

L'eau, sa pollution, et son traitement

René Moletta

« Moletta Méthanisation »
1504 Route des Bottières 73470 Novalaise (France)
e mail : rene.moletta@yahoo.fr

nota bene : Toute mise en œuvre de ce qui est décrit dans les chapitres doivent être faite avec une personne compétente

Chapitre 7 : Le traitement de la pollution des eaux usées

1. Le pouvoir épurateur du milieu naturel

Le milieu naturel a le pouvoir de transformer la matière grâce au organismes vivants qui le compose. Les acteurs sont les micro-organismes, les plantes, les animaux ... qui utilisent cette matière comme source de nourriture pour se développer, se reproduire (figure 1). Ceci a permis de recycler la matière des organismes vivant depuis l'apparition de la vie, c'est à dire depuis 3,5 milliards d'année.

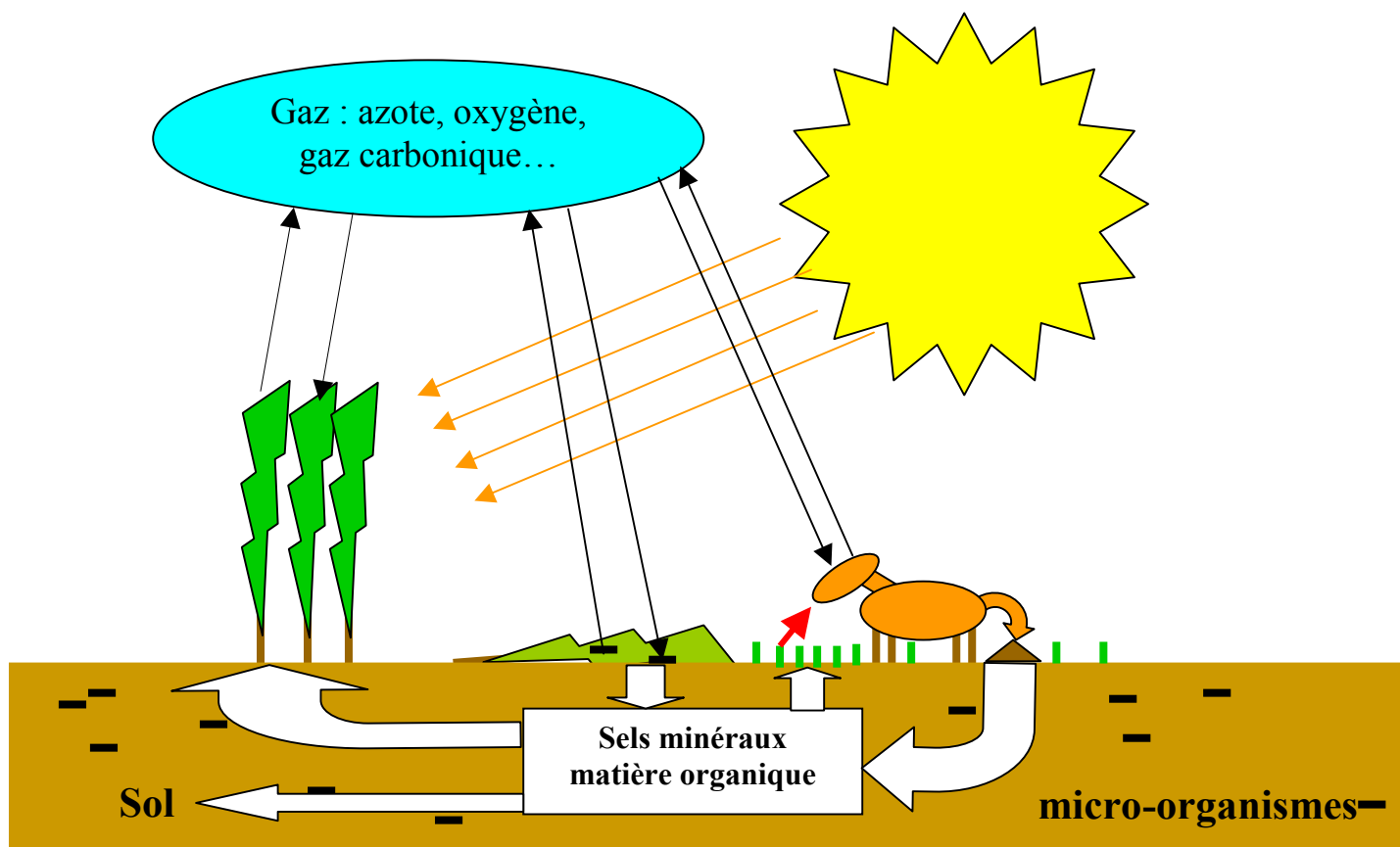


Figure 1. Schéma simplifié des transferts de matière dans le milieu naturel.

Le soleil apporte de l'énergie aux plantes qui font de la matière organique, via la photosynthèse et leurs métabolismes. Elles utilisent l'eau, et le gaz carbonique, l'azote, le phosphore et les minéraux. Elles rejettent en même temps de l'oxygène. Ces plantes sont consommées par les animaux qui rejettent du gaz carbonique, de la matière organique (les excréments). Ces derniers seront transformés, comme les plantes et les animaux morts, par les micro-organismes qui s'en serviront de substrat et rejetteront des sels minéraux, et du gaz carbonique de l'azote, du phosphore ... qui sera de nouveau consommé par les plantes.

Depuis l'apparition de la vie sur terre, tous les éléments (carbone, azote, phosphore, oxygène...) qui ont été apportés de l'espace ont été utilisés pour faire les molécules de la vie. C'est parce qu'ils ont été recyclés que la vie a pu se développer sur terre. On considère que la matière qui constitue le vivant a été recyclé en moyenne 5 fois depuis l'apparition de la vie.

2. L'épuration par l'épandage

Les effluents contiennent un grand nombre de molécules qui elles même contiennent des éléments utiles pour les végétaux. C'est pourquoi une des techniques très utilisées pour éliminer des effluents, est l'épandage. Elle est appliquée principalement pour les effluents d'origine agricole, des industries agro-alimentaires et pour les boues de stations d'épurations. Elle n'est plus utilisée pour épandre directement les effluents urbains.

Elle consiste à répandre sur un sol agricole des effluents contenant des éléments nutritifs pour la culture envisagée avec le soucis de ne pas accumuler de matière provenant de l'effluent dans le sol. C'est le pouvoir épurateur du sol qui est alors exploité. Il faut considérer que l'épandage bien réalisé apporte un plus à l'agriculture en économisant des engrais chimiques et en améliorant les qualités des sols via l'apport de matières organiques.

2.1. Contraintes de mises en oeuvre

Cette technique a des contraintes de mise en oeuvre très strictes pour qu'elle ne pose pas elle-même de nuisance. Elle nécessite

Une étude de faisabilité est tout d'abord réalisée.

- Les volumes d'effluents à épandre par unité de surface et par an, sont calculés de telle manière à ce que l'on apporte la quantité désirée de l'élément nutritif principal.
- Ces effluents ne doivent pas contenir de produits indésirables qui peuvent poser des problèmes sanitaires (micro-organismes pathogènes, molécules toxiques...) ou modifier les qualités des sols.
- On ne doit pas créer de nuisances et il y a donc des contraintes de distances minimales d'habitation et de cours d'eau, de pentes pour éviter le ruissellement ...
- La nature du sol doit être apte à retenir les volumes apportés (pas d'épandage en temps de pluie, sous la neige, importance du type de sol...)
- Il doit y avoir obligatoirement exportation de la matière de la parcelle (pas de «parcelle poubelle »).
- Lorsque l'épandage est autorisé, et afin de s'assurer qu'il se passe dans de bonnes conditions techniques, un «cahier d'épandage » doit être tenu à jour et qui précise tout ce qui a été fait.

2.2. Techniques d'épandage

La mise en œuvre de l'épandage se fait par deux techniques.

- Epandage par postes fixes. Il s'agit d'envoyer par une pompe sur des parcelles choisies les effluents qui auront subi un tamisage car ils seront répartis par des asperseurs en postes fixes.
- Epandage par une tonne à lisier. Il s'agit ici de transporter l'effluent par tracteur tirant une citerne qui répartira l'effluent sur les parcelles choisies grâce à des asperseurs. Cette stratégie nécessite l'intervention de personnel.

3. Principes des traitements en station d'épuration

Il faut enlever la matière polluante de la manière la plus simple et la moins cher possible. C'est pourquoi sur des stations d'épurations on trouve des procédés biologiques et des procédés physico-chimiques.

L'action de «dépolluer» signifie que l'on va retirer la matière présente de l'eau. Celle qui est plus difficilement séparable (la pollution soluble) va subir des transformations qui permettront de la l'éliminer plus facilement. Ces transformations sont donc de natures physico-chimiques et/ou biologiques. Elles conduiront à la production de matières insolubles ou gazeuses car le principe de Lavoisier est toujours respecté :

« Dans la nature rien ne se créait, rien ne se perd, tout se transforme ».

Les eaux polluées contiennent des matières qui peuvent être minérales ou organique, sous forme soluble ou insoluble. La stratégie employée pour la retirer de l'eau est résumée sur la figure 2.

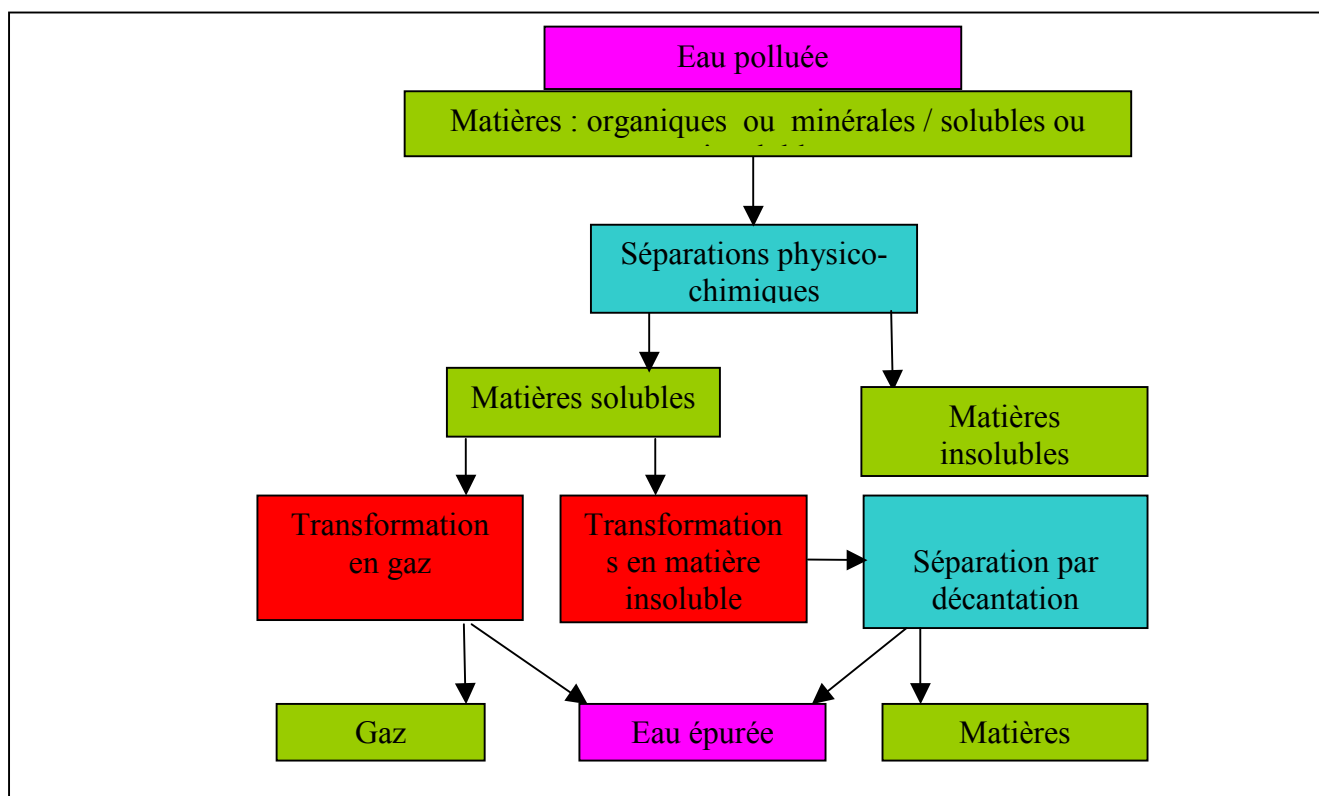


Figure 2: Schéma de principe des stratégies possibles utilisées pour une station d'épuration

La matière polluante de l'eau est composée de matières organiques et minérales qui peuvent être sous forme soluble ou insolubles. Ces matières subissent une première série de traitements physico-chimiques qui permettront de retirer de l'eau les polluants facilement éliminables. Il reste des matières solubles (et aussi colloïdales) qui n'ont pu être piégées. Elles vont subir des transformations mettant en œuvre des transformations plus complexes (microbiologiques ou physico-chimiques) qui vont les transformer en gaz (qui quittera naturellement l'eau) ou en matières insolubles qui seront séparées de l'eau par décantation. La matière polluante initiale aura donc quitté l'eau.

4. Les traitements par des procédés physico-chimiques.

Ce sont des opérations unitaires du génie chimique qui sont soit mises en œuvre seule, soit en complément avec des procédés biologiques. Les principales opérations sont décrites ci-dessous. Les principales opérations unitaires utilisées sont : le dégrillage, le tamisage, la décantation, l'évaporation, la filtration, les techniques de séparations membranaires, la coagulation floculation, la précipitation, la flottation, la centrifugation, l'adsorption, l'absorption, l'échange d'ions, la neutralisation du pH, l'oxydation chimique, l'échange de chaleur (refroidissement) ... certaines sont décrites ci-dessous.

4.1. Opérations unitaires

4.1.1. Le dégrillage et le tamisage.

Il s'agit de retenir les déchets solides qui peuvent arriver à la station d'épuration en faisant passer l'effluent à traiter à travers des grilles espacées de quelques centimètres (le dégrillage). Le tamisage est réalisé en faisant passer l'effluent à travers des grilles ayant des trous de quelques dixièmes à quelques millimètres.

4.1.2. La flottation

Contrairement à la décantation, la flottation consiste à former des amas de particules qui ont une densité inférieure à celle de l'eau et qui vont donc se retrouver en surface. La flottation peut être « naturelle », pour les graisses par exemple, « assistée » si des particules qui flotteraient naturellement ont besoin d'une intervention, ou alors « provoquée » s'il est nécessaire d'ajouter de l'air (sous forme de micro-bulles) qui va se fixer sur des particules.

La flottation est utilisée pour éliminer les graisses par exemple (dégraissage), des floes, pour séparer et récupérer des fibres en papeterie, épaissir des boues de station d'épuration (diminuer leur teneur en eau)...

4.1.3. La décantation

Une particule ou un agrégat qui a une densité supérieure à celle de l'eau va tomber au fond. On dit qu'elles décantent. Certaines particules peuvent décanter naturellement, d'autres nécessitent l'addition de produits qui vont les relier entre elles.

On récupère donc en fond de récipient les particules solides qui ont été séparées de l'eau à traiter. L'eau résiduelle contient alors principalement les colloïdes et la matière dissoute. Ces particules décantées forment des boues.

4.1.4. Les séparations membranaires

L'utilisation de membrane ayant des pores de plus en plus petits permettent de pousser très loin le seuil de séparation (nommé aussi le «seuil de coupure »coupure) de la matière pour aller jusqu'à la rétention de molécules et de sels. La classification des technologies membranaires en fonction de leur «seuil de coupure » est reportée sur la figure 3.

Elle a donné lieu à de nouvelles applications comme l'ultrafiltration, la nanofiltration, et l'osmose inverse, la dialyse. Elles peuvent être assistées électriquement comme l'électrodialyse par exemple. Ces membranes peuvent être composées de matières organiques ou minérales. Elles sont particulièrement intéressantes dans le cas de réutilisation de l'eau sur site (ultra filtration) ou pour dessaler l'eau de mer (osmose inverse).

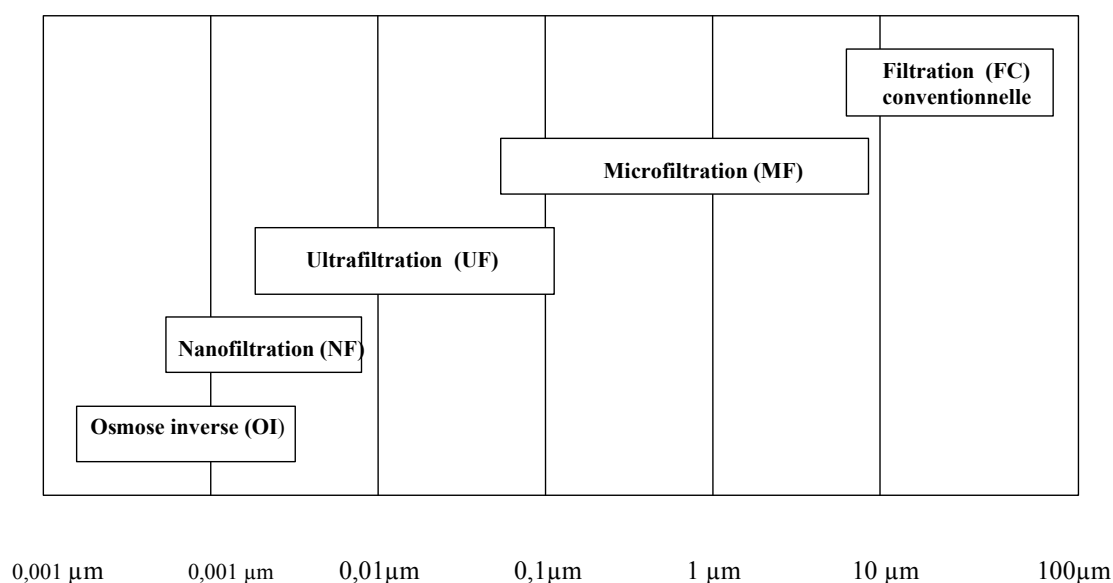


Figure 3. :Classification des technologies membranaires en fonction de leur «seuil de coupure »

Les micro-organismes ayant une taille supérieure à 0,1 µm, le passage de l'eau à travers une membrane ayant un seuil de coupure inférieur conduit à une stérilisation de l'eau.

