

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Blida 1



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biologie et Physiologie Cellulaire

**LABORATOIRE DE RECHERCHE : BIOTECHNOLOGIES,
ENVIRONNEMENT ET SANTE.**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master II

Option : « Ecosystème aquatique »

Thème :

**Evaluation physico-chimique et microbiologique des boues
résiduares de la station d'épuration de Beni-Mered en vue de
leur réutilisation dans l'épandage**

Présenté par :

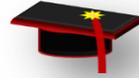
M^{lle} : HADJ SADOUK Loubna

Devant le jury composé de :

| | | | |
|------------------------------|------------|---------------------|---------------|
| Mr Bouriache M. | MCB | Université de Blida | Président |
| Mme Hamzi W. | MAA | Université Blida | Examinatrice |
| Mme Hamaidi F. | MCA | Université de Blida | Promotrice |
| M ^{lle} Benmoumou S | Doctorante | Université Blida | Co-promotrice |

Promotion 2018/2019

Remerciement



Tout d'abord je voudrais remercier Mr Bouriache M de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'évaluer mon travail de mémoire et d'en être le président de jury de cette soutenance.

Je tiens à remercier également Mme Hamzi W, de l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant d'être l'examinatrice de ce mémoire.

J'adresse tous mes remerciements à ma promotrice, Mme Hamaidi F, Je lui suis reconnaissante pour ces précieux conseils, je lui exprime toute ma gratitude pour ça confiance, sa disponibilité et ses réponses à mes nombreuses sollicitations. C'est un privilège qu'elle m'a accordé en étant la promotrice.

Je tiens à remercier également ma co-promotrice M^{lle} Benmoumou S, pour le temps qu'elle a consacré et pour les précieuses informations qu'elle m'a prodiguées avec intérêt et compréhension.

Un spécial remerciement va à Mme Boulahbel responsable de laboratoire au sein de l'INRA pour sa qualité humaine et son énorme patience et gentillesse, je la salue également pour son aide et ses conseils, qu'elle a bien voulu consacré à ce mémoire.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements également à Mr Derias le directeur de la station de Beni-Mered et aux personnel de laboratoire : M^{lle} Derbel. M, Mme Gherbi.F, Mrs Gheris. L, auprès desquelles j'ai trouvé l'accueil chaleureux, l'aide et l'assistance dont j'ai besoin.

Mes remerciements vont à Mr Tafahi personnel au sein de laboratoire d'hygiène de Blida et Mme Saliha au sein de laboratoire d'hygiène de Boufarik.

Dédicace



Je dédie ce travail :

A ma chère mère,

A mon cher père,

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler
pour que je puisse atteindre mes objectifs.*

A mes chères sœurs : Houhou, Didi et Marwa

A mon frère : Oussama

A ma cousine : Nour el Houda

Pour leurs soutiens moraux et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

A mes chères Loulou et Wissem

Pour leur indéfectibles soutiens et leurs aides.

A mes chères amies : Nour el kouloub, Mimi, Kami, Mahdia, Zineb, Ines

Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

A toute ma famille

A toute mes autres ami(e)s.

*Je voudrai enfin exprimer toute mon affection à tous ceux qui me connaissent de près ou de
loin et à qui je dédie ce modeste travail. Tout mon souhait est d'être à la hauteur de leur
espérance en moi.*

RESUME

Cette étude consiste à examiner pour la première fois la possibilité de l'épandage des boues résiduaires issues de la station d'épuration de Béni-Mered. Elle vise comme principal objectif l'évaluation physico-chimique et microbiologique de ces boues. Les résultats obtenus ont montré que les boues résiduaires de la station de traitement des eaux usées de Beni-Mered présentent des teneurs appréciables en éléments fertilisants azotés (2,3%) et phosphorés (0,05%), une importante concentration en carbone organique total (39.2%) et un pH légèrement basique (7,9%) ont été enregistré. Les concentrations en métaux lourds (Ni, Cu, Cd, Pb et le Zn) sont inférieures aux valeurs limites. Ainsi que les mesures effectuées ont montré des taux élevés en matière organique total allant jusqu'à 78,4%, avec un rapport C/N de 17,15%.

Cependant l'analyse microbiologique a enregistré des concentrations non négligeables en coliformes totaux, streptocoques fécaux, clostridium sulfite-réducteurs atteignent respectivement 96×10^3 , $86,43 \times 10^4$, 183×10^3 germes/ 100ml, avec la mise en évidence par observation microscopique des œufs d'helminthes et de kystes de protozoaires.

Mot clés : Boues résiduaires, STEP Béni-Mered, Paramètres physico-chimiques, Paramètres microbiologiques.

Abstrats

This study consists of examining for the first time the possibility of spreading wastewater sludge from the Beni-Mered wastewater treatment plant. Its main objective is the physico-chemical and microbiological evaluation of these sludges. The results obtained showed that the wastewater sludge from the Beni-Mered wastewater treatment plant has significant levels of nitrogen (2.3%) and phosphorus (0.05%) nutrients, a high concentration of total organic carbon (39.2%) and a slightly basic pH (7.95). Concentrations of heavy metals (Ni, Cu, Cd, Cd, Pb and Zn) are below the limit values. As well as the measurements carried out have shown high levels of total organic matter up to 78.4%, with a C/N ratio of 17.15%.

However, microbiological analysis recorded significant concentrations of total coliforms, faecal streptococci, clostridium sulfito-reducor reach 96×10^3 , $86,43 \times 10^4$, 183×10^3 germs/100ml, respectively, with the detection by microscopic observation of helminth eggs and protozoon cysts.

Keywords: wastewater sludge, STEP Béni-Merad, Physic-chemical parameters, microbiological parameters.

ملخص

تهدف هذه الدراسة لأول مرة إلى إمكانية النثر الزراعي للحماة من محطة معالجة مياه الصرف الصحي لبني مراد، هدفها الرئيسي هو التقييم الفيزيائي والميكروبيولوجي لهذه الحماة.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أنّ حماة النفايات الناتجة عن محطة معالجة مياه الصرف الصحي ببني مراد تحتوي على مستويات ملحوظة من المغذيات النيتروجينية (2.3%) والفوسفورية (0.05%)، ونسبة عالية من الكربون العضوي الإجمالي (39.2%) ودرجة حموضة قاعدية قليلة (7.95)، أما تركيزات المعادن الثقيلة (Pb، Cd، Cu، Ni، Zn) فهي أقل من القيم الحدية. وكذلك أظهرت القياسات - التي أجريت - مستويات عالية من إجمالي الكربون العضوي تصل إلى 78.4%، مع نسبة C / N 17.15%.

ومع ذلك سجل التحليل الميكروبيولوجي تركيزات كبيرة في القولونيات الكلية، والعقديات البرازية، ومخفضات الكبريتات اللاهوائية تصل بالترتيب إلى $10^3 \times 96$ ، $10^4 \times 86,43$ ، $10^3 \times 183$ جراثيم / 100 مل، مع تسليط الضوء على ملاحظة بيض الديدان الطفيلية المجهرية وكيسات البروتوزوان.

الكلمات المفتاحية: حماة النفايات، محطة تطهير المياه ببني مراد، القياسات الفيزيائية والكيميائية، القياسات الميكروبيولوجية.

TABLE DE MATIERE

Remerciement

Dédicace

RESUME

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION.....1

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

I. ORIGINE ET CARACTERISTIQUES DES BOUES RÉSIDUAIRES

I.1. Origine et définition des boues résiduaires.....2

I.2 Différents types de boues résiduaires.....2

I.3. Paramètres des boues résiduaires5

I.3.1. Paramètres physiques.....5

I.3.2. Paramètres chimiques.....6

I.3.3. Paramètres biologiques.....7

II. TRAITEMENT DE BOUES

II.1. Procédés de traitement.....10

II.1.1. Epaississement.....10

II.1.2. Stabilisation et hygiénisation.....11

II.1.3. Conditionnement.....12

II.1.4. Déshydratation.....13

II.2 Différentes vois de valorisation et d'élimination boues.....14

III. EPANDAGE DES BOUES :

III.1. Définition de l'épandage.....16

III.2. Processus d'épandage.....16

III.3. Intérêts de l'épandage des boues de stations d'épuration.....16

III.3.1. Valeur agronomique des boues d'épuration.....16

III.3.2. Valeur environnementale et sanitaire.....17

III.3.3. Valeur économique.....18

| | |
|--|----|
| III.4. Limites et contraintes liés à l'épandage des boues..... | 18 |
| III.4.1. Qualité des boues..... | 18 |
| III.5. Aspect règlementaire..... | 19 |

PARTIE EXPERIMENTALE

I. MATERIEL ET METHODES

| | |
|--|----|
| I.1. Présentation de la station d'épuration..... | 21 |
| I.2. Matériel..... | 23 |
| I.2.1. Matériel biologique..... | 23 |
| I.2.2 Matériel non biologique..... | 23 |
| I.3. Méthodes..... | 24 |
| I.3.1. Procédure d'échantillonnage..... | 24 |
| I.3.2. Analyses physico-chimiques..... | 26 |
| I.3.2.1. Paramètres physiques..... | 26 |
| I.3.2.2. Analyses chimique..... | 28 |
| I.3.3. Paramètres Microbiologiques..... | 33 |
| I.3.3.1. Paramètres bactériologiques..... | 34 |
| I.3.3.2. Recherche des parasites..... | 42 |
| I.3.4. Analyses des métaux lourds..... | 42 |

II. RESULTATS ET DISCUSSION

| | |
|--|----|
| II.1. Paramètres physico-chimiques..... | 44 |
| II.1.1. Paramètres physiques..... | 44 |
| II.1.2. Paramètres chimiques..... | 47 |
| II.2. Paramètres microbiologiques..... | 53 |
| II.2.1. Paramètres bactériologiques..... | 54 |
| II.2.2. Paramètres parasitologiques..... | 60 |

| | |
|------------------------|-----------|
| CONCLUSION..... | 66 |
|------------------------|-----------|

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

ABREVIATIONS

| | | |
|-------|---|--|
| AFNOR | : | Association Française de normalisation |
| BCPL | : | Bouillon lactosé au pourpre de bromocrésol |
| COT | : | Carbone Organique Total |
| CE | : | Conductivité Electrique |
| C/N | : | Carbone / Azote |
| CTO | : | Composées Trace Organiques |
| D/C | : | Double Concentration |
| ETM | : | Eléments Trace Métalliques |
| HAP | : | Hydrocarbures Aromatiques Polycyclique |
| INRA | : | Institut National de Recherche Agronomique |
| K | : | Potassium |
| MES | : | Matières En Suspension |
| MO | : | Matières Organiques |
| MS | : | Matières Sèche |
| MVS | : | Matières Volatiles Sèche |
| NPP | : | Nombre le Plus Probable |
| ONA | : | Office National d'Assainissement |
| pH | : | Potentiel d'Hydrogène |
| PCB | : | Polychlorés Ciphényles |
| PT | : | Phosphore Total |
| STEP | : | Station de Traitement des Eaux Polluées |
| S | : | Siccité |
| S/C | : | Simple Concentration |

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|----------------------|---|--------|
| Tableau I | Différents types de boues produites dans une station d'épuration | 4 |
| Tableau II | Principaux agents pathogènes d'intérêt sanitaire pouvant être retrouvés dans les boues des stations d'épurations. | 8 |
| Tableau III | Valeurs limites et flux maximum en éléments-traces minéraux définis par l'arrêté du 8/01/1998 | 18 |
| Tableau IV | Valeurs limites et flux maximum des composés-traces organiques dans les boues, fixées par l'arrêt du 8/01/1998 | 19 |
| Tableau VII | Siccité à atteindre dans chaque ouvrage de la filière de traitement des boues | 23 |
| Tableau VIII | Date de prélèvement des échantillons étudiés | 24 |
| Tableau IX | Volume à introduire pour la préparation des solutions d'étalonnage | 32 |
| Tableau X | Résultat des valeurs du pH des boues de la STEP | 44 |
| Tableau XI | Résultats des taux d'azote total dans les boues de la STEP | 47 |
| Tableau XII | Taux de phosphore total dans les boues de la STEP | 48 |
| Tableau XIII | Teneur des boues de la STEP e potassium total | 49 |
| Tableau XIV | Teneur des boues de la STEP en carbone organique total | 50 |
| Tableau XV | Teneur de matières organiques total contenant dans les boues de la STEP | 50 |
| Tableau XVI | Rapport C/N présent dans les boues de la STEP | 52 |
| Tableau XVII | Teneur en éléments traces métalliques(ETM) des boues de la STEP | 53 |
| Tableau XVIII | Teneurs des coliformes dans les boues de la STEP de Beni-Mered | 54 |
| Tableau XIX | Teneurs des Streptocoques fécaux dans les boues de la STEP de Beni-Mered | 55 |
| Tableau XX | Teneurs des spores <i>des Clostridium sulfito-réducteurs</i> dans les boues de la STEP | 56 |
| Tableau XXI | Résultats de recherche des salmonelles dans les boues de la STEP | 57 |
| Tableau XXII | Résultats de recherche des staphylocoques dans les boues de la STEP de Beni-Mered | 58 |
| Tableau XXIII | Résultats d'analyse parasitologique | 61 |
| Tableau XXIV | Espèces des parasites déterminés dans les boues de la STEP | 63 |
| Tableau XXV | COT% points de gamme | Annexe |
| Tableau XXVI | PT % des points de gamme | Annexe |

| | | |
|-----------------------|---|--------|
| Tableau XXVII | K% des points de gamme | Annexe |
| Tableau XXVIII | Norme AFNOR des paramètres chimiques des boues résiduaires | Annexe |
| Tableau XXIX | Norme AFNOR des paramètres microbiologiques des boues résiduaires | Annexe |
| Tableau XXX | Table de Mac Grady | Annexe |

LISTE DES FIGURES

| | | |
|------------------|--|--------|
| Figure 1 | Etapes d'une filière de traitement des eaux | 3 |
| Figure 2 | Filières de traitement des boues. | 10 |
| Figure 3 | Station d'épuration de Beni-Mered | 22 |
| Figure 4 | Protocole préliminaire pour l'analyse de boue. | 25 |
| Figure 5 | Préparation des suspensions de dilution des boues | 34 |
| Figure 6 | Recherche et dénombrement des coliformes sur milieu liquide (Test de présomption) | 35 |
| Figure 7 | Recherche et dénombrement des coliformes sur milieu liquide (Test de confirmation) | 36 |
| Figure 8 | Recherche et dénombrement des Streptocoques fécaux (Test de présomption) | 37 |
| Figure 9 | Recherche et dénombrement des Streptocoques Fécaux (Test de confirmation) | 38 |
| Figure 10 | Recherche et dénombrement des anaérobies sulfito-réducteurs | 39 |
| Figure 11 | Recherche des Salmonelles | 41 |
| Figure 12 | Conductivité électrique des boues de la STEP | 45 |
| Figure 13 | Siccité des boues de la STEP | 46 |
| Figure 14 | Taux de MVS dans les boues de la STEP | 47 |
| Figure 15 | Présence d' <i>Escherichia coli</i> confirmé par l'apparition d'anneau rouge | 54 |
| Figure 16 | Virage de couleur de milieu et confirmation de la présence des <i>Streptocoques fécaux</i> | 56 |
| Figure 17 | Mise en évidence des spores des <i>Clostridium</i> sulfito-réducteurs | 57 |
| Figure 18 | Observation macroscopique des colonies jaunâtres de staphylocoque | 58 |
| Figure 19 | Observation microscopique des colonies de staphylocoques sous forme de grappes de raisin | 58 |
| Figure 20 | Processus d'épuration de la station d'épuration de Beni-Mered | Annexe |
| Figure 21 | Point de gamme de carbone organique total | Annexe |
| Figure 22 | Courbe d'étalonnage carbone organique total | Annexe |
| Figure 23 | Courbe d'étalonnage de phosphore total | Annexe |
| Figure 24 | Points de gamme de phosphore total | Annexe |
| Figure 25 | Points de gamme de potassium | Annexe |

| | | |
|------------------|----------------------------------|--------|
| figure 26 | Courbe d'étalonnage de potassium | Annexe |
| Figure 27 | Echelle de la salinité | Annexe |

INTRODUCTION

Jusqu'à très récemment, l'impact environnemental d'une station d'épuration était défini par la qualité des eaux rejetées en fin de filière. Les produits résiduels de dépollution étaient alors simplement mis en décharge. Aujourd'hui, ces sous-produits font intégralement partie de la filière de dépollution, et, à ce titre, l'exploitant de la station d'épuration est désormais entièrement responsable de leur devenir (**BAUDEZ *et al.*, 1998**).

En Algérie, la quantité des boues produites annuellement reste malheureusement méconnue, mais, le volume global d'eaux usées rejetées annuellement est évalué par l'Office National d'Assainissement à près de 600 millions de m³. Ce chiffre passerait à près de 1,150 millions de m³ à l'horizon 2020 (**LADJEL et ABBOU, 2014**).

Dans le contexte actuel de protection de l'environnement, l'élimination des boues d'épuration constitue un des enjeux majeurs pour notre pays. Les principaux procédés actuellement utilisés pour disposer des boues sont l'incinération, la mise en décharge et la fertilisation agricole ou forestière. De toutes ces solutions de disposition des boues, seules celles prévoyant leur épandage sur les terres agricoles ou forestières peuvent être considérées comme définitives, les autres solutions ne font que déplacer le problème de la pollution (**COUILLARD, 1989**).

L'épandage agricole des boues de station d'épuration est une méthode de gestion d'un grand intérêt pour faire face à l'augmentation importante des quantités de boues résiduelles générées par le traitement des eaux usées municipales. De plus, la valorisation agricole contribue à la réintégration des éléments minéraux et organiques dans les sols, ce qui permet de se rapprocher des cycles naturels. En effet, les boues présentent les caractéristiques d'un amendement organique bien pourvu en matière organique, azote, phosphore, ainsi qu'en oligo-éléments nécessaires à la préparation et la fertilisation des sols. Toutefois, leurs teneurs élevées en métaux lourds, ainsi que la présence de micro-organismes pathogènes, posent de sérieuses contraintes face à cette pratique (**BENMOUSSA *et al.*, 1997**).

L'étude que nous présentons est une contribution à l'étude des boues résiduelles de la station d'épuration de Beni-Mered en vue de leur réutilisation dans l'épandage. Le travail a pour objectifs :

- Evaluation physico-chimiques des boues de la station d'épuration de Beni-Mered.
- Caractérisation microbiologique et les risques sanitaires liés à l'épandage des boues résiduelles de la STEP de Beni-Mered.

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

I. ORIGINE ET CARACTERISTIQUES DES BOUES ACTIVEES

I.1. ORIGINE ET DEFINITION DES BOUES REDUAIRES

L'épuration des eaux usées s'effectue en différentes étapes selon des techniques basées sur des lois de la physique, de la chimie et de la biologie (**Figure 1**). Il en résulte une eau épurée que l'on rejette dans le milieu naturel et un résidu principal : les boues (**DEPRES et al., 2008**).

Les Boues des stations d'épuration désignent l'ensemble des résidus de l'activité biologique des micro-organismes vivant dans les stations d'épuration, qui transforment les matières transportées par les eaux usées pour qu'elles puissent en être extraites. Elles sont constituées essentiellement d'eau, de sels minéraux et de matière organique (**LADJEL et ABBOU, 2014**).

Schématiquement, il existe deux grandes catégories des boues résiduaires :

- Les boues urbaines : elles résultent du traitement des eaux usées d'origine domestique (activités des particuliers).
- Les boues industrielles : elles résultent du traitement des eaux usées issues des industries, leurs caractéristiques sont évidemment liées à la nature des activités industrielles concernées (**OTV, 1997**).

I.2. DIFFERENTS TYPES DE BOUES RESIDUAIRES

Au niveau de la station d'épuration des eaux usées, les boues sont formées à chacune des étapes de l'assainissement des eaux usées, mais principalement par les traitement primaires et secondaires (**JARDE, 2002**) (**Tableau I**).

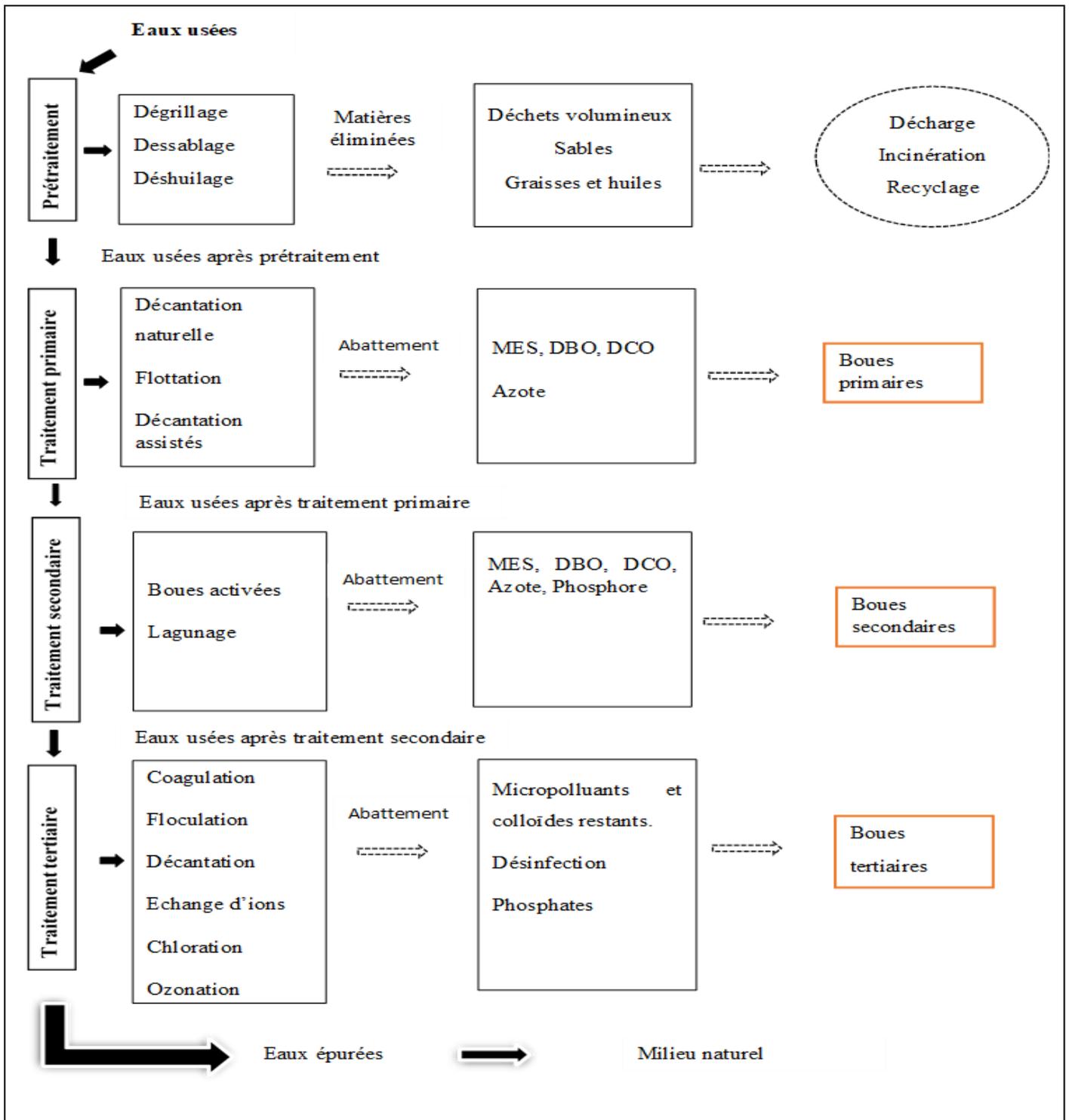


Figure 1 : Etapes d'une filière de traitement des eaux (BASSOMPIERRE, 2007).

