



République Algérienne démocratique 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 des biotechnologies

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master académique en Sciences de
la Nature et de la Vie

Spécialité : Biotechnologies microbiennes

Evaluation du potentiel phytotechnique et microbien
(Bioremédiation) dans l'épuration des eaux usées
issues des industries agroalimentaires

Présenté par Mlle Attaba Feriel Hayet

Devant le jury composé de :

| Enseignantes | grade | Université |
|--------------------------|-------|---------------|
| Dr. Ammad F. Présidente | M.C.A | Univ. Blida 1 |
| Mme Aoues K. Promotrice | M.C.A | Univ. Blida 1 |
| Mme Toua D. Examinatrice | M.A.A | Univ. Blida 1 |

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Avant toute chose, je remercie Dieu, le tout puissant, de m'avoir donné la force et la patience pour achever ce modeste travail.

A ma promotrice, Mme Aoues K. Maitre conférence et enseignante à l'université Saad Dahleb Blida de m'avoir aidé tout au long du travail.

A Mme Ammad Maitre conférence à l'université Saad Dahleb Blida de nous avoir encouragé et aidé pendant tout le long de notre cursus.

A Mme Benchabane Maitre Assistante (classe A) à l'université Saad Dahleb Blida, de nous avoir donné une graine de connaissance sur le monde microbien et nous avoir donné de la patient pour cette filière.

A monsieur Benchabane, Professeur à l'université Saad Dahleb Blida, d'avoir partagé ses connaissances et sa disponibilité ainsi que son aide durant le cursus.

Dédicaces

A mon défunt papa, que je souhaite qu'il soit heureux là ou il est de savoir que j'ai tenue ma promesse et finir mes études.

A ma maman chérie, pour toute la patience qu'elle m'avait appris et toute la joie qu'elle m'apporte dans cette vie.

A ma sœur et pour son soutien moral.

A mon neveu Abdelmoumene d'avoir porté une joie grandiose à notre vie malgré son très jeune âge (Qu'Allah te bénisse)

A mon très cher fiancé, Abderrahim de m'avoir soutenu tout au long de ce travail et m'avoir encouragé et partagé tes sentiments.

A ma future belle mère et future belle famille pour tout le courage que vous m'avez apporté.

A mes meilleures amies Linda et Madjda que j'aime tellement, je vous remercie pour tous les souvenirs que nous avons vécus ensemble.

Résumé

Le secteur agro-alimentaire se caractérise par sa diversité de par sa taille, le type d'entreprises, la gamme étendue de matières premières, les produits et procédés utilisés ainsi que les nombreuses combinaisons qu'ils permettent. Le secteur est également sujet à des conditions économiques, sociales et environnementales locales diverses, et soumis à des législations nationales voire régionales.

Les principaux enjeux environnementaux cruciaux des eaux usées agro-industrielles sont les résidus solides, L'azote total, le phosphore total, et le demande biochimique en oxygène. En raison d'un certain nombre de facteurs tels que l'augmentation des prix de l'eau douce, la préservation et la disponibilité des ressources en eau ainsi que la durabilité environnementale, de nouvelles approches pour le traitement des eaux usées apparaissent.

Les différentes informations ont été collectées à partir des principales bases de données scientifiques (articles publiés, des thèses ...ect) présent au niveau des plateformes Science Direct, Pubmed, Web of Knowledge, et Google scholar.

La synthèse des données a permis d'identifier une multitude de traitements biologiques faisant appel à des bactéries, des champignons, des algues et/ou des plantes aquatiques. L'efficacité de ces traitements dépend des conditions adoptées (aérobie, anaérobie...), de l'industrie en question, et du taux de contamination de cette eau par les effluents.

Ainsi les procédés biologiques sont fiables que les procédés physico-chimiques du fait d'une bonne efficacité d'élimination de la demande chimique en oxygène (DCO), du coût d'investissement maîtrisé et de la maturité du traitement.

Mots clés : Bioremédiation, industries agroalimentaires, eaux usées, phytotechnologie, Pollution.

Evaluation of the phytotechnical and microbial potential (Bioremediation) in the purification of wastewater from agri-food industries

Abstract

The agri-food sector is characterized by its diversity in terms of size, type of companies, the wide range of raw materials, products and processes used and the many combinations they allow. The sector is also subject to diverse local economic, social and environmental conditions, and subject to national and regional legislation.

The main critical environmental issues of agro-industrial wastewater are solid residues, total nitrogen, total phosphorus, and biochemical oxygen demand. Due to a number of factors such as increasing freshwater prices, preservation and availability of water resources, and environmental sustainability, new approaches to wastewater treatment are emerging.

The different information was collected from the main scientific databases (published articles, theses ...ect) present at the Science Direct, Pubmed, Web of Knowledge, and Google scholar platforms.

The synthesis of the data allowed us to identify a multitude of biological treatments using bacteria, fungi, algae and/or aquatic plants. The effectiveness of these treatments depends on the conditions adopted (aerobic, anaerobic...), the industry in question, and the rate of contamination of this water by the effluents.

Thus, biological processes are more reliable than physical-chemical processes due to their good efficiency in eliminating the chemical oxygen demand (COD), the controlled investment cost and the maturity of the treatment.

Key words: Bioremediation, agri-food industries, wastewater, phytotechnology, Pollution.

تقييم إمكانات التكنولوجيا النباتية والجراثيم (الإصلاح الحيوي) في معالجة المياه المستعملة من الصناعات الزراعية الغذائية

ملخص

يتميز قطاع الأغذية الزراعية بتنوع حجمه، ونوع المؤسسات، ومجموعة واسعة من المواد الخام، والمنتجات والعمليات المستخدمة، والعديد من التركيبات التي تسمح بها. ويخضع هذا القطاع أيضا لظروف اقتصادية واجتماعية وبيئية محلية متنوعة، ويخضع لتشريعات وطنية أو حتى إقليمية.

وتتمثل القضايا البيئية الرئيسية الحرجة لمياه الصرف الصحي الزراعية الصناعية في المخلفات الصلبة، والنيتروجين الكلي، والفوسفور الكلي، والطلب على الأكسجين الكيميائي الحيوي. و بسبب عدد من العوامل مثل ارتفاع أسعار المياه العذبة، والحفاظ على الموارد المائية وتوافرها، والاستدامة البيئية، بدأت تظهر نهج جديدة لمعالجة مياه الصرف الصحي .

تم جمع المعلومات المختلفة من قواعد البيانات العلمية الرئيسية (المقالات المنشورة، الأطروحات ... ect) موجودة على مستوى المنصات العلوم المباشرة، Pubmed، ويب المعرفة، والباحث جوجل.

وقد أتاح تجميع البيانات تحديد العديد من العلاجات البيولوجية باستخدام البكتيريا والفطريات والطحالب و/أو النباتات المائية. تعتمد فعالية هذه العلاجات على الشروط المعتمدة (الهوائية ، اللاهوائية...) ، والصناعة المعنية ، ومعدل تلوث هذه المياه بالنفايات السائلة.

وبالتالي فإن العمليات البيولوجية موثوق بها كعمليات فيزيائية كيميائية بسبب الكفاءة الجيدة للقضاء على الطلب على الأكسجين الكيميائي (DCO) وتكلفة الاستثمار الخاضعة للرقابة ونضج العلاج.

الكلمات الرئيسية: الإصلاح البيولوجي، الصناعات الزراعية الغذائية، مياه الصرف الصحي، التكنولوجيا النباتية، التلوث.

Sommaire

| | | |
|--------|---|----|
| 1- | Définition de la Pollution : | 4 |
| 1.1- | Pollution de l'air : | 4 |
| 1.2- | Pollution du sol : | 4 |
| 1.3- | Pollution des eaux : | 4 |
| 2. | Eaux usées : | 4 |
| 2.1- | Types et origines des eaux usées : les eaux usées sont divisés en 3 types : | 5 |
| 2.1.1- | Eaux usées domestiques : | 5 |
| 2.1.2- | Eaux usées de ruissellements urbains : | 5 |
| 2.1.3- | Eaux usées industrielles : | 5 |
| 3- | Utilisation de l'eau en industries agroalimentaires : | 5 |
| 4- | Caractéristiques physico-chimiques des eaux usées industrielles: | 6 |
| 4.1- | Température | 6 |
| 4.2- | pH | 6 |
| 4.3- | Potentiel redox (Eh) | 7 |
| 4.5- | Eléments en solution | 7 |
| 4.6- | Oxygène dissous (OD) | 7 |
| 4.7- | Demande biochimique en oxygène (DBO) | 7 |
| 4.8- | Demande chimique en oxygène (DCO) | 7 |
| 4.9- | Substances eutrophisantes : différentes formes d'azote et de phosphore (nutriments) | 8 |
| 5- | Impact des eaux usées industriels : | 8 |
| 6- | Normes des eaux usées : | 9 |
| 6.1- | Normes internationales : | 9 |
| 6.2- | Normes algériennes | 9 |
| II- | Composants des déchets industriels : | 12 |
| 1. | Composants des déchets selon le type d'industrie : | 13 |
| 1.1. | Industrie de produits laitiers | 13 |
| 1.2. | Caractéristiques des effluents d'abattoirs: | 16 |
| 1.3. | Caractéristiques des eaux usées des brasseries : | 16 |
| III- | Traitements classiques des eaux usées industriels : | 18 |
| 1- | Prétraitement | 18 |
| 2- | Traitement primaire | 18 |
| 3- | Traitement secondaire | 18 |
| 3.1. | Boues activées | 19 |
| 3.2. | Filtres à ruissellement | 19 |
| 3.2.1. | Contacteurs biologiques rotatifs | 19 |
| 4- | Traitement tertiaire | 20 |

| | |
|---|----|
| 4.1. Traitement des boues : | 20 |
| 4.1.1. Boues activées conventionnelles (flux continu) | 20 |
| I- Définition de la bioremédiation | 23 |
| 1.1- Biopile..... | 24 |
| 1.2- Bioréacteur | 24 |
| 2. La bioremédiation in situ : | 24 |
| 2.1- Bioaugmentation..... | 25 |
| 2.2- Bioslurping :..... | 25 |
| 2.3- La mycoremédiation | 25 |
| 2.4- Phytoremédiation..... | 26 |
| Avantages et limitations des Bioremédiations..... | 28 |
| a. Les avantages :..... | 28 |
| b. Les limites :..... | 29 |
| 2- Les abattoirs :..... | 38 |
| Résultats : | 39 |
| DISCUSSION..... | 42 |
| CONCLUSION ET PERSPECTIVES | 46 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-------------------------------------|
| Tableau 1 consommation d'eau en industrie agroalimentaire. (Mekonnen & Hoekstra, 2012); (Gerbens-Leenes et al., 2013)..... | 6 |
| Tableau 2 normes des rejets industrielles selon OMS..... | 9 |
| Tableau 3 normes de paramètres d'effluents des industries de transformation des viandes et abattoirs (JORA 2006) | 10 |
| Tableau 4 normes des paramètres d'effluents dans le secteur des industries de sucreries (JORA 2006) .. | 10 |
| Tableau 5 normes des paramètres d'effluents dans le secteur de production des levures (JORA 2006) ... | 10 |
| Tableau 6 normes des paramètres d'effluents dans le secteur de la production des brasseries (JORA 2006) | 11 |
| Tableau 7 : les différents effluents contenus dans les eaux usées des industries laitières (Kolev Slavov et al 2017) | 15 |
| Tableau 8 : caractéristiques des eaux usées des abattoirs (Bustillo-Lecompte et al., 2016) | 16 |
| Tableau 9: caractéristiques des eaux usées issues des brasseries (Boukary, 2019) | 17 |
| Tableau 10: différents résultats obtenus dans les articles précédents | Error! Bookmark not defined. |
| Tableau 11: différents résultats obtenus dans l'article précédent | 41 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : classification des déchets agro-industriels selon différentes sources (Andri et al. 2018)..... | 12 |
|---|----|

Liste des abréviations :

DBO₅ : demande biochimique en oxygène pour une période de cinq jours

DCO : demande chimique en oxygène

pH : Potentiel d'hydrogène

MES : Matière en suspension

TSD : Total des solides dissous

TSS : Total des solides en suspension

TS : Total des solides

TSV : Total des solides volatiles

ATK : Azote total Kjeldahl

COT : Carbone organique total

DCOS : Demande chimique en oxygène soluble

DCTO : Demande chimique totale en oxygène

°C : Degré Celsius

Introduction générale

Introduction :

L'eau joue un rôle crucial dans le développement économique et social. De plus, elle est un élément classée comme étant une source de vie et est depuis toujours une richesse irremplaçable. Ainsi, sa gestion de manière durable est devenue aujourd'hui indispensable. La qualité de l'eau est par ailleurs affectée par des applications industrielles, agricoles et domestiques qui ont une immense influence sur la détérioration de cette ressource. En effet, des substances d'origine chimique n'ont cessées d'être émises dans l'environnement et peuvent devenir une menace pour l'équilibre des écosystèmes aquatiques et pour la santé humaine.

Selon l'UNICEF la moitié de la population mondiale pourrait vivre dans des zones confrontées à une pénurie d'eau dès 2025, quelque 700 millions de personnes pourrait être déplacées par une pénurie d'eau intense d'ici 2030. D'ici 2040, environ 1 enfant sur 4 dans le monde vivra dans des zones de stress hydrique extrêmement élevé.

Les industries sont les plus grands consommateurs de l'eau. Les industries agro-alimentaires sont très exigeantes pour leur approvisionnement en eau tant en volume qu'en qualité. Une grande qualité d'eau est souvent nécessaire pour la production de vapeur, Comme ingrédient et plus généralement dans tous les usages au contact du produit. Parmi les principaux investisseurs, on retrouve les sucreries, les industries du grain, le secteur de la viande et, enfin, les laiteries et les conserveries. Cette consommation d'eau génère en contrepartie une quantité considérable d'effluents et de déchets solides ou liquides qui sont rejetés dans l'environnement. (Compton, M. et al., 2018)

Les méthodes de traitement de ces eaux usées sont classées en quatre catégories : chimiques, physiques, méthodes biologiques et hybrides. Un certain nombre de recherches récentes qualifiées et complètes et des articles de synthèse ont été publiés toute en mettant l'accent sur les différents thèmes du traitement biologique ou bioremédiation qui consiste d'utiliser les êtres vivants (plantes, champignons ou bactéries) pour réduire cette pollution.