4.1.5. Coagulation-Floculation

Lorsque des particules sont trop petites ou trop légères par exemple pour décanter ou être filtrées seules (colloïdes, petites matières en suspension), on peut les aider en ajoutant un produit coagulant qui va réduire les forces de répulsions électrostatiques (coagulation) permettant ainsi aux forces d'attraction de Van der Waals de rapprocher les particules entre elles pour former des micro-flocs puis des flocons plus volumineux (floculation) qui eux pourront décanter (figure 4). Cette dernière étape peut être facilitée par l'addition d'un produit de floculation. Les coagulants sont généralement de cations trivalents (fer, aluminium) et les produits de floculation des polymères minéraux (silice activée), des polymères naturels (amidon alginates) ou des polymères de synthèse.

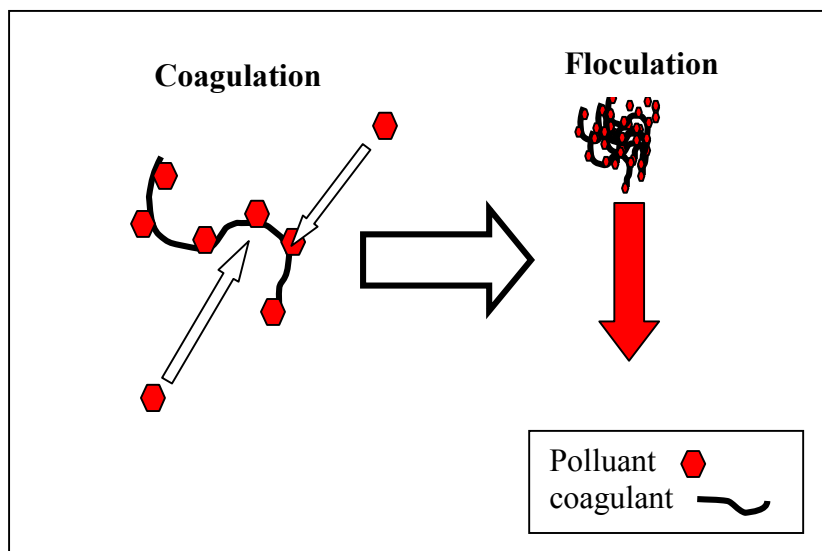


Figure 4 : Schéma de principe de la coagulation-floculation.

4.1.6. Précipitation

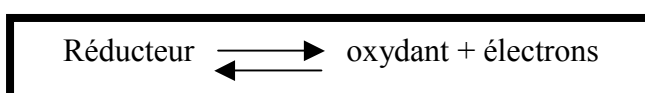
Elle consiste à faire réagir deux produits ensemble (molécules solubles avec des éléments polymères...) pour les rendre insolubles.

Cette technique est appliquée à l'élimination du calcium, du magnésium, des métaux, des sulfates chlorures. Elle a une très grande importance pour l'élimination des phosphates.

Pour l'élimination des phosphates on utilise de la chaux pour les eaux acides ou des sels de fer et d'aluminium pour les autres.

4.1.7. Oxydation/réduction chimique

Les réactions d'oxydations/réductions sont des réactions dans lesquelles on a un échange d'électron entre un réducteur qui va céder un électron à un oxydant. On a la réaction suivante :



Une molécule peut être un oxydant ou un réducteur en fonction de la nature de la molécule avec laquelle elle va réagir.

L'oxygène ne peut par contre n'être qu'un oxydant et l'hydrogène qu'un réducteur.

Les réactions d'oxydations chimiques sont utilisées dans le traitement des eaux pour, pour fragiliser ou supprimer la matière (oxydation chimique à l'ozone par exemple) pour désinfecter une eau traitée (ozone, rayons UV, dioxyde de chlore ClO_2 ...)

4.2. Station d'épuration physico-chimique

Nous ne verrons ici que les procédés mettant en œuvre de procédés physico-chimiques seuls.

Ils sont appliqués pour traiter des eaux qui contiennent de la matière non transformable par les micro-organismes (pour des raisons techniques ou économiques) ou pour leur rapidité de mise en régime. Ce dernier aspect peut être déterminant dans le choix pour des communes qui subissent des variations de populations rapides dues à l'afflux touristique.

Ils sont appliqués par exemple pour éliminer polluants qui ont des charges électriques (c'est à dire, des molécules ionisées). Ce sont :

- Des matières en suspension, des colloïdes
- Des métaux solubles ;
- Des molécules organiques difficilement ou non biodégradables
- Des sels, des ions solubles
- Des matières organiques ionisées
- Des produits biologiquement toxiques
- Autres....

Un exemple d'application par coagulation floculation est représenté sur la figure 5.

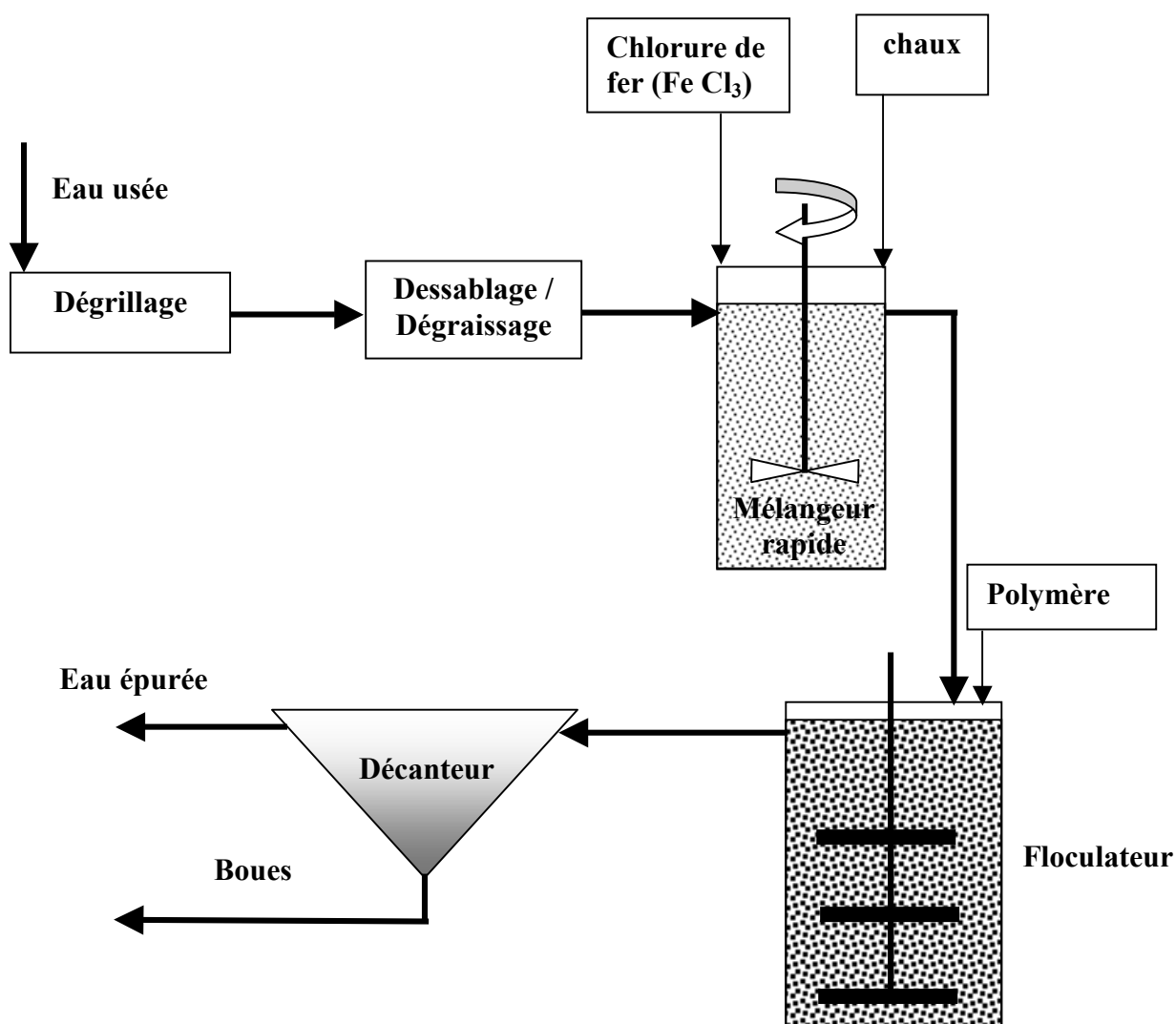


Figure 5 : exemple d'application par coagulation floculation

Le principe consiste en la réalisation de prétraitement qui va retirer les particules grossières dans un dégrilleur. Il sera suivi par un dessablage va permettre de récupérer le sable et enfin un dégraissage (par flottation) qui va faire flotter les matières grasses comme les huiles par

exemple. Le dessablage et le dégraissage se font généralement dans le même bassin (on a des dessableur-dégraisseurs). Dans un mélangeur rapide, l'effluent est ensuite mélangé à un produit qui va faire monter le pH (la chaux) pour rendre les molécules chargées négativement, et un produit coagulant qui va fixer les molécules. Ce coagulant peut être du chlorure de fer (FeCl_3), du sulfate d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) ... Ce mélange va ensuite dans un flocculateur à agitation lente qui, à l'aide d'un produit flocculant va faire des floccs importants qui décanteront facilement dans le décanteur qui suit.

Cette technique de traitement physico-chimique est applicable aux effluents urbains et industriels quand cela se justifie. Généralement ce sont les procédés biologiques qui sont les plus intéressants.

5. Les traitements par des procédés biologiques

Les micro-organismes sont, et de loin, les principaux acteurs des traitements biologiques. Les plantes ne sont que rarement utilisées. Elles servent principalement (grâce à leurs racines) de support aux micro-organismes ou à éliminer de l'eau via l'évapo-transpiration.

Les micro-organismes sont utilisés pour transformer la matière organique des effluents. C'est principalement les produits qui contiennent du carbone et de l'azote qui sont visés. Ils peuvent aussi modifier la matière minérale sans que cela soit forcément recherché.

5.1. Les acteurs de la transformation de la matière.

Les micro-organismes ont été l'expression majeure de la vie principalement à ses débuts. Ils ont survécus aux 3,5 milliards d'années et en ont profité pour se diversifier dans leurs structures et fonctionnements. Ils ont colonisé tout l'espace et tous les éléments que ce soit l'eau, l'air ou le sol. Ils sont devenus des auxiliaires de vie indispensables à de nombreux organismes supérieurs.

Actuellement on les classe en différentes catégories qui sont représentées sur la figure 6, ci dessous :

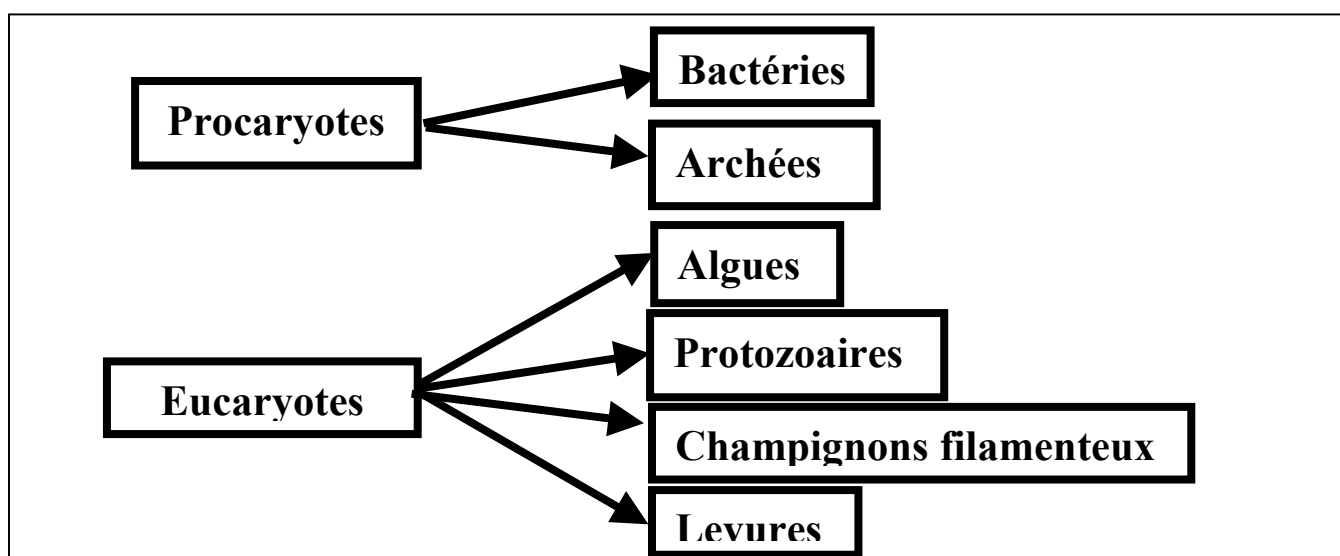


Figure 7.6 : Classification des micro-organismes

Ce sont les procaryotes qui sont les principaux acteurs des stations d'épurations. Mais on y trouve aussi des virus, des protozoaires.... qui jouent des rôles importants dans le fonctionnement des écosystèmes.

De nos jours, les micro-organismes ont une grande variété de substrats qu'ils utilisent comme sources de substrat et d'énergie pour survivre et se multiplier. Ceux qui utilisent les matières organiques dissoutes organiques sont dits chimiotrophes, ceux qui utilisent les matières minérales sont dits lithotrophes. Certains utilisent obligatoirement de l'oxygène (ils sont aérobies), d'autre n'utilisent pas l'oxygène car il est toxique pour eux (ils sont anaérobies). D'autres, par contre, peuvent fonctionner dans les deux cas. Ce sont les bactéries aérobies facultatives.

Le traitement des eaux se fait par un ensemble de micro-organismes qui forment une communauté microbienne. A coté des bactéries, des archéobactéries on trouve parfois des levures, des champignons filamenteux, des protozoaires, ... et tout cet ensemble va consommer la matière polluante.

Suivant la nature chimique de la pollution elle sera consommée totalement ou partiellement. Les produits dissous difficilement biodégradables resteront dans l'eau. C'est pourquoi il est impossible d'avoir une eau épurée à 100 %. Cette fraction polluante restante est appelée « DCO dure » parce que difficile à éliminer par cette voie.

Dans une communauté microbienne, les micro-organismes qui la composent vivent autour dans un certain équilibre. Les produits excrétés des uns servent de substrats aux autres. Les techniques de microbiologie moléculaires ont complètement révolutionné notre connaissance du fonctionnement des communautés microbiennes. Leur équilibre n'est pas figé. Certains micro-organismes sont dominants d'autres minoritaires, mais les dominants peuvent devenir minoritaires et vice versa... et la même transformation microbienne se réaliser tout aussi bien !

5.2. Stratégies de mise en œuvre des micro-organismes

5.2.1. Aérobie/anaérobie

Il y a deux stratégies principales pour la mise en œuvre les micro-organismes dans le traitement des eaux usées : la stratégie aérobie et la stratégie anaérobie. Elles sont résumées dans les schémas suivants :

5.2.1.1.Stratégie de mise en oeuvre des micro-organismes en aérobie :

Dans cette stratégie on cherche à transformer la pollution en biomasse microbienne, c'est à dire en matière insoluble facile à récupérer par décantation. Elle est schématisée sur la figure 7.

L'oxygène qui est apporté dans l'eau à traiter, va être consommé avec les matières polluantes pour la croissance microbienne. Cette réaction d'oxydation biologique conduit à la production de chaleur et de quantité de boues (dites «boues biologiques »). Cette quantité varie de 0,2 à 0, 5 kg de biomasse microbienne (exprimée en matière sèche) par kg de DCO éliminée. C'est la stratégie appliquée pour traiter les effluents urbains sous nos latitudes.

La composition moyenne des bactéries (exprimée sur une base de matière sèche) est de 53 % en carbone, 20 % en oxygène, 12 % en azote, 7 % en hydrogène, 3 % en phosphore, 1% en soufre, 0,5 % en Magnésium et 3,5 % autres. L'effluent doit donc comporter tous ces éléments (dans ses matières polluantes et colloïdales) pour pouvoir réaliser la croissance

microbienne. Il faut qu'ils soient aussi biodisponible, c'est à dire consommable par les micro-organismes.

La masse de biomasse microbienne réalisable sera conditionnée par la quantité de l'élément limitant. Pour les stations d'épuration urbaines c'est souvent le carbone.

