomasse autour des grains de sable, le rendement a atteint des valeurs très intéressantes (valeurs maximales) [87].

La diminution de rendement après la 6^{ème} semaine de travail est due à l'amortissement des filtres (la saturation du filtre) provoqué par le colmatage de la première couche du filtre [88]. Malgré ces diminutions remarquables des rendements ceux-ci restent des rendements intéressants.

4. 2.2. Détermination et suivie de la DBO₅

Les rendements de l'abattement de la DBO₅ sont représentés en fonction du temps (semaine) sur la figure V. 4.

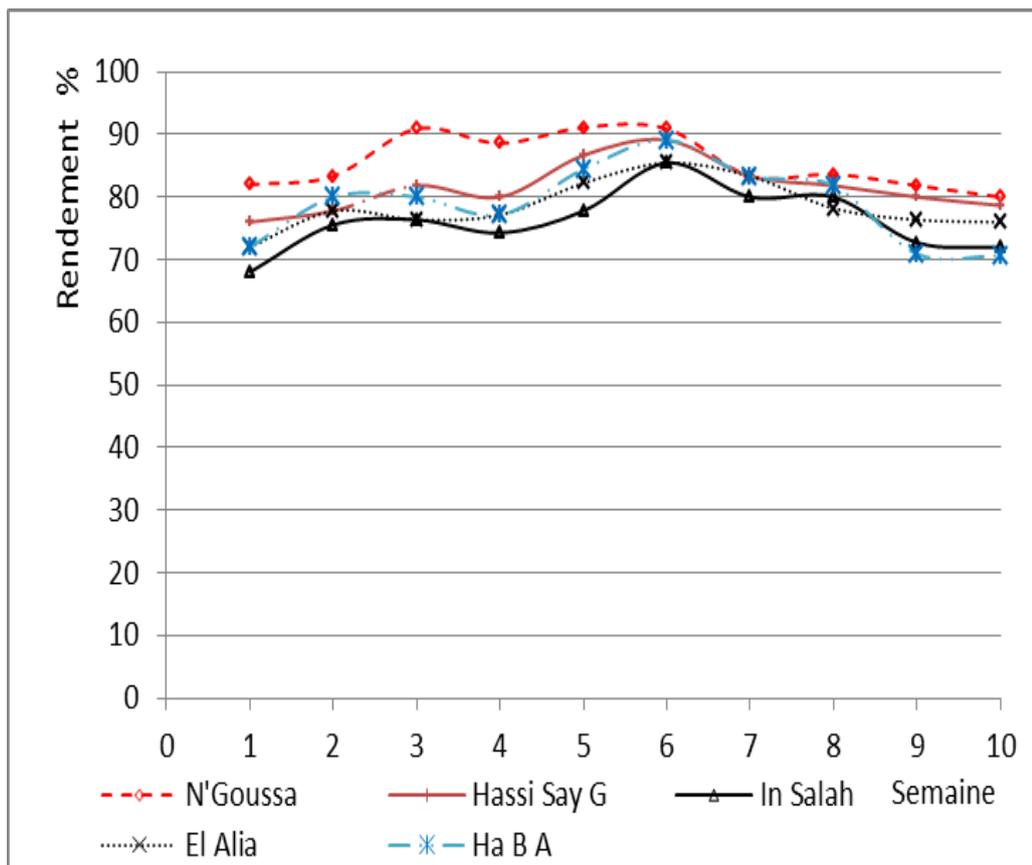


Figure V. 4 : Suivi hebdomadaire des rendements de réduction de la DBO₅ pour différentes carrières

Nous constatons que les allures de l'abattement de la DBO₅ ont les mêmes allures que les rendements de diminution de la DCO.

Durant la première semaine, les valeurs de la DBO₅ atteignent des valeurs remarquables de 90,9 ; 81,8 et 63,6 % pour respectivement les eaux traitées de N'Goussa, Hassi Sayeh et In Salah.

À partir de la deuxième semaine, nous remarquons une élévation du rendement de la DBO₅ de N'Goussa jusqu'à une valeur maximale de 95,8 % (semaine 3) et de 91,7 % pour Hassi Sayeh, In Salah dans la sixième semaine et El Allia dans quatrième semaine. Par contre, la valeur maximale d'élimination de la DBO₅ est de 95,8 % pour Hassi Ben Abdellah pendant la sixième semaine. Tous les filtres ont la même diminution du rendement de la DBO₅ après la septième semaine sauf pour In Salah et Hassi Ben Abdellah.

L'importante dégradation des matières biodégradables peuvent expliquer ces bons résultats [89].

V. 5. Conclusion

D'après ces résultats nous constatons que le sable de N'goussa donne des meilleurs rendements durant les 6 premières semaines ensuite son rendement se rapproche au rendement des autres sables notamment celui de Hassi Sayah grossier. Ceci est due probablement au colmatage de ce dernier et étant donné qu'il est un sable légèrement grossier par rapport au autres sables, comme nous constatons le début de diminution des rendements après la sixième semaines de fonctionnement. Ceci est traduit par le commencement du colmatage et le début de crevaison des filtres. Six semaine de fonctionnement avec un débit doublé est un résultat satisfaisant relativement aux travaux de [4] qui a trouvé le temps de crevaisance est d'environ 60 jours avec un débit qui correspond à la moitié de notre débit.

CHAPITRE 6

CHAPITRE VI : Etude de colmatage des filtres

VI. 1. Introduction

La filtration lente biologique est un domaine d'épuration des eaux usées en plein essor qui a vu ses activités et ses applications croître considérablement ces dernières années, au profit de la mise en place de traitements complémentaires, biologiques en particulier. Selon l'efficacité du prétraitement, le filtre reçoit une quantité non négligeable de matière en suspension et de matière organique, dont la conséquence est un colmatage biologique, engendré par la colonisation des pores du milieu filtrant par la biomasse et les sous-produits issus de l'activité bactérienne.

Les objectifs de cette partie du travail sont d'une part d'évaluer la variation du colmatage en fonction de la profondeur du filtre et en fonction du temps de fonctionnement, et également de suivre l'évolution au cours du temps du dépôt de la matière organique dans les différentes couches du filtre ainsi que les différents types de colmatage et leurs apport dans le colmatage total des filtres.

VI. 2. Conception du dispositif de traitement

Pour l'étude du colmatage nous avons constitué le dispositif expérimental présenté sur les figures VI. 1 et VI. 2

- Bac d'alimentation

Le bac d'alimentation est un récipient en plastique ordinaire de 30 L de volume utilisé comme réservoir équipé par un piézomètre pour contrôler le volume utilisé. Ce bac a aussi le rôle d'un décanteur. (Voire figure VI. 1)

- Bac de recyclage

Le bac de recyclage est un récipient en plastique ordinaire de 10 L de volume utilisé pour récupérer le surplus d'eau d'alimentation afin de les réutiliser dans (voire figure VI. 1)

- Récipient pour l'eau filtrée

Un récipient en plastique ordinaire de 5 L est mis en place pour récupérer l'eau filtrée. (Voire figure VI. 1)

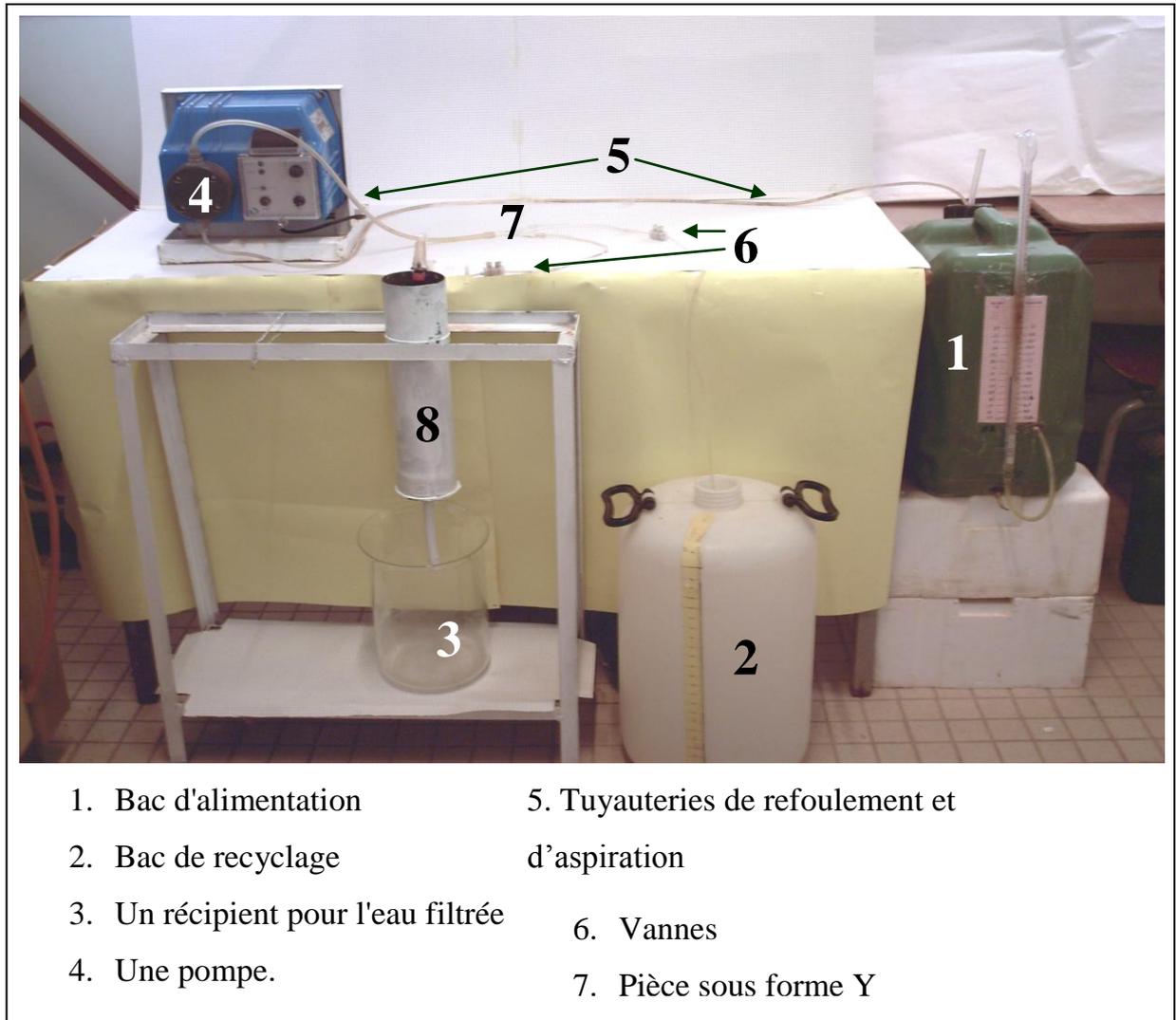


Figure VI. 1 : Photo du dispositif expérimental pour l'étude du colmatage

L'alimentation du filtre est faite d'une manière régulière et continue à l'aide d'une pompe à piston de la marque HD MA, de débit réglable utilisée pour le dosage du chlore dans l'eau potable. Le matériau de fabrication de la pompe résiste à l'agressivité de l'eau usée. Le débit théorique de la pompe est de 2 à 20 litre/ heure. (Voir figure VI. 1 et VI. 2)

- Tuyauteries

Pour assurer l'alimentation continue et uniforme du filtre, des tuyauteries en matière plastique souple et transparente sont utilisés comme suit :

- Tuyau transparent d'aspiration d'un diamètre de 5 mm entre le bac d'alimentation et la pompe.

- Tuyau transparent de refoulement de diamètre de 5 mm entre la pompe et le nœud de séparation du débit.
- Deux tuyaux transparents de diamètre de 2 mm pour l'alimentation du filtre et aussi le transport de surplus d'eau vers le bac de recyclage.
- Les accessoires

Le débit de la pompe est variable et supérieur au débit voulu, pour cela l'utilisation de trois pièces spéciales est nécessaire a fin d'ajuster le débit

- Pilote de filtration

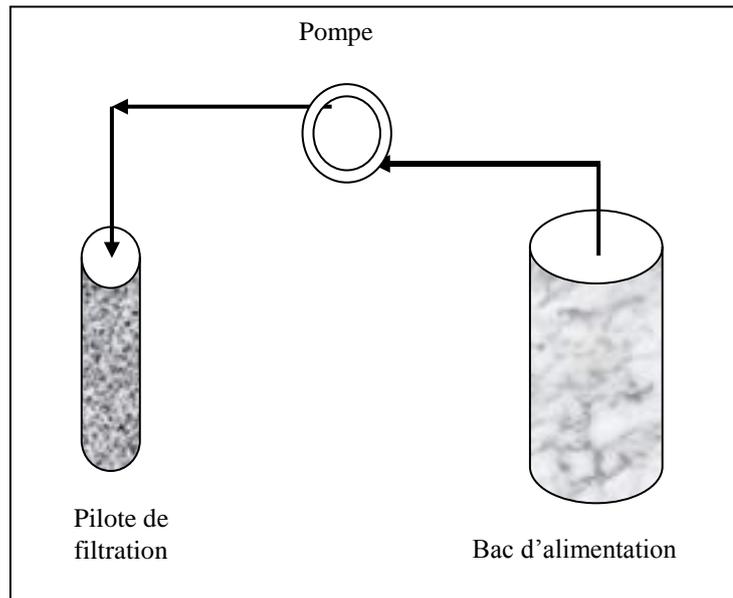


Figure VI. 2 : Dispositif de filtration

Les filtres qui ont été utilisés sont des colonnes en PVC, de diamètre 76 mm et de hauteur 35 cm ; le lit de sable utilisé comme couche filtrante a une épaisseur de 30 cm. Chaque filtre est équipé d'un dispositif de drainage monté à la base de la colonne [3][90][91].

L'alimentation est assurée par une pompe à débit constant pour assurer un fonctionnement continue et permanent; Avant le commencement de fonctionnement un travail d'étalonnage de répartition du débit a été fait pour assurer que le débit d'alimentation est identique pour tous les filtres.

VI. 3. Fonctionnement du dispositif

VI. 3. 1. Calcul des débits

Le dimensionnement d'un filtre à sable pour l'épuration des eaux usées se base sur la détermination des débits issus de l'habitation; qui dépend de la consommation en eau potable. La consommation d'un habitant est évaluée entre 150 à 250 l/j selon le niveau de vie. Dans la région d'étude la consommation est estimée de 150 l/j. après utilisation cette quantité est réduite à 70 %, ce qui donne une valeur de 105 l/j pour chaque habitant. La filtration de tel débit nécessite une surface de sable de 2 à 2,5 m². Pour le pilot expérimental le débit total est considéré comme uniformément réparti sur la section et la surface du pilote est une surface élémentaire du filtre réel. La section est de 47,78 cm² donc le débit qui devra traverser cette surface est de 0,1 l/h. [3][91][92]

Pour faire fonctionner les filtres au maximum nous prévenions à une petite modification au niveau du débit d'alimentation de tel sorte que nous resterons toujours dans l'application d'une filtration lente; nous avons un écoulement à travers un milieu poreux de porosité initiale n_i , la section apparente traversée par l'eau est de A, le débit est Q; pour que la filtration soit lente il faut que la vitesse de filtration soit entre 2 et 7 m/jour. La vitesse apparente de filtration est déterminée par la formule suivante :

$$V = \frac{Q}{A}$$

Avec :

V : La vitesse d'écoulement en m/s

Q : Le débit traversant le filtre en m³/s

A : La section apparente du filtre en m²

La vitesse réelle de filtration est déterminée par la formule suivante :

$$V_f = \frac{V}{n}$$

Avec :

V_f : La vitesse moyenne de filtration en m/s

V : La vitesse d'écoulement en m/s

n : La porosité de la couche filtrante.

Nous avons un débit d'alimentation de $1,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ avec la section apparente du filtre de $4,77 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ ce qui nous donne une vitesse apparente de l'écoulement égale à 8.3 cm/h. Dans ce sens avec une porosité initiale du sable de 43,98% et la vitesse moyenne de filtration au début de l'opération est de 18,87 cm/h c'est-à-dire 4.53 m/j ce qui nous indique que la filtration est lente.

A la fin de l'expérience la porosité finale du sable est de 34.79 % ce qui induit à une vitesse moyenne de filtration de 23,85 cm/h c'est-à-dire 5,72 m/j qui indique que la filtration reste lente.

A partir de cette modification nous pouvons dire qu'une heure de travail du modèle est équivalente à 40 heures dans le cas réel [41].

VI. 3. 2. Qualité des eaux usées

Les composés organiques existants dans l'eau usée sont instables ce qui provoque des changements au niveau de leurs caractéristiques d'une compagne à une autre. Pour cette raison des eaux usées préparées au laboratoire sont utilisées en prenant compte de faire une composition d'une eau usée domestique. Cette eau est préparée en mélangeant quelques produits d'alimentation domestique avec de l'eau en s'assurant que ces produits contiennent tous les produits chimiques susceptibles d'être présent dans une eau usée domestique en concentration considérable.

Les caractéristiques des eaux usées synthétiques préparées sont présentées dans le tableau V. 2 présenté dans le chapitre V.

VI. 3. 3. Mise en marche de dispositif

Dans la présente étude, sept filtres ont été utilisés afin d'épurer les eaux usées. Chaque filtre est indépendant des autres filtres pendant une durée bien précise allant d'une journée à sept jours. Le sable utilisé provient de la carrière de N'Goussa (Sud Algérien) réparti d'une façon homogène dans les colonnes. Les filtres sont alimentés avec l'eau usée synthétique pour avoir une qualité d'eau plus au moins la même durant la période du travail et pour tous les filtres et ainsi minimiser le nombre de variable cette eau présente. Pour bien visualiser le phénomène de colmatage nous avons multiplié le débit de fonctionnement de 20 fois afin d'accélérer le phénomène et travailler dans un temps réduit

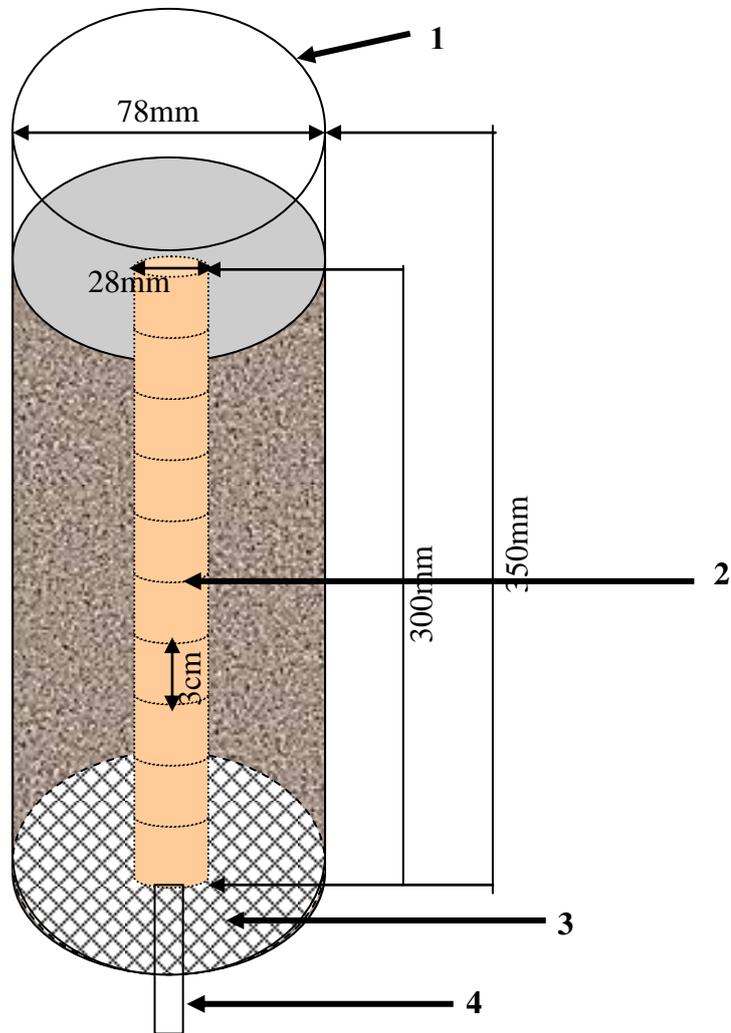
(une semaine) pour avoir les mêmes conditions de travail (les conditions ambiantes) alors le débit moyen est de 0.40 l/h.