Tableau I : Différents types de boues produites dans une station d'épuration

| Type de boues | Origine | Concentration (g/l) | Taux de matières organiques (%) | Références |
|-----------------------------|---|---------------------|---------------------------------|----------------|
| Les boues primaires | Obtenues au niveau du décanteur primaire par séparation physiques des matières en suspension décantables organiques et minérales. | 50 | 50 à 70 | (SATIN, 2006) |
| Les boues physico-chimiques | Engendrées par la formation d'un complexe entre la quasi-totalité de la pollution particulaire et colloïdale, de l'eau et le réactif injecté. | 10 à 60 | 40 à 65 | (KOLLER, 2009) |
| Les boues biologiques | Proviennent essentiellement de la dégradation des substances organiques par les micro-organismes contenus dans les eaux à traiter et cultivé à cet effet. | 20 à 30 | 50 à 70 | (ADDOU, 2009) |
| Les boues mixtes | Mélange de boues primaires et de boues activées ou boues provenant de lits bactériens. | / | / | (ADDOU, 2009) |

I.3. PARAMETRES DES BOUES ACTIVEES

I.3.1. Paramètres physiques

Pour leur traitement ultérieur, il est nécessaire de connaître plusieurs paramètres qui définiront leur aptitude à la déshydratation et à la filtration (**GAMRASNI, 1981**).

- **pH, température, et conductivité**

Ces paramètres n'ont pas de valeur prédictive dans le traitement des boues mais ils permettent de mettre en évidence un dysfonctionnement de type vieillissement ou acidification d'une boue (**VALENTIN, 2012**).

- **Siccité (S)**

La siccité est le pourcentage massique de matière sèche contenant dans les boues. Une boue avec une siccité de 10 % présente une humidité de 90% (**ASMAHANE, 2011**).

- **Matière volatile sèche MVS**

On mesure cette teneur par la différence entre le poids de boue sèche (105C°), et celui de cette même boue après chauffage jusqu'au poids constant à 550C°. Cette teneur varie de 60 à 85% des matières sèches (**GAMRASNI, 1981**).

- **Matière en suspension MES**

Il s'agit de mesurer le poids de résidus sec après chauffage à 105 C° jusqu'au poids constant. On l'exprime généralement en pourcentage, celui-ci varie de 3 à 8% de matières sèches (**GAMRASNI, 1981**).

- **Teneur en eau**

L'eau contenue dans les boues se trouve sous deux formes :

- Une eau libre qui s'élimine facilement par filtration ou par décantation.
- Et une eau liée contenue dans les molécules chimiques, les substances colloïdales et les cellules des matières organiques qui ne s'élimine que par la chaleur (**RAMDANI, 2007**).

I.3.2. Paramètres chimiques

✚ Matière organique

La matière organique prépondérante dans les boues activées, est constituée généralement de polymères (cellulose, lignine), de polysaccharides, d'acides aminés, de protéines, d'acides humiques et de lipides. (**BENOUDJIT, 2016**). La connaissance de la composition élémentaire de la boue en terme de C, H, O, N, S permet de déterminer l'aptitude d'une boue à être dégradée biologiquement (digestion anaérobie avec production de biogaz) ou thermiquement (incinération) (**VALENTIN, 2012**).

En général, les boues qui résultent de traitement biologique contiennent une teneur en matières organiques qui varie entre 60 à 85% de matières sèches (**GAMRASNI, 1981**).

✚ Matière minérale

Silice, alumines, carbonate et phosphate constituent les éléments les plus couramment rencontrés. Carbonate et phosphate ont ainsi leur importance pour préciser la qualité agricole d'une boue épandue (**VALENTIN, 2012**).

✚ Eléments nutritifs

Il s'agit des teneurs en azote total, phosphore et potassium. Des substances qui favorisent la croissance des plantes et donc qui ont une très grande importance dans l'utilisation agricole des boues (**GAMRASNI, 1981**).

✚ Micropolluants minéraux

La présence des métaux lourds dans les boues est variable, due principalement aux rejets industriels (**JOURAIPHY, 2007**).

Certains de ces éléments sont indispensables au développement des végétaux et des animaux et peuvent se révéler toxiques à fortes doses, tandis que d'autre sont potentiellement toxiques (**AMIR, 2005**).

✚ Micropolluants organiques

Il existe des composés non toxiques qui constituent la plus grande proportion de cette matière, cela comprend toute les matières d'origine animale et végétale (protéines, les acides

aminés, les sucres et les graisses). Ainsi que des composés toxiques qui sont de nature très diverse. Les groupes les plus représentatifs dans les boues, sont les hydrocarbures aromatiques polycyclique (HAPs), les pesticides, les composés aliphatiques halogénés, les chlorobenzènes, composés organiques volatiles (COT) (**JOURAIPHY, 2007**).

I.3.3 Paramètres biologiques

Les boues activées renferment des bactéries, des protozoaires et des parasites (**Tableau II**).

Tableau II : Principaux agents pathogènes d'intérêt sanitaire pouvant être retrouvés dans les boues des stations d'épurations.

| Groupe | Genre | Pathologie | Durée de survie dans le sol | Durée de survie sur les plantes cultivées |
|-------------------------|---|--|-----------------------------|---|
| BACTERIES | <i>Salmonella sp.</i> | Salmonellose | 70 à 20 jours | 30 à 20 jours |
| | <i>Shigella sp.</i> | Dysenterie bacillaire | / | / |
| | <i>Yersinia sp.</i> | Gastro-Entérite | / | / |
| | <i>Vibrio cholerae</i> | Choléra | 20 à 10 jours | 5 à 2 jours |
| | <i>Campylobacter jejuni</i> | Gastro-Entérite | | |
| | <i>Escherichia coli</i> (souches pathogènes). | Gastro-Entérite | 70 à 20 jours | 30 à 50 jours |
| VIRUS ENTERIQUES | Virus de l'hépatite A et E | Hépatite infectieuse | 100 à 20 jours | 60 à 15 jours |
| | Virus de Norwalk et apparentés. | Gastro-Entérite | | |
| | Rotavirus | Gastro-Entérite | | |
| | Entérovirus : - Poliovirus. - Coxsackievirus - Echovirus | Poliomyélite Méningite, pneumonie, hépatite Méningite, paralysie, diarrhée | | |

| | | | | |
|--|------------------------------|--|------------------|---------------|
| | Réovirus | Infection respiratoire, gastro-entérite | | |
| | Astrovirus | Gastro-Entérite | | |
| | Calicivirus | Gastro-Entérite | | |
| | Protozoaires | | | |
| | <i>Cryptosporidium sp</i> | Gastro-Entérite | / | / |
| | <i>Giardia intestinalis</i> | Diarrhée | / | / |
| | <i>Entamoeba histolytica</i> | Dysenterie | 70 à 10 jours | 10 à 20 jours |
| | <i>Balantidium coli</i> | Diarrhée et dysenterie | / | / |
| | <i>Toxoplasma gondii</i> | Toxoplasmose | | |
| | Helminthes | | De nombreux mois | 60 à 30 jours |
| | <i>Ascaris lumbricoïdes</i> | Troubles gastro-intestinaux | | |
| | <i>Trichuris trichiura</i> | Diarrhée, douleurs abdominales. | / | / |
| | <i>Toxocara sp</i> | Diarrhée, douleurs abdominales | / | / |
| | <i>Taenia sp</i> | Nervosité, insomnie, troubles digestifs, anorexie. | De nombreux mois | 30 à 60 jours |
| | <i>Hymenolepis</i> | Nervosité, insomnie, troubles digestifs, anorexie | / | / |

(CONSEIL SUPERIEUR DEHYGENE PUBLIQUE DU FRANCE, 1998)

II. TRAITEMENT DE BOUES

Le traitement de boues a pour objectif de réduire la fraction organique afin de diminuer le pouvoir fermentescible des boues et les risques de contamination (stabilisation), et de diminuer le volume total des boues afin de réduire leur coût d'évacuation (déshydratation) (SATIN, 2006).

II.1. PROCEDE DE TRAITEMENT

La figure ci-dessous résume les principales étapes de traitement des boues :

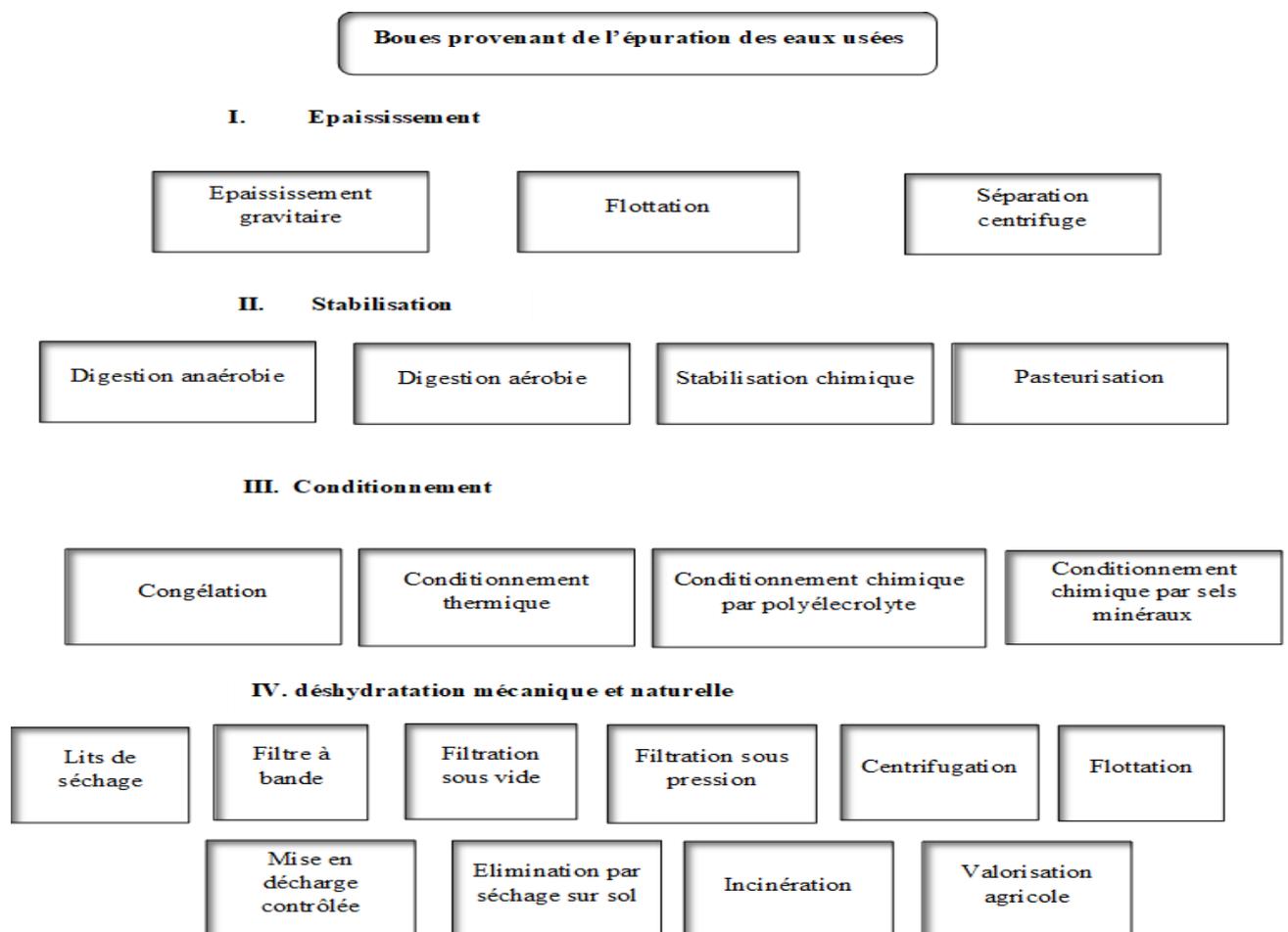


Figure.2 Filières de traitement des boues (RAMDANI, 2007).

II.1.1. Epaisissement

Le premier stade de la déshydratation est l'épaissement induisant une réduction importante du volume des boues issues des traitement biologiques ou physico-chimique des

effluents urbains (SATIN, 2006). Son principe consiste à enlever une partie plus ou moins importante de l'eau contenue dans les boues (OUANOUKI, 2014).

L'épaississement vise donc à augmenter la siccité des boues, soit leur teneur en matière sèche (5%) (MOLETTA, 2003), sans modifier le caractère liquide des boues (CERRA *et al.*, 2014). Il existe plusieurs techniques :

Epaississement gravitaire : la décantation (ou sédimentation)

La boue est introduite dans un épaisseur qui permet de concentrer la boue au fond de l'ouvrage (OUANOUKI, 2014). L'épaisseur est alors considéré comme un décanteur, puis sous l'action de la pesanteur, la teneur des boues en matière sèche progresse. Il s'agit d'une sédimentation (CARDOT, 1999). La siccité des boues à la sortie de ce procédé varie de 2 à 10% selon la nature des boues traitées (AMORCE, 2012).

Epaississement dynamique

Les procédés d'épaississement dynamique ou mécanique sont composés de diverses techniques (CERRA *et al.*, 2014) :

- Flottation et centrifugation : ont l'avantage d'être des procédés rapides par rapport à la décantation et réalisé dans des installations compactes surtout avec les matières en suspension (MES) de faible décantabilité (siccité de 3,5-5%) (AMORCE, 2012).
- Égouttage : utilisé pour des petites STEP, souvent avec des boues biologiques d'aération prolongée (CERRA *et al.*, 2014).

II.1.2. Stabilisation et hygiénisation

La stabilisation est concrètement obtenue en ralentissant, voire en supprimant, la biodégradation des matières organiques de la boue, à travers différentes voies, biologiques, chimiques, ou physiques, avant (phase liquide) ou après (phase pâteuse) l'étape de déshydratation. Cette étape s'attaque à la matière organique et permet l'hygiénisation des boues ainsi que la réduction du volume de boues (VALENTIN, 2012).

Il existe trois grands types de stabilisation :

Stabilisation biologique : (digestion aérobie ou anaérobie, compostage)

- a) Digestion aérobie : consiste à une aération prolongée des boues qui favorise l'auto oxydation de la matière organique jusqu'à dépasser la période de synthèse des cellules (**SATIN, 2006**).
- b) Digestion anaérobie : réaliser par fermentation méthanique des boues dans des cuves fermées (digesteur), à l'abri de l'air, permet d'atteindre des taux de réduction des matières organiques de 45 à 50% (**KOLLER, 2004**).
- c) Compostage : basé sur le principe du compostage des fumiers agricoles. L'opération s'effectue en milieu aéré, ce qui permet de délivrer un produit sans nuisances olfactives (**OTV, 1999**).

Stabilisation chimique

Elle est obtenue soit par adjonction massive de chaux aux boues (**KOLLER, 2004**), qui par augmentation du pH, bloque les fermentations (**SATIN, 2006**), soit par une stabilisation aux nitrites étant réalisée sur boue épaissie, les nuisances olfactives sont éliminées dès le début de la filière (la boue peut ensuite être stockée plusieurs mois sans dégager d'odeurs) (**OTV, 1997**).

Stabilisation physique

Elle peut être assurée par pasteurisation des boues liquides (70°C pendant 30minutes), par séchage thermique (80 à 100°C), ou par autoclavage (180 à 220 °C) (**KOLLER, 2004**). Cette technique a pour but de dégrader la matière organique (MO) partiellement oxydée et adsorbée sur les floccs en présence d'oxygène (**AMORCE, 2012**).

II.1.3. Conditionnement

Le conditionnement des boues est obtenu par l'application de plusieurs principes physiques, chimiques et thermiques (**SATIN, 2006**). Il a pour objet de réduire entre autre la stabilité colloïdale des espèces particulières, de favoriser la libération d'eau ou de réduire l'énergie de liaison avec les espèces particulières (**CERRA et al., 2014**), afin d'assurer la floculation de la boue pour faciliter le drainage, la filtration ou la centrifugation, ce qui optimise la déshydratation. (**SATIN, 2006**). Il peut être obtenu par :

✚ Conditionnement chimique

Ce type de conditionnement, par apport d'électrolytes minéraux qui conduit à la formation d'un floc relativement fin et sable ou de polyélectrolytes organiques conduit à la formation de floccs volumineux assez fragiles (**CERRA *et al.*, 2014**) (**SATIN, 2006**).

✚ Conditionnement thermique

Il consiste à un échauffement de la boue à une température variant entre 160 et 260°C conduit à une transformation irréversible de sa structure en libérant la majeure partie de l'eau liée ou combinée à la matière boueuse (pendant 30 à 90 minutes) (**CERRA *et al.*, 2014**).

II.1.4. Déshydratation

La déshydratation constitue une étape majeure de la filière de traitement, car la siccité obtenue est déterminante pour la suite du traitement (**OTV, 1997**). Elle s'opère sur des boues épaissies, stabilisées ou non, en vue d'une élimination plus ou moins poussée de leur humidité résiduelle, de manière à les rendre soit pelletables (siccité de 16% à 30%), soit solides (siccité supérieure à 30 %) (**SATIN, 2006**). Il existe plusieurs techniques de déshydratation mécanique :

✚ La filtration

- a) Filtration sous vide : la filtration sous vide constitue le procédé de déshydratation traditionnel (**KOLLER, 2004**), c'est une technique très bien maîtrisée et fiable. (**SATIN, 2006**). La filtration sous vide déshydrate une suspension par application du vide à travers un milieu poreux qui retient les matières solides mais permet au liquide de le traverser (**ECKENFELDER, 1982**).
- b) Filtration sous pression (filtres presses) : la filtration sous pression met essentiellement en œuvre le filtre-presse. C'est une technique de déshydratation qui consiste à exercer mécaniquement une forte pression sur la boue, Cette dernière libère l'eau interstitielle au travers d'un filtre. Il se forme alors, avec les solides retenus, un « gâteau » plus ou moins sec (**AMORCE, 2012**). La filtration à bande est la technique la plus utilisée pour la

déshydratation mécanique des boues dans les petites stations d'épurations (la filtration des boues entre deux toiles filtrantes mobiles entraînées par des rouleaux au sein d'une enceinte ouverte) (**CERRA et al., 2014**).

La centrifugation

La centrifugation est appliquée à la fois en épaissement et en déshydratation des boues résiduelles (**ECKENFELDER, 1982**). Qui est l'accélération de la sédimentation des particules sous l'incidence de forces centrifuges par le biais d'une séparation des phases liquides-solides (**OUANOUI, 2014**). Il existe notamment d'autres procédés tel que : panier rotatif, presseur fourrier, sacs filtrants. (**CERRA et al., 2014**).

Le Séchage

Le séchage consiste à évaporer l'eau contenue dans une boue déjà déshydratée. Ce dernier a pour objectifs d'éliminer partiellement ou totalement l'eau interstitielle pour réduire le volume et augmenter la valeur calorifique, avant oxydation thermique, de stabiliser voire l'hygiéniser, lorsque la siccité est supérieure à 90% et d'améliorer la texture de la boue avant l'épandage (**OTV, 1997**).

- **Lit de séchage**

C'est une technique de déshydratation naturelle. Le système consiste à sécher les boues à l'air libre sur des lits de séchage drainés (**SATIN, 2013**), tel que le séchage solaire, lit de sable, lagune de séchage et le lit planté des macrophytes (**AMORCE, 2012**).

- **Séchage thermique**

Le séchage thermique est une opération physique qui permet l'élimination d'un liquide par évaporation ou vaporisation. Pour y parvenir, il faut apporter une certaine quantité de chaleur au produit à traiter, afin d'atteindre une siccité plus élevée (**KOLLER, 2009**). Ce type de séchage vient obligatoirement après une étape de déshydratation mécanique (**AMORCE, 2012**).

II.2. DIFFERENTES VOIES DE VALORISATION ET D'ELIMINATION DES BOUES

Les boues d'épuration peuvent avoir trois destinations : le stockage ou la mise en décharge, l'incinération et la valorisation agricole (ADEME, 2007).

Stockage ou la mise en décharge

Il consiste à enfouir les boues souvent mélangées avec les ordures en prenant en considération les précautions suivantes : site étanche, compactage des résidus, récupération et traitement des jus de décharge (lixiviats) (JOURAIPHY, 2007). Cette solution perd progressivement de son intérêt pour des raisons financières et des problèmes environnementaux tels que l'émanation d'odeurs nauséabondes ainsi que l'entraînement d'éléments minéraux et organiques toxiques par les eaux superficielles et la contamination des nappes phréatiques (BENOUDJIT, 2016).

Incinération

Les boues déshydratées sont brûlées dans des incinérateurs, seules avec d'autres combustibles. Il existe de nombreuses technologies de combustion des déchets et donc des boues. L'incinération des boues génèrent des cendres de 5 à 6 % de la matière sèche entrante et les normes des rejets gazeuses sont très réglementées (poussières, métaux, composés organiques volatiles) (MOLETTA, 2003).

Valorisation agricole

L'épandage direct est la principale voie de retour au sol des déchets organiques. Il concerne 60 % des boues de stations d'épuration des eaux (ADEME, 2016).