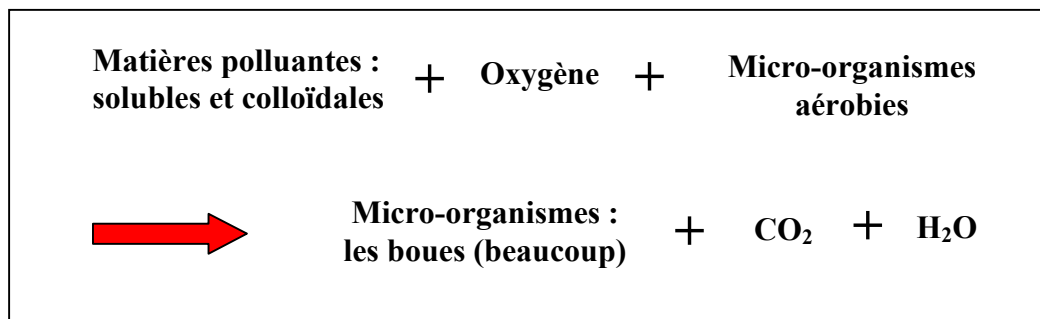


Figure 7 : Schéma de principe de la mise en œuvre des micro-organismes en aérobose.

5.2.1.2.Stratégie de mise en œuvre des micro-organismes en anaérobiose

Dans cette stratégie, on cherche à transformer la pollution organique en méthane et gaz carbonique, deux gaz qui quitteront naturellement l'eau. Ces gaz forment ce que l'on appelle communément le « biogaz ». On forme théoriquement 760 litres de biogaz par kg de DCO éliminée.

Elle est schématisée sur la figure 8.

En réalité on en forme moins car une partie de la DCO éliminée va en production de biomasse (environ 0,05 kg de biomasse microbienne, exprimée en matière sèche, par kg de DCO éliminée) et une partie du CO₂ produit va rester sous forme ionisée dans l'eau. On a souvent un biogaz composé à 60% de méthane et 40% de gaz carbonique.

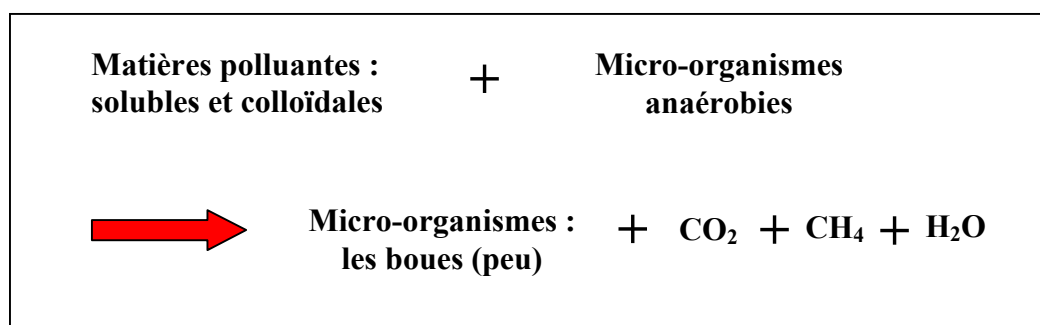


Figure 8 : Schéma de principe de la mise en œuvre des micro-organismes en anaérobiose.

Dans ces communautés microbiennes la transformation de la matière organique en méthane et gaz carbonique passe par différentes étapes qui sont représentées sur la figure 9.

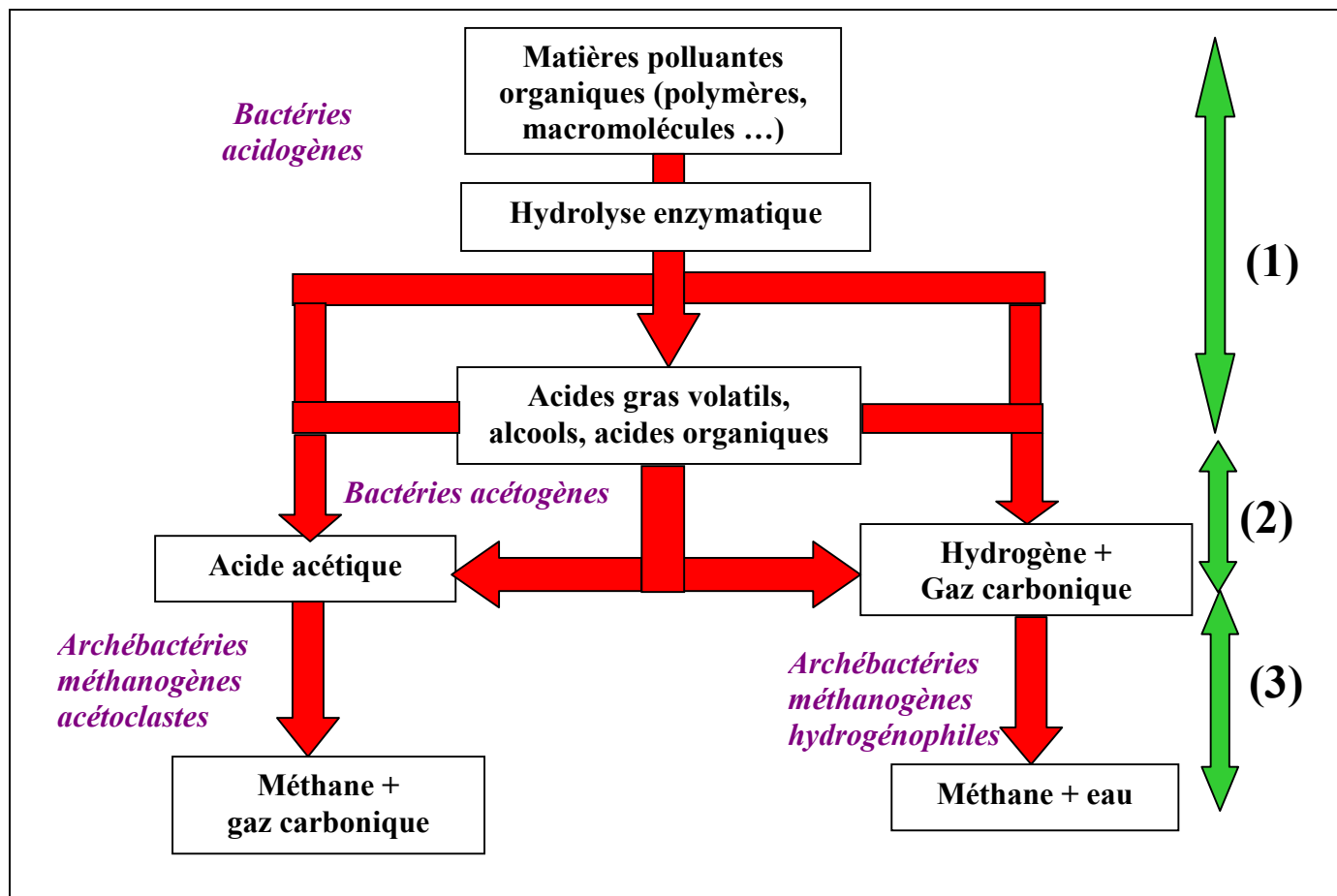


Figure 9. : Schéma du flux métabolique de transformation de la matière organique en méthane et gaz carbonique par une communauté microbienne en anaérobiose avec : (1) phase d'hydrolyse et d'acidogénèse, (2) phase d'acétogénèse, (3) phase de méthanogénèse.

La matière organique entrante est hydrolysée par les enzymes produites par les microorganismes présents et transformée en monomères (molécules simples) qui seront ensuite consommés et transformés en acides organiques ("Acides Gras Volatiles" –AGV– c.à.d. acides acétique, propionique, butyrique, valérique...) ou en alcools, et en hydrogène et gaz carbonique. C'est la première étape qualifiée d'étape d'hydrolyse et d'acidogénèse. La seconde étape est la transformation des AGV et alcool en acide acétique, gaz carbonique et hydrogène. C'est l'étape d'acétogénèse (génése de l'acide acétique littéralement). La dernière étape est l'étape de méthanogénèse dans laquelle l'acide acétique, le gaz carbonique avec l'hydrogène vont être transformés en méthane par les archéobactéries acétoclastes et hydrogénophiles respectivement.

Ceci montre que le fonctionnement d'une communauté microbienne peut être une suite de transformation ou le produit excrété par de l'un devient le substrat de l'autre.

5.2.2. Micro-organismes libres ou fixés

Les micro-organismes peuvent se développer isolément. Ils ont aussi la faculté naturelle de se regrouper de différentes manières. Ils peuvent s'assembler de manière lâche pour former des «flocs», ou de se fixer étroitement entre eux et former des biofilms. Ces biofilms peuvent se former sans support, et on a alors des «granules». Ils peuvent se former sur un support qui

peut être fixe ou mobile dans le réacteur. Un schéma de ces différentes structures est représenté sur la figure 10.

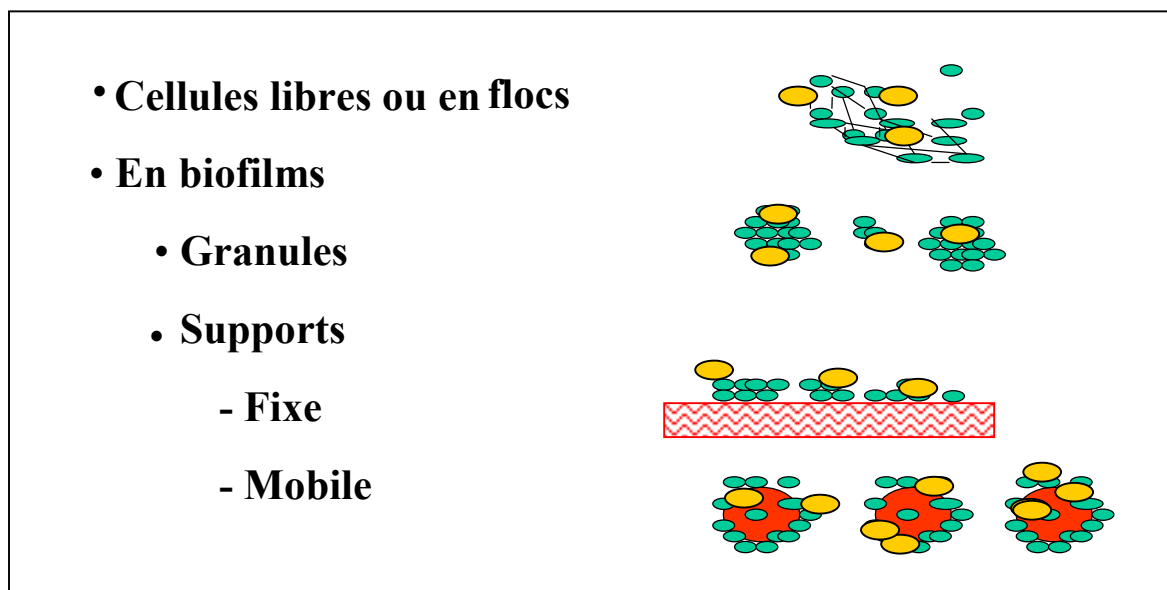


Figure 10 : Schéma des différentes structures microbiennes exploitées dans les systèmes de traitement de la pollution par voie bactérienne.

5.3. Les techniques d'épuration aérobies

Les techniques d'épuration aérobies nécessitent l'apport d'oxygène dans le milieu. Cet oxygène provient de l'air, rarement d'oxygène pur. Elles se font à température ambiante.

Comment ça marche? Comment l'oxygène qui est dans l'air passe dans l'eau?

5.3.1. Le transfert de l'oxygène

Prenons le cas d'une bulle d'air dans l'eau.

Dans l'air il y a de l'azote et de l'oxygène! A l'interface air/eau les gaz présents dans la bulle d'air vont passer en partie dans l'eau et vont donc s'y retrouver dissous. A un moment, on va avoir un équilibre entre l'oxygène (et l'azote) qui sont présent dans l'eau et dans l'air et l'on ne transférera plus rien.

Pour transférer l'oxygène dans l'eau, on utilise (figure 11) :

- l'introduction de bulle d'air dans l'eau
- l'introduction de gouttelettes d'eau dans l'air
- on utilise la diffusion naturelle au niveau d'une surface d'eau

Dans le premier cas, un compresseur génère de l'air comprimé qui est envoyé dans le milieu à travers de trous très fins. On envoie donc de l'air dans l'eau.

Dans le second cas, c'est les gouttelettes d'eau qui sont envoyées dans l'air par une turbine de surface qui crée une aspersion (Figure 12).

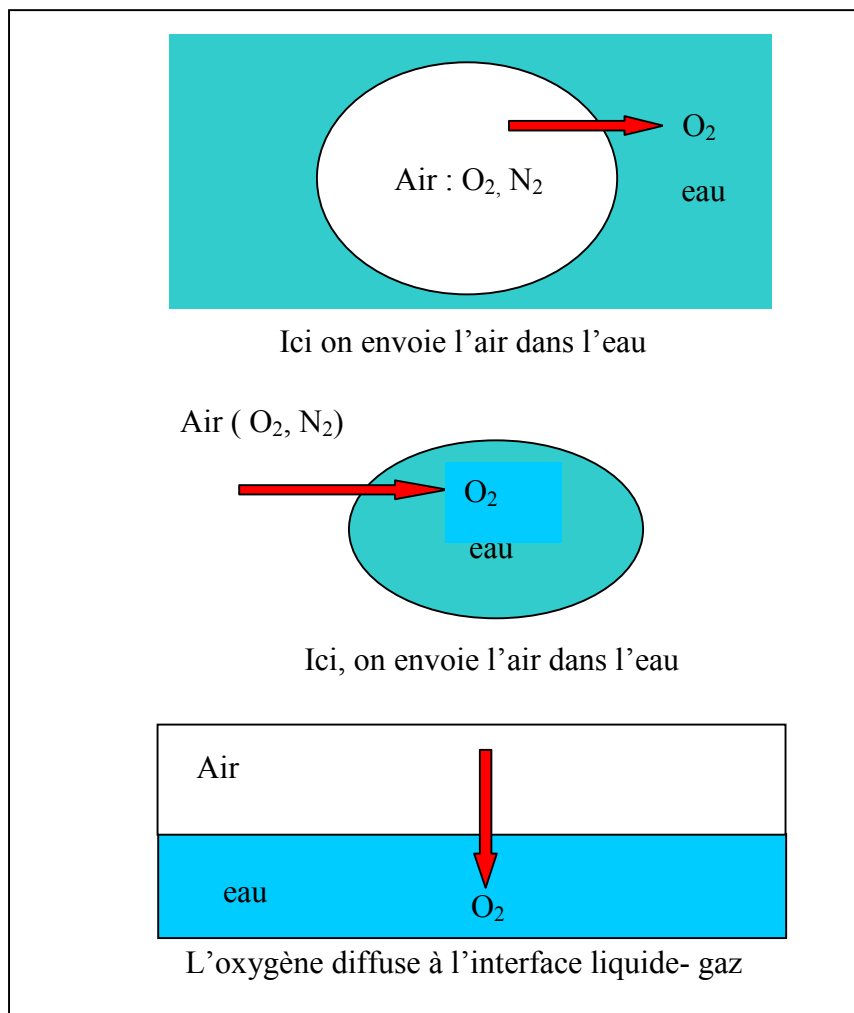
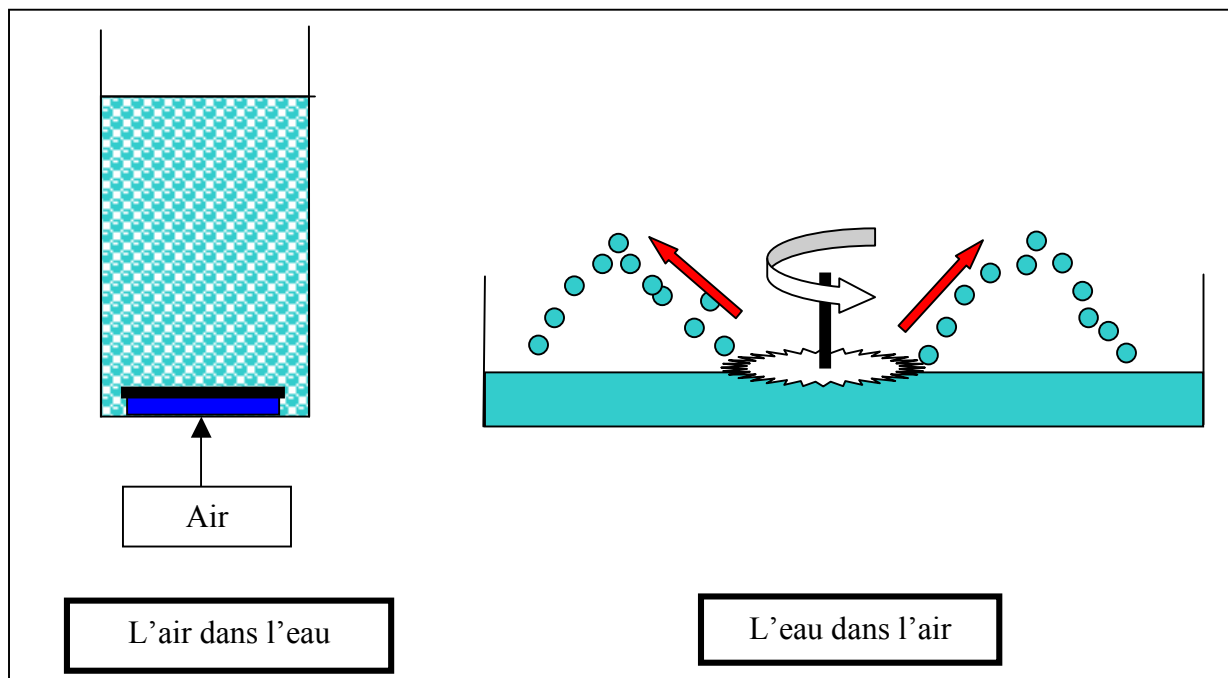


Figure 11 : Transfert de l'oxygène de l'air dans l'eau.



