



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
University Abdel Hamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologies
DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCÉDES

N° d'ordre:
M2 /GPE/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des Procédés

Option: Génie des Procédés de l'Environnement

Thème

Biofiltration des eaux usées sur support inorganique.

Présenté par :

1. BOUGOBBA OMAR ISMAIL

Soutenue le : 07/07/ 2022 devant le jury composé de :

Président : Dr D. MEKHATRIA	MCB	Université de Mostaganem
Examineur : Mme Z. FARES	MAA	Université de Mostaganem
Encadrant: Mme M. KHELLADI.M	MAA	Université de Mostaganem

Année Universités 2021/2022

Remerciements

Merci à ALLAH le tout puissant pour m'avoir toujours guidé dans mes choix afin de savoir classer mes priorités et qui m'a armé de courage pour achever mes études.

*J'adresse mes remerciements aux membres du jury pour avoir bien voulu examiner et juger ce travail en l'occurrence **Mme Z. FARES**, présidente du jury et **Dr D. MEKHATRIA** examinateur.*

Mes remerciements les plus sincères vont à tous mes enseignants de la faculté FST ainsi que le personnel de la faculté et toute la promotion M2 Génie des Procédés 2021-2022.

Je vous remercie tous pour cette année et un grand merci à tous ce qui m'ont aidé de près ou de loin.

*Je tiens aussi à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrante **Mme M. Khelladi**, Je la remercie pour ses conseils, sa patience et ses orientations scientifiques qui ont été un apport pour moi durant la réalisation de ce projet.*

Enfin, J'adresse mes remerciements les plus sincères à ma famille, et de manière particulière, à mes chers parents pour les soutiens moraux, l'aide et les prières.

Je tiens à remercier aussi tous ceux qui nous ont honorés en assistant à notre soutenance.

Pour tous ceux qui n'ont pas été cités ...Merci !

ملخص

المياه العادمة غنية جدًا بالمواد العضوية الناتجة عن الأنشطة البشرية.

إن إطلاقها في البيئة الطبيعية دون علاج مناسب له عواقب وخيمة على البيئة والصحة. لهذا ، تم النظر في العديد من طرق المعالجة. من بين هذه العمليات ، هناك ترشيح حيوي ، مستوحى من التنقية الطبيعية لمياه الصرف الصحي.

يعتمد مبدأ الترشيح البيولوجي على تحلل المواد العضوية الملوثة بواسطة الكائنات الحية الدقيقة التي تلتصق وفقًا لوقت المكوث ، على دعامة قد تكون عضوية أو غير عضوية. المادة المختارة لهذه الدراسة هي البوزولان من وديعة بوحميدي بنصاف. إنها مادة محلية وطبيعية وغير مكلفة وتوجد بكثرة.

أظهرت التحليلات الفيزيائية الخصائص المختلفة للبوزولان ؛ خفته وانضغاطه ومساميته مما يسمح بتثبيت الكائنات الحية الدقيقة. وجد أن حجم حبيبات المادة يلعب دورًا مهمًا في ترشيح السائل.

لتحسين عملية الترشيح البيولوجي ، تم أخذ المعلمات في الاعتبار للنمذجة. أظهر الأخير أن عامل الطلب الأوكسجيني البيولوجي (الطلب الكيميائي الحيوي على الأكسجين) كان العامل المهم.

الكلمات المفتاحية: الترشيح البيولوجي ، الكائنات الحية الدقيقة ، البوزولان ، الطلب على الأكسجين البيوكيميائي ، العلاج.

Summary

Wastewater is very rich in organic matter resulting from anthropogenic activities.

Their release into the natural environment without adequate treatment has severe consequences in terms of the environment and health. For this, several processing methods have been considered. Among these processes, there is biofiltration, which is inspired by the natural purification of wastewater.

The principle of biofiltration is based on the degradation of polluting organic matter by microorganisms which adhere according to a residence time, on a support which may be organic or inorganic. The material chosen for this study is pozzolan from the Bouhamidi-Benisaf deposit. It is a local, natural, inexpensive material and is found in abundance.

Physical analyzes have shown the different characteristics of pozzolan; its lightness, its compactness, and its porosity which allows the fixation of microorganisms. The grain size of the material is found to play an important role in liquid filtration.

To optimize the biofiltration process, parameters were taken into consideration for the modeling. The latter showed that the BOD factor (biochemical oxygen demand) was the significant factor.

Keywords: biofiltration, microorganisms, pozzolan, biochemical oxygen demand, treatment.

Résumé

Les eaux usées sont très riches en matière organique issues des activités anthropiques.

Leur rejet dans le milieu naturel sans traitement adéquat provoque des conséquences sévères sur le plan environnement et santé. Pour cela plusieurs procédés de traitement ont été envisagés. Parmi ces procédés, il y a la biofiltration qui s'inspire de l'épuration naturelle des eaux usées.

Le principe de la biofiltration repose sur la dégradation des matières organiques polluantes par les microorganismes qui s'adhèrent selon un temps de séjour, sur un support qui peut être organique ou inorganique. Le matériau choisi pour cette étude est la pouzzolane en provenance du gisement de Bouhamidi- Benisaf. C'est un matériau local, naturel, non couteux et se trouve en abondance.

Des analyses physiques ont montré les différentes caractéristiques de la pouzzolane ; sa légèreté, sa compacité, et sa porosité qui permet la fixation des microorganismes. Les dimensions des grains du matériau s'avèrent jouent un rôle important dans la filtration du liquide.

Pour optimiser le procédé de biofiltration des paramètres ont été pris en considération pour la modélisation. Cette dernière a montré que le facteur DBO (demande biochimique en oxygène) était le facteur significatif.

Mots clés : biofiltration, microorganismes, pouzzolane, demande biochimique en oxygène, traitement

Sommaire

Remerciements

Résumé

Introduction générale.....	09
-----------------------------------	-----------

CHAPITRE I

I.1 Les eaux usées.....	12
I.1.1 Définition des eaux usées.....	12
I.1.2 Origine des eaux usées.....	12
I.2 Différents procédés de traitement	13
I.2.1 Traitement par boues activées.....	13
I.2.2 Traitement par lagunage.....	14
a- Les lagunes anaérobies	15
b- Les lagunes facultatives.....	15
c- Les lagunes aérobies.....	15
d- Lagune à haut rendement.....	15
I.2.3 Traitement par culture fixée.....	15
I.3 La pouzzolane	21
I.3.1 Définition	21
I.3.2 Origine du nom pouzzolane	21
I.3.3 Types de pouzzolane.....	21
I.3.4 Caractéristiques de la pouzzolane.....	22
I.4 Optimisation par plan d'expérience	22
I.4.1 Introduction.....	22
I.4.2 Généralités sur la méthode des plans d'expériences.....	23
I.4.3 Modélisation	25
I.4.4 Types des plans d'expériences.....	25
I.4.5 Plans factoriels complets 2^k	26

CHAPITRE II

II.1 Choix du support.....	28
II.2 Origine et caractéristiques.....	28
II.3.1 Coefficient d'uniformité (CU) ou coefficient de HAZEN	30
II.3.2 Le coefficient de classement	30

II.3.3 Détermination des caractéristiques physiques du matériau	31
II.3.3.1 Masse volumique ρ	31
II.3.3.2 La masse volumique apparente	31
II.3.3.3 La masse volumique absolue.....	31
II.3.3.4 Porosité du matériau ϕ (en pourcentage).....	32
II.3.3.5 La porosité du lit ϕ_l	32
II.3.3.6 Densité apparente δ_a	33
II.3.3.7 Densité relative de la pouzzolane δ_r	33
II.3.3.8 Indice de vide (e).....	33
II.3.3.9 Capacité d'absorption d'eau (Cab).....	33
II.3.3.10 Compacité.....	34

CHAPITRE III

III.1 Résultat et interprétation de l'étude physique de la pouzzolane	36
III.1.1 Tracé de la courbe granulométrique.....	36
III.1.2 Calcul des coefficients de HAZAN et de classement ou de courbure.....	37
III.1.3 Résultats de l'analyse physique de la pouzzolane.....	38
III.2 Optimisation des paramètres de traitement	39
III.2.1 Facteurs étudiés et domaines de variation.....	39
III.2.2 Plan d'expérimentation et résultats expérimentaux	41
III.2.3 Analyse statistique des résultats	41
III.2.4 Temps de rétention hydraulique(HRT)	45

Liste des figures

Chapitre I

Fig. I. 1 : Traitement par boues activées	14
Fig. I. 2: Traitement des eaux usées par un lagunage naturel	14
Fig. I. 3 : Traitement des eaux usées à travers un lit bactérien	16
Fig. I. 4 : Synoptique d'une STEP à disque biologique	19
Fig. I. 5 : Domaine de variation du facteur.....	23
Fig. I.6 : Effet d'un facteur.....	24
Fig. I.7 : L'ensemble des réponses qui correspondent à tous les points du domaine d'étude forme la surface de réponse.	25

Chapitre II

Fig. II. 1 : Tamis à différents diamètre	28
Fig. II. 2: Série de tamis avec vibreur	29
Fig. II. 3 : pouzzolane à différents diamètres après tamisage	30
Fig. II. 4 : Schéma du biofiltre	35

Chapitre III

Fig. III. 1: Tracé de la courbe granulométrique	37
Fig. III. 2: Diagramme de Pareto des effets	41
Fig. III. 3 : Graphique des effets principaux	43
Fig. III. 4: Graphique de contour % (DBO et Q)	44
Fig. III. 5: optimisation des résultats	44
Fig. III. 6 : Diagramme de Pareto des effets (HRT)	45
Fig. III. 7 : Graphique des effets principaux pour HRT	47
Fig. III. 8 : Graphique de contour HRT (DBO et Q)	48
Fig. III. 9 : Optimisation des résultats	48

Liste des tableaux

Tableau III. 1 : Tableau récapitulatif des résultats de masses et volumes	38
Tableau III. 2: Résultat de l'analyse physique de la pouzzolane	38
Tableau III. 3: Domaine des paramètres étudiés avec les niveaux minimums et maximums	40
Tableau III. 4: Matrice des expériences du plan factoriel complet	41
Tableau III. 5 : Résultat de la variance ANOVA pour (Q)	42
Tableau III. 6: Résultat de la variance ANOVA pour la DBO	43

Liste des Abréviations

C° : Degré Celsius.

DBO : Demande Biochimique en Oxygène (mg/l).

DCO : Demande Chimique en Oxygène (mg/l).

MES : Matière En Suspension (mg/l).

T : Température (°C).

pH : Potentiel Hydrogène.

me : masse d'eau (g).

ms : masse du de matériau sec (g).

mes : masse du mélange d'eau et de matériau (g).

ξ : La porosité totale ou géométrique.

V_T : Volume totale des vides (matériau sec) (m³).

V_s : Volumes des solides (m³).

V_v : Volume des vides (m³).

ρ_s : La masse volumique absolue (kg/m³).

Y_s : La densité relative.

Ab : Coefficient d'absorption (%).

e : indice de vide

D_E : La taille effective (mm).

D₆₀ : diamètre de la maille du tamis retenant 60 % de la masse.

Q : Débit (l/h).

Introduction

Les procédés utilisant des cultures libres (les filières boues activées et lagunage aéré) présentent d'excellents rendements d'épuration. Cependant, les couts d'investissement et de fonctionnement qu'ils génèrent ne sont supportables ni économiquement, ni techniquement.