En effet, l'épandage permet de recycler une partie des boues et de profiter de leurs propriétés fertilisantes en bouclant le cycle de la matière organique par retour vers le sol. Cependant, cette pratique est strictement encadrée du point de vue sanitaire et environnemental car il faut s'assurer, d'une part, de l'aptitude des sols à remplir cette fonction environnementale de recyclage et d'autre part, de l'innocuité des épandages de boues vis-à-vis des sols, de la chaîne alimentaire et des autres compartiments de l'environnement, les eaux en particulier. (LACHASSAGNE, 2014). D'où l'intérêt de cette étude.

III. EPANDAGE DES BOUES

III.1. DEFINITION DE L'EPANDAGE

De source réglementaire, le terme épandage désigne toute application de produits sur des sols agricoles. L'épandage ne peut être pratiqué que si les produits appliqués présentent un intérêt pour les sols ou pour la nutrition des cultures et des plantations (**SOULIGNAC, 2000**).

III.2. PROCESSUS D'EPANDAGE

Les boues épandues en agriculture sont soit liquides (siccité 2-5%), soit pâteuses (siccité 15-25%), soit solides. Elles peuvent être chaulées (siccité 25-30%) ou compostées (siccité 37-70%). La réglementation prévoit deux grandes périodes d'épandages : le printemps, de mars à avril, et à la fin de l'été, d'août à octobre (**ADEME, 2016**).

L'épandage est interdit en dehors de ces périodes, mais les boues continuent d'être produites et il faut donc les stocker durant 6 à 9 mois (**DUDKOWSKI, 2000**). L'épandage direct fait l'objet d'un plan d'épandage suivi par les missions d'expertise et de suivi des épandages (MESE) qui se déroule en plusieurs étapes : étude préalable du sol, phase de conception, auto-surveillance des boues et des sols soumis à contrôle et à validation des services de l'état (**AGENCE DE L'EAU, 2016**).

Pour les boues liquides, l'épandage se fait avec des tonnes à lisier ou avec des rampes d'aspersion basse pression qui évitent les brouillards fins. Pour les boues pâteuses ou solides, le matériel est spécialisé avec des épandeurs à plateaux, avec des équipements limitant les dégradations du sol (**DUDKOWSKI, 2000**).

III.3. INTERET DE L'EPANDAGE DES BOUES DE STATIONS D'EPURATION

III.3.1. Valeur agronomique des boues d'épuration

La valorisation en agriculture des boues a un intérêt agronomique pour les sols car elles contiennent une teneur élevée en matière organique (ADEME, 2016).

Valeur fertilisante

Les boues de stations d'épuration sont des Mafor fertilisantes présentent la particularité de contenir les trois principaux éléments fertilisants (azote, phosphore et potassium) sous forme organique plus ou moins facilement minéralisable (INRA, 2014). En effet l'augmentation de la teneur en matière organique du sol, a un impact sur les propriétés des sols et leur fertilité au sens large (physique, chimique, biologique) (ADEME, 2016).

Le potassium et le phosphore se trouvent sous forme minérale dans les boues. Les valeurs fertilisantes potassique et phosphatée des boues sont équivalentes à celles des engrais minéraux (INRA, 2014). L'azote se trouve sous forme organique, c'est un constituant essentiel des protéines, donc un élément fondamental pour les êtres vivants et en particulier pour les végétaux. La valeur fertilisante azotée est définie à partir de la fraction minéralisée et devenu utilisable par les cultures de l'année qui suit l'épandage (VIGNERON, 2017).

Valeur amendante

Elle est a priori faible car les boues sont facilement biodégradables, ce qui entraîne une stimulation des activités biologiques dans les sols après apport. Cependant, la synthèse des résultats d'essais au champ montre un potentiel d'augmentation des teneurs en matière organique des sols du même ordre de grandeur que les fumiers ($25\% \pm 12\%$). Des effets positifs, souvent transitoires, sur les propriétés physiques des sols sont rapportés (HOUOT *et al.*, 2014).

La valeur fertilisante et la valeur amendante organique ne sont pas indépendantes, puisqu'elles dépendent toutes deux de la matière organique que contient la boue. La fraction stable de la matière organique détermine la valeur amendante organique, tandis que la fraction (complémentaire) facilement biodégradable contribue à la valeur fertilisante. Selon la composition de sa matière organique, une boue aura donc un caractère plutôt « fertilisant » ou plutôt « amendant » (HOUOT *et al.*, 2016).

III.3.2. Valeur environnementale et sanitaire

L'épandage des boues d'épurations présente un meilleur moyen pour l'utilisation des ressources naturelles (biomasse) que constituent les boues. Ainsi, elle répond aux défis que poseront aux systèmes d'assainissement les prochaines décennies en terme de préservation de l'environnement et de la sécurité sanitaire (**GUIRKINGER, 2006**).

III.3.3. Valeur économique

La fourniture d'éléments fertilisants contenus dans les matières organiques apportées par les boues (N, P, K, Ca, Mg, S), constitue une économie substantielle pour les agriculteurs sur leur achat d'engrais (**ADEME, 2016**).

III.4. LIMITES ET CONTRAINTES LIEES A L'EPANDAGE DES BOUES

III.4.1. Qualité des boues

La qualité des boues d'épuration dépend donc de la qualité des eaux usées, c'est-à-dire de la concentration en contaminants. Le taux de capture de ces contaminants par les boues se situe entre 70 % et 90 % des quantités entrantes dans la station d'épuration. Les contaminants chimiques et biologiques de l'environnement présents dans les boues d'épuration sont les éléments-traces métalliques (ETM) (**Tableau III**), les composés-traces organiques (CTO) (**Tableau IV**), les micro-organismes pathogènes et les émissions gazeuses (**WOLF et GUILMAULT, 2016**).

Tableau III : Valeurs limites et flux maximum en éléments-traces minéraux définis par l'arrêté du 8/01/1998

| ETM | Valeur limites dans les Mafor (mg/kg MS) | Flux cumulé en 10ans (g/m ²) |
|---------|--|--|
| Cadmium | 10 | 0.03 |
| Chrome | 1000 | 1.5 |
| Cuivre | 1000 | 1.5 |
| Mercure | 10 | 0.015 |

| | | |
|------------------------------|------|-----|
| Nickel | 200 | 0.3 |
| Plomb | 800 | 1.5 |
| zinc | 3000 | 4.5 |
| Chrome +cuivre +nickel +zinc | 4000 | 6 |

(VIGNERON, 2018).

Tableau IV : Valeurs limites et flux maximum des composés-traces organiques dans les boues, fixées par l'arrêté du 8/01/1998

| CTO | Valeur limite dans MAFOR (mg/kg MS) | Flux cumulé maximum en 10 ans (g/m ²) |
|------------------------|--|--|
| Total des 7 PCB | 0.8 | 1.2 |
| Fluoranthène | 5 | 7.5 |
| Benzo (b) fluorenthène | 2.5 | 4 |
| Benzo (a) pyrène | 2 | 3 |

(AGENCE DE L'EAU, 2016).

III.5. ASPECT REGLEMENTAIRE

Dans un contexte général d'augmentation des quantités de boues d'épuration liée aux politiques environnementales de protection des eaux, les textes se succèdent et se conjuguent depuis la première loi sur l'eau de 1964 qui n'a pas prévu la gestion de boues. A partir de celle de 02/01/1992 entraînant l'augmentation des tonnages produits, la question d'élimination, de recyclage ou de valorisation préoccupe les collectivités locales et prennent l'initiative d'encadrer les épandages soumis aux procédures d'autorisation ou de déclaration (décret du 29/03/1993) (BOURIOUG, 2013).

En droit française, le cadre règlementaire que doivent respecter les épandages de ces boues est fixé par le décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 et son arrêté d'application du 8

janvier 1998 (Journal Officiel no°26 du 31 janvier 1998) (**DONGUY et CHENON, 2017**).

Les grands axes de cette réglementation sont :

- Les seuils des teneurs en ETM des boues sont diminués de moitié, des teneurs limites en 10 CTO sont fixés (HPA et PCB) et des flux maximums cumulés en ETM et CTO sont imposés (**ADEME, 2000**).
- Les boues sont considérées comme des déchets. De ce fait, le producteur de boues est responsable de la filière épandage ; il doit faire chaque année un programme prévisionnel d'épandage, suivi d'un bilan agronomique de celui-ci (**DONGUY et CHENON, 2017**).
- En droit Européen, la Directive 86/278/CEE du Conseil du 12 juin 1986 soumet l'épandage des boues à des obligations diverses afin que leur utilisation soit correcte (**BARNAT, 2001**).
- En Algérie, aucun texte réglementaire relatif à la valorisation agricole des boues. (**LADJEL et ABBOU, 2014**).

MATERIEL ET METHODE

I. MATERIEL ET METHODES

Notre étude s'est étalée sur une période de trois mois (allant du mois de février jusqu'au mois d'Avril 2019). Elle s'est déroulée dans le laboratoire physico-chimique de la STEP de Beni-Mered (paramètres physiques), le laboratoire de l'INRA (paramètres chimiques), le laboratoire d'hygiène de la wilaya de Blida et le laboratoire de prévention de Boufarik (paramètres microbiologiques).

Les boues utilisées dans notre expérimentation proviennent d'un échantillonnage à partir de la station d'épuration des eaux usées urbaines (STEP de Beni-Mered) de la ville de Blida.

Les boues de la STEP de Beni-Mered ont subi trois traitements successifs (**Annexe I**) :

- Epaissement gravitaire.
- Stabilisation aérobie.
- Déshydratation mécanique.

Trois prélèvements ont été réalisés à raison d'un échantillon par mois.

I.1 Présentation de la station d'épuration de Beni-Mered

La station d'épuration de Beni-Mered est construite sur six hectares, et traite les eaux usées issues de la ville de Blida. Sa capacité nominale à l'horizon 2015 est de 383 000 EH, pour un débit de pointe de 51 560 m³/j.

La station d'épuration de Beni-Mered est alimentée par deux postes de refoulement :

- Le PR 18 avec un débit de 4000 m³/h pour l'horizon 2015 et 6200 m³/h l'horizon 2030.
- Le PR 22 avec un débit nominal de 800 m³/h pour l'horizon 2015 et 1000 m³/h pour l'horizon 2030.



Figure 3 : Station d'épuration de Beni-Mered

Le traitement des eaux usées au sein de la station d'épuration de Beni-Mered se fait en quatre étapes successives, d'où provient l'ensemble de production des boues :

- Prétraitement : dégrillage, déshuilage, dessablage.
- Traitement primaire.
- Traitement biologique.
- Traitement secondaire.
- Traitement des boues : épaissement, stabilisation, déshydratation.

Il existe trois fils de traitement dans la STEP de Beni-Mered, chaque file se compose en :

- Un décanteur primaire.
- Bassin d'aération.
- Clarificateur et un poste recirculation/ extraction des boues.

Dans cette station, il existe deux filières : la filière eau et la filière boue (**voir Annexe I**). Dans cette étude, nous vous présenterons la filière boues.

Les étapes du procédé de traitement des boues ont été déjà étudié (*cf.* voir paragraphe traitement de boues). Au niveau de la STEP, ce procédé consiste en un épaissement, puis une stabilisation aérobie suivie d'une déshydratation mécanique qui permet la réduction du volume des boues en excès avant le stockage/épandage et assure une siccité supérieure à 20%. Finalement les boues sont acheminées vers une aire de stockage (**Tableau VII**).

Tableau VII : Siccité à atteindre dans chaque ouvrage de la filière de traitement des boues

| Types des boues | Exigence minimale | Taux de polymère |
|--------------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Boues épaisées gravitairement | ≥ 30 g/l | Néant |
| Boues épaisées sur table d'égouttage | ≥ 80 g/l | Néant |
| Siccité des boues déshydratées | $\geq 20\%$ | 8 Kg/T |
| Teneurs MVS stabilisateur | $\geq 70 \%$ | |

I.2. Matériel

I.2.1. Matériel biologique

Des boues provenant de l'aire de stockage (après six mois de séjour) de cette STEP ont fait l'objet de notre expérimentation.

I.2.2. Matériel non biologique

C'est l'ensemble de matériel utilisé pour la réalisation des différentes analyses, tel que : la verrerie, les milieux de culture, les réactifs, appareillages (**AnnexeII**).

I.3. Méthodes

I.3.1. Procédure d'échantillonnage

Dans un premier temps, et pour évaluer les caractéristiques des boues, nous avons effectué des prélèvements d'une façon aléatoire à partir de l'aire de stockage.

Pour cela, nous avons suivi le mode opératoire suivant :

- Pour obtenir un échantillon représentatif nous avons prélevé une quantité de boues à partir de différents endroits, de l'aire de stockage.
- Mélanger l'ensemble des boues prélevées.
- Déposer l'échantillon dans une coupelle.
- Passer ensuite au laboratoire, afin de réaliser les différentes analyses.

Les dates de prélèvement sont consignées dans le tableau suivant :

Tableau VIII : Date de prélèvement des échantillons étudiés

| Echantillon | Date de prélèvement |
|--------------------|----------------------------|
| Echantillon 1 | 10 Février 2019 |
| Echantillon 2 | 17 Mars 2019 |
| Echantillon 3 | 14 Avril 2019 |

La figure 4 résume l'ensemble des analyses réalisées au cours de cette étude.

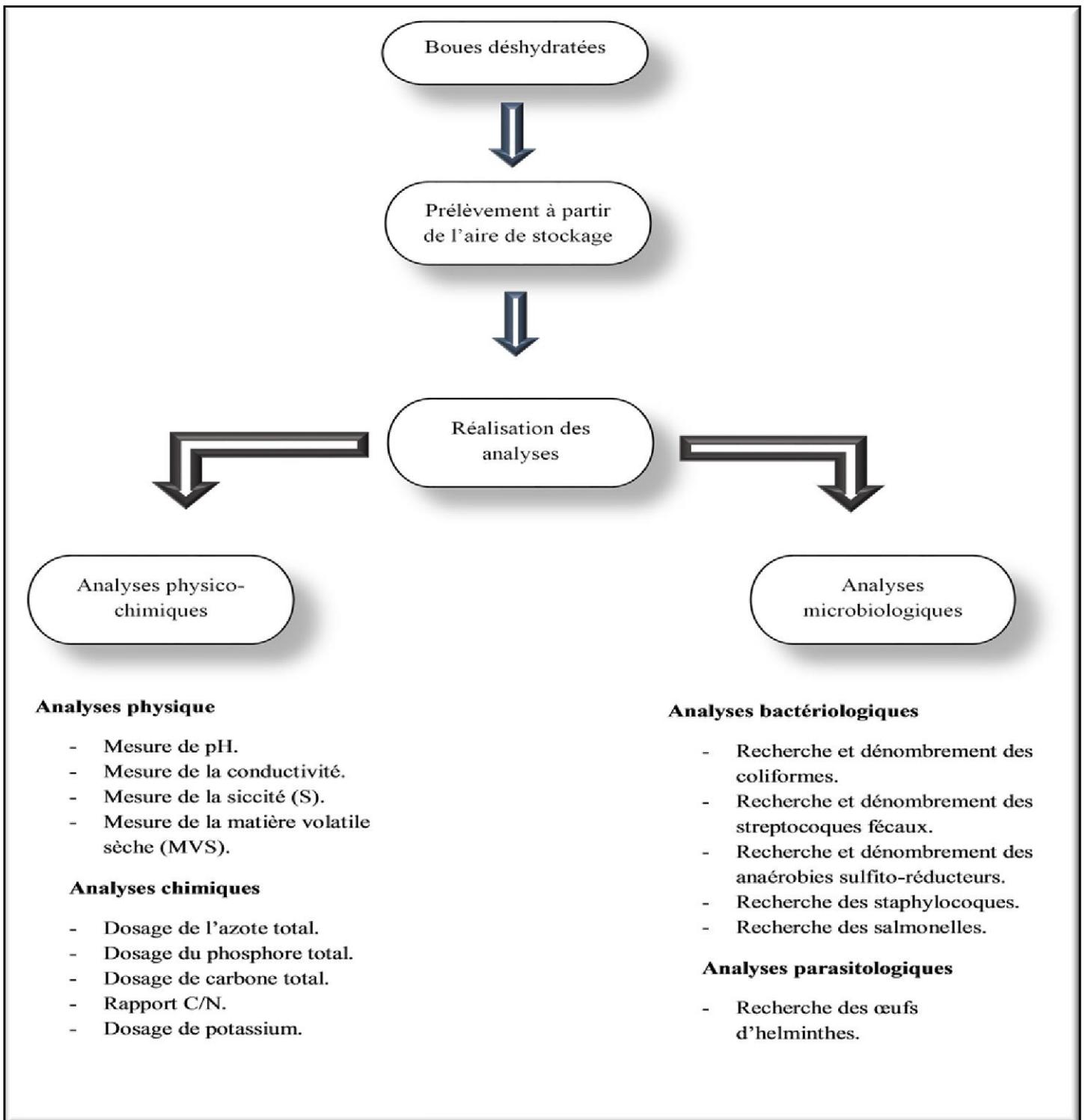


Figure 4 : Protocole préliminaire pour l'analyse de boue.

I.3.2. Analyses physico-chimiques

I.3.2.1. Paramètres physiques

Mesure du potentiel d'hydrogène (pH) (NF T 90-008)

C'est un paramètre important pour l'utilisation ultérieure de la boue en agriculture. Il détermine partiellement la charge électrique des particules solides, et par conséquent, influe sur leur stabilité colloïdale. Le pH de la boue est déterminé par un pH-mètre sensION (Hach) en diluant une portion de cette dernière dans l'eau distillée. Pour cela, nous avons suivi le mode opératoire suivant :

a) Préparation de l'échantillon

- Peser 10g de boues dans une capsule tarée.
- Ajouter ensuite 100 ml de l'eau distillée.
- Homogénéiser la solution avec une agitation légère à l'aide d'un agitateur magnétique pendant 30 minutes.

b) Réalisation de la mesure du pH

- Rincez l'électrode du pH-mètre avec de l'eau distillée puis l'essuyer avec du papier absorbant.
- Versez la solution à tester dans un bécher : remplissez environ la moitié du récipient.
- Trempez l'électrode du pH-mètre dans la solution.
- Après stabilisation de l'afficheur, relevez le pH.

Mesure de la conductivité électrique (NF EN 27888 / ISO 7888-1985)

La conductivité électrique donne une idée sur la salinité du milieu. Elle est déterminée par un conductimètre HACH HQ430d, dans la même solution préparée pour la détermination du pH. Nous avons suivi le mode opératoire suivant :

- Rincer l'électrode du conductimètre avec de l'eau distillée puis l'essuyer avec du papier absorbant.
- Versez la solution à tester dans un bécher : remplissez environ la moitié du récipient.
- Trempez l'électrode du conductimètre dans la solution.
- Après stabilisation de l'afficheur, relevez la conductivité électrique.

✚ Siccité (EN NF 12880)

Les boues sont constituées d'eau et de matière sèche. La siccité est le pourcentage massique de matière sèche contenu dans la boue.

Un petit volume d'échantillon préalablement homogénéisé est déshydraté dans une coupelle de céramique placée dans un four à 105 °C. La matière restant dans la coupelle après le passage au four est appelé matière solide totale. Elle comprend les solides organiques, inorganiques, dissous, suspendus et volatiles. Pour cela, nous avons suivi le mode opératoire suivant :

- Numéroter et peser les coupelles vides.
- Déposer les boues dans les coupelles, puis les peser.
- Mettre les coupes dans le four, chauffé à 105 °C jusqu'à ce que la masse des échantillons soit stable (idéalement, laisser les échantillons dans le four une nuit, pendant environ 15 heures).
- Laisser refroidir les échantillons jusqu'à température ambiante (Idéalement, les coupes refroidissent dans un dessiccateur afin d'éviter la reprise d'humidité).
- Peser les coupes.
- Le calcul des résultats est réalisé par :

$$S (\%) = \frac{M_1 - M_0}{M_2 - M_0} \times 100$$

Avec :

S : siccité

M₀ : la masse de la coupe vide.

M₁ : la masse de la coupe et du gâteau humide.

M₂ : masse de la coupe et du gâteau sec (après séchage à 105 C°).

✚ Matière volatile sèche (MVS) (NF EN 12879)

Pour la majorité des boues, la détermination des matières volatiles est une évaluation approchée de la matière organique. L'échantillon initial ou le résidu de matière solide totale est brûlé dans un four à 550 °C. Nous avons suivi le mode opératoire suivant :

- Le résidu sec obtenu lors de la mesure de la matière sèche est porté pendant 2 heures dans un four à moufle à 550 C°.
- Calculer par la suite la teneur en matières volatiles rapportées à la matière sèche, à partir de la masse initiale et la masse finale.
- On obtient alors :

$$\text{MVS (\%)} = \frac{M_2 - M_f}{M_2} \times 100$$

Avec :

M_2 : la masse de la coupe et du gâteau sec (après séchage à 105C°).

M_f : la masse de la coupe du gâteau sec (après séchage à 550C°).

I.3.2.2. Analyses chimiques

Les boues d'épuration contiennent des quantités importantes d'azote et de phosphore, ainsi que de potassium et de matière organique.

Afin de faciliter les opérations des analyses chimiques, l'échantillon de boue doit être préalablement sécher, broyer (dans un mortier) et tamiser afin d'éliminer les éléments grossiers.

Préparation de l'échantillon

Séchage

Étaler toute la matière sur un plateau ne pouvant provoquer aucune contamination, en une couche dont l'épaisseur ne doit pas être supérieure à 5 cm, et la sécher dans une étuve à 105°C pendant 24 heures.

Broyage et tamisage

On prépare la poudre de boue en broyant l'échantillon dans un mortier, pour le tamiser ensuite afin d'éliminer les éléments grossiers.

Cette poudre sera utilisée pour les différentes analyses chimiques :

- Détermination de l'Azote total, du Phosphore, du potassium et du carbone organique.

✚ Dosage de l'azote totale (NORME AFNOR T 90-110)

On minéralise les matières organiques contenues dans la boue en présence d'acide sulfurique et d'un catalyseur à base de sélénium :

- Entraînement à la vapeur de l'ammoniac libéré.
- Dosage par titrimétrie directe ou en retour par H_2SO_4 .
- Prise d'essai de 50 ml d'échantillon (0.2 à 20 mg d'azote).