Figures 12 : Systèmes de transfert d'oxygène utilisés dans des stations d'épuration aérobie

Dans le troisième cas, on ne fait rien. C'est la diffusion normale qui se passe entre au niveau de la surface d'un étang. On verra que dans les procédés «lit bactérien », on augmente cette surface d'échange entre l'eau et l'air en faisant ruisseler l'eau dans un garnissage.

Les concentrations en gaz dissous dans un liquide dépendent de sa pression partielle dans le gaz, de la température de la salinité de l'eau...

La concentration en oxygène dissous de l'eau en équilibre avec l'air est de 8,25 mg/l à 25 degrés Celcius.

5.3.2. La station d'épuration aérobie

Le schéma d'une importante station d'épuration urbaine «classique »est représenté sur la figure 13. Elles s'appliquent aux effluents urbains mais aussi industriels.

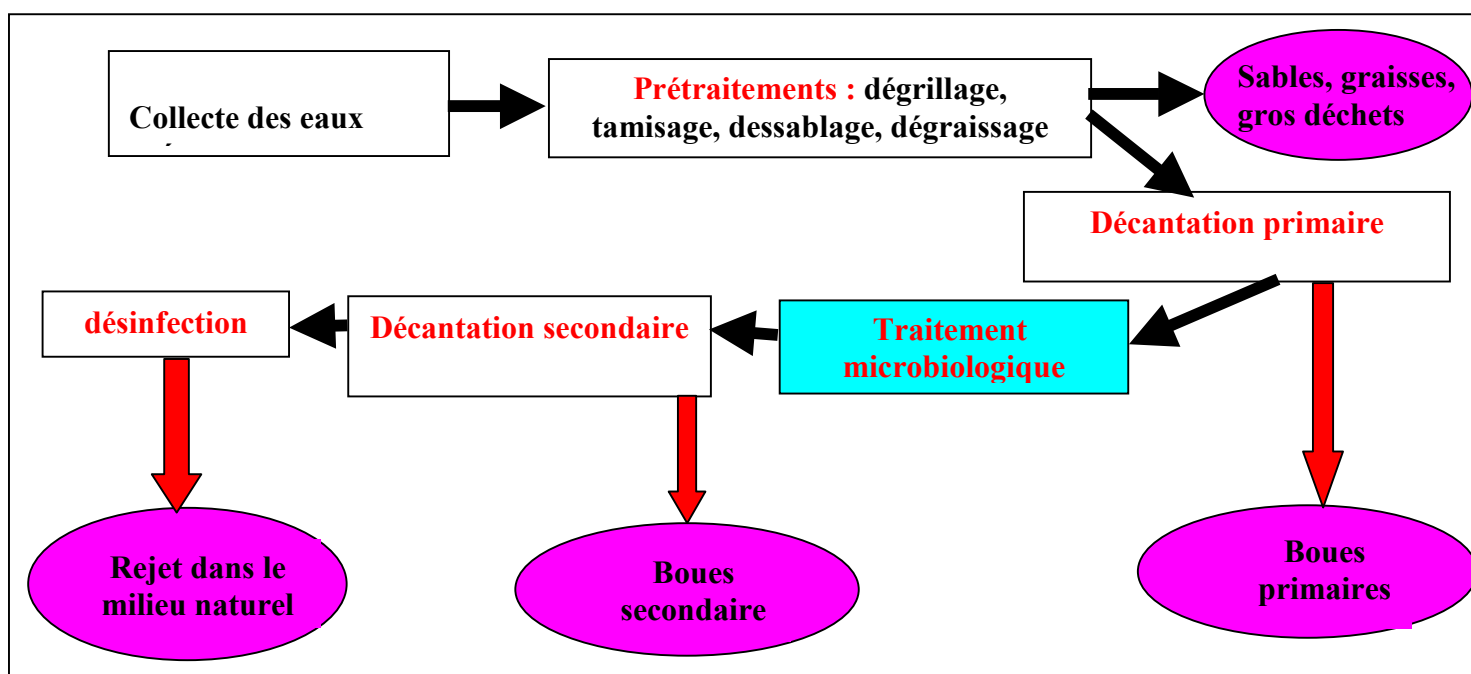


Figure 13 : Schéma d'une station d'épuration urbaine classique

Le pré-traitement consiste en plusieurs opérations physico-chimiques.

Les eaux qui arrivent à la station passent à travers des grilles espacées de quelques centimètres (dégrillage) puis un tamis avec des trous de quelques millimètres (tamisage) afin de retirer les plus gros déchets.

Les eaux usées passent dans un dessableur/dégraisseur. Il consiste en un a faire décanter le sable au fond d'un d'une cuve et de faire flotter la matière grasse par flottation assistée ou non. Le sable est raclé sur le fond et les graisses qui flottent sont récupérées aussi.

L'eau va ensuite dans un premier décanteur ou les particules qui restent vont décanter. Il reste donc une eau usée qui contient la pollution soluble et des colloïdes.

Elle est envoyée dans le réacteur biologique aérobie où la pollution qui reste va être consommée par les micro-organismes qui seront récupérés ensuite par décantation. C'est la décantation secondaire. L'eau qui reste va subir un traitement de désinfection par l'ajout de chlore ou par traitement aux rayons ultraviolet.

Pour les toutes petites stations (moins de 2000 équivalents habitants) on a souvent un schéma plus simple.

Les rendements des stations d'épurations aérobies dépendent sont généralement très bons lorsqu'elles sont bien conçues. Ils sont entre 90 et 98 % lorsque l'on a eu une bonne conception et que la station est bien gérée.

La «charge volumique» est la quantité de pollution apportée par m^3 de réacteur et par jour. C'est donc la quantité de pollution quotidienne qu'est capable de traiter $1 m^3$ de réacteur. C'est un choix de fonctionnement. En aérobie les charges appliquées vont de 0,7 (faible charge) à 4 kg (forte charge) de DCO/ m^3 de réacteur et par jour.

5.3.3. Schéma de principe des technologies aérobies utilisées

Il existe de nombreuses techniques pour le traitement microbologique aérobie. Nous n'en reprendrons ici que trois.

5.3.3.1. Les boues activées

Le principe de mise en œuvre est représenté sur la figure 14. C'est l'aération qui permet le mélange.

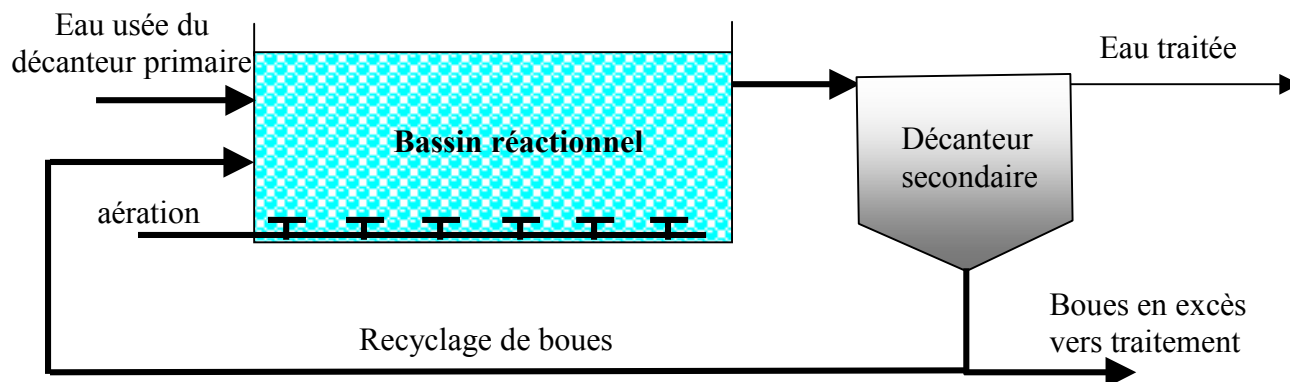


Figure 14 : Principe de fonctionnement des boues activées

Les micro-organismes sont sous la forme de floccs. Ils consomment la pollution et sont décantés ensuite. Une fraction des boues est recyclée en tête de bassin l'autre sera traitée.

Les boues activées sont la technique la plus appliquée pour traiter des effluents urbains. Pour éliminer 1 kg de DCO il faut transférer 0,75 kg d'oxygène lorsque l'on fonctionne à faible charge et on produira 0,37 kg de boues (exprimée en matière sèche).

Si le bioréacteur fonctionne en forte charge, pour éliminer 1 kg de DCO il faut transférer 0,32 kg d'oxygène et on produira 0,62 kg de boues (exprimée en matière sèche).

5.3.3.2. Le lit bactérien

C'est un procédé de traitement qui utilise les micro-organismes sous la forme de biofilm (figure 15). Ce biofilm se forme naturellement sur un support fixe (le garnissage) qui est mis à l'intérieur du fermenteur. Sur le biofilm ruisselle l'effluent à traiter. L'oxygène de l'air passe d'abord dans l'effluent puis dans le biofilm pour être consommé par les micro-organismes par diffusion entre l'interface liquide gazeuse. La pollution de l'eau diffuse à l'intérieur des micro-organismes qui s'en servent de substrat de croissance.

Nota : Un garnissage est un support plastique ou minéral, de surface spécifique importante sur lequel vient se former un biofilm. Il est caractérisé par sa surface spécifique exprimée en m^2/m^3 de support et un coefficient de vide qui est le volume de vide par volume total de support qui s'exprime en pourcentage. Les garnissages utilisés pour les lits bactériens sont généralement en plastique et ils ont des surfaces spécifiques de 80 à $220 m^2/m^3$. Les coefficients de vide sont supérieurs à 90%.

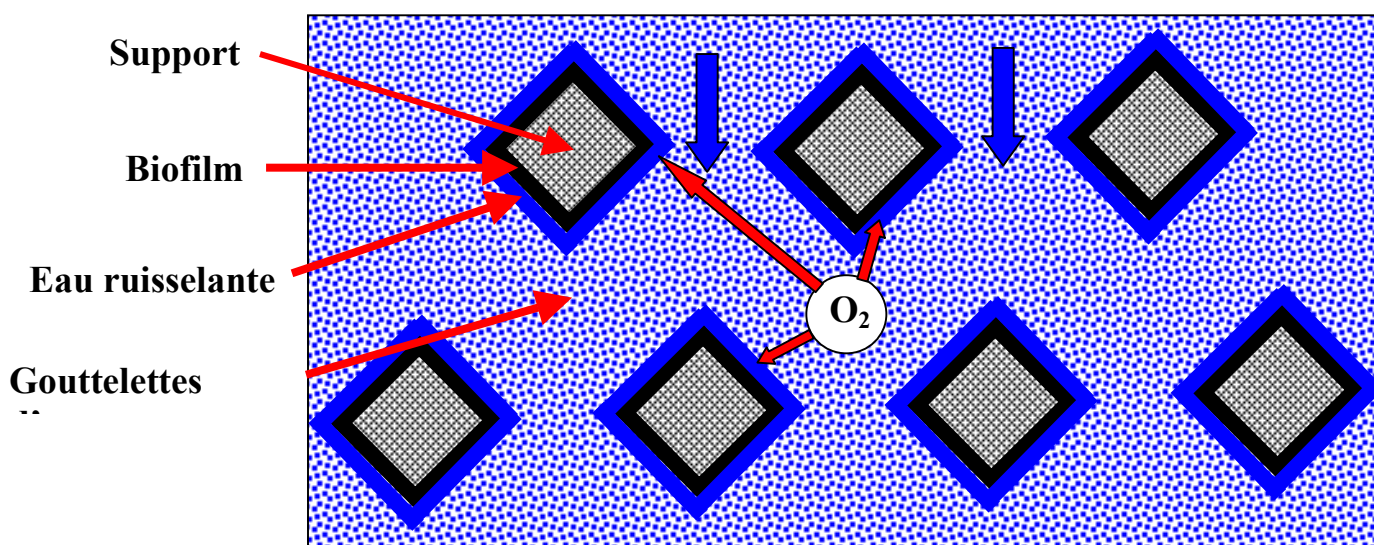


Figure 15 : Schéma en coupe de l'intérieur d'un lit bactérien.

La mise en œuvre de cette stratégie est représenté sur la figure 16.

L'eau à traiter est mélangé avec un circuit de recirculation. Elle passe à travers le garnissage sous forme de gouttelette d'effluent à traiter. Ici on a une circulation d'air naturelle à travers le garnissage et donc une économie d'énergie. C'est un donc moyen peu coûteux pour transférer l'oxygène.

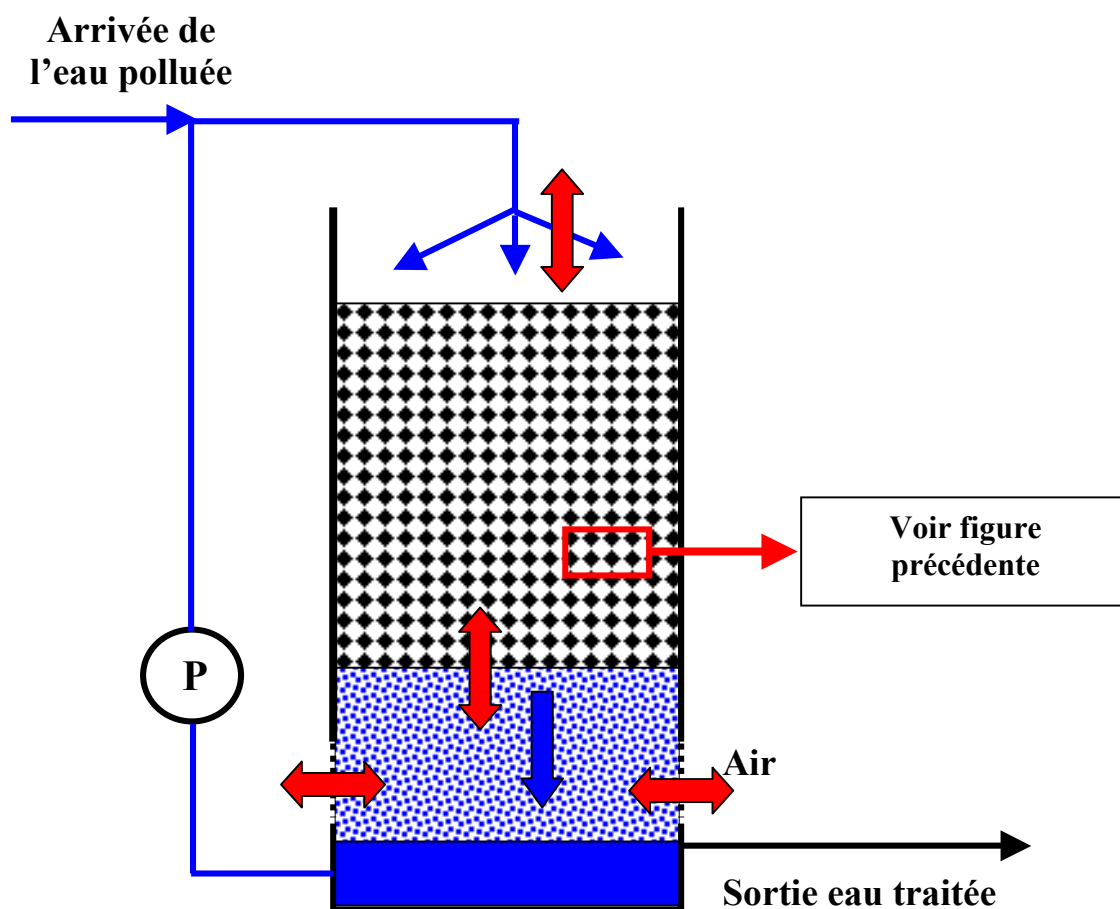


Figure 16 : Schéma de principe du lit bactérien.

Nous avons vu que en aérobie la pollution était transformée sous forme de biomasse microbienne. Mais ce système ne peut fonctionner indéfiniment comme cela. Que devient la biomasse sous forme de biofilm à la longue?

En consommant la pollution, le biofilm s'épaissit. L'oxygène et le substrat ne pourront plus diffuser jusqu'aux micro-organismes qui sont en contact avec le support et ils vont mourir. Le biofilm n'étant plus solidement fixé au support va se détacher et un nouveau biofilm va se reformer à la place. On trouvera donc en sortie dans l'eau traitée des microorganismes qui devront être éliminés car c'est aussi de la DCO.

5.3.3.3. Le lagunage aérobie

C'est certainement le système le plus simple car il consiste à envoyer l'effluent à traiter dans une série de bassins de faibles profondeurs qui contiennent la communauté microbienne de traitement. Dans cette stratégie, la station d'épuration se limite à un prétraitement (dégrillage et un tamisage) et les lagunes. La figure 17 illustre ce procédé.