VI. 3. 4. Méthode de prélèvement

Plusieurs méthodes de prélèvement de sol recensées dans la bibliographie ont été testées à l'échelle de notre pilote, afin de pouvoir obtenir des échantillons représentatifs du sable contenu dans le filtre. La méthode se base sur l'échantillon de sol non remanié c'est-à-dire d'un échantillon dont la structure n'a pas été modifiée. En utilisant des petits cylindres en PVC de diamètre de 28 mm et de 30 mm de hauteur. Ces cylindres rassemblés entre eux constituent un tube; qui doit être axialement posé dans la colonne avant le remplissage avec du sable voir figure VII. 3

Après l'arrêt d'alimentation du filtre le sable est dégagé autour le cylindre de prélèvement; en creusant autour avec une spatule. Ensuite le cylindre est enlevé et dissocié en 10 petits cylindres de 3 cm d'épaisseur. Chaque cylindre présente une couche. Les petites carottes de sable sont séchées dans l'étuve à 105° pendant 24 heures.

Pour obtenir des résultats plus précis, la méthode consiste à diviser le pilote en dix couches nous faisons les analyses sur des échantillons par alternance de façon à obtenir des variations lisibles.



- 1 -colonne en PVC
- 2- cylindres de prélèvement
- 3- couche poreuse
- 4 -tuyau de drainage

Figure VI. 3: Schéma du pilote de filtration

VI. 4. Détermination de la porosité:

Après l'arrêt d'alimentation du filtre, on retire la colonne axiale en la dissociant du cylindre et on retire les petites carottes de sable qui seront séchées à l'étuve à 105° pendant 24 heures. Les mesures de la densité réelle et la densité apparente sont prises régulièrement

toutes les 24 heures à fin de calculer la porosité sur des échantillons de sable travaille pendant un temps précis au niveau chaque profondeur.

VI. 4.1. La détermination de la densité réelle

La détermination de la densité réelle est effectuée par la méthode du pycnomètre.

VI.4.2 La détermination de la densité apparente

La méthode du cylindre est utilisée pour la détermination de la densité apparente et la porosité du sol est déterminée par la formule :

$$n\% = \left(1 - \frac{P_a}{P_r}\right) \times 100$$

n% : la porosité du sol

P_a : la densité apparente

P_r : la densité réelle

Les mesures sont réalisées en triplicats.

Le travail s’est fait en trois reprises. Le tableau VI. 1 nous donne les moyennes des valeurs mesurées. Parallèlement le tableau VI. 2 résume les écarts types correspondants à la mesure de la porosité et pour chaque couche.

Tableau VI. 2 : Valeurs de la porosité après le fonctionnement des filtres (%)

Temps Profondeur	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	144 h	168 h
3	40,06	39,01	37,45	36,42	35,40	35,14	34,79
9	40,27	39,42	38,12	37,08	36,17	35,68	35,25
15	40,90	39,81	38,6	37,67	36,6	36,11	35,66
21	41,25	39,98	39,05	38,21	37,28	36,67	36,09
27	41,50	40,40	39,71	39,12	37,7	36,96	36,22

Tableau VI. 2 : Les écarts types entre les valeurs de la porosité

Temps Profondeur	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	144 h	168 h
1	0,11	0,55	0,13	0,24	0,33	-	-
2	0,29	0,34	0,17	0,23	0,08	-	-
3	0,23	0,54	0,13	0,22	0,34	-	-
4	0,07	0,38	0,17	1,35	0,17	-	-
5	0,14	0,42	0,34	1,32	0,51	-	-

Les écarts présentés au tableau VI. 2 nous indiquent que l'erreur entre les valeurs de la porosité, sont des petites valeurs ce qui va nous permettre d'utiliser les moyennes arithmétiques de la porosité. Ces valeurs sont représentées dans le tableau VI. 3.

Au cours de la filtration, la porosité varie en fonction de la profondeur du filtre, la variation est représentée pour les différentes profondeurs et pour chaque durée de fonctionnement.

La figure VI. 4 nous donne la variation de la porosité en fonction de la durée de fonctionnement pour chaque couche, ainsi que les écarts types correspondant à chaque point.

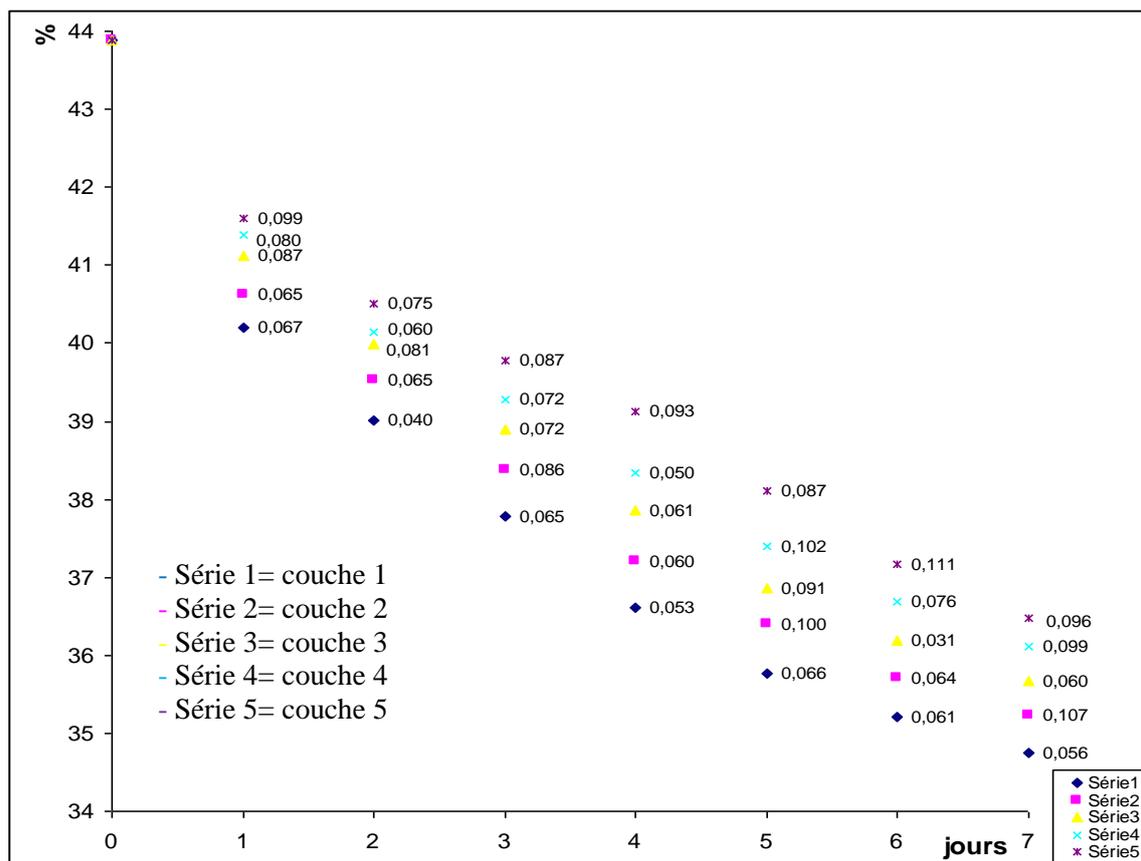


Figure VI. 4 : Variation de la porosité en fonction du temps pour les différentes couches

L'écoulement de l'eau usée à travers le filtre pendant un certain période provoque une variation de la porosité en fonction du temps de fonctionnement.

VI. 5. Evolution du colmatage

C'est l'obstruction progressive des interstices du matériau filtrant. Il provoque une augmentation de la perte de charge ; la vitesse de colmatage dépend du type de support filtrant et de la qualité de l'eau filtrer.

A partir de la définition du colmatage, on admet que le colmatage du filtre est le pourcentage des vides remplis par rapport à la totalité de la porosité initiale; on le calcul par la relation suivante :

$$CO = \left(1 - \frac{n_f}{n_i}\right) \times 100$$

n_i : porosité initiale on a $n_i = 43.98 \%$

n_f est la porosité finale après le fonctionnement des filtres.

Pour les valeurs de la porosité présentées dans le tableau VI. 2, nous aurons les valeurs du colmatage correspondants qui sont présentées dans le tableau VI. 3.

Tableau VI. 3 : Les valeurs du colmatage (%)

Temps Profondeur	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	144 h	168 h
3	8,92	11,30	14,84	17,19	19,52	20,10	20,90
9	8,44	10,37	13,32	15,69	17,76	18,87	19,85
15	7,00	9,49	12,23	14,36	16,78	17,89	18,92
21	6,21	9,10	11,20	13,12	15,23	16,62	17,94
27	5,63	8,13	9,71	11,06	14,28	15,96	17,64

Au cours de la filtration, le taux de colmatage varie en fonction de la profondeur du filtre; et cette variation est représentée pour les différentes profondeurs pour chaque durée de fonctionnement. La représentation des données définies dans le tableau VI. 4 est finalisée sur la figure VI. 5.

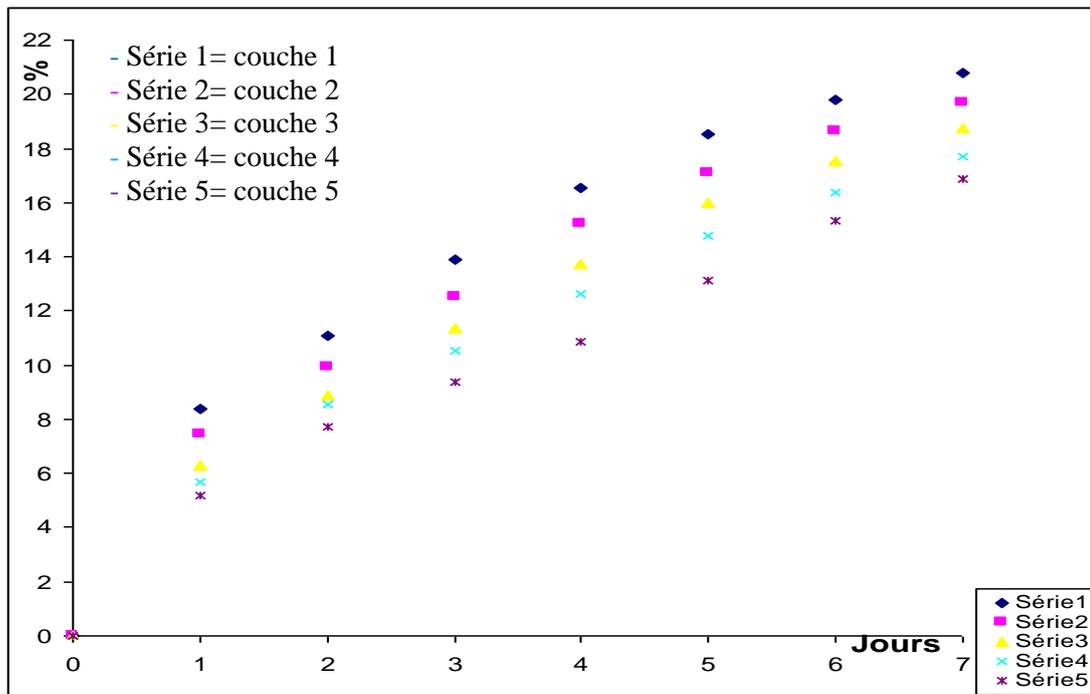


Figure VI. 5 : Taux de colmatage en fonction du temps pour chaque couche

Interprétation des résultats

Les courbes représentées à la figure VI. 4 ; montrent que les valeurs de la porosité au niveau de la surface sont inférieures à celles des autres couches. Comme il existe une différence de la porosité entre la première couche et la dernière couche et qui peut aller jusqu' à 2%. Les courbes prennent une allure plus ou moins linéaire dès le troisième filtre. Cette linéarité peut être reliée aux causes de la diminution de la porosité; dans les deux premiers filtres la diminution est due à l'accumulation de la MES surtout la MO et beaucoup plus la réorganisation et l'arrangement des grains de sable, suite à l'écoulement. Par contre pour les autres filtres la réorganisation des grains est faible devant la diminution due à l'accumulation de la MES par le mécanisme de tamisage de cette dernière par les grains de sable.

Nous remarquons aussi que la différence entre la porosité du deuxième filtre et celle du troisième est considérable (2.11%) cela peut être lié à la formation du film biologique au niveau de la première couche, en cette période [4][41].

Les courbes représentées à la figure VI. 4, montrent que la porosité est décroissante avec le temps de fonctionnement. Les valeurs de la porosité au niveau des surfaces des filtres sont nettement inférieures à celles des couches profondes. Comme la différence de la porosité entre le premier filtre et le dernier peut aller jusqu' a 6.5 %, les courbes prennent une allure plus ou moins linéaire, avec une pente négative dès le troisième point. Ces modifications de la porosité appelés colmatage peut être classé en trois types [82][89] : colmatage mécanique provoqué par le tassement du support filtrant et la réorganisation des squelettes solide de la couche filtrante, colmatage physique due l'accumulation des matières en suspension sur les grains du sable; dans le mécanisme de tamisage (le filtre joue le rôle d'une passoire) [23]. Le troisième type de colmatage est le colmatage biochimique; qui est provoqué par l'adsorption des matières dissoutes en particulier les matières organiques et la formation des micro-organismes et les algues surtout sur la surface du filtre ce qui explique la différence entre les couches superficielles et les couches profondes [87][92].

VI. 6. Evolution de la matière organique

Après le fonctionnement des filtres la teneur en MO est mesurée pour chaque couche par la méthode Anne [93]. Les mesures sont faites plusieurs fois pour chaque

couche chaque 24 heures. Les valeurs moyennes de la teneur en MO sont représentées au tableau VI. 4.

Tableau VI. 4: Matière organique (%) en fonction de la profondeur et du temps de fonctionnement des filtres

Temps Profondeur	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	144 h	168 h
3	0,290	0,425	0,550	0,630	0,840	1,590	2,370
9	0,230	0,34	0,450	0,580	0,720	1,090	1,603
15	0,180	0,265	0,320	0,480	0,610	0,840	1,240
21	0,130	0,160	0,210	0,420	0,500	0,680	1,020
27	0,079	0,11	0,167	0,260	0,394	0,540	0,790

Les valeurs moyennes de la teneur en MO sont représentées sur la figure VI. 6, qui donnent la variation de la teneur en matière organique en fonction de la profondeur pour chaque durée de la manipulation.

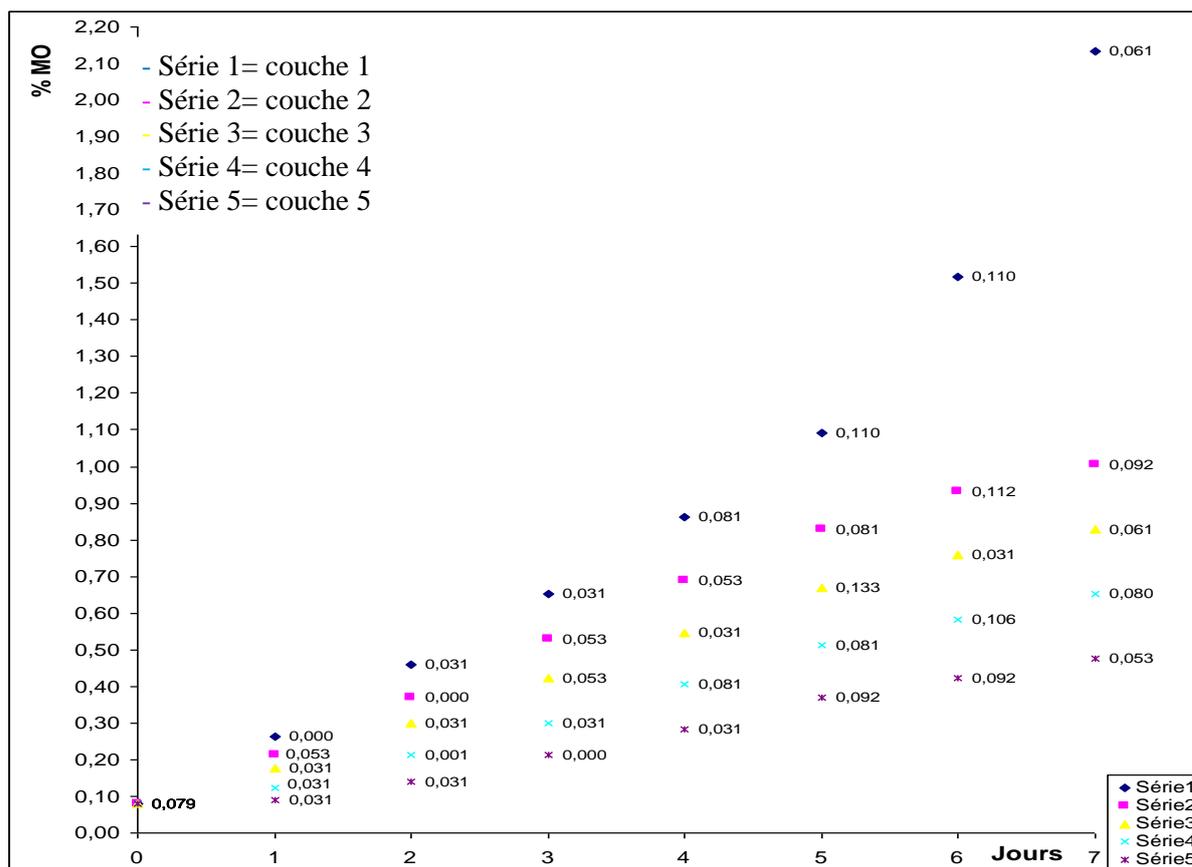


Figure VI. 6 : Evolution de la teneur en MO en fonction du temps de fonctionnement

Interprétation des résultats

La figure VI. 5 montre que, comme attendu, l’augmentation de la matière organique correspond à une diminution de la porosité ; une augmentation de la teneur en MO est observée dès le premier jour de fonctionnement et cette augmentation est plus ou moins régulière ; elle est seulement due aux apports de MO en raison de l’écoulement de l’eau usée, et jusqu’au cinquième jour un changement de pente des courbes peut être observé. Cette augmentation de la pente est très remarquable pour la première couche, ceci confirme un colmatage très net de la première couche du filtre ; par contre nous constatons une diminution de pente des autres courbes, en raison d’un transfert très réduit de la matière organique vers ces couches. La majeure partie de la matière organique est retenue dans la première couche; une formation d’algues dans la première couche est même à noter.