L'objectif de ce mémoire est de réaliser une synthèse bibliographique sur les différents traitements biologiques des eaux usées effectué dans les industries agro-alimentaire.

Ce document est structuré en 2 parties :

La première partie comprend une étude bibliographique sur les différentes pollutions qui existent, les différentes eaux usées et leurs normes de rejets ainsi que les techniques biologiques et physico-chimiques connues en traitement des eaux usées issues des industries agroalimentaires.

La deuxième partie consiste à faire une étude bibliographique basée sur l'efficacité des différents traitements en utilisant les techniques de bioremédiation (phytotechnologie, l'usage des bactéries/champignons et microalgues) en traitement des eaux usées issues des industries agroalimentaires. Ainsi qu'une discussion des résultats obtenues et suivi d'une conclusion et des perspectives.

CHAPITRE I SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1- Définition de la Pollution :

La pollution peut être définie comme l'accumulation des contaminants ayant des effets néfastes sur la santé et le bien-être de l'homme et sur l'environnement. Mais pour vraiment comprendre la pollution, nous devons définir l'identité et la nature des contaminants potentiels. Les contaminants peuvent résulter de déchets produits par l'activité des organismes vivants, en particulier les humains. Les polluants sont également omniprésents dans la mesure où ils peuvent se trouver à l'état solide, liquide ou gazeux et causer différents types de pollutions. (Pepper et al., 2013).

1.1- Pollution de l'air :

La pollution de l'air est l'introduction dans l'atmosphère de produits chimiques, de particules ou de matières biologiques néfastes pour l'homme et l'environnement appelées polluants atmosphériques. Ces polluants peuvent se présenter sous la forme de particules solides, de gouttelettes liquides ou de gaz. En outre, ils peuvent être d'origine naturelle ou humaine comme : les cendres d'une éruption volcanique, le monoxyde de carbone des gaz d'échappement d'un véhicule à moteur ou le dioxyde de soufre rejeté par les usines. (Saxena & Pratap Choudhary, 2017)

1.2- Pollution du sol :

La pollution des sols est définie comme l'accumulation dans les sols de composés toxiques persistants, de produits chimiques, de sels, de matières radioactives ou d'agents pathogènes qui ont des effets néfastes sur la croissance des plantes et des animaux. (Havugimana et al., 2015)

1.3- Pollution des eaux :

La pollution de l'eau peut être définie comme la contamination des cours d'eau, des lacs, des mers, des eaux souterraines ou des océans par des substances nocives pour les êtres vivants. (Goel, 2006). Les principales sources de pollution de l'eau sont : les eaux usées municipales non traitées ; une industrialisation rapide sans traitement adéquat des effluents et sans élimination des déchets ; des pratiques agricoles intensives de plus en plus basées sur l'utilisation de produits agrochimiques couplées à une irrigation excessive ; et une surexploitation des eaux souterraines causant l'intrusion d'eau salée dans l'eau douce. (FAO, 2000)

2. Eaux usées :

Une eau usée est généralement un mélange de matières polluantes répondant à ces catégories, dispersées ou dissoutes dans l'eau qui a servi aux besoins domestiques ou industriels. La plupart

des activités humaines qui utilisent de l'eau produisent des eaux usées. Étant donné que la demande d'eau dans son ensemble augmente, la quantité d'eaux usées produites, et leur charge polluante globale, sont en régularité constante dans le monde entier. (K.Bengouga, 2010)

2.1- Types et origines des eaux usées : les eaux usées sont divisés en 3 types :

2.1.1- Eaux usées domestiques :

Ce sont des eaux ménagères, issues des maisons, composées des excréments humaines, nutriments et matières organiques, eaux contenant des poudres de lessives, produits d'usage quotidien, et peuvent également contenir des polluants émergents tels que les produits pharmaceutiques. (Baumont et al., 2004)

2.1.2- Eaux usées de ruissellements urbains :

Ces dernières regroupent les eaux de ruissellements c'est-à-dire eaux de pluies et de fonte des neiges, les effluents industriels ou même les eaux agricoles qui ruissellent à la surface du sol et se jettent dans des cours d'eau. Ces eaux sont composées d'un très large éventail de contaminants tels que les microorganismes pathogènes nutriments, matières organiques, métaux lourds, produits de combustion (hydrocarbures aromatiques polycycliques), caoutchouc, huile de moteurs, engrais et pesticides...etc. (Baumont et al 2004).

2.1.3- Eaux usées industrielles :

Les eaux usées industrielles regroupent toutes les eaux qui sont en principe rejetées par l'usine dans le milieu extérieur, après avoir contribué à la fabrication, au nettoyage, au transport, au refroidissement. (Woodard & Curran, Inc., 2006)

3- Utilisation de l'eau en industries agroalimentaires :

L'industrie alimentaire est un secteur important. L'utilisation de l'eau dans l'industrie d'un pays ou d'une région donnée est associée au niveau de revenu. Selon les données recueillies auprès de la Banque mondiale, les pays à faible revenu utilisent 2% du prélèvement total d'eau douce, tandis que les pays à revenu élevé en utilisent 17 %. L'Europe et l'Asie centrale ont rapporté 45% d'utilisation d'eau dans l'industrie. (Meneses et al., 2019).

Tableau 1 représente le pourcentage d'utilisation de l'eau en différentes industries agroalimentaires :

Tableau 1 : consommation d'eau en industrie agroalimentaire. (Mekonnen & Hoekstra, 2012); (Gerbens-Leenes et al., 2013)

| Industries agroalimentaires | Consommation d'eau (%) |
|------------------------------|------------------------|
| Transformation de la viande | 24 |
| Boissons | 13 |
| Produits laitiers | 12 |
| Autres produits alimentaires | 11 |
| Fruits et légumes | 10 |
| Produits de la boulangerie | 9 |
| Céréales et oléagineux | 9 |
| Sucres et confiseries | 5 |
| Aliments pour animaux | 5 |
| Produits de la mer | 2 |

4- Caractéristiques physico-chimiques des eaux usées industrielles:

Selon l'institut bruxellois (2005) pour la gestion et l'environnement les caractéristiques physico-chimiques des eaux usées industrielles sont citées ci-dessous :

4.1- Température :

La valeur de ce paramètre est influencée par la température ambiante mais également par d'éventuels rejets d'eaux résiduelles chaudes. Des changements brusques de température de plus de 3° C s'avèrent souvent néfastes à la prolifération des microorganismes qui dégradent les polluants. Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet, celle-ci joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissociation des sels dissous donc sur la conductivité électrique, dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et des mélanges éventuels,...etc. (Rodier, 2009)

4.2- pH

Le pH d'une eau naturelle peut varier de 4 à 10 en fonction de la nature acide ou basique des terrains traversés. Des pH faibles (eaux acides) augmentent notamment le risque de présence de métaux sous une forme ionique plus toxique. Des pH élevés augmentent les concentrations d'ammoniac, toxique pour les poissons. On admet généralement qu'un pH naturel situé entre 6,5 et 8,5 caractérise des eaux de manière optimale. (Rodier, 2009)

4.3- Potentiel redox (Eh)

Dans les systèmes aqueux, le potentiel redox affecte les états d'oxydation des éléments (H, C, N, O, S, Fe...). Dans une eau bien oxygénée, les conditions d'oxydation dominent. Quand les concentrations d'oxygène diminuent, le milieu devient plus réducteur ce qui se traduit par une réduction du potentiel redox.

4.5- Eléments en solution

Les chlorures (Cl⁻) et les sulfates (SO₄²⁻) font généralement l'objet d'un suivi particulier. Une forte teneur en chlorures peut indiquer une pollution par certaines eaux usées industrielles. Les eaux usées de nombreuses industries peuvent également contenir des sulfates. D'autres ions tels que le calcium (Ca²⁺), magnésium (Mg²⁺), potassium (K⁺), fluor (F⁻) peuvent être également mesurés. Les éléments en solution sont exprimés en mg/l. (Rejsek, 2002)

4.6- Oxygène dissous (OD)

Les concentrations en oxygène dissous constituent, avec les valeurs de pH, l'un des plus importants paramètres de qualité des eaux. La concentration en oxygène dissous varie de manière journalière et saisonnière car elle dépend de nombreux facteurs tels que la pression partielle en oxygène de l'atmosphère, la température de l'eau, la salinité, la pénétration de la lumière, l'agitation de l'eau et la disponibilité en nutriments et les processus d'oxydation et de décomposition de la matière organique présente dans l'eau. Globalement, plus la concentration en oxygène dissous (OD) plus l'absorption la pollution est grande. (IBGE, 2005)

4.7- Demande biochimique en oxygène (DBO)

La demande biochimique en oxygène (DBO) représente la quantité d'oxygène utilisée par les bactéries pour décomposer partiellement ou pour oxyder totalement les matières biochimiques oxydables présentes dans l'eau et qui constituent leur source de carbone (graisses, hydrates de carbone, tensioactifs, etc.). Ce prélèvement d'oxygène se fait au détriment des autres organismes vivants. L'indicateur utilisé est généralement la DBO₅ qui correspond à la quantité d'oxygène (exprimée en mg/l) nécessaire aux microorganismes décomposeurs pour dégrader et minéraliser en 5 jours la matière organique présente dans un litre d'eau polluée. (Mathieu et al., 2003)

4.8- Demande chimique en oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène (DCO) correspond à la quantité d'oxygène nécessaire pour la dégradation par voie chimique, effectuée à l'aide d'un oxydant puissant, des composés organiques présents dans l'eau. Elle permet de mesurer la teneur en matières organiques totales, y compris celles qui ne sont pas dégradables par les bactéries. (Rodier, 2009)

4.9- Substances eutrophisantes : différentes formes d'azote et de phosphore (nutriments)

Des éléments tels que l'azote (N) et le phosphore (P) constituent des éléments nutritifs indispensables aux végétaux. Les composés qui en contiennent comme les phosphates et les nitrates constituent dès lors des matières nutritives de choix pour les végétaux.

Les concentrations en nitrites (NO_2^-), nitrates (NO_3^-), ammoniac (NH_3) et ammonium (NH_4^+), phosphates (PO_4^{3-}), azote (N) et phosphore (P) sont dès lors des paramètres importants pour le suivi de la qualité des eaux usées. L'azote « Kjeldahl » représente l'azote organique et l'azote ammoniacal. Quant à l'azote « total », il correspond à la somme de l'azote organique, de l'azote ammoniacal, des nitrites et des nitrates. Les phosphates interviennent dans la composition de nombreux détergents. Ils doivent être dégradés et hydrolysés par les bactéries en orthophosphates pour être assimilables par les autres organismes aquatiques. (Rodier, 2009)

5- Impact des eaux usées industriels :

Les eaux usées représentent un danger à causes des rejets de substances toxiques, la bioaccumulation ou la bioamplification dans les différents écosystèmes, et une augmentation des charges de nutriments (Environnement Canada, 1997) nous citons parmi les impacts cités par (Wethé et al., 2003) :

- La pollution et la dégradation de la qualité des ressources en eau ce qui engendre la disparition des espèces aquatiques telles que les poissons, plantes aquatiques...etc. ;
- Détérioration de la qualité des sols due à l'érosion et le ravinement des sols ;
- Détérioration du cadre de vie, la destruction du patrimoine urbain, l'inesthétisme
- Risques de maladies et autres malaises, le ralentissement des activités socio-économiques et les risques accrus d'accidents ;
- Pollution de l'air suite aux dégagements d'odeurs nauséabondes.

Les problèmes de santé, dus au non-traitement des eaux usées et à leur stagnation dans les drains et les espaces libres sont signalés en terme de :

- Prolifération de gîtes des vecteurs de maladies (moustiques, mouches, cafards et rongeurs) ainsi que des odeurs nauséabondes;
- Présence, dans les eaux usées, de germes causant la contamination des eaux, sols et aliments ce qui engendre des maladies telles que la dysenterie amibienne, la typhoïde et la diarrhée;

Les eaux usées traitées et non traitées peuvent engendrer d'autres problèmes économiques (Hernández-Sancho et al., 2015) telles que:

- Baisse de la productivité industrielle et agricole
- Baisse de la valeur marchande des récoltes, si des eaux usées insalubres sont utilisées pour l'irrigation
- Réduction des possibilités de loisirs aquatiques (baisse du nombre de touristes, ou touristes moins disposés à payer pour des services de loisirs)
- Diminution des prises de poissons et de crustacés, ou baisse de la valeur marchande du poisson et des mollusques et crustacés
- Augmentation des coûts de traitement de l'eau (pour l'approvisionnement humain et d'autres usages)
- Baisse des prix des propriétés situées à proximité des masses d'eau contaminées.

6- Normes des eaux usées :

6.1- Normes internationales : Les normes internationales selon l'organisation mondiale de la santé respective pour les eaux usées sont représentées en chiffres fixes à respecter qui sont représentés dans le tableau n°2 :

Tableau 2 normes des rejets industrielles selon OMS

| Caractéristiques | Normes utilisées (OMS) |
|------------------------|------------------------|
| pH | 6.5 – 8.5 |
| DBO5 | <30 mg/l |
| DCO | <90 mg/l |
| MES | <20 mg/l |
| NH⁴⁺ | <0.5 mg/l |
| NO2 | 1 mg/l |
| P2O5 | 2 mg/l |
| Température | <30°C |
| Couleur | Incolore |
| Odeur | Inodore |

6.2- Normes algériennes

Les normes de rejets des effluents industriels sont fixées par la loi n° 05-07 du 19 Rabie elAouel 1426 correspondant au 28 avril 2005 comprenant le décret exécutif n°06-141 du 20 Rabie elAouel 1427 correspondant au 19 avril 2006 définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels, des normes et tolérances particulières aux valeurs limites accordés selon les

Chapitre 1 : synthèse bibliographique

catégories industrielles concernées (JORA n°26, 2006). Les tableaux 3,4,5,6 montrent les normes algériennes en ce qui concerne les valeurs limites des rejets issus des industries agroalimentaires.

