

Partie2 : Epuration des eaux

I. Les paramètres de pollution et les normes de rejets

I.1. Définition

L'utilisation des eaux engendre un nouveau produit appelé effluent ou eau usée:

- les eaux résiduaires urbaines (ERU)
- les eaux résiduaires industrielles (ERI).

I.2. Paramètres de pollution

1. Eaux résiduaires urbaines (ERU) : Les eaux résiduaires urbaines (ERU) regroupent les eaux ménagères, les eaux vannes et les eaux de ruissellement. La composition et les caractéristiques d'une eau résiduaire urbaine sont peu variables par rapport aux eaux usées industrielles.

- Les matières en suspension (MES)
- La demande biochimique en oxygène (DBO).
- La demande chimique en oxygène (DCO).
- Les teneurs en azote et en phosphore sont également des paramètres très importants, à cause des problèmes d'eutrophisation.
- Les microorganismes excrétés avec les matières fécales. L'ensemble de ces organismes peut être classé en quatre grands groupes : les bactéries, les virus, les protozoaires et les helminthes.

2. Eaux résiduaires industrielles (ERI) : Sont des eaux rejetées après la fabrication des produits ou nettoyage

Les principaux polluants transitant dans les eaux usées d'origine industrielle sont :

- Les métaux toxiques,
- Les toxines organiques,
- Les matières colorées,
- Les huiles et graisses,
- Les sels,

I.3. Evaluation de la pollution des eaux

Trois principaux paramètres mesurent les matières polluantes des eaux usées :

- Les matières en suspension (MES) exprimées en mg par litre. Ce sont les matières non dissoutes de diamètre supérieur à 1 μ m contenues dans l'eau. Elles comportent à la fois des éléments minéraux et organiques et décantent spontanément.
- La demande biochimique en oxygène (DBO), exprimée en mg d'oxygène par litre. Elle exprime la quantité de matières organiques biodégradables présentes dans l'eau. Plus précisément, ce paramètre mesure la quantité d'oxygène nécessaire à la destruction des matières organiques grâce aux phénomènes d'oxydation par voie aérobie. Pour mesurer ce paramètre, on prend comme

référence la quantité d'oxygène consommé au bout de cinq jours. C'est la DBO₅, demande biochimique en oxygène sur cinq jours.

- La demande chimique en oxygène (DCO), exprimée en mg d'oxygène par litre. Elle représente la teneur totale de l'eau en matières oxydables. Ce paramètre correspond à la quantité d'oxygène qu'il faut fournir pour oxyder par voie chimique ces matières.

Tableau 10 : les limites des paramètres de pollution dans les effluents des réseaux eaux usées

Type de réseaux	MES (en mg/l)	DCO (en mg/l)	DBO ₅ (en mg/l)
Effluents de réseaux unitaires	152 – 670	114 – 570	48 – 270
Effluent de réseaux séparatifs	34 – 460	28 – 320	13 – 40
Eaux épurées	35	125	25

I.4. Les normes des eaux de rejet :

La norme est représentée par un chiffre qui fixe une limite supérieure à ne pas dépassée ou une limite inférieure à respecter.

- a) **Normes internationale :** Les normes internationales selon l'organisation mondiale de la santé (OMS) respective pour les eaux usées.

Tableau 11: normes de rejets internationales

Caractéristiques	Normes utilisées (OMS)
PH	6,5-8,5
DBO ₅	<30 mg/l
DCO	<90 mg/l
MES	<20mg/l
NH ₄ ⁺	<0,5 mg/l
NO ₂	1 mg/l
NO ₃	<1 mg/l
P ₂ O ₅	<2mg/l
Température	<30°C
Couleur	Incolore
Odeur	Inodore

- b) **Normes Algériennes :** Les normes de rejets des effluents industriels résultent de la loi n° 83-17 du 16 Juillet 1983 portant code des eaux, de l'ordonnance n° 96-13 du 15 Juin 1996 modifiant et complétant la loi n° 83-17, du décret exécutif n° 93-160 du 10 Juillet 1993 réglementant les rejets d'effluents liquides des industriels et du décret exécutif n° 06-141 du 19 avril 2006 de la république algérienne démocratique définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels

Tableau 12 : Les normes Algériennes de rejets des effluents liquides

Paramètres	Unités	Valeurs limites
Température	°C	30
PH	-	6,5- 8,5
DBO ₅	mg/l	30
DCO	mg/l	120
MES	mg/l	35
Azote total	mg/l	30
Phosphore total	Mg/l	10
Furfural	mg/l	50
Hydrocarbures	mg/l	10
Plomb	mg/l	0,5
Fer	mg/l	3
Mercure	mg/l	0,01
Cuivre	mg/l	0,5
Zinc	mg/l	3

I.5. Notion d'équivalent habitant (EH)

L'équivalent habitant (éq. h.) correspond à la quantité de pollution rejetée par un habitant quotidiennement.