Les procédés à cultures fixées sur support grossiers présentent également des couts importants (aération active du massif, gestion des boues après clarification).

Les procédés d'épuration par cultures fixées sur support fins sont des procédés reproduisant les propriétés épuratoires des sols. Leur spécificité réside dans l'absence de production de boues. Ces techniques consistent à infiltrer les effluents dans des massifs de différents matériaux qui servent de support de la biomasse épuratrice.

Le support de l'épuration est un matériau granulaire. Le milieu granulaire est caractérisé par sa texture dont dépendent la dimension des pores, leur distribution, la perméabilité et les capacités d'aération du massif. La texture repose sur la répartition des particules en fonction de leur géométrie (granulométrie).

La forme des grains conditionne leur arrangement et ainsi, influence la dimension des pores et le comportement hydraulique du massif. La densité joue également un rôle sur la porosité en influant la compacité des massifs.

La plupart des interfaces solide-liquide subissent une colonisation bactérienne sous la forme d'un biofilm. La fixation garantit souvent une position stable à proximité d'une source de nourriture, une optimisation des transports de substrat vers le biofilm. La formation du biofilm est un phénomène complexe se déroulant en plusieurs étapes influencées par des facteurs autant physico-chimiques ou biologiques.

D'un point de vue expérimental, le modèle est un outil quasi- irremplaçable. Une fois correctement calibré, le modèle permet également de faciliter le choix des expérimentations à poursuivre.

Le manuscrit du présent travail, comporte trois chapitres :

Le premier chapitre s'intéresse à la synthèse bibliographique concernant les eaux usées et les différentes techniques d'épuration, ainsi que le procédé de biofiltration dont le support était en pouzzolane et enfin des notions sur les plans d'expériences.

Le deuxième chapitre est consacré au matériel et méthodes dont la méthode de l'obtention des grains de pouzzolane qui vont servir comme support pour le lit fixe, a été détaillée, ainsi que les différentes analyses physiques qui lui sont propre.

Le troisième chapitre abordera les résultats obtenus et les interprétations.

CHAPITRE I

Synthèse bibliographique

I.1 Les eaux usées

I.1.1 Définition des eaux usées

La pollution de l'eau s'entend comme, une modification défavorable ou nocive des propriétés physico-chimiques et biologiques, produite directement ou indirectement par les activités humaines, les rendant impropres à l'utilisation normale établit.

Les eaux usées sont toutes les eaux issues des activités domestiques, agricoles et industrielles chargées en substance toxique qui parviennent dans les canalisations d'assainissement. Les eaux usées englobent également les eaux de pluies et leur charge polluante, elles engendrent au milieu récepteur toutes sortes de pollution et de nuisance. **[1]**

I.1.2 Origine des eaux usées

La pollution de l'eau connaît différentes origines, et suivant la qualité de substances polluantes, on distingue 04 catégories d'eaux usées :

-  Domestique.
-  Industrielle.
-  Agricole.
-  Les eaux de ruissellement.

I.1.2.1 Les eaux usées domestiques

Elles proviennent des différents usages domestiques de l'eau. Des eaux ménagères de vaisselle chargées de détergents, de graisses appelées eaux grises et de toilette chargées de matières organiques azotées, phosphatées et de germes fécaux appelées eaux noires.

I.1.2.2 Les eaux usées industrielles

Les eaux usées industrielles sont celles qui proviennent des diverses usines de fabrication ou de transformation. Elles peuvent contenir des substances organiques ou minérales corrosives. Les substances sont souvent odorantes, et colorées, et parfois toxiques et peuvent rompre l'équilibre écologique des milieux récepteurs. Les eaux évacuées par les industries sont :

- Les eaux de fabrication qui dépendent de la nature de l'industrie ;
- Les eaux de lavage des machines ;
- Les eaux de refroidissement qui dépendent du taux de recyclage.

Les usages industriels ont le choix entre trois possibilités :

- Soit déverser leurs effluents directement dans le réseau d'égouts si l'autorisation leur est donnée par la commune ;

- Soit traiter entièrement leurs effluents avant de les rejeter directement dans le milieu naturel récepteur ;
- Soit effectuer un prétraitement en usine avant le rejet dans le réseau d'égouts [2] [3]

I.1.2.3 Eau agricole

Ce sont des eaux qui ont été polluées par des substances utilisées dans le domaine agricole. Dans le contexte d'une agriculture performante et intensive, l'agriculteur est conduit à utiliser divers produits d'origine industrielle ou agricole dont certains présentent ou peuvent présenter, des risques pour l'environnement et plus particulièrement pour la qualité des eaux. Il s'agit principalement des fertilisants (engrais minéraux du commerce ou déjections animales produites ou non sur l'exploitation), des produits phytosanitaires (herbicides, fongicides, insecticides,...) [4]

I.1.2.4 Les eaux pluviales

Les eaux de pluie ruissellent dans les rues où sont accumulées polluants atmosphériques, poussières, détritiques, suies de combustion et hydrocarbures rejetés par les véhicules dans l'atmosphère. Les eaux de pluies, collectées normalement à la fois avec les eaux usées puis déversées dans la canalisation d'assainissement et acheminées vers une station d'épuration, sont souvent drainées directement dans les rivières entraînant ainsi une pollution intense du milieu aquatique d'épurations. [5]

I.2 Différents procédés de traitement

I.2.1 Traitement par boues activées

C'est au début du XXème siècle, et en s'appuyant sur les travaux de Louis Pasteur, qu'Edward Arden et William Lockett donnent naissance au traitement biologique.

Ils constatèrent la formation d'agrégats bactériens lors de l'aération continue d'eaux d'égout. La présence d'oxygène augmente l'activité bactérienne, ce qui accélère la dégradation naturelle de la matière organique. Cette biomasse active prend le nom de « boue activée »

Ce traitement passe par deux phases ; le contact de la biomasse et de l'eau usée dans un réacteur ensuite la séparation des solides de la phase liquide épurée par décantation.

Ce traitement est le plus répandu et son développement est dû aux excellentes performances de dépollution (rendement supérieur à 95%) qu'il réalise par rapport aux autres procédés existants. En contrepartie, suivant le type d'effluent à traiter, ce procédé peut être difficile à maîtriser pour le traitement de l'azote du phosphore ou en cas de variations importantes des flux à traiter [6]

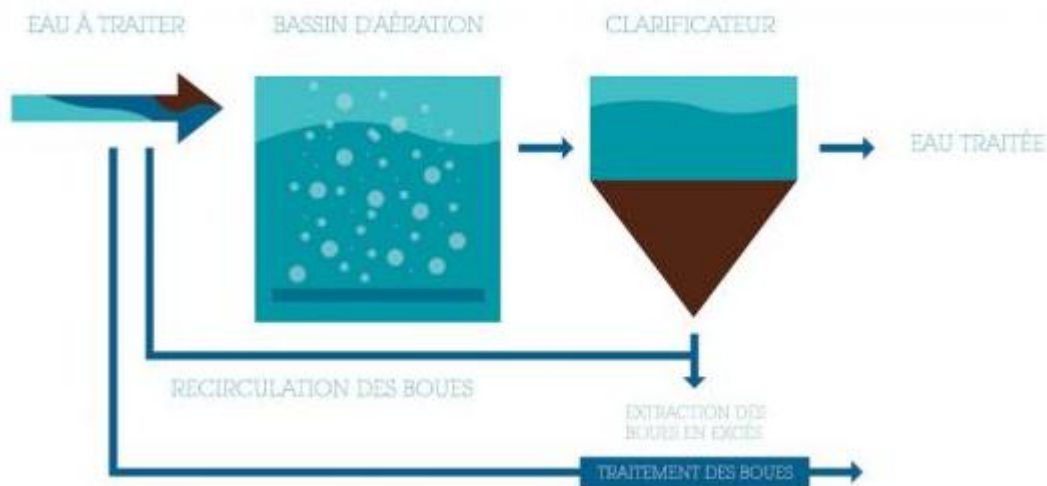


Fig. I. 1: Traitement par boues activées

I.2.2 Traitement par lagunage

Il fait appel à un stockage des eaux pour des temps de séjour relativement longs, au minimum plusieurs jours, parfois plusieurs mois pour optimiser des processus naturels d'autoépuration à l'aide de technologies peu sophistiquées à coût énergétique limité [7]

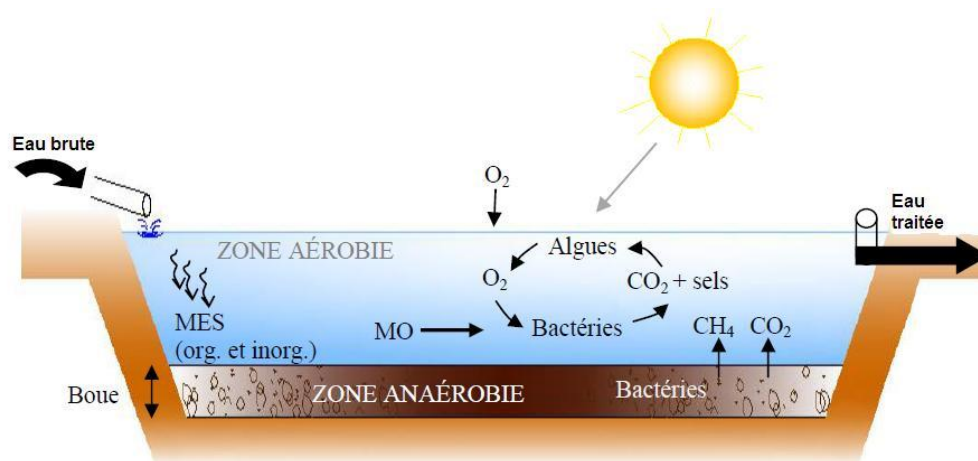


Fig. I.2: Traitement des eaux usées par un lagunage naturel

Il existe quatre types de lagunes :

a- Les lagunes anaérobies

Ce sont des bassins assez profonds (2,5 à 5 m) où la dégradation a lieu en absence d'oxygène produisant ainsi du biogaz (CO_2 et CH_4). Ces lagunes permettent une réduction de 60 % de la DBO.

b- Les lagunes facultatives

Elles sont moins profondes (1,2 à 2,4 m) et combinent entre l'aérobiose et l'anaérobiose. La dégradation aérobie s'effectue dans les zones proches de la surface et la dégradation anaérobie dans les profondeurs de la lagune.

c- Les lagunes aérobies

Ou lagune de maturation. Elles sont aérées et la circulation de l'eau est artificielle. L'air favorise la dégradation des déchets. Les algues et les plantes se nourrissent des éléments dissous par les bactéries et se développent par photosynthèse en augmentant ainsi le taux d'oxygène dissous dans l'eau. Leur profondeur ne dépasse pas les 1,5 m.

d- Lagune à haut rendement

Elles sont constituées de bassins de 30 cm à 60 cm de profondeur seulement. L'eau est lentement agitée par des roues à aubes, ce qui entraîne une production intensive d'algue et d'oxygène. Ainsi la surface nécessaire pour les bassins de ce type peut être jusqu'à 5 fois plus petite par rapport aux autres lagunes. Elles nécessitent des conditions minimales de rayonnement solaire et de température [8]

I.2.3 Traitement par culture fixée

I.2.3.1 Lit bactérien traditionnel

Les premières stations d'épuration à lits bactériens sont apparues dans les années 1970 et leurs exploitations pour le traitement des eaux usées urbaines ne se font que dans les années 1990.