Dans le premier filtre la différence entre la teneur en MO de la première couche est celle du dernier est de plus de 0,2 %, avec une différence de plus de 1,2 % pour le dernier point. Cette augmentation remarquable peut s’expliquer par la formation d’algues et de

micro-organismes au niveau de la surface du filtre, en raison de l'aération importante dans cette zone [82].

VI. 7. Détermination des différents types de colmatage

Le colmatage se présente en trois formes comme suit : colmatage physique dû aux MES, colmatage biologique dû aux M.O (microorganismes) et colmatage chimique dû aux réactions des argiles [4][87]. Dans cette étude le colmatage est réparti en trois classes suivant l'origine de ce phénomène et les paramètres mesurés ce qui a donné le colmatage mécanique

VI. 7. 1. Colmatage mécanique

Ce colmatage est provoqué par l'écoulement de l'eau à travers le support filtrant. Pour l'évaluation de ce colmatage, la mesure de la porosité est effectuée sur des échantillons de sable en utilisant de l'eau potable; qui est supposée ne contenant ni les MES ni la MO. Le colmatage est calculé à partir de la porosité totale à l'aide de la formule utilisée pour le colmatage total. Les résultats sont présentés sur le tableau VI. 5.

Tableau VI. 5 : Les valeurs du colmatage mécanique en (%) en fonction de la profondeur et du temps de fonctionnement des filtres

Temps Couche	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	144 h
1	0,93	3,07	5,05	5,46	5,75	6,23
2	2,09	3,23	8,98	9,21	11,3	12,66
3	2,43	4,27	9,23	9,23	10,44	12,16
4	2,84	5,53	10,43	10,73	11,09	13,09
5	4,43	6,34	9,16	10,12	11,75	13,37

VI. 7. 2. Colmatage biologique

Ce colmatage est provoqué dans cette présente étude par le dépôt de la matière organique dissoute et en suspension "l'analyse utilisée nous donne la quantité totale de la

matière organique”. Le colmatage organique est calculé par la soustraction de la teneur en matière organique initiale de la teneur en matière organique totale. Il ne provient pas seulement de la teneur en MO dans l'eau mais aussi de la formation des algues et des micro-organismes surtout au niveau des couches superficielles. Les résultats du colmatage organiques sont représentés sur le tableau VI. 6.

Tableau VI. 6: Les valeurs du colmatage organique en (%) en fonction de la profondeur et du temps de fonctionnement des filtres

Temps Couche	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	144 h
1	0,264	0,458	0,653	0,864	1,093	1,516
2	0,212	0,370	0,529	0,688	0,828	0,931
3	0,177	0,299	0,423	0,547	0,670	0,758
4	0,124	0,212	0,299	0,405	0,511	0,582
5	0,088	0,141	0,212	0,282	0,370	0 ;423

VI. 7. 3. Colmatage physique

Le colmatage physique est estimé à partir du dépôt de la MES minérale; car la MES organique est déjà prise en compte lors de calcul du colmatage organique. Le colmatage physique est calculé en utilisant les autres types de colmatage comme suit

$$CO_{org} = CO_T - CO_{méc}$$

:

Avec :

CO_T : Colmatage total (%)

CO_{org} : Colmatage organique (%)

$CO_{méc}$: Colmatage mécanique (%)

CO_{phys} : Colmatage physique (%)

Les résultats concernant le colmatage physique sont représentés sur le tableau VI. 7

Tableau VI. 7 : les valeurs du colmatage physique en (%) en fonction de la profondeur et du temps de fonctionnement des filtres

Temps Couche	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	144 h
1	7.256	7.657	8,263	10,323	11,741	12,106
2	5.199	6.385	3,112	5,412	5,020	5,114
3	3.755	4.390	1,803	4,029	4,975	4,694
4	2.805	2.860	0,856	1,969	3,253	2,800
5	0.757	0.993	0,066	0,233	1,093	1,600

Le colmatage physique est principalement dû à l'accumulation de MES (il représente plus de 60% du colmatage total) ; ce type de colmatage se situe essentiellement au niveau de la couche superficielle (la différence entre cette couche et la couche adjacente est de plus de 50%). Il est de plus en plus considérable au cours du fonctionnement du filtre. Il est dû aux apports des MES contenus dans l'eau (245 mg/l). Les MES sont retenues dans la couche superficielle par un mécanisme de tamisage, lorsque la dimension des particules en suspension est supérieure à celle des pores de la masse filtrante.

VI. 7. 4. Interprétation des résultats de calcul des différents types de colmatage

Le colmatage mécanique, dû à l'écoulement de l'eau et au tassement du filtre sous l'effet de son propre poids, dû au lessivage des sels dû la salinité du sable, ainsi qu'au mouvement des particules fines de la surface vers le fond du filtre ont également un rôle important. Contrairement aux autres types de colmatage la variation du colmatage mécanique croît avec la profondeur, car l'effet de compactage des grains et la pression de l'eau augmentent de la surface vers le fond du filtre ; l'eau intervient également au travers du transport des particules fines de la surface vers le fond du filtre.

Le colmatage organique semble être le moins important par rapport aux différents types de colmatage. Il représente 2.98 % du colmatage total pour le premier filtre, et peut aller jusqu'à 7.65 % au bout de 6 jours. Ce colmatage est dû aux apports en MO existant dans l'eau usée ; ces apports sont sous forme de MES ou de matière dissoute. D'après les

courbes qui représentent ce colmatage la plupart des apports sont sous forme de MES, ce qui explique la distribution de la teneur en MO dans la couche filtrante ; elle décroît de la surface vers le fond du filtre. Les micro-organismes et les algues au niveau de la couche superficielle interviennent également, caractérisés par l'apparition d'une couleur verte à partir de 5 jours de filtration ; quant à la couche superficielle, elle devient noirâtre à partir de 3 jours de fonctionnement.

Le colmatage est essentiellement apparent dans la première et la deuxième couche des filtres. Le taux de matière organique déposé dans la première couche est au moins deux fois plus important que le dépôt observé dans la dernière couche, et ce pour tous les filtres. La diminution de la porosité ainsi que l'augmentation du taux de matière organique doivent également être soulignés.

VI. 8. Conclusion

Le filtre à sable subit au cours de son fonctionnement trois type de colmatage : colmatage mécanique dû à l'écoulement de l'eau, colmatage physique provoqué par la rétention des MES et colmatage organique et biologique dû à l'accumulation de la matière organique et à la formation de micro-organismes et d'algues. Le colmatage le plus important après fonctionnement est constaté dans la première couche et il devient très faible pour les couches inférieures.

Pour augmenter la l'efficacité du filtre après colmatage on doit éliminer la première couche de sable et la faire remplacer par un sable propre.

CHAPITRE 7

CHAPITRE VII : Elimination bactériologique

VII. 1. Introduction

Dans le but de voir l'efficacité d'élimination bactériologique des filtres à sable nous allons examiner dans cette partie l'efficacité d'élimination de certaines espèces bactériologiques. Pour cela, nous avons choisi deux sables d'origine différente. Le sable N'Goussa comme sable éolien et celui de Hassi Sayah comme sable alluvionnaire.

Le travail a été réalisé en parallèle celui consacré à la comparaison entre les efficacités de filtration des différents sables, c'est à dire les mêmes colonnes avec un suivi du fonctionnement pendant 8 semaines. En parallèle des mesures des paramètres de pollution présentés dans le chapitre IV, nous avons procédé au dénombrement de certains espèces microbiennes, à savoir les germes totaux, les streptocoques totaux, les streptocoques fécaux, et les coliformes totaux.

VII. 2. Dénombrement des germes totaux :

Le dénombrement s'effectue sur les colonies appartenant à l'intervalle entre 30 et 300 colonies (toutes les boîtes donnant un nombre de colonies supérieures à 300 sont considérées comme indénombrables) ; nous avons ensuite calculé les rendements d'élimination des germes totaux.

VII. 2.1. Matériel et méthode [94] :

Il s'agit du dénombrement des germes aérobies mésophiles se développant sur milieu ordinaire (GNO).

- **Dilutions**

Le liquide de dilution utilisé est l'eau distillée stérile. Pour effectuer les différentes dilutions et les inoculations, il est indispensable d'utiliser une pipette différente pour chaque dilution.

On réalise des dilutions suivant : 1/10, 1/100, 1/1000.....etc.

Le choix d'un nombre de dilution dépend de la nature et de la richesse microbienne de l'eau.

- **Ensemencement et incubation**

- Introduire dans chaque dilution deux boîtes de Pétrie de 1 ml des dilutions.
- Marquer sur chaque boîte de Pétrie, le numéro de l'enregistrement de l'eau analysée, la température d'incubation, la dilution.
- Faire fondre la gélose nutritive ordinaire (GNO). Lorsqu'elle est refroidie à 45°C, la couler aseptiquement dans les boîtes de Pétrie contenant les inocules.
- Agiter doucement par un mouvement circulaire pour assurer un mélange homogène de l'eau avec la gélose, sans créer de bulle.
- Laisser refroidir sur un plan parfaitement horizontal.

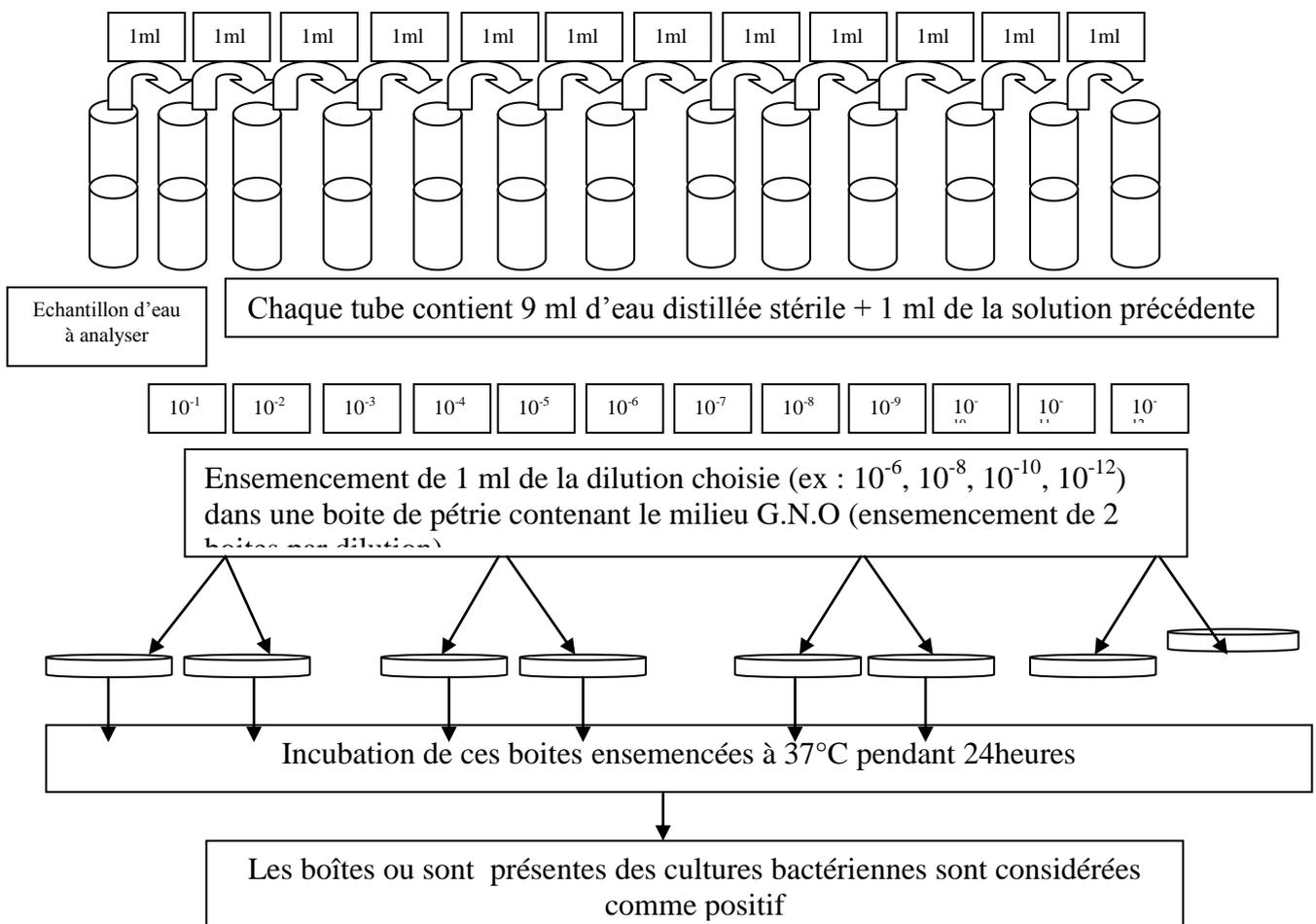


Figure VII. 1: Recherche et dénombrement des Germes totaux

- **Lecture**

Elle se fait après 24 heures et 48 heures à 37°C et 72 heures à 25°C : les colonies apparentes sont dénombrées.

La figure VII. 1 résume toute la technique.

VII. 2.2. Résultats et discussion :

Les résultats de dénombrement des germes totaux et de calcul des rendements d'élimination sont présentés dans le tableau VII.1

Tableau VII. 1 : Dénombrement des germes totaux

Campagne	Concentration (u/100 ml)			Rendement %	
	Eau usée	Filtre N'Goussa	Filtre Hassi Sayah	Filtre N'Goussa	Filtre Hassi Sayah
1	-	-	-	-	-
2	12.10 ⁸	17. 10 ⁶	20.10 ⁶	98,58	98,33
3	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
5	195 .10 ¹²	36. 10 ⁶	3. 10 ⁶	99,99	99,99
6	131 .10 ¹²	178 .10 ⁶	76 .10 ¹⁰	99,99	99,99
7	>300. 10 ¹²	1.10 ¹²	6.10 ¹²	>99,67	98,00
8	56.10 ¹²	-	265.10 ⁶	-	99,99

Ces germes présentent fréquemment des concentrations importantes dans les matières fécales de l'homme, qui sont les plus susceptibles d'héberger des pathogènes. Les concentrations observées s'avèrent normales car nous analysons des eaux usées.

Nous observons une augmentation importante du rendement concernant l'élimination des germes, d'une valeur de 99,55 % jusqu'à une valeur de 99.99 % pour les deux eaux filtrées.

Cette élimination est bien expliquée dans la littérature : Selon [31] par la capture qui est caractérisée par l'interception de la particule (des matières en suspension, les germes,...), par frottement grâce à son inertie et sa décantation. L'élimination des germes de grosse taille comme les spores de *Celostrium sulfito-réducteur* peut être effectué par :

Le tamisage mécanique s'il s'agit de la rétention des particules plus grosses que la maille du filtre. Ce phénomène intervient d'autant plus que la maille du matériau filtrant est fine comme celle de NGOUSSA.

Selon [29], Il y a formation à la surface des filtres d'une membrane biologique qui concourt d'une façon très importante à l'épuration de l'eau tout en retenant la plupart des micro-organismes et les particules colloïdales.

Malgré les bons rendements d'élimination de ces germes, leur nombre reste élevée après filtration, voire même que cette eau est considérée contaminée et non utilisable ; ceci est dû à la grande concentration initiale des eaux usées car elle n'a pas subit du prétraitement.

VII. 3. Dénombrement des streptocoques totaux et fécaux [95] :

VII. 3.1. Matériels et méthode

La méthode d'analyse utilisée est la méthode de fermentation en tubes multiples :

Matériel et produits :

- Tubes à essai à bouchons vissant stériles.
- Eau distillée
- Pipettes pasteur
- Milieu d'EVA-LITSKY

Mode opératoire :

- L'ensemencement se fait de la même manière que pour les coliformes, seul le milieu diffère on ensemence sur le milieu ROTH :
 - 03 tubes de 10 ml de milieu ROTH, à double concentration contenant 1 ml d'eau à analyser.

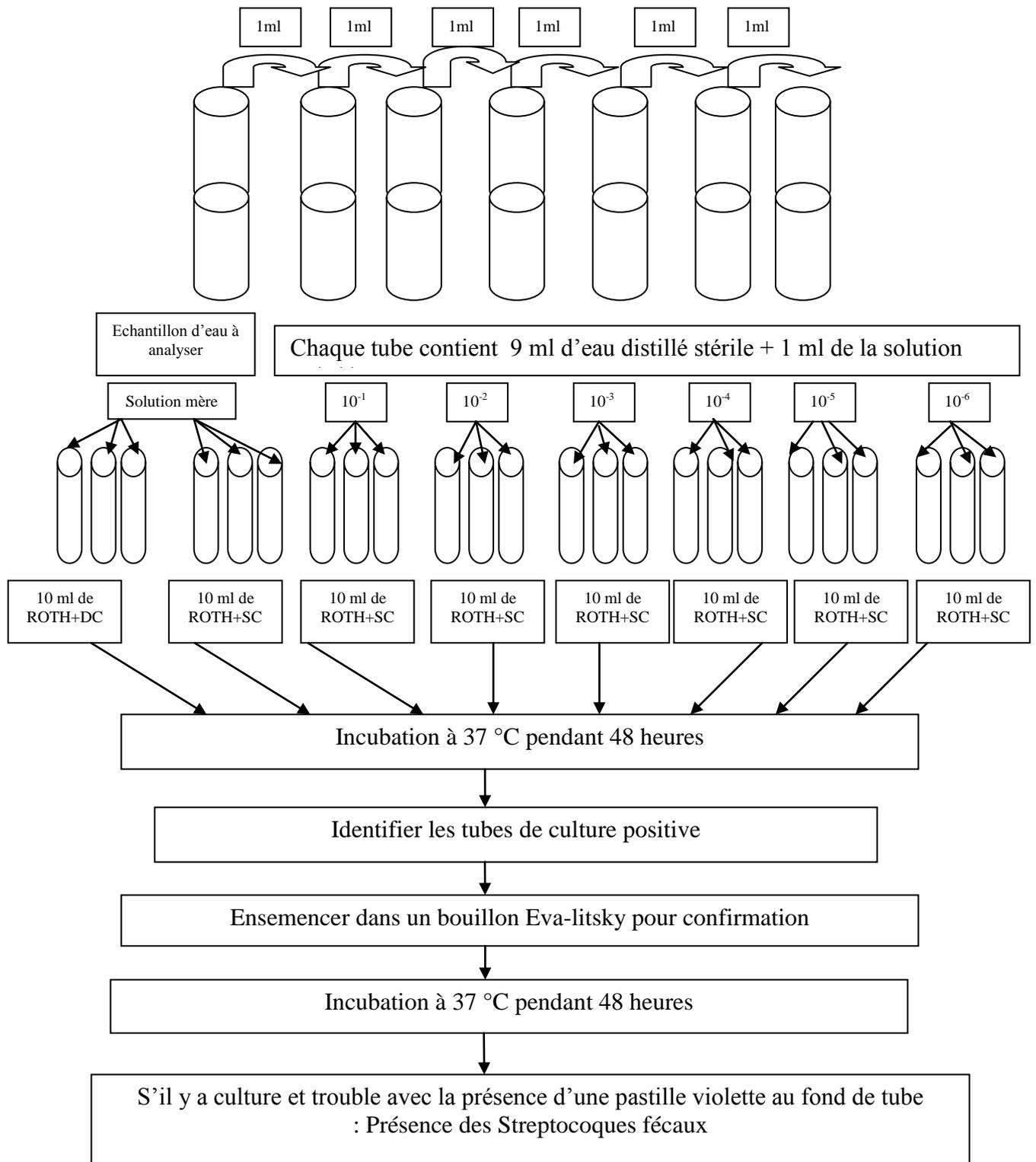


Figure VII. 2 : Recherche et dénombrement des Streptocoque totaux et fécaux

-03 tubes de 10 ml de milieu ROTH, à simple concentration avec 1 ml d'eau à analyser.