- 90 g de matières en suspension ;
- 57 g de matières oxydables ;
- 15 g de NTK ;
- 4 g de phosphore total.

I.6. Epuration des eaux usées

- Prétraitement (physique)
- Traitement primaire (physique)
- Traitement secondaire (chimique et biologique)
- Traitement tertiaire (physique et biologique)
- Traitement des boues

II. Les prétraitements

Les prétraitements sont indispensables au bon fonctionnement de la station mais génèrent de fortes contraintes d'exploitation (récupération des refus, salubrité, entretien, ...).

L'accessibilité, la facilité des opérations manuelles doivent présider dans les choix technologiques. Dans le cas des petites stations, ces impératifs militent en faveur d'un rehaussement général des prétraitements qui se situeront à 1,5 m - 2 m au-dessus du sol.

II.1. Le dégrillage

1) Principe

Le dégrillage est réalisé en faisant passer les eaux usées au travers d'une grille caractérisée par l'écartement de ses barreaux, 30 à 100 mm, 10 à 25 mm, 3 à 10 mm pour un dégrillage grossier, moyen ou fin respectivement, l'espacement des barreaux étant choisi en fonction de la qualité du dégrillage désiré et de la quantité de déchets générée.

Les dégrilleurs assurent la protection des équipements électromécaniques et réduisent les risques de colmatage des conduites mises en place dans la station d'épuration

Une grande diversité de grilles est disponible sur le marché (droite, courbe, nettoyage amont, aval, ...). Les performances d'un dégrilleur (manuel ou autonettoyant) se caractérisent par son espacement entre barreaux (**figure 1**).



Figure 1 : Dégrilleur courbe

2) dimensionnement

Tableau 13 : Critères de conception des dégrilleurs

Diamètre des barreaux (mm)	d	8 – 10
Espacement entre les barres (mm)	e	10 – 50
Pente par rapport à l'horizontal (°)	α	60– 80
Vitesse à travers les grilles (m/s)	V_{\max}	0,6 – 0,9
Pertes de charges admissibles (mm)	ΔH	<150

1. Calcule le coefficient de vide de la grille, (O)

$$O = \frac{e}{e + d}$$

2. Calcul de la surface de la grille :

$$S_{grille} = \frac{Q_p}{V_{\max} \cdot O \cdot C}$$

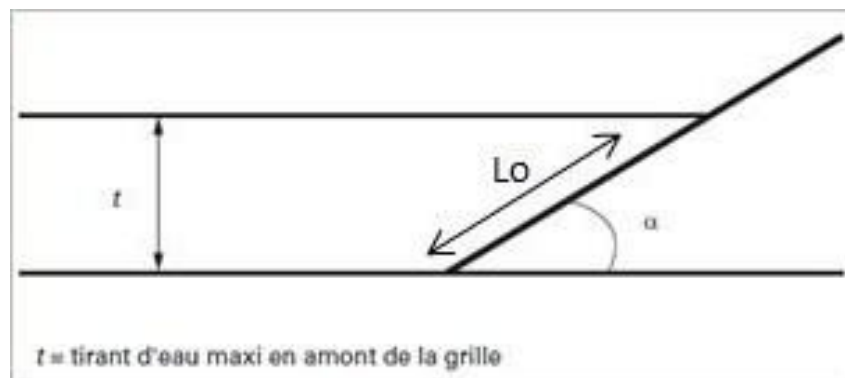
C : Coefficient de colmatage

0,10 < C < 0,30 pour une grille manuelle

0,40 < C < 0,50 pour une grille automatique.