Tableau 3 normes de paramètres d'effluents des industries de transformation des viandes et abattoirs (JORA 2006)

| Paramètres | Unité | Valeurs limites | Tolérance aux valeurs limites anciennes installations |
|---------------------|------------------------------------|-----------------|---|
| Volume/quantité | M ³ /t carcasse traitée | 6 | 8 |
| pH | - | 5.5-8.5 | 6-9 |
| DBO ₅ | g/t | 250 | 300 |
| DCO | “ | 800 | 1000 |
| Matière décantables | “ | 200 | 250 |

Tableau 4 normes des paramètres d'effluents dans le secteur des industries de sucreries (JORA 2006)

| Paramètres | Unité | Valeurs limites | Tolérance aux valeurs limites anciennes installations |
|--------------------|-------|-----------------|---|
| Température | °C | 30 | 30 |
| pH | - | 6-9 | 6-9 |
| DBO ₅ | Mg/l | 200 | 400 |
| DCO | . | 200 | 250 |
| MES | . | 300 | 350 |
| Huiles et graisses | . | 5 | 10 |

Tableau 5 normes des paramètres d'effluents dans le secteur de production des levures (JORA 2006)

| Paramètres | Unité | Valeurs limites | Tolérance aux valeurs limites anciennes installation |
|------------------|-------|-----------------|--|
| Température | °C | 30 | 35 |
| pH | - | 5.5-8.5 | 6.5-8.5 |
| DBO ₅ | Mg/l | 100 | 120 |
| DCO | . | 7000 | 8000 |
| MES | . | 30 | 50 |

Tableau 6 normes des paramètres d'effluents dans le secteur de la production des brasseries (JORA 2006)

| Paramètres | Unité | Valeurs limites | Tolérance aux valeurs limites anciennes installation |
|------------------|---------------------|-----------------|--|
| Température | °C | 30 | 35 |
| pH | - | 5.5-8.5 | 9-10.5 |
| DBO ₅ | g/t de malt produit | 250 | 300 |
| DCO | . | 700 | 750 |
| MES | . | 250 | 300 |

II- Composants des déchets industriels :

Les déchets agro-industriels désignent tous les sous-produits et résidus générés par les cultures, l'élevage, la foresterie et les industries agro-industrielles. La figure ci-dessous présente les sources de ces déchets agro-industriels, selon Andri et al, (2018) la plupart des déchets agro-industriels ne sont pas traités et sont sous-utilisés. La majorité d'entre eux sont éliminés par brûlage, mise en décharge ou mise en mise en décharge inappropriée (Prasad & Aranda, 2018).

Les différents résidus agro-industriels sont représentés dans la figure 1 :

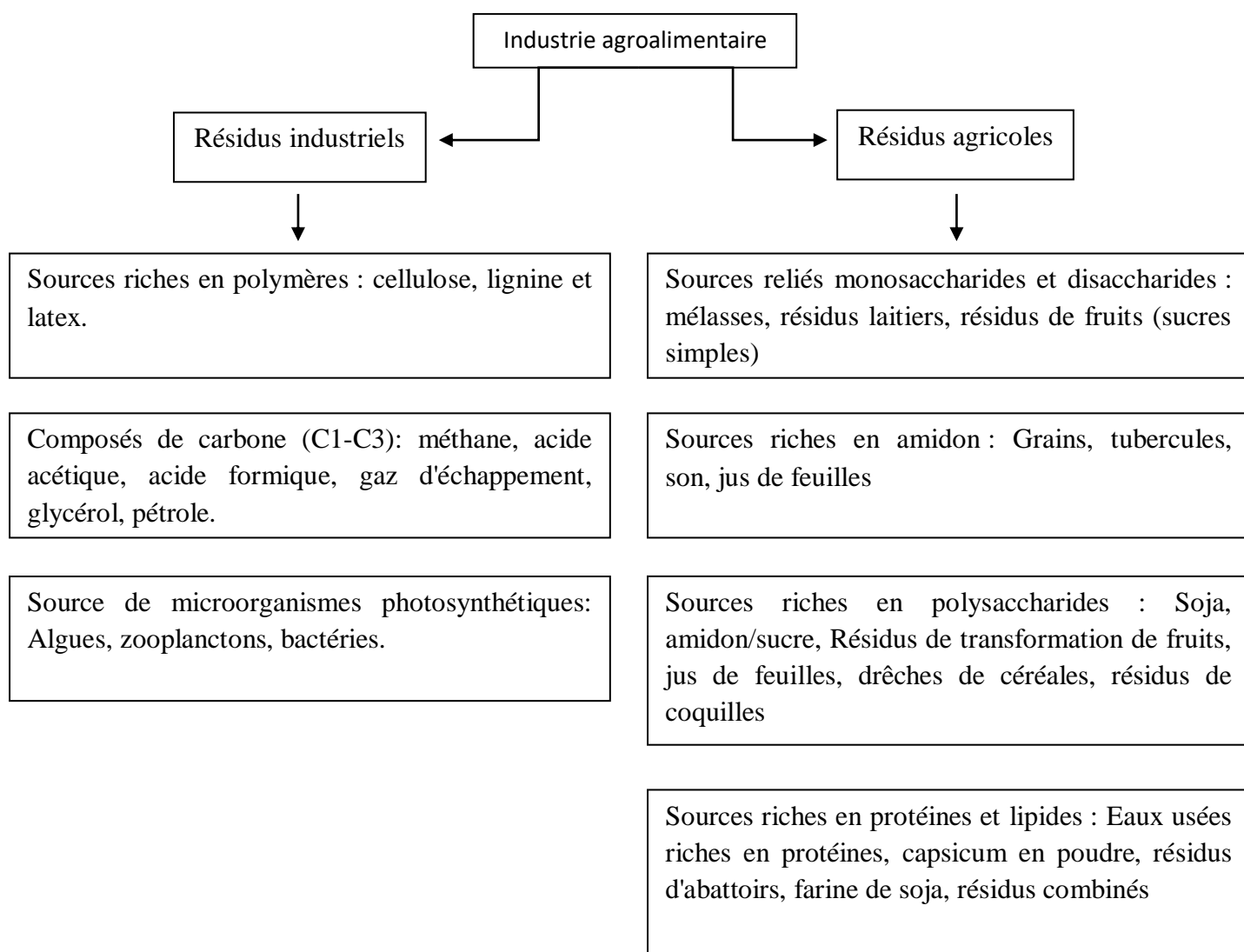


Figure 1 : classification des déchets agro-industriels selon différentes sources (Andri et al. 2018)

1. Composants des déchets selon le type d'industrie :

1.1. Industrie de produits laitiers

De toutes les activités industrielles, le secteur alimentaire a l'une des plus fortes consommations d'eau et est l'un des plus gros producteurs d'effluents par unité de production; en outre, ils génèrent un volume important de boues en traitement biologique. Il a été rapporté que l'industrie laitière produisait en moyenne 6 à 10 L d'eaux usées par litre de lait transformé. On estime qu'environ 2% du lait total transformé est gaspillé dans les égouts. (Kolev Slavov, 2017)

Il existe peu d'informations sur la composition des effluents de laiterie à l'échelle industrielle. Les informations sur les caractéristiques générales des eaux usées de laiterie sont présentées dans le tableau ci-dessous. En général, les eaux résiduaires laitières sont de couleur blanche (le lactosérum est de couleur vert jaunâtre) et ont une teneur élevée en matières organiques (est jaune-vert) et ont une odeur désagréable et un caractère turbide. (Kolev Slavov, 2017) Avec des températures annuelles de 17-25 °C, les flux de déchets laitiers sont plus chauds que les déchets municipaux laitiers sont plus chauds que les eaux usées municipales (10 à 20 °C), ce qui entraîne une accélération du processus biologique.). Ce qui entraîne une dégradation biologique plus rapide par rapport aux stations d'épuration des eaux usées. Les températures moyennes des effluents laitiers industriels varient de 17-18 °C en hiver et 22-25°C en été. (Kolev Slavov, 2017) . Les différentes caractéristiques d'une eau usée issues des industries agro-alimentaires sont représentées dans le tableau n°7

| Effluent de traitement du lait | $\gamma/$ (g/L) | | | | | | | | |
|--------------------------------------|----------------------|------------------|-----------|-----------------|-----------|------------|------------|------------|---------------------------------|
| | Réaction active (pH) | DBO ₅ | DCO | Graisses/huiles | MST | TSS | AT | TP | Alcalinité en CaCO ₃ |
| Lait mixte | 4-11 | 0.24-5.9 | 0.5-10.4 | 0.02-1.92 | 0.71-7 | 0.06-5.80 | 0.01-0.66 | 0-0.6 | 0.32-1.2 |
| Réception du lait | 7.18 | 0.8 | 2.54 | 1.06 | - | 0.65 | - | - | - |
| Lait / eaux usées | 9.1 ± 6.7 | 1.08-2.81 | 2.04-4.73 | 0.24-0.29 | - | 0.53-1.13 | - | 0.02-0.03 | - |
| Lait de consommation | 5 – 9.5 | 0.5-1.3 | 0.95-2.4 | - | - | 0.09-0.45 | - | - | - |
| Yaourt | 4.53 | - | 6.5 | - | - | - | - | - | - |
| Beurre | 12.08 | 0.22-2.65 | 8.93 | 2.88 | - | 0.7-5.07 | - | - | - |
| Crème glacée | 5.1-6.96 | 2.45 | 5.2 | - | 3.9 | 3.1 | - | 0.014 | 0.2 |
| Fromage | 3.38-9.5 | 0.59-5 | 1-63.3 | 0.33-2.66 | 1.92-53.2 | 0.19-2.5 | 0.018-0.83 | 0.005-0.28 | - |
| Fromage blanc | 7.83 | 2.6 | 17.65 | 0.95 | - | 3.38 | - | - | - |
| Petit-lait de fromage | 3.92-6.5 | 27-60 | 50-102.1 | 0.9-14 | 55-70.9 | 1.27-22.15 | 0.2-1.76 | 0.12-0.53 | - |
| Lactosérum de fromage à pâte dure | 5.8 | 9.48 | 73.45 | 0.99 | - | 7.15 | - | - | - |
| Lactosérum de fromage à pâte molle | 5.35 | 26.77 | 58.55 | 0.49 | - | 8.31 | - | - | - |
| Lactosérum de fromage blanc | 4.5 | - | 79 | - | 68 | - | 2 | - | - |
| Eaux usées de lactosérum de fromages | 4.6 | 35 | - | 0.8 | - | - | - | 0.64 | - |

Tableau 7 : les différents effluents contenus dans les eaux usées des industries laitières (Kolev Slavov et al 2017)

| | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-------------|------|-------------|-----------|---------|-----------|-----|
| Effluents de traitement du lactosérum | 5-9 | 0.59-1.21 | 1.07-2.18 | - | - | 0.08-0.44 | - | - | - |
| Perméat de lait | 5.55-6.52 | - | 52.94-57.46 | - | 11.61-15.39 | 1.94-3.4 | 0.3-0.4 | 0.35-0.45 | 2.5 |
| Condensat | 8.3 | - | - | - | - | - | 0.0006 | 0.0001 | - |
| Eaux usées du lavage | 10.37 | 3.47 | 14.64 | 3.11 | - | 3.82 | - | - | - |

Tableau 7 (suite) : les différents effluents contenus dans les eaux usées des industries laitières (Kolev Slavov et al 2017)

1.2. Caractéristiques des effluents d'abattoirs:

Les effluents de la transformation de la viande sont considérés comme nocifs dans le monde entier en raison de la composition complexe des eaux usées synthétiques, qui comprend des graisses, des protéines, des fibres, un contenu organique élevé, des agents pathogènes et des produits pharmaceutiques à des fins vétérinaires. Les effluents d'abattoirs sont généralement évalués à l'aide de paramètres de masse en raison de la grande diversité des eaux usées et des charges polluantes. Les caractéristiques typiques d'une eau usée réelle sont résumées dans le tableau n°8 :

Tableau 8 : caractéristiques des eaux usées des abattoirs (Bustillo-Lecompte et al., 2016)

| Paramètres | Intervalles | Moyenne |
|-------------------------|-------------|---------|
| DBO mg/l | 150-8500 | 3000 |
| DCO mg/l | 500-16000 | 5000 |
| COT mg/l | 50-1750 | 850 |
| AT mg/l | 50-850 | 450 |
| PT mg/l | 25-200 | 50 |
| TSS mg/l | 0.1-10000 | 3000 |
| K mg/l | 0.1-100 | 50 |
| Couleur mg/l échelle Pt | 175-400 | 300 |
| Turbidité | 200-300 | 275 |
| pH | 4.9-8.1 | 6.5 |

1.3. Caractéristiques des eaux usées des brasseries :

Les eaux usées des brasseries ont généralement une demande chimique en oxygène (DCO) élevée provenant de tous les composants organiques (sucres, amidon soluble, éthanol, acides gras volatils, etc.). Elles présentent généralement des températures de 25 °C à 38 °C, mais atteignent parfois des températures beaucoup plus élevées ((Boukary, 2019)). Le pH peut varier entre 2 et 12 ((Boukary, 2019) et est influencé par la quantité et le type de produits chimiques utilisés pour le nettoyage et la désinfection (par exemple, soude caustique, acide phosphorique, acide nitrique, etc.) (Boukary, 2019). Les caractéristique de ce secteur d'industrie est représenté dans le tableau n°9 :

Tableau 9: caractéristiques des eaux usées issues des brasseries (Boukary, 2019)

| Paramètre | Intervalle | Valeur moyenne | Limites de rejet |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------|
| Température (°C) | 24-30.5 | 27.90 ± 2.23 | <44 |
| pH | 4.6-7.3 | 6.0 ± 1.44 | Entre 5.0 et 9.5 |
| Total DCO | 1096.41 – 8926.08 | 5340.97 ± 2265 | 75 |
| DCO soluble | 1178.64 – 5845.74 | 3902.28 ±1644 | - |
| DBO ₅ | 1609-3980 | 3215.27 ± 870.92 | 25 |
| Total des solides | 1289-12248 | 5698.11 ± 2749.06 | - |
| Solides volatiles | 1832-4634 | 3257.33 ± 1074.34 | - |
| Total des solides dissous | 530-3728 961-1483 | 1826.74 ± 182.74 1281.60 | 1000 |
| Solides volatiles en suspension | 804 -1278 961-1483 | 1090.86 ± 182.74 1280.60 | - |
| Protéines brutes | 61.67-754.42 | 273.47 ±233.63 | - |
| Orthophosphate | 7.51-74.10 | 23.71±21.88 | 10 |
| Azote oxydé total | 0-5.36 | 1.81±1.66 | - |
| NH ₃ -N | 0.48-13.05 | 8.62±10.40 | 3 |
| Nitrate | 1.14-11.55 | 4.30±3.41 | 15 |
| Nitrite | 0-0.24 | 0.37±0.18 | 15 |
| Potentiel oxydo-réduction (mv) | -27.1 à -84.9 | -47.80 | - |
| Conductivité ms/cm | 1.044-1.622 | 1.52 | 70-150 |
| Alcalinité (mgCaCO ₃ /L) | 500-10000 | 2450.33±3034.19 | - |

III- Traitements classiques des eaux usées industriels :

Le traitement des eaux se fait sous différentes étapes : prétraitement, traitement physico-chimique, traitement des eaux et traitement des boues :

1- Prétraitement :

Le traitement préliminaire est principalement destiné à l'élimination des solides grossiers et les gravillons.