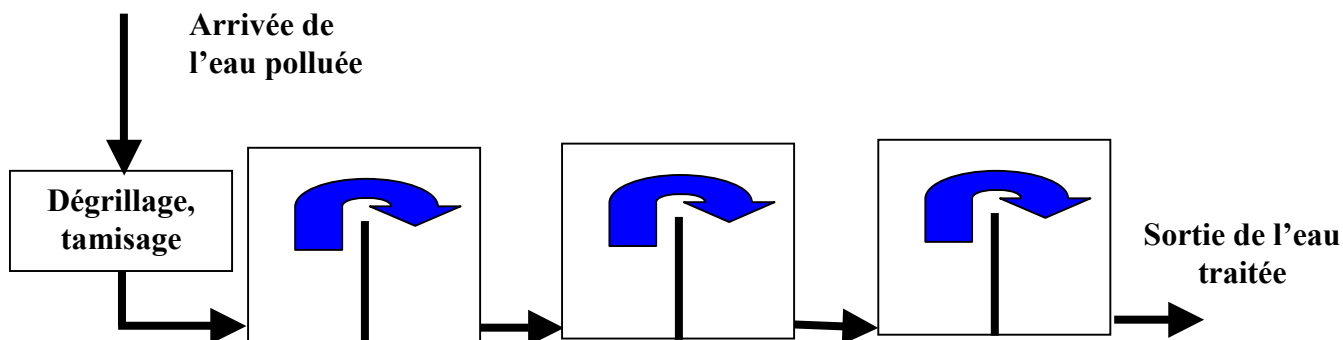


Figure 17 : Schéma de principe du lagunage aérobie (vues de dessus)

L'eau usée passe dans différents bassins successifs de faible profondeur (1,2 à 1,5 m). Ils peuvent avoir différentes formes pour améliorer l'hydraulique du système (haricot, allongée...). Un cheminement en chicane évite les courts circuits hydrauliques. Le passage d'un bassin à l'autre se fait par gravité. C'est un système qui utilise beaucoup de surface et qui est donc appliqué en zone rurale. Elle est de 10 m² par habitant et le temps de séjour de l'effluent est de 50 à 60 jours.

Les matières en suspensions de l'eau usée et la biomasse microbienne formée se déposent dans les lagunes. Un écosystème complexe va transformer tout cela.

Elles sont en partie décomposées et minéralisées par d'autres micro-organismes, la faune et la flore présentes (protozoaires, algues microscopiques, végétaux macrophytes...). Les lagunes nécessitent donc un curage après quelques années de fonctionnement.

Afin de diminuer cette surface on peut mettre des aérateurs de surfaces (des turbines de surfaces) qui vont augmenter le transfert d'oxygène de l'air vers l'eau.

5.3.3.4. Les filtres plantés de roseaux

C'est un concept de station de type extensif. Le principe consiste à faire passer les eaux usées à travers un massif granulaire planté de végétaux (des macrophytes généralement comme typha,). Les racines des végétaux permettent une bonne circulation des fluides et ils supportent comme le massif granulaire, les microorganismes épurateurs. Des cycles d'alimentation suivis de cycles de repos permettent la minéralisation de la matière organique entrante. Deux stratégies sont appliquées : les flux verticaux figure 18 et les flux horizontaux figure 19.

Dans les flux verticaux, l'effluent est apporté par banchées qui couvrent toute la surface et descendent dans le massif filtrant. En passant, il entraîne un renouvellement de l'air dans le massif et entraîne donc un apport d'oxygène qui permettra les réactions de nitrifications qui conduiront ensuite à la dénitrification. Les cycles d'alimentation permettent l'élimination de la pollution organique et les cycles de repos permettent la minéralisation de la biomasse formée précédemment.

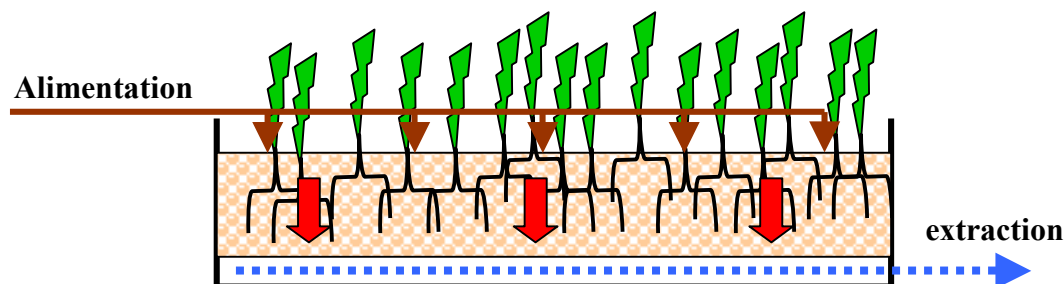


Figure 18 : Schéma du filtre planté de roseaux à flux vertical

Dans la stratégie du flux horizontal, on met en œuvre une circulation horizontale de l'effluent prétraité qui reste en dessous du niveau du lit granulaire. Pendant son passage à travers le massif l'eau est traitée. Comme précédemment, les cycles d'alimentation permettent l'élimination de la pollution organique et cycles de repos permettent la minéralisation de la biomasse formée auparavant.

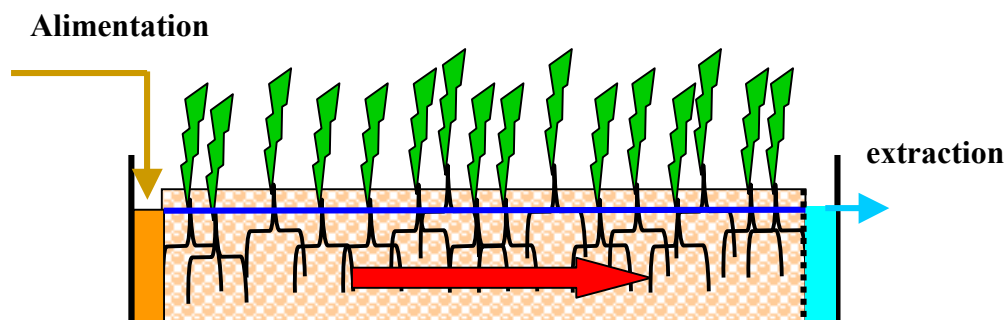


Figure : 19 : Schéma de principe du filtre planté de roseaux à flux horizontal

Ces techniques d'épuration demandent la duplication des bassins afin de recevoir l'eau usée qui arrive en continu. Une fois par an, les roseaux sont coupés et repoussent au printemps. Ce sont des technologies extensives qui s'intègrent merveilleusement bien dans le paysage car on ne voit que la masse verte des végétaux.

5.3.3.5. Les stations qui traitent le carbone, l'azote et le phosphore

La législation a imposé un traitement de l'azote et du phosphore en plus du traitement du carbone pour les grosses stations d'épuration. C'est à dire que l'on doit réduire de manière importante les concentrations de ces deux éléments dans les rejets en lieu naturels.

Pour cela on a mis en place des stations d'épuration qui combinent le traitement du carbone, de l'azote et du phosphore. Le schéma de telle station est représenté sur la figure 20.

Dans ces stations, on intègre des traitements anaérobies et aérobies pour satisfaire les conditions d'élimination de ces trois éléments. Comme dans les stations d'épuration classiques on n'a pas assez de matière organique disponible pour la dénitrification et la déphosphatation biologique, les stations nouvelles n'ont pas de décanteur primaire afin de récupérer un maximum de matière organique.

Dans le bassin anaérobie on a un traitement partiel de la matière organique entrante qui va jusqu'à la formation de matière organique facilement utilisable par les microorganismes. Elle provient soit des eaux usées soit des boues qui sont recyclées.

Dans le bassin anoxique, les nitrates issus du bassin aérobie (via la "liqueur mixte") sont transformés en azote gazeux qui s'échappe et les bactéries déphosphatantes accumulent des réserves de substrat.

Dans le bassin aérobie, les microorganismes consomment la matière organique soluble, les bactéries nitrifiantes oxydent l'ammoniaque en nitrate, et les bactéries déphosphatantes accumulent les phosphates sous forme de granule de polyphosphate.

Dans le bassin anoxique, les nitrates issus du bassin aérobie (via la "liqueur mixte") sont transformés en azote gazeux qui s'échappe et les bactéries déphosphatantes accumulent des réserves de substrat.

Dans le bassin anaérobie, les microorganismes consomment la matière organique soluble, les bactéries nitrifiantes oxydent l'ammoniaque en nitrate, et les bactéries déphosphatantes accumulent les phosphates sous forme de granule de polyphosphate.

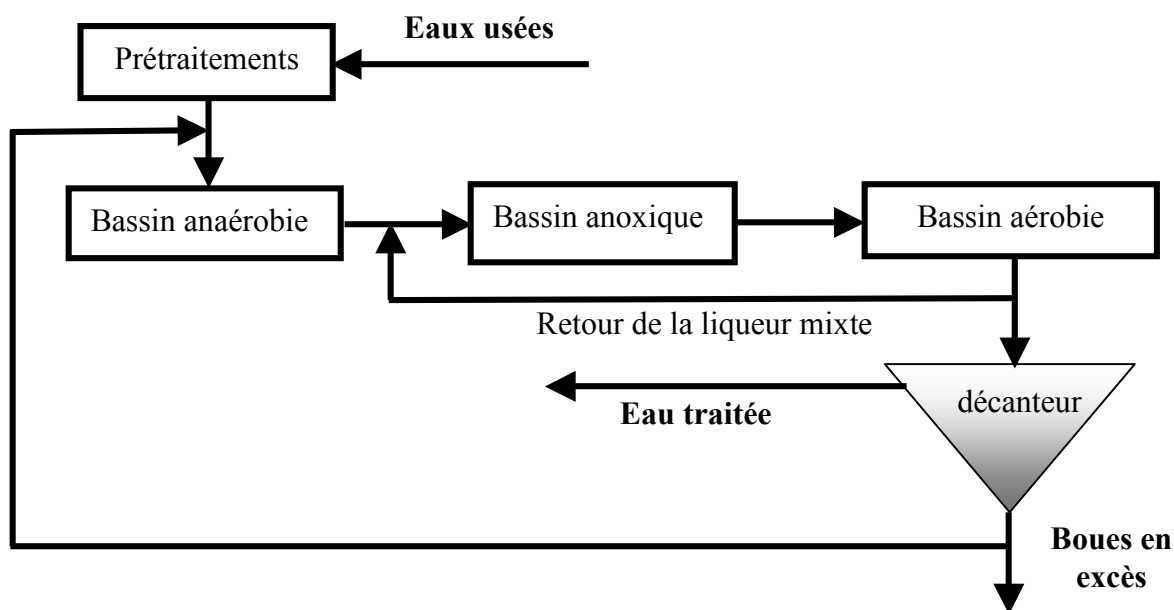


Figure 20 : Organisation d'une station d'épuration traitant biologiquement le carbone, l'azote et le phosphore.

Une partie du mélange du bassin aérobie est recyclé dans le bassin anoxique, l'autre va en décantation. L'élimination des boues chargées en granules de polyphosphates permet l'épuration du phosphore.

Si cette stratégie permet une bonne élimination de l'azote, les normes de rejet du phosphore (1 à 2 mg/l dans les eaux traitées) n'est obtainable uniquement par voie biologique. C'est pourquoi on ajoute un traitement physico-chimique de l'eau par addition d'une molécule qui va le précipiter. Cela se fait en post-traitement ou dans le bassin aérobie.

Nota : On commence à faire une distinction entre "l'anaérobie" et "l'anoxie". Ce sont toutes les deux des mises en œuvre en absence d'oxygène mais l'anoxie se fait à des potentiels d'oxydo-réduction négatifs mais élevés (0 à -150 mV), alors que "l'anaérobie" est caractérisée par des potentiels d'oxydo-réductions encore plus bas -200 à -450 mV par exemple).

Descriptif détaillé du fonctionnement des step urbaines modernes

Le fait que d'utiliser la technique aérobie on a croissance de microorganismes. Pour se structurer ces microorganismes utilisent de l'azote et du phosphore (en plus du carbone) qui sont présents dans l'eau usée à traiter.

Sur les structures classiques des importantes stations d'épuration en fin de traitement il reste de l'azote et du phosphore qu'il faut éliminer car le carbone biodisponible est l'élément limitant à la croissance.

Dans les stations d'épurations urbaines modernes, on utilise la capacité des microorganismes à transformer l'azote présent sous différentes formes (azote pris dans des molécules organiques, ammoniac, nitrate, nitrite...) en azote gazeux (N_2). Ces microorganismes ont la capacité aussi de concentrer le phosphore sous forme de granule de polyphosphate sous certaines conditions de mise en œuvre. Voyons comme quels sont les étapes nécessaires pour réaliser ces opérations.

Traitement de l'azote

Plusieurs étapes très différentes sont nécessaires. Elles sont représentées sur la figure 1a.

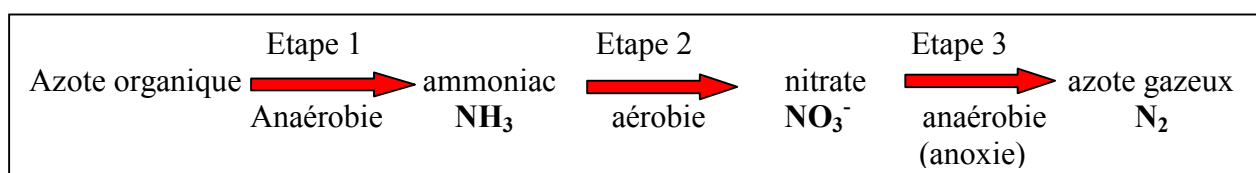


Figure 1a : différentes étapes de transformation de l'azote sous forme organique en azote gazeux.

La première étape est l'ammonification de l'azote organique. Elle est réalisée par les microorganismes principalement sous des conditions très larges (absence ou présence d'oxygène.) En absence d'oxygène la transformation s'arrête à l'ammoniac, en présence d'oxygène elle continue jusqu'au nitrate.

La seconde étape est la nitrification. Elle est réalisée en aérobiose par des bactéries nitrifiantes qui vont oxyder l'ammoniac en nitrite (NO_2^-), puis en nitrate (NO_3^-). C'est une réaction qui se passe donc en présence d'oxygène par des bactéries autotrophes (qui ne consomment que de la matière minérale). La présence de matière organique ici empêche cette réaction de se faire correctement.

La troisième étape est la dénitrification.. Les différentes étapes sont représentées dans la figure 2a.

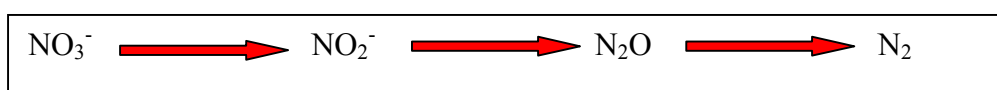


Figure 2a : Différentes étapes de la dénitrification

Ces réactions sont réalisées en absence d'oxygène. On dit aussi qu'elles se font en "anoxie". Elle nécessite une source de carbone organique car elle est réalisée par des bactéries hétérotrophes.

Donc le problème de la dénitrification biologique est que pour faire la seconde étape de nitrification, il faut enlever la matière organique présente dans l'effluent et que pour faire la troisième étape de dénitrification, il faut de la matière organique. Nous verrons après comment a été traité ce problème dans les nouvelles stations d'épurations.

Nota : On commence à faire une distinction entre "l'anaérobie" et "l'anoxie". Ce sont toutes les deux des mises en œuvre en absence d'oxygène mais l'anoxie se fait à des potentiels d'oxydo-réduction négatifs mais élevés (0 à -150 mV), alors que "l'anaérobie" est caractérisée par des potentiels d'oxydo-réductions encore plus bas -200 à -450 mV par exemple).

Le traitement biologique du phosphore

Contrairement à l'azote, le phosphore n'est pas biologiquement transformable sous une forme gazeuse.

On l'élimine facilement en précipitant les ions phosphate avec des minéraux (chlorure de fer par exemple) mais ce qui coûte le moins cher reste encore son élimination par la voie biologique. Par cette voie, on le concentre sous forme de granules de polyphosphate à l'intérieur des microorganismes et on élimine les microorganismes!

Pour cela il faut appliquer une stratégie qui est une succession de passage des microorganismes en anoxie (absence d'oxygène) et en aérobie. Le schéma de principe est représenté sur la figure 3a.

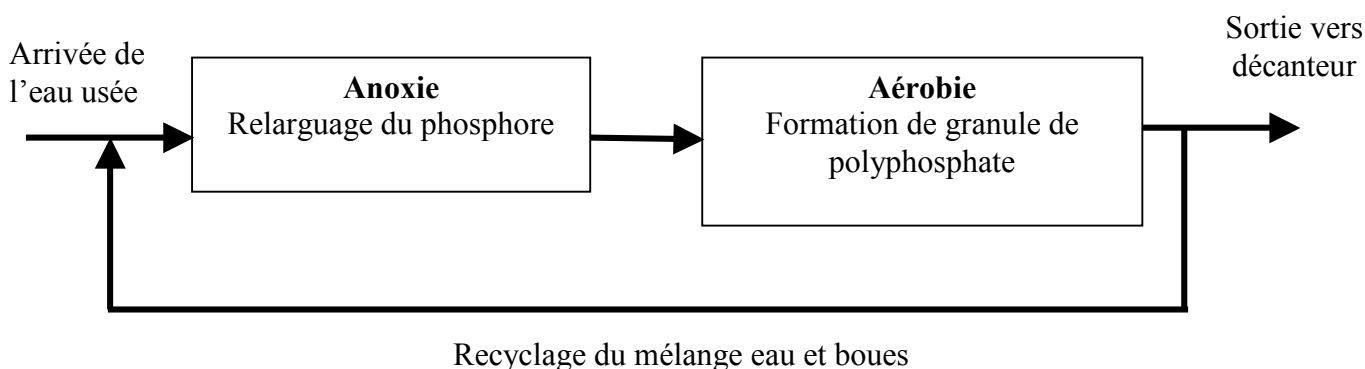


Figure 3a : Stratégie d'élimination du phosphore par voie biologique

Comment ça marche?