3. Calcul de la longueur et largeur de la grille :

$$L_0 = \frac{t}{\sin \alpha} \text{ et } l = \frac{S_{grille}}{L_0}$$



t : tirant d'eau dans le canal d'amener

4. Calcul le nombre des barreaux

$$N_b = \frac{l - e}{d + e}$$

5. Calcul de la perte de charge à travers la grille (formule de Kirschmer)

$$\Delta H = \beta \left(\frac{d}{e}\right)^{4/3} \frac{V_{max}^2}{2g} \sin \alpha$$

Tableau 14 : Valeurs du coefficient β en fonction de la forme des barreaux

Forme des barreaux	β
Rectangulaires à arrête à angle droit	2.42
Rectangulaires avec face amont circulaire	1.83
Circulaire	1.79

II.2. Le dessablage et le dégraissage

1) Le dessablage

Le dessableur est un ouvrage dans lequel les particules denses, dont la vitesse est inférieure à 0,3 m/s, vont pouvoir se déposer. Il s'agit principalement des sables. Il est en effet souhaitable de les récupérer en amont de la station plutôt que de les laisser s'accumuler en certains points (bassin d'aération, ...) où ils engendrent des désordres divers. Par ailleurs, ils limitent la durée de vie des pièces métalliques des corps de pompe ou d'autres appareillages (effet abrasif, ...). 90% des particules de taille supérieure ou égale à 200 μm (sables) doivent être éliminées dans le dessableur.

2) Le dégraissage

Le dégraisseur a pour objet la rétention des graisses par flottation naturelle ou accélérée par injection de fines bulles (**photo 2**). Les teneurs en graisses sont appréciées analytiquement par la mesure des MEH (Matières Extractibles à l'Hexane). Ces matières grasses sont susceptibles de nuire à la phase biologique du traitement (mousses, ...).

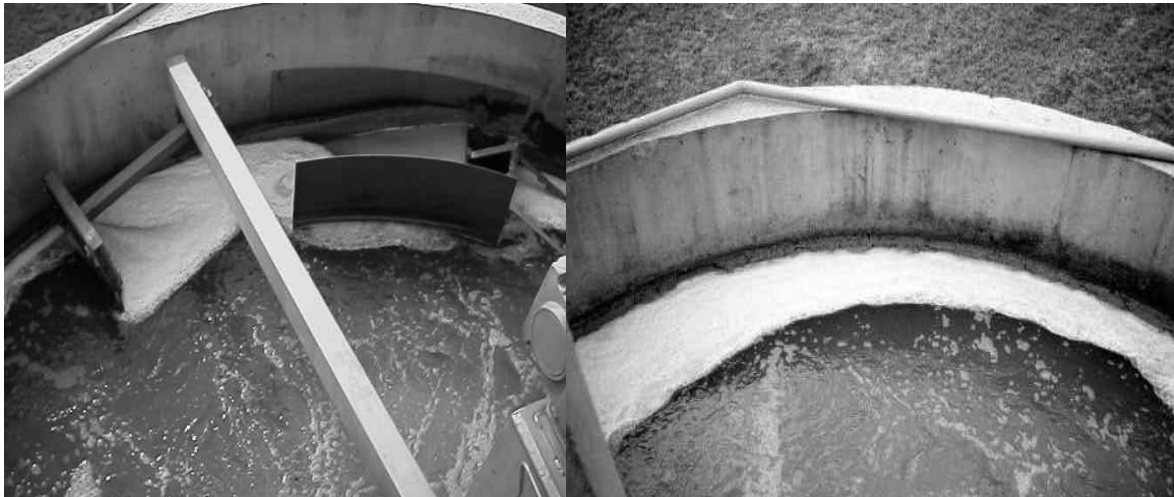


Figure 2 : Flottation des graisses par injection de fines bulles

3) Dimensionnement

- Le temps de séjour de l'eau (T_s) dans le dessableur est de 1 à 5 minutes,
- La hauteur de dessableur est de 1 à 3 m,
- Le volume de l'ouvrage sur sa surface doit être compris entre 1,25 et 2,5 m.
- La quantité d'air à injecter est estimée de 1 à 1,5 m³ par m³ d'eau usée.

a) Volume du dessableur

$$V = Q_p \cdot T_s$$

b) Calcul de la surface de décantation

$$S = \frac{Q_p}{V_a}$$

V_a : vitesse ascensionnelle m/s

c) Débit volumique d'air injecté

La quantité d'air à injecter est donnée par la relation :

$$Q_{air} = Q_p \cdot V$$

Avec V : volume d'air à injecter (m³/m³)

III. Les traitements primaires

Après les prétraitements, les effluents conservent une charge polluante dissoute et des matières en suspension. Les procédés de traitement primaire sont physiques, comme la décantation, ou physico-chimique.