Les mécanismes d'élimination de base sont d'ordre physique. Outre les unités d'élimination des solides grossiers s'agit généralement d'un canal normalisé. L'élimination de ces derniers est souvent effectuée par des tamis ou des crémaillères. Lors du dégrillage, les matières dont les dimensions sont supérieures aux espaces entre les barreaux sont éliminées. Il existe des cribles grossiers, moyens et fins, en fonction de l'espacement entre les barreaux. L'élimination du matériau retenu peut être manuelle ou mécanisée. L'élimination du sable contenu dans les eaux usées se fait au moyen d'unités spéciales appelées dessableurs, leurs mécanisme se fait simplement par sédimentation : les grains de sable vont au fond de la cuve, tandis que la matière organique, qui se dépose beaucoup plus lentement, reste en suspension et passe dans les unités en aval. (FAO, 1992)

2- Traitement primaire

La clarification primaire agit comme une barrière pour l'huile et la graisse pour éviter les problèmes de fonctionnement lors du traitement ultérieur. Étant donné que les solides seront collectés au fond du décanteur, des dispositions doivent être prises pour leur élimination. Les solides (boues) sont ensuite pompés de la trémie à boues vers un digesteur de boues ou une autre unité de traitement des boues. A noter que le bassin de sédimentation secondaire suit un traitement biologique. De plus, à la place d'un convoyeur à bande, un soutirage sous vide est souvent utilisé pour éliminer rapidement les solides pour les applications de boues activées. Il convient de noter que des produits chimiques sont parfois ajoutés avant la décantation pour améliorer l'élimination des solides. (Asano & Levine, 1996)

3- Traitement secondaire

L'objectif du traitement secondaire est d'éliminer les matières organiques résiduelles et les solides en suspension. Le traitement biologique aérobie est effectué en présence d'oxygène par des micro-organismes aérobies (principalement des bactéries) qui métabolisent la matière organique dans les eaux usées (tels que CO₂, NH₃ et H₂O). Les procédés biologiques à haut débit sont caractérisés

par des volumes de petits réacteurs et des concentrations élevées de micro-organismes par rapport aux procédés à faible débit qui seront être séparés des eaux usées traitées par sédimentation pour produire un effluent secondaire clarifié. Les bassins de sédimentation utilisés dans le traitement secondaire, souvent appelés clarificateurs secondaires, fonctionnent de la même manière que les clarificateurs primaires. Les solides biologiques retirés pendant la sédimentation secondaire, appelés boues secondaires ou biologiques. (Noor et al., 2002)

3.1. Boues activées

Dans le procédé à boues activées, le réacteur à croissance dispersée est un bassin d'aération ou un bassin contenant une suspension d'eaux usées et de micro-organismes appelée la liqueur mixte mélangée vigoureusement par des dispositifs d'aération qui fournissent également de l'oxygène à la suspension biologique. Après l'étape d'aération, les micro-organismes sont séparés du liquide par sédimentation et le liquide clarifié constitue l'effluent secondaire. Une partie des boues biologiques est recyclée dans le bassin d'aération pour maintenir un niveau élevé de matières en suspension dans le liquide mixte. Le reste est retiré du processus et envoyé au traitement des boues pour maintenir une concentration relativement constante de micro-organismes dans le système (M.B Pescod, 2002)

3.2. Filtres à ruissellement

Un filtre à ruissellement ou biofiltre consiste en un bassin ou une tour remplie de supports tels que des pierres, des formes en plastique ou des lattes de bois. L'eau usée est appliquée par intermittence, ou parfois en continu, sur le support. Les micro-organismes se fixent sur le support et forment un biofilm. La matière organique contenue dans les eaux usées se diffuse dans le biofilm, où elle est métabolisée. L'oxygène est normalement fourni au biofilm par l'écoulement naturel de l'air vers le haut ou vers le bas à travers le milieu. L'épaisseur du biofilm augmente à mesure que de nouveaux organismes se développent. Périodiquement, des parties du film se détachent du support. La matière détachée est séparée du liquide dans un clarificateur secondaire et évacuée vers le traitement des boues. Le liquide clarifié du décanteur secondaire est l'effluent secondaire et une partie est souvent recyclée dans le biofiltre pour améliorer la distribution hydraulique des eaux usées sur le filtre. (Noor et al., 2002)

3.2.1. Contacteurs biologiques rotatifs

Les contacteurs biologiques rotatifs (CBR) sont des réacteurs à biofilm fixe similaires aux biofiltres. Dans le cas du CBR, les supports sont des disques qui tournent lentement et qui sont partiellement immergés dans l'eau usée qui s'écoule dans le réacteur. L'oxygène est fourni au

biofilm fixé par l'air lorsque le film est en hors de l'eau et par le liquide lorsqu'il est immergé, puisque l'oxygène est transféré à l'eau usée par la turbulence de surface créée par la rotation des disques. Les morceaux de biofilm détachés sont éliminés de la même manière que celle décrite pour les biofiltres. (Noor et al., 2002)

4- Traitement tertiaire

Il s'agit d'un ou plusieurs traitements complémentaires qui améliorent un paramètre spécifique de la qualité de l'eau rejetée en vue de protéger le milieu récepteur dans une zone localement plus vulnérable. Parmi les traitements existants, nous pouvons citer (World Water 1987) :

- ❖ la désinfection : elle est nécessaire lorsque les eaux usées traitées sont rejetées dans un milieu aquatique à usage balnéaire ou pour diminuer le risque de contamination humaine. Pour éliminer les germes pathogènes, les techniques classiques sont utilisées : chloration, ozonation ou irradiation par rayonnement ultraviolet (UV).
- ❖ les traitements de finition : pour certains usages, il est conseillé d'atteindre des concentrations très basses en MES, en DBO, en DCO, en azote ou en phosphore. Plusieurs procédés peuvent alors être utilisés comme traitement d'affinage.
- ❖ le traitement sur charbon actif : il peut être intéressant pour l'élimination de certaines molécules résistantes aux traitements biologiques, bien souvent lorsque la STEP accueille des eaux industrielles. Il permet par exemple d'enlever la couleur de l'effluent.

4.1. Traitement des boues :

Il existe de nombreuses variantes du procédé à boues activées, et la présente section ne couvre que les principales, les systèmes à boues activées peuvent être classés selon les catégories suivantes :

4.1.1. Boues activées conventionnelles (flux continu)

En analysant les systèmes de bassins aérés décrits dans les points précédents, il devient évident qu'une réduction du volume requis pourrait être obtenue en augmentant la concentration de biomasse en suspension dans le liquide. Plus il y a de bactéries en suspension, plus la consommation de nourriture sera importante, et donc plus l'assimilation de la matière organique présente dans les eaux usées brutes sera importante. C'est le principe de base du système à boues activées, dans lequel les solides sont recyclés par pompage, du fond de l'unité de décantation vers l'unité d'aération. Les éléments suivants sont donc essentiels dans le système de boues activées (flux liquide):

- Bassin d'aération (réacteur)
- Bassin de décantation (bassin de sédimentation secondaire, ou clarificateurs finaux)
- Pompes pour la recirculation des boues
- Elimination de l'excès de boue biologique

La biomasse peut être séparée dans le bassin de sédimentation secondaire en raison de sa propriété de floculation. Ceci est dû au fait que de nombreuses bactéries ont une matrice gélatineuse qui permet leur agglutination.

La concentration des matières en suspension dans le bassin d'aération du système à boues activées est plus de 10 fois supérieure à celle d'un bassin aéré à mélange complet.

Le temps de rétention du liquide est très faible, de l'ordre de 6 à 8 heures, ce qui implique que le volume du bassin d'aération est très faible. Cependant, en raison de la recirculation des boues, les solides (biomasse) restent dans le système pendant un temps plus long que celui du liquide qui est de 4 à 10 jours dans le système conventionnel à boues activées. C'est cette rétention des solides dans le système qui garantit la haute efficacité des boues activées, car la biomasse a suffisamment de temps pour métaboliser pratiquement toute la matière organique des eaux usées. Dans le réacteur UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), la biomasse est renvoyée dans le système de boues activées par gravité dans le compartiment de digestion à partir du compartiment de décantation situé au-dessus du compartiment de digestion, et par conséquent, le temps de rétention des solides est également supérieur au temps de rétention hydraulique. (M.B. Pescod, 2002)

CHAPITRE II- Techniques de la bioremédiation

I- Définition de la bioremédiation

Le terme de bioremédiation a été composé de deux parties : "bios" signifie vie et se réfère aux organismes vivants et "remédiation ou remédier" qui signifie résoudre un problème.

"Bioremédiation" signifie utiliser des organismes biologiques pour résoudre un problème environnemental tel qu'un sol ou une eau souterraine contaminés. La bioremédiation est l'utilisation de micro-organismes vivants pour dégrader les polluants environnementaux ou pour prévenir la pollution. En d'autres termes, il s'agit d'une technologie permettant d'éliminer les polluants de l'environnement, ce qui permet de restaurer le milieu naturel d'origine et de prévenir toute nouvelle pollution ((Sasikumar & Papinazath, 2003)).

La bioremédiation est définie comme l'accélération du processus métabolique naturel par lequel les microorganismes modifient et décomposent les molécules organiques en d'autres substances métabolique naturel par lequel les micro-organismes modifient et décomposent les molécules organiques en d'autres substances. La biorémédiation in situ consiste à placer des amendements directement dans le milieu contaminé, tandis que la biorémédiation ex situ consiste à transférer le milieu contaminé vers un site sélectionné pour le traitement. L'accélération du processus est obtenue en ajoutant des amendements pour stimuler la biodégradation des contaminants par les populations microbiennes indigènes (biostimulation). ((Sardrood et al., 2013))

a. Principes de la bioremédiation:

Dans la biorémédiation, des organismes vivants, tels que des micro-organismes (bactéries, champignons et algues) ou des plantes, sont utilisés pour dégrader et détoxifier les polluants dangereux présents dans l'environnement et les convertir en CO₂, H₂O, biomasse microbienne et métabolites (sous-produits moins toxiques que le composé parent). Ces micro-organismes peuvent être indigènes au site contaminé ou être isolés et amenés de l'extérieur sur ce site contaminé pour la biorémédiation. Les micro-organismes dégradent et transforment ces polluants par leurs réactions métaboliques et les utilisent pour leur croissance. La dégradation complète d'un polluant nécessite l'action de plusieurs microbes potentiels peuvent être ajoutés au site contaminé pour que le processus de dégradation soit efficace ; ce processus est appelé bioaugmentation. Le processus de biodégradation dépend des conditions environnementales favorables, du type de polluant et de sa solubilité, ainsi que de la biodisponibilité du polluant pour les microbes. Les conditions environnementales sont donc contrôlées ou manipulées pour permettre une croissance microbienne suffisante et donc une biodégradation rapide et efficace. (Tyagi & Kumar, 2021)

1. La bioremédiation ex situ :

Les technologies de traitement ex situ impliquent le déplacement physique des matériaux contaminés de leur lieu d'origine vers une autre zone (Simate et al., 2019). Ces dernières sont généralement envisagées en fonction du coût du traitement, de la profondeur de la pollution, du type de polluant, du degré de pollution, de la situation géographique et de la géologie du site pollué. Des critères de performance, qui déterminent également le choix des techniques de bioremédiation ex situ, ont été décrits. Parmi ses techniques nous avons :

1.1- Biopile :

Les piles à combustibles microbiennes (PCM) appelées aussi biopiles microbiennes (ou Microbial Fuel Cell, MFC en anglais) sont des dispositifs de génération d'électricité. Elles fonctionnent sur le principe des piles à combustibles avec une partie anodique, productrice d'électrons et une partie cathodique consommatrice d'électrons. Ces transferts d'électrons sont réalisés par des micro-organismes vivants sous forme de biofilms. Ces biofilms qui se développent sur les deux électrodes permettent la multiplication de communautés bactériennes dites électroactives (EA). L'électroactivité bactérienne est définie pour un biofilm comme étant sa capacité à échanger des électrons avec une surface conductrice, sans avoir recours à des médiateurs. (Smida, 2017)

1.2- Bioréacteur :

Le bioréacteur, comme son nom l'indique, est un récipient dans lequel les matières premières sont converties en produits spécifiques à la suite d'une série de réactions biologiques. Il existe différents modes de fonctionnement du bioréacteur, notamment : batch, fed-batch, batch de séquençage, continu et à plusieurs étages. ((Azubuiké et al., 2016)).