Les avantages de cette technique sont :

- La possibilité d'échapper aux accidents de décantation des boues activées, Occupe moins du surface au sol,
- Sont plus faciles à installer dans des bâtiments fermés,
- Se prête bien à une construction modulaire,
- Temps de réaction plus court et permet d'envisager une optimisation automatique des paramètres de fonctionnement,
- Adaptation aux variations des eaux à traiter.[9]

I.2.3.1.1 Principe de fonctionnement

Dans les lits bactériens, la masse active des micro-organismes se fixe sur un support poreux inerte ayant un taux de vide à travers lequel est percolé l'effluent (lits minéraux comme la pouzzolane et le coke métallurgique, ou plastique). [10]

Les matériaux de remplissage peuvent être ordonnés ou en vrac et la vitesse d'écoulement de l'effluent ne doit être ni trop rapide, pour donner le temps suffisant à la digestion bactérienne de la pollution organique, ni trop lent pour permettre une bonne évacuation de MES en excès.

Le lit bactérien est plus performant qu'un procédé à boues activées car il élimine :

- 30 à 40 % des virus,
- 50 à 95 % des bactéries,
- 20 à 90 % des œufs d'helminthes,
- 83 à 99 % des kystes de protozoaires [11]

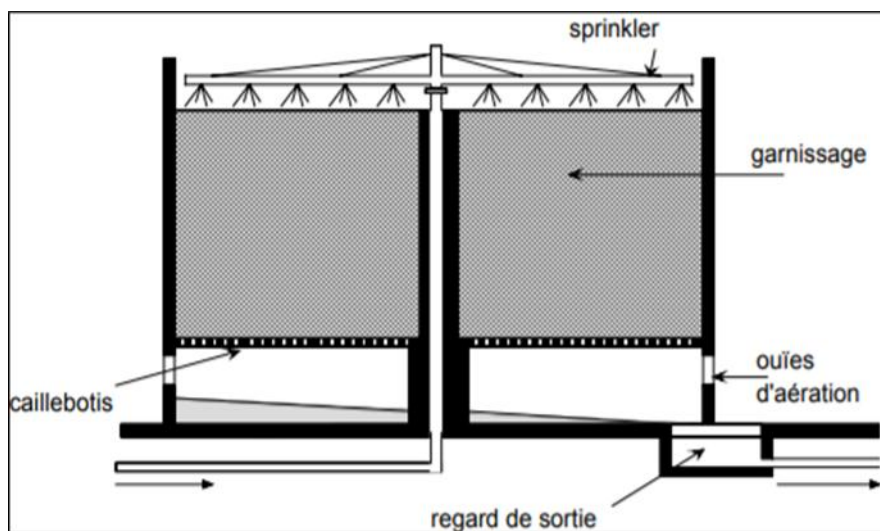


Fig. I.3 : Traitement des eaux usées à travers un lit bactérien

I.2.3.1.2 Classification des lits bactériens

Ils sont classifiés selon :

a- La charge

Les lits à faible charge : la charge hydraulique est inférieure à $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ et la charge en DBO_5 est de $0,08$ à $0,15 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot \text{j}$ et le rendement de ce type de lits est de l'ordre de 95 %. Les lits bactériens à faible charge possèdent des risques de colmatage et le coût est élevé et peuvent éliminer l'azote.

Les lits à forte charge : la charge hydraulique est supérieure à $0,7 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{h}$, et la charge en DBO_5 est entre 0,7 et $0,8 \text{ kg} / \text{m}^3 \cdot \text{j}$. Cette classe de lits nécessite une recirculation qui assure :

- ✚ L'autocurage du lit,
- ✚ L'ensemencement des eaux décantées,
- ✚ La dilution des eaux à traiter

b- Le matériau de remplissage

- **Les lits à remplissage traditionnel**

Le matériau de remplissage de ces lits peut être la pouzzolane (roche volcanique à structure alvéolaire), le coke métallurgique (coke en gros morceaux, très résistant à la compression, ou le coke la houille), de la silice ou des galets.

Ces matériaux possèdent une surface spécifique de 90 à $105 \text{ m}^2 / \text{m}^3$. Le taux de vide est de 50% et la hauteur du support est d'environ 2 m . Lorsque le lit est à forte charge le taux d'épuration diminue (66%). [12]

- **Les lits à remplissage plastique**

Ils ont une hauteur très importante par rapport au garnissage traditionnel, allant jusqu'à 12 m avec une surface spécifique développée de 80 à $220 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ et un pourcentage de vide de 90% . Ces lits peuvent traiter des charges volumiques élevées entre 1 et $5 \text{ kg} / \text{m}^3 \cdot \text{j}$.

Parfois ce procédé est réuni avec un traitement de type « boues activées ». On peut distinguer deux types de présentation :

- ✚ Matériaux à remplissage ordonné,
- ✚ Matériaux à remplissage en vrac.

La durée de vie moyenne des lits à remplissage plastique est à l'ordre d'une dizaine d'années. Leur remplacement est occasionné par l'encrassement, l'écrasement, défaut de supportage, etc [13]

I.2.3.1.3 Les paramètres de fonctionnement

a- Expression de la charge

La charge hydraulique admise par lit bactérien est donnée par la relation suivante :

Avec :

Ch. : charge hydraulique (m/h),

Q : débit d'effluent à traiter (m^3/h),

R : taux de recyclage (%),

A : surface horizontale du lit (m²).

b-Le recyclage

Le recyclage de l'eau traitée dans un lit bactérien à remplissage traditionnel a pour but d'améliorer les performances de l'élimination de la DBO.

Dans les lits à remplissage plastique, il permet d'augmenter la charge hydraulique ce qui améliore le mouillage du matériau.

$$S_0/S_f = \exp(KHA_s/Q^n)$$

c-Equation de dimensionnement

Avec :

S₀ (mg/l): DBO₅ de l'eau brute, après décantation,

S_f (mg/l) : DBO₅ de l'eau de sortie du lit, après décantation,

A_s (m²/m³): surface spécifique du matériau plastique considéré,

H (m) : hauteur de remplissage,

Q (m³/j.m²) : la charge hydraulique.

n : coefficient calculé expérimentalement, d'après la relation suivante :

K : constante de la biodégradabilité dépend de la nature de la pollution d'effluent à traiter et la température. [13]

I.2.3.2 Traitement par disques biologiques

Les micro-organismes se développent et forment un film biologique épurateur à la surface des disques minces en plastique montés sur un axe horizontal. Les disques étant semi émergés (environ 40% de la surface des disques), leur rotation permet alternativement l'oxygénation de la biomasse fixée et la dégradation de pollution.[14] [15]

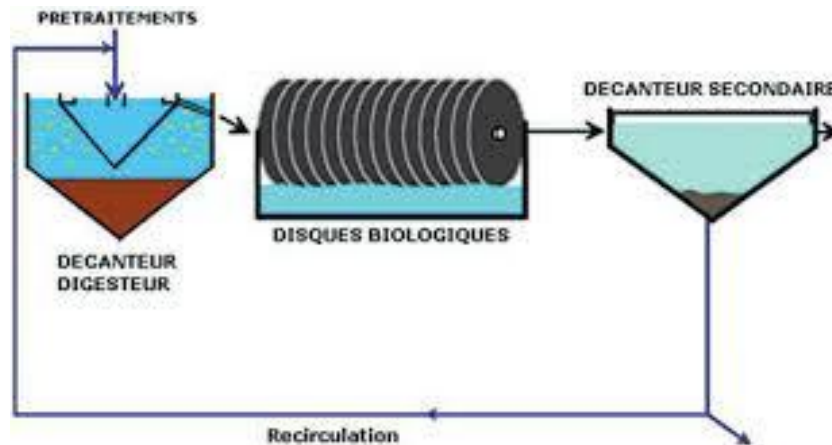


Fig. I.4 : Synoptique d'une STEP à disque biologique

I.2.3.3 Traitement par biofiltration des eaux résiduaires urbaines

I.2.3.3.1 Données générales sur les biofiltres

Le principe de la biofiltration repose sur l'utilisation d'un matériau filtrant de type granulaire colonisé par une biomasse épuratrice et à travers lequel transite l'effluent à traiter.

Les procédés techniques de biofiltration, développés par les différents constructeurs, se distinguent par leurs modes de fonctionnement. Ainsi, le système d'alimentation en eau peut être placé en bas ou en haut du biofiltre; les flux d'eau étant alors ascendants ou descendants. Actuellement, la majorité des biofiltres est équipée de système d'alimentation en eau à flux ascendant.

Les caractéristiques des grains constitutifs du massif filtrant (nature, densité, forme, etc.) sont, elles aussi, spécifiques à chaque constructeur. Bien qu'il existe une grande diversité de matériaux (argile expansé, polystyrène, etc. Dans le cas de grains de densité supérieure à 1, le transit de l'effluent à traiter à travers le massif filtrant, qui repose sur un plancher, induit un phénomène d'expansion du matériau (biofiltration en expansion) - cas des filtres biologiques à courant ascendant.

À l'inverse, le transit de l'effluent à travers un massif filtrant constitué de grains de densité inférieure à 1, retenu dans la partie haute du filtre par un plafond, induit une compression du matériau (biofiltration en compression – cas des filtres biologiques à courant descendant).

Le type de biomasse épuratrice présente au sein du massif filtrant dépend des conditions de fonctionnement du biofiltre (forme de l'oxydant, type de pollution à traiter). Ainsi, la présence de carbone organique et d'oxygène dans le milieu est propice au développement de bactéries hétérotrophes aérobies qui dégradent la pollution carbonée. [16]

I.2.3.3.2 Performances épuratoires des unités de biofiltration

Ce paragraphe est consacré à l'évaluation des performances épuratoires atteintes sur les unités de biofiltration destinées au traitement secondaire de la pollution carbonée, à la nitrification tertiaire et à la dénitrification aval et amont des eaux usées. Il convient de souligner que les performances épuratoires sont susceptibles de varier légèrement en fonction des caractéristiques du matériau filtrant. En effet, la géométrie du massif a une influence sur la structure du biofilm présent à la surface du matériau support et, par conséquent, sur la surface d'échange biomasse – substrat. Or, les mécanismes de diffusion et transport des substrats présents dans l'effluent (carbone, azote, oxygène) vers la biomasse épuratrice constituent les principaux facteurs limitants du métabolisme bactérien. En dépit de ce constat, il nous a semblé intéressant de nous appuyer sur notre expérience du fonctionnement des unités de biofiltration pour dresser un bilan global sur les capacités épuratoires des biofiltres. Des informations sur l'influence des conditions d'exploitation sur les rendements d'élimination de la pollution complètent ce bilan (intensité de l'aération, dosage du substrat carboné en dénitrification, température des eaux à traiter, etc.). [17]

I.2.3.3.3 Dynamique de colonisation et d'encrassement des massifs filtrants

Au cours de la filtration des eaux usées, le matériau support est colonisé par la biomasse épuratrice et piège les particules en suspension non captées lors des traitements amont. Ces phénomènes qui s'opèrent conjointement induisent une diminution de la porosité et, en conséquence, un accroissement de la résistance à l'écoulement de l'effluent.