Ces traitements éliminent 50 à 60 % des matières en suspension, mais ne suffisent généralement plus pour satisfaire les exigences épuratoires de la réglementation actuelle.

III.1. Procédés de décantation (décantation primaire)

1. Décantation classique : La base de ces procédés de séparation solide-liquide est la pesanteur. Ces procédés permettent d'éliminer, d'une part 50% à 60% des matières en suspension et réduit d'environ 30 % la DBO et la DCO et d'autre part, de réduire leurs caractéristiques dimensionnelles (élimination des matières présentant une taille supérieure à 50 μ m. Les matières solides se déposent au fond d'un ouvrage appelé "décanteur" pour former les "boues primaires". Ces dernières sont récupérées au moyen d'un système de raclage.

Dans le décanteur on distingue: zone d'eau claire, zone de sédimentation et zone d'épaississement. La zone d'eau claire est comprise entre 0,5 et 1 m de haut, la zone de sédimentation entre 1,5 et 2,5 m et enfin la zone d'épaississement entre 0,5 et 1,5 m.

Il existe de nombreux types de décanteurs classiques :

- décanteur horizontal avec raclage des boues (figure 3) ;
- décanteur cylindro-conique ordinaire (figure 4) ;
- décanteur circulaire avec raclage des boues (figure 5).

Le raclage s'effectue au moyen d'un pont racleur qui entraîne une ou plusieurs lames poussant les boues vers une ou plusieurs trémies.