-03 tubes de 10 ml de milieu ROTH, à simple concentration avec 1 ml de dilution à 1/10.

-03 tubes de 10 ml de milieu ROTH, à simple concentration avec 1 ml de dilution à 1/100, et ainsi de suite jusqu'à la dilution à 1/10000.

- Incuber à 37°C pendant 48 h. La présence d'un trouble accompagné d'un dépôt microbien au fond du tube indique la présence de streptocoques fécaux.

Teste de confirmation :

A partir de chaque tube contenant des streptocoques, ensemercer 6 à 7 gouttes dans le même nombre de tubes de milieu EVA. Incuber à 37°C pendant 24 h (les tubes présentent un trouble au fond confirment la présence de streptocoques fécaux). Le dénombrement se fait également à l'aide de la table N.P.P (nombre plus probable).

VII. 3.2. Résultats et discussion

Nous avons dénombré les streptocoques totaux et fécaux à l'entrée et à la sortie des deux filtres, et nous avons calculé les rendements d'élimination. Les résultats sont présentés dans le tableau VII. 2.

Tableau VII. 2 : Dénombrement des streptocoques totaux et les rendements d'élimination

Campagne	Concentration (u/100 ml)			Rendement %	
	Eau usée	Filtre N'Goussa	Filtre Hassi Sayah	Filtre N'Goussa	Filtre Hassi Sayah
1	4,3.10 ⁸	24.10 ⁴	24.10 ³	99,94	99,99
2	140.10 ⁸	1,1.10 ⁴	110. 10 ⁴	99,99	99,99
3	140.10 ⁸	0,92.10 ⁸	21.10 ⁶	99,34	99,85
4	3,5. 10 ⁸	0,9. 10 ⁴	0,3.10 ⁷	99,74	99,14
5	0,6.10 ⁵	0	0,3.10 ²	100	99,95
6	9 .10 ⁸	4 .10 ⁵	2.10 ⁵	99,95	99,97
7	0,4.10 ⁸	0,2.10 ⁴	0,2.10 ⁴	99,99	99,99
8	1,1.10 ¹⁰	2,5.10 ²	0	99,99	100

À partir de chaque tube contenant des streptocoques totaux, nous avons ensemencé 6 à 7 gouttes dans le même nombre de tubes de milieu EVA.

Le dénombrement se fait également à l'aide de la table N.P.P ; les résultats de dénombrement et les rendements sont présentés dans le tableau VII. 3.

Tableau VII. 3 : Le dénombrement des streptocoques fécaux et les rendements

Campagne	Concentration (u/100 ml)			Rendement %	
	Eau usée	Filtre N'Goussa	Filtre Hassi Sayah	Filtre N'Goussa	Filtre Hassi Sayah
1	$4,3.10^8$	24.10^4	24.10^3	99,94	99,99
2	140.10^8	$1,1.10^4$	46.10^4	99,99	99,99
3	140.10^8	$0,92.10^8$	21.10^6	99,34	99,85
4	$3,5.10^8$	$0,9.10^4$	$0,3.10^7$	99,99	99,14
5	$0,6.10^8$	0	$0,3.10^3$	100	99,99
6	$0,3.10^8$	$0,3.10^4$	$0,3.10^5$	99,99	99,90
7	$0,4.10^8$	0	0	100	100
8	$1,1.10^{10}$	$2,5.10^2$	0	99,99	100

A travers les résultats de dénombrement des streptocoques totaux et fécaux dans les eaux pour les deux filtres, nous constatons que pendant les huit semaines, le rendement est presque identique avec une valeur optimale de 99,99 %. C'est-à-dire que nos sables éliminent très bien les streptocoques totaux et fécaux ; mais il y a une forte variabilité des valeurs, car pour certaines campagne d'analyse les concentrations restent élevées par rapport aux normes d'utilisation [29] et dans d'autres il y a absence de ces germes. Nous constatons une légère amélioration du rendement avec le temps en surtout après la sixième semaine de travail.

VII. 4. Dénombrement des coliformes totaux [95]

Le dénombrement des coliformes totaux à l'entrée et à la sortie de deux filtres a été effectué par la méthode de fermentation en tubes multiples :

VII. 4.1. Matériels et produits

- Tubes à essai à bouchons vissant stériles
- Eau distillée
- Pipette pasteur
- Bouillon BCPL simple et double concentration
- Milieux de culture Schubert
- Réactif de KOVACS

Teste présomptif :

Le teste présomptif est effectué en utilisant le bouillon lactose au pourpre de bromocrésol (bouillon BCPL).

-Tous les tubes sont munis d'une cloche de durham pour déclarer le dégagement éventuel de gaz dans le milieu. On ensemence :

03 tubes de 10 ml de bouillon de BCPL, à double concentration avec 1 ml d'eau à analyser.

03 tubes de 10 ml de bouillon de BCPL, à simple concentration avec 1 ml d'eau à analyser.

03 tubes de 10 ml de bouillon de BCPL, à simple concentration avec 1 ml de dilution à 1/10.

03 tubes de 10 ml de bouillon de BCPL, à simple concentration avec 1 ml de dilution à 1/100, et ainsi de suite jusqu'à la dilution à 1/10000.

- Après ensemencement, chasser le gaz éventuel des tubes et incuber à 37°C pendant 48 h (les tubes où l'on a présence de gaz dans la cloche avec virage de l'indicateur coloré (trouble) seront considérés comme positif ; le dénombrement se fera à l'aide de la table N.P.P.

Recherche et dénombrement des colibacilles :

A partir de chaque tube contenant des coliformes, ensemercer 6 à 7 gouttes dans le même nombre de tube de milieu Schubert. Incuber à 44°C pendant 24h.

Elimination bactériologique

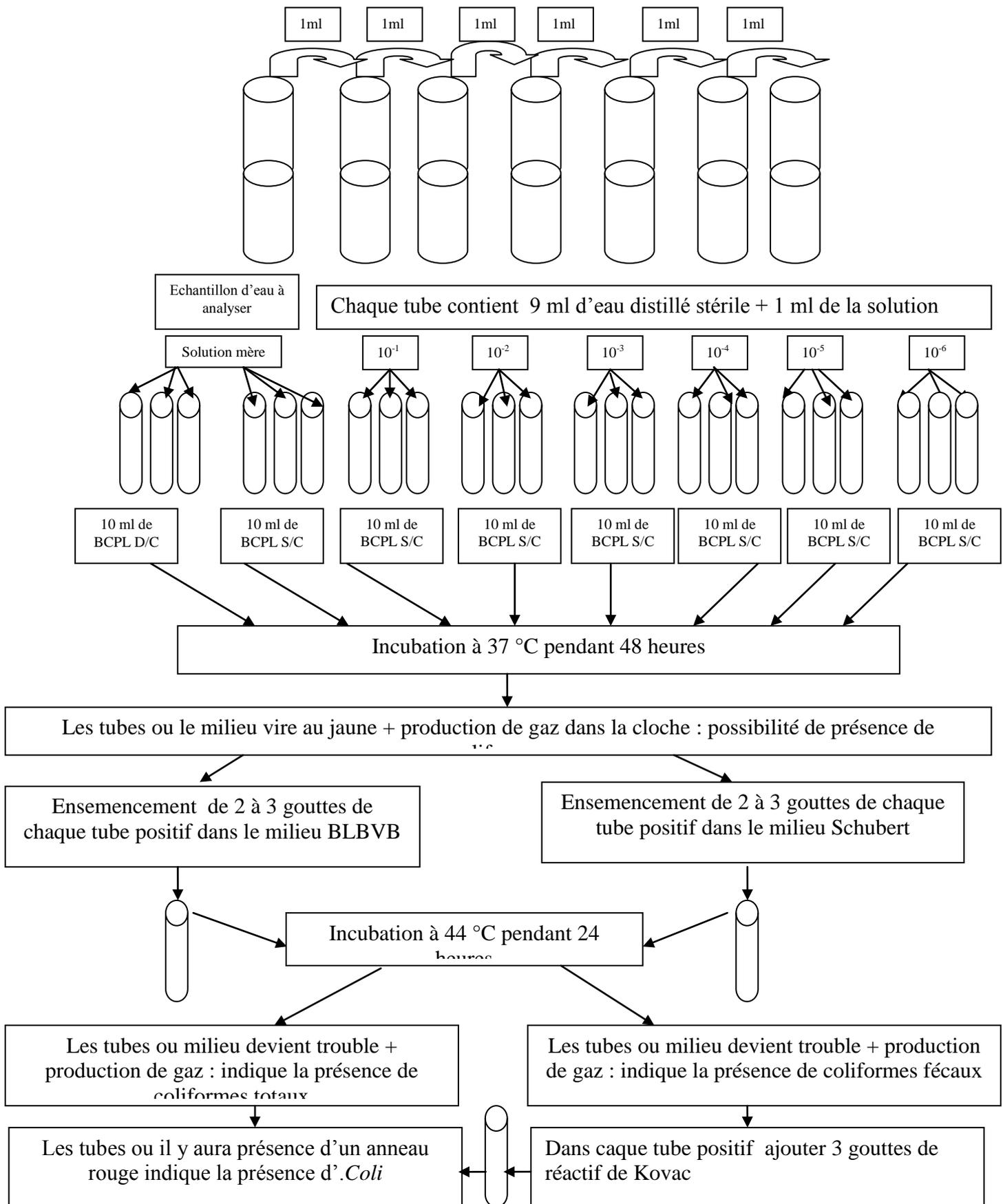


Figure VII. 3 : Recherche et dénombrement des Coliformes fécaux

La présence de gaz dans la cloche + la réaction positive (virage au jaune) et la confirmation de cette dernière après l'ajout du réactif de KOVACS (formation d'anneau rouge en surface) indique la présence des colibacilles (E.COLI) figure VII.4

VII. 4.2. Résultats et discussion

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau VII. 4 représentant 2 campagnes seulement, correspondantes à 2 semaines.

Tableau VII. 4 : Le dénombrement des coliformes totaux et le rendement

Campagne	Concentration (ul/100 ml)			Rendement%	
	Eau usée	Filtre N'Goussa	Filtre Hassi Sayah	Filtre N'Goussa	Filtre Hassi Sayah
2	45.10^5	26.10^4	2.10^3	94,22	99,96

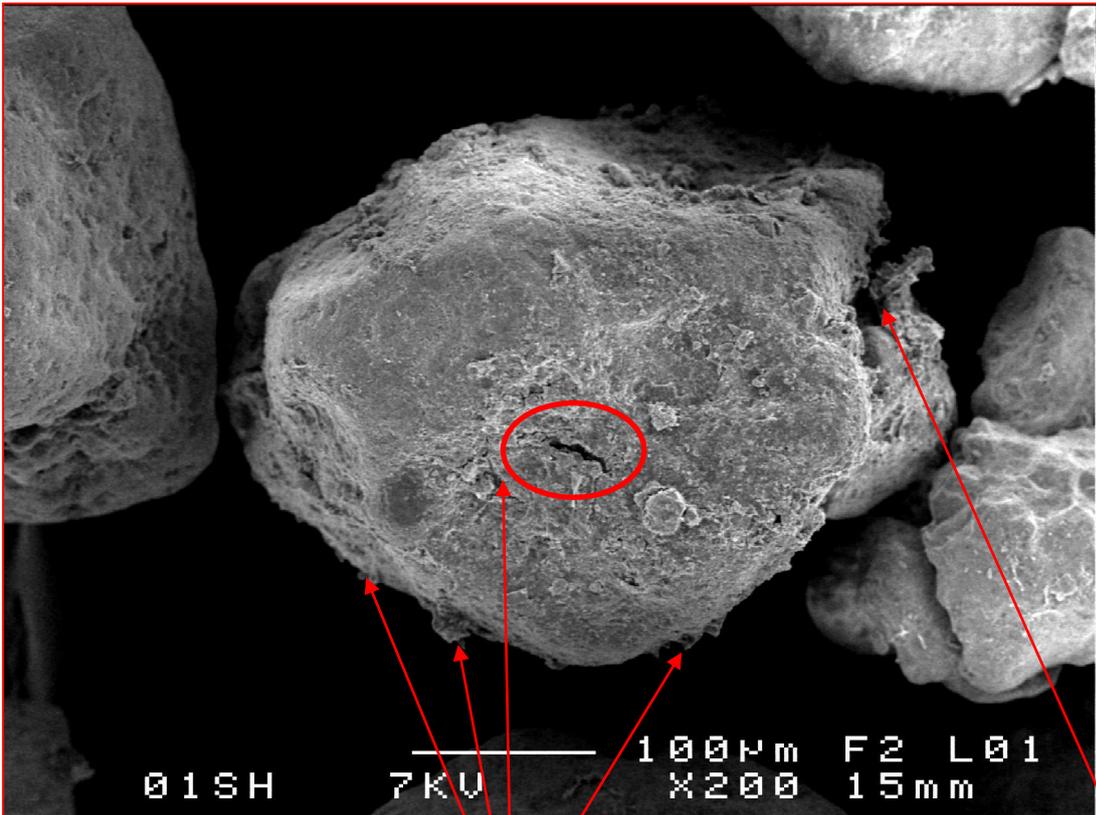
Bien que nous n'ayons pas fait qu'une seule campagne, nous constatons l'obtention d'un bon rendement pour les deux filtres.

VII. 5. Analyse microscopique

Pour compléter ce travail, nous avons procédé à l'analyse de quelques couches de filtre par la microscopie à balayage électronique afin de visualiser l'état des grains de sable après utilisation du filtre pendant semaines.

A cette effet, nous avons découpé le filtre de 60 cm d'épaisseur en en couche de 3 cm d'épaisseur et nous avons obtenue 20 couches ; la première couche correspond à la couche superficielle et la 20^{ème} couche correspond à la dernière couche du fond du filtre. Nous avons choisi le filtre du sable de N'Goussa et les couches analysées sont les couches : 1, 3, 9, 15 et 19 ; les résultats sont présentés sur la figure VIII. 4.

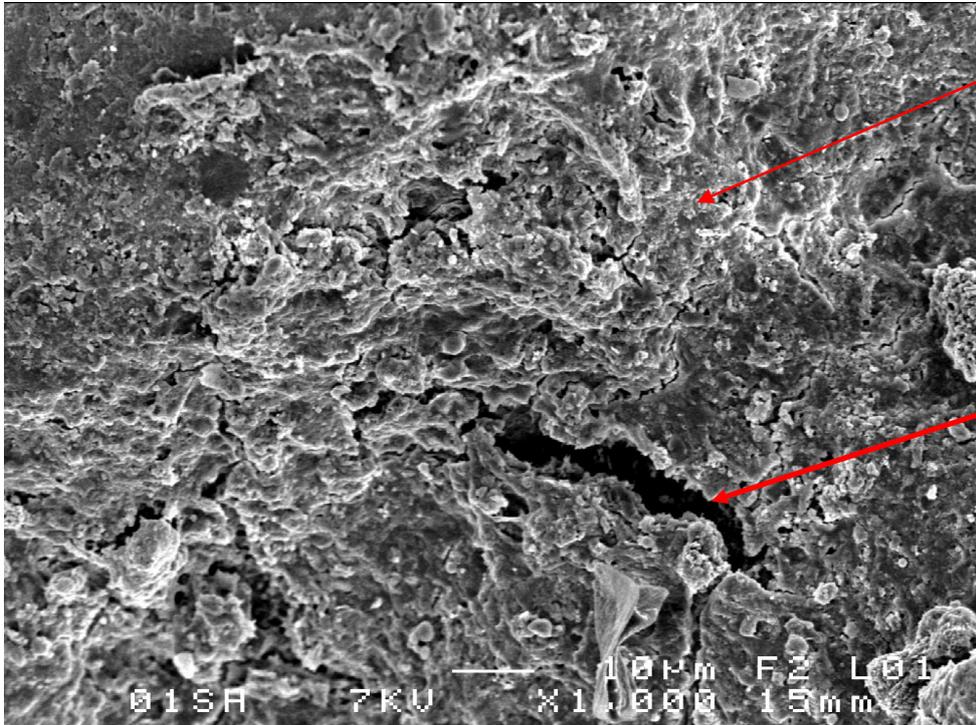
Par la microscopie électronique à balayage, seuls les premiers microns sont traversés par le rayonnement (7 µm au maximum) et la profondeur traversée dépend de la densité du produit par rapport au cuivre de la cuve, elle augmente avec la diminution de la densité. Nous aurons donc une analyse superficielle.