2. La bioremédiation in situ :

La bioremédiation in situ est l'application d'un traitement biologique pour éliminer les composés dangereux présents dans l'environnement. Ses techniques devraient être moins coûteuses que les techniques de bioremédiation ex situ, en raison de l'absence de coût supplémentaire pour les processus d'excavation ; néanmoins, le coût de conception et d'installation sur site de certains équipements sophistiqués pour améliorer les activités microbiennes pendant la biorestoration est une préoccupation majeure. ((Prasad & Aranda, 2018)). Certaines des pratiques de bioremédiation in situ ont été discutées ci-dessous :

2.1- Bioaugmentation

Cette technique consiste à introduire des microorganismes spécialisés, soit naturels, soit génétiquement modifiés pour leur capacité exceptionnelle à dégrader ou détoxifier un contaminant ou un groupe de contaminants spécifique dans un sol ou une eau pollués. (Simate et al., 2019) L'utilisation d'inocula ou de bioaugmentation par des cultures pures ou mixtes de microbes a été l'objectif de nombreux projets de développement pour une technologie efficace de bioremédiation in situ, mais, jusqu'à présent, il n'y a pas beaucoup d'exemples de réussite à grande échelle. (Jørgensen, 2011)

2.2- Bioslurping :

Cette technique combine le pompage sous vide, l'extraction des vapeurs du sol et la bioventilation pour réaliser l'assainissement des sols et des eaux souterraines par apport indirect d'oxygène et stimulation de la biodégradation des contaminants (Aivalioti et al., 2014). La technique est conçue pour la récupération de produits libres tels que les liquides légers en phase non aqueuses, remédiant ainsi aux zones capillaires, insaturées et saturées.

2.3- La mycoremédiation :

La bioremédiation par les champignons est un procédé alternatif pour éliminer, dégrader ou rendre inoffensifs les composés toxiques en utilisant l'activité biologique naturelle. Les champignons appartenant aux basidiomycètes ont été les premiers à être testés pour dégrader les composés toxiques, car on a observé que cette classe de champignons se développe sur les fragments d'arbres qui gisent au sol dans les forêts, provoquant leur pourrissement. Ces champignons ont une caractéristique de production d'un système enzymatique capable de dégrader la lignine. Pour cette raison, ils sont également appelés champignons ligninolytiques. *Phanerochaete chrysosporium* a été l'un des premiers champignons de la pourriture blanche à être étudié, montrant sa capacité à dégrader la lignine, les composés toxiques, et sa relation avec le système enzymatique (Ryan & Bumpus, 1989)). Les champignons sont bien connus pour leur capacité à coloniser un large éventail d'environnements hétérogènes et pour leur capacité à s'adapter aux matrices complexes du sol, également dans des conditions environnementales extrêmes. De plus, ils peuvent décomposer la matière organique et coloniser facilement les surfaces biotiques et abiotiques (Joutey et al., 2013). Il a été démontré que les champignons jouent un rôle important dans la biorestoration de divers polluants tels que les POP, les colorants textiles, les hydrocarbures pétroliers, les effluents de l'industrie des pâtes et papiers, les

effluents du tannage du cuir, les HAP (Les hydrocarbures aromatiques polycycliques), les pesticides, les PPCP (produits pharmaceutiques et d'hygiène personnelle). (Khan et al., 2009)

2.4- **Phytoremédiation :**

Il s'agit d'un ensemble de technologies qui reposent sur l'exploitation de la capacité naturelle des plantes à résister et à modifier la spéciation des métaux dans l'eau, les sédiments et les sols afin de réhabiliter les sites pollués ou de réduire les risques liés aux contaminants (Prasad & Aranda, 2018). Cette technique est écologiquement acceptable, efficace, elle a l'avantage d'être réalisée in situ à faible coût et permet la bio-récupération des métaux (Robinson et al., 2001). L'idée d'utiliser des plantes accumulatrices de contaminants a été introduite en 1983. Les plantes utilisées dans la phytoremédiation doivent répondre à des exigences telles que: le système racinaire, qui peut être fibreux ou tarudé selon la profondeur du polluant, la biomasse aérienne, qui ne devrait pas être disponible pour la consommation animale, la toxicité du polluant pour la plante, la survie et son adaptabilité aux conditions environnementales dominantes, le taux de croissance des plantes, la surveillance du site et surtout, le temps nécessaire pour atteindre le niveau de propreté souhaité. La phytoremédiation comprend plusieurs méthodes :

2.4.1- **La phytoextraction :**

La phytoextraction est la technique de phytoremédiation la plus reconnue et la plus appliquée pour l'élimination des métaux toxiques des environnements contaminés. Elle est également appelée phytoaccumulation, phytoabsorption ou phytoséquestration, fait référence à l'utilisation des plantes pour absorber, transloquer et stocker les contaminants toxiques du sol, des sédiments et/ou des boues dans les tissus des racines et des pousses ((Salt et al., 1998), (Garbisu et al., 2017)).

L'idée d'utiliser les plantes pour extraire les métaux des sols contaminés a été introduite et développée par (UTSUNAMYIA, 1980)et (Chaney, 1983). La phytoextraction nécessite un entretien à long terme et une récolte régulière des plantes, ainsi qu'une élimination sûre des matériaux végétaux pollués. Le coût de la phytoextraction, comparé à celui des techniques conventionnelles d'assainissement des sols, est 10 fois moins élevé. La phytoextraction ne fonctionne pas pour certains métaux, dont le Plomb, mais elle peut être efficace pour l'élimination de l'Arsenic, du Cadmium et du Nickel. La phytoextraction se produit dans la zone des racines de la plante. La zone racinaire peut être relativement peu profonde, la majeure partie de la racine se trouvant à une faible profondeur plutôt qu'à une profondeur plus

importante. Cela peut constituer une limitation de la phytoextraction. En général, les plantes idéales à utiliser pour la phytoextraction doivent présenter les caractéristiques suivantes :

1. Tolère des niveaux élevés de concentration de métaux
2. Taux de croissance rapide et production élevée de biomasse
3. Accumule un niveau élevé de métaux dans les parties récoltables.
4. Largement distribué et avec un système racinaire profond.
5. Résistance aux maladies et aux ravageurs et peu attrayant pour les animaux.
6. Facilité de culture, de récolte et de transformation
7. Faibles exigences en matière de culture
8. Répulsif pour les herbivores, pour éviter la contamination de la chaîne alimentaire.

2.4.2- Phytostabilisation :

La phytostabilisation est l'utilisation de certaines espèces végétales pour absorber et précipiter les contaminants, généralement des métaux, réduisant ainsi leur biodisponibilité, et donc le potentiel d'exposition humaine à ces contaminants. Cette technique peut être utilisée pour rétablir une couverture végétale sur des sites où la végétation naturelle fait défaut en raison de concentrations élevées de métaux dans les sols de surface ou de perturbations physiques des matériaux superficiels. Des espèces tolérantes aux métaux peuvent être utilisées pour rétablir la végétation sur les sites, diminuant ainsi la migration potentielle de la contamination par l'érosion et le transport éoliens des sols de surface exposés et la lixiviation de la contamination du sol vers les eaux souterraines (l'érosion et la lixiviation sont courantes dans les zones sans végétation).

Les caractéristiques des plantes appropriées pour la phytostabilisation d'un site particulier sont les suivantes ((Kumar & Chandra, 2020)) :

- La tolérance à des niveaux élevés de contaminant(s) préoccupant(s) ;
 - Une production élevée de biomasse racinaire capable d'immobiliser ces contaminants par absorption, précipitation ou réduction ;
 - La rétention des contaminants applicables dans les racines, par opposition à leur transfert vers les pousses, afin d'éviter une manipulation et une élimination spéciales des pousses.
- (Trihadiningrum et al., n.d.)

2.4.3- Phytovolatilisation :

Processus par lequel les plantes absorbent les contaminants hydrosolubles par transpiration et les convertissent en une forme gazeuse qui est libérée par les stomates des plantes en éliminant les

contaminants de la subsurface mais pourrait alors mais pourraient alors entraîner une exposition accrue dans l'air. En général, le devenir des contaminants n'est souvent pas clair, ce qui peut soulever des problèmes d'importantes questions quant au potentiel de dissémination de certains polluants dans l'environnement. (Bose et al., 2011)

2.4.4- Phytodégradation :

également connue sous le nom de phytotransformation, est un processus dans lequel les contaminants absorbés par les plantes sont décomposés par des processus métaboliques au sein de la plante ou par les effets des enzymes produites par les plantes sur les contaminants à proximité de la plante ((Vishnoi et al., 2008). Les plantes sont capables de produire des enzymes qui catalysent et accélèrent la dégradation des polluants organiques. Ainsi, les polluants organiques sont décomposés en formes moléculaires plus simples par ce que l'on appelle des processus métaboliques ex planta et sont incorporés dans les tissus végétaux pour favoriser la croissance de la plante (McGrath & Zhao, 2003).

L'assainissement d'un site par phytotransformation dépend de l'absorption directe des contaminants à partir du milieu et de leur accumulation dans les tissus végétaux via le système racinaire dépend de l'efficacité de l'absorption, du taux de transpiration et de la concentration du produit chimique dans le sol et la végétation. (Kumar & Chandra, 2018)

Avantages et limitations des Bioremédiations (Azubuiké et al., 2016):

La bioremédiation offre dans de nombreux cas une solution permanente aux problèmes environnementaux et représente aussi quelques limites cités ci-dessous :

a. Les avantages :

La bioremédiation est un processus naturel et est donc perçue par le public comme un processus acceptable de traitement des déchets pour les matériaux contaminés tels que le sol.

Le respect de l'environnement et la réduction des coûts sont parmi les principaux avantages de la biorémédiation par rapport aux méthodes chimiques et physiques d'assainissement.

Excellent contrôle des paramètres du bioreacteur (température, pH, taux d'agitation et d'aération, concentrations du substrat et de l'inoculum).

D'autres avantages de la bioremédiation sont les suivants : opération à grande échelle, faible coût d'installation et d'entretien, conservation de la structure du sol, prévention de l'érosion et de la lixiviation des métaux, etc.

b. Les limites :

La bioremédiation est limitée aux composés qui sont biodégradables. Tous les composés ne sont pas susceptibles de se dégrader rapidement et complètement.

On craint que les produits de la biodégradation ne soient plus persistants ou toxiques que le composé d'origine.

Les processus biologiques sont souvent très spécifiques. Les facteurs importants du site nécessaires au succès de la biodégradation comprennent la présence de populations microbiennes capables de métaboliser, des conditions environnementales de croissance adéquates et des niveaux appropriés de nutriments et de contaminants.

Il est difficile d'extrapoler des études en laboratoire et à l'échelle pilote aux opérations sur le terrain à grande échelle.

La recherche est nécessaire pour développer et mettre au point des technologies de biorestauration qui sont appropriées pour les sites avec des mélanges complexes de qui ne sont pas uniformément dispersés dans l'environnement. Les contaminants peuvent être présents sous forme de solides, de liquides et de gaz.

La bioremédiation prend souvent plus de temps que d'autres options de traitement, comme l'excavation et l'enlèvement du sol ou l'incinération.

L'incertitude réglementaire demeure quant aux critères de performance acceptables pour bioremédiation. Il n'y a pas de définition acceptée de "propre", l'évaluation de la performance de la bioremédiation est difficile, et il n'y a pas de critères et il n'y a pas de critères acceptables pour la bioremédiation traitement.

**Chapitre III : Techniques utilisées dans l'épuration des eaux usées
industrielles**

Le rôle des microorganismes et plantes dans le traitement des eaux usées industriels :

De nombreuses méthodes physico-chimiques ont été étudiées et appliquées pour le traitement des eaux usées. Parmi ces méthodes nous citons :

- Le criblage, filtrage est la première étape de traitement des eaux usées afin de séparer facilement et éliminer les gros matériaux portés par l'eau ;
- La sédimentation ou décantation: procédé d'enlèvement des matières solides décantables en suspension dans l'eau
- L'ozonation : c'est l'utilisation de réactifs chimiques oxydants pour le traitement des eaux a visé au départ la stérilisation de l'eau
- La chloration : elle consiste à introduire des produits chlorés (pastilles de chlore, eau de javel,...) dans de l'eau usée pour tuer les micro-organismes qu'elle contient

Cependant, ces méthodes présentent de nombreuses limitations telles que l'utilisation d'agents chimiques, un coût plus élevé, un traitement partiel, la production de polluants secondaires et la production de grands volumes de solides. En raison de ces limitations, l'application de méthodes biologiques était plus appropriée pour être utilisée comme technique alternative (Rodrigues et al., 2008).

Ces dernières années, de nouvelles technologies ont été découvertes. Ces technologies reposent principalement sur :

- b- l'utilisation de micro-organismes ou de leurs enzymes pour transformer un environnement pollué en son état d'origine. Cette technologie est économique (coût relativement faible), simple (nécessite des techniques de faible technicité) et écologique (utilise des micro-organismes non pathogènes qui sont bien acceptés par le public). Les micro-organismes utilisés au cours du processus de biorémédiation peuvent être indigènes à la zone contaminée ou être isolés de différentes sources et apportés sur le site contaminé. En outre, pour obtenir une biorémédiation efficace, il est très nécessaire de connaître la composition microbienne des eaux usées à traiter, ainsi que les propriétés biochimiques corrélées aux polluants d'origine et l'activité métabolique et les conditions physico-chimiques optimales (Janczukowicz et al., 2008).
- c- Le métabolisme des plantes peut contribuer à l'assainissement ou au nettoyage des sites contaminés. Les polluants pénètrent dans la plante principalement par les racines, qui contiennent de nombreux mécanismes de détoxification, fournissent

une surface pour l'adsorption et l'accumulation d'eau et de nutriments qui favorisent la croissance. Ces polluants, une fois absorbés par la plante, peuvent être stockés dans les racines, les tiges ou les feuilles, transformés en produits chimiques moins nocifs dans la plante ou transformés en gaz qui sont libérés dans l'air lorsque la plante transpire (Lu et al., 2014).