Selon le mode de fonctionnement du biofiltre, cette dissipation énergétique est plus ou moins forte. Le phénomène de gonflement du massif filtrant, spécifique à la biofiltration en expansion, limite la résistance à l'écoulement du massif. Au contraire, le tassage du matériau filtrant, propre à la biofiltration en compression, augmente la résistance à l'écoulement du massif et favorise la perte énergétique. De manière générale, la différence de pression entre l'entrée et la sortie du biofiltre, communément appelée perte de charge (PDC), constitue un indicateur fiable de l'état d'encrassement du biofiltre sur lequel se base l'exploitant pour déclencher le lavage du biofiltre et ainsi éviter les phénomènes de colmatage. Le lavage consiste en une injection alternée d'air et d'eau au sein du massif filtrant qui crée un phénomène d'attrition entre les grains. L'objectif est de décrocher la biomasse excédentaire tout en maintenant une population active sur le support. Le lavage permet un retour à la perte de charge dite initiale qui traduit l'état d'ensemencement du filtre en début de cycle de filtration. [18]

I.2.3.3.4 Les pertes de charge en biofiltration

Le niveau de colonisation au début du cycle de filtration et les cinétiques d'encrassement des massifs filtrants sont étroitement liés aux conditions de fonctionnement des biofiltres.

Les charges appliquées en substrat et la température de l'eau ont notamment une influence majeure sur les mécanismes de colonisation et d'encrassement du matériau support. Cette influence est logique dans la mesure où le métabolisme bactérien est fortement influencé par la quantité de substrat disponible et la température du milieu. [18]

I.3 La pouzzolane

I.3.1 Définition

La pouzzolane est une roche siliceuse d'origine volcanique, faiblement agglomérée, friable, dont la couleur varie du gris au rougeâtre, utilisée depuis l'Antiquité comme constituant secondaire des ciments et des mortiers. Ce sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. [19]

I.3.2 Origine du nom pouzzolane

Le nom de "pouzzolane" vient de la ville de Pouzzoles, un port italien riche en sable volcanique, situé dans le golfe de Naples au pied du Vésuve.

I.3.3 Types de pouzzolane

Nous pouvons distinguer deux types de pouzzolane à savoir :

I.3.3.1 Pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle est une roche naturelle de composition silico- alumineuse et de texture majoritairement vitreuse généralement d'origine volcanique. Il existe toutefois des pouzzolanes d'origine sédimentaire (Diatomite, radiolarite, Gaize).

I.3.3.2 Pouzzolane artificielle

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets de différentes industries. On distingue. Soit des résidus de fabrication industrielle tels que le mâchefer, cendre de bois ou d'houille, soit des débris de brique et de tuile fabriquées avec des argiles purs à des températures modérées. On distingue aussi le schiste cuit, et les déchets de l'industrie à base de méta kaolinite [19].

I.3.4 Caractéristiques de la Pouzzolane

La pouzzolane est :

I.3.4.1 Insoluble

C'est une pierre qui ne se dégrade pas dans l'eau et qui n'interagit pas avec elle au niveau du pH (contrairement au calcaire par exemple).

I.3.4.2 Porosité

Elle laisse toujours passer l'eau, ne se colmate pas facilement et abrite de très nombreuses bactéries [19]. La Porosité peut varier de 30 à 60 % en volume suivant les granulométries. Contrairement aux agrégats lourds, ce sont les gros éléments qui possèdent le coefficient de porosité le plus important

Elle est caractérisée :

I.3.4.3 Teneur en eau naturelle

Par rapport aux autres roches naturelles, la teneur en eau de la pouzzolane est élevée et peut varier de 8 à 13 % suivant l'état hygrométrique ambiant.

I.3.4.4 Légèreté

La pouzzolane a une faible densité du fait de sa porosité.

Densité : $1 \text{ m}^3 = 1 \text{ tonne}$ environ selon la granulométrie (vrac et non-tassé).

I.3.4.5 Capacité d'absorption d'eau

Les essais d'absorption d'eau à 24 heures montrent que la texture cellulaire, et la porosité de la pouzzolane lui confèrent une grande capacité d'absorption qui peut varier de 20 à 30 % en poids du granulat sec.

I.3.4.6 Résistance à la chaleur

La température de fusion de la pouzzolane est de 1140°C , mais sa mauvaise conductibilité est telle qu'un élément de 0,150 m d'épaisseur exposé sur une face 8 heures à cette chaleur présente sur la face opposée une température d'environ 100°C seulement. La face exposée se vitrifie [20].

I.4 Optimisation par plan d'expérience

I.4.1 Introduction

La méthode des plans d'expériences est un outil indispensable pour la recherche et le développement industriel. Elle permet de fournir le meilleur protocole expérimental pour modéliser ou prédire une réponse en fonction de facteurs de variabilité, selon un modèle présumé. Si l'expérimentation est aussi ancienne que la science, la planification expérimentale, destinée à optimiser le processus d'obtention des données, ne date cependant que du XXe siècle.

I.4.2 Généralités sur la méthode des plans d'expériences

I.4.2.1 Terminologie

La grandeur d'intérêt, qui est généralement notée Y , porte le nom de « réponse ». Les variables qui peuvent modifier la réponse sont appelées facteurs. On parle donc des facteurs qui influent sur une réponse. Les termes facteur et réponse sont universellement employés dans le domaine des plans d'expériences.

❖ Facteur

Les variables que l'on désire étudier sont appelées facteurs. En général, un facteur varie entre deux bornes : la borne inférieure et la borne supérieure. Dans le langage des plans, on dit que le facteur varie entre le niveau bas (borne inférieure que l'on note souvent par -1) et le niveau haut (borne supérieure que souvent notée par $+1$). L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation (figure IV-1). Un facteur peut prendre plusieurs niveaux à l'intérieur de son domaine de variation.

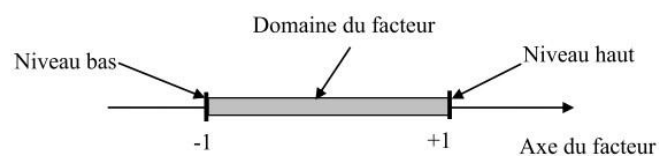


Fig. I.5: Domaine de variation du facteur

❖ Effet d'un facteur

L'effet d'un facteur A sur la réponse Y s'obtient en comparant les valeurs prises par Y quand A passé du niveau -1 au niveau +1. Soient y_1 et y_2 ces valeurs (figure I.6).

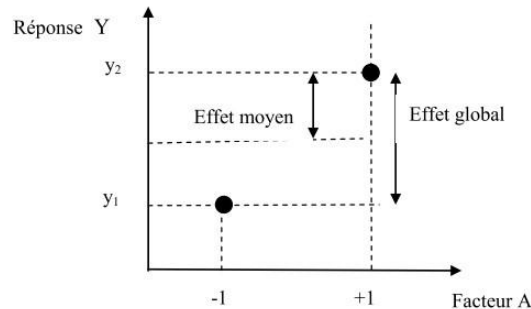


Fig. I.6 : Effet d'un facteur

Nous distinguons :

- l'effet global $y_2 - y_1$;
- l'effet moyen $(y_2 - y_1)/2$.

❖ La réponse

Les grandeurs qui intéressent l'expérimentateur et qui sont mesurées à chaque expérience sont appelées réponses. Le choix de la réponse ne relève pas de la théorie des plans d'expériences. Ce n'est qu'après une analyse minutieuse des phénomènes, des enjeux, des objectifs et des contraintes de l'étude que l'on peut définir la ou les bonnes réponses, donc une recherche d'extremum.

I.4.2.2 Surfaces de réponse

À chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. À l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localise sur une surface appelée surface de réponse.

En général, on ne connaît que quelques réponses, celles qui correspondent aux points expérimentaux retenus par l'expérimentateur. On interpole, à l'aide d'un modèle mathématique, les réponses inconnues pour obtenir la surface de réponse. Les points d'expériences, retenus par la théorie des plans d'expériences, assurent la meilleure précision possible sur la forme et la position de la surface de réponse.

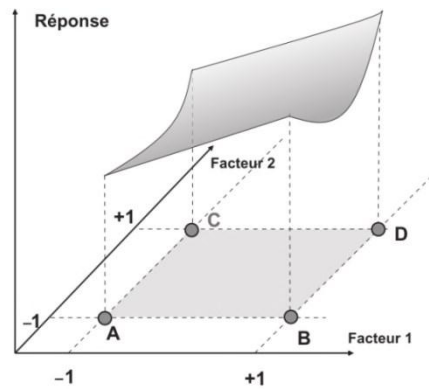


Fig. 1.7 : L'ensemble des réponses qui correspondent à tous les points du domaine d'étude forme la surface de réponse.

I.4.3 Modélisation

La modélisation mathématique consiste à trouver une fonction f telle que :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Où : y est la réponse et $x_1, \dots, x_n$ sont les facteurs. Ce modèle est déterministe (la réponse dépend uniquement des facteurs sans aucune incertitude possible, ce qui revient à ignorer les bruits tels que les erreurs de mesure) et invariant (le comportement n'évolue pas au cours du temps).

I.4.4 Types des plans d'expériences

Il existe de nombreux plans d'expériences classiques adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur, les plus utilisés sont :

- ❖ Plans de criblage : pour trouver les facteurs les plus influents sur une réponse ;
- ❖ Plans de modélisation ou plans pour surfaces de réponse : modèles du 1^{er} ou 2^{ième} degré ;
- ❖ Plans de mélange : adaptés aux facteurs dépendants ;
- ❖ Plans factoriels complets : toutes les combinaisons des niveaux de facteurs sont présentes ;
- ❖ Plans factoriels fractionnaires : tous les niveaux, de chaque facteur, sont présents, mais pas toutes les combinaisons possibles de facteurs.

Le choix d'un plan dépend essentiellement de la nature des questions à traiter, du degré de généralités recherché pour les conclusions et des ressources disponibles (matériaux expérimental, personnel, contraintes de temps...).

I.4.5 Plans factoriels complets 2^k

Ces plans sont les plus simples à réaliser. Ils consistent à prendre pour chaque facteur deux valeurs significatives (ou niveaux) qui correspondent aux limites du domaine de variations de celui-ci. La borne inférieure est le niveau bas (indiqué par -1). La borne supérieure est le niveau haut (indiqué par +1). Toutes les combinaisons de niveaux sont réalisées.

La dénomination 2^k a la signification suivante : le chiffre 2 représente les deux niveaux haut et bas des facteurs, et k indique le nombre de facteurs.

CHAPRE II

Matériel et méthodes

II.1 Choix du support

Le biofiltre réalisé est une colonne en PVC avec des dimensions bien déterminées. Il a été relié à un distributeur d'eau usée secondaire (Fig.II.1). Le support inorganique utilisé pour la biofiltration est de la pouzzolane. Ce matériau support a été choisi d'une part pour des raisons d'ordre économiques (le cout) et sa disponibilité et d'autre part pour l'irrégularité des formes et des talles des vésicules qui sont séparées par des cloisons permettant ainsi la fixation des microorganismes [5].

II.2 Origine et caractéristiques

La pouzzolane utilisée est une pouzzolane naturelle en provenance du gisement de Bouhamidi (à 25 km de Béni-Saf) et à 100km d'Oran dans l'ouest de l'Algérie. Selon les analyses effectuées par le laboratoire de la cimenterie de Béni-Saf, la pouzzolane présente une composition chimique formée essentiellement de silice (SiO_2) avec 46.60%, d'alumine (Al_2O_2) avec 17.5%. La partie restante contient de l'oxyde de fer et d'autres oxydes.

II.3 Analyse granulométrique par tamisage (EN 933-1 et EN 933-2)

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant un granulat dont le diamètre est supérieur ou égal à $80\mu\text{m}$. Elle est effectuée par la méthode de tamisage.