Photos 01

La matière organique attachée au grain de sable

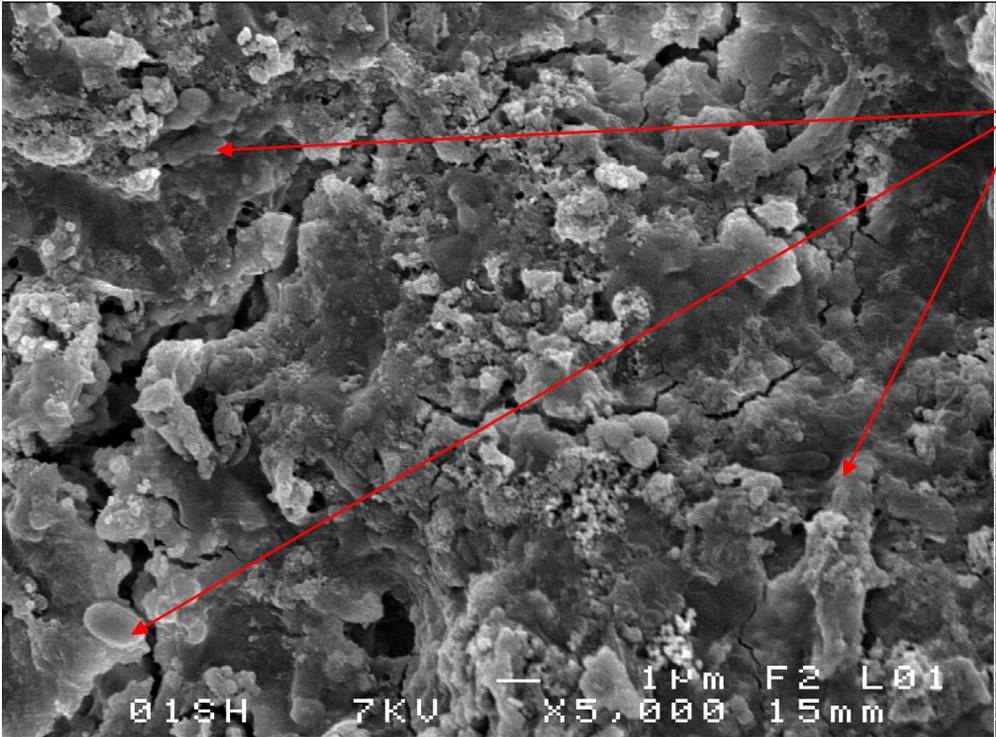
Le détachement



La couche de la matière organique

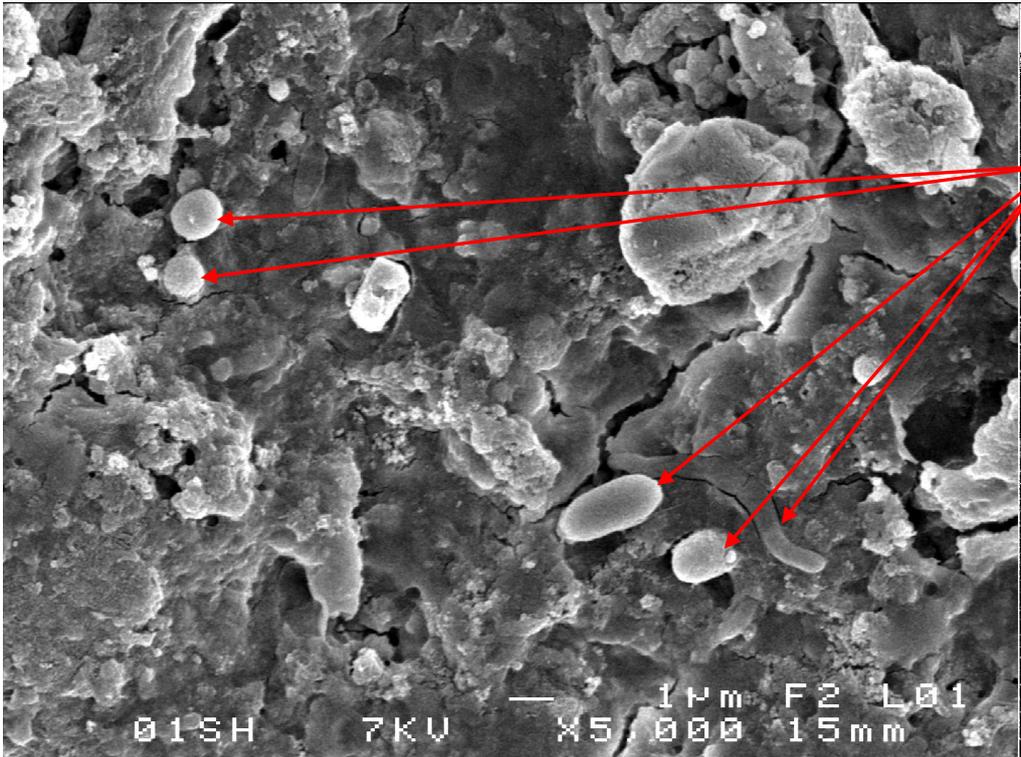
Un détachement de la couche qui fait apparaitre l'épaisseur de la couche

Photos 02



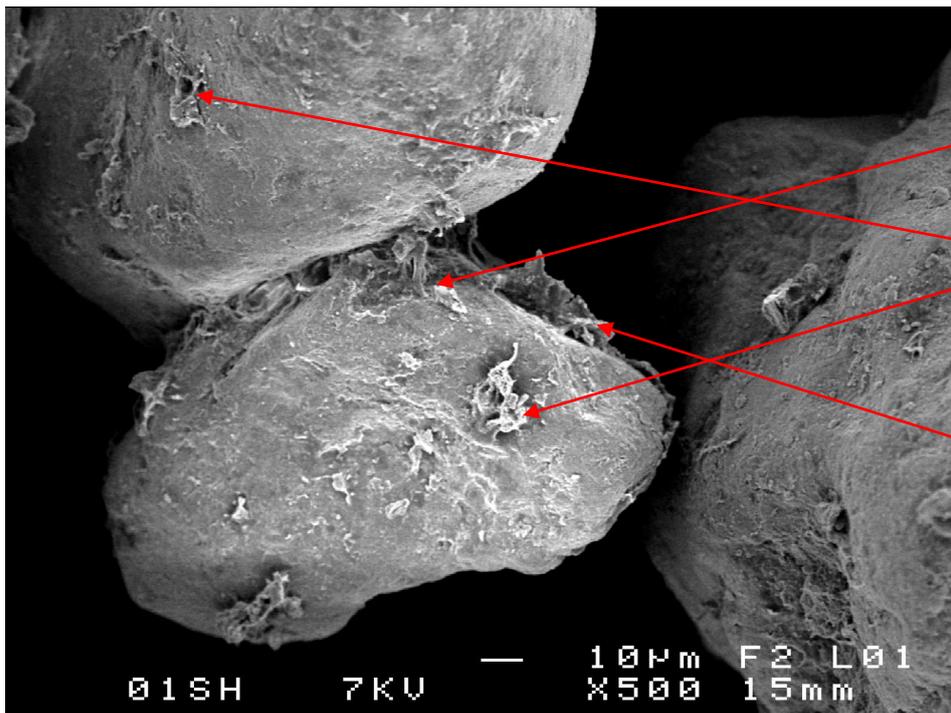
Les microorganismes

Photos 03



Les microorganismes

Photos 04

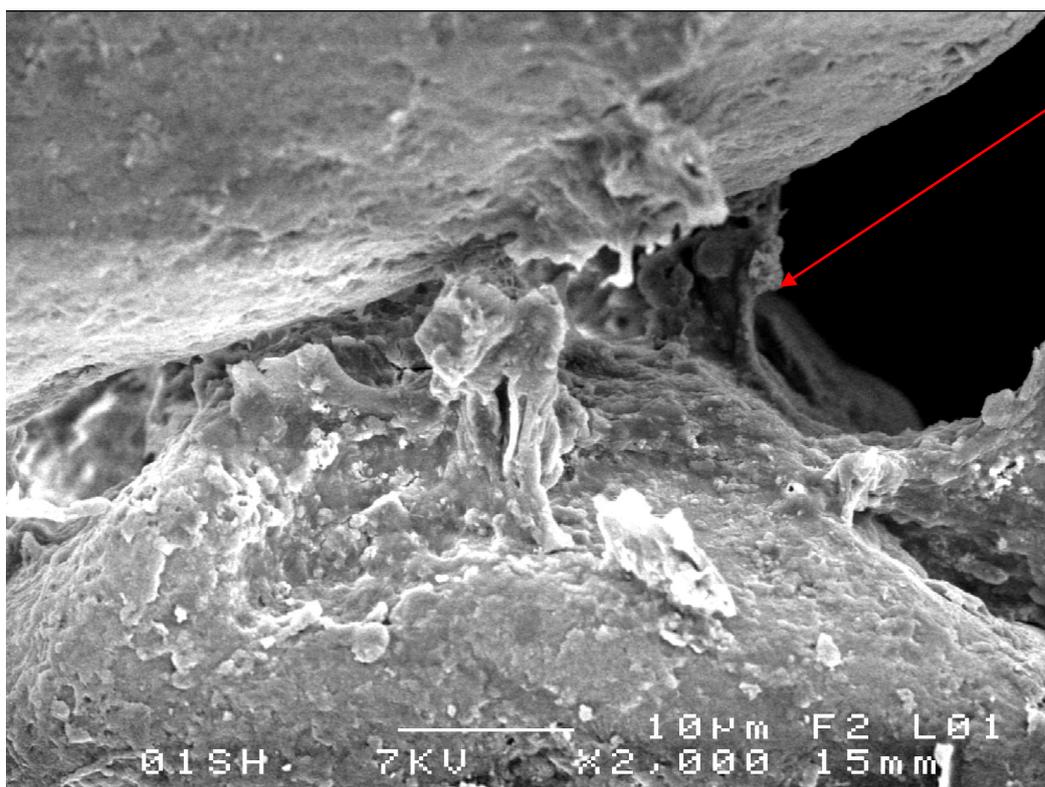


La cimentation
entre 2 grains
par la matière
organique

Le dépôt de
matière
organique

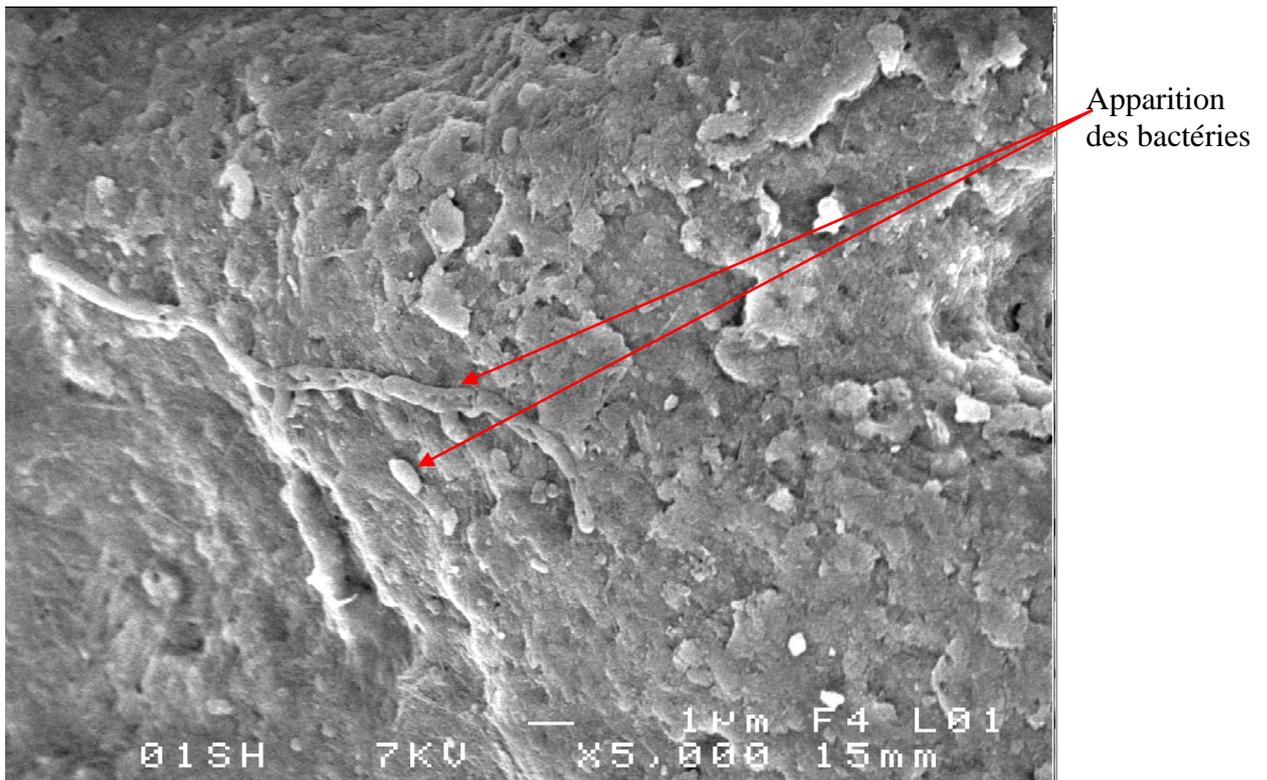
Le décollement
de la couche de
la matière
organique

Photos 05



Une bonne
cimentation
de deux
grains

Photos 06



Photos 07

Figure VII. 4 : Etat des grains après filtration

D'après les photos présentées dans la figure VII. 4, nous constatons :

Un enrobage du grain de sable par une pellicule de la matière organique (photos 01 et 02).

Les photos 03 et 04 montrent très clairement quelques bactéries et spots attachées au grain de la première couche ainsi qu'une pellicule de la matière organique qui est décollé du grain dans certains cas.

Les photos 05 et 06 montrent la cimentation entre les grains provoquée par la matière organique ainsi que les détachements de cette dernière qui est due au séchage du sable (la perte d'eau due aux conditions de stockage).

VII. 6. Conclusion

L'élimination des bactéries est très confirmée par les analyses bactériologiques, qui ont donné des bons résultats. Ces derniers ont été confirmés par le taux d'élimination de la matière organique, ainsi que par microscopie électronique à balayage qui montre bien le dépôt des microorganismes et des bactéries sur les grains de sable ainsi qu'une cimentation entre les grains provoqué par la matière organique qui est très visible sur les grains.

CHAPITRE 8

Chapitre VIII- Modélisation de la filtration biologique

VIII. 1. Introduction

Les résultats obtenus dans les parties précédentes méritent d'être poursuivis par des essais de modélisation et/ou de simulation de certains paramètres de la filtration biologique.

La partie que nous jugeons la plus importante est celle concernant les rendements d'élimination de la DCO et de la DBO₅. En effet, ces deux paramètres ont été étudiés plusieurs fois, et ce pour plusieurs sables.

Dans ce contexte nous allons essayer de trouver la relation mathématique entre les rendements épuratoires de la DCO et de la DBO₅ en fonction du temps pour quelques sables.

VIII. 2. Définition du modélisation

Le principe d'un modèle est de remplacer un système complexe en un objet ou opérateur simple reproduisant les aspects ou comportements principaux de l'original (ex : modèle réduit, maquette, modèle mathématique ou numérique, modèle de pensée ou raisonnement) [96].

L'étude d'un phénomène peut, le plus souvent être schématisée de la manière suivante :

- 1- Une ou plusieurs grandeurs de sortie, mesurables, qui constituent le résultat du processus
- 2 - Une ou plusieurs grandeurs d'entrée (ou facteurs), qui peuvent être de deux types ; des entrées sur lesquelles il n'est pas possible d'agir (perturbations). Ces entrées peuvent être aléatoires ou déterministes, mesurables ou non mesurables.

VIII. 3. Les différents modèles [96].

L'une des solutions est de recourir à une série d'expériences pour analyser les paramètres et grandeurs du système. Mais les essais peuvent s'avérer très coûteux (essais en vol, essais avec matériaux rares, instrumentations très chères...) et ils peuvent être très dangereux (essais nucléaires, environnement spatial...). Enfin il peut être difficile de mesurer tous les

paramètres : échelles du problème trop petites (chimie du vivant, couche limite en fluide...) ou trop grandes (astrophysique, météorologie, géophysique...).

On peut aussi construire un modèle mathématique permettant la représentation du phénomène physique. Ces modèles utilisent très souvent des systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP) non-linéaires dont on ne connaît pas de solutions analytiques en général.

VIII. 3. 1. Les modèles de connaissance : Un modèle de connaissance est un modèle dont les caractéristiques et les équations ont été établies en faisant appel à des modèles plus généraux mettant en œuvre les lois de la physique : température, pression, courant, accélération, force... Ils sont beaucoup plus riches de signification que les modèles de représentation définis ci-dessous et contiennent toutes les informations utiles sur le processus étudié. Par contre, ils sont en général difficiles à déterminer et de mise en œuvre complexe [97].

Dans la pratique, il est toujours souhaitable d'établir un modèle de connaissance des processus que l'on étudie. Néanmoins, il arrive fréquemment que le processus soit trop complexe, ou que les phénomènes qui le régissent soient trop mal connus, pour qu'il soit possible d'établir un modèle de connaissance suffisamment précis pour l'application considérée. On est alors amené à concevoir des modèles purement empiriques, fondés exclusivement sur les résultats de mesures effectuées sur le processus.

VIII. 3. 2. Les modèles "boîte noire" : les modèles "boîte noire" sont construits essentiellement sur la base de mesures effectuées sur les entrées et les sorties du processus à modéliser. La modélisation consiste alors à utiliser, pour représenter les relations entre les entrées et les sorties, des équations (algébriques, différentielles, ou récurrentes) paramétrées, et à estimer les paramètres, à partir des mesures disponibles, de manière à obtenir la meilleure précision possible avec le plus petit nombre possible de paramètres ajustables.

Le domaine de validité d'un tel modèle ne peut pas s'étendre au-delà du domaine des entrées qui est représenté dans les mesures utilisées pour l'apprentissage [98].

VIII. 3. 3. Les modèles "boîte grise" : lorsque des connaissances, exprimables sous forme d'équations, sont disponibles, mais insuffisantes pour concevoir un modèle de connaissance satisfaisant, on peut avoir recours à une modélisation "boîte grise" (ou modélisation semi-physique) qui prend en considération à la fois les connaissances et les

mesures. Une telle démarche peut concilier les avantages de l'intelligibilité d'un modèle de connaissance avec la souplesse d'un modèle comportant des paramètres ajustables [99].

VIII. 4. Les étapes de la conception d'un modèle [100].

Lors de la conception d'un modèle de connaissance, la relation entre les entrées et la (ou les) sortie(s) du modèle découlent directement de la mise en équation des phénomènes physiques (chimiques, ou autres) qui régissent le fonctionnement du processus. Une fois le modèle obtenu sous forme analytique, des approximations peuvent être faites pour simplifier son expression (par exemple "linéariser" le modèle pour passer d'un modèle non linéaire à un modèle linéaire) si une telle approximation est justifiée.

Dans le cas d'une modélisation de type "boîte noire", la construction du modèle nécessite les trois éléments suivants :

- Une hypothèse sur l'existence d'une relation déterministe liant les entrées à la (ou aux) sortie(s). Cette relation est caractérisée par une fonction appelée *fonction de régression* (ou plus simplement *régression*). L'expression formelle supposée adéquate pour représenter cette relation est appelée *modèle-hypothèse*.
- Une séquence de mesures des entrées et de la sortie du processus.
- Un algorithme d'apprentissage.

VIII. 5. Approximation au sens des moindres carrés

L'approximation en moyenne quadratique, encore appelée dans le cas discret approximation des moindres carrés, a été étudiée au XIX siècle par Tchebychev et Hermite. Le polynôme de meilleure approximation s'exprime simplement à l'aide des polynômes orthogonaux [101].