Afin de bien expliquer nous allons étudier quelques articles ayant établi des études en ce qui concerne les traitements d'eaux usées industrielles.

Etude d'articles sur les techniques utilisées dans l'épuration des eaux dans les différentes industries agroalimentaires :

Le but de cette étude est de comparer quelle méthode est la plus efficace pour diminuer les polluants essentiels tels que la demande chimique en oxygène (DCO), la demande biochimique en oxygène (DBO) les métaux lourds...etc. présents dans les eaux usées des différentes industries.

1- Industrie des produits laitiers

1.1- Article 1 :

Etude réalisée par C. Keffala et al, 2017 :

UTILISATION DE SOUCHES DE BACTÉRIES ET DE LEVURES POUR LE TRAITEMENT DES EAUX USÉES DES PRODUITS LAITIERS TRAITEMENT DES EAUX USÉES

L'étude a été menée pour étudier la biodégradation d'effluents laitiers collectés dans une industrie laitière en utilisant des isolats microbiens aérobies et de levure sélectionnés. Les microorganismes prédominants : *Candida albicans*, *Candida krusei*, *Lactobacillus plantarum* et *Lactobacillus casei* isolés du bassin de boues activées de la laiterie ont été utilisés.

Les tests de biodégradation ont été réalisés par lots dans des flacons Erlenmeyer contenant des échantillons d'eaux usées laitières collectées. Deux séries d'expériences ont été réalisées en double. Pour la première série d'expériences, chaque souche de bactérie et de levure a été utilisée pour la préparation de quatre inoculums composés d'une seule culture. Pour la deuxième série d'expériences, trois taux d'inoculums ont été testés.

Objectif de l'étude : étudier la capacité des microorganismes à dégrader la matière organique et évaluer leurs effet sur l'élimination de la DCO.

Expérience :

Les tests de biodégradation ont été réalisés par lots dans des flacons Erlenmeyer (500 ml) contenant 150 ml d'échantillons d'eaux usées laitières collectées. Deux séries d'expériences ont été réalisées en double. Pour la première série d'expériences, les souches de bactéries et de levures sélectionnées ont été ajoutées séparément dans les échantillons d'essai à une concentration de 1 % (v/v) et incubées dans un agitateur orbital à une vitesse de rotation de 150 tour/min à 30°C pendant 25 jours. Une expérience à blanc, constituée d'un échantillon d'eaux usées laitières non inoculées, a été réalisée dans les mêmes conditions que les échantillons testés. La mesure de la DCO a été effectuée sur des échantillons aliquotes à différents intervalles (0, 5, 10, 15, 20 et 25 jours). Pour la deuxième série d'expériences, trois taux d'inoculum (1, 5 et 10 (v/v)) ont été testés. Une culture mixte de bactéries et de levures a été préparée puis ajoutés séparément dans les échantillons testés et incubés dans l'agitateur orbital avec une vitesse de rotation de 150 rpm à 30°C pendant 25 jours. Des aliquotes des échantillons ont été prélevés à différents intervalles (0, 5, 10, 15, 20 et 25 jours) et analysés pour la demande chimique en oxygène (DCO), les protéines et les sucres totaux. L'ajustement du pH (7-8) a été effectué au début des tests. La demande chimique en oxygène (DCO) a été mesurée selon la méthode HACH (gamme 25-1500 mg/L) dans des flacons DCO, ce qui implique un chauffage à 150°C pendant 2h puis une lecture spectrophotométrique. Les sucres totaux ont été déterminés par spectrophotométrie selon la méthode de Dubois et la teneur en protéines a été déterminée selon la méthode de Lowry avec de l'albumine de sérum bovin (BSA, 1 mg/mL) comme standard protéique. La teneur en protéines a été déterminée par lecture de l'absorbance à 600 nm. Les résultats seront brièvement représentés dans le tableau n° 10.

Élimination de la DCO par les monocultures microbiennes et de levure

Au cours de la première série d'expériences, les échantillons inoculés avec *Candida albicans*, *Candida krusei*, *Lactobacillus casei* et *Lactobacillus plantarum* ont été examinés pour leur capacité à réduire la demande chimique en oxygène (DCO) en période de 25 jours. La DCO initiale des eaux usées étaient de 1840 mg/l, et les résultats sont donnés dans le tableau 10. Il a été observé qu'en raison de l'inoculation de bactéries et de levures supplémentaires dans les échantillons, il y avait une réduction appréciable de la DCO après 15 jours, la réduction de la

DCO était comparativement plus élevée dans les échantillons inoculés avec *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus plantarum* et *Candida albicans* avec une réduction de la DCO jusqu'à 48%.

On a également observé qu'après 20 jours, le pourcentage de réduction de la DCO est resté inchangé. Ceci est probablement dû au fait que le substrat est devenu un facteur restrictif ou que la population microbienne s'est réduite. *Lactobacillus plantarum* a montré la meilleure efficacité de réduction (71%) de l'effluent, tandis que *Candida krusei* a montré la plus faible réduction (51%) par rapport au contrôle (53%) où seule la microflore indigène était active.

Efficacité d'élimination de la culture mixte microbienne et de levure

Comme l'a montré la première série d'expériences, à 20 et 25 jours de période d'incubation, le pourcentage d'élimination de la DCO reste inchangé. Il en va de même pour ce qui a été observé pour le consortium de levures et de bactéries. La population de microorganismes ajoutés a diminué avec l'augmentation du temps d'incubation, cela peut être dû à diverses raisons telles que le besoin en substrat et le contenu qualitatif de la population microbienne, ce qui nécessite leur ajout périodique pour maintenir la population qui est affectée par de nombreux facteurs tels que les conditions physiologiques de l'effluent. Les résultats de cette étude indiquent que l'élimination de la DCO par une culture mixte de *Lactobacillus plantarum* et *Lactobacillus casei* est plus élevée que les autres traitements. Le consortium de bactéries a montré une réduction maximale de 86,3% de la DCO dans l'effluent laitier de pH neutre avec un niveau d'inoculum de 5% (v/v), cependant, le consortium de levures a montré une réduction maximale de 78,5% de la DCO avec un niveau d'inoculum de 5% (v/v).

1.2. Article 2 :

Etude réalisée par : Nair & Kani, 2016

PHYTOREMEDIATION DES EFFLUENTS DE LAITERIE A L'AIDE DE MACROPHYTES AQUATIQUES.

L'article décrit le rôle des macrophytes aquatiques dans le traitement des eaux usées laitières. Les plantes aquatiques *Azolla* et *jacinthe d'eau* ont été sélectionnées pour la présente étude en raison de leur disponibilité et de leur énorme potentiel pour l'élimination de divers polluants des eaux usées et surtout il a la capacité de se développer même dans l'eau sévèrement polluée. Une expérience à l'échelle du laboratoire a été menée en prenant les eaux usées d'une usine laitière et qui ont été traitées avec les deux plantes.

Objectif de l'étude :

Evaluer l'efficacité de l'élimination de certaines caractéristiques physiques et chimiques des eaux usées de laiterie et pour comparer quelle plante est la plus efficace pour le traitement des eaux usées de laiterie parmi les plantes sélectionnées.

La jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*) fait partie de la famille des *Pontederiaceae*. C'est une plante vivace flottant librement qui peut atteindre une hauteur d'environ 90cm. Elle possède des feuilles circulaires ou elliptiques de couleur vert foncé attachées à un pétiole spongieux et gonflé ainsi qu'un système racinaire épais, fortement ramifié et fibreux foncé.

L'azolla (*Azolla pinnata*) fait partie de la famille des *Salviniaceae* ; elle est petite (généralement quelques cm de diamètre). L'azolla flotte à la surface de l'eau grâce à de nombreuses petites feuilles en forme d'écailles qui se chevauchent étroitement et dont les racines pendent dans l'eau.

Technique utilisée : Le système de zones humides

Cette méthode utilise des processus naturels qui incluent des communautés microbiennes autosuffisantes ou des espèces végétales pour améliorer le traitement des eaux usées. Leur construction simple et l'absence de recyclage des boues les rendent préférables pour l'utilisation des effluents laitiers dans les communautés en développement (Haberl et al., 1995).

En général, les eaux usées de laiterie sont traitées dans des zones humides dans des conditions aérobies. Cinq jours suffisent pour obtenir une réduction de 85 % de la DBO5 dans des bassins aérobies avec des déchets de lait à 20 °C, tandis que les eaux usées laitières à forte charge sont traitées principalement dans des zones humides facultatives. (Kolev Slavov, 2017)

Expérience :

Après la collecte de 40 litres d'effluents bruts d'une usine laitière. Les effluents ont été apportés et stockés dans les conditions du laboratoire. Les plantes aquatiques sélectionnées pour l'étude, à savoir l'*Azolla* et la jacinthe d'eau, ont été fraîchement collectées et apportées dans des sacs en plastique avec de l'eau. Ces plantes ont été nettoyées correctement pour enlever la saleté et la poussière et stabilisées dans des conditions de laboratoire pendant une semaine pour normaliser leur croissance. Les eaux usées, après les dilutions nécessaires, ont été versées dans trois bacs en plastique transparents et arrondis d'un volume de 15 litres. La capacité de chaque cuvette en plastique était d'environ 20 litres. Les plantes maintenues dans les bassins de stockage ont été collectées et introduites dans les bassins expérimentaux séparément sur la base de 100g/1litre d'eau usée. Les conditions de laboratoire ont été maintenues uniformément tout au long de la

période expérimentale de 15 jours. Les résultats seront représentés brièvement dans le tableau n°10.

Résultats :

Une évaluation comparative de l'efficacité des herbes aquatiques comme *Eichhornia sp.* et *Azolla sp.* a été menée sur le traitement des eaux usées de laiterie dans des conditions de laboratoire. Les échantillons collectés dans l'installation de traitement ont été analysés périodiquement en vue de découvrir les changements périodiques dans leurs propriétés physico-chimiques apportés par la croissance des mauvaises herbes respectives.

a- Effluents traités à la jacinthe d'eau

Une diminution de la valeur du pH a été observée lorsque l'effluent laitier a été traité avec de la jacinthe d'eau après 15 jours de traitement avec la jacinthe d'eau avec une efficacité d'élimination de 8,47%. La turbidité a montré une efficacité décroissante après 15 jours de traitement, soit 51,85%.

La dureté totale a été mesurée initialement à 61200 mg/l et elle a diminué jusqu'à 2400mg/l en traitant avec la jacinthe d'eau après 15 jours. La dureté calcique a diminué jusqu'à 58,33% pendant l'étude alors que le niveau de calcium a été réduit de 1923,84 mg/l à 801,6 mg/l. En traitant avec la jacinthe d'eau, le TSS a été réduit jusqu'à 6000mg/l après 15 jours de traitement. Les niveaux de solides totaux et de solides dissous totaux ont également montré une variation considérable au cours de la période d'étude, respectivement de 86,92% et 85,89%.

b- Effluent traité à l'*Azolla*

Lors du traitement avec *l'azolla*, le pH de l'effluent du bassin a diminué de 8,26 à 7,8. La conductivité électrique au stade final a été réduite par rapport au stade initial dans les traitements. La turbidité des eaux usées laitières dans l'étape initiale était de 324 NTU. Elle a été réduite jusqu'à 156 NTU lors du traitement avec *l'azolla*. Le pourcentage de diminution de la turbidité était élevé dans le cas de *l'azolla*.

La dureté totale était initialement à un niveau de 61200 mg/l dans l'effluent des eaux usées laitières, elle a été réduite à 1600 mg/l lors du traitement à *l'azolla* au 15ème jour.

La réduction de calcium est arrivée à 480.86 mg/l après traitement avec cette herbe après 15 jours de l'expérience

Chapitre 3 : Techniques utilisées dans l'épuration des eaux usées industrielles

La concentration totale de solides a été réduite à environ 80,15%. Le total des solides en suspension lors du traitement avec *l'azolla*, a été réduit à 13800mg/l après le 15ème jour de l'expérience soit une efficacité de réduction de 73,46%.

Le niveau initial de DBO était de 1215.19mg/l et il a été réduit jusqu'à 81.012mg/l en traitant avec *l'azolla*.

Tableau 10 : différents résultats obtenus dans les articles précédents :

| Techniques utilisées | Espèces microbiennes/végétales étudiées | Paramètres étudiés | Valeur initiale | Valeur après traitement | pourcentage d'efficacité de réduction des effluents | Auteur |
|--|--|--|---|---|---|--------------------------|
| Article 1 : Boues activées | <i>Candida albicans</i> <i>Candida krusei</i> <i>Lactobacillus casei</i> <i>Lactobacillus plantarum</i> | Demande chimique en oxygène (DCO) | DCO 1710.9 mg/L | Non mentionné | <i>L.plantarum</i> 71% <i>C. Krusei</i> 51% <i>L. casei</i> 60% <i>C. albicans</i> 69% | (C. Keffala et al, 2017) |
| Article 2 : Phytoremédiation en utilisation des zones humides | <i>Eichhornia crassipes</i> <i>Azolla pinnata</i> | pH initial : 7.6 – 7.8 DBO ₅ initial 1226-1425 mg/l DCO initial 1860-1915 | pH 7.6-7.8 BOD5 1226-1425 COD 1860-1915 | pH 6.9 DBO ₅ 20mg/L DCO 600 mg/L | DBO ₅ 85% DCO 75% pH est proche de l'axe neutre soit 6.9 | (Nair & Kani, 2016) |

2- Les abattoirs :

2.1- article 1

Etudie réalisée par : (Terán Hilaes et al., 2021)

Précipitation acide suivie de la culture de microalgues (*Chlorella vulgaris*) comme nouvelle approche pour le traitement des eaux usées des abattoirs de volailles

Les eaux usées des abattoirs de volailles contiennent beaucoup de matières organiques et de nutriments et nécessitent donc un traitement spécial avant leur élimination finale. Dans ce travail, la précipitation acide (H_2SO_4) suivie de la culture de microalgues "*Chlorella vulgaris*" à la fois dans des processus discontinus et continus a été étudiée comme une méthode alternative pour le traitement des eaux usées de l'abattoir.