Le matériau a été lavé à l'eau de robinet plusieurs fois puis séché dans une étuve à 105°C afin d'éliminer toute éventuelle humidité ensuite broyé et passé au tamisage.

Une colonne de tamisage est composée d'une série de tamis de contrôle empilés les uns sur les autres.

Un échantillon de 1000g de pouzzolane à analyser est versé dans le tamis supérieur. L'ensemble des tamis est soumis à des secousses pendant 5 mn pour que les particules puissent se répartir le long de la colonne de tamisage.

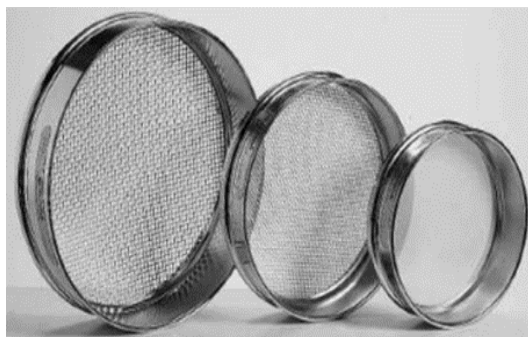


Fig. II.1 : Tamis à différents diamètres



Fig. II.2: Série de tamis avec vibreur

Chaque tamis divise les particules qui lui sont appliquées en deux fractions :

- Un refus sur tamis correspondant aux particules retenues sur chaque tamis (M_1 , M_2 , M_3)
- Un tamisat ou encore 'passant', correspondant aux particules appliquées au tamis inférieur (P_1 , P_2 , P_3).

Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

A partir de ces résultats, on calcule la masse de matériau qui a traversé chaque tamis et on l'exprime en pourcentage de la masse de matériau utilisé pour l'analyse.

Ouverture des tamis (mm)	Passant (g)	Refus partiel (g)	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisa cumulé(%)
	P_1	M_1	M_1	$R_1 = 100 \times \frac{M_1}{M}$	$T_1=100-R_1$
	P_2	M_2	$M_1 + M_2$	$R_2 = 100 \times \frac{M_1+M_2}{M}$	$T_2=100-R_2$
	P_3	M_3	$M_1 + M_2 + M_3$	$R_3 = 100 \times \frac{M_1 + M_2 + M_3}{M}$	$T_3=100-R_3$

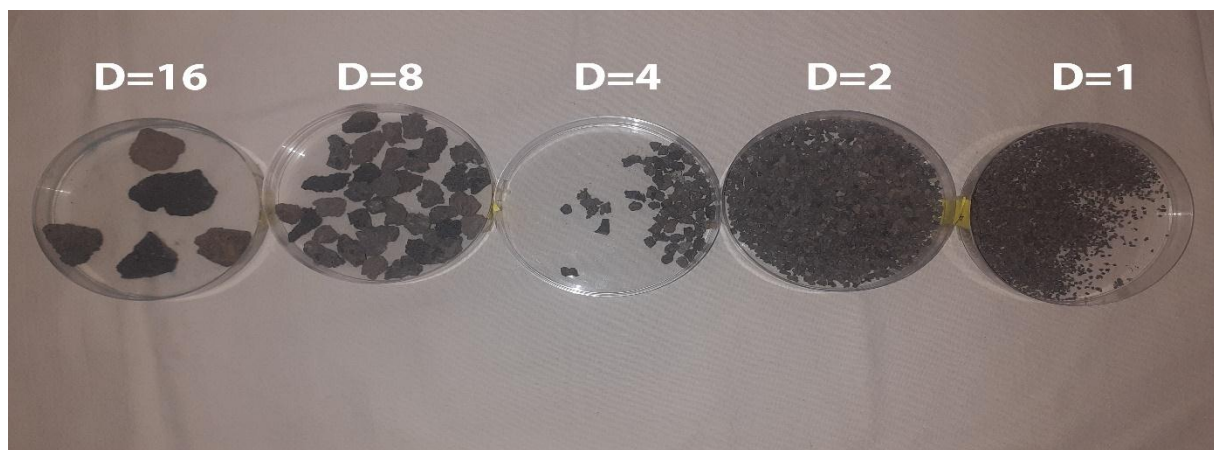


Fig. II. 3 : pouzzolane à différents diamètres après tamisage

Les divers pourcentages des tamisats cumulés sont portés sur une feuille semi-logarithmique pour tracer la courbe représentant les pourcentages en fonction des vides des mailles de chaque tamis

A partir de cette courbe, on peut déterminer les valeurs des deux grandeurs qui caractérisent le matériau granulaire : la taille effective et le coefficient d'uniformité.

II.3.1 Coefficient d'uniformité (CU) ou coefficient de HAZEN

C'est le rapport de l'ouverture de maille de tamis qui permet le passage de 60% de la masse de matériau (d_{60}) à l'ouverture de maille de tamis permettant le passage de 10% de la masse de matériau (D_{10}). Il est obtenu par la formule suivante :

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

D_{60} et D_{10} étant les valeurs lues en abscisse pour les points de la courbe granulométrique correspondant aux ordonnées de 60 % et 10 %. Par conséquent, la référence suivante permet de déterminer l'uniformité de la courbe.

Si $C_u < 3$, alors la granulométrie est uniforme ou encore serrée.

Si $C_u > 3$, alors la granulométrie est variée ou encore étalée.

II.3.2 Le coefficient de classement

ou de courbure (C_c) quant à lui, permet de décrire la forme de la courbe granulométrique entre D_{10} et D_{60} . Le coefficient de classement fait appel à la notion de diamètre effectif

correspondant au pourcentage (%) de passants placés en indice déterminé à l'aide de la courbe granulométrique.

D_{60} est le diamètre effectif des particules qui correspond à 60 % de passants, D_{10} est le diamètre effectif des particules qui correspond à 10 % de passants et D_{30} le diamètre effectif des particules qui correspond à 30 % du passant. Lorsque $1 < C_c < 3$, la courbe granulométrique descend d'une façon assez régulière, indiquant ainsi la présence d'une grande variété de diamètres. Un C_c trop grand ou trop petit indique l'absence de certains diamètres entre les diamètres effectifs D_{10} et D_{60} , la granulométrie est alors mal graduée.

La détermination du coefficient de classement est donnée par la formule suivante :

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

Ce coefficient constitue un indice de la variation relative de la pente de la courbe.

II.3.3 Détermination des caractéristiques physiques du matériau

II.3.3.1 Masse volumique ρ

Les masses volumiques apparentes et absolues des granulats sont déterminées conformément à la norme NA 255.

II.3.3.2 La masse volumique apparente

De la pouzzolane est mesurée en effectuant le rapport masse sèche sur le volume selon la méthode décrite par Baize, 2000. Cette méthode prend en considération le volume et les vides ménagés par la porosité du matériau.

$$\rho_{ap} = \frac{M_s}{V}$$

➤ ρ_{ap} : masse volumique apparente en g.cm^{-3}

II.3.3.3 La masse volumique absolue

Ou réelle d'un matériau est mesurée par la méthode à l'éprouvette graduée. Elle est calculée par le rapport de la masse du granulat sec sur le volume absolu (V) sans prendre en considération les vides.

- ❖ -On prépare un échantillon de granulats secs de masse M
- ❖ -On verse de l'eau dans une éprouvette et on note V_1
- ❖ -On verse l'échantillon dans l'éprouvette à l'aide d'un entonnoir et on chasse l'air en remuant le mélange.

❖ On note le nouveau volume d'eau dans l'éprouvette V_2 (volume d'eau déplacée).

La masse volumique absolue est définie par la relation suivante :

$$\rho_{ab} = \frac{M_s}{V_2 - V_1}$$

Avec :

- ρ_{ab} : masse volumique absolue en g.cm^{-3}
- M_s (g) = masse du matériau sec
- $V_2 - V_1$ (ml) = volume absolu

II.3.3.4 Porosité du matériau ϕ (en pourcentage)

La porosité est la valeur utilisée pour décrire l'ensemble des vides ou de pores d'un échantillon de matériau solide donné. Elle varie volumétriquement selon les granulométries.[3]

Le calcul de la porosité ϕ d'un matériau se fait par la division du volume des vides (V_v) par le volume total (V_t).

$$\phi = \frac{V_v}{V_t} = \frac{(M_2 - M_1) / \rho_w}{V_s + V_v} \times 100$$

Avec :

- M_1 (g) : masse initiale du matériau
- M_2 (g) : masse du matériau gorgé d'eau
- ρ_w (g/cm^3) : masse volumique de l'eau
- (V_v) : volume des vides
- V_s (ml) : Volume du matériau égal à ($V_2 - V_1$)

II.3.3.5 La porosité du lit ϕ_l

La masse M_1 est obtenue en pesant l'éprouvette graduée vide. Le matériau sec est ensuite versé dans l'éprouvette jusqu'à une graduation connue pour obtenir le volume du matériau V_s . La masse M_2 est obtenue après pesée de l'éprouvette avec le matériau.

$$\phi = 1 - \frac{(M_2 - M_1)}{(\rho_s)(V_s)}$$

Avec :

- P_s : masse volumique du matériau
- V_s : le volume du solide (matériau).

II.3.3.6 Densité apparente δ_a

La densité apparente de la pouzzolane varie en fonction de la granulométrie (les éléments les plus fins sont les plus denses) [3]

$$\delta_a = \frac{M_1}{(V_2 - V_1) + V_v}$$

II.3.3.7 Densité relative de la pouzzolane δ_r

Pour calculer la densité relative du matériau, on suit les étapes ci-dessous :

- On pèse un certain volume d'eau qu'on met dans une éprouvette graduée (M_1) en g,
- On pèse le matériau sec (M_2), ensuite on le verse dans l'éprouvette en g,
- On pèse le mélange (eau + matériau) considéré comme M_3 en g.

La densité relative du matériau est obtenue par le rapport de sa masse sur celle de l'eau déplacée.

$$\delta_r = \frac{\text{masse du matériau sc}}{\text{masse de l'eau déplacée}} = \frac{M_2}{M_3 - M_1}$$

II.3.3.8 Indice de vide (e)

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Avec :

- $V_s = V_2 - V_1$
- $V_v = V_t - V_s$

II.3.3.9 Capacité d'absorption d'eau (C_{ab})

La méthode utilisée est celle proposée par Redlich et al. (1975). Cette méthode consiste à peser une quantité de pouzzolane après ressuyage à atmosphère saturée d'eau (M_1) puis après séchage à 105°C jusqu'au poids constant (M_2). La formule de calcul est la suivante :

$$C_{ab} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

- C_{ab} : capacité d'absorption en eau en %
- M_1 : masse initiale de pouzzolane en (g)

- M_2 : masse de pouzzolane après séchage en (g)
- M_2 : masse après séchage

La structure alvéolaire de la pouzzolane et sa porosité qui en découle confèrent à ce matériau une capacité d'absorption d'eau. Le coefficient d'absorption est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse (M_i) de l'échantillon après imbibition par l'eau pendant 24 heures, à la masse sèche (M_s) après passage à l'étuve à 105°C de l'échantillon. Le coefficient d'absorption est calculé par la formule suivante :

$$Ab = \frac{M_i - M_s}{M_s} \cdot 100$$

- M_i : masse du matériau imbibé d'eau
- M_s : masse du solide sec

II.3.3.10 Compacité

Calcul de la compacité

Pour chaque éprouvette, la compacité est calculée selon la formule :

$$C = \rho_a / \rho_r$$

Avec :

ρ_r = masse volumique réelle au sens de la norme NF EN 1097-6 (g/cm³),

ρ_a = masse volumique apparente du matériau, calculée selon l'expression suivante :

$$\rho_a = M / V$$

- M : masse de l'échantillon en (g).
- V : volume apparent calculé (cm³)

II.4 Optimisation des paramètres de biofiltration

Principe

Le principe de la modélisation consiste à varier simultanément les niveaux d'un ou plusieurs facteurs, qui sont les variables discrets ou continues à chaque essai. Ceci va permettre de :

- diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés,

- en détectant les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport à une réponse.

