

1. Traitement par Boues Activées

Le procédé à boues activées est le traitement biologique le plus couramment utilisé dans les stations d'épuration des eaux usées. Il repose sur l'utilisation de micro-organismes aérobies (bactéries, protozoaires, etc.) pour dégrader la matière organique présente dans l'eau. Ces micro-organismes sont cultivés dans un bassin d'aération en suspension et agissent comme un catalyseur pour l'oxydation des polluants organiques dissous dans l'eau.

1.1.Principe du procédé

Le processus de boues activées repose sur l'oxydation biologique des matières organiques présentes dans l'eau usée, principalement des hydrocarbures et autres substances organiques. Les bactéries hétérotrophes présentes dans les boues activées consomment ces composés organiques comme source de carbone, produisant ainsi du dioxyde de carbone (CO_2) et de l'eau, tout en se multipliant.

Ce processus est effectué dans un bassin d'aération où l'eau usée est aérée pour maintenir une concentration en oxygène dissous suffisante pour favoriser l'activité des micro-organismes. Ces micro-organismes consomment la matière organique, la dégradant en des produits plus simples et en biomasse.

Les boues activées, qui sont composées de ces micro-organismes, sont séparées de l'eau épurée par un clarificateur secondaire. Le recyclage des boues, où une partie de ces boues est renvoyée dans le bassin d'aération, permet de maintenir une concentration suffisante de micro-organismes pour assurer la dégradation continue de la matière organique.

1.1.1. Schéma d'une station de traitement par boues activées

Le schéma de base d'une station d'épuration utilisant le procédé des boues activées se décompose en trois grandes étapes :

- **Bassin d'aération** : Les micro-organismes dégradent la matière organique en présence d'oxygène.
- **Clarificateur secondaire** : Les boues activées sont séparées de l'eau traitée par décantation.

- **Recyclage des boues** : Une partie des boues est renvoyée dans le bassin d'aération, permettant ainsi de maintenir une population microbienne suffisante pour dégrader la matière organique.

Ces trois éléments fonctionnent ensemble pour garantir une efficacité maximale dans la réduction des polluants organiques présents dans l'eau usée.

1.1.2. Rôle des bactéries dans les boues activées

Les bactéries présentes dans les boues activées sont les principales responsables de la dégradation de la matière organique. Ces micro-organismes consomment le carbone organique (glucides, lipides, protéines) présent dans les eaux usées et, en retour, produisent de l'énergie nécessaire à leur croissance et à leur reproduction.

Les bactéries dans les boues activées peuvent être classées en deux grandes catégories :

- **Bactéries hétérotrophes** : Ce sont les principales bactéries impliquées dans la dégradation des matières organiques. Elles utilisent le carbone organique comme source d'énergie.
- **Bactéries autotrophes (nitrifiantes)** : Ces bactéries sont responsables de la conversion de l'ammonium (NH_4^+) en nitrites (NO_2^-) puis en nitrates (NO_3^-), un processus appelé nitrification.

1.1.3. Types de boues activées

Il existe plusieurs configurations pour l'utilisation des boues activées, selon les besoins et les caractéristiques des eaux usées à traiter. Les principales configurations sont :

- Système à boues activées classiques : Il s'agit du système standard, où les micro-organismes sont en suspension dans l'eau.
- SBR (Sequencing Batch Reactor) : Un procédé par batch (lot) qui fonctionne de manière discontinue et permet de mieux contrôler les processus biologiques. Il est utilisé pour traiter des eaux usées à faibles débits ou dans des systèmes de taille plus petite.

- Système à boues activées avec aération fine : Il utilise des diffuseurs à haute efficacité pour fournir de l'oxygène aux micro-organismes, permettant ainsi un meilleur rendement dans les systèmes à faible capacité.

1.2. Paramètres de fonctionnement d'une station d'épuration à boues activées

Le bon fonctionnement d'une station de traitement à boues activées dépend de plusieurs paramètres essentiels qui influencent directement son efficacité. Il est donc nécessaire de les surveiller de manière continue pour garantir des performances optimales.

1.3. Âge des boues (SRT - Sludge Retention Time)

L'âge des boues (SRT) est un paramètre clé dans les stations à boues activées. Il représente le temps moyen que les micro-organismes restent dans le système avant d'être éliminés avec les boues excédentaires.

- **SRT élevé** : Plus de biomasse est conservée, ce qui améliore la capacité de traitement et la stabilité du système.
- **SRT faible** : Un SRT trop faible peut réduire la capacité de dégradation des matières organiques et affecter la nitrification.