Objectif de l'étude :

Evaluer la performance de la microalgue en réduction de la demande chimique en oxygène.

Expérience :

Précipitation acide des eaux usées :

Ces expériences ont été réalisées en utilisant 800 mL d'effluent de PSW (pH 6-7) dans des cylindres gradués (1000 mL). Les échantillons ont été acidifiés en ajoutant de l'acide sulfurique 0,25 M jusqu'à un pH de 2, 3, 4, 5 et 6, respectivement, puis maintenus statiques pendant 15-30 min pour la sédimentation des particules. Les surnageants ont été récupérés à l'aide d'une pompe péristaltique et analysés en paramètres comme la demande chimique en oxygène (DCO), la DBO5, la turbidité, l'huile et la graisse, selon les méthodes indiquées dans la section 2. Les fractions sédimentées ont été centrifugées et séchées dans un four à 60 °C et ensuite analysées dans leur composition proximale par des méthodes appropriées telles que : Kjeldahl pour les protéines (AOAC, 1984), gravimétrie après extraction Soxhlet (NTP 209.263, 2001) et les cendres par méthode gravimétrique (NTP 209.265, 2001).

Culture de microalgues dans des eaux usées d'abattoir de volaille traitées - procédé discontinu

Les eaux usées d'abattoir de volailles traitées ont été utilisées comme milieu de culture de microalgues dans un photobioréacteur à tube concentrique à boucle interne (350 mm × 150 mm, 5L), contenant 4,5 L d'eaux usées d'abattoir de volailles traitées à un pH initial de 6 et une concentration de microalgues dans le réacteur de 250 mg L⁻¹. L'expérience a été réalisée pendant 72 h à 25-27 °C avec un éclairage continu (440 μmol m⁻²s⁻¹ de densité de flux de

photons) et un apport d'air constant dans le réacteur (0,2vvm) pour une homogénéisation constante. Pendant le processus, des échantillons ont été obtenus périodiquement pour analyser la concentration de microalgues, la demande chimique en oxygène (DCO) et le pH.

Résultats :

La plus grande élimination de CODT (81%) a été obtenue dans le surnageant à pH 4. En plus de la réduction de COD par l'effet de la précipitation acide, la couleur et la turbidité des eaux usées ont été réduites de manière significative, rendant le processus de traitement plus facile. La turbidité est causée par la présence de particules en suspension ou dissoutes. Ce paramètre a été considérablement réduit de 650 à 950 NTU à 98 NTU, à pH 4. De plus, la taille moyenne des particules dans le surnageant (pH = 4) était de 726 nm, ce qui est inférieur aux eaux usées non traitées (1432 nm). La sédimentation à pH < 6 peut être associée au point isoélectrique (IP).

Les eaux usées d'abattoir de volaille traités réglé à pH 6 a été utilisé pour la culture de microalgues "C. vulgaris" dans un processus discontinu et continu en utilisant un photobioréacteur à tube concentrique à boucle interne (ICTB) et les résultats sont présentés dans le tableau 11. Comme observé, la valeur de la demande chimique en oxygène (DCO) a diminué de 83% après un processus de 48 heures. De plus, 58% et 60% des nutriments, respectivement l'azote total et le phosphore, ont également été éliminés. Cette réduction considérable peut être attribuée à la consommation d'une grande partie des nutriments par la co-culture symbiotique de la microalgue "*Chlorella vulgaris*" et des bactéries sauvages (*Salmonella*, *E. coli*, *Clostridium* et *Staphylococcus* et autres) présentes dans les eaux usées industrielles

2.2. Article 2 :

Etude réalisée par : (Gutiérrez-Sarabia et al., 2004)

Traitement des eaux usées d'un abattoir dans un système à échelle réelle avec des zones humides construites

Ce travail a évalué la performance d'un système en grandeur réelle avec des zones humides pour le traitement des effluents d'un abattoir. Le système de traitement se composait d'un bassin de sédimentation primaire, d'un lagon anaérobie et d'une zone humide construite à écoulement souterrain, en série.

Objectif de l'étude : Ce travail a permis d'évaluer la performance d'un système en grandeur réelle avec un milieu humide construit pour le traitement des effluents d'abattoir.

Expérience :

Des analyses physico-chimiques et microbiologiques ont été effectuées à chaque étape du système de traitement (demande biochimique en oxygène en pendant 5 jours [DBO5] et demande chimique en oxygène [DCO]. Les essais de post-traitement à l'échelle du laboratoire de l'effluent du milieu humide ont été effectués dans un filtre à sable, qui consistait en un pot de 18 L en polyéthylène téréphtalate de 30 cm de diamètre, rempli (de bas en haut) de 7,5 cm de gravier de 10 mm, de 15 cm de sable et de 5 cm d'antracite de 20 mesh. Le filtre à sable a été alimenté par intermittence six fois par jour à un débit hydraulique de $0,075\text{m}^3/(\text{m}^2\text{d})$. L'effluent filtré a été désinfecté avec de l'hypochlorite de sodium commercial (NaOCl) à une dose de 5 mg/L de chlore avec un temps de contact de 30 minutes. Les coliformes totaux et fécaux et le chlore résiduel ont été déterminés dans l'effluent filtré selon les méthodes standard.

Résultats :

Élimination des matières organiques. Les efficacités d'élimination de la matière organique (à la fois sous forme de DCO et de DBO5) pour l'ensemble du système

Le bassin de sédimentation a bien fonctionné malgré le temps de rétention relativement court de 1 heure et 20 minutes. Il a pu éliminer 43% et 40% de la DBO5, de la DCO, contribuant ainsi à près de 40% de l'élimination du système

Le lagon anaérobie a fonctionné à un taux de charge moyen 36 % de DBO5 et 34 % de DCO également être attribuée au fait que, dans notre système, la charge organique associée à la matière en suspension a été essentiellement éliminée dans le bassin de sédimentation, laissant à la lagune anaérobie la seule tâche de dégrader par voie anaérobie principalement la matière organique soluble et colloïdale.

Dans l'étape de la zone humide, les éliminations de la DBO5 et de la DCO étaient satisfaisantes (la plupart des mois plus de 80%) ; La zone humide a représenté près de 35% de l'élimination de la matière organique, avec des efficacités d'élimination moyennes par étape de 76 et 74 % pour la DBO5 et la DCO, respectivement.

Tableau 10: différents résultats obtenus dans l'article précédent

| Technique | Espèces microbienne / végétales étudiées | Paramètres étudiés | Valeurs initiales | Valeurs après traitement | Résultats Efficacité de réduction des effluents | Auteurs |
|---|---|---|--|---|--|----------------------------------|
| Ultrafiltration | <i>Chlorella vulgaris</i> | DCTO DCO Azote total Phosphore total | DCTO 2185- 7313 mg/L DCO non mentionné Azote total 110-175mg/L Phosphore total 44-67mg/L | DCTO non mentionné DCO 97 mg/L, Azote total non mentionné, Phosphore total 2 | DCTO 80%, DCO 83%, Azote total 58%, Phosphore total 60% | (Terán Hilares et al., 2021) |
| Phytoremédiation: Zones humides artificielles | <i>Phragmites australis</i> <i>Typha latifolia</i> | DBO ₅ , DCO. | DBO ₅ :1593 mg/L DCO:36.33mg/L | Non mentionné | DBO ₅ 91%, DCO 89%. | (Gutiérrez-Sarabia et al., 2004) |

Conclusion des articles :

Selon les résultats obtenus, nous pouvons observer que les méthodes biologiques réalisées pour diminuer ou éliminer les polluants principaux des eaux usées issues des industries agroalimentaires étudiées (Laiterie et abattoirs), les cultures mixtes utilisées peuvent donner de meilleurs résultats en élimination de la DCO et la DCO₅, mais leur efficacité pourrait être améliorée par des tests complémentaires visant à optimiser les conditions physiques de développement des bactéries. (C. Keffala et al, 2017). Ces méthodes doivent être étudiées plus profondément avec d'autres méthodes d'épuration sont suggérées afin d'évaluer le processus d'un point de vue économique et environnemental ; ainsi que différentes plantes et microorganismes peuvent être utilisées pour la même étude. La remédiation en utilisant les microorganismes ou les plantes aquatique peut également être développée pour réduire les destructions imposées à l'environnement par l'exploitation minière et les industries en expansion dans notre pays.

DISCUSSION

Discussion

De nos jours, le monde connaît de grandes industrialisations dans de multiples domaines ; parmi nous retrouvons les industries agroalimentaires. Ces dernières connaissent une grande consommation des eaux en processus de fabrications, lavage des matières premières agricoles, l'incorporation de l'eau comme ingrédient lors des préparations des aliments, ainsi que le nettoyage des outils, des matériels et des locaux et pour l'hygiène du personnel de l'entreprise. Cette grande consommation des eaux génère aussi des effluents liquides solides mélangés avec de l'eau appelés eaux usées. Ces dernières génèrent des sous-produits non désirés en industrie agroalimentaires qui seront soit éliminé par brûlage ou traités.

La composition et la concentration des eaux usées industrielles sont extrêmement variables selon le type d'industrie. Ces eaux sont extrêmement hétérogènes et présentent souvent un large spectre de polluants chimiques (composés à l'état solide ou dissous, matières organiques et minérales, métaux, hydrocarbures, solvants, polymères, huiles, graisses, sels, etc.) à divers niveaux de toxicité. Les caractéristiques physiques principales des eaux usées industrielles sont la teneur en matières solides, la couleur, l'odeur et la température, tandis que les caractéristiques chimiques sont la teneur en ammoniac, en azote organique, en nitrites, en nitrates, en phosphore organique, en phosphore inorganique, la DBO, la DCO et le COT, etc.

Dans l'optique du pallier le déficit croissant des ressources en eau destinées à la consommation humaine, ces eaux résiduaires sont de plus en plus soumises à des traitements poussés en vue d'une réutilisation. Cette réutilisation doit toujours être réalisée dans l'objectif de fournir une eau présentant, en continu, une qualité spécifique liée à l'usage attendu (eau de production, eau de lavage, eau de refroidissement, eau d'irrigation ou d'arrosage, etc.).

Le traitement des eaux usées industrielles comprennent beaucoup de méthodes de traitements biologiques et physico-chimiques (FAO,2002). Les traitements les plus utilisés en traitements physico-chimiques sont la coagulation et la désinfection. L'ajout des produits chimiques dans eaux usées permet de réduire le temps de rétention global du processus de traitement des eaux mais ceci entraîne la production d'un grand volume de boues qui devront êtres traitées et éliminées car ces dernières représentent un très grand danger sur la nature. Par ailleurs, d'après Moletta et Torrijos (1999), les traitements physico-chimiques ne suffisent pas à atteindre les seuils de rejets fixés par la réglementation.

Les traitements biologiques des eaux usées industrielles sont des techniques alternatives moins dangereuses à l'environnement et font appels aux organismes vivants (microorganismes ou végétaux) pour la dégradation de la matière organique contenue dans les

Discussion

effluents. (Kone, 2011) d'autres avantages sont connus en bioremédiation tels que l'utilisation des réacteurs et ustensiles à faibles coûts et à grande échelle.

Ces dernières décennies, il s'est publié une pléthore d'articles scientifiques sur le sujet. Selon Jaiyeola et Bwapwa (2016) les procédés biologiques sont viables que les procédés physico-chimiques du fait d'une bonne efficacité d'élimination de la demande chimique en oxygène (DCO), du coût d'investissement maîtrisé et de la maturité du traitement.

Parmi les techniques biologiques impliquées dans la bioremédiation, nous retrouvons la phytoremédiation qui s'agit d'un ensemble de techniques écologiquement acceptables et réalisées à faible coût et permet la récupération biologique des métaux (Robinson et al. 2006).

D'après les résultats des recherches montrés dans le chapitre précédent, l'efficacité de réduction des métaux et effluents présents dans les différentes eaux usées industrielles étudiées (Brasseries, laiteries, et abattoirs) varie selon la plante utilisée dans le traitement.

D'après les résultats obtenus par les expérimentations réalisées, les plantes les plus utilisées en traitements des effluents sont du genre *Typha*, *Eichhornia* et *Azolla*. Le pourcentage d'efficacité de réduction le plus élevé de la demande biochimique en oxygène a été démontrée lors de l'expérience faite par Nilesh B. Deshmukh, M.V Jadhav, Vikas R. Rahane en expérimentant *Eichhornia crassipes* (Jacinthe d'eau) en zones humides avec des eaux usées laitières avait montré une réduction de 85% de DBO. L'espèce végétale *Azolla sp* avait montrée une réduction de DBO depuis les eaux des laitières de 93.33% (Chinchu. S. Nair et K. Morphin Kani, 2016).

En ce qui concerne la réduction de la demande chimique en oxygène présente dans les eaux usées issus des laiteries *Typha sp* et *Eichhornia sp* ont marquées une efficacité de réduction de cet effluent de 85% et 82.53% respectivement (S. Dipu, Anju A. Kumar et Salom Gnana Tanga, 2011). Selon Nilesh B. Deshmukh, M.V. Jadhav et Vikas R. Rahan, la performance de *Eichhornia crassipes* en réduction de DCO est de 75% ce qui nous mène à dire que la Jacinthe d'eau ou l'espèce végétale *Eichhornia* montre de bon résultats en réduction de la DCO en effluents laitiers.