Pour cela, nous avons suivi le mode opératoire suivant :

a) Minéralisation

- Prise d'essai dans un ballon Kjeldahl (500 ml) muni d'un dispositif régulateur d'ébullition.
- Ajouter 1 g de catalyseur (mélange de 995 g de potassium $K_2 SO_4$ et de 5 g de sélénium en poudre).
- Ajouter 10 ml d'acide sulfurique concentré.
- Placer un entonnoir.
- Porter lentement à ébullition et évaporer jusqu'à apparition de fumées blanches, forcer ensuite le chauffage pendant au moins 2 heures.
- Laisser refroidir à température ambiante.

Si la minéralisation est incomplète, diminuer la prise d'essai ou effectuer une dilution préalable.

b) Distillation

- Transvaser si nécessaire dans l'appareil de distillation le contenu du ballon et les eaux de rinçage (200 à 250ml).
- Introduire 50 ml de NaOH (solution à 400 g/l).

c) Dosage

- Transvaser 200 ml de distillat dans un récipient contenant 10 ml de solution d'acide borique (solution à 10 g/l) et 3 à 4 gouttes d'indicateurs (100 mg de rouge de méthyle et 500 mg de vert de bromocrésol dissous dans 500 ml d'éthanol à 95 %).
- Titrer en utilisant la solution titrée d'acide sulfurique.

$C(\frac{1}{2} H_2SO_4) = 0.1 \text{ mol/l}$ si la prise d'essai contient entre 2 et 20 mg de N.

$C \left(\frac{1}{2} \text{H}_2\text{SO}_4\right) = 0,02 \text{ mol/l}$ si la prise d'essai contient entre 0,2 et 2 mg de N.

Noter le volume V_1 nécessaire.

d) Résultats :

$$N \text{ mg/l} = \frac{(v_1 - v_0)c \times 1000 \times 14}{p}$$

En mg de N/kg de boue brute et mg/ g de MS

Avec

V_1 : volume de H_2SO_4 utilisé pour le dosage (ml).

V_2 : volume de H_2SO_4 utilisé pour l'essai à blanc (ml).

C : concentration en mol/l de H_2SO_4 de la solution titrée d'acide sulfurique utilisé pour le dosage.

N : en mg par litre de boue.

P : poids de la boue brute en g (LASSEE, 1985).

✚ Dosage de phosphore total

a) Minéralisation :

La minéralisation s'effectue par attaque par HCL- NO_3 sur boue calcinée à 450 C° avec NH_4NO_3 . On utilise la méthode suivante :

- Placer 1 à 2 g de boue dans une capsule (en platine ou silice), ajouter du nitrate d'ammonium (solution à 10% P/V) à raison de 2 ml par gramme d'échantillon. Homogénéiser et sécher dans une étuve à 110 C° . Mettre la capsule dans un four froid et élever la température progressivement pour atteindre 450 C° en une heure environ. Laisser la 2 heures puis laisser refroidir à l'extérieur.
- Reprendre le résidu de calcination par quelques millilitres d'eau et le transférer dans un bécher de 100 à 150 ml, rincer la capsule avec 2 fois 5 ml de HCl chaud puis 2 fois 5 ml d'eau bouillante et transvaser dans le bécher.
- Ajouter 5 ml de HNO_3 , le couvrir d'un verre de montre et porter à douce ébullition pendant 10 minutes puis évaporer à sec.

- Reprendre le résidu par 20 ml de HCl (2N), chauffer jusqu'à ébullition, puis filtrer sur papier filtre sans cendres et recueillir le filtrat dans un ballon jaugé de 100 à 200 ml, laver le bécher et le filtre 10 ml de HCl (2N) et 2 à 3 fois avec de l'eau bouillante.
- Laisser refroidir, amener au trait de jauge avec de l'eau.

b) Dosage colorimétrique

- Placer 10 ml d'aliquot (digéré, à partir de 100 ml) dans un flacon de 50 ml.
- Ajouter 10 ml de réactif « HNO₃-vanadate-molybdate ».
- Compléter à 50 ml avec de l'eau distillé.
- Mixer, puis laisser la solution 10 minutes, filtrer si nécessaire.
- Mesurer au spectrophotomètre Gallenkamp (longueur d'onde 470 nm) à l'aide d'une gamme étalon (**Annexe III**).

Préparation de réactif « HNO₃-vanadate-molybdate »

- Dissoudre 1.25 g de NH₄ VO₃ dans 300 ml d'eau distillée.
- Chauffer jusqu'à ébullition, refroidir et ajouter 330 ml de HNO₃ concentré.
- Verser le tout dans une solution composée de 25 g de (NH₄)₆Mo₇O₂₄.4H₂O dissout dans 300 ml d'eau distillée.
- Mélanger et compléter à un litre (**LASSEY, 1985**).

🚦 Dosage de carbone organique total (méthode Anne)

La matière organique est oxydée par K₂Cr₂O₇ en milieu acide. L'oxydation se fait à chaud (chauffage à reflux), les échantillons sont maintenus pendant 5 minutes à ébullition que par l'oxydation soit complète.

La prise d'essai ne doit pas contenir plus de 30 mg de carbone :

- Mettre l'échantillon dans un ballon de 100 à 150 ml.
- Ajouter 10 ml de solution aqueuse de bicarbonate de potassium et 15 ml d'acide sulfurique.
- Laisser 5 minutes à l'ébullition lente à reflux.
- Refroidir.
- Transvaser dans une fiole jaugée et amener à 100 ml avec les eaux de rinçage du ballon.
- Prélever 20 ml dans un bécher et doser par le sel de Mohr.

- Essai témoin : faire le même essai à l'aide de bichromate mais sans échantillon.

Préparation des réactifs

- Préparer 80 g de bichromate de potassium dans un litre d'eau distillé (**LASSEE, 1985**).

+ Dosage de potassium

Le dosage de cet élément est effectué par spectrophotomètre à flamme, à partir de la solution de l'échantillon préparé par minéralisation avec HCL-NO₃ (*cf*: voir paragraphe minéralisation de phosphore). Pour cela, nous avons suivi le mode opératoire suivant :

Le dosage du potassium au spectrophotomètre à flamme nécessite d'étalonner l'appareil de mesure. La gamme d'étalonnage est préparée de la façon suivante :

- Solution mère 1000ppm : introduire 1.907g de KCl dans une fiole jaugée de 1000 ml, bien agiter et compléter au volume.
- Solution fille à 100 ppm : prendre 100 ml de la solution mère, les introduire dans une fiole de 100 ml, compléter au volume.
- Solution d'étalonnage : prendre des fioles de 100 ml et introduire les volumes suivants :

Tableau IX : Volumes à introduire pour la préparation des solution d'étalonnage

| Solution N | Nombre de ml à prendre de la solution fille à 100 ppm | Concentrations obtenues en ppm |
|-------------------|--|---------------------------------------|
| 1 | 0.5 | 0.5 |
| 2 | 1 | 1 |
| 3 | 2 | 2 |
| 4 | 4 | 4 |
| 5 | 8 | 8 |
| 6 | 12 | 12 |

(**LASSEE, 1985**)

- Compléter au trait de jauge avec la solution d'acétate d'ammonium ou avec de l'eau distillée.
- Passer la gamme d'étalonnage au spectrophotomètre et noter la lecture obtenue pour chaque concentration.
- Passer ensuite la solution de l'échantillon déjà préparer par minéralisation avec HCL-NO₃ au spectrophotomètre.
- Etablir la courbe d'étalonnage, et calculer les résultats avec :

$$K \text{ (ppm)} = X \cdot \frac{V \times I}{P}$$

X : lecture de potassium

V : volume d'extraction ml.

I : inverse de dilution.

P : prise d'essai (poids des boues en g).

I.3.3. PARAMETRES MICROBIOLOGIQUES

L'évaluation microbiologique des boues déshydratées nécessite, la réalisation des dilutions décimales selon le protocole suivant (**Figure 5**) :

- Peser 10g de boue, puis la déposer dans un tube contenant 100 ml d'eau physiologique, homogénéiser la solution par agitation magnétique à l'aide d'un agitateur, pendant 30 minutes.
- En condition aseptique, pipeter 10 ml d'échantillon liquide dans 90 ml l'eau physiologique de la dilution 10⁻¹.
- Bien agiter la solution, afin d'homogénéiser la dilution.
- Répéter cette même opération, jusqu'au dilution 10⁻⁶ .
- Changer de pipette entre chaque dilution

La recherche des coliformes totaux, les anaérobies sulfito-réducteurs, les streptocoques fécaux ainsi que la recherche des salmonelles sont réalisés à partir de la dilution 10⁻³.

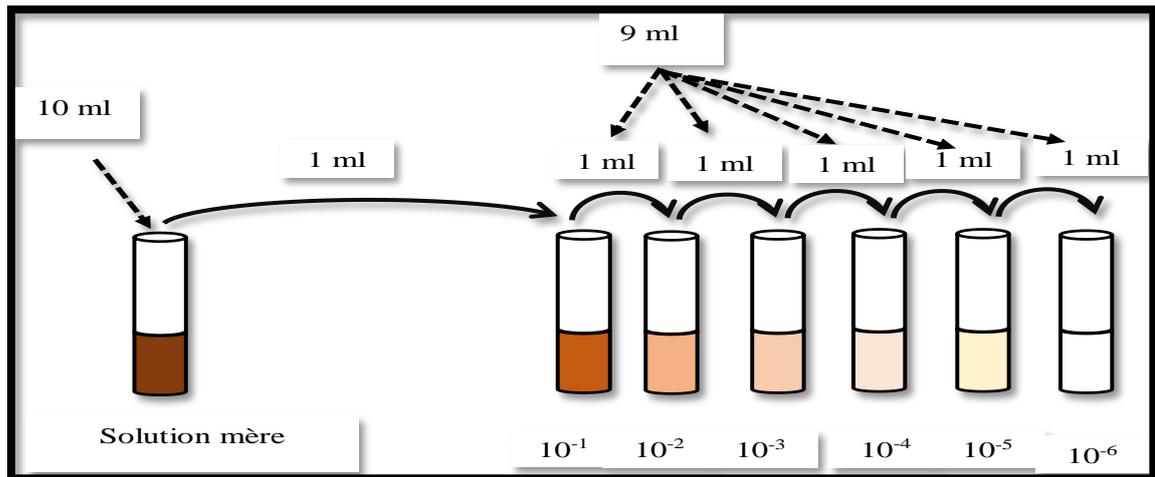


Figure 5 : Préparation des suspensions de dilution des boues.

I.3.3.1. Paramètres bactériologiques

✚ Recherche et dénombrement des coliformes totaux et fécaux (NF EN ISO 9308-3)

Pour la recherche des coliformes totaux, nous avons suivi le protocole suivant :

a) Test de présomption : (milieu de culture BCPL)

Préparer trois séries de tubes de BCPL additionnés d'une cloche et les numériser de la façon suivante :

- Trois tubes de BCPL double concentration additionnés d'une cloche,ensemencer avec 10ml de la dilution 10^{-3} .
- Trois tubes de BCPL simple concentration additionnés d'une cloche,ensemencer avec 1ml de la dilution 10^{-3} .
- Trois tubes de BCPL simple concentration additionnés d'une cloche,ensemencer avec 0.1ml de la dilution 10^{-3} .
- Incuber les tubes à 37 C° pendant 24 heures.

Lecture et interprétation : après la période d'incubation les tubes présentant :

- D'une part un dégagement du gaz dans la cloche.
- D'autre part un trouble microbien, sera considéré comme positif (**Figure 6**).

Il y'a donc présence des coliformes totaux, et le résultat sera exprimé par le NPP selon la table de Mac Grady (**Annexe V**).

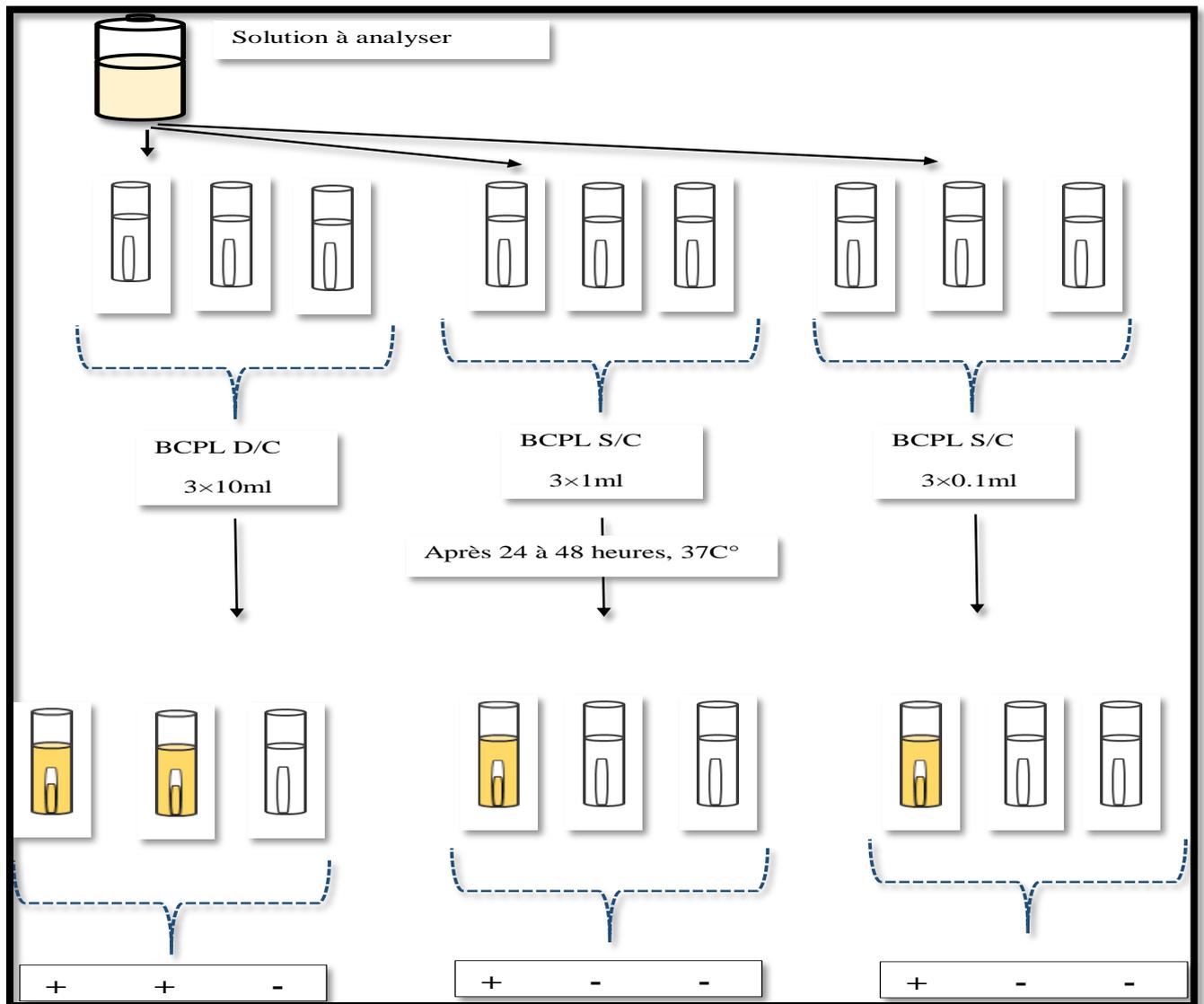


Figure 6 : Recherche et dénombrement des coliformes sur milieu liquide (Test de présomption)

b) Test de confirmation

- Chaque tube de BCPL positif, sera repiqué (3 à 4 gouttes) sur milieu Schubert.
- Cette deuxième série de tubes sera incubée à 44 C° pendant 24 heures.
- Après cela ajouter 2 à 3 gouttes de réactif de Kowax pour voir l'apparition d'un anneau rouge qui témoigne de la production d'indole par les coliformes fécaux (E, coli) (**Figure7**).

- Les résultats sont exprimés selon la table de Mac Grady (Annexe IV en Tableau XXXIII).

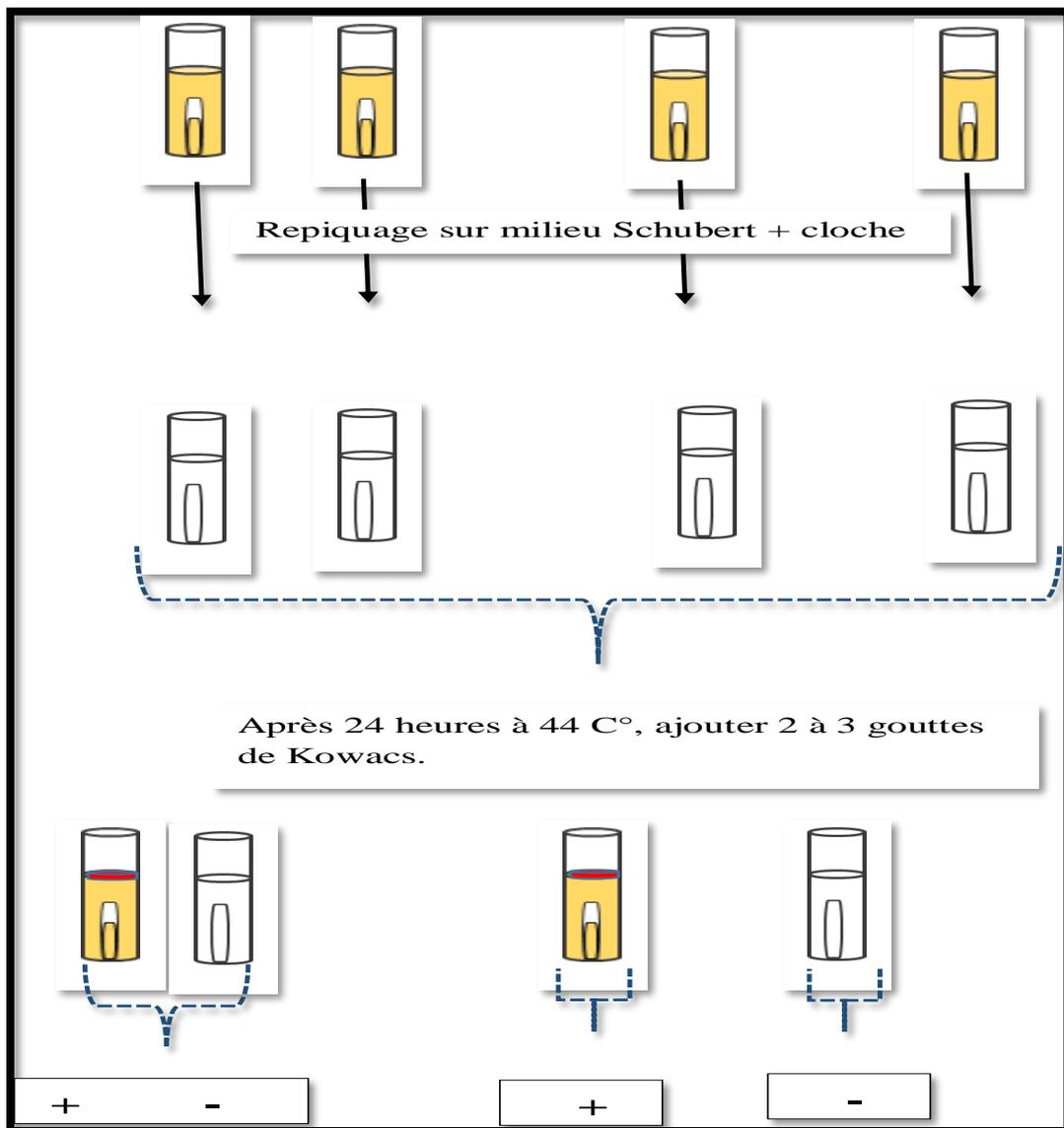


Figure 7 : Recherche et dénombrement des coliformes sur milieu liquide (Test de confirmation)

✚ Recherche et dénombrement des streptocoques fécaux (NF EN ISO 7899- 1)

Nous avons suivi le protocole suivant :

a) Test de présomption :

Préparer trois séries de tubes de Rothe et les numériser de la façon suivante :

- Trois tubes de Rothe double concentration, ensemercer avec 10 ml de la dilution 10^{-3} .
- Trois tubes de Rothe simple concentration, ensemercer avec 1ml de la dilution 10^{-3} .
- Trois tubes de Rothe simple concentration, ensemercer avec 0.1 ml de la dilution 10^{-3} .
- Incuber à 37 C° pendant 24 heures à 48 heures.

Lecture : après la période d'incubation les tubes de Rothe présentant un trouble microbien seront considérés comme positif (**Figure 8**).

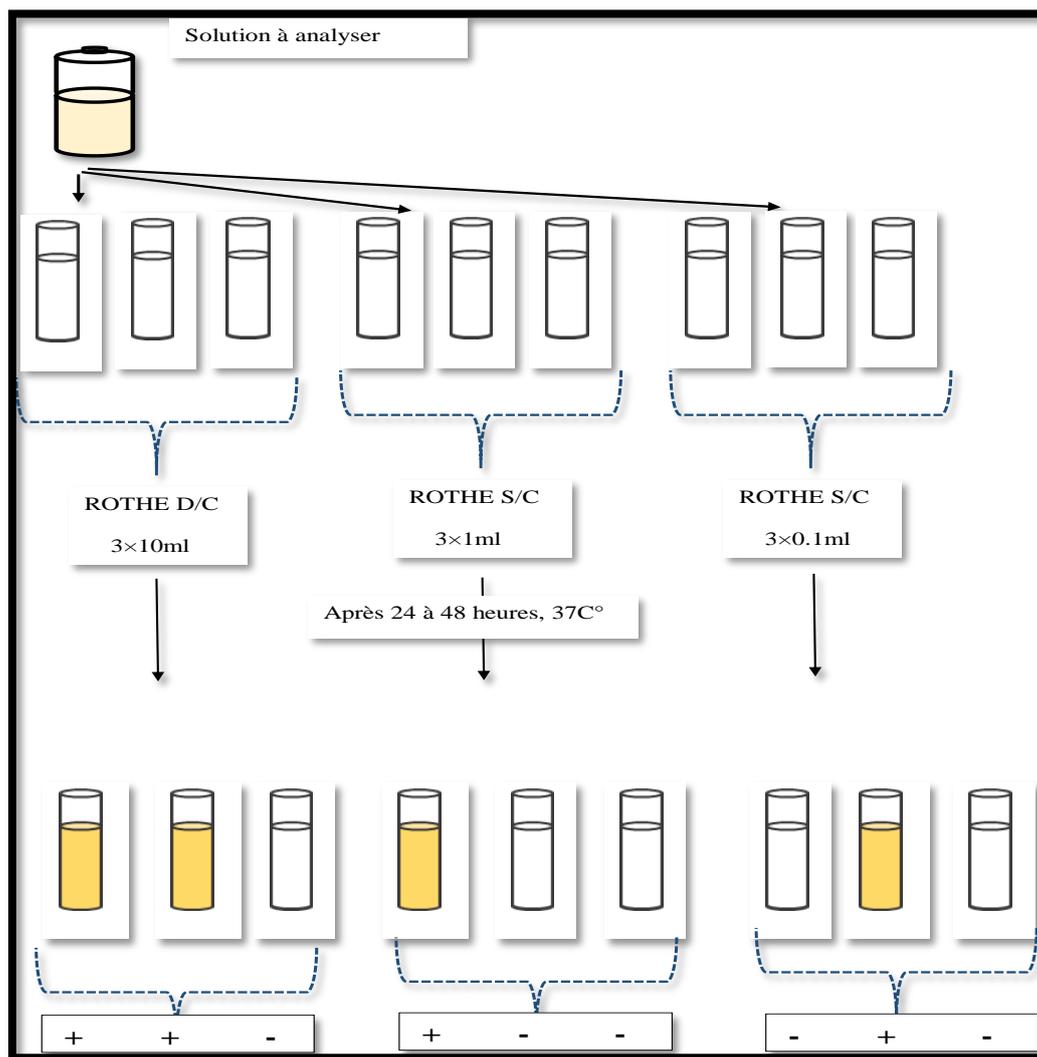


Figure 8 : Recherche et dénombrement des Streptocoques fécaux (Test de présomption)

b) Test de confirmation

Chaque tube positif sera repiqué (03 gouttes) sur un tube de Litsky (EVA). Après 24 heures d'incubation à 37C°, les tubes d'EVA présentant, d'une part un trouble microbien, d'autre part une pastille violette (blanche) au fond du tube, seront considérés comme positif (**Figure 9**).