Le phosphore à éliminer se trouve sous forme de phosphate dans l'eau usée. Dans la phase d'anoxie, les microorganismes accumulent le substrat organique pour en faire des réserves et libèrent le phosphate qu'ils ont de présent sous forme de granule de

polyphosphate. Dans la phase aérobie, ils utilisent leur réserves de substrat pour accumuler les phosphate (sous forme de granule de polyphosphate) qui sont dans l'eau. Comme ils en accumulent plus que ce qu'ils en libèrent, la quantité de phosphate présentes diminuent.

Une partie des microorganismes chargés en phosphore (sous forme de granule interne de polyphosphate) sont éliminés après décantation. Une autre partie recommence le cycle.

Organisation des stations d'épuration traitant biologiquement le carbone, l'azote et le phosphore.

Le schéma de telle station est représenté sur la figure 4a.

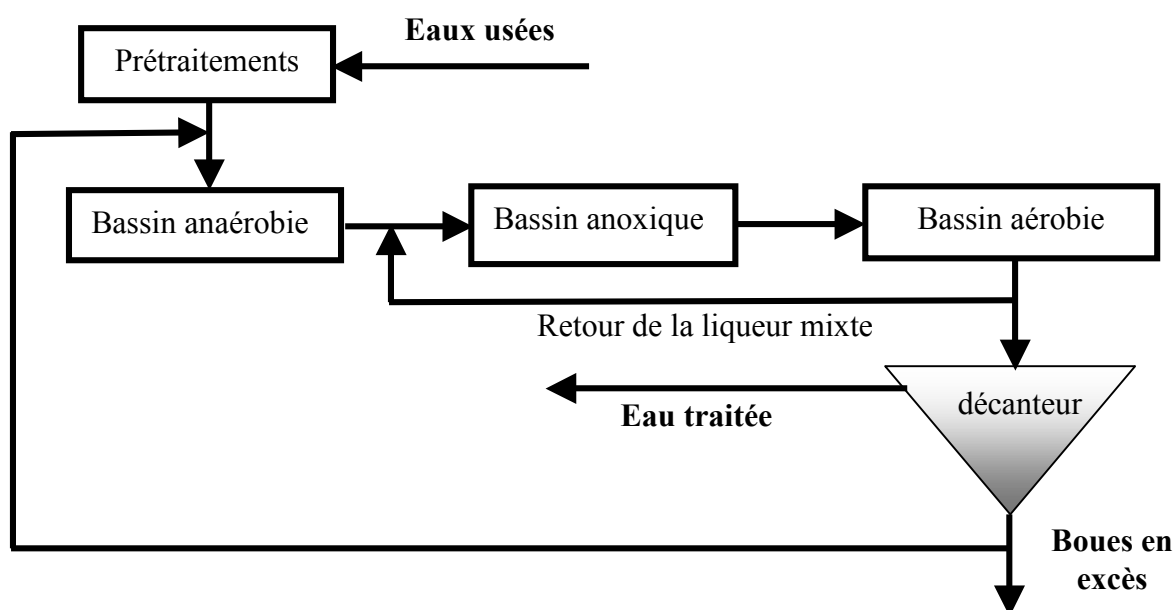


Figure 4a: Organisation d'une station d'épuration traitant biologiquement le carbone, l'azote et le phosphore.

Nous avons vu que dans les structures des stations d'épuration urbaines classiques, la quantité de carbone disponible dans le bassin aéré était insuffisante (et donc limitante) pour éliminer sous forme de biomasse, tout l'azote et le phosphore présent dans les eaux usées. Pour récupérer le maximum de matière carbonée qui arrive à la station d'épuration, on a commencé par supprimer la décantation primaire et mettre un bassin anaérobie en tête. Dans ce bassin, les particules organiques (qui n'ont donc pas été éliminées car il n'y a plus de décanteur primaire) subissent une hydrolyse et sont transformées en Acide Gras Volatile. C'est uniquement la première étape phase d'hydrolyse et d'acidogénèse du flux matière anaérobie de la figure 7.9 qui est réalisé. De plus, ce bassin recevant des boues les transforme en matière organique soluble supplémentaire. Il transforme l'azote organique en ammoniacque et les différentes formes du phosphore en phosphate.

Dans le bassin anoxique on a l'arrivée de l'eau usée du bassin anaérobie contenant la matière organique facilement utilisable par les micro-organismes ainsi que la liqueur

mixte qui contient des boues chargé de granule de polyphosphate et de l'eau avec l'azote sous forme de nitrate.

Dans le bassin d'anoxie les micro-organismes dénitrifiants vont transformer le nitrate en azote gazeux et les microorganismes déphosphatants vont accumuler des réserves et relarguer le phosphate dans le milieu.

Dans le bassin aérobie, les micro-organismes vont consommer la matière organique disponible résiduelle, oxyder l'ammoniaque en nitrate et les bactéries déphosphatantes vont utiliser leur réserves pour accumuler les granules de polyphosphates. Une partie de ce mélange (liqueur mixte) retourne dans le bassin anoxique l'autre va dans le décanteur.

Les boues produites dans le décanteur vont dans le bassin anaérobie pour être hydrolysée et servir de source de carbone. Le reste est éliminée avec les microorganismes qui contiennent les granules de polyphosphates.

5.4. Les techniques d'épuration anaérobies

5.4.1. Schéma de principe des stations anaérobies

Dans nos latitudes, la méthanisation (ou encore la digestion anaérobie) est appliquée aux effluents industriels uniquement car leurs concentrations en DCO sont bien plus élevées que celles des effluents urbains. Elles sont supérieures à 2 g/l (jusqu'à 50- 100 g/l) alors que les effluents urbains ont une DCO qui est inférieure à 1 g/l.

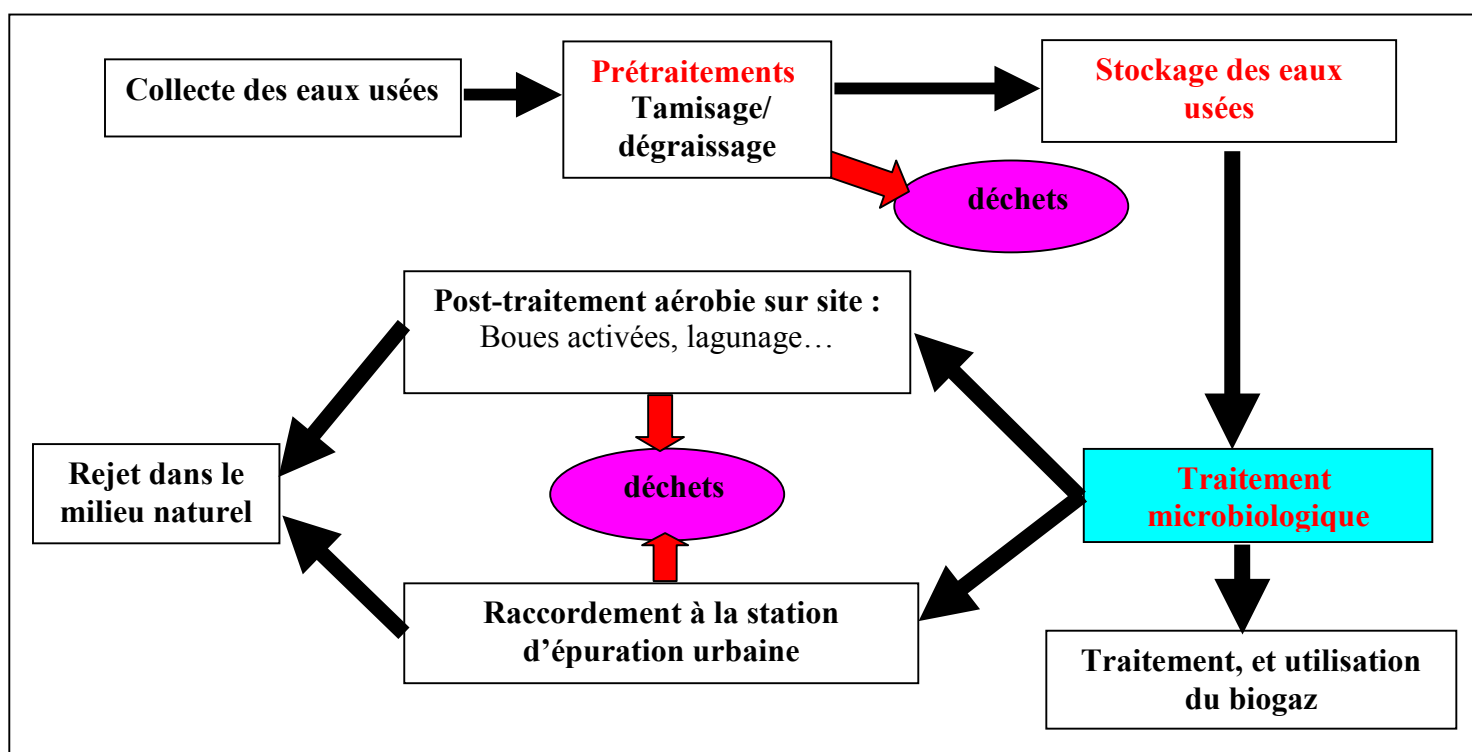


Figure 21. Schéma de principe d'une station d'épuration utilisant la méthanisation.

La méthanisation se réalise à des températures plus élevées que celle de l'aérobiose. C'est 35-40 °C lorsqu'elles sont conduites en mésophilie. C'est 55 °C en thermophilie.

Les stations d'épurations qui mettent en œuvre des procédés de méthanisation sont légèrement différentes des stations aérobies car ces sont avant tout des stations qui traitent que des effluents industriels. Le schéma de la filière est représenté sur la figure 21.

Les eaux usées arrivent avec des débits et des concentrations en pollution variables dans la journée. Elles subissent un tamisage poussé (et un dégraissage aussi en cas de besoins). L'eau a peu de particule en suspension et va être stockée. Ce stockage intermédiaire va permettre de réguler les débits et les concentrations de pollution qui vont au traitement anaérobie. A partir de ce stockage, on alimente le réacteur anaérobie (le digesteur) qui va transformer la pollution organique en biogaz et faire très peu de boues (les micro-organismes). Bien sûr pour éviter toute entrée d'oxygène ces cultures microbiennes se font dans des systèmes fermés

5.4.2. La production d'énergie à partir du biogaz.

La production de biogaz est un plus mais ce n'est pas le facteur déterminant pour choisir la méthanisation.

La figure 22 nous donne les équivalences énergétiques de 1 m³ de méthane.

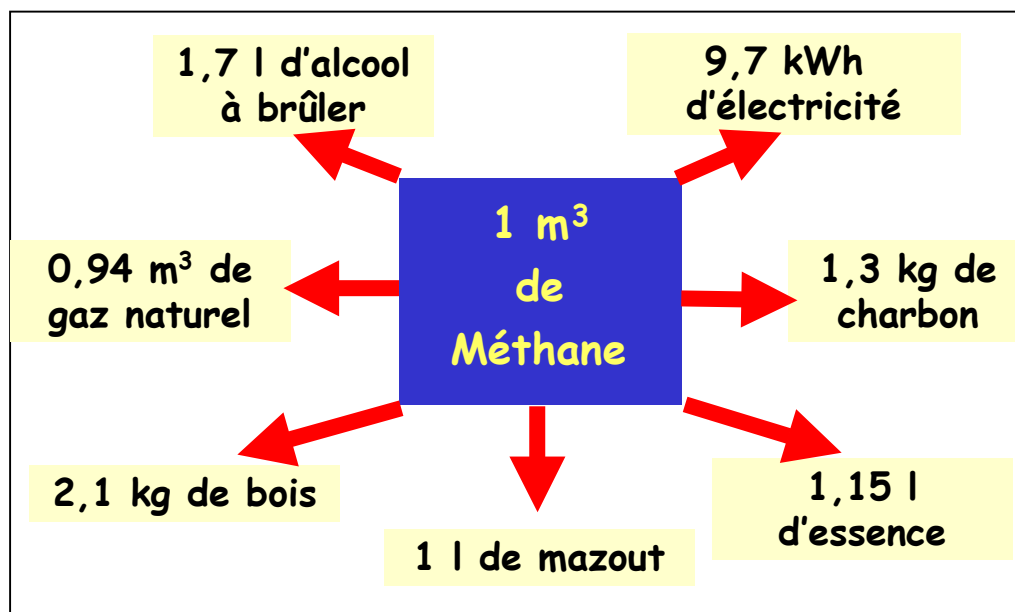


Figure 22 : Equivalence énergétique de 1 m³ de méthane

Théoriquement on produit 760 litres de biogaz à 50 % de méthane et 50 % de gaz carbonique par kg de DCO éliminée (mesuré à 25 °C et à 1 Atm).

Pratiquement on en produit moins car une partie du CO₂ reste dans le liquide sous différentes formes (ions carbonates, CO₂ dissous...). On a environ 500 à 600 litres d'un biogaz qui est composé d'environ 60 % de méthane et de 40% de gaz carbonique.

Ceci est très intéressant pour les usines qui ont ce système d'épuration car, quand elles fonctionnent, elles ont besoin de vapeur (surtout les industries agro-alimentaires). Le biogaz qu'elles produisent peut être utilisé dans des chaudières pour faire de la vapeur qui est réutilisée dans l'usine. Cela représente une économie de 10 à 40 % de la facture énergétique de l'usine.

5.4.3. Les technologies du traitement microbiologique anaérobie.

5.4.3.1. Le «contact anaérobie»

C'est la transposition en anaérobiose des »boues activées«. Il est représenté sur la figure 23.

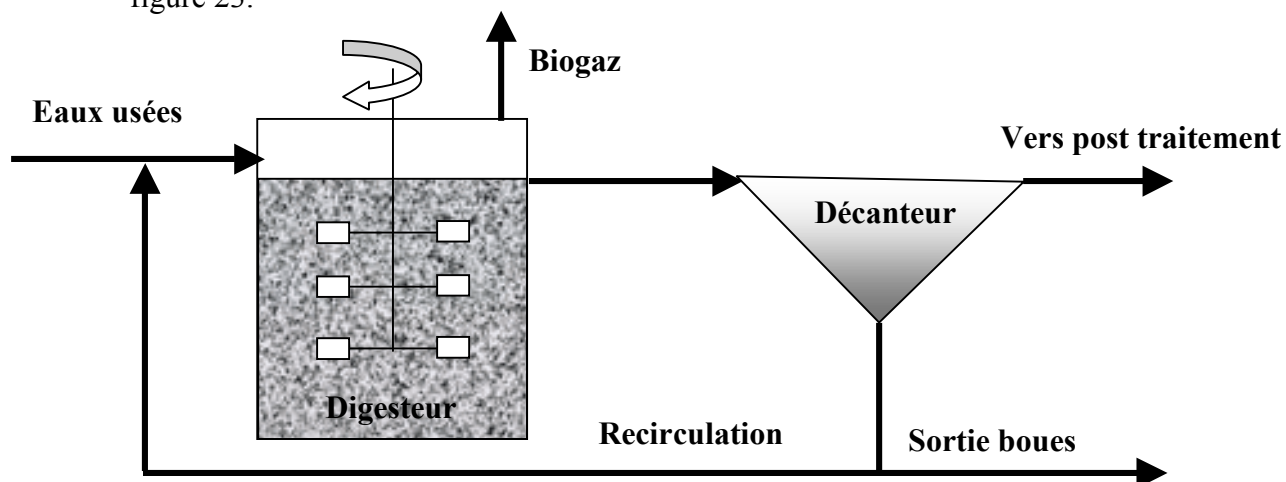


Figure 23: Schéma de principe d'un digesteur contact anaérobie

C'est un système qui est à micro-organismes libres (qui se trouvent sous formes de floes) et qui est mélangé soit mécaniquement par des pales, soit par recirculation du biogaz via des compresseurs et des cannes qui l'envoient au fond. Le mélange est envoyé dans un décanteur et les boues (les micro-organismes anaérobies) sont recirculés dans le digesteur. C'est une technique appliquée pour les effluents qui ont des matières en suspensions que l'on veut éliminer.

5.4.3.2. Le filtre anaérobie

C'est un digesteur qui fonctionne sur le principe de la rétention des micro-organismes par la mise en place naturellement d'un biofilm qui se crée sur un support fixe (le garnissage) dans le digesteur. Le flux d'eau usée passe à travers ce garnissage avec un flux qui peut être ascendant (figure 24) ou descendant. (Figure 25).

Pour le lit fixe à flux ascendant (figure 24), l'effluent arrive en bas du digesteur. Il est distribué de manière homogène sur toute la section. Ce flux passe à travers le garnissage et la pollution organique va dans le biofilm puis dans les micro-organismes qui rejettent du biogaz.