L'utilisation de la phytoremédiation en traitement des eaux usées issus des abattoirs avait connue une épreuve en élimination des polluants présents dans ces dernières surtout en associant les espèces végétales comme l'avait montré Gutiérrez-Sarabia et al (2014) que *Phragmites australis* et *Typha latifolia* ayant réduit la DBO de 91% et la DCO de 89%.

Discussion

Quant à l'élimination des polluants utilisant les microorganismes (bactéries, champignons microscopiques/ levures et microalgues) celle-ci comprend une exploitation plus large que celle des plantes. Plusieurs microorganismes ont été utilisés dans les traitements des eaux usées industrielles. Prenant l'exemple des cultures mixtes tels que l'association des champignons avec les bactéries ou levure bactéries ou en associant les microalgues avec les bactéries ou champignons ou même bactérie-bactérie donneraient de meilleurs résultats en élimination des polluants (C. Keffala et al 2017), comme dans le cas d'utilisation de la biofloculation à l'aide de 2 espèces bactériennes halophiles sur les effluents des eaux usées laitiers, ayant montré un pourcentage d'élimination de la DCO à 99.9% (Sekelwa Cosa, Anthony Okoh, 2014). Selon Lekshmisree A.S prof. N. Vijayan (2016), la réduction des effluents laitiers par l'association de 2 champignons donne une meilleure réduction des polluants qui se trouve dans les effluents laitiers. Tout comme l'association levures-bactéries dans le but de traiter les eaux usées issues des brasseries et de produire l'électricité qui pourrait rendre le traitement des eaux usées plus abordable aux pays en développement et pays développés en économisant les frais de traitements. (Abhila Shasingh Mathuriya et al. 2010).

Les traitements des eaux usées avec les traitements aérobies en utilisant des bioréacteurs consiste à ajouter des microorganismes aérobies et une aération continue du mélange afin d'assurer une bonne dégradation des polluants. Ces traitements avaient montré une efficacité de réduction remarquable des effluents dans les eaux usées des différentes industries étudiées. L'utilisation des consortium microbiens avec la combinaison des traitements biologiques tels que l'aération et la filtration augmente le pourcentage d'élimination des polluants présents dans l'échantillon (R.S. Al-Wasify et al., 2017).

Lors des traitements anaérobies les espèces microbiennes ajoutées sont anaérobies et sans aération du milieu. Selon les résultats obtenus par les chercheurs, la biodégradation peut sembler être inefficace comme les traitements aérobies, le pourcentage de réduction des polluants comme la DBO, DCO et les différents types des solides peut varier de 40% jusqu'à 97%. (K.E. Adou et al., 2020) et (C. Chavez P. et al., 2005)

En conclusion, les processus de traitement des eaux usées en utilisant la bioremédiation s'avèrent moins coûteuses et éliminent la nécessité de transporter des quantités hors du site de l'industrie et les menaces potentielles pour la santé humaine et l'environnement.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Conclusion et perspectives

L'objectif de ce mémoire est de réaliser une synthèse bibliographique sur les différents traitements biologiques des eaux usées effectués dans les industries agro-alimentaire.

La synthèse des données a permis d'identifier une multitude de traitements biologiques faisant appel à des bactéries, des champignons, des algues et/ou des plantes aquatiques.

Un grand nombre d'espèces de bactéries, de champignons, d'algues et de végétaux ont été étudiées dans le but de conclure leurs efficacités.

La plupart des chercheurs ont déduit que l'efficacité de ces traitements dépend des techniques adoptées (aérobie, anaérobie...), de l'industrie en question, et du taux de contamination de cette eau par les effluents.

L'utilisation de cultures mixtes tels que l'association des champignons avec les bactéries ou levure bactéries ou en associant les microalgues avec les bactéries ou champignons ou même bactérie-bactérie donneraient de meilleurs résultats en terme d'élimination des polluants.

À la suite de ces déductions, il serait donc intéressant :

En premier lieu de répertorier les espèces végétales et microbiennes intervenant dans les traitements d'épuration des eaux usées qui existent en Algérie.

Étudier les potentiels de dégradation des effluents agro-alimentaire de ces plantes et micro-organismes afin d'élargir l'épuration à faible coût, et diminuer l'utilisation des produits chimiques dans les traitements des eaux usées.

Contribution de la mise en place d'un système de management environnemental (SME) relatif à l'application de l'ISO 14001 au niveau des industries agro-alimentaires et de l'évaluer par rapport au traitement de ces polluants (déchets).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- . C. K. (2017). Use of Bacteria and Yeast Strains for Dairy Wastewater Treatment. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 06(03), 108–113. <https://doi.org/10.15623/ijret.2017.0603019>
- Aivalioti, M., Cossu, R., & Gidarakos, E. (2014). *New opportunities in industrial waste management*.
- Asano, T., & Levine, A. D. (1996). Wastewater reclamation, recycling and reuse: Past, present, and future. *Water Science and Technology*, 33(10–11), 1–14. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00401-5](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00401-5)
- Azubuike, C. C., Chikere, C. B., & Okpokwasili, G. C. (2016). Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32(11), 1–18.
- Bose, S., Rai, V., Bhattacharya, S., Chaudhuri, P., & Bhattacharyya, A. K. (2011). Phytoremediation: a promising technology of bioremediation for the removal of heavy metal and organic pollutants from the soil. *Handbook of Phytoremediation. Environmental Science. Engineering and Technology. Nova Science, New York*.
- Boukary, S. (2019). *Traitement des eaux usées industrielles par des procédés membranaires sous climat sahélien : cas des eaux usées de brasserie au Burkina Faso Boukary Sawadogo To cite this version : HAL Id : tel-02071743. 177p. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02071743*
- Chaney, R. L. (1983). Plant uptake of inorganic waste. *Land Treatment of Hazardous Wastes*.
- Garbisu, C., Garaiurrebaso, O., Epelde, L., Grohmann, E., & Alkorta, I. (2017). Plasmid-mediated bioaugmentation for the bioremediation of contaminated soils. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1966.
- Goel, P. K. (2006). *Water pollution: causes, effects and control*. New Age International.
- Gutiérrez-Sarabia, A., Fernández-Villagómez, G., Martínez-Pereda, P., Rinderknecht-Seijas, N., & Poggi-Varaldo, H. M. (2004). Slaughterhouse Wastewater Treatment In a Full-scale System With Constructed Wetlands. *Water Environment Research*, 76(4), 334–343. <https://doi.org/10.2175/106143004x141924>
- Haberl, R., Perfler, R., & Mayer, H. (1995). Constructed wetlands in Europe. *Water Science and Technology*, 32(3), 305–315. <https://doi.org/10.2166/wst.1995.0153>
- Havugimana, E., Bhopale, B. S., Kumar, A., Byiringiro, E., Mugabo, J. P., & Kumar, A. (2015). Soil pollution—major sources and types of soil pollutants. *Environmental Science and Engineering*, 11,

Références bibliographiques

53–86.

- Janczukowicz, W., Zieliński, M., & Dębowski, M. (2008). Biodegradability evaluation of dairy effluents originated in selected sections of dairy production. *Bioresource Technology*, 99(10), 4199–4205.
- Jørgensen, K. S. (2011). In Situ Bioremediation. In *Comprehensive Biotechnology, Second Edition* (Second Edi, Vol. 6). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00372-X>
- Joutey, N. T., Bahafid, W., Sayel, H., & El Ghachtouli, N. (2013). Biodegradation: involved microorganisms and genetically engineered microorganisms. *Biodegradation-Life of Science*, 1, 289–320.
- K.Bengouga. (2010). *Thèse de Doctorat: Généralités sur les eaux usées*. 1–23.
- Khan, A. A., Jilani, G., Akhtar, M. S., Naqvi, S. M. S., & Rasheed, M. (2009). Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop production. *J Agric Biol Sci*, 1(1), 48–58.
- Kolev Slavov, A. (2017). Dairy Wastewaters – General Characteristics and Treatment Possibilities – A Review. *Food Technology and Biotechnology*, 55(1). <https://doi.org/10.17113/ftb.55.01.17.4520>
- Kumar, V., & Chandra, R. (2020). Bioremediation of melanoidins containing distillery waste for environmental safety. In *Bioremediation of industrial waste for environmental safety* (pp. 495–529). Springer.
- Lu, H., Li, Z., Fu, S., Méndez, A., Gascó, G., & Paz-Ferreiro, J. (2014). Can biochar and phytoextractors be jointly used for cadmium remediation? *PLoS One*, 9(4), e95218.
- Mathieu, C., Pieltain, F., & Jeanroy, E. (2003). *Analyse chimique des sols: Méthodes choisies*. Tec & doc.
- McGrath, S. P., & Zhao, F.-J. (2003). Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Current Opinion in Biotechnology*, 14(3), 277–282.
- Meneses, Y. E., Martinez, B., & Hu, X. (2019). Water reconditioning in the food industry. In *Sustainable Water and Wastewater Processing*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816170-8.00010-7>
- Nair, C. S., & Kani, K. M. (2016). Phytoremediation of dairy effluent using aquatic macrophytes. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(4), 253–259.
- Noor, M. J. M. M., Ahmadun, F. R., Mohamed, T. A., Muyibi, S. A., & Pescod, M. B. (2002). Performance of flexible membrane using kaolin dynamic membrane in treating domestic wastewater. *Desalination*, 147(1–3), 263–268.

Références bibliographiques

- Pepper, I. L., Gerba, C. P., & Brusseau, M. L. (2013). *Environmental & Pollution Science* (Vol. 53, Issue 9).
- Prasad, R., & Aranda, E. (2018). Approaches in Bioremediation: The New Era of Environmental Microbiology and Nanobiotechnology. In *Approaches in Bioremediation: The New Era of Environmental Microbiology and Nanobiotechnology*. <http://www.springer.com/series/15921><http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-02369-0>
- Rejsek, F. (2002). *Analyse des eaux: Aspects réglementaires et techniques*. Centre régional de documentation pédagogique d'Aquitaine.
- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., & Nigam, P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, 77(3), 247–255.
- Rodier, J. (2009). Jean Rodier - L'analyse de l'eau. In *International Journal of Biological and Chemical Sciences* (Vol. 1, Issue 1, p. 1579). http://www.earthprint.com/%0AAlgeria-Educ.com/forum%0Ahttps://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/b_fdi_53-54/010020862.pdf%0Ahttps://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-10/34766.pdf%0Ahttps://library.
- Rodrigues, M. A. S., Amado, F. D. R., Xavier, J. L. N., Streit, K. F., Bernardes, A. M., & Ferreira, J. Z. (2008). Application of photoelectrochemical–electrodialysis treatment for the recovery and reuse of water from tannery effluents. *Journal of Cleaner Production*, 16(5), 605–611.
- Ryan, T. P., & Bumpus, J. A. (1989). Biodegradation of 2, 4, 5-trichlorophenoxyacetic acid in liquid culture and in soil by the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 31(3), 302–307.
- Salt, D. E., Smith, R. D., & Raskin, I. (1998). Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, 49(1), 643–668.
- Sardrood, B. P., Goltapeh, E. M., & Varma, A. (2013). An introduction to bioremediation. In *Fungi as bioremediators* (pp. 3–27). Springer.
- Sasikumar, C. S., & Papinazath, T. (2003). Environmental management: bioremediation of polluted environment. *Proceedings of the Third International Conference on Environment and Health*, 465–469.
- Saxena, S., & Pratap Choudhary, M. (2017). Performance Evaluation of Dairy Wastewater Treatment

Références bibliographiques

- Plant. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(11), 1291. www.irjet.net
- Simate, G. S., Cluett, J., Iyuke, S. E., Musapatika, E. T., Ndlovu, S., Walubita, L. F., Alvarez, A. E., Chandra, P., Enespa, Shahid, M. J., AL-surhane, A. A., Kouadri, F., Ali, S., Nawaz, N., Afzal, M., Rizwan, M., Ali, B., Soliman, M. H., Megharaj, M., ... Quiñones-Bolaños, E. (2019). Mushroom as a product and their role in mycoremediation. *Sustainability (Switzerland)*, 4(May), 3–21. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.01001-0>
- Smida, H. (2017). *Modulation de l'interface entre biofilms microbiens électroactifs et surface d'électrode: modifications de surface et effets de milieux*. Université Rennes 1.
- Taghezout Fatima. (2015). *Impact Environnemental Des Rejets D'eau Le Long Du Littoral Occidental Algérien*. 4.
- Terán Hilares, R., Garcia Bustos, K. A., Sanchez Vera, F. P., Colina Andrade, G. J., & Pacheco Tanaka, D. A. (2021). Acid precipitation followed by microalgae (*Chlorella vulgaris*) cultivation as a new approach for poultry slaughterhouse wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 335(March). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125284>
- Trihadiningrum, Y., Basri, H., Mukhlisin, M., Listiyanawati, D., & Jalil, N. 'Ain bt A. (n.d.). *Phytotechnology, a Nature-Based Approach for Sustainable Water Sanitation and Conservation*. 1–10.
- Tyagi, B., & Kumar, N. (2021). Bioremediation: principles and applications in environmental management. In *Bioremediation for Environmental Sustainability* (Issue February). INC. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820524-2.00001-8>
- UTSUNAMYIA, T. (1980). *Japanese Patent Application No. 55-72959*. Japan.
- Vishnoi, S., Srivastava, P. N., & Shekhawat, N. S. (2008). Removal of colour from textile effluent using cyanobacterial biomass. *Journal of Environmental Science & Engineering*, 50(2), 93–96.
- Wethé, J., Radoux, M., & Tanawa, E. (2003). Assainissement des eaux usées et risques socio-sanitaires et environnementaux en zones d'habitat planifié de Yaoundé (Cameroun). *VertigO-La Revue Électronique En Sciences de l'environnement*, 4(1).
- Woodard & Curran, Inc. (2006). Wastes from Industries (Case Studies). *Industrial Waste Treatment Handbook*, 409–496. <https://doi.org/10.1016/b978-075067963-3/50012-6>