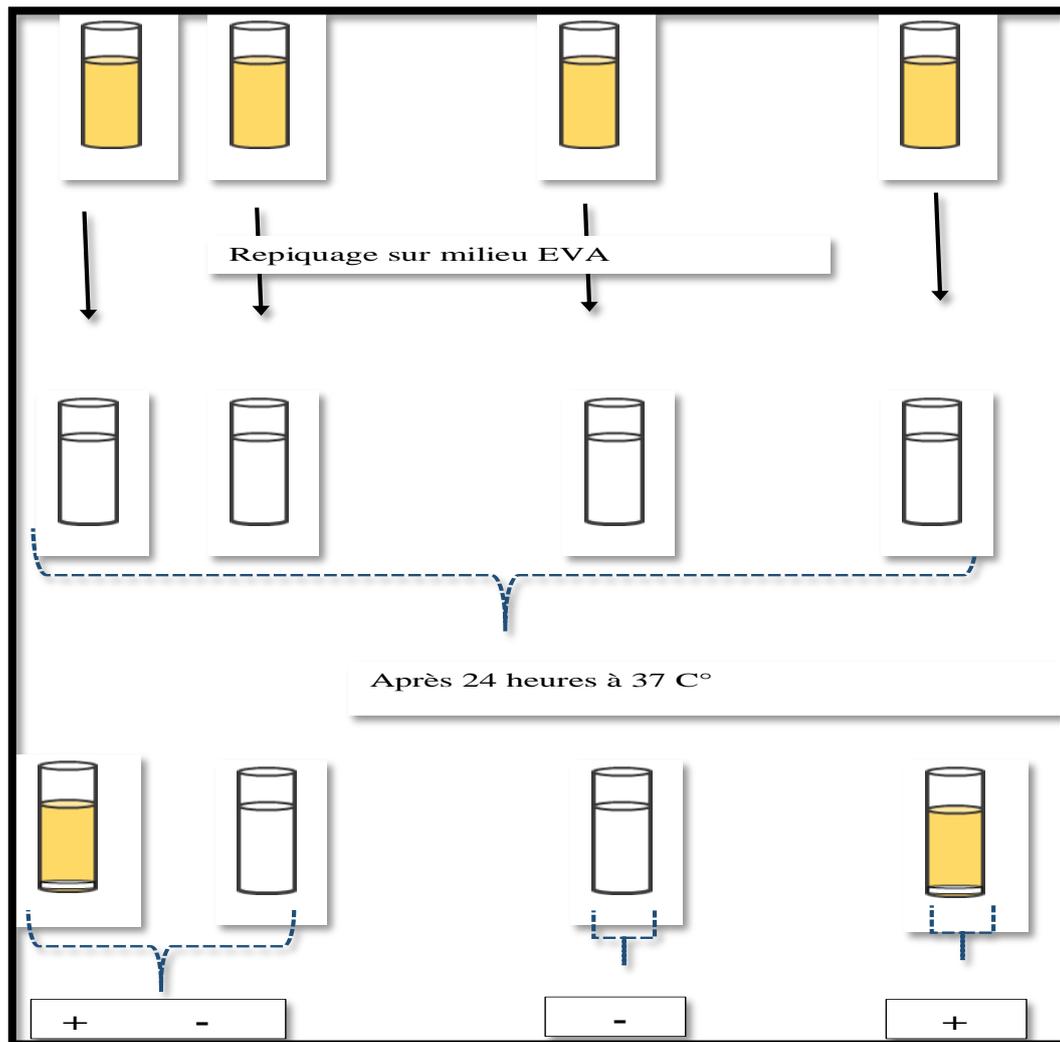


Figure 9 : Recherche et dénombrement des Streptocoques Fécaux (Test de confirmation)

➤ Recherche et dénombrement des Clostridium sulfito-réducteurs (Norme AFNOR NF EN 26461-1 – ISO 6461-1)

Nous avons suivi le protocole suivant :

- Répartir 25 ml de l'échantillon, dans 04 tubes à raison de 5ml par tube.

- Chauffer les 04 tubes à 80 C° pendant 10 minutes au bain marie. Afin de ne laisser viable que les spores de clostridium, puis refroidir immédiatement les tubes à l'eau de robinet.
- Ajouter ensuite 20 ml de gélose viande foie préalablement fondue, additionnée d'alène de fer et de sulfite de sodium.
- Laisser solidifier sur la pailasse, puis incuber à 37 C° pendant 48 heures, avec une première lecture à 24 heure.

Lecture et interprétation

Après la période d'incubation, seront considérés comme positifs, les tubes contenant des colonies noires de spores de *Clostridium* sulfito-réducteur (**Figure 10**).

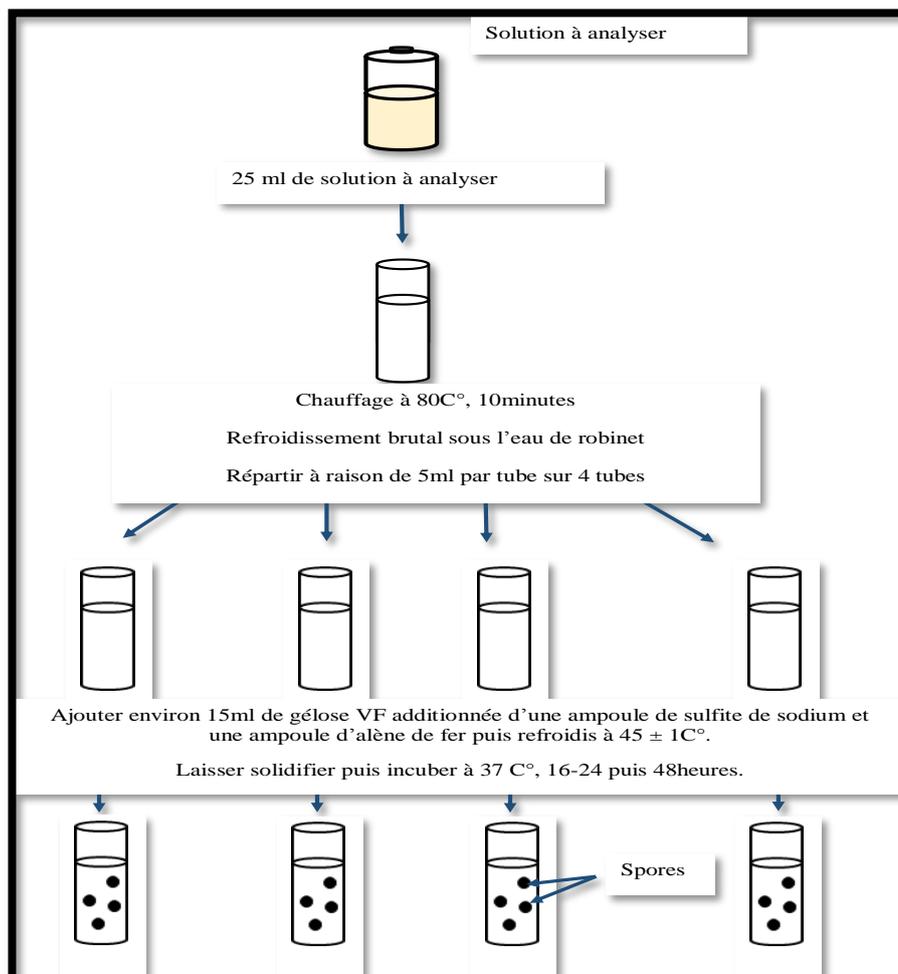


Figure 10 : Recherche et dénombrement des anaérobies sulfito-réducteurs

✚ Recherche des *Staphylocoques* (Norme XP-T 90-412)

- Faire fondre le milieu (Chapman), laisser refroidir ensuite couler le milieu en boîte de Pétri stérile.
- Laisser solidifier sur une surface froide.
- Faire sécher les boîtes à l'étuve, couvercle entrouvert.
- Transférer 0.1 ml à partir des dilutions préalablement préparées (de dilution 10^{-3} jusqu'à la dilution 10^{-6}) dans des boîtes de Pétri.
- Étaler l'inoculum à la surface du milieu.
- Incuber à 37°C pendant 24 à 48 heures.

La lecture et interprétation

Les staphylocoques pathogènes forment des colonies pigmentées, entourées d'une auréole jaune due à la fermentation du mannitol. Les staphylocoques non pathogènes forment en général de petites colonies rouges qui ne modifient pas la teinte du milieu.

✚ Recherche des *Salmonelles* (NF EN ISO 657)

Les salmonelles sont des bactéries entériques en forme de bâtonnets, anaérobies facultatives, à Gram négatif, mobiles pour la plupart avec des flagelles péritriches, de $0,7-1,5 \times 2,0-2,5 \mu\text{m}$, qui produisent du sulfure d'hydrogène.

a) Première enrichissement

On effectue un premier enrichissement sur SFB D/C soit :

- Ajouter 50 ml à partir de la solution diluée (dilution 10^{-3}) dans un flacon de 100 ml de SFB D/C, c'est la solution 1.
- Incuber la solution 1, à 37°C pendant 24 heures

b) Deuxième enrichissement

A partir de SFB préparé précédemment on effectue :

- D'une part un premier isolement sur Hecktoen +additif.
- D'autre part un deuxième enrichissement sur SFB en tube (1 ml par tube).
- Incuber 37°C à 24 heures.

c) Ré-isolement

A partir de deuxième enrichissement on effectue :

- D'une part un deuxième isolement sur Hecktoen.

- D'autre part un troisième enrichissement sur SFB en tube
- Incuber à 37 pendant 24 heures.

Interprétation et lecture

- La lecture s'effectue sur la boîte de gélose Hecktoen de deuxième enrichissement.
- Les Salmonelles sont présentes sous forme des colonies grises avec ou sans centre noire (**Figure 11**).

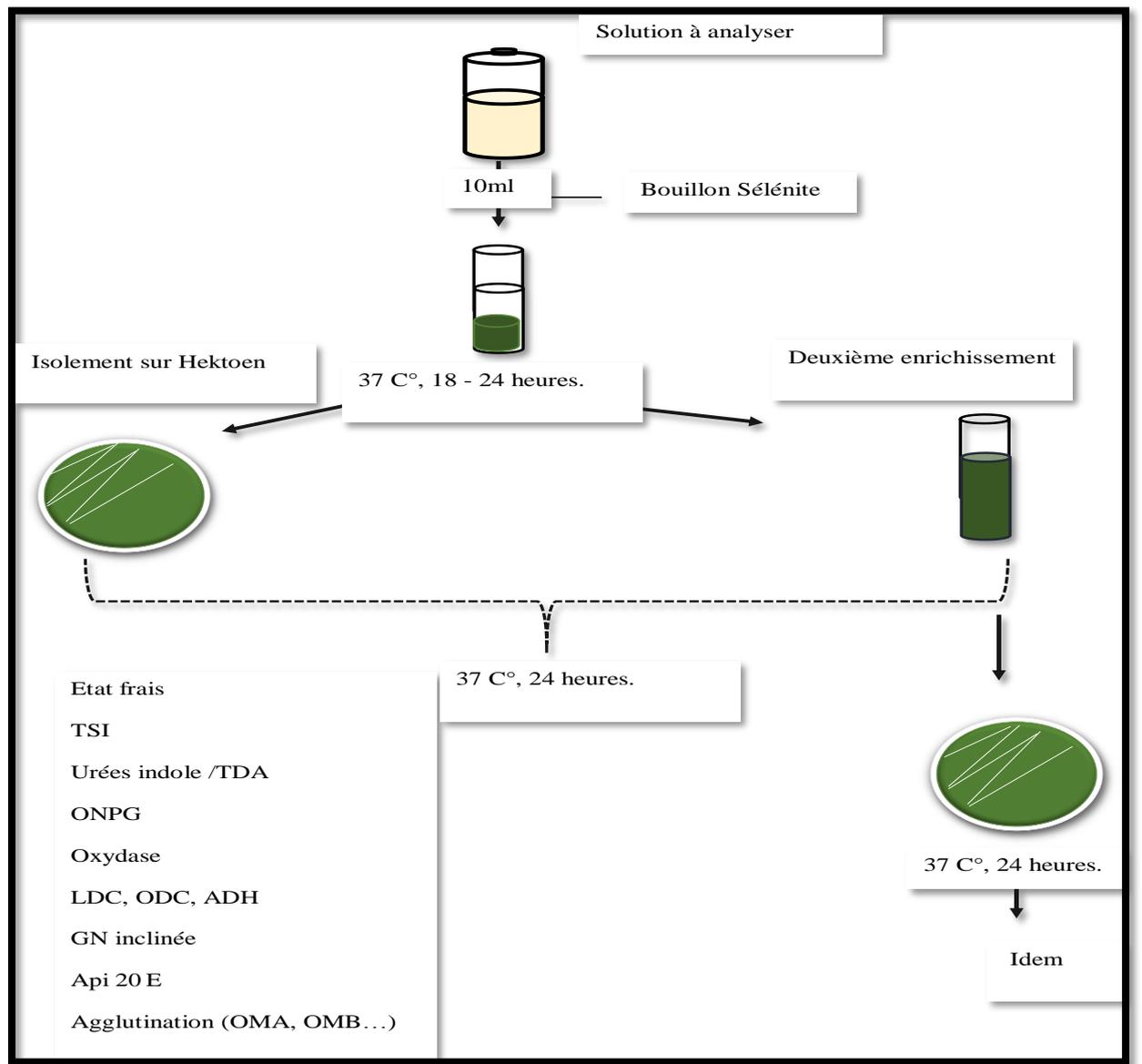


Figure 11 : Recherche des Salmonelles

I.3.3.2. Recherche des parasites

Les boues présentent de nombreux parasites d'origine fécale ou tellurique. Ces parasites sont doués d'une grande résistance pouvant dépasser cinq ans dans la nature. Ce sont les œufs d'helminthes, les formes kystiques de *Cryptosporidium* et *Giardia*. La survie de ces œufs augmente les risques d'infestation de l'Homme ou de l'animal, directement ou indirectement, lors de réutilisation des boues à des fins agricoles.

Les œufs d'helminthes :

Taille : caractère relativement stable sauf chez certains œufs atypiques (ascaris) apprécié (ou éventuellement dans certains cas précis mesurée à l'aide d'un oculaire gradué préalablement étalonné).

Forme : le plus souvent ovale ou ronde (certains œufs atypiques peuvent avoir des formes très curieuses).

- Symétrique ou non (exemple : l'asymétrie classique de l'œuf d'oxyure).
- Coque :
- Contour : lisse ou irrégulier (ex : mamelonné, comme celle de l'ascaris).
- Aspect : transparent, opaque, strié.
- Sa couleur : incolore, du jaune au brun.
- Épaisseur : mince ou épaisse, simple ou double (décrire alors les contours, aspect, couleur et épaisseur de chacune d'elles).
- Éléments inconstants : opercule (douve, bothriocéphale) éperon latéral ou terminal (schistosomes).

Mode opératoire

- Prendre une lame,
- Introduire une goutte à partir de la solution mère sur cette lame à l'aide d'une pipette.
- Mettre soigneusement une lamelle sur cette goutte.
- Observer dans les oculaires de microscope les différents parasites, et noter les parasites trouvées en suivant le guide de laboratoire.

I.3.4 Analyses des métaux lourds

Les résultats des analyses des métaux lourds sont effectués par le laboratoire centrale de l'office nationale de l'assainissement (ONA). Ces analyses sont effectuées sur des boues

| Matériel et méthodes

déshydratées, les éléments déterminés sont : Cobalt, Fer, Cadmium, Cuivre, Chrome, Manganèse, Mercure, Nickel, Plomb, Zinc.

RESULTATS ET DISCUSSION

II. RESULTATS ET DISCUSSION

II.1. Paramètres physico-chimiques

II.1.1. Paramètres physiques

pH

Le pH est un paramètre important en agriculture et ce pour le bon développement de la plante. Généralement le pH des boues résiduaire est situé dans un intervalle de valeurs précises $6 < \text{pH} < 8$ (**BENOUDJIT, 2016**). Dans cette étude, la moyenne du pH des échantillons est de $7,95 \pm 0,28$ (**Tableau X**), il est considéré comme neutre et relativement favorable à toutes les espèces.

Tableau X : Résultats des valeurs de pH des boues de la STEP

| Paramètre | Echantillon 1 | Echantillon 2 | Echantillon 3 |
|-----------|---------------|---------------|---------------|
| pH | 8,21 | 7,64 | 8,01 |

Les valeurs du pH des boues de la STEP de Béni-Mered sont caractérisées par une légère basicité, cela est due principalement à la période de prélèvement (hivernale) où l'aire de stockage des boues est exposée aux pluies qui permettraient la dilution des boues stockées.

L'utilisation de ces boues serait souhaitable sur des sols à tendance acide. Il semblerait que cette basicité rend insoluble une grande partie des métaux lourds qui serait de ce fait inaccessible aux plantes après épandages (**PERRON *et al.*, 2007**).

Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique nous renseigne sur la salinité des boues. De point de vue, salinité, la boue présente une conductivité électrique de l'ordre de $917 \pm 126 \mu\text{s/cm}$ (**Figure 13**). Selon **CHOUIAL *et al.*, (2017)** d'après l'échelle de salinité (**Annexe III**), la boue utilisée dans cette étude est peu salée.

Selon **KASSAOUI *et al.*, (2009)**, la salinité retarde le processus de germination par diminution de la disponibilité en eau, ce qui inhibe le gonflement de la graine et entraîne des

changements enzymatiques. Ce n'est pas le cas des boues prélevées dans cette étude car elles présentent une faible salinité (**Figure 12**).

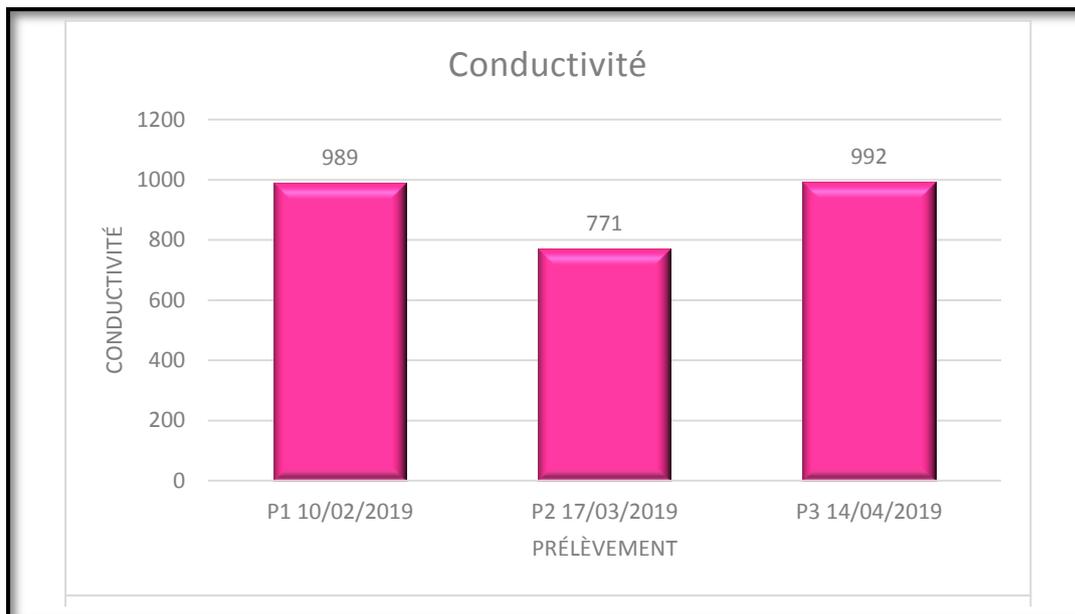


Figure 12 : Conductivité électrique des boues de la STEP

✚ Siccité (S)

La siccité (pourcentage de matière sèche) est un paramètre qui renseigne sur la consistance et la concentration en solides des boues. Les résultats de la présente étude révèlent que les boues de la STEP de Beni-Mered possèdent une siccité moyenne de $23,75 \pm 2,39$ % (**Figure 13**). Ces valeurs obtenues sont très proches aux valeurs fixées par la station (atteindre une siccité ≥ 20 % après déshydratation (**Tableau VII**)).

Selon **PIRRON *et al.*, (2007)**, ces résultats s'expliquent par le fait que la plupart des stations mécanisées possèdent des équipements de déshydratation mécanique. La siccité varie néanmoins d'une station mécanisée à l'autre, selon la technologie de déshydratation utilisée.

Une siccité élevée a pour avantage de réduire le volume de boues à transporter et de permettre leur entreposage au champ, ce qui n'est pas autorisé avec les boues liquides.