L'objectif principal peut être résumé par la devise : « obtenir un minimum d'information avec un minimum d'expériences.

CHAPRE III

Résultat et interprétation

III. 1 Résultat et interprétation de l'étude physique de la pouzzolane

III.1.1 Tracé de la courbe granulométrique

Il suffit de porter les divers pourcentages des tamisats cumulés sur une feuille semi-logarithmique :

En abscisse : les dimensions des mailles, échelle logarithmique.

En ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique.

La courbe doit être tracée de manière continue.

Ensuite, on trace la courbe représentant les pourcentages en fonction des vides des mailles de chaque tamis.

A partir de cette courbe, on peut déterminer les valeurs des deux grandeurs qui caractérisent le matériau granulaire : la taille effective et le coefficient d'uniformité.

III.1.2 Calcul des coefficients de HAZAN et de classement ou de courbure

$$D_{10} = 3$$

$$D_{60} = 11$$

$$D_{30} = 8$$

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 3.66$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} = 1.93$$

III.1.3 Résultats de l'analyse physique de la pouzzolane

Les différents résultats obtenus après manipulation et mesure sont récapitulés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III. 1 : Tableau récapitulatif des résultats de masses et volumes

	D=16	D=8	D=4	D=2	D=1
M ₁ (mass sec) (g)	10.18	8.34	4.99	5.5	1
M ₂ (imbibée dans l'eau)(g)	13.67	9.62	6.25	4.74	3.19
M ₃ (105°C)	9.95	7.26	1.97	5.46	3.97
V ₁ (ml)	74	36	28	35	35
V ₂ (ml)	76	32	33	41	27
V _s (ml)	5	4	2	2	0.1
V _v (g)	2.069	1.286	0.227	0.241	0.155
V _{app}	6.01	4.26	2.23	3.28	1.56

Avec :

- M₁ = masse pouzzolane sèche
- M₃ = masse de la pouzzolane séchée à 105°C
- M₂ = masse de la pouzzolane imbibée dans l'eau pendant 10mn
- V₁ = volume à t=0
- V₂ = volume après 10mn
- V_v = M₂-M₁
- V_s = V₂-V₁
- V_{app} = V_s + V_v

Tableau III.2: Résultat de l'analyse physique de la pouzzolane

	D=16	D=8	D=4	D=2	D=1
Masse volumique $\gamma = \frac{M_s}{V_{app}}$	1.45	2.38	2.626	1.01	2.05
Porosité	35%	34%	28%	29%	32%

$\varphi = \frac{V_v}{V_t}$					
Porosité de lit $\varepsilon = 1 - \frac{(M_2 - M_1)}{(\rho_s)(V_s)}$	0.95	0.48	1.62	1.76	1.94
Densité apparente δ_a $\delta_a = \frac{M_1}{(V_2 - V_1) + V_v}$	1.84	1.38	1.62	2.01	3.05
Indice de vide $e = \frac{V_v}{V_s}$	0.51	0.32	0.227	0.241	0.23
Capacité d'absorption d'eau (Cab) $C_{ab} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$	20%	16%	17%	12%	14%
Compacité $C = \rho_{re} / \rho_{ap}$	1.37	1.83	1.56	1.25	0.82

Interprétation

D'après les résultats obtenus, on constate que plus le diamètre des particules de pouzzolane diminue, plus la masse volumique augmente. L'inverse de la porosité où la porosité des grains est importante quand le diamètre est grand (16mm) par contre la porosité du lit est quand les particules de pouzzolane présentent un diamètre entre 2 et 1mm. Ces grains de pouzzolane montrent une capacité d'absorption à des diamètres importants.

III.2 Optimisation des paramètres de traitement

Dans ce travail, le plan factoriel complet a été utilisé afin de réduire le nombre d'expérience à effectuer et de fixer les paramètres optimaux et démontrer l'effet de l'interaction des paramètres. Ainsi, le nombre total des expériences nécessaires à cette étude est de $2^2 = 4$. Sachant que les facteurs étudiés sont : le Débit et la demande biochimique en oxygène (DBO).

III.2.1 Facteurs étudiés et domaines de variation

Les facteurs étudiés accompagnés de leur domaine de variation sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III. 3: Domaine des paramètres étudiés avec les niveaux minimums et maximums

Facteurs	Min (-)	Max (+)
Q(L/h)	13.47	30.43
DBO	200	220

III.2.2 Plan d'expérimentation et résultats expérimentaux

Selon le modèle utilisé, il a été constaté que le débit n'a pas d'effet sur le temps de rétention.

Par contre, plus le temps de rétention est important et plus le taux d'élimination est important.

Tableau III. 4: Matrice des expériences du plan factoriel complet

N° d'essais	Q	DBO	HRT(h)	% élimination
1	13.47	200	0.34	58
2	30.43	200	0.25	60
3	13.47	220	0.17	30
4	28.43	120	0.19	32

III.2.3 Analyse statistique des résultats

III.2.3.1 diagramme des effets

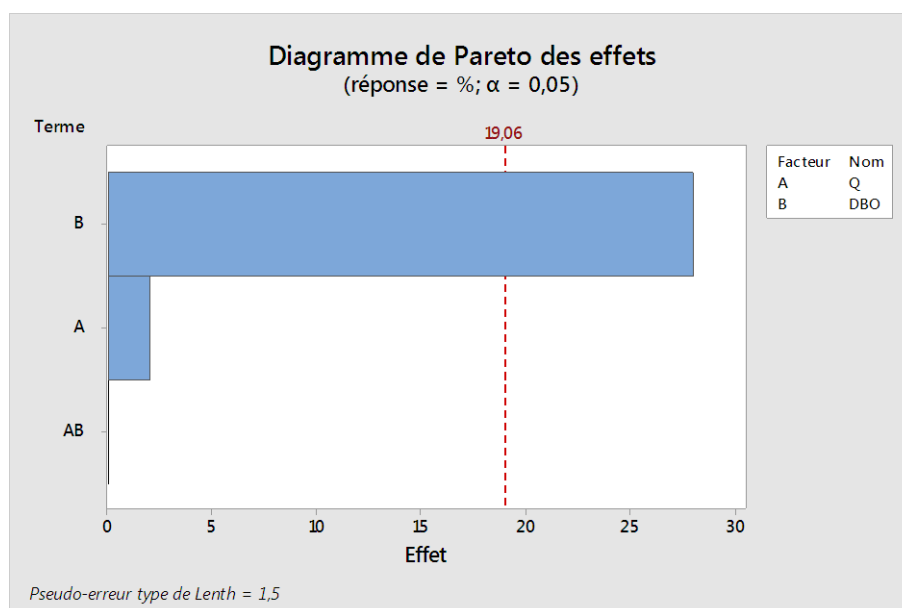


Fig .III. 2: Diagramme de Pareto des effets

D'après le diagramme de Pareto des effets, on remarque que le débit a un grand effet sur le pourcentage de traitement.

III.2.3.2 coefficient d'ajustement du modèle

S	R carré	R carré (ajust)	R carré (prév)
*	100,00%	*	*

Le coefficient d'ajustement du modèle est à 100% donc ce modèle empirique explique bien notre étude.

III.2.3.3 Equation de régression en unités non codées

$$\% = 196,7 + 0,1172 Q - 1,400 DBO - 0,000000 Q \cdot DBO$$

Il s'agit d'une équation polynomiale du premier ordre, c'est un modèle empirique qui décrit notre étude.

III.2.3.4 Analyse de variance ANOVA

III.2.3.4.1 le débit Q

Tableau III. 5 : Résultat de la variance ANOVA pour (Q)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Q	1	4,000	4,000	0,01	0,929
Erreur	2	784,000	392,000		
Total	3	788,000			

D'après le tableau ANOVA on remarque que la valeur de la probabilité $p > 0,05$. Donc ce paramètre n'est pas significatif

III.2.3.4.2 La demande biochimique en oxygène

Tableau III. 6: Résultat de la variance ANOVA pour la DBO

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
DBO	1	784,000	784,000	392,00	0,003
Erreur	2	4,000	2,000		
Total	3	788,000			

Pour la DBO la valeur de $p < 0.05$ donc ce paramètre est très significatif.

III.2.3.5 Graphique des effets principaux pour le débit et DBO

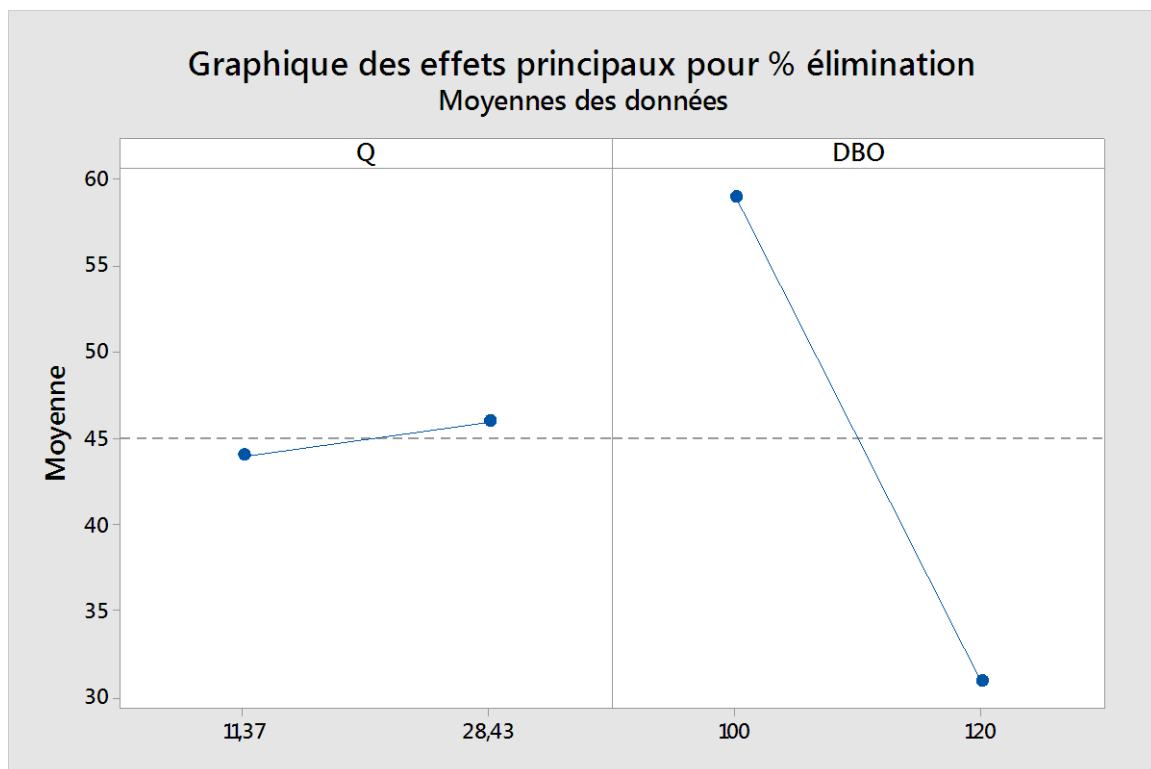


Fig.III. 3 : Graphique des effets principaux

- On remarque que le pourcentage d'élimination est élevé pour un débit maximal.
- pour une DBO minimale on trouve un pourcentage d'élimination maximal.