Dans ce cas de figure, le biofilm met beaucoup plus de temps pour se renouveler car les microorganismes poussent très lentement. Le recyclage permanent par une pompe (qui se mélange à l'alimentation), permet d'avoir un bon mélange de l'effluent dans la masse liquide du digesteur.

Pour le système à flux descendant (figure 25), le principe est le même mais le flux liquide va du haut vers le bas.

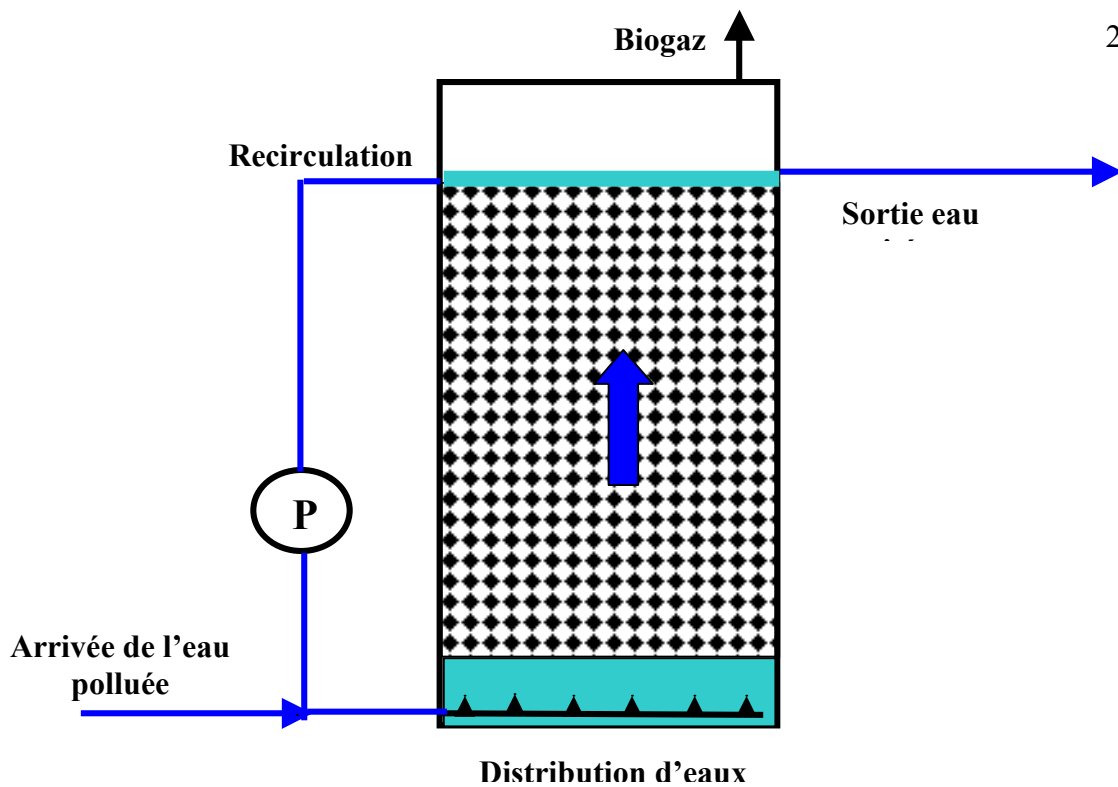


Figure 24 : Schéma de principe du filtre anaérobie à flux ascendant.

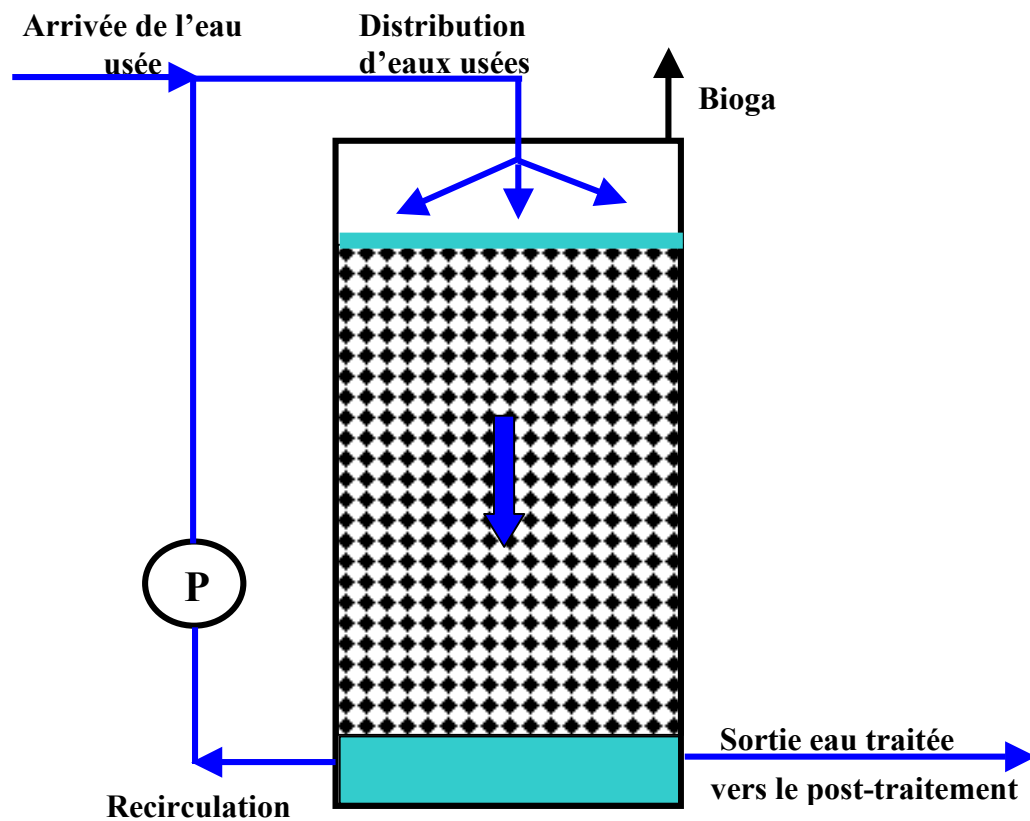


Figure 25 : Schéma de principe du filtre anaérobie à flux descendant.

5.4.3.3. UASB : Upflow anaerobic sludge blanket

Cela veut dire «lit de boues à flux ascendant ». Il est représenté sur la figure 26. Les micro-organismes forment un lit de boues composé de granules qui se créait spontanément en bas du digesteur. Ces granules sont des sphères de quelques millimètres de diamètre, composées de micro-organismes liés les uns aux autres pour former un biofilm. Ils sont mis en suspension par la distribution des eaux usées à traiter (et parfois aussi aidée par un recyclage des eaux).

Ce digesteur comporte en bas un lit de boues granulaire qui transforme la matière organique en biogaz. Ce biogaz est piégé par un collecteur qui n'est autre qu'un entonnoir renversé. L'autre côté de l'entonnoir sert de décanteur (car il n'y a plus de bulles de biogaz) ce qui permet de récupérer des granules ou des boues qui auraient quitté le lit de boues. Ce système est très répandu dans le monde puisqu'on compte que 70 % des digesteurs sont des UASB.

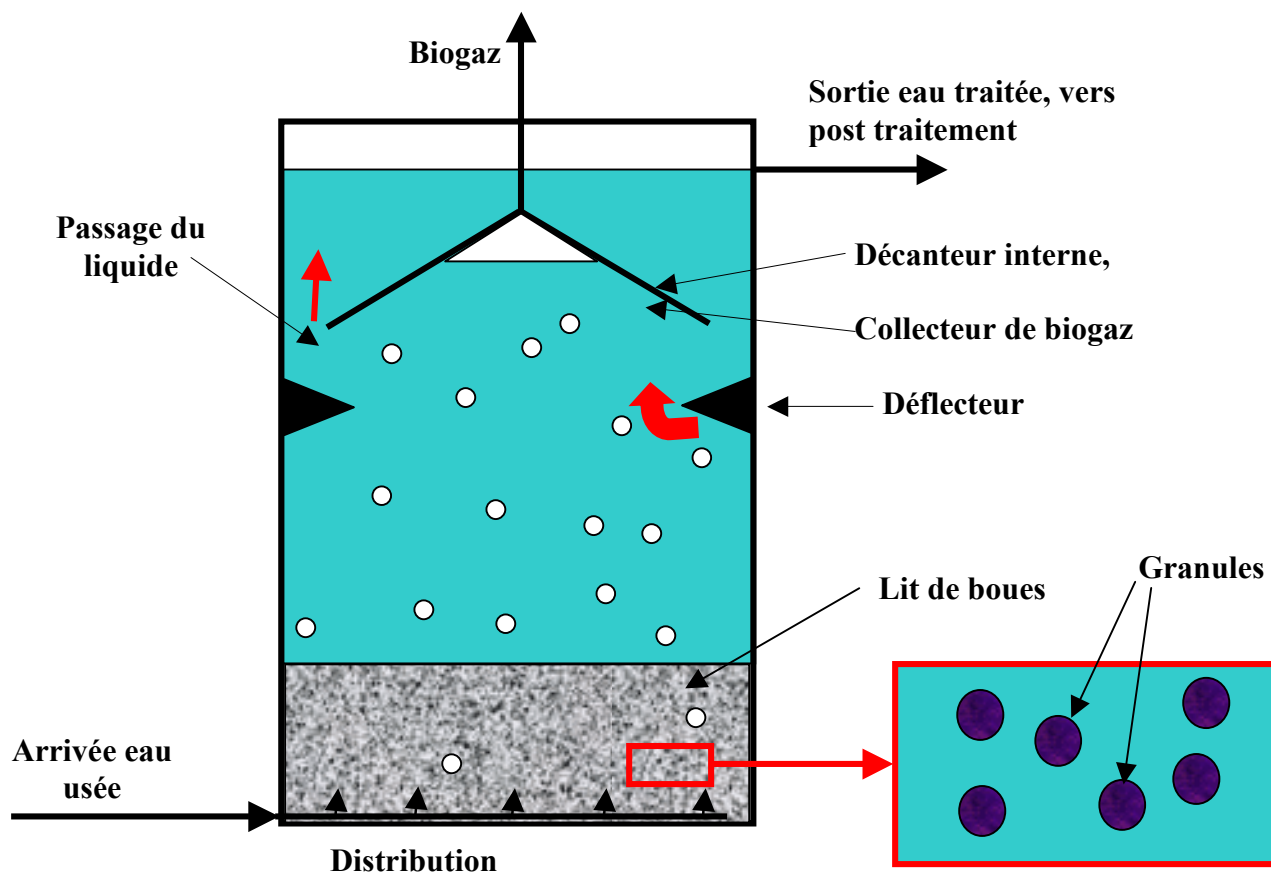


Figure 26. Schéma de principe d'un UASB (lit de boues à flux ascendant).

5.4.3.4. Le lit fluidisé

Le principe de cette technologie est de mettre en suspension (en fluidisation) des supports particuliers sur lesquels se sont formés des biofilms. Ce support ayant une densité élevée, une recirculation de liquide permet de le maintenir en fluidisation. Le schéma de principe est représenté sur la figure 27.

L'effluent à traiter arrive vers le bas du digesteur. Il est mélangé à la recirculation de l'effluent. Le flux ascendant fluidise les particules qui servent de support à un biofilm. Le biogaz formé est collecté et évacué. Le liquide traité va vers un post traitement

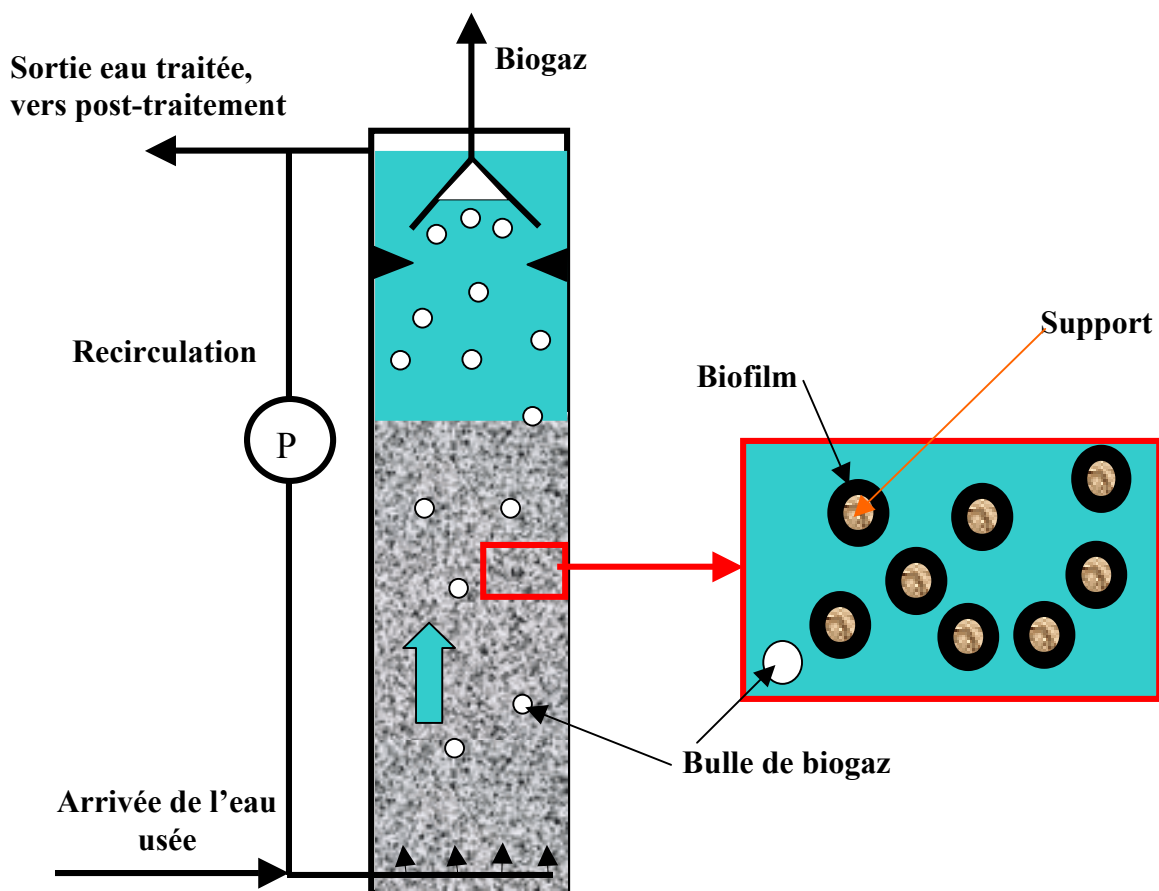


Figure 27 : Schéma d'un lit fluidisé fonctionnant en anaérobiose.

5.4.3.5. Les digesteurs à membranes

Le principe réside sur la séparation des matières solides (boues anaérobies) de la partie liquide par une membrane le plus souvent de micro-filtration. L'avantage de cette technique est que l'effluent est exempt de microorganismes et donc de microorganisme pathogènes ce qui facilite la réutilisation de l'eau à des fins d'irrigation par exemple.

Cette technique met en œuvre un digesteur (mélangé ou filtre anaérobie) couplé à un système membranaire qui peut être externe ou interne au digesteur. Il est représenté sur la figure 28.

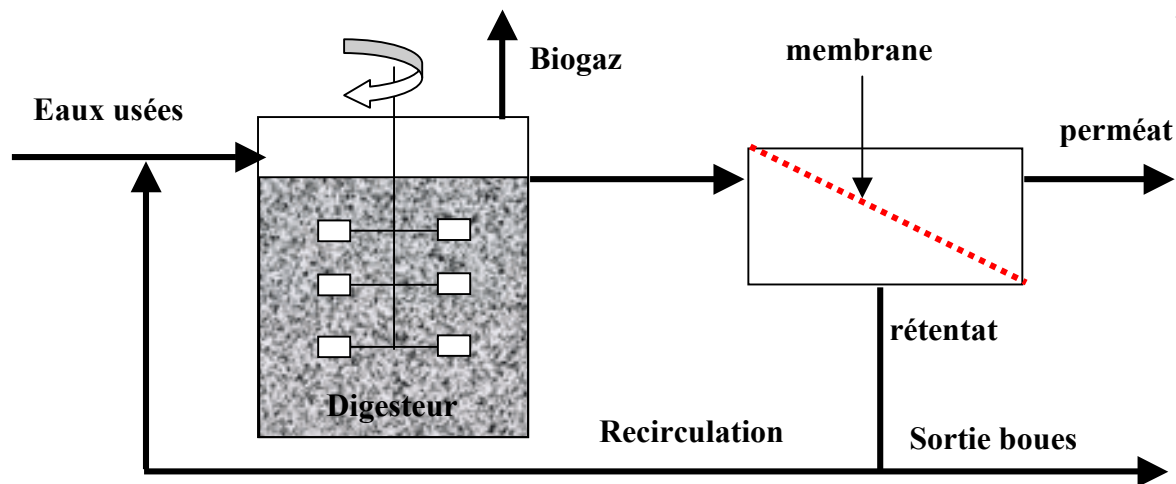


Figure 28 : digesteur couplé à une membrane

5.4.4. Les performances d'épuration des procédés de méthanisation

Les digesteurs traitent des effluents avec des rendements d'épuration de 90 à 98 % sur la DCO, avec des charges organiques appliquées de 1 à 40 kg de DCO par m³ de réacteur et par jour, (ce qui est 10 fois supérieur à l'aérobiose). La production de boues (micro-organismes anaérobies) est de 50 grammes (exprimé en matière sèche) par kg de DCO éliminée. C'est 4 à 50 fois inférieur à l'aérobiose. Ceci est dû au fait que la pollution va sous forme de biogaz et pas de boues. Le problème actuel du devenir des boues explique l'engouement actuel pour ce type de transformation biologique.