De ces résultats, on peut constater que le taux d'humidité est élevé, avec une moyenne de 76,25%. Plus les boues sont humides, plus elles causent des problèmes de transport et de stockage car on sait que tout milieu humide favorise le développement de microorganismes multiples.

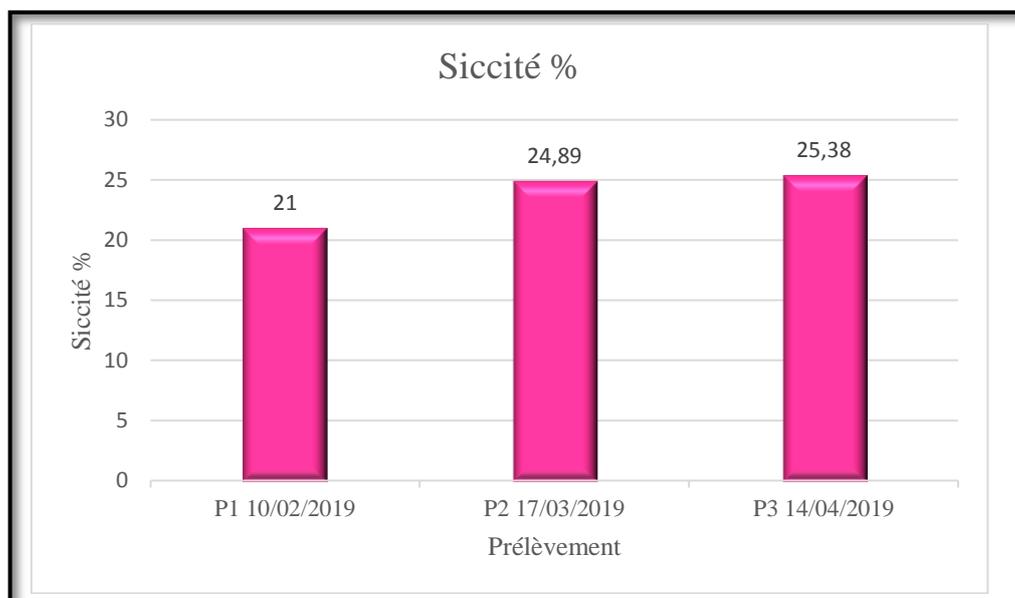


Figure 13 : Siccité des boues de la STEP

✚ Matière volatile sèche (MVS)

Les boues de la STEP présentent des pourcentages en matières volatiles sèches (MVS) relativement élevés oscillant entre 34% et 69% (**Figure 14**). Ces valeurs révèlent la richesse des boues étudiées en matière organique. Cela est dû non seulement à la composition des eaux usées épurées qui sont riches en éléments organiques, mais aussi à l'absence de processus de stabilisation, car les concentrations des matières volatiles sèches des boues diminuent grâce à la digestion aérobie qui se déroule dans le stabilisateur par la présence des micro-organismes et de l'oxygène (O_2) (**SATIN, 2006**).

La charge élevée en MVS (la matière organique), a tendance à fermenter spontanément (notamment en l'absence d'air) et à générer des nuisances olfactives durant leur stockage.

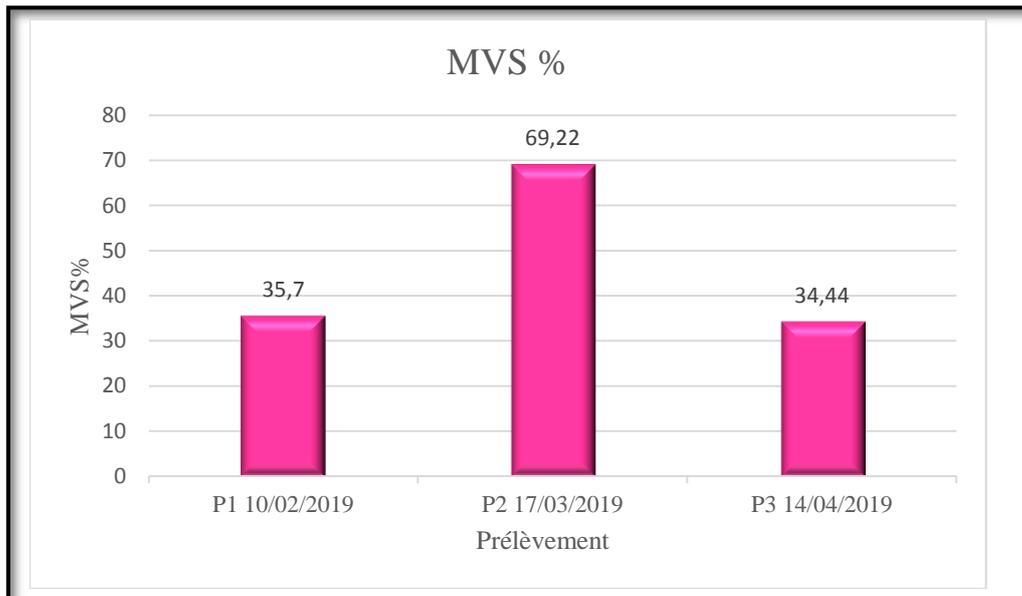


Figure 14 : Taux de MVS dans les boues de la STEP

II.1.2. Paramètres chimiques

Les résultats des paramètres chimiques des boues de la STEP de Beni-Mered, ont montré une richesse en matière organique et en azote, avec des teneurs faibles en potassium et en phosphore.

Ces résultats seront comparés aux normes recommandées par AFNOR.

Azote total

La détermination de la teneur en azote permet d'estimer la valeur agricole d'une boue et d'évaluer les risques de pollution.

D'après les résultats présentés dans le **Tableau XI**, les analyses ont montré que les boues renferment environ 2,30% d'azote total. Cette concentration est proche de la norme **AFNOR (Annexe IV)** (2 à 2,5 %) citée par **LASSEY (1985)**. Par conséquent, ces boues sont riches en azote total.

Tableau XI : résultats des taux d'azote total dans les boues de la STEP

| Paramètre | Echantillon 1 | Echantillon 2 | Echantillon 3 | Norme AFNOR |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|-------------|
| Azote total (%) | 2,16 | 2,50 | 2,24 | 2 – 2,5 |

D'après **REJEB *et al.*, (2003)**, des travaux sur l'épandage des boues ont montré que l'apport des boues accru la production de pomme de terre. Ces résultats sont liés à une libération lente et continue de l'azote à partir des boues qui peut satisfaire les besoins de la plante.

Selon **KCHAOU *et al.*, (2011)**, l'épandage des boues résiduelles semble être une solution qui pourrait combler les besoins en azote des cultures et pour atteindre des rendements optimaux, sans avoir recours à une fertilisation complémentaire.

Outre leurs propriétés d'amendement organique, les boues municipales contiennent des éléments fertilisants. Leur contenu en azote leur confère même des propriétés d'engrais organiques. Elles peuvent donc constituer un substitut ou un complément aux engrais minéraux de synthèse (**PERRON *et al.*, 2007**).

L'azote est l'élément fertilisant qui influence le plus la productivité végétale (**PIRRON *et al.*, 2007**).

Phosphore total

Le phosphore est un autre élément très important pour la croissance des plantes. Dans notre résultat il se retrouve environ $0,053 \pm 0,05\%$ (**Tableau XII**), cette teneur est inférieure aux normes **AFNOR** citée par le même auteur (0,43 à 0,87%). Cette diminution est provoquée par le drainage solaire et la fermentation des boues au niveau de l'aire de stockage. D'après **PERRON *et al.*, (2007)**, il est recommandé d'utiliser les boues possédant des teneurs faibles en phosphore, dans les sols agricole contenant des quantités excessives en phosphore.

Tableau XII : Taux de phosphore total dans les boues de la STEP

| Paramètre | Echantillon 1 | Echantillon 2 | Echantillon 3 | Norme AFNOR |
|-----------|---------------|---------------|---------------|-------------|
| | | | | |

| | | | | |
|----------------------------|------|------|------|-------------|
| Phosphore total (%) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,43 – 0,87 |
|----------------------------|------|------|------|-------------|

Les boues des stations d'épuration urbaine peuvent constituer un amendement phosphaté intéressant à valoriser. Cela a été prouvé par les travaux de **BROSSARD *et al.*, (1989)** qui ont observé que le phosphore du sol a nettement augmenté, après épandage des boues des stations d'épuration. Ce transfert de la boue au sol des formes assimilables et minérales peut être très rapide et est favorisé par les pluies.

Potassium total

Le potassium est le troisième élément fertilisant en importance pour les plantes. C'est un élément essentiel pour l'alimentation des végétaux, car il stimule la photosynthèse ainsi qu'un grand nombre de réaction biologiques et favorise la constitution de réserves énergétiques.

Dans cette étude, il est présent en faible concentration avec une moyenne de $0,02 \pm 1,5 \times 10^{-5} \%$ (**Tableau XIII**), ce qui est inférieure aux concentrations admissibles citées par la norme **AFNOR (1985)** (0,16 à 0,40 %). Les boues sont généralement pauvres en potassium, car cet élément reste en solution dans les eaux rejetées (**OTV, 1997**).

Tableau XIII : Teneur des boues de la STEP en potassium total

| Paramètre | Echantillon 1 | Echantillon | Echantillon 3 | Norme AFNOR |
|----------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| Potassium total (%) | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,16 – 0,40 |

Toutefois, cette particularité des boues municipales peut être avantageuse pour la culture dans des sols naturellement riches en potassium (**PERRON *et al.*, 2007**).

Carbone organique total (COT)

La teneur en carbone organique présente une importance pour l'évaluation de l'aptitude des boues à devenir un engrais organique, et lui donne un intérêt important en agriculture. La minéralisation d'une boue dans le sol et en relation avec sa teneur en carbone

organique, plus elle sera riche en carbone organique total, plus sa minéralisation dans le sol sera intense (GANRY et BADIAN, 1998).

La méthode de ANNE (*cf*: voir matériel et méthode) utilisée pour la détermination du carbone organique totale a donné une teneur moyenne de $39,2 \pm 0,15$ % (Tableau XIV). Cela nous permet de dire que l'utilisation de ces boues est bénéficiaire pour les terres agricoles, par effet de ces teneurs en carbone sur les propriétés physico-chimiques des sols. A titre d'exemple, les résultats de l'expérimentation menée par IGOUD (2001), où l'apport des boues a favorisé la croissance en hauteur, et l'augmentation de la production de la biomasse sylvicole (produits ligneux). Le taux de survie s'est trouvé également amélioré grâce notamment à une bonne nutrition en éléments minéraux et organique.

Tableau XIV : Teneur des boues de la STEP en carbone organique total

| Paramètre | Echantillon 1 | Echantillon 2 | Echantillon 3 |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Carbone organique total (%) | 27,99 | 56,58 | 33,03 |

Des effets comparables des boues et des engrais sur les rendements des récoltes ont été notés dans les travaux de KACHOU *et al.*, (2011) et ont noté que l'apport des boues a augmenté le rendement de l'orge en comparaison avec le témoin. Ces augmentations sont proches et même plus élevées que celles enregistrées lors d'un apport d'un fertilisant minéral. Ces auteurs ont attribué cet effet à une amélioration des caractéristiques du sol, suite à une fourniture d'un supplément de carbone issu des boues.

Matière organique (MO)

Les résultats de l'analyse physico-chimique des boues étudiées (Tableau XV) ont montré une valeur moyenne de $78,4 \pm 0,3$ % de matière organique, une teneur beaucoup plus élevée que celle des normes AFNOR citées par LASSEE (1985) (40 à 65%). Ces résultats peuvent être liés aux origines des eaux usées traitées riches en éléments organiques, ainsi que le problème lié à l'absence de processus de stabilisation (*cf*: voir paragraphe sur MVS).

Tableau XV : Teneur de matières organiques total contenant dans les boues de la STEP

| Paramètre | Echantillon 1 | Echantillon 2 | Echantillon 3 | Norme AFNOR |
|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|-------------|
| Matières organiques total (%) | 55,99 | 66,06 | 113,16 | 40 – 65 |

Les boues de la STEP de Beni-Mered constitue une source importante en matière organique pour les sols pauvres en éléments organiques, cela a été prouvé à partir des résultats positifs réalisés par **KACHOU *et al.*, (2011)**, lors de l'épandage des boues résiduaire riches en matière organique et en éléments fertilisants, sur des sols agricoles pauvres en matière organique, permet d'orienter l'action des agriculteurs vers une utilisation des boues en tant qu'engrais susceptibles de fournir aux cultures des éléments nutritifs utiles à leur croissance et à leur développement, mais aussi en tant qu'amendement organique permettant d'entretenir ou d'améliorer la structure du sol.

Cependant des teneurs élevées en matière organique peuvent poser des problèmes de fermentation et des odeurs désagréables lors de leurs stockages.

D'après les résultats obtenus dans le **Tableau XIV**, les boues de la STEP de Beni-Mered constituent un amendement organique pour les sols agricoles. Dans ce contexte et selon **BENMOUFFOK (1994)**, les résultats de l'épandage des boues de la station de Draa Ben Khedda a montré que le taux en matière organique dans le sol a augmenté proportionnellement aux doses appliquées des boues résiduaire.

La matière organique est un paramètre agronomique qui revêt une grande importance en agriculture, puisqu'elle améliore la porosité et le pouvoir de rétention de l'eau des sols. Elle favorise ainsi l'enracinement des plantes cultivées, leur approvisionnement en eau et en éléments nutritifs tout en apportant une source de nourriture aux vers de terre et aux microorganismes utiles (**PERRON *et al.*, 2007**). Cela a été confirmé par les résultats obtenus par **IDDER *et al.*, (2012)**, qui montrent que l'épandage d'une dose de 25 tonnes de boues/hectare permet l'augmentation de la teneur du sol en matière organique. L'apport de cette matière organique a contribué à l'amélioration de la capacité d'échange cationique et à la rétention de l'eau nécessaire pour la culture.

Le rapport C/N est toujours demandé quand il s'agit d'agriculture car il reflète la minéralisation de la matière organique, et la disponibilité en azote pour la plante. Le rapport C/N moyen calculé est de l'ordre de $17,15 \pm 0,07$ % (**Tableau XVI**).

Tableau XVI : Rapport C/N présent dans les boues de la STEP

| Paramètre | Echantillon 1 | Echantillon 2 | Echantillon 3 |
|-----------|---------------|---------------|---------------|
| C/N (%) | 12,99 | 13,21 | 25,25 |

La valeur fertilisante des boues est reliée à leur rapport C/N :

- Les boues ayant un C/N < 8 ont une valeur fertilisante intéressante.
- Un C/N > 8 la valeur fertilisante azotée est moindre mais la valeur amendant augmente (**HOUOT et al, 2014**).

En se référant à la classification de **HOUOT et al., (2014)**, le rapport calculé est supérieur à 8, nous pouvons utiliser ces boues comme valeur fertilisante tant un amendement organique.

Tandis que selon **PERRON et al., (2007)**, Il est connu que les engrais organiques ayant des rapports C/N inférieurs à 20 se minéralisent rapidement et peuvent libérer des quantités importantes d'azote aux cultures, ce qui est le cas des boues de la STEP de Beni-Mered. Le rapport C/N constitue donc un indice de la fraction d'azote organique facilement minéralisable des boues municipales. Cependant des essais réalisés par **CHOUIAL et al., (2017)**, afin d'étudier les performances et les limites d'utilisation des boues des stations d'épuration pour les plantes forestières en pépinière, le rapport C/N enregistré dans ces boues est inférieur à 25, ce qui a permis une bonne minéralisation de la matière organique et une disponibilité de l'azote pour la plante.

De ce fait les boues de la STEP de Beni-Mered se minéralisent facilement et constituent des quantités importantes en azote nécessaires aux cultures des terres agricoles.

Métaux lourds

D'après le **Tableau XVII**, il apparaît que les concentrations en métaux lourds, déterminées à partir des boues de la STEP de Beni-Mered sont inférieures aux valeurs limites donnés par la norme AFNOR. Ces résultats sont très intéressants dans le cadre de l'usage des boues dans l'agriculture sans conséquence grave sur la santé humaine et l'environnement. Plusieurs auteurs précisent que ces éléments sont dangereux pour les végétaux et les animaux et peuvent se révéler toxiques à trop fortes doses (**CHOUIAL et al., 2017**). En effet, les valeurs enregistrées pour les boues de la STEP de Beni-Mered sont largement inférieures aux normes, donc ces boues ne présentent pas de risque de toxicité lors de l'épandage

Des boues issues de la station d'épuration de Touggourt se sont distinguées par de très faibles concentrations en métaux lourds ce qui n'a pas engendré un transfert significatif vers le sol et la biomasse végétale produite affichant des valeurs très en deçà des normes AFNOR (**IDDER et al., 2012**).

Tableau XVII : Teneur en éléments traces métalliques(ETM) des boues de la STEP

| Paramètres Métaux lourds | Unité | Boues STEP Beni Mered | Normes Afnor |
|---------------------------------|--------------|------------------------------|---------------------|
| Cobalt | mg/kg | 11 | / |
| Fer | mg/kg | 9865 | / |
| Cadmium | mg/kg | < 0,66 | 10 |
| Cuivre | mg/kg | 161 | 1000 |
| Chrome | mg/kg | 24 | 1000 |
| Manganèse | mg/kg | 104 | / |
| Mercure | mg/kg | 0,7 | 10 |
| Nickel | mg/kg | 23 | 200 |
| Plomb | mg/kg | 69 | 800 |
| Zinc | mg/kg | 579 | 3000 |

II.2. Paramètres microbiologiques

Les teneurs des boues en agents pathogènes sont caractérisées en fonction de la présence des plus résistants d'entre eux : salmonelles, les œufs d'helminthes (OTV, 1997). Les paramètres microbiologiques sont importants pour l'évaluation des aspects hygiéniques des boues utilisées à des fins agricoles.

II.2.1. Paramètres bactériologiques

✚ Coliformes totaux et fécaux

Sur la base des données représentées par le **Tableau XVIII**, on constate que les boues de la STEP sont caractérisées par des teneurs élevées en coliformes oscillant entre 75×10^3 et 116×10^3 germes/100 ml (dilution 10^{-3}) avec une moyenne de $94,6 \times 10^3 \pm 20,54 \times 10^3$ germes/100 ml, avec présence d'*Escherichia coli* (**Figure 15**). Il faut souligner que la présence de ces germes est due principalement à leur origine des eaux usées urbaines chargées en matières fécales (HOUUT *et al.*, 2014).

Cependant, les valeurs trouvées dans cette étude sont très élevées par rapport aux valeurs citées par AFNOR.

Tableau XVIII : Teneurs des coliformes dans les boues de la STEP de Beni-Mered

| Micro-organismes | Echantillon 1 | Echantillon 2 | Echantillon 3 | Norme AFNOR NFU 44-041 |
|--|-------------------|------------------|------------------|---------------------------|
| Coliformes totaux (germes / 100ml) | 116×10^3 | 93×10^3 | 75×10^3 | 10^3 à 10^4 |
| <i>Escherichia coli</i> | Présent | Présent | Absent | - |

Anneau
rouge



Figure 15 : Présence d'*Escherichia coli* confirmé par l'apparition d'anneau rouge

✚ Streptocoques fécaux

Les streptocoques fécaux, sont connus pour leur résistance aux conditions environnementales difficiles et leur longue persistance dans l'environnement. Ils survivent plus longtemps dans le sol et sur les végétaux et sont de ce fait plus nombreux que les autres indicateurs (TRAD RAIS *et al.*, 2016).

D'après le **Tableau XIX**, on constate que les concentrations en streptocoques fécaux dans les boues de la STEP sont comprises entre 90×10^3 et 140×10^3 germes/100 ml avec une moyenne de $113,3 \times 10^3 \pm 25,16 \times 10^3$ germes/100 ml. Ces valeurs sont supérieures à celles citées par AFNOR.

| Micro-organismes | Echantillon 1 | Echantillon 2 | Echantillon 3 | Norme AFNOR NFU 44-041 |
|---|-------------------|-------------------|------------------|---------------------------|
| <i>Streptocoques fécaux</i> (germes/100ml) | 140×10^3 | 110×10^3 | 90×10^3 | 10^4 à 10^5 |

Tableau XIX : Teneurs des Streptocoques fécaux dans les boues de la STEP de Beni-Mered

Tube positif



Figure 16 : Virage de couleur de milieu et confirmation de la présence des *Streptocoques fécaux*

✚ *Clostridium sulfito-réducteurs*

Les teneurs en ASR dans les boues (**Tableau XX**) oscillent autour d'une valeur moyenne de l'ordre de $183 \times 10^3 \pm 72,09$ spores/100 ml. Ces valeurs sont très importantes par rapport aux valeurs citées par **AFNOR**.

Tableau XX : Teneurs des spores des *Clostridium sulfito-réducteurs* dans les boues de la STEP de Beni-Mered

| Micro-organismes | Echantillon 1 | Echantillon 2 | Echantillon 3 | Norme |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| <i>Clostridium sulfito-réducteurs</i> (germes/100ml) | 219×10^3 | 230×10^3 | 100×10^3 | 10^2 à 10^3 |

Spores



Figure 17 : Mise en évidence des spores des *Clostridium* sulfito-réducteurs

✚ Salmonelles

Les germes pathogènes comme *Salmonella* sont généralement plus fréquents dans les eaux usées urbaines, ce qui explique leur présence dans les boues résiduaire issues des stations d'épuration des eaux usées (DARSY *et al.*, 2002). Les résultats de la recherche des salmonelles dans les échantillons des boues issues de la STEP de Beni-Mered montrent l'absence de ce germe pathogène (Tableau XXI). Cela est probablement due à l'absence des salmonelles dans les effluents urbains traités par la station.

Tableau XXI : Résultats de recherche des salmonelles dans les boues de la STEP

| Micro-organismes | Echantillon 1 | Echantillon 2 | Echantillon 3 | Norme AFNOR NFU 44-041 |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|------------------------------|
| <i>Salmonelles</i> | Absent | Absent | Absent | Absence |

✚ Staphylocoques

Durant cette étude, nous avons mis en évidence la présence de *Staphylococcus aureus* dans le premier échantillon (**Tableau XXII, Figures 18 et 19**).