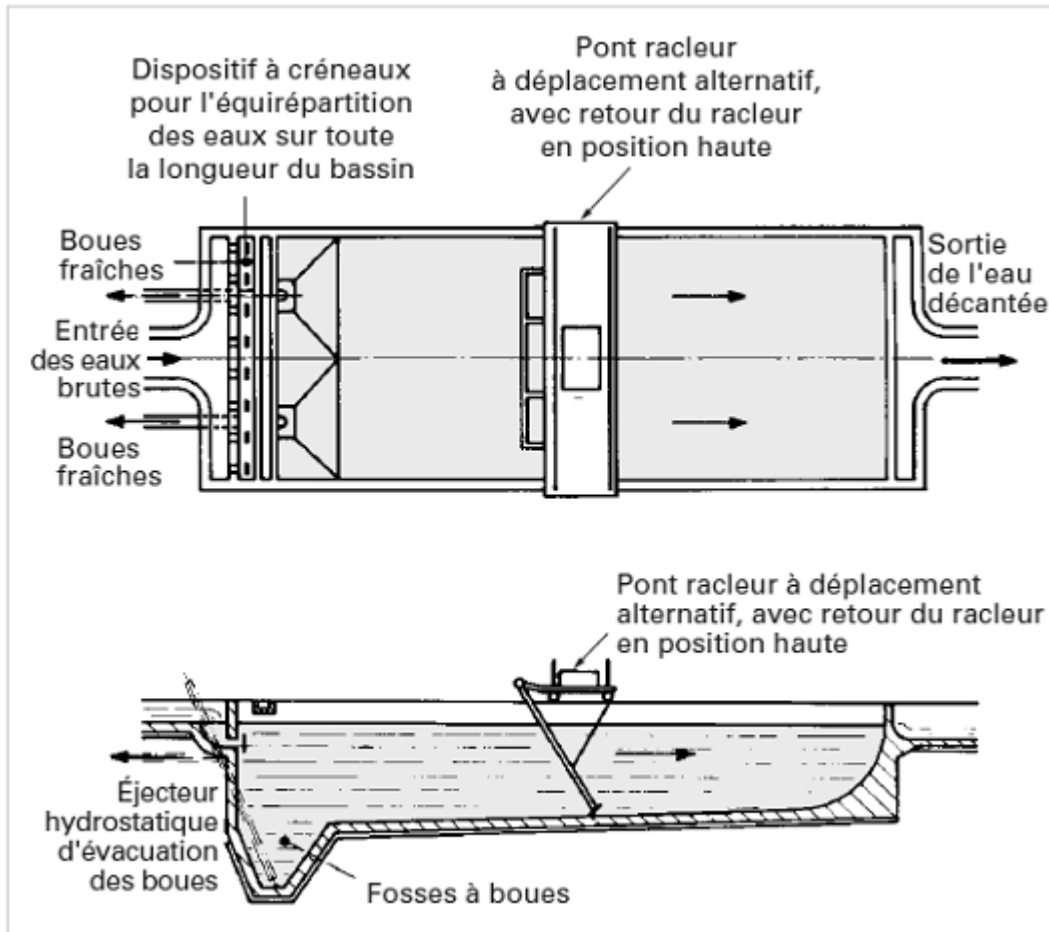


Figure 3 : Décanteur rectangulaire avec raclage de boues

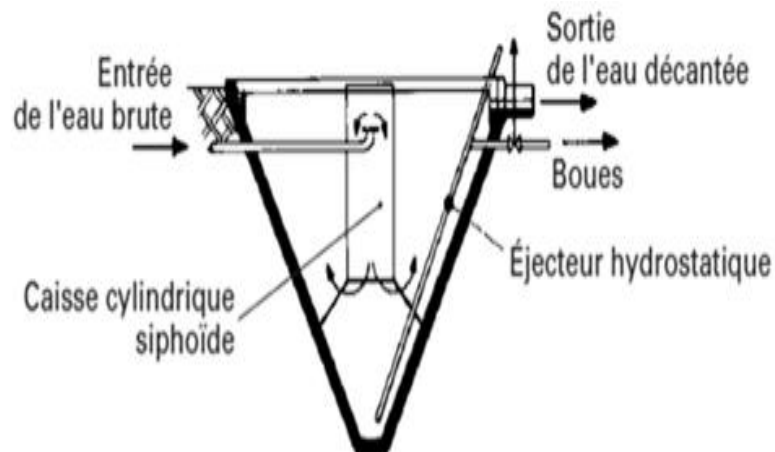


Figure 3 : Décanteur cylindro-conique

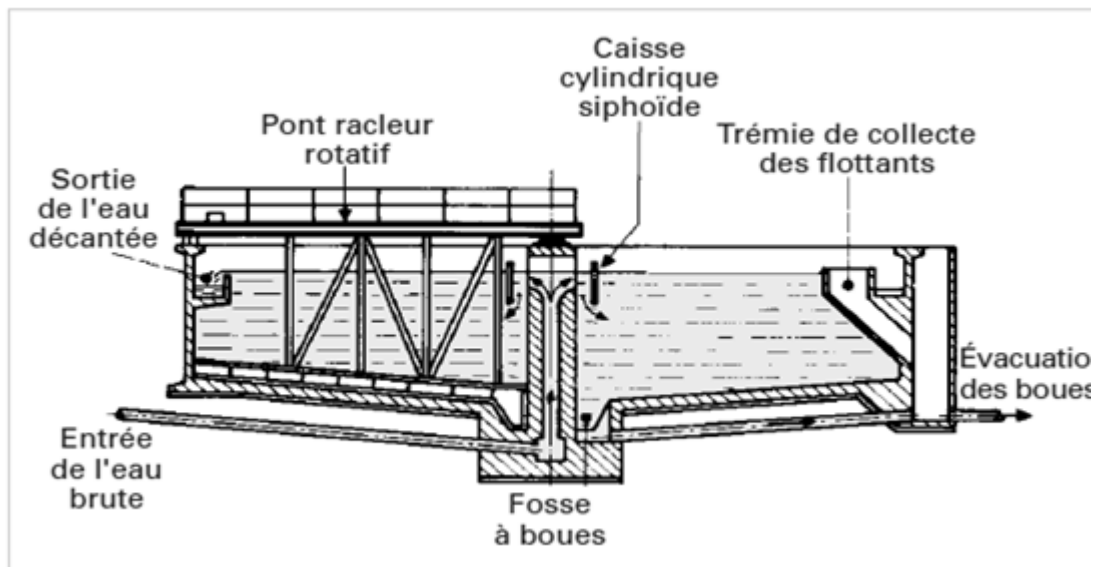


Figure 3a : Décanteur circulaire avec raclage de boues