VIII. 5. 1. Détermination du polynôme [102][103][104]:

Soient n un entier strictement supérieur à 1 et $\{(x_i, y_i) \in \mathbb{R}^2, i \in [1 \dots n]\}$, un ensemble de n observations et p un entier strictement inférieur à n . L'on cherche le polynôme P à coefficients réels noté :

$$P(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_px^p,$$

Pour lequel.

$$\sum_{i=1}^n (P(x_i) - y_i)^2$$

En posant.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & \dots & \dots & x_1^p \\ \cdot & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \cdot & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \cdot & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \cdot & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & \dots & \dots & x_n^p \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_p \end{bmatrix} \quad \hat{\beta} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_p \end{bmatrix}$$

le problème posé revient alors à trouver un vecteur β minimisant la norme de $(X \times \beta - Y)$. On appelle $\hat{\beta}$ le vecteur minimisant cette norme.

Soit $D = \{X \times \beta, \beta \in R^p\}$. De façon triviale, D est un sous espace vectoriel de R^n . D'après le théorème de Pythagore, $\hat{\beta}$ est tel que le vecteur $(Y - X \times \hat{\beta})$ appartient à l'orthogonal de D .

Soit β un élément de R^p . On note $(|)$ le produit scalaire euclidien. D'après ce qui précède $(X \times \beta | (Y - X \times \hat{\beta})) = 0$, et l'on a successivement :

$${}^t(X \times \beta) \times (Y - X \times \hat{\beta}) = 0,$$

$$\text{puis : } {}^t\beta \times ({}^tX \times Y - {}^tX \times X \times \hat{\beta}) = 0.$$

Ceci étant vrai pour tout vecteur β , on obtient :

$${}^tX \times Y - {}^tX \times X \times \hat{\beta} = 0.$$

Si ${}^tX \times X$ est inversible, alors :

$$\hat{\beta} = ({}^tX \times X)^{-1} \times X \times Y.$$

VIII. 5. 2. Pondération des données

Les données étant souvent entachées d'incertitudes (a priori différentes) il est alors tentant d'accorder plus d'importance aux données ayant de faibles incertitudes, dont la connaissance est de ce fait plus assurée, qu'aux valeurs présentant de mauvaises incertitudes. Cela pourra conduire par exemple à minimiser l'influence de valeurs issues de conditions extrêmes, proches des limites des instruments de mesure.

Soit $\{w_i, i \in [1 \dots n]\}$, un ensemble de n réels positifs ou nuls tels que pour $i \in [1 \dots n]$, w_i représente le degré de confiance que l'on a pour le doublet (x_i, y_i) . Pour prendre en compte l'influence de la pondération dans l'approximation il suffit de multiplier chacune des composante de X et de Y par la racine carrée de la pondération qui lui est associée. Pratiquement, cela revient à construire la matrice diagonale $W_{1/2}$ avec les racines carrées des w_i sur la diagonale et des 0 ailleurs, puis à remplacer X par $W_{1/2} \times X$ et Y par $W_{1/2} \times Y$. La simplicité de cette prise en compte de la pondération résulte de la linéarité du formalisme matriciel employé. Les calculs se simplifient et la formule (1) avec prise en compte de la pondération devient :

$$\hat{\beta} = ({}^t X \times W \times X)^{-1} \times X \times W \times Y .$$

avec :

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & w_2 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & w_3 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & w_n \end{bmatrix}$$

La difficulté est maintenant de choisir une pondération. Afin de tenir compte des incertitudes, on pourra prendre par exemple comme valeurs de pondération pour le doublet d'observations (x_i, y_i) avec $i \in \{1, \dots, n\}$:

$$w_i = \frac{\frac{1}{U_i^2}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{U_j^2}}$$

U_k étant l'incertitude élargie sur y_k ($k \in \{1, \dots, n\}$). Il convient néanmoins de garder à l'esprit que la pondération est ici présentée dans un cadre purement déterministe et non probabiliste.

VIII. 5. 3. Choix du degré du polynôme

Soit $n \geq 2$ le nombre de doublets numériques (x, y) . Le degré k du polynôme calculé pourra être compris entre 0 et $n- 1$. S'il est aisé d'éliminer les cas triviaux $k = 0$ et $k = 1$, il est moins évident de déterminer à partir de quelle valeur de k l'approximation est

optimale. Il n'existe en effet pas de méthode permettant de déterminer le degré du polynôme « optimum » dans le cas général.

On peut néanmoins remarquer que lorsque l'on augmente le degré k du polynôme, les résidus

$$\varepsilon_i = |y_i - P_k(x_i)| \quad (i \in \{0, \dots, n\}),$$

sont de plus en plus petits. Toutefois, lorsque k augmente, la proximité du graphe de P aux points (x_i, y_i) s'accompagne souvent d'oscillations en dehors des points d'interpolation qui sont le plus souvent peu crédibles sur le plan physique.

Dans le cas où le modèle physique qui lie y_i à x_i est un polynôme dont on connaît le degré on peut tracer

$$\varepsilon(k) = \sum_{i=0}^n (y_i - P_k(x_i))^2$$

en fonction de k . Lorsque le degré « optimum » du polynôme sera atteint [105][106].

VIII. 5. 4. Justesse « algébrique » du polynôme

La justesse du polynôme au sens algébrique dépend de la « proximité » entre

$$W_{1/2} \times X \times \hat{\beta} \text{ et } W_{1/2} \times Y.$$

Cette proximité peut être caractérisée par le cosinus de l'angle formé entre

$$W_{1/2} \times W \times \hat{\beta} \text{ et } W_{1/2} \times Y.$$

Celui-ci se calcule très simplement par la formule :

$$\cos \theta = \frac{(W_{1/2}Y | W_{1/2} \times X \times \hat{\beta})}{\|W_{1/2} \times Y\| \cdot \|W_{1/2} \times X \times \hat{\beta}\|}$$

Ce qui s'écrit:

$$\cos \theta = \frac{(tY \times W \times X \times \hat{\beta})}{\sqrt{tY \times W \times Y} \cdot \sqrt{t\hat{\beta} \times tW \times X \times \hat{\beta}}}$$

Le polynôme sera d'autant plus juste que la valeur de $|\cos \theta|$ sera proche de 1 [105].

VIII. 6. Approximation des résultats expérimentaux

Nous allons utiliser les résultats expérimentales des rendements d'abattement de la DCO et la DBO₅ de cinq sables différents à savoir celui de N'Goussa, Hassi Sayah, In Salah, Alia et Hassi Ben Abdellah ; nous allons déterminer les polynômes d'approximation pour des degrés de 2 au degré 6 pour chaque sable et chaque paramètre et ensuite nous choisirons le polynôme optimum. Pour ce choix nous allons calculer les résidus et leurs paramètres ainsi que le coefficient de détermination R².

VIII. 6. 1. Résultat d'approximation des rendements d'élimination de la DCO

En appliquant les relations citées en paragraphe 3. 1 (les calculs matriciels) pour les résultats de mesure du rendement d'abattement de la DCO pour les cinq sables, nous avons obtenu les résultats présentés par les tableaux VIII. 1, VIII. 2, VIII. 3, VIII. 4 et VIII. 5.

Résultats du sable de N'Goussa

Les polynômes d'approximation

$$y = -0,440x^2 + 4,345x + 78,589$$

$$y = 0,0693x^3 - 1,582x^2 + 9,616x + 72,646$$

$$y = 0,016x^4 - 0,275x^3 + 0,938x^2 + 2,726x + 78,020$$

$$y = -0,007x^5 + 0,216x^4 - 2,293x^3 + 9,965x^2 - 14,468x + 88,450$$

$$y = -0,001x^6 + 0,0155x^5 - 0,076x^4 - 0,460x^3 + 4,162x^2 - 5,965x + 84,140$$

Tableau VIII. 1 : Estimation des paramètres DCO sable de N’Goussa

	Y _i	P 2 ^{ème} degré		P 3 ^{ème} degré		P 4 ^{ème} degré		P 5 ^{ème} degré		P 6 ^{ème} degré	
		Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε
1	70,833	70,69	0,144	67,64	3,198	69,09	1,744	70,74	0,091	70,43	0,408
2	71,795	77,03	-5,237	77,64	-5,848	76,19	-4,394	72,88	-1,087	73,9	-2,102
3	84,906	81,52	3,385	83,76	1,145	82,31	2,599	81,76	3,150	81,14	3,763
4	86,047	84,16	1,890	86,5	-0,451	86,26	-0,209	88,46	-2,413	87,7	-1,652
5	86,842	84,94	1,904	86,36	0,479	87,33	-0,490	89,54	-2,695	89,79	-2,948
6	89,796	83,87	5,930	83,87	5,930	85,32	4,476	85,32	4,476	86,17	3,631
7	78,125	80,94	-2,816	79,52	-1,390	80,48	-2,360	78,28	-0,155	78,53	-0,409
8	69,565	76,16	-6,596	73,82	-4,255	73,58	-4,013	71,37	-1,808	70,61	-1,048
9	65,909	69,53	-3,620	67,29	-1,380	65,84	0,074	66,39	-0,478	65,77	0,135
10	63,636	61,04	2,593	60,43	3,204	58,98	4,658	62,28	1,351	63,3	0,337
11	53,125	50,7	2,422	53,76	-0,632	55,21	-2,086	53,56	-0,433	53,24	-0,117
Coefficient de détermination R ²		0,724		0,812		0,836		0,861		0,861	
La somme des carrés		158,4		113,9		97,15		49,77		44,76	
La moyenne		0,000		0,000		0,000		0,000		0,000	
L'écart type		3,980		3,376		3,117		2,231		2,116	

Résultats du sable de Hassi Sayah

Les polynômes d'approximation

$$y = -0,769x^2 + 8,633x + 53,993$$

$$y = -0,019x^3 - 0,422x^2 + 6,895x + 56,098$$

$$y = 0,0356x^4 - 0,873x^3 + 6,374x^2 - 13,173x + 72,750$$

$$y = -0,003x^5 + 0,113x^4 - 1,717x^3 + 10,461x^2 - 21,528x + 78,096$$

$$y = -0,008x^6 + 0,267x^5 - 3,654x^4 + 23,887x^3 - 76,769x^2 + 114,687x + 5,784$$

Tableau VIII. 2 : Estimation des paramètres DCO sable de Hassi Sayah

	Y _i	P 2 ^{ème} degré		P 3 ^{ème} degré		P 4 ^{ème} degré		P 5 ^{ème} degré		P 6 ^{ème} degré	
		Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε
1	64,58	61,86	2,726	62,55	2,032	65,11	-0,530	65,42	-0,838	64,19	0,389
2	66,67	68,18	-1,518	68,05	-1,379	65,48	1,183	64,87	1,800	68,79	-2,127
3	71,70	72,97	-1,276	72,46	-0,767	69,90	1,795	69,80	1,898	67,43	4,270
4	69,77	76,23	-6,458	75,69	-5,926	75,27	-5,499	75,68	-5,910	72,73	-2,966
5	78,95	77,94	1,008	77,62	1,331	79,32	-0,377	79,74	-0,788	80,72	-1,769
6	87,76	78,12	9,638	78,12	9,638	80,68	7,077	80,68	7,077	83,95	3,805
7	78,12	76,76	1,369	77,08	1,045	78,79	-0,663	78,38	-0,252	79,36	-1,233
8	69,57	73,86	-4,293	74,39	-4,825	73,96	-4,398	73,55	-3,986	70,61	-1,040
9	65,91	69,42	-3,513	69,93	-4,022	67,37	-1,460	67,47	-1,563	65,10	0,812
10	65,45	63,45	2,005	63,59	1,867	61,03	4,428	61,64	3,812	65,56	-0,110
11	56,25	55,94	0,311	55,24	1,005	57,81	-1,557	57,50	-1,249	56,26	-0,013
Coefficient de détermination R ²		0,748		0,751		0,823		0,825		0,928	
La somme des carrés		183,7		181,4		129,3		127,7		52,58	
La moyenne		0,000		0,000		0,000		0,000		0,002	
L'écart type		4,287		4,260		3,596		3,573		2,293	

Résultats du sable de In Salah

Les polynômes d'approximation

$$y = -0,775x^2 + 9,452x + 44,340$$

$$y = -0,0165x^3 - 0,478x^2 + 7,964x + 46,141$$

$$y = 0,0317x^4 - 0,778x^3 + 5,583x^2 - 9,933x + 60,992$$

$$y = 0,008x^5 - 0,219x^4 + 1,967x^3 - 7,708x^2 + 17,240x + 43,605$$

$$y = -0,006x^6 + 0,217x^5 - 3,128x^4 + 21,744x^3 - 75,089x^2 + 122,459x - 12,252$$

Tableau VIII. 3 : Estimation des paramètres DCO sable de In Salah

	Y _i	P 2 ^{ème} degré		P 3 ^{ème} degré		P 4 ^{ème} degré		P 5 ^{ème} degré		P 6 ^{ème} degré	
		Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε
1	54,17	53,02	1,150	53,61	0,556	55,90	-1,729	54,89	-0,726	53,94	0,222
2	61,54	60,14	1,396	60,02	1,514	57,74	3,799	59,75	1,793	62,78	-1,240
3	64,15	65,72	-1,568	65,28	-1,132	63,00	1,153	63,33	0,818	61,50	2,651
4	62,79	69,74	-6,953	69,29	-6,498	68,91	-6,117	67,57	-4,779	65,30	-2,505
5	73,68	72,22	1,466	71,94	1,743	73,46	0,220	72,13	1,557	72,89	0,799
6	77,55	73,14	4,409	73,14	4,409	75,43	2,124	75,43	2,124	77,95	-0,403
7	78,12	72,52	5,609	72,79	5,332	74,32	3,809	75,65	2,471	76,41	1,714
8	67,39	70,34	-2,947	70,79	-3,403	70,41	-3,022	71,75	-4,359	69,47	-2,084
9	63,64	66,61	-2,975	67,05	-3,410	64,76	-1,125	64,43	-0,791	62,59	1,043
10	60,00	61,33	-1,333	61,45	-1,452	59,17	0,833	57,16	2,840	60,19	-0,190
11	56,25	54,50	1,746	53,91	2,340	56,19	0,055	57,20	-0,947	56,24	0,007
Coefficient de détermination R ²		0,800		0,803		0,867		0,894		0,963	
La somme des carrés		129,5		127,8		86,33		68,89		24,09	
La moyenne		0,000		0,000		0,000		0,000		0,001	
L'écart type		3,598		3,575		2,938		2,625		1,552	

Résultats du sable de Alia

Les polynômes d'approximation

$$y = -1,070x^2 + 12,738x + 39,115$$

$$y = 0,018x^3 - 1,397x^2 + 14,379x + 37,129$$

$$y = 0,048x^4 - 1,138x^3 + 7,806x^2 - 12,798x + 59,680$$

$$y = 0,002x^5 - 0,014x^4 - 0,459x^3 + 4,518x^2 - 6,076x + 55,379$$

$$y = -0,008x^6 + 0,275x^5 - 3,819x^4 + 25,406x^3 - 83,603x^2 + 131,531x - 17,672$$

Tableau VIII. 4 : Estimation des paramètres DCO sable de Alia

	Y _i	P 2 ^{ème} degré		P 3 ^{ème} degré		P 4 ^{ème} degré		P 5 ^{ème} degré		P 6 ^{ème} degré	
		Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε
1	52,08	50,78	1,300	50,13	1,954	53,60	-1,515	53,35	-1,267	52,11	-0,027
2	61,54	60,31	1,226	60,44	1,095	56,97	4,564	57,47	4,068	61,44	0,101
3	62,26	67,70	-5,438	68,18	-5,918	64,71	-2,449	64,80	-2,531	62,40	-0,135
4	69,77	72,95	-3,184	73,45	-3,686	72,88	-3,108	72,54	-2,777	69,57	0,198
5	78,95	76,06	2,885	76,37	2,580	78,68	0,267	78,35	0,598	79,34	-0,394
6	83,67	77,03	6,641	77,03	6,641	80,50	3,171	80,50	3,171	83,81	-0,134
7	81,25	75,86	5,386	75,56	5,692	77,87	3,379	78,20	3,048	79,19	2,056
8	65,22	72,56	-7,338	72,05	-6,836	71,48	-6,258	71,81	-6,589	68,83	-3,615
9	63,64	67,11	-3,471	66,63	-2,991	63,16	0,478	63,08	0,561	60,68	2,955
10	58,18	59,52	-1,338	59,39	-1,207	55,92	2,262	55,42	2,759	59,40	-1,213
11	53,13	49,79	3,332	50,45	2,678	53,92	-0,792	54,16	-1,039	52,93	0,191
Coefficient de détermination R ²		0,829		0,831		0,911		0,912		0,977	
La somme des carrés		203,1		201,1		105,5		104,4		27,78	
La moyenne		0,000		0,000		0,000		0,000		-0,002	
L'écart type		4,507		4,484		3,248		3,231		1,667	

Résultats du sable de Hassi Ben Abdellah

Les polynômes d'approximation

$$y = -0,782x^2 + 8,230x + 53,402$$

$$y = 0,013x^3 - 1,010x^2 + 9,372x + 52,020$$

$$y = 0,048x^4 - 1,145x^3 + 8,201x^2 - 17,826x + 74,588$$

$$y = 0,005x^5 - 0,103x^4 + 0,513x^3 + 0,17324337x^2 - 1,414x + 64,086$$

$$y = -0,006x^6 + 0,203x^5 - 2,860x^4 + 19,255x^3 - 63,681x^2 + 98,298x + 11,152$$

Tableau VIII. 5 : Estimation des paramètres DCO sable de Hassi Ben Abdellah

	Y _i	P 2 ^{ème} degré		P 3 ^{ème} degré		P 4 ^{ème} degré		P 5 ^{ème} degré		P 6 ^{ème} degré	
		Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε
1	62,50	60,85	1,650	60,39	2,105	63,87	-1,366	63,26	-0,761	62,36	0,138
2	66,67	66,73	-0,068	66,83	-0,159	63,35	3,313	64,57	2,101	67,44	-0,773
3	67,92	71,06	-3,131	71,39	-3,465	67,92	0,007	68,12	-0,195	66,38	1,541
4	69,77	73,81	-4,046	74,16	-4,395	73,58	-3,816	72,78	-3,009	70,62	-0,853
5	76,32	75,01	1,309	75,22	1,096	77,53	-1,218	76,73	-0,411	77,45	-1,129
6	81,63	74,64	6,995	74,64	6,995	78,11	3,523	78,11	3,523	80,50	1,128
7	78,12	72,70	5,421	72,49	5,634	74,81	3,319	75,61	2,511	76,33	1,793
8	63,04	69,21	-6,163	68,86	-5,814	68,28	-5,235	69,09	-6,043	66,93	-3,888
9	61,36	64,15	-2,782	63,81	-2,448	60,34	1,024	60,14	1,226	58,40	2,962
10	54,55	57,52	-2,976	57,43	-2,885	53,96	0,587	52,75	1,799	55,62	-1,076
11	53,13	49,33	3,791	49,79	3,336	53,26	-0,136	53,87	-0,741	52,97	0,155
Coefficient de détermination R ²		0,790		0,791		0,904		0,912		0,959	
La somme des carrés		177,9		176,9		81,14		74,78		34,55	
La moyenne		0,000		0,000		0,000		0,000		0,000	
L'écart type		4,218		4,206		2,849		2,735		1,859	

Nous constatons qu'il y a une bonne corrélation de tous les polynômes avec les données expérimentales et que les résidus de tous les polynômes suivent une loi normale.