III.2.3.6 Graphique de contour

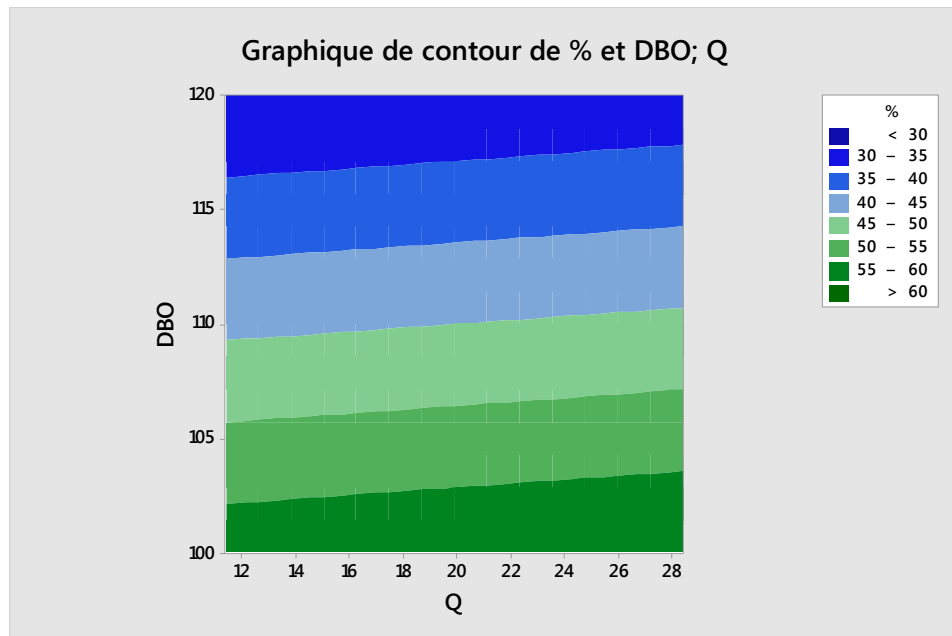


Fig.III. 4: Graphique de contour % (DBO et Q)

Selon la figure ci-dessus, on constate que le rendement maximal est atteint dans la zone vert foncé.

III.2.3.7 Optimisation des résultats

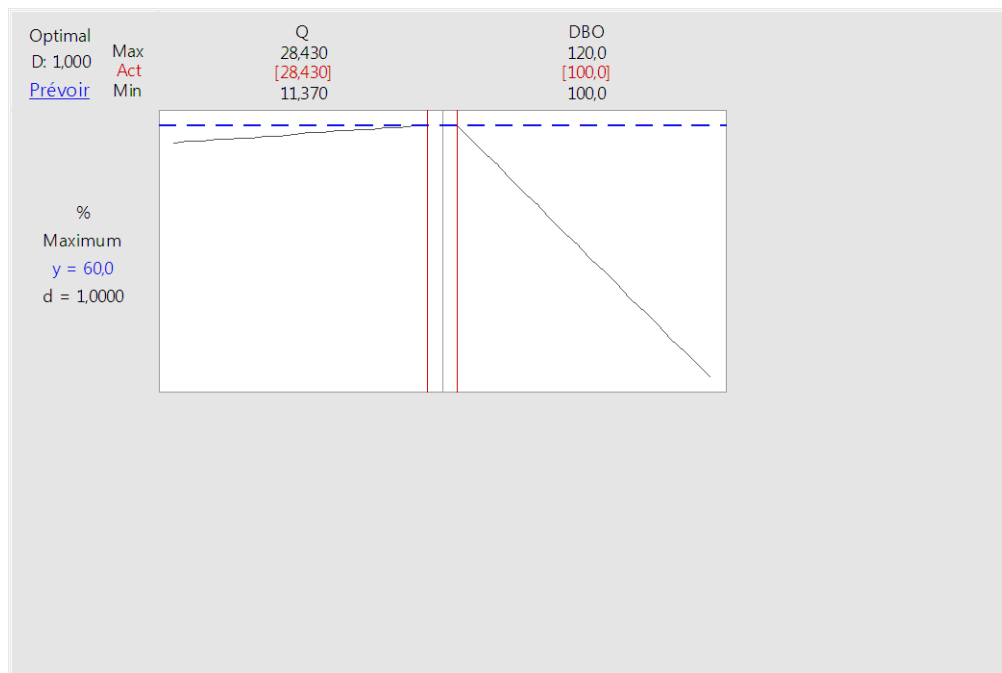


Fig. III. 5: optimisation des résultats

Dans cette étude, le rendement maximal optimisé est de 60%. Il est atteint pour le débit maximal.

Pour améliorer ce rendement il faut ajouter un autre paramètre qui pourrait être significatif ou bien ajouter un autre niveau à ces deux paramètres, c'est le niveau moyen (0). Donc on va travailler avec un plan factoriel à deux paramètres et trois niveaux (3^2).

III.2.4 Temps de rétention hydraulique(HRT)

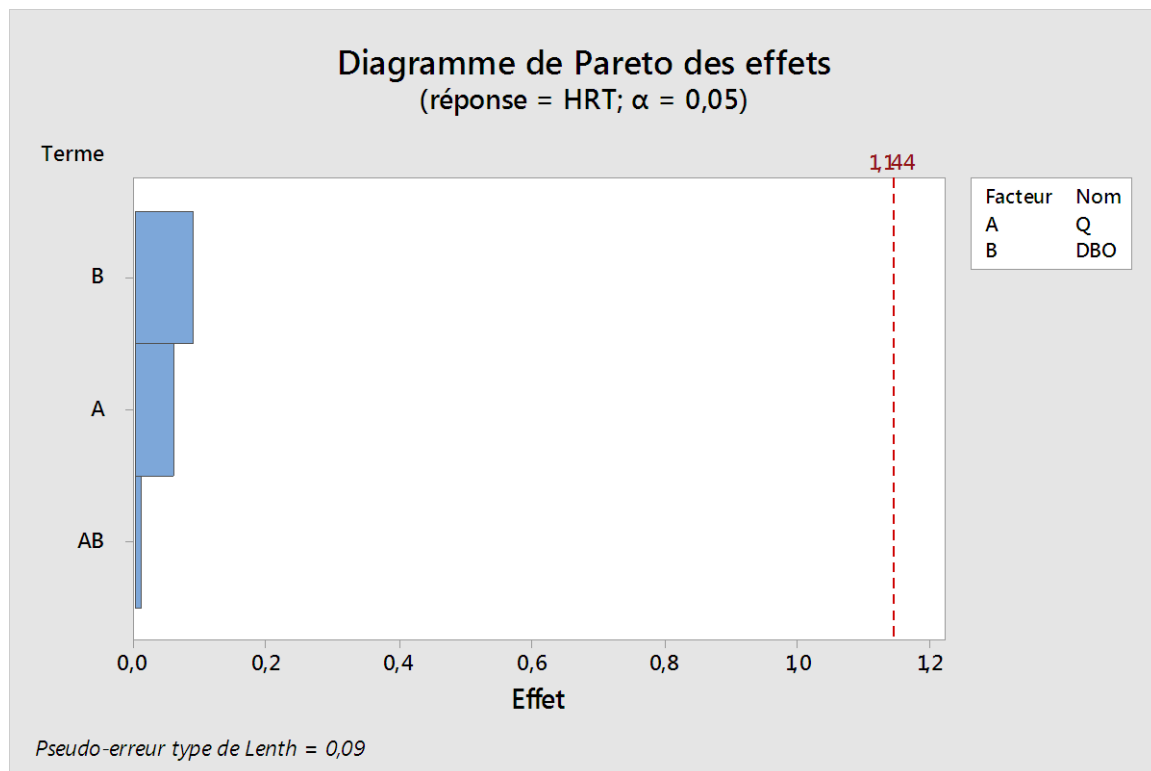


Fig.III. 6 : Diagramme de Pareto des effets (HRT)

D'après le diagramme de Pareto des effets, on trouve que les facteurs sont peut significatifs. Mais la DBO est plus influente que le débit. L'interaction des deux facteurs est faible.

III.2.4.1 Récapitulatif du modèle

S	R carré	R carré (ajust)	R carré (prév)
*	100,00%	*	*

Le coefficient d'ajustement du modèle est à 100% donc ce modèle empirique explique bien notre étude.

III.2.4.2 Equation de régression en unités non codées

$$\text{HRT} = 0,4667 + 0,009965 \text{ Q} - 0,003334 \text{ DBO} - 0,000059 \text{ Q*DBO}$$

Le modèle empirique qui décrit notre étude est une équation polynomiale du premier ordre.

III.2.4.3 Analyse de variance ANOVA

➤ Pour le débit Q

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Q	1	0,003600	0,003600	0,88	0,448
Erreur	2	0,008200	0,004100		
Total	3	0,011800			

D'après le tableau ANOVA on remarque que la valeur de la probabilité $p > 0,05$. Donc ce paramètre n'est pas significatif.

➤ Pour la DBO

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
DBO	1	0,008100	0,008100	4,38	0,171
Erreur	2	0,003700	0,001850		
Total	3	0,011800			

La valeur de la probabilité $p > 0,05$. Donc ce paramètre n'est pas significatif.

III.2.4.4 Graphique des effets principaux pour le Débit et DBO

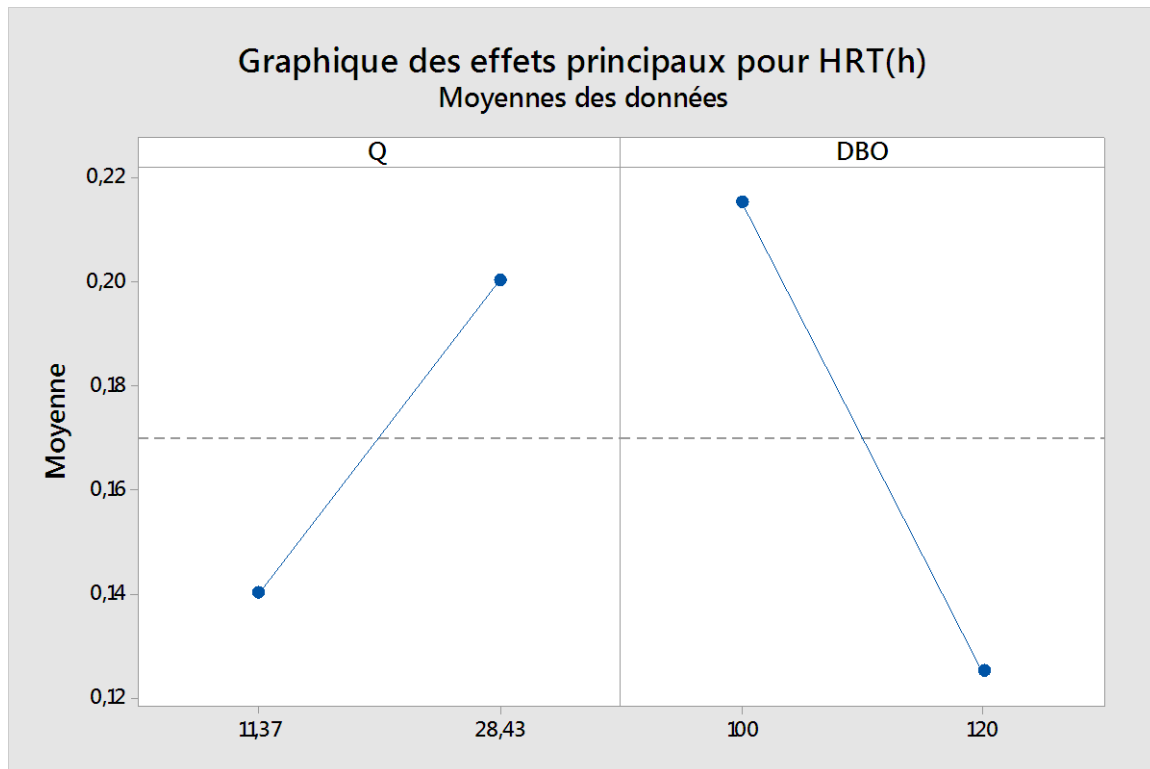


Fig.III. 7 : Graphique des effets principaux pour HRT

- Lorsque le débit augmente, la valeur de HRT augmente aussi
- La DBO est inversement proportionnelle par rapport à HRT.