Tableau XXII : Résultats de recherche des staphylocoques dans les boues de la STEP de Beni-Mered

| Micro-organismes | Echantillon 1 | Echantillon 2 | Echantillon 3 | Norme AFNOR NFU 44-041 |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|------------------------------|
| <i>Staphylocoques</i> | Présent | Absent | Absent | Absence |

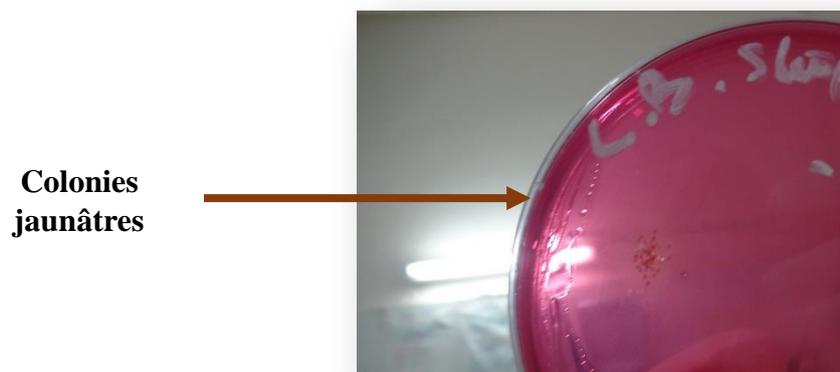


Figure 18 : Observation macroscopique des colonies jaunâtres de staphylocoque

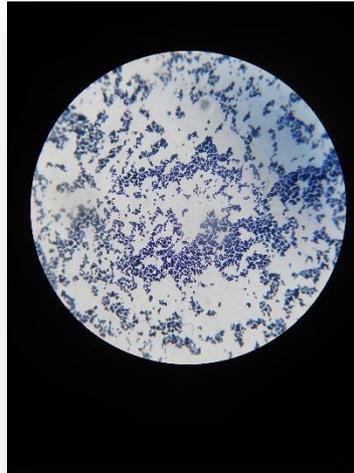


Figure 19 : Observation microscopique des colonies de staphylocoques sous forme de grappes de raisin

Il apparaît bien que les résultats des analyses bactériologiques des boues de la station d'épuration de Beni-Mered ne sont pas conformes aux valeurs citées par la norme **AFNOR**. Notons que les teneurs élevées en matières organiques (*cf.* Voir Tableau XV) est due à l'absence de processus de stabilisation, ainsi que le taux d'humidité important durant la période d'étude (pluie). Ce sont des conditions favorables au développement des microorganismes, il est probable que c'est la raison qui peut expliquer les valeurs trouvées dans cette étude. Cependant, **GAILLOT *et al.*, (2015)** a signalé qu'en période de stockage, il n'est pas rare d'observer une certaine reprise de l'activité et de la croissance des bactéries pathogènes lorsque les conditions de leur développement se trouvent réunies.

Selon **CHAULET *et al.*, (2018)**, une fois au sol, les chances de survie de ces microorganismes sont toutefois considérablement amoindries par les conditions de milieu qui leurs sont défavorables et par la concurrence des micro-organismes du sol. De plus, l'épandage accélère leur destruction en les soumettant aux effets du climat (température, rayonnement solaire, humidité) et aux effets du sol (compétition avec d'autres micro-organismes, conditions physico-chimiques) (**WOLF et GUILMAULT, 2016**). Tel est le cas par exemple des :

- Coliformes qui peuvent survivre entre 20 et 70 jours dans le sol et 30 à 50 jours dans les plantes cultivées.

- Salmonelles qui peuvent survivre entre 20 à 70 dans le sol et 20 à 230 jours dans les plantes cultivées.
- Streptocoques qui peuvent survivre 63 jours dans le sol.

Ces observations sont expliquées par **TRAD RAIS *et al.*, (2016)** du fait qu'à l'intérieur du sol, les microorganismes non autochtones disparaissent au cours de la saison culturale sous l'effet des conditions environnementales et de l'action des enzymes du sol et de la microflore tellurique. A titre exemple, **BENOIT *et al.*, (2014)**, ont étudié la survie et le transfert de certains germes pathogènes de Clostridium, dans le sol fertilisé avec du compost de fumier de bovin ou du compost de boues de station d'épuration, les spores de Clostridium ont diminué en 16 mois et ont été détectées sur les feuilles de persil pendant les 90 jours de l'expérience.

Une autre étude des risques sanitaires liées à l'épandage des boues de station d'épuration a été réalisée en 2005 par un groupe de scientifique de **l'INERIS, l'ADEME, le SYPREA et le SPDE (Syndicat des Producteurs et Distributeurs d'Eau) in CHAULI *et al.*, (2018)** a permis de détecter et de quantifier la présence de certains agents pathogènes dans les boues d'épuration, tandis que sur les parcelles épandues la plupart du temps, une forte décroissance des pathogènes au bout de deux mois du fait des conditions défavorables à leur survie (dessiccation, température, compétition naturelle de l'écologie microbienne).

Ainsi, l'existence d'un risque sanitaire et environnemental lié à l'application des boues résiduaires sur les sols agricoles est confirmée (**TRAD RAIS *et al.*, 2016**).

Notamment l'impact des épandages sur la qualité microbiologique des eaux est plus marqué sur les eaux superficielles (ruissellement) que dans les nappes phréatiques. Toutefois, certains travaux ont permis de déceler la présence de virus et de germes fécaux jusqu'à près d'un mètre de profondeur peu de temps après épandage de lixiviat (**GAILLOT *et al.*, 2015**).

Il apparait bien que l'épandage des boues de la STEP de Beni-Mered présente non seulement un risque de contamination des cultures lors de l'épandage, mais aussi la contamination des ressources en eau.

II.2.2. Paramètres parasitologiques

Certaines formes kystiques de parasites peuvent rester infectant pendant plusieurs années, tandis que les helminthes peuvent survivre pendant plusieurs mois après épandage (WOLF et GUILMAULT, 2016).

La recherche des parasites dans les boues de la STEP, montre la présence des œufs d’helminthes ainsi que des kystes des protozoaires (Tableau XXIII). Tandis que la norme AFNOR exige l’absence de ces germes pathogènes dans les boues destinées à l’utilisation agricole.

Tableau XXIII : Résultats d’analyse parasitologique

| Micro-organismes | Echantillon 1 | Echantillon 2 | Echantillon 3 | Norme AFNOR |
|--------------------------------|------------------------------|--|---|-------------|
| Œufs d’helminthes | <i>Hymenolepis nana</i> | <i>Ancylostoma duodenal</i> <i>Toxocara sp</i> | <i>Ancylostoma duodenal</i> <i>Ascaris lumbricoïde</i> | Absence |
| Kystes des protozoaires | <i>Entamoeba histolytica</i> | <i>Entamoeba hartmani</i> <i>Entamoeba coli</i> | <i>Hymenolepis diminuta</i> | - |

Les boues de Seine aval subissent un traitement d’hygiénisation et présentent des teneurs négligeables en germes pathogènes avec absence total des œufs d’helminthes (CHAULET *et al.*, 2018).

CULDAUT *et al.*, (2018), ont signalé que les procédés d’épuration biologiques ou physico-chimiques classiques ayant une efficacité limitée sur les micro-organismes pathogènes, des traitements d’hygiénisation des boues ont été développés permettant d’éliminer en grande partie ou totalement ces micro-organismes pathogènes. Cependant le processus de déshydratation n’a pas beaucoup d’influence sur la charge parasitaire des boues de la STEP de Beni-Mered.

EL FELS (2014), ont montré que le processus de déshydratation des boues de vidange (boues matière fécale) sur des lits de séchage n'était pas assez efficace pour inactiver tous les œufs d'helminthes, 25 à 50% des œufs d'*Ascaris* et de *Trichuris* restent viables.

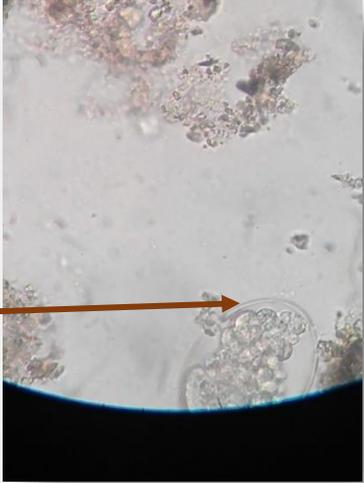
Les œufs des vers parasites émis dans les matières fécales de leurs hôtes, sont constitués de telle façon qu'ils puissent rester viables pendant plusieurs mois dans l'environnement extérieur (le sol en particulier) jusqu'à ce qu'ils soient éventuellement absorbés par un nouvel hôte intermédiaire ou définitif (**GAILLOT *et al.*, 2015**). Ainsi, l'action de nombreux facteurs défavorables en terre labourable limite la survie et la présence dans l'horizon superficiel à une durée comprise entre 30 et 90 jours. La survie des protozoaires est quant à elle mal connue (**WALF et GUILMAULT, 2016**).

Toutefois, l'enfouissement des boues peut ralentir la disparition, ou l'inactivation (perte de la viabilité) des micro-organismes pathogènes. Certains organismes, comme les vers parasites, peuvent prendre des formes de résistance (œufs) qui leur donnent une bonne capacité de survie. Cependant selon **GAILLOT *et al.*, (2015)**, la contamination des végétaux est en fonction de la capacité des micro-organismes pathogènes à persister sur ou dans différentes parties de la plante. Si certaines bactéries peuvent s'y multiplier, ce n'est absolument pas le cas des virus ni des parasites.

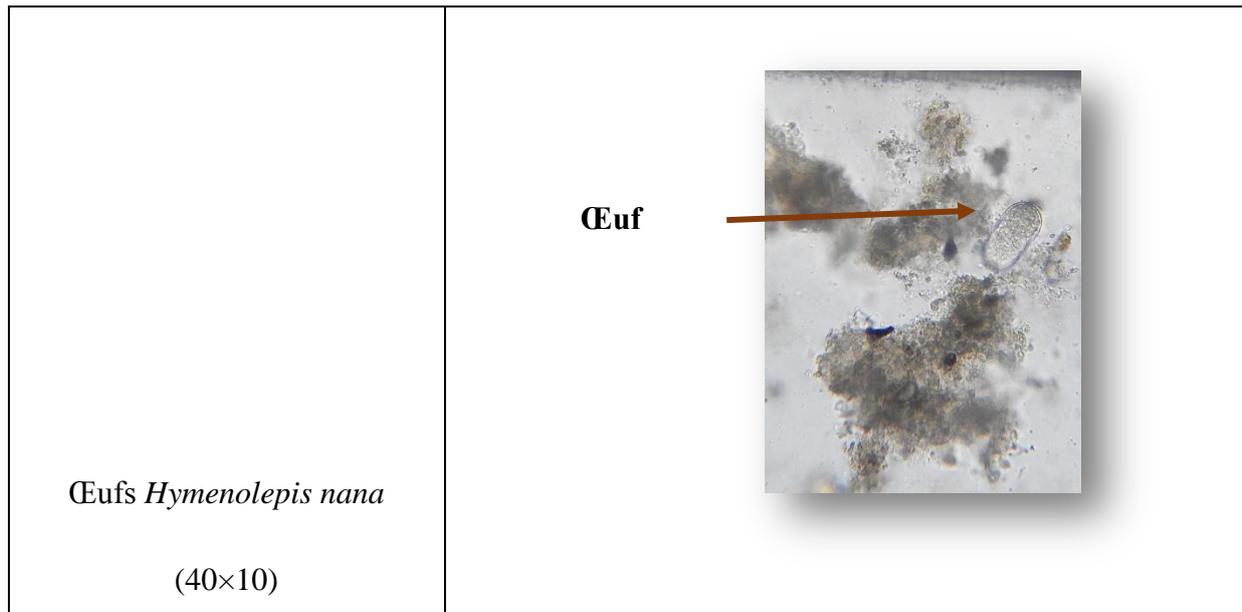
BENOIT *et al.*, (2014), ont retrouvé des œufs d'helminthes sur des carottes et des épinards cultivés sur un sol fertilisé avec du compost de toilettes sèches.

Les deux seules études consacrées à la contamination des végétaux par des protozoaires n'ont pas été réalisées avec des boues urbaines mais avec de l'eau d'irrigation contaminée. L'analyse de légumes irrigués a mis en évidence la présence de *Cryptosporidium* et de *Giardia* sur les parties comestibles des salades, courgettes, petits pois et choux (**BENOIT *et al.*, 2014**).

Tableau XXIV : Espèces des parasites déterminé dans les boues de la STEP

| Micro-organismes | Observation microscopiques |
|---|--|
| <p>Œuf d'<i>Ancylostoma duodenal</i> (40×10)</p> | <p>Blastomères à l'intérieur de kyste</p>  |
| <p>Kystes <i>Entamoeba hartmani</i></p> | <p>Kyste</p>  |

| | |
|--|---|
| <p>(40×10)</p> | |
| <p>Kyste <i>Entamoeba coli</i> (40×10)</p> | <p>Kyste d'<i>E. coli</i></p>  |
| <p>Œufs de <i>Toxocara sp</i> (40×10)</p> | <p>Œuf</p>  |



CONCLUSION

La valorisation agricole est une solution possible au problème de l'élimination des déchets d'origine urbaine mais elle contribue à accroître les teneurs des sols en certains éléments réputés toxiques entraînant ainsi le risque de contamination des chaînes alimentaires.

La présente étude a montré une légère basicité (7,95) avec une conductivité électrique plus importante (917 $\mu\text{s}/\text{cm}$) dans les boues de la STEP, qui sont relativement favorables au développement des plantes.

Cependant la caractérisation chimique des boues résiduaires, produites à la station de Beni-Mered, a permis d'établir leur richesse en azote ainsi que leur faible teneur en phosphore et en potassium. Ces teneurs en éléments fertilisants permettent de subvenir aux besoins des cultures. Notamment la richesse des boues en carbone et en matières organiques, ainsi que le calcul du rapport C/N (17,15%) permettant de les classer comme amendements organiques.

Pour ce qui est des concentrations en éléments trace métalliques, plusieurs auteurs précisent que ces éléments sont dangereux pour les végétaux et les animaux et peuvent se révéler toxiques à trop fortes doses. Ces éléments sont présents dans les boues sans pour autant dépasser les normes préconisées dans le cas de la valorisation agricole des boues, leurs concentrations sont largement inférieures aux normes AFNOR.

Par contre les résultats microbiologiques ont signalé des concentrations plus élevées pour les coliformes totaux (96×10^4 germes/100ml), les streptocoques fécaux ($86,43 \times 10^3$ germes/100ml) et les anaérobies sulfito-réducteurs (183×10^3 germes/ 100ml), par rapport aux celles citées par AFNOR, avec la mise en évidence des œufs d'helminthes, des kystes des protozoaires et la présence des staphylocoques, leur présence peut contaminer les sols agricoles.

Un risque sanitaire potentiel est donc associé à leur manipulation et à leur utilisation agricole. Mais n'oublions pas les valeurs amendant et fertilisantes enregistrées durant cette étude. Pour cela, le moyen le plus adéquat pour l'utilisation de ces boues résiduaires serait leur valorisation agricole, spécialement sylvicole puisqu'elle se justifie, selon plusieurs auteurs, par l'écartement de la matière ligneuse produite de la chaîne alimentaire humaine. Ceci éviterait les risques d'accumulation et de transmission des métaux lourds et des agents pathogènes chez l'homme. En outre, le milieu forestier nécessite des apports importants en matières organiques et en fertilisant pour l'enrichissement de ses sols pauvres et squelettiques.

Les boues peuvent, en quelque sorte, avoir un rôle écologique, qui se résume dans l'amélioration de la texture du sol, économique du fait que ces boues résiduaire ne sont pas coûteuses comparées aux engrais, et agronomique par apport des éléments essentiels pour amélioration des rendements des cultures.

Ce rôle doit nous pousser à élargir notre champ d'action :

- Sur le plan hygiénique par la mise en œuvre des processus de traitement de stabilisation et d'hygiénisation au niveau des stations d'épuration afin de minimiser les risques sanitaires liés à l'épandage des boues.
- Sur le plan analytique par le développement des méthodes d'analyse et d'étude afin de toucher tous les paramètres nécessaires à l'évaluation des critères agronomique liés à l'épandage des boues municipales (éléments majeurs, secondaire et oligo-éléments, éléments traces organiques et les éléments trace métalliques) et essayer de les concrétiser et de les appliquer sur le terrain.

Les résultats de cette étude restent parcellaires, et demande comme perspective à être poursuivie par d'autres études dans l'avenir afin de maîtriser l'influence de ces déchets sur le sol, la plante et l'environnement.

REFERENCES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

- **ADEME. 2007.** Évaluation des risques sanitaires des filières d'épandage des boues de stations d'épuration. Convention 0375C0093 et 0675C0071.
- **AGENCE DE L'EAU. 2016.** Qualité des boues recyclées des stations d'épuration urbaines bassins Rhône méditerranée et corse, établissement public de l'eau, savon l'eau. Rapport de recherche.45p.
- **ADEME. 2016.** Epandage. Fiche technique : Fabienne MULLER – Service mobilisation et Valorisation des Déchets Direction Economie Circulaire et Déchets.14p
- **ASMAHANE, B. 2011.** Valorisation des poussières de four à ciment dans le procédé solidification/stabilisation des déchets.
- **ADDOU, A. 2009.** Traitement des déchets : valorisation, élimination. Ellipses. Mostaganem : pp 67-69.
- **AMIR, S. 2005.** Contribution à la valorisation des boues de station d'épuration par compostage : devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost. Thèse de doctorat : science agronomique. Institut national polytechnique de Toulouse.
- **AMORCE. 2012.** Boues de station d'épuration : techniques de traitement, valorisation et élimination. France.

B

- **BARNAT, S. 2001.** Les boues d'épuration. Document de synthèse. Comité sécurité alimentaire d'APRIFEL, France.
- **BAUDEZ, J.C., COUSSOT, P et THIRION, F. 2010.** Rhéologie des boues de stations d'épuration : études préliminaires pour la maîtrise des stockages et épandages. Ingénieries - E A T, IRSTEA édition 1998, 33p.
- **BOURIOUG, M. 2013.** Évaluation des impacts environnementaux de l'apport des boues urbaines liquides sur les plants de Mélèzes cultivés sur un sol acide : Bénéfices et risques. Sciences de l'environnement. Université de Franche-Comté. Français.

- **BENOIT, J. 2016.** Valorisation et élimination des boues d'épuration : réglementation et perspectives, application informatique SILLAGE. Unité police de l'eau, DEAL Guyane. Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer.46p
- **BEAUCHESNE, I. 2011.** Assainissement des boues d'épuration municipales. Edition Universitaire Européen. Allemagne. 319p
- **BENMOUFFOK, A. 1994.** Caractérisation et valorisation agricole des boues résiduelles de Draa Ben Khedda (Algérie). Université Tizi Ouzou Institut d'agronomie, département de Pédologie. Cahier agriculture ; 3, 295-9.
- **BENOIT, P., CHATELET, A., GENERMONT, S., GIAMBERINI, L., MOUGIN, C., NGUYEN, C., PATUREAU, D., POURCHER, A.M., RYCHEN, G., SMOLDERS, E., TOPP, E et VIGUIE, C. 2014.** Conséquences de l'épandage de Mafor en termes de contamination de l'environnement. Rapport final de l'ESCO « Matières fertilisantes d'origine résiduelle », chapitre 4, pp 568-739.
- **BAUDEZ, J.C., COUSSOT, P et THIRION, F. 1998.** Rhéologie des boues de stations d'épuration : études préliminaires pour la maîtrise des stockages et épandages. Ingénieries - E A T, IRSTEA, pp 33 - 46.
- **BASSOMPIERRE, C. 2007.** Procédé à boues activées pour le traitement d'effluents papetiers : de la conception d'un pilote à la validation de modèles. Domain_stic. Inge. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG. Français
- **BENMOUSSA, H., TYAGI, R.D et CAMPBEL, C. 1997.** Etude conjointe de la biolixiviation et de la stabilisation de boues de station d'épuration en bioréacteurs de type colonne : effet de la concentration en solide. Institut national de la recherche scientifique (INRS-Eau), Université du Québec, pp 2373-2390.
- **BENOUDJIT, F. 2016.** Caractérisation et Valorisation des Boues Issues d'un Office d'Assainissement. Cas ONA Boumerdès (STEP Boumerdès). Thèse de Doctorat : Université M'Hamed Bougara-Boumerdes. Algérie.

- **CONSEIL SUPERIUR D'HYGEINE PUBLIQUE DE France. 1998.** Risques sanitaires liés aux boues d'épuration des eaux usées urbaines. Lavoisier TEC & DOC : Ministère du travail et des affaires sociales. France. 107p
- **CHOUAL, M., BENAMIROUCHE, S et BELBELDI, O. 2017.** Performances et limites d'utilisation des boues des stations d'épuration pour l'élevage de plants

forestiers en pépinière : Cas du pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) Performance and limits of use of sewage sludge for seedlings production: case of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait). *Revue Agriculture* vol. 8 n°1, pp 55 – 67.

- **CHAULET, J.P., CHARLIAC, M.A et SOILL, N. 2018.** Périmètre d'épandage des boues et composts de boues de l'usine d'épuration Seine aval. Service public de l'assainissement Francilien, Seine aval, 82p.
- **CULDAUT, J., GAMACHE, P et SOULERES, O. 2019.** Epandage des boues d'épuration de la station Carré de Réunion. 89p
- **COUILLARD, D. 1989.** Elimination des boues résiduelles urbaines par la fertilisation sylvicole. Institut national de la recherche scientifique (INRS-Eau), Université du Québec, pp 650-660.
- **CARDOT, C.1999.** Génie de l'environnement : les traitements de l'eau. Paris : Ellipses. 247p.
- **CERRA, I., DESAGNAT, M., DUBART, R., JUVEN, L., ZHOU, N et ZIANI, H. 2014.** Traitement des boues des stations d'épuration des petites collectivités. France.

D

- **DUDKOWSKI, A. 2000.** L'épandage agricole des boues de stations d'épuration d'eaux usées urbaines. *Courrier de l'environnement de l'INRA* n°41.france.
- **DURAND, J.H. 1983.** Les sols irrigables, étude pédologique. Département de géographie de l'université de paris. Sorbonne, 389p.
- **DONGUY, G et CHENON, P. 2017.** Evaluation des Risques Ecotoxicologiques liés à l'épandage de boues de STEP chaulées sur une parcelle agricole. *Déchets Sciences et Techniques - N°74*.france.12p
- **DEROUICHE, F. 2012.** Contribution à l'étude des boues résiduelles comme amendement organiques pour les cultures maraichères. Mémoire pour l'obtention du diplôme de magister : biologie végétale. Université d'Oran.
- **DRIDI, B et TOUMI, C. 1998.** Influence d'amendements organiques et d'apport des boues sur les propriétés d'un sol cultivés. Institut national agronomique, El Harrach, Alger. *Etude gestion des sols* 6,1, pp 7 - 14.
- **DARSY, C., LESCURE, I., PAYOT, V et ROULAND, G. 2002.** Effluents des établissements hospitaliers : teneur en microorganismes pathogènes, risques sanitaires,

procédures particulières d'épuration et de gestion des boues. Office international de l'eau, 10p.