A l'exception des polynômes de 6^{ème} degré des sables de Hassi Sayah, In Salah et Alia, la moyenne des $\varepsilon_i = 0$ présentent une moyenne des résidus qui tend vers 0 (voir tableaux IX. 2, IX. 3 et IX. 4).

Les coefficients de détermination sont très intéressants à partir du polynôme de 4^{ème} degré $R > 0.9$.

D'après ces résultats, le polynôme optimum d'approximation est le 5^{ème} degré pour le sable de N'goussa et le 4^{ème} degré pour les autres sables.

Les équations des différents sables s'écrivent :

$$\text{N'Goussa : } y = -0,007x^5 + 0,216x^4 - 2,293x^3 + 9,965x^2 - 14,468x + 88,450$$

$$\text{Hassi Sayah : } y = 0,036x^4 - 0,873x^3 + 6,374x^2 - 13,173x + 72,750$$

$$\text{In Salah : } y = 0,0317x^4 - 0,778x^3 + 5,583x^2 - 9,933x + 60,992$$

$$\text{Alia : } y = 0,048x^4 - 1,138x^3 + 7,806x^2 - 12,798x + 59,680$$

$$\text{Hassi Ben Abdellah : } y = 0,048x^4 - 1,145x^3 + 8,201x^2 - 17,826x + 74,588$$

VIII. 6. 2. Résultat d'approximation des rendements d'élimination de la DBO₅

Pour la DBO₅ nous avons procédé de la même façon que pour la DCO et nous avons trouvé les résultats présentés dans les tableaux VIII. 6, VIII. 7, VIII. 8, VIII. 9 et VIII. 10.

Résultats du sable de N'Goussa

Les polynômes d'approximation sont :

$$y = -0,440x^2 + 4,345x + 78,589$$

$$y = 0,069x^3 - 1,582x^2 + 9,616x + 72,646$$

$$y = 0,016x^4 - 0,275x^3 + 0,939x^2 + 2,726x + 78,020$$

$$y = -0,007x^5 + 0,216x^4 - 2,293x^3 + 9,965x^2 - 14,468x + 88,450$$

$$y = -0,001x^6 + 0,016x^5 - 0,076x^4 - 0,460x^3 + 4,162x^2 - 5,965x + 84,140$$

Tableau VIII. 6 : Estimation des paramètres DBO₅ du sable de N'Goussa

	Y _i	P 2 ^{ème} degré		P 3 ^{ème} degré		P 4 ^{ème} degré		P 5 ^{ème} degré		P 6 ^{ème} degré	
		Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε
1	82,00	82,49	-0,494	80,75	1,25	81,42	0,575	81,86	0,138	81,82	0,18
2	83,33	85,52	-2,186	86,10	-2,77	85,27	-1,942	84,25	-0,920	84,42	-1,09
3	90,91	87,67	3,242	89,12	1,79	88,48	2,427	88,56	2,354	88,40	2,50
4	88,57	88,93	-0,363	90,22	-1,65	90,34	-1,764	91,14	-2,567	91,05	-2,48
5	91,11	89,32	1,788	89,82	1,29	90,50	0,612	90,94	0,175	91,06	0,05
6	90,91	88,83	2,076	88,33	2,57	89,01	1,898	88,57	2,336	88,69	2,22
7	83,33	87,46	-4,131	86,18	-2,84	86,29	-2,955	85,49	-2,153	85,40	-2,06
8	83,64	85,22	-1,579	83,76	-0,12	83,12	0,514	83,05	0,587	82,90	0,74
9	81,82	82,09	-0,270	81,51	0,31	80,68	1,138	81,70	0,117	81,86	-0,05
10	80,00	78,08	1,918	79,83	0,17	80,50	-0,504	80,07	-0,066	80,02	-0,02
Coefficient de détermination R ²		0,724		0,812		0,836		0,861		0,861	
La somme des carrés		46,48		31,66		27,63		23,48		23,33	
La moyenne		0,000		0,000		0,000		0,000		0,001	
L'écart type		2,273		1,876		1,752		1,615		1,610	

Résultats du sable de Hassi Sayah

Les polynômes d'approximation sont :

$$y = -0,429x^2 + 5,028x + 70,359$$

$$y = -0,010x^3 - 0,263x^2 + 4,266x + 71,218$$

$$y = 0,027x^4 - 0,602x^3 + 4,069x^2 - 7,574x + 80,453$$

$$y = 0,005x^5 - 0,100x^4 + 0,679x^3 - 1,658x^2 + 3,337x + 73,834$$

$$y = -0,004x^6 + 0,145x^5 - 1,900x^4 + 11,972x^3 - 37,395x^2 + 55,707x + 47,292$$

Tableau VIII. 7 : Estimation des paramètres DBO₅ du sable de Hassi Sayah

	Y _i	P 2 ^{ème} degré		P 3 ^{ème} degré		P 4 ^{ème} degré		P 5 ^{ème} degré		P 6 ^{ème} degré	
		Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε
1	76,00	74,96	1,042	75,21	0,790	76,37	-0,373	76,10	-0,095	75,82	0,183
2	77,78	78,70	-0,923	78,62	-0,839	77,20	0,582	77,84	-0,066	78,86	-1,087
3	81,82	81,59	0,232	81,38	0,442	80,28	1,540	80,23	1,586	79,30	2,514
4	80,00	83,62	-3,615	83,43	-3,429	83,62	-3,623	83,11	-3,114	82,56	-2,557
5	86,67	84,79	1,879	84,72	1,951	85,88	0,789	85,60	1,067	86,34	0,324
6	89,09	85,10	3,989	85,17	3,917	86,34	2,754	86,61	2,476	87,36	1,734
7	83,33	84,56	-1,227	84,75	-1,413	84,94	-1,607	85,45	-2,116	84,89	-1,559
8	81,82	83,16	-1,343	83,37	-1,554	82,27	-0,456	82,32	-0,502	81,39	0,426
9	80,00	80,91	-0,906	80,99	-0,990	79,57	0,431	78,92	1,079	79,94	0,059
10	78,67	77,79	0,873	77,54	1,126	78,70	-0,037	78,98	-0,314	78,70	-0,034
Coefficient de détermination R ²		0,727		0,730		0,812		0,824		0,863	
La somme des carrés		39,4		39,09		27,16		25,49		19,8	
La moyenne		0,000		0,000		0,000		0,000		0,000	
L'écart type		2,092		2,084		1,737		1,683		1,483	

Résultats du sable de In Salah

Les polynômes d'approximation sont :

$$y = -0,514x^2 + 6,008x + 62,944$$

$$y = -0,037x^3 + 0,092x^2 + 3,215x + 66,093$$

$$y = 0,0001x^4 - 0,039x^3 + 0,107x^2 + 3,175x + 66,125$$

$$y = 0,023x^5 - 0,621x^4 + 6,209x^3 - 27,840x^2 + 56,411x + 33,831$$

$$y = -0,002x^6 + 0,086x^5 - 1,433x^4 + 11,302x^3 - 43,954x^2 + 80,025x + 21,863$$

Tableau VIII. 8 : Estimation des paramètres DBO₅ du sable de In Salah

	Y _i	P 2 ^{ème} degré		P 3 ^{ème} degré		P 4 ^{ème} degré		P 5 ^{ème} degré		P 6 ^{ème} degré	
		Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε
1	68,00	68,44	-0,439	69,36	-1,364	69,37	-1,368	68,01	-0,013	67,89	0,113
2	75,56	72,91	2,649	72,60	2,958	72,59	2,962	75,75	-0,199	76,22	-0,660
3	76,36	76,35	0,017	75,58	0,788	75,57	0,792	75,35	1,017	74,93	1,436
4	74,29	78,76	-4,474	78,08	-3,791	78,08	-3,792	75,59	-1,308	75,34	-1,057
5	77,78	80,15	-2,368	79,88	-2,104	79,89	-2,108	78,53	-0,753	78,87	-1,087
6	85,45	80,50	4,950	80,77	4,686	80,77	4,682	82,13	3,327	82,46	2,992
7	80,00	79,84	0,164	80,52	-0,519	80,52	-0,519	83,00	-3,004	82,75	-2,752
8	80,00	78,14	1,859	78,91	1,089	78,91	1,092	79,13	0,867	78,71	1,285
9	72,73	75,42	-2,691	75,73	-2,999	75,72	-2,994	72,56	0,168	73,02	-0,292
10	72,00	71,67	0,332	70,74	1,257	70,75	1,253	72,10	-0,102	71,98	0,024
Coefficient de détermination R ²		0,687		0,706		0,706		0,889		0,894	
La somme des carrés		68,17		64,01		64,01		24,23		23,07	
La moyenne		0,000		0,000		0,000		0,000		0,000	
L'écart type		2,752		2,667		2,667		1,641		1,601	

Résultats du sable de Alia

Les polynômes d'approximation sont :

$$y = -0,418x^2 + 4,945x + 67,384$$

$$y = -0,021x^3 - 0,077x^2 + 3,371x + 69,160$$

$$y = 0,021x^4 - 0,486x^3 + 3,330x^2 - 5,939x + 76,421$$

$$y = 0,0171x^5 - 0,448x^4 + 4,235x^3 - 17,788x^2 + 34,289x + 52,018$$

$$y = -0,006x^6 + 0,211x^5 - 2,936x^4 + 19,844x^3 - 67,179x^2 + 106,671x + 15,333$$

Tableau VIII. 9 : Estimation des paramètres DBO₅ du sable de Alia

	Y _i	P 2 ^{ème} degré		P 3 ^{ème} degré		P 4 ^{ème} degré		P 5 ^{ème} degré		P 6 ^{ème} degré	
		Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε
1	72,00	71,91	0,089	72,43	-0,433	73,35	-1,347	72,32	-0,323	71,94	0,062
2	77,78	75,60	2,175	75,43	2,349	74,31	3,466	76,70	1,077	78,11	-0,334
3	76,36	78,46	-2,093	78,02	-1,659	77,16	-0,795	76,99	-0,625	75,71	0,658
4	77,14	80,47	-3,332	80,09	-2,947	80,24	-3,099	78,37	-1,222	77,60	-0,453
5	82,22	81,66	0,566	81,51	0,715	82,42	-0,199	81,40	0,824	82,42	-0,202
6	85,45	82,00	3,452	82,15	3,303	83,07	2,389	84,09	1,366	85,12	0,339
7	83,33	81,51	1,822	81,90	1,437	82,05	1,285	83,93	-0,592	83,16	0,178
8	78,18	80,18	-2,002	80,62	-2,437	79,76	-1,573	79,93	-1,744	78,64	-0,461
9	76,36	78,02	-1,657	78,19	-1,830	77,08	-0,713	74,69	1,676	76,10	0,266
10	76,00	75,02	0,980	74,50	1,501	75,41	0,587	76,44	-0,437	76,05	-0,050
Coefficient de détermination R ²		0,701		0,711		0,761		0,917		0,992	
La somme des carrés		43,5		42,17		34,8		12,09		1,226	
La moyenne		0,000		0,000		0,000		0,000		0,000	
L'écart type		2,198		2,165		1,966		1,159		0,369	

Résultats du sable de Hassi Ben Abdellah

Les polynômes d'approximation sont :

$$y = -0,680x^2 + 7,220x + 65,421$$

$$y = -0,047x^3 + 0,089x^2 + 3,671x + 69,421$$

$$y = 0,0149x^4 - 0,374x^3 + 2,485x^2 - 2,877x + 74,529$$

$$y = 0,028x^5 - 0,750x^4 + 7,325x^3 - 31,953x^2 + 62,725x + 34,734$$

$$y = -0,004x^6 + 0,118x^5 - 1,904x^4 + 14,562x^3 - 54,849x^2 + 96,278x + 17,728$$

Tableau VIII. 10 : Estimation des paramètres DBO₅ du sable de Hassi Ben Abdellah

	Y _i	P 2 ^{ème} degré		P 3 ^{ème} degré		P 4 ^{ème} degré		P 5 ^{ème} degré		P 6 ^{ème} degré	
		Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε	Ŷ	ε
1	72,00	71,96	0,040	73,13	-1,135	73,78	-1,778	72,11	-0,108	71,93	0,070
2	80,00	77,14	2,861	76,75	3,253	75,96	4,039	79,86	0,143	80,51	-0,511
3	80,00	80,96	-0,957	79,98	0,022	79,37	0,629	79,09	0,907	78,50	1,502
4	77,14	83,42	-6,273	82,55	-5,405	82,66	-5,513	79,59	-2,451	79,24	-2,095
5	84,44	84,51	-0,069	84,18	0,267	84,82	-0,376	83,15	1,294	83,63	0,818
6	89,09	84,25	4,840	84,59	4,504	85,23	3,862	86,90	2,192	87,37	1,716
7	83,33	82,63	0,706	83,50	-0,162	83,60	-0,269	86,66	-3,330	86,31	-2,973
8	81,82	79,64	2,174	80,62	1,195	80,02	1,802	80,29	1,523	79,70	2,119
9	70,91	75,30	-4,392	75,69	-4,783	74,91	-3,997	71,01	-0,102	71,66	-0,755
10	70,67	69,60	1,070	68,42	2,245	69,06	1,602	70,73	-0,068	70,55	0,112
Coefficient de détermination R ²			0,719		0,739		0,749		0,923		0,930
La somme des carrés			97,54		90,82		87,17		26,77		24,43
La moyenne			0,000		0,000		0,000		0,000		0,000
L'écart type			3,292		3,177		3,112		1,725		1,648

Les résultats d'approximation des données de la DBO₅ ressemblent beaucoup aux résultats d'approximation des données de la DCO avec, cependant, quelques différences. Une bonne corrélation de tous les polynômes avec les données expérimentales est constaté et les résidus de tous les polynômes suivent une loi normale ; à l'exception des polynômes de 6^{ème} degré du sable de N'goussa, la moyenne des ε_i = 0 présentent une moyenne des résidus qui tend vers 0 (tableau IX. 6).

A partir du polynôme de 4^{ème} degré ($R > 0.8$), des valeurs tout à fait satisfaisantes des coefficients de détermination sont obtenues ; cependant légèrement inférieures à celles observées pour les valeurs de la DCO pour certains sables

D'après ces résultats, le polynôme optimum d'approximation est celui de 5^{ème} degré pour tous les sables, à l'exception du sable de Hassi Sayah qui présente un optimum pour un polynôme du 4^{ème} degré.

Les équations des différents sable s'écrit :

$$\text{N'Goussa : } y = -0,007x^5 + 0,216x^4 - 2,293x^3 + 9,965x^2 - 14,468x + 88,450$$

$$\text{Hassi Sayah : } y = 0,027x^4 - 0,602x^3 + 4,069x^2 - 7,574x + 80,453$$

$$\text{In Salah : } y = 0,023x^5 - 0,621x^4 + 6,209x^3 - 27,840x^2 + 56,411x + 33,831$$

$$\text{Alia : } y = 0,0171x^5 - 0,448x^4 + 4,235x^3 - 17,788x^2 + 34,289x + 52,018$$

$$\text{Hassi Ben Abdellah : } y = 0,028x^5 - 0,750x^4 + 7,325x^3 - 31,953x^2 + 62,725x + 34,734$$

VIII. 7. Conclusion

Cette partie a permis de faire de premiers essais de modélisation ; les polynômes obtenus par approximation au sens des moindres carrés nous a donné une bonne idée sur l'évolution du rendement d'élimination de la DCO ou de la DBO₅ pour les cinq sables étudié et nous avons procédé au choix du polynôme optimum. Les degrés des polynômes choisis varient entre 4 et 5 ; la bonne adéquation de cette approximation est bien démontrée par leurs paramètres déterminés.

Nous avons commencé nos calculs par le point 1, car la première semaine de fonctionnement correspond à la phase de maturation caractérisée par une augmentation rapide du rendement durant les 3 à 5 premiers jours de fonctionnement. Un important travail expérimental reste à réaliser, afin de réduire cette phase de maturation, si possible pour arriver à la réduire à seulement une journée.

La deuxième phase est la phase de bon fonctionnement, qui s'étale de la fin de la première semaine jusqu'à 9 à 10 semaines, ce qui correspond au temps de travail normal des filtres, qui est de l'ordre 64 jours [4]. Nous constatons ensuite une chute des rendements ; le début de crevasance des filtres qui correspond à la fin de vie des filtres.

[CONCLUSION]

CONCLUSION

Au terme de notre étude, nous pouvons faire ressortir les constatations suivantes :

D'après les enquêtes sur terrain et l'analyse cartographique ; le Sahara septentrional représente un grand gisement en sable de dunes dont les différences ont été explorées à travers l'analyse physico-chimique de 21 sables. Nous avons montré qu'au vu de l'analyse granulométrique, il y a 3 catégories de sable : le sable grossier, représenté par Still, Djamaa et Hassi Sayah SG ; le sable fin, représenté par Hassi Guenifida, M'Nagueur, Taibet, Benaceur et In Salah ; les autres sables sont considérés comme sables moyen.. Leurs caractéristiques montrent qu'il y a des différences remarquables de certains paramètres mais elles sont proches aux caractéristiques des sables testés comme support filtrant pour le traitement des eaux usées.

L'efficacité de la filtration biologique sur sable de dunes de la région de N'Goussa s'est révélée être très intéressante au vu des résultats obtenus durant les 72 jours de fonctionnement, ainsi que des rendements promoteurs en terme d'abattement de la DCO supérieur à 80% et supérieur à 85% pour la DBO₅ après maturation.

A titre comparatif, en plus de la carrière de N'Goussa, 5 autres carrières de sables ont été testées comme support filtrant. Bien que celles-ci ont conduit à de bons résultats en termes d'efficacité (des rendements d'abattelements de la DCO et de la DBO₅ dépassants les 60% durant la phase de bon fonctionnement), celle de N'Goussa est la meilleure. En conséquence, l'utilisation des sables de dune permet de résoudre le problème des eaux usées des petits villages et les équipements isolés, sans avoir recours à des techniques très coûteuses et qui nécessitent des moyens de gestion plus importants.

Les filtres à sables se colmatent au fur et à mesure du fonctionnement. L'étude du colmatage nous a amené à évaluer la densité apparente pour chaque couche du filtre de la colonne de filtration en considérant que la densité réelle est constante. Nous avons ainsi constaté qu'on a trois types de colmatage à savoir le colmatage mécanique due à l'action du poids du sable et de l'écoulement de l'eau, le colmatage organique due au dépôt de la matière organique et le colmatage physique qui est provoqué par le dépôt des MES. Nous sommes arrivés à déterminer le colmatage total en mesurant la porosité de chaque couche et le colmatage mécanique en mesurant la porosité après fonctionnement en utilisant l'eau de robinet ; enfin, le colmatage organique est déterminé en fonction de la DCO et de la DBO₅.