Si une eau usée rentre à 20 g/l de DCO totale et si elle est épurée à 95 %, elle sort à 1 g/l de DCO après le digesteur. Cette valeur est encore trop élevée pour être rejetée dans le milieu naturel. (C'est généralement 300 mg/l de DCO totale). Donc il faut faire un post traitement souvent aérobique pour descendre au-dessous de 300 mg/l de DCO.

Cette stratégie de mettre deux systèmes permet (traitements anaérobies puis aérobique) présente de nombreux avantages pour traiter les effluents industriels car pour la partie méthanisation on élimine une grosse quantité de pollution avec peu de boues formées et on produit de l'énergie, le biogaz, qui va servir pour réchauffer le digesteur et de source d'énergie dans l'usine.

Pour le post traitement aérobique la quantité de DCO résiduelle à traiter sera très faible et donc consommera peu d'énergie (pour l'aération) et donnera peu de boues.

Les volumes de réacteur biologique sont nettement plus petits avec cette stratégie que si tout était en aérobiose.

5.5. Le traitement des boues.

Les stations d'épuration urbaines ou industrielles ont des déchets qui sont : les refus issus du dégrillage et de tamisage, les graisses, les sables issus du dessablage-dégraissage, et les boues de décantation.

Les sables et les refus de dégrillage vont généralement en décharges, les graisses sont incinérées ou transformées sur place en micro-organismes (des boues) par des réacteurs biologiques spéciaux, et les boues subissent des traitements séchages, hygiénisation divers en fonction de leurs destinations.

Les boues issues des stations physico-chimiques sont très minéralisées (à cause des additifs). Par contre celles qui sont issues des stations à boues activées urbaines ont des teneurs en

matières organiques plus bien plus élevées. On s'intéressera principalement à ces dernières ci dessous.

5.5.1. Composition des boues

La composition et la quantité de ces boues vont dépendre de leurs origines : urbaines ou industrielles, issues de stations biologiques ou physico-chimiques, de la nature de l'industrie qui produit l'eau usée. Leurs compositions sont donc extrêmement variable en fonction du site ou elles sont produites.

En sortie des décanteurs elles sont aux alentours à 10-15 g/litre en matière sèche. Les tableaux 1 et 2 donnent des exemples de composition de boues urbaines et de boues obtenues lors du traitement d'effluents vinicoles.

	Matières organiques	Azote N	Phosphore P	Potassium K	Calcium Ca
Teneur en % de la matière sèche	60-80	3,5-4,5	2-2,5	0,2-0,3	5-15

Tableau 1 : Composition des boues urbaines obtenues par le mélange des boues des décanteurs primaires et secondaires de stations d'épurations à boues activées. (Elle est exprimée sur une base de la matière sèche.

	Matière organique	azote total Nt	Phosphore P	Potassium K	Magnésium Mg
Teneur en % de la matière sèche	57,8	4,9	3,07	1,81	0,011

Tableau 2 : Composition des boues issues du traitement des effluents vinicoles par le procédé des boues activées (exprimé sur la base de la matière sèche)

L'analyse des ces boues montre qu'elles possèdent un grand nombre d'éléments très intéressants pour l'agriculture comme la matière organique (nécessaire aux sols) l'azote, le phosphore, le potassium, le magnésium que l'on doit souvent apporter sous forme d'engrais chimique pour avoir une bonne récolte.

Les boues urbaines sont-elles dangereuses ?

On ne peut pas tout identifier ce qu'il y a dans les boues, car ce serait un travail énorme. Par contre, on sait ce qu'elles contiennent en produits indésirables identifiés par la législation.

Les produits indésirables qui peuvent être trouvés dans les boues d'origines urbaines sont principalement des micro-organismes pathogènes (qui donnent des maladies aux hommes, animaux domestiques et aux plantes), des virus, des métaux lourds, et des molécules toxiques... Si ces produits sont dans les boues c'est que la plus part du temps, ils arrivent avec les eaux usées.

De sérieux efforts ont été faits pour minimiser les risques d'introduction de produits indésirables avec les eaux usées arrivant aux stations d'épuration urbaines en les récoltant à la source même. Cela s'est traduit par des stations d'épurations et des ramassages

spécifiques dans des usines (stations physico-chimiques pour piéger les métaux lourds des usines de traitement de surface qui étaient raccordées aux réseaux de collecte urbaine, récolte spécifique par des réseaux de collecte des produits dangereux...).

La qualité des boues actuelle est devenue nettement meilleure et on ne peut plus les comparer à celle qui était générée il y a une dizaine d'année.

5.5.2. Production de boues

Les traitements en stations d'épurations urbaines par boues activées donnent des quantités de boues qui sont de 40 à 60 g par habitant et par jour et ont un volume de 0,4 à 0,8 litres.

En France les stations d'épuration urbaines ont produit en 2000 environ 850 000 t par an de boues (exprimée en matière sèche) ce qui fait environ 9 millions de tonnes de boues humides. Avec l'amélioration des rendements des stations d'épuration, et l'augmentation de leur nombre, on estime qu'en 2005, c'est 1 100 000 t/an (exprimé en matière sèche) soit 11 000 000 t/an exprimé en matière humide qu'il faudra traiter.

Un important effort de recherche a été réalisé pour minimiser la quantité de boues produites. Cela passe par des couplages des traitements aérobies avec des procédés physico-chimiques (oxydation des boues par un traitement à l'ozone par exemple) ou par une utilisation plus rationnelle de la digestion anaérobie pour traiter les effluents industriels par exemple.

Lorsque la quantité de boues est importante, il faut essayer de réduire leurs volumes avant les traitements qui les préparent à leur destination finale.

La législation a largement réglementé les contraintes de rejet dans les réseaux urbains et les traitements et compositions des boues avant leurs destinations finales.

5.5.3. Traitements des boues

Les filières de traitement des boues sont très variées et dépendent de leurs compositions et de leurs destinations finales. La figure 29 représente les différentes étapes possibles de cette filière.

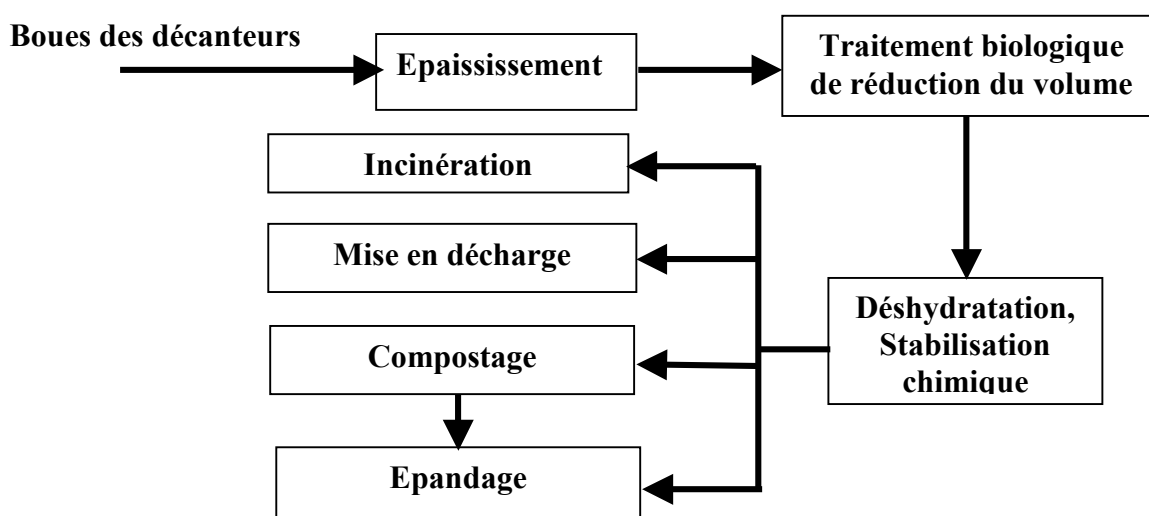


Figure 29 : Exemple des différentes étapes du traitement des boues.

5.5.3.1. La réduction de leurs volumes.

Les différentes étapes du traitement des boues mettent en œuvre des procédés physico-chimiques ou microbiologiques. Il s'agit ici d'appliquer des techniques de traitement des déchets solides.

- L'«épaississement». C'est la première étape qui consiste à éliminer une partie de l'eau en utilisant des techniques comme la décantation, la flottation, la centrifugation, soit le drainage qui consiste à passer un espèce de "grand peigne tournant" pour permettre à l'eau de descendre plus facilement. Il permet d'obtenir des boues qui ont jusqu'à 5% de matière sèche.
- La réduction du volume par traitement biologique se fait en aérobiose parfois, mais la voie la plus intéressante est l'anaérobiose c'est à dire la méthanisation des boues.

Ce traitement consiste à mettre les boues dans des réacteurs anaérobies, les digesteurs qui vont transformer une partie des boues anaérobies en méthane et gaz carbonique (le biogaz). Ces digesteurs sont chauffés à 35 ou 55°C et éliminent 40 à 50 % de la masse des boues. Ils produisent environ 350 m³ de méthane par tonne de matière organique éliminée sous forme d'un biogaz à 65-70 % de méthane et le reste en gaz carbonique.

La digestion anaérobie des boues permet l'élimination de bactéries pathogènes et de virus. En France en 2002, c'est la production de boues urbaines équivalente à 20 millions d'habitants qui sont traités de cette manière. Cela conduit à un taux d'élimination de 14 % du total des boues urbaines produites.

5.5.3.2. Déshydratation et stabilisation chimique

La déshydratation a pour but pour d'amener les boues aux teneurs en matière sèche désirée pour les traitements ultérieurs. Elle est réalisée par des procédés mécaniques de filtration (par filtres à bande ou filtres presses) ou de centrifugation et/ou thermiques via des fours. Leurs teneurs en matière sèche peuvent atteindre 70 à 80 % en fonction de leurs destinations finales.

Une boue qui est à 50% de matière sèche a perdu 90% de son volume.

Le mélange des boues avec des produits stabilisants empêche les fermentations et détruit des micro-organismes pathogènes. Pour cela on mélange les boues avec de la chaux par exemple.

Dans les petites stations d'épuration du secteur rural on utilise d'autre technique de déshydratation. Dans les zones très ensoleillées, on épand les boues sur des surfaces de sable et de graviers ou elles vont sécher et au soleil.

On peut aussi accumuler des boues dans un bassin et y mettre des plantes adaptées. Pendant plusieurs années les racines des plantes vont et l'eau drainée l'eau vers le fond et les feuilles vont éliminer de l'eau grâce à l'évapotranspiration.

Les eaux récoltées dans les deux cas retournent à la station d'épuration.

5.5.3.3. L'incinération

Les boues déshydratées sont brûlées dans des incinérateurs, seules avec d'autres combustibles. Il existe de nombreuses technologies de combustion des déchets et donc des boues.

L'incinération des boues génère des cendres de 5 à 6% de la matière sèche entrante et les normes de rejets gazeuses sont très réglementées (poussières, métaux, composés organiques volatiles...)

Cette voie élimine environ 12 % des boues urbaines produites en France.

5.5.3.4. La mise en décharge

Les décharges ou encore « Centres d'Enfouissement Techniques » (C.E.T.) sont des sites où l'on stocke des déchets solides. On a trois classes de décharge :

- Classe 3 : elles n'accueillent que les déchets inertes comme les gravats, les déchets du bâtiment ... donc les déchets qui ne fermentent pas, qui ne brûlent pas.
- Classe 2 : elles accueillent les déchets de types ordures ménagères ou assimilés. Donc les produits qui peuvent fermenter et évoluer avec le temps.
- Classe 1 : elles reçoivent les déchets toxiques et dangereux.

Les boues vont en classe 2 si elles ne contiennent pas de produits toxiques sinon elles vont en classe 1. La législation française va vers l'interdiction de la mise en C.E.T. des produits fermentescibles et donc des boues dans les décharges.

Le stockage des déchets en C.E.T. de classe 2 se fait par « casiers » qui sont d'immenses bacs de plusieurs milliers de m³. Quand un casier est plein on en remplit un autre !

Les C.E.T. génèrent des liquides issus des déchets eux-mêmes et des précipitations pluie, neige que l'on nomme les lixiviats. Ces lixiviats sont potentiellement très polluants. C'est pourquoi les C.E.T. sont réalisés dans des sols étanches ou rendus étanches par des géotextiles afin de les récupérer pour les traiter.

Dans ces C.E.T. une méthanisation s'installe naturellement et leurs durées de vie est de 20 à 30 ans. Le recyclage des lixiviats dans la masse de déchets permet d'abaisser la durée de vie d'une décharge à 6-8 ans car on accélère la méthanisation.

Quand les casiers sont pleins, on les couvre pour les rendre étanches, on récupère le biogaz (méthane et gaz carbonique) et on remet une couche de terre pour le revégétaliser en mettant de l'herbe, des arbustes.

En France, c'est 21% des boues de stations d'épurations urbaines qui sont mises en décharges. Ceci est théoriquement interdit depuis 2002.

5.5.3.5. Le Compostage

Le compostage est une technique de fermentation aérobie de déchets solides. Elle peut se faire en réalisant des tas (des « andins ») qui aérés par injection d'air par le sol et mélangés par retournement de temps à autres cela nécessite plusieurs mois. Il existe aussi des composteurs qui sont de grands cylindres en rotation où le temps de résidence de la matière est plutôt de quelques jours.

Dans le compostage on a une consommation des molécules facilement fermentescibles et une montée naturelle en température au-dessus de 70 °C. pendant plusieurs heures à plusieurs jours en fonction des conditions de réalisation. Cette chaleur est générée par les micro-organismes eux-mêmes et constitue une hygiénisation de la matière car elle réduit de manière importante la quantité de micro-organismes pathogènes.

Ce compostage se fait à partir de boues (partiellement déshydratées) et de déchets ligneux broyés (déchets verts, palettes...) qui jouent le rôle de structurants. Ils permettent ainsi à l'oxygène d'atteindre l'intérieur de l'andin.

En fin de compostage le produit obtenu est tamisé donnant un compost de qualité qui peut être utilisé en agriculture.

Par exemple le mélange de 1700 m³ de déchets verts (soit 600 tonnes) avec 750 m³ de boues liquides (soit 750 tonnes) sont compostées pendant 3 mois. Ce mélange subit ensuite un criblage à 25 mm de diamètre et génère 600 tonnes de compost. Le refus de déchets verts repart de nouveau en compostage avec des boues nouvelles.

Cette nouvelle technique élimine actuellement 2% des boues de stations d'épurations urbaines en France et est amenée à se développer rapidement.

5.5.3.6. L'épandage

L'azote, le phosphore, le potassium le magnésium contenu dans les boues sont des éléments fertilisants pour l'agriculture. La matière organique présente est aussi d'un grand intérêt pour certains sols.

L'épandage des boues sur sol agricole est réalisé depuis très longtemps. Les manques de connaissances de la composition des boues et de leurs conditions de mise en oeuvre en épandage, leurs qualités médiocres, ont conduit à des pratiques qui ont discrédité l'intérêt de ce mode d'élimination des boues.

Une législation récente a profondément modifié les contraintes d'application de cette technique. Le décret N° 97-1133 du 8 décembre 1997 est relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées, et l'arrêté du 8 janvier 1998 fixe les prescriptions techniques applicables aux épandages des boues sur les sols agricoles. Cette législation spécifie que le producteur de boues est responsable jusqu'à l'élimination finale du produit.

L'amélioration de la qualité des boues, l'augmentation de nos connaissances dans ce domaine ont conduit à définir les conditions des bonnes pratiques de l'épandage sur les sols agricoles. Il permet de réaliser des économies importantes pour les agriculteurs en limitant l'apport d'engrais et en améliorant la teneur en matières organiques des sols.

Les boues peuvent être épandues sous forme liquide ou plus ou moins déshydratées et enfouies immédiatement ou non suivant les techniques choisies.

La réglementation impose des conditions d'épandage très strictes :

- Tout épandage est subordonné à une étude préalable
- L'épandage ne peut être pratiqué que si cela a un intérêt pour la plante
- Les boues doivent avoir une qualité attestée par des analyses complètes
- Les principes de transparence et de traçabilité doivent être respectés
- La filière d'épandage doit être détaillée
- Un suivi rigoureux doit être mis en place

Les conditions techniques de mise en œuvre sont bien définies. Comme par exemple :

- La pente doit être inférieure à 7%
- La distance minimale des habitations est de 100 m ou 20 m s'il y a enfouissement immédiat des boues
- Des délais minimums de récolte sont à respecter en fonction du type de culture (il y a des périodes d'épandage)
- On ne peut pas épandre sur des sols enneigés, gelés ou pendant de fortes pluies (il faut donc prévoir des stockages) ;
- On ne peut pas épandre sur des terres non régulièrement travaillées.

Quelle quantité à apporter ?

La quantité de boues que l'on peut épandre par année va dépendre des types de cultures réceptrices, de la composition des sols, de la composition des boues. C'est donc une donnée que l'on recalcule pour chaque cas. Cette quantité est de quelques tonnes de matière sèche par hectare et par an.

Actuellement en France 51 % des boues ont pour destination finale l'épandage.