Un SRT adéquat permet de maintenir une biomasse stable et d'optimiser la dégradation de la matière organique.

1.4. Charge massique (F/M - Food to Microorganism Ratio)

Le F/M (rapport nourriture/micro-organisme) est le rapport entre la quantité de matière organique disponible (sous forme de DBO) et la biomasse microbienne présente dans le système. Ce rapport influence directement la vitesse de dégradation de la matière organique.

- **F/M élevé** : Les micro-organismes ont plus de substrat à consommer, ce qui accélère la dégradation, mais peut entraîner une prolifération excessive des micro-organismes et des boues plus fines et moins faciles à décanter.
- **F/M faible** : Une faible charge massique réduit la vitesse de dégradation mais permet une plus grande stabilité du système.

1.5.DBO₅ / DCO (Demande Biochimique en Oxygène / Demande Chimique en Oxygène)

Les indices DBO₅ et DCO sont utilisés pour mesurer la quantité de matière organique dans les eaux usées. Le rapport entre DBO₅ et DCO indique la biodégradabilité des eaux usées. Un faible rapport DCO/DBO indique une matière organique facilement biodégradable, qui peut être efficacement traitée par des boues activées.

1.6. Indice de Mohlman (IV30)

L'indice de Mohlman (IV30) est utilisé pour évaluer la capacité de décantation des boues activées. Il est calculé en mesurant le volume de boues excédentaires après 30 minutes de décantation. Un IV30 élevé indique des boues plus difficiles à décanter, ce qui peut entraîner des problèmes de clarification dans le clarificateur secondaire.

1.7. Problèmes courants : Bulking filamenteux, Moussage

1.7.1. Bulking filamenteux

Le bulking filamenteux est un phénomène où des bactéries filamenteuses dominent la population microbienne dans les boues activées, entraînant une mauvaise agglomération des boues et des problèmes de décantation. Cela peut conduire à une turbidité de l'eau traitée.

1.7.2. Moussage

Le moussage se produit lorsque des micro-organismes producteurs de mousse, tels que *Nocardia*, prolifèrent dans le bassin d'aération, formant une mousse stable à la surface de l'eau.

1.8. Dénitrification biologique dans une station d'épuration

La dénitrification biologique est le processus par lequel des bactéries anoxiques réduisent les nitrates (NO₃⁻) en azote gazeux (N₂). Ce processus est essentiel pour éliminer l'azote des eaux usées et éviter la pollution des milieux récepteurs. La dénitrification est réalisée en absence d'oxygène, en utilisant les nitrates comme accepteurs d'électrons.

2. Procédés à biofilms

2.1. Lits Bactériens

Les lits bactériens font partie des procédés biologiques utilisés pour le traitement des eaux usées dans lesquels des micro-organismes fixés sur un substrat solide dégradent la matière organique. Contrairement aux procédés à boues activées, les micro-organismes dans un lit bactérien ne sont pas en suspension, mais se fixent sur des supports solides tels que des pierres, des graviers ou des plastiques, qui forment un biofilm. Ce procédé permet d'optimiser l'utilisation de l'espace et d'améliorer la stabilité des systèmes biologiques.

2.1.1. Principe du procédé

Le principe de fonctionnement des lits bactériens repose sur l'interaction entre les micro-organismes, le support solide et l'eau à traiter. Le substrat solide, généralement constitué de matériaux comme les pierres ou des supports plastiques, sert à favoriser la fixation et le développement des biofilms. L'eau usée circule à travers ces supports, permettant aux micro-organismes fixés sur les biofilms de dégrader la matière organique en consommant l'oxygène dissous dans l'eau.

Les micro-organismes du biofilm utilisent la matière organique dissoute comme source d'énergie, tout en produisant des métabolites tels que le dioxyde de carbone (CO_2) et de l'eau (H_2O) comme produits finaux de la dégradation. Ce processus d'oxydation biologique a pour but de réduire la charge organique de l'eau usée avant son rejet dans le milieu récepteur.

2.1.2. Avantages des lits bactériens

Les lits bactériens présentent plusieurs avantages qui les rendent adaptés dans des contextes spécifiques, notamment dans des systèmes de taille réduite ou lorsque l'espace est limité :

- Moins de boues produites : En raison de la fixation de la biomasse sur le support, la production de boues est bien inférieure à celle des procédés à boues activées. Cela permet de réduire la nécessité de traiter ou d'éliminer les boues excédentaires.
- Économie d'espace : Ces systèmes nécessitent généralement moins d'espace pour traiter la même quantité d'eau par rapport aux procédés traditionnels à boues activées, ce qui est particulièrement utile dans les zones urbaines ou à espace limité.