D'un point de vue bactériologique, le dénombrement des différents groupes de micro-organismes montre une diminution de leur nombre, cette diminution variant suivant la catégorie de germes considérée ; Le rendement épuratoire de l'élimination des germes totaux dépasse les 99,55% et une élimination totale est observée pour les deux eaux filtrées. Pour les streptocoques totaux et fécaux, une élimination totale est également observée pour les deux filtres.

La recherche du modèle régissant le phénomène de la filtration biologique, repose sur la maîtrise des différents processus d'une part, et la connaissance des paramètres qui ont un impact sur le phénomène. Cette relation est d'autant complexe que le nombre de paramètres est important.

L'établissement ou le développement d'un modèle mathématique, nécessite une bonne maîtrise des différents aspects et paramètres de la filtration afin d'émettre et de formuler les différentes hypothèses de base adaptées et adéquates. Dans ce contexte, et à travers nos résultats, nous pouvons dire que la granulométrie représente le paramètre qui peut être considéré comme le cœur du modèle.

Au terme de ce travail, certaines perspectives peuvent être envisagées telles que :

- L'étude de l'effet spécifique de chaque paramètre physico-chimique et bactériologique sur le rendement épuratoire.
- Affiner l'étude de la filtration sur les sables les plus intéressants investis ou non dans notre travail.
- Compléter la chaîne de traitement en termes de désinfection pour éliminer d'avantage les germes restants après filtration et évaluer les possibilités de réutilisation des eaux épurées pour des applications telles que l'irrigation. Ceci peut être concrétisé par la confection d'un site expérimental hors laboratoire.
- Approfondir l'étude de la modélisation de cette filière de traitement des eaux usées pour son optimisation..

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [01] **Bouziani. M**, L'eau de la pénurie aux maladies, Edition Ibn-Khaldoun (2000)
- [02] **Rejsek. F**, Analyse des eaux aspects réglementaires et techniques, Edition Centre régional de documentation pédagogique d'aquitaine France (2002)
- [03] **Satin. M et Selmi. B**, Guide technique de l'assainissement, Edition le Moniteur Paris (1999)
- [04] **Gougoussis. C**, Assainissement individuel et aptitude des sols a l'élimination et a l'épuration des effluents domestiques, Edition Institut national polytechnique de lorraine (1979)
- [05] **Lienard. A et Racault. Y**, Hydraulique générale, Edition Eyrolles Paris (2003)
- [06] **Ould Baba Sy. M**, Recharge et paleorecharge du système aquifère du Sahara septentrional, Thèse de Doctorat (200 né&5).
- [07] **Tabouche. N et Achour. S**, Étude de la qualité des eaux souterraines de la région orientale du Sahara septentrional algérien, Edition CRSTRA (2004).
- [08] **Ouali. S** . Etude géothermique du sud de l'Algérie, thèse de magister, université de Boumerdes (2004-2005)
- [9] **Khadraoui. A** ; Gestion des ressources en eau souterraines au Sahara Algérien SEMINAIRE INTERNATIONAL SUR L'EAU Pour une gestion rationnelle ovembre 2006
- [10] **Le Houerou H.N.**, (1990): Définition et limites bioclimatiques du Sahara. sècheresse, 1 (4) .pp. 246-259.
- [11] **Le Lubre M.**, 1952. Conditions structurales et formes de relief dans le Sahara. Ed: Inst. Rech. Saha., Alger, Tome VIII. pp.189 -190.
- [12] **Wulf. A et Dalion. P**, Les pollueurs de nos cours d'eau et de nos milieux aquatiques sont-ils les payeurs ?, Annales des Mines - Responsabilité et environnement 2009/2 (N° 54), (2009).
- [13] **Ayral. C**, Elimination de polluants aromatiques par oxydation catalytique sur charbon actif ; thèse de doctorat, université de Toulouse (2009)
- [14] **Rodriguez-Gracia. A** ; Etude de la congélation comme technique de traitement des eaux : Application spécifiques, Institut national des sciences appliquées de Toulouse. (2004)
- [15] **Shi. H. C**; Industrial wastewater type Amount and effect; point sources of pollution lolcal effects control - Voll; Encyclopedia of life support systems.
- [16] **Grosclaude. G**. L'eau. Tome 2 Usages et polluants. INRA, (1999)
- [17] **Ongley. E. D** ; Control of pollution from agricultur; FAO Agricultur and drainage ; paper 55; Rome (1996)
- [18] **Ramade. F** ; Dictionnaire encyclopédie des sciences de l'eau, édiscience internationale, Paris, (1998).
- [19] **Salghi. R** ; Différents filière de traitement des eaux ; Université Ibn Zohr, Ecole Nationale des Sciences Appliquées d'Agadir, (1999)

- [20] **Leroy. J. B** ; La pollution des eaux ; Paris : Presses universitaires de France, (1992)
- [21] **Rodier. J**, analyse de l'eau, Edition Doin (1996)
- [22] **Manole-Creanca. C** , Procédé AD-OX d'élimination de polluants organiques non biodégradables (par adsorption puis oxydation catalytique), Thèse de doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse, France, (2007)
- [23] **Dégremont**, Mémento technique de l'eau, Edition de cinquanteenaire (1989)
- [24] **Haslay. C., Leclerc. H.**, Microbiologie des eaux d'alimentation. Editions Lavoisier Tec et Doc, Paris, 1993, 495 p
- [25] **Figarella J, Leyral G, Terret M**, *Microbiologie Générale et Appliquée*. Edit. Jacques Lanore, (2004).
- [26] **Salvato , J. A., Nemerow, N. and Agardy, F**, "Environmental Engineering", John Wiley and Sons, Inc. New Jersey, USA (2003)
- [27] **Joffin J.N., Leyral G.** (2001) Microbiologie technique 1 dictionnaire des techniques. 3e éd. Biologie technique, (2001)
- [28] <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX:31991L0271>
DIRECTIVE DU CONSEIL du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux urbaines résiduaires (9 1 /27 1 /CEE)
- [29] **Corsin. P et Le Strat. P. :** Les effluents des stations d'épuration : comment les rendre aptes à une seconde vie, L'EAU, L'INDUSTRIE, LES NUISANCES - N° 299, (2007)
- [30] **Baumont. S**, Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France, École nationale supérieure agronomique de Toulouse (ENSAT)
- [31] <http://www.legifrance.gouv.fr>, **Arrêté du 2 août 2010 relatif à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts,**
- [32] **Aurélien. D, Graillet. D, Bourgois. J, Tardy. A** ; Outil d'aide au choix de procédés d'épuration des eaux usées en milieu isolé. Colloque Eau, Déchets et Développement Durable, Mar 2010, Alexandrie, Egypt. pp.61-67, 2010
- [33] **Dhaouadi. H** ; Traitement des Eaux Usées Urbaines : Les procédés biologiques d'épuration ; Université Virtuelle de Tunis (2008)
- [34] **Alcaraz Gonzalez. V** ; Estimation et commande robuste non-linéaires des procédés biologique de dépollution des eaux usées : application à la digestion anaérobie ; thèse de doctorat de l'université de Perpignan,(2001)
- [35] **Metcalf et Eddy.**: Wastewater engineering : treatment and reuse. 4^e éd., McGraw-Hill Inc., New-York, (2003).
- [36] **Kenealy A.** "The Cholera in Hamburg." The Congress of Women: The Woman's Building, World's. Columbian Exposition. Chicago, U. S. A., 1893. Mary Kavanaugh Oldham Eagle, (ed). Monarch Book Company; 354-358. (1894)
- [37] **Huisman, L.; Wood, W.E.** (1974): Slow Sand Filtration. WHO, Geneva
- [38] **Bellamy, W.D. et al.**: Removing Giardiacysts with slow sand filtration. Journal AWWA 77:52–60 (1985)
- [39] **Ipperger. S, WALTER Gösele. W, and Alt. C** ; Filtration, 1. Fundamentals: Encyclopedia of industrial chemistry; ULLMANN'S (2009)

- [40] **Koller. E**, Aide-mémoire Génie chimique, 3ème édition (2009)
- [41] **Coulomb. R.** : Hydraulique urbaine, Edition Eyrolles Paris (1989)
- [42] **Jegatheesan. V and Vigneswaran. S**; Deep Bed Filtration: Mathematical Models and Observations; Critical Reviews in Environmental Science and Technology, (2005)
- [43] **Disjardind. R**, Le traitement des eaux, Edition de l'école polytechnique de Montréal (1997)
- [44] **Bear. J**, Hydraulic of groundwater, Mc Grew-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, New-York, (1979).
- [45] **Chaudhary. D. S, Vigneswaran. S, Ngo. H. H, Shim.W. G and Moon. H**; Biofilter in Water and Wastewater Treatment; Korean J. Chem. Eng.,20(6), (2003)
- [46] **Visscher. J. T** ; Slow sand filtration: Design, operation and maintenance; Journal AWWA (1990)
- [47] **Maiga A. H.** ; Filtration lente sur sable. Rapport de recherche-développement. (E.P.F.L.) (octobre 1983)
- [48] **Huisman L. et W.E. Wood. W. E**; Slow sand filtration. World Health Organization, Geneva (1974)
- [49] **De Marsily. G**, Hydrogéologie : comprendre et estimer les écoulements souterrains et le transport des polluants, Edition Ecole de mines de Paris (1994)
- [50] **Migniot. C**, Etude des sédiments pélitiques, -F.D.E.S. Ministère de l'Industrie et L.C.H.F. (1963).
- [51] **Baize. D**, Guide des analyses en pédologie, Edition INRA éditions paris (2000)
- [52] **Castany. G**, Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Edition Bordas Paris (1982)
- [53] **Bourke. N, Carty. G, Crowe. M , and Lambert. M** ; Water treatment manuals filtration. Environmental Protection Agency Ardavan, Wexford , Ireland. (1995)
- [54] **Disa-Disa. P, Culot.M, Lobo. J, Kalala.A. I, Kawita. C. H, Ekoko. G et Mulaji. C**; Traitement des eaux de consommation par filtration lente sur sable à plusieurs étapes ; Revue des Sciences de l'Eau 27(3) (2014)
- [55] **Ball. L H, Bernier. B, Chenier. R, Dix. S P, Dumoulin. P P, Otis. R J, Tchobanoglous. G**, Les épandages souterrains et les filtres intermittents dans les installations septiques communautaires ; Gouvernement du Québec Ministère de l'Environnement et de la Faune (1996)
- [56] **Musy. A et Soutter. M**, Physique du sol, Presse polytechnique et universitaires romandes (1991)
- [57] **Hénin. S**, cours de physique d'udes sols ; ORSTOM EDITEST Volume I (1976)
- [58] **Bonneau. M**, Constituants et propriétés du sol, Masson Paris (1994)
- [59] **Mathieu. C**, Analyse physique des sols, Edition Lavoisier (1996)
- [60] **Bowles. J E**, Physical and geotechnical proprieties of soils, McGraw-Hill Singapore (1989)
- [61] **Lancastre. A**, Hydraulique générale, Edition Eyrolles Paris (1996)
- [62] **Guy. A**, Méthodes d'analyse des sols, Edition centre régional de documentation pédagogique de Marseille (1978)

- [63] **Chneebeli. G**, Hydraulique souterraine, Edition Eyrolles Paris (1987)
- [64] **AFES, 1995** – Référentiel pédologique. INRA Editions
- [65] **Servant. J** ; Contribution à l'étude pédologique des sols halomorphe ; thèse de doctorat d'état Montpellier France (1975)
- [66] **Ouahes, R. & Dévallez, B. (1998)**. Chimie générale. Paris: Publisud. 1982
- [67] **Balesdent. J** ; Un point sur l'évolution des réserves organique des sols en France. Etude et gestion des sols, 3 ; 4 (1996)
- [68] **Besnard. E, Chenu. C, Balesdent. J, Pugel. P et Arrouays. D** ; Fate of particle organic matter in soil aggregates during cultivation .Eur. J. Soil Sci, 47 (1996)
- [69] **OMS** ; Guide pratique pour l'eau et l'assainissement rurale et suburbain ; Copenhague (1984)
- [70] **Franceys. R, Pickford. J et Reed. R** ; Guide de l'assainissement individuel ; Water, Engineering and Development Centre Loughborough University of Technology Loughborough, Angleterre; Organisation mondiale de la Santé Genève 1995
- [71] **JAMICS PKKPI.KS AND KARKN MANCL**, Metcalf & Eddy, Inc., Laboratory Scale Septic Tanks1 ; OHIO J SCI 98 (4/5): 75-79, (1998)
- [72]**State of Kansas Department of health and environment**; Minimum standards for design and construction of onsite wastewater systems: Bultin 4-2 March 1997
- [73] www.nj.gov/dep/dwq/nonpoint.htm ; A HOMEOWNER'S Guide to septic systems; EPA (2002)
- [74] **Alexandre. O, Boutin. C, Duchène. P, Lagrange. C, Lakel. A, Liénard. A et Ordit. D** ; Filières d'épuration adaptées aux petites collectivités ; Document technique FNDAE 22 Cemagef édition ; Antony (1998)
- [75] **Corea E. J. H**; Appropriate Disposal of Sewage in Urban and Suburban Sri Lanka. Ph.D.Thesis, School of Civil Engineering, University of Leeds, (2001)
- [76] **Nsavyimana. G** ; Modélisation des processus physiques et biologique dans des fosses septiques et voies de valorisation des boues de vidange : Application à Bujumbura (Burundi) ; thèse de doctorat, Université de Liège (2014/2015)
- [77] www.developpement-durable.gouv.fr; Assainissement non collectif. Guide d'information sur les installations, Outil d'aide au choix. Ministère de l'écologie, du Développement durable et de l'énergie (2012)
- [78] **Normalisation française** ; mise en œuvre des dispositifs d'assainissement autonome ; AFNOR ; (1992)
- [79] **Abissy. N et Mandi. L** ; Utilisation des plantes aquatique enracinées pour le traitement des eaux usées urbaines : cas du roseau ;Revue des sciences de l'eau, Rev. Sci. Eau (1999)
- [80] **Tzanakakis. V E, Paranychianakis. N. V and Angelakis. A. N** ; Performance of slow rate systems for treatment of domestic wastewater Water Science & Technology Vol 55 No 1–2 pp 139–147 Q IWA Publishing (2007).
- [81] **M.G. Healy_, M. Rodgers, J. Mulqueen** ; Performance of a stratified sand filter in removal of chemical oxygen demand, total suspended solids and ammonia nitrogen from high-strength wastewaters ; Journal of Environmental Management 83, 409–415. (2007)

- [82] **Hendricks. D, Barrett. J. M, Bryak. J, Collins. B. A, Logsdon. G. S** ; Manuel of design for slow sand filtration; AWWWA ; Research Foundation (1991)
- [83] **United States Environmental Protection Agency**; Wastewater Technology Fact Sheet Intermittent Sand Filters; EPA (1999)
- [84] **Rodgers. M, Zhan. X, O'Reilly. E**; Small-scale domestic wastewater treatment using an alternating pumped sequencing batch biofilm reactor system; Bioprocess Biosyst Eng (2006)
- [85] **Walsh. G, Rodgers. M, Healy. M** ; Different depth sand filters for laboratory treatment of synthetic wastewater with concentrations close to measured septic tank effluent; <http://dx.doi.org/10.1080/10934529.2011.526907> (2011)
- [86] **Nur. M, Ken. E** ; Optimization of slow sand filtration, 22nd WEDC Conference Reaching The Unreached: Challenges For 21st Century, New Delhi, India (1996)
- [87] **Djedidi. N, Hassen. A** ; Propriété physiques des sols et pouvoir colmatant des eaux usées en fonction de leur degré de traitement, Cah. ORSTOM, Sér. Pédo. vol XXVI, (1991) 3-10
- [88] **Laurent. P, Prévost. M, Cigana. J, Niquette. P and Servais. P** ; Biodegradable organic matter removal in biological filter, Wat. Res. vol. 33, (1999) 1387-1398
- [89] **Gnagne. T**, Etude des limites de l'épuration par infiltration sur sables des eaux usées fortement chargées en matière oxydables de l'abattoir de Ouagadougou au Burkina Faso, Sud sciences et technologie, vol.9, (2002) 34-41
- [90] **Jimenez. B, Chavez A, Leyva. A and Tchobanoglous. G** ; Sand and synthetic medium filtration of advanced primary treatment effluent from Mexico City, Wat. Res. Vol. 34 N°2, (2000) 473-480
- [91] **Lakel. A**, 1998, Hydrodynamique d'un filtre biologique en système insaturé avec nitrification d'un effluent septique, Wat. Res. Vol. 32, 3157-3167
- [92] **Van Cuyk. S, Siegrist. R, Logan. A, Masson. S, Fisher. E and L. Figueroa. L**; Hydraulic and purification behaviors and their interactions during wastewater treatment in soil infiltration systems, Wat. Res. Vol. 35, (2001) 953-964
- [93] **Rodgers. M, J. Mulqueen, and M. G. Healy**; Surface clogging in an intermittent stratified sand filter, Soil. Sci. Soc. Am, Vol. 68, (2004) 1827-1832
- [94] **Dabin. B, J.C. Brion. J. C**; Application des dosages automatique à l'analyse des sols ; *Cah. ORS. T O. M. série Pédologie Vol. V N° 3 – (1967)*
- [95] **Blumenthal. U. J, Mara. D. D, Peasey. A, Ruiz-Palacios. G, Stott. R**; Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture: recommendations for revising WHO guidelines Bulletin of the World Health Organization, (2000)
- [96] **Goncalvés da Silva. E** ; Méthodes et Analyse Numériques. Ecole d'ingénieur. Institut Polytechnique de Grenoble (2007)
- [97] **Najim. K, Muratet. G** ; Pratique de la régulation numérique des processus industriels ; Editions Masson, Paris, 1983.
- [98] **Ljung. L**; System identification : theory for the user. Prentice Hall, (1999)
- [99] **Oussar. Y, Dreyfus. G** ; How to Be a Gray Box: The Art of Dynamic Semi-Physical Modeling. Neural Networks, Elsevier, 14 (1) (2001)

- [100] **Oussar. Y** ; Réseaux d'ondelettes et réseaux de neurones pour la modélisation statique et dynamique de processus ; Thèse de Doctorat de l'université Pierre et Marie Curie ; (1998)
- [101] **Jedrzejewski. F** ; Introduction aux méthodes numériques Deuxième édition ; Springer-Verlag France, Paris (2005)
- [102] **Dantal. Y ; Rondeau.M** ; Librairie Algorithmique Soluscience ; (2003)
- [103] **Benoit. C**, Analyse de données en sciences expérimentale, DUNOD, Paris (2012)
- [104] **Roumchiski. L. Z**, Traitement mathématique des résultats expérimentaux Nouka, Moscou, (1977)
- [105] **Platel. F** ; Détermination du polynôme des moindres carrés par une méthode algébrique. www.metgen.org
- [106] **Antille. G, Weinsberg. A. A**; D-optimal design for regression : Choice of degree and robustness; Atelier Russie-Suisse sur Econométrie et statistique (2007).