- **DEPRES, C., AZNAR, O., VOLLET, D et JEANNEAUX, P. 2008.** Identification et notion de coûts d'organisation dans les services collectifs locaux Étude de cas : le service d'épandage agricole des boues d'épuration. Ingénieries - E A T, IRSTEA, pp 33 - 41.

E

- **ECKENFELDER, W, W. 1982.** La gestion des eaux usées urbaines et industrielles. Technique et documentation. USA. 497p

G

- **GUIRKINGER, B. 2006.** La gestion intégrée des boues urbaines : les solutions des délégataires de services d'eau et d'assainissement. Syndicat professionnel des entreprises de service d'eau et d'assainissement. Paris. 14p
- **GAILLOT, B., LAVARDE, P., BALNY, P., DELCOUR, D et MURIEL GUILLET. 2015.** Les épandages sur terres agricoles des matières fertilisantes d'origine résiduaire. Rapport CGEDD n° 009801-01, CGAAER n° 14074, 177.
- **GANRY, F et BADAIN, A. 1998.** La valorisation agricole des fumiers et des composts en Afrique soudano-sahélienne diagnostic et perspectives. Agriculture et développement n° 18, p 74-80.
- **GAMRASNI, M.A. 1981.** Utilisation agricole des boues d'origine urbaine. Edition technique et documentation, 120p.

H

- **HOUOT, S., PONS, M. N et PRADEL, M. 2014.** Synthèse des principaux résultats de l'ESCO par grand types de Mafor. Rapport final de l'ESCO « Matières fertilisantes d'origine résiduaire », chapitre 8.

I

- **INRA (2014).** Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier. Résumé de l'expertise scientifique collective. France.
- **IGOUD, S. 2001.** Valorisation des Boues Résiduaire Issues des Stations d'Épuration Urbaines par leur Epannage dans les Plantations Forestières. Rev : Production et Valorisation – Biomasse, Alger, pp 69-74.
- **IDDER, A., CHELOUFI, H., IDDER, T et MAHMA, S. 2012.** Action des boues résiduaire de la station d'épuration des eaux usées de Touggourt (Algérie) sur un sol sableux cultivé. Algerian journal of arid. Vol. 2, n°1 :pp 77-81.

J

- **JARDE, E .2002.** Composition organique des boues de stations d'épuration par compostage : devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost. Thèse de doctorat : science agronomique, institut national polytechnique de Toulouse.
- **JAURAIPHY, A. 2007.** Compostage des boues activées. Déchets verts : analyses physico-chimiques, microbiologiques, toxicologiques, bilan humiques et valorisation agronomiques. Thèse de doctorat : science agronomique et environnemental. Université Cadi Ayaad, Marrakech.

K

- **KOLLER, E. 2004.** Traitement des pollutions industriels : eau, air, sols, boues. Dunod.Paris.421p
- **KASSAOUI, H., LEBKIRI, M., LEBKIRI., RIFI, A.E., BADOUC, A et DOUIRA, A. 2009.** Bioaccumulation de métaux lourds chez la tomate et la laitue fertilisées par les boues d'une station d'épuration. Bull. Soc. Pharm. Bordeaux, 148, pp 77-92.
- **KCHAOU, R., KHELIL, M.N., GHARBI, F., REJEB, S., REJEB, M.N., HENCHI, B ET DESTAIN, J.P. 2011.** Efficience de L'utilisation de L'azote des Boues Résiduaire par le Sorgho Fourrager. European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.54 No.1 (2011), pp.75-83.

L

- **LES VOIRONS AGGLOMERATION. 2010.** Boues d'épuration de la station Ocybèle de Gaillard Etude préalable à l'épandage. Revue, pièce n°2 version aout 2010.france.
- **LACHASSAGNE, D. 2014.** Devenir de micropolluants présents dans les boues d'épuration, du traitement à l'épandage agricole : Application aux micropolluants métalliques (Cd, Cu) et organiques (médicaments) issus du traitement biologique conventionnel d'effluents urbains ou hospitaliers. Ingénierie de l'environnement. Université de Limoges. Français.
- **LASSEE, C. 1985.** Analyse des boues « analyse physico-chimique ». A F E E.
- **LADJEL, F et ABBOU, S. 2014.** Perspectives de valorisation agricole et énergétique des boues issues des STEP en Algérie. Office national d'assainissement, Algérie, 49p.

M

- **MOLETTA, R. 2009.** Traitement des déchets. Lavoisier.

O

- **OTV (1997).** Traiter et valoriser les boues. Infinités communication. Paris. 447p
- **OUANOUKI, B. 2014.** Gestion de l'environnement. Traitement des eaux usées. Edition page bleu.

P

- **PERRON, V et HEBERT, M. 2007.** Caractérisation des boues d'épuration municipales, partie I : paramètres agronomiques. VECTEUR environnement., 52p.

R

- **RAMDANI, N. 2007.** Contribution à l'étude urbaines des boues d'épuration des eaux usées résiduaires effets sur la fertilité d'un sol sableux. Mémoire pour l'obtention du diplôme de magister « science de l'environnement et climatologie ». Université d'Oran.
- **RULKENS, W. 2007.** Les boues d'épuration comme ressource de biomasse pour la production d'énergie : Aperçu et évaluation des différents sites.

- **REJEB, S., KHELIL1, M.N., GHARBI1, F ET GHORBA, M.H. 2003.** Effet des boues urbaines sur la production de la pomme de terre. Faculté des sciences, Département de biologie végétale, Campus universitaire, 1002 Tunis, Tunisie. Cahiers Agricultures 2003 : 12 : pp 39-42.
- **RODIER, J., LEGUBE, B., MERTEL, N. et BRUNET, R. 2009.** L'analyse de l'eau. 9ème édition. Paris : DUNOD. 419 ; 1066

S

- **SOULIGNAC. V. 2000.** Epandage de boues urbaines, de déchets industriels et d'effluents d'élevage sur les sols agricoles - Comparatif réglementaire en octobre 2000. Ingénieries - E A T, IRSTEA édition 2000, pp 15 - 32
- **SATIN, M. 2006.** Guide technique de l'assainissement. Le moniteur 3eme édition. Paris.713p

T

- **TRAD RAÏS, M., NACEUR KHELIL, N., MARZOUGUI, N ET SABBAHI, S. 2016.** Impact de L'épandage Agricole des Boues Résiduaire Urbaines sur la Qualité Microbiologique de Trois Légumes. European Journal of Scientific Research, pp.26-36.

V

- **VIGNERON, S. 2017.** Etude de plan d'épandage : recyclage agricole des boues déshydratées chaulées issues de traitement des eaux de process de la station d'épuration de la plate-forme industrielle de Lamotte. SEDE-Agence Nord Picardie.129p
- **VALENTIN, Y. 2012.** Gestion de l'eau. Technique de l'ingénieur : réf. Internet :42234 /3em édition. Donatienne GAUVIN.396p
- **VALENTIN, Y. 2012.** Gestion de l'eau par les industriels. Technique de l'ingénieur. BUISINE Maud. Réf. Internet : 42447/ 2em édition.478p
- **VIGNERON, S. 2018.** Recyclage agricole des boues déshydratées chaulées issues de traitement des eaux de process de la station d'épuration de la plate-forme industrielle de Lamotte. SEDE-Agence Nord Picardie, VIOLIA.12p
- **VEOIIA. 2006.** Méthode d'analyse des boues. Manuel d'auto-surveillance.

W

- **WOLF, J et GUILMAULT, P. 2016.** Approche sanitaire de l'épandage des boues d'épuration. Affaire n° B_15349, Alliance environnement exploitation.

ANNEXES

Annexe I



Epaisseur



Stabilisateur



Déshydratation

File boue

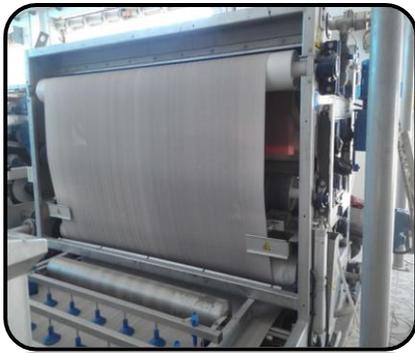


Table d'égouttage

Injecteur de polymère

Aire de stockage

Figure 20 : Processus d'épuration de la station d'épuration de Beni-Mered (photo originale)

Annexe II

Matériels utilisés dans la partie expérimentale

1- Matériels utilisés pour les analyses physico-chimiques

Appareillages

- pH-mètre sensION (Hach).
- Conductimètre HACH HQ430d.
- Four à moufle.
- Étuve BINDER.
- Appareil Kjeldahl.
- Spectrophotomètre Gallenkamp.
- Balance précise au milligramme.
- Agitateur magnétique.
- Dessiccateur.

Verreries et matériels consommables

- Bécher.
- Mortier
- Entonnoir.
- Creusets.
- Eprouvettes 100ml, 1l.
- Erlen Meyer.
- Fioles 10ml, 50ml, 100ml.
- Matras.
- Picettes.
- Pipettes 1ml, 10ml, 15ml.
- Récipient pour l'eau de dilution.
- Papier absorbant.
- Coupe en céramique ou en porcelaine.
- Pincés.

Colorants, réactifs et produits chimiques

- L'eau distillée
- Acide sulfurique
- Catalyseur à base de sélénium :
- Mélanger 995 g de potassium K_2SO_4 et 5 g de sélénium en poudre.
- Hydroxyde de sodium NaOH.
- Acide borique
- Indicateurs :
- 100 mg de rouge de méthyle et 500 mg de vert de bromocrésol dissous dans 500 ml d'éthanol à 95 %.
- Acide chlorhydrique.

2. Matériels utilisés pour les analyses microbiologiques

Appareillages et verreries

- Microscope optique.
- Une lame.
- Des lamelles.
- Bain marie 80°C
- Bec Bunsen
- Boîtes de Pétri
- Etuves
- Glacière
- Pince stérile
- Pipettes Pasteur
- Portoir
- Réfrigérateur
- Tubes à essai

Réactif, additifs et solution

- Additif Hektoen
- Additif SFB
- Alun de fer.
- Eau distillée
- Eau de Javel.
- Rouge de méthyle
- Réactif kowacs

- Sulfite de sodium

Milieux de culture

| <i>Milieu de culture</i> | <i>Composition</i> |
|---|---|
| <i>Bouillon lactosé au bromocrésol pourpre (BCPL, milieu simple et double concentration)</i> | Peptone 5g Extrait de viande 3g Lactose 10g Pourpre de bromocrésol 0,3g Bacto agar difco 15g Eau distillée 1000ml |
| <i>Bouillon de Schubert en g/l d'eau distillée</i> | Tryptophane 0,2g Acide glutamique 0,2g Sulfate de magnésium 0,7g Citrates de sodium 0,5g Sulfate d'ammonium 0,4g Chlorure de sodium 2g Peptone 10g Mannitol 7,5g Phosphate disodique 4g Phosphate monopotassique 0,6g Eau distillée 500ml |
| <i>Milieu ROTHE (milieu simple concentration et double concentration) en g/l</i> | Hydrolysats tryptiques de caséine 12,6g (S/C), 25,2g (D/C) Peptone bactériologique 8 g (S/C), 16g (D/C) Glucose 5g (S/C), 10g (D/C) Chlorure de sodium 5g (S/C), 10g (D/C) Phosphate dipotassique 2,7g (S/C), 5,4g (D/C) Phosphate monopotassique 2,7g (S/C), 5,4g (D/C) Azide de sodium 0,2g (S/C), 0,4g (D/C) |
| <i>Milieu Litsky (EVA BROTH) en g/l d'eau distillée</i> | Peptone 20g. Glucose 5g Chlorure de sodium 5g Phosphate dipotassique 2,7g Phosphate monopotassique 2,7g Azothhydrate de sodium 0,3g Ethyl violet 5ml Eau distillée 1000ml |
| <i>Bouillon au sélénite de sodium cystéine SFB</i> | Lactose 4g Tryptophane 5g |

Gélose Heckoten

Phosphate disodique 10g
Sélénite de sodium 0,01g
L-Cystine 0,01g

Peptone 12g
Extrait de viande 3g
Lactose 12g
Saccharose 12g
Salicine 2g
Citrate de fer III et d'ammonium 2g
Sels biliaires 9g
Fuchsine acide 0,1g
Bleu de bromothymol 0,065g
Agar 13g

Gélose Viande Foie (VF)

Base viande foie 30g
Glucose 2g Agar 6g
Eau distillée 1000ml

Gélose Chapman

Extrait de viande 1g
Peptone 10g
Chlorure de sodium 5g
Mannitol 10g
Rouge de phénol 25g
Gélose 15g
Eau distillée 1000ml

Annexe III

Calcul de pourcentage des paramètres chimiques :

- Carbone organique total :



Figure 21 : Point de gamme de carbone organique total (originale)

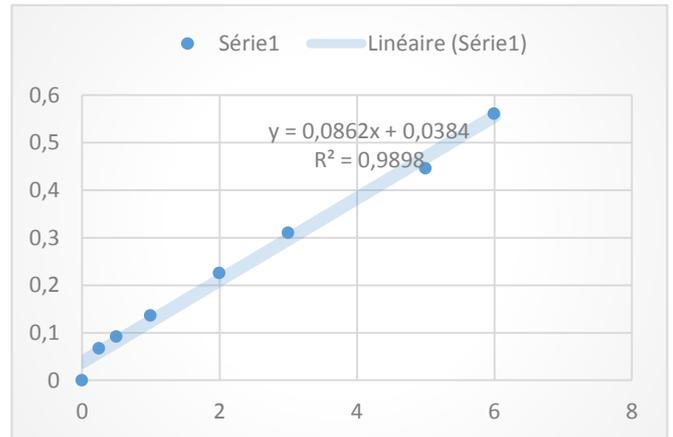


Figure 22 : Courbe d'étalonnage carbone organique total

Tableau XXV :
points de gamme

| <i>COT%</i> | <i>Lectures</i> |
|-------------|-----------------|
| 0 | 0 |
| 0,25 | 0,067 |
| 0,5 | 0,092 |
| 1 | 0,136 |
| 2 | 0,226 |
| 3 | 0,31 |
| 5 | 0,446 |
| 6 | 0,561 |

COT% des

- Phosphore total



Figure 24 : points de gamme
(originale)

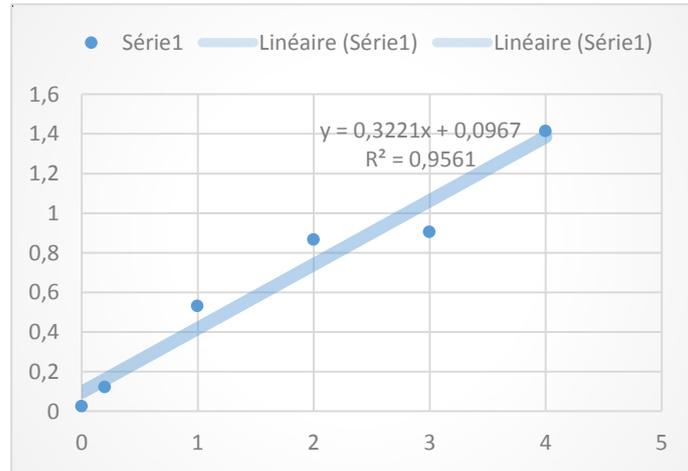


Figure 23 : Courbe d'étalonnage
phosphore total

Tableau XXVI : PT % des points de gamme

| <i>PT (ppm)</i> | <i>lectures</i> |
|-----------------|-----------------|
| 0 | 0,026 |
| 0,2 | 0,122 |
| 1 | 0,531 |
| 2 | 0,867 |
| 3 | 0,906 |
| 4 | 1,414 |

- Potassium :

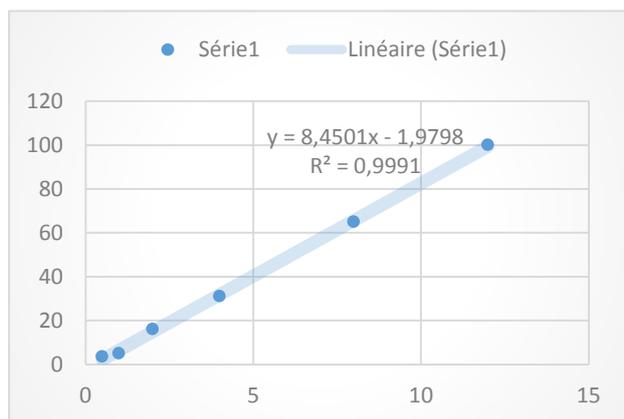


Figure 25 : Points de gamme (originale)

figure 26 : Courbe d'étalonnage de potassium

Tableau XXVII : K% des

points de gamme

| <i>point de gamme</i> | |
|-----------------------|-----|
| 0,5 | 3,5 |
| 1 | 5 |
| 2 | 16 |
| 4 | 31 |
| 8 | 65 |
| 12 | 100 |

Annexe IV

Tableau XXVIII : Norme AFNOR des paramètres chimiques des boues résiduaires

| Paramètres | Norme AFNOR |
|---------------------------|---------------|
| Azote total | 2 – 2.5 % |
| Phosphore total | 0,43 – 0,87 % |
| Potassium | 0,16 – 0,40 % |
| Matières organiques total | 40 – 65 % |

(LASSEE, 1985)

Tableau XXIX : Norme AFNOR des paramètres microbiologiques des boues résiduaires

| Micro-organismes | Norme AFNOR |
|-------------------------------|-----------------|
| Coliformes totaux | 10^3 à 10^4 |
| Escherichia coli | - |
| Streptocoques fécaux | 10^4 à 10^5 |
| Anaérobies sulfito-réducteurs | 10^2 à 10^3 |
| Salmonelle | Absence |
| Staphylocoques | Absence |
| Œufs d'helminthes | Absence |

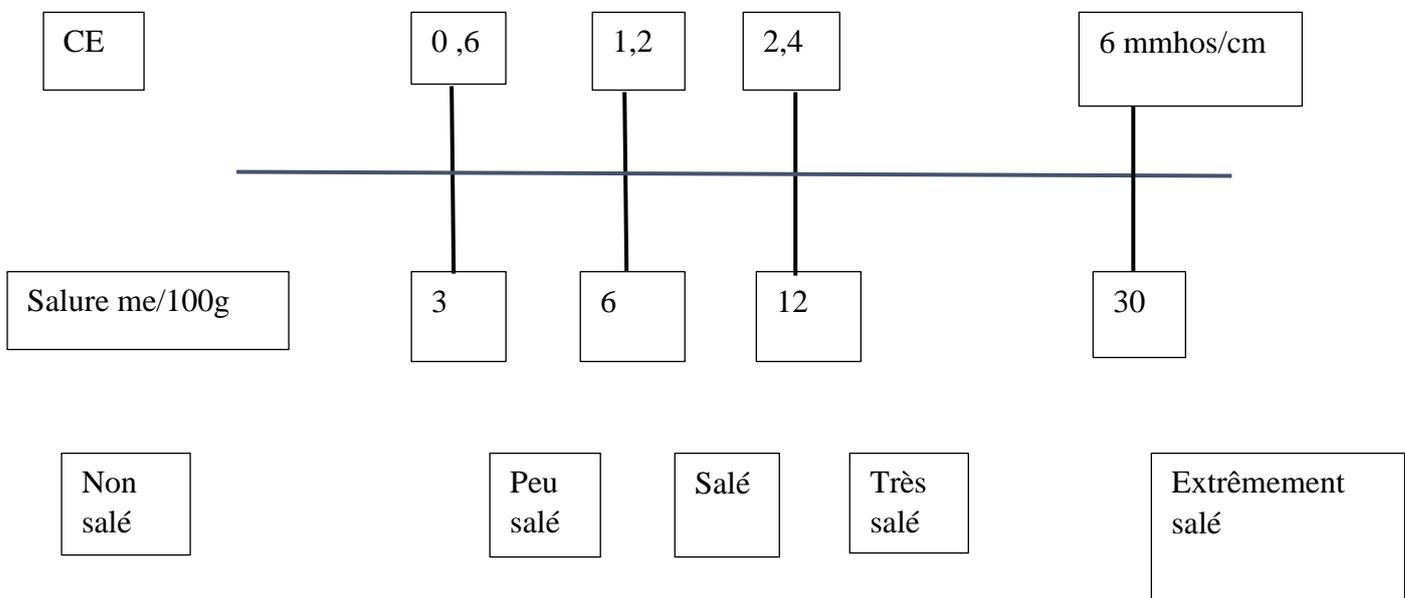


Figure 27 : Echelle de la salinité (DURAND, 1983)

Annexe V

Tableau XXX : table de Mac Grady

| Nombre des tubes positifs | | | NPP dans 100 ml |
|---------------------------|-----------|-------------|-----------------|
| 3 de 10 ml | 3 de 1 ml | 3 de 0.1 ml | |
| 0 | 0 | 1 | 3 |
| 0 | 1 | 0 | 3 |
| 1 | 0 | 0 | 4 |
| 1 | 0 | 1 | 7 |
| 1 | 1 | 0 | 7 |
| 1 | 1 | 1 | 11 |
| 1 | 2 | 0 | 11 |
| 2 | 0 | 0 | 9 |
| 2 | 0 | 1 | 14 |
| 2 | 1 | 0 | 15 |
| 2 | 1 | 1 | 20 |
| 2 | 2 | 0 | 21 |
| 2 | 2 | 1 | 28 |
| 3 | 0 | 0 | 23 |
| 3 | 0 | 1 | 39 |
| 3 | 0 | 2 | 64 |
| 3 | 1 | 0 | 43 |
| 3 | 1 | 1 | 75 |
| 3 | 1 | 2 | 120 |
| 3 | 2 | 0 | 93 |
| 3 | 2 | 1 | 150 |
| 3 | 2 | 2 | 210 |

| | | | |
|---|---|---|------|
| 3 | 3 | 0 | 240 |
| 3 | 3 | 1 | 460 |
| 3 | 3 | 2 | 1100 |
| 3 | 3 | 3 | 1400 |

(RODIER *et al*, 2009)