- Moins de consommation énergétique : Contrairement aux systèmes à boues activées, les lits bactériens n'ont pas besoin d'une aération aussi poussée, ce qui réduit les coûts énergétiques associés à leur exploitation.

2.1.3. Limites des lits bactériens

Cependant, ces systèmes présentent également certaines limitations :

- Rendement plus faible : Par rapport aux boues activées, les lits bactériens ont généralement un rendement plus faible dans la dégradation des matières organiques, ce qui peut conduire à une qualité d'effluent inférieure.
- Sensibilité à la charge organique : Les lits bactériens sont sensibles aux variations de charge organique dans les eaux usées. En cas de forte variation de charge, la performance du système peut se détériorer.
- Entretien des supports : Le colmatage des supports est un problème courant dans les systèmes à lits bactériens. Les dépôts d'huiles et de graisses ou d'autres substances peuvent obstruer les pores des matériaux utilisés pour les supports, réduisant ainsi leur efficacité.

2.2. Disques Biologiques (RBC)

Les disques biologiques (RBC, *Rotating Biological Contactors*) sont un autre procédé à biofilm largement utilisé pour le traitement des eaux usées. Ce procédé repose sur des disques en plastique ou en métal qui sont partiellement immergés dans l'eau à traiter et qui tournent lentement sur un axe horizontal. Les micro-organismes se fixent sur les surfaces des disques, formant des biofilms qui dégradent la matière organique contenue dans les eaux usées.

2.2.1. Principe du procédé

Le fonctionnement des RBC repose sur un système de rotation des disques dans l'eau à traiter. À chaque rotation, les disques sont partiellement immergés dans l'eau usée, ce qui permet aux micro-organismes fixés sur les disques de consommer la matière organique dissoute. Lorsque les disques émergent de l'eau, ils sont exposés à l'air, permettant aux micro-organismes

de se réoxygéner. Cette alternance entre immersion dans l'eau et exposition à l'air est cruciale pour maintenir un environnement favorable à la croissance des micro-organismes.

L'oxygénation est réalisée de manière plus naturelle par le mouvement des disques et l'exposition à l'air. Ce processus est donc plus économique en termes d'énergie par rapport à d'autres procédés nécessitant une aération forcée, comme les boues activées.

2.2.2. Avantages des RBC

Les RBC présentent de nombreux avantages :

- Efficacité énergétique : Comme les disques sont partiellement immergés dans l'eau et tournent lentement, les RBC n'ont pas besoin d'une aération constante. Cela permet de réduire considérablement les coûts d'énergie.
- Adaptabilité : Les RBC peuvent être utilisés dans une large gamme de conditions d'exploitation, et ce procédé est souvent utilisé dans les petites stations d'épuration ou les installations où les espaces sont réduits.
- Maintenance simple : Le procédé ne nécessite pas un entretien complexe. Les disques sont relativement faciles à nettoyer et à remplacer.

2.2.3. Limites des RBC

- Espace nécessaire : Bien que les RBC soient efficaces, ils nécessitent un espace important pour les disques. Cela peut poser problème dans les zones urbaines ou dans les installations ayant des contraintes d'espace.
- Défaut de flexibilité : Les RBC sont moins adaptés aux fluctuations importantes de la charge organique, ce qui peut réduire leur efficacité dans des systèmes à charge variable.

2.3. MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor)

Le MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) est un procédé innovant à biofilm qui utilise des supports mobiles flottants dans l'eau. Ces supports sont agités par le flux d'eau, ce qui permet de maintenir une grande surface d'adhésion pour les micro-organismes tout en minimisant le colmatage des supports.

2.3.1. Principe du procédé

Le MBBR repose sur l'utilisation de supports plastiques en forme de boules ou de cylindres qui flottent librement dans le réacteur. L'eau à traiter est agitée, ce qui permet aux supports de se déplacer et d'optimiser l'exposition du biofilm aux contaminants. L'oxygénation est généralement assurée par une aération fine, ce qui permet de maintenir les micro-organismes dans des conditions aérobies tout au long du processus de dégradation de la matière organique.

Les supports mobiles offrent plusieurs avantages par rapport aux systèmes fixes, notamment la réduction du colmatage et l'amélioration de l'efficacité du traitement en augmentant la surface disponible pour les micro-organismes.

2.3.2. Avantages du MBBR

Les MBBR offrent plusieurs avantages clés :

- Haute capacité de traitement : Le MBBR est capable de traiter des eaux usées avec une charge organique plus élevée que les autres systèmes de biofilm, ce qui le rend efficace dans les stations de traitement à grande échelle.
- Espace réduit : Comparé aux autres procédés biologiques, le MBBR permet un traitement plus compact des eaux usées.
- Flexibilité : Le système MBBR peut facilement être intégré dans les stations existantes sans nécessiter de modifications complexes de l'infrastructure.

2.3.3. Limites du MBBR

- Coût des supports : Les supports plastiques peuvent représenter un investissement initial relativement élevé, bien que leur durabilité et leur efficacité justifient souvent ce coût supplémentaire.
- Maintenance et gestion des supports : Bien que les supports flottants réduisent le colmatage, une gestion efficace de leur mouvement est essentielle pour maintenir un rendement optimal.

3. Lagunage

Le lagunage est un procédé de traitement des eaux usées reposant sur l'utilisation de bassins peu profonds où se produisent des processus biologiques complexes, notamment la dégradation de la matière organique par des micro-organismes, l'absorption de nutriments par des algues et la filtration des particules solides. Ce système est largement utilisé pour traiter des eaux usées à faible coût énergétique, tout en étant relativement simple à mettre en œuvre et à maintenir.

Le lagunage repose sur les interactions entre des micro-organismes, des algues et des macrophytes (plantes aquatiques), et peut être classé en différents types en fonction des conditions d'oxygénation et de l'environnement biologique. Ce procédé est particulièrement adapté aux sites où l'espace est disponible et où des ressources limitées peuvent être allouées à l'exploitation du système.

3.1.Types de Lagunage

Le lagunage se divise en trois grands types de procédés, chacun ayant des caractéristiques spécifiques qui influencent leur efficacité et leur adaptation aux différents types d'eaux usées.

3.1.1. Lagunage Anaérobie

Le lagunage anaérobie est utilisé dans des conditions où la matière organique est présente à des concentrations élevées, comme dans les eaux usées industrielles ou agricoles. Dans ce système, la dégradation de la matière organique se fait en absence d'oxygène. Ce type de procédé repose principalement sur des bactéries anaérobies, telles que les méthanogènes, qui réduisent la matière organique en produisant du biogaz, principalement du méthane (CH_4).

a. Principe du Lagunage Anaérobie

Les bassins utilisés pour le lagunage anaérobie sont peu profonds et de grande superficie. La matière organique contenue dans l'eau usée est dégradée par les micro-organismes qui ne nécessitent pas d'oxygène pour leur activité métabolique. Les composés organiques sont dégradés en produits simples, notamment le méthane, le dioxyde de carbone et de petites quantités d'acides organiques. Ce processus est particulièrement efficace pour traiter des eaux usées très chargées en matières organiques, telles que celles provenant des industries alimentaires, des sucreries ou des industries du papier.

b. Avantages et Limites du Lagunage Anaérobie

- **Avantages :**

Production de biogaz : Le processus génère du méthane, qui peut être capté et utilisé comme source d'énergie, ce qui réduit les coûts énergétiques de la station d'épuration.

Faible coût d'exploitation : Le lagunage anaérobie ne nécessite pas de système d'aération coûteux, ce qui le rend très économique.

Réduction de la charge organique : Ce système est particulièrement efficace pour la dégradation des polluants organiques à forte charge.

- **Limites :**

Temps de rétention long : Le lagunage anaérobie prend plus de temps pour traiter les eaux usées par rapport aux systèmes aérobies, ce qui peut entraîner une utilisation plus longue de l'espace.

Sensibilité aux fluctuations de température : Les bactéries méthanogènes sont sensibles aux variations de température. Des températures trop basses peuvent ralentir considérablement le processus.

3.1.2. Lagunage Facultatif

Le lagunage facultatif combine des procédés aérobies et anaérobies. Ce type de procédé repose sur la présence de différentes couches de micro-organismes dans les bassins de traitement. En surface, les micro-organismes aérobies consomment l'oxygène dissous produit par les algues, tandis qu'en profondeur, où l'oxygène est limité, des bactéries anaérobies poursuivent la dégradation de la matière organique.

a. Principe du Lagunage Facultatif

Le lagunage facultatif repose sur un équilibre entre les différents types de micro-organismes présents. Les algues et les bactéries aérobies, en consommant l'oxygène dissous, dégradent la matière organique en surface. Plus bas, les conditions deviennent anoxiques, et les bactéries

dénitrifiantes et anaérobies poursuivent la dégradation des polluants organiques et azotés, y compris la réduction des nitrates.

Ce système peut être utilisé pour traiter des effluents domestiques ou industriels à charge organique moyenne. Le processus est plus rapide que le lagunage anaérobie, mais reste relativement simple.

b. Avantages et Limites du Lagunage facultatif

- **Avantages :**

Flexibilité : Ce système peut traiter une large gamme d'effluents, allant des eaux usées domestiques aux eaux usées industrielles.

Moins d'entretien : Contrairement aux autres systèmes qui nécessitent une aération continue, le lagunage facultatif est relativement simple à maintenir et à gérer.

Réduction de l'azote : Le processus de dénitrification dans les zones anoxiques permet de réduire efficacement les concentrations de nitrates dans les eaux usées.

- **Limites :**

Espace nécessaire : Bien qu'il soit plus efficace que le lagunage anaérobie, le lagunage facultatif nécessite encore une grande superficie pour être efficace.

Sensibilité aux variations climatiques : Comme le lagunage anaérobie, il peut être affecté par les variations saisonnières de température.

3.1.3. Lagunage de Maturation

Le lagunage de maturation est un procédé utilisé après un traitement primaire ou facultatif pour éliminer les pathogènes restants et clarifier davantage l'eau. Ce procédé repose principalement sur des processus aérobiques intensifs, dans lesquels les algues et les micro-organismes dégradent les polluants restants, tout en réduisant les agents pathogènes présents.

a. Principe du Lagunage de Maturation

Les bassins de maturation sont conçus pour maximiser l'exposition de l'eau à l'air et à la lumière, favorisant ainsi l'oxygénation par les algues et la dégradation de la matière organique. Ce processus est également utilisé pour la réduction des pathogènes, grâce à l'action de l'oxygène et de l'exposition au soleil, qui tue une partie des micro-organismes pathogènes.

b. Avantages et Limites du Lagunage de Maturation

- **Avantages :**

Réduction des pathogènes : Ce procédé est particulièrement efficace pour réduire la charge en pathogènes dans les eaux traitées, ce qui les rend sûres pour leur rejet dans l'environnement.

Faible coût de fonctionnement : Le lagunage de maturation ne nécessite pas d'équipement sophistiqué et utilise des ressources naturelles comme le soleil pour désinfecter l'eau.

- **Limites :**

Temps de rétention long : Ce procédé nécessite généralement plus de temps que les autres méthodes de traitement, ce qui peut être un inconvénient dans les zones où la capacité de traitement doit être élevée.

Espace important : Comme le lagunage facultatif, il nécessite de vastes étendues de terrain.

3.2.Rôle des Écosystèmes dans le Lagunage

Le succès du lagunage dépend de l'interaction entre les micro-organismes, les algues et les macrophytes. Ces écosystèmes aquatiques interagissent de manière synergique pour dégrader la matière organique, absorber les nutriments et améliorer la qualité de l'eau.

3.2.1. Algues-Bactéries

Les algues jouent un rôle central dans l'oxygénation des eaux, car elles produisent de l'oxygène par photosynthèse. Cet oxygène dissous est utilisé par les micro-organismes aérobies pour la dégradation de la matière organique. Les algues consomment également du dioxyde de carbone, ce qui crée un environnement favorable aux bactéries aérobies et permet une dégradation efficace des polluants organiques.

Chapitre 2 : Traitement biologique des eaux usées

Les bactéries aérobies dégradent les matières organiques dans les couches supérieures des bassins, tandis que les bactéries anaérobies dégradent la matière organique dans les zones plus profondes où l'oxygène est limité.

3.2.2. Macrophytes

Les macrophytes, ou plantes aquatiques, comme les roseaux, les carex et les jacinthes d'eau, jouent un rôle essentiel dans la filtration des eaux. Les racines des macrophytes peuvent absorber les nitrates, phosphates, et métaux lourds, contribuant ainsi à la réduction de la charge en nutriments dans les eaux usées.

Les macrophytes sont particulièrement efficaces pour absorber l'azote et le phosphore, qui sont des polluants importants responsables de l'eutrophisation des milieux aquatiques.