III.2.4.5 Graphique de contour

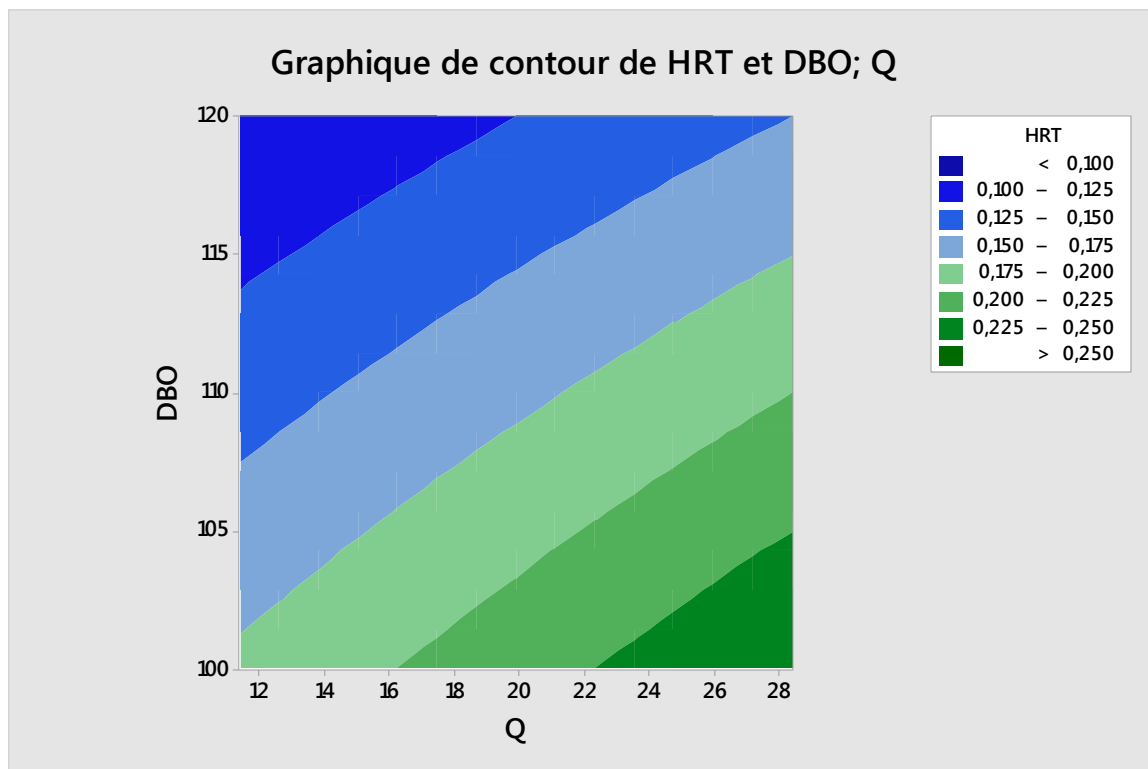


Fig.III. 8 : Graphique de contour HRT (DBO et Q)

➤ La zone en vert Foncé correspond au maximum de la réponse.

III.2.4.6 Optimisation des réponses

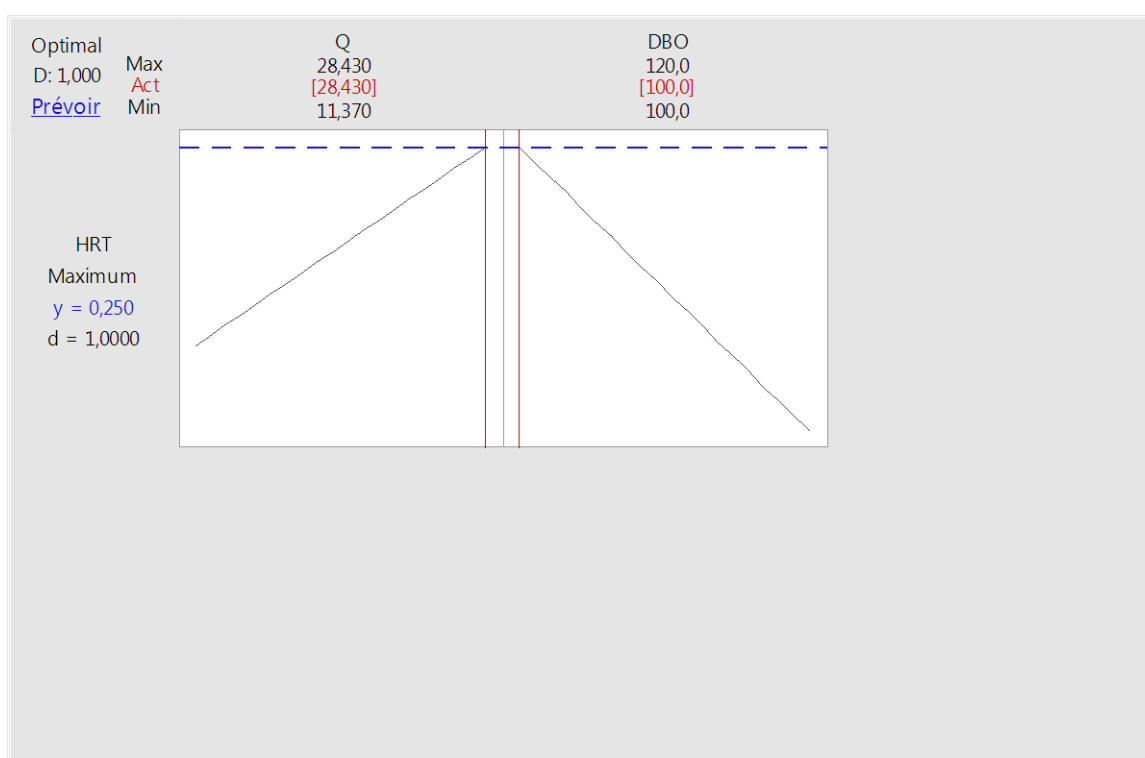


Fig.III. 9 : Optimisation des résultats

- Le maximum de la réponse pour ce modèle est optimisé à 0.25, elle est atteinte pour un débit de 28.43l/h et une DBO de 100.

Conclusion

La biofiltration est une technologie prometteuse pour le traitement des eaux usées basée sur l'assimilation de la matière organique par la biomasse fixée sur le support.

Le dispositif est relativement simple à construire et à exploiter.

Plusieurs matériaux organiques et inorganiques ont été utilisés comme support pour le développement des microorganismes. Seulement, on a choisi le matériau pouzzolane parce que c'est un matériau local et moins coûteux.

Les analyses physiques faites sur ce matériau a montré que ce dernier est léger ce qui explique sa densité faible.

Le pourcentage de capacité d'absorption d'eau à 24 heures est inférieur à celui cité par la littérature qui est 20 à 30% en poids du granulat sec.

Concernant la porosité, cette dernière varie avec le diamètre du granulat. Les grains les plus gros ont le coefficient le plus important.

Selon le modèle utilisé, il a été constaté que plus le temps de rétention et plus le taux d'élimination est important.

Il s'est avéré aussi que le facteur DBO est un facteur important.

Référence bibliographique

- [1] **Actualisation de l'étude de la station** d'épuration de la ville de tazmalt, mission A, ENHYD, juin 2004,
- [2] **MIRA Yasmin**, contribution a la conception de la station d'épuration d'ISOLA 2000, ENP, promotion 2007-2008
- [3] **BALEH Kahina**, mémoire, thème : conception de station d'épuration de la ville d'AZAZGA, (W.TIZI OUZOU), ENSH, novembre 2011
- [4] **GROSCLAUDE, (1999)**, L'eau : usage et polluant, Tome II .4ème Edition. INRA, Paris.
- [6] **C. BASSOMPIERRE, 2007**, procédés à boues activées pour le traitement d'effluents papetiers : de la conception d'un pilote à la validation de modèles, thèse doctorat automatique, Grenoble, Institut National Polytechnique de Grenoble, 232 p.
- [7] **J. BONTOUX, B. PICOT, 1994**, canada, volume 29, possibilités et limites des bassins lagunaires dans l'épuration des eaux usées.
- [8] **www.wikiwater.fr consulté le : 25/05/2019.**
- [9] : **D. BALLAY, J.F. BLAIS, 1998**, le traitement des eaux usées, revue des sciences de l'eau, université de Québec INRS-Eau, Terre et Environnement.
- [10] : **www.emse.fr, consulté le : 26/05/2019.**
- [11] : **F.Z. DEHBI, 2015**, étude comparative des performances d'un lit bactérien à garnissage en pouzzolane de beni Saf et d'un lit bactérien à garnissage plastique, mémoire Master, hydraulique, Tlemcen, université Abou Bakr Belkaid, 195 p.
- [13] : **DEGREMONT, 1978**, Mémento technique de l'eau, huitième édition, France, 1200 p, technique et documentation.
- [14] : **Guide des procédés extensifs d'épuration des eaux usées-** adoptés aux petites et moyennes collectivités, mise en oeuvre de la directive du conseil n° 91/271 du 1991, relative au traitement des eaux urbaines résiduaires (water guide).
- [15] : **www.slideshare.net, consulté le : 25/05/2019.**
- [16] **Biofilm reactor (Biofor)** - Experiments with different carbon sources. *Water Res.*, 32, 1463-1470.
- [17] **AZIMI S., V. ROCHER, C. PAFFONI, A. GONÇALVES et M. GOUSAILLES (2008)**. Dynamique de la colonisation du massif filtrant d'une unité de dénitrification des eaux usées par biofiltration. Houil. Blanc., soumis.

[18] PAFFONI C. (1997). Pertes de charge sur le prototype Biostyr® - Role de la charge eliminee en ammonium et de la temperature. Rapport d'etude, SIAAP, France, 14 p.

[19] <http://www.ciment.wikibis.com/pouzzolane.php> (consulté le 6-03-2015).

[20] Caractéristiques technique de la pouzzolane (<http://www.pouzzolanedugour.com/lesproduits/donneestechniques/index.html>) (consulte le 16/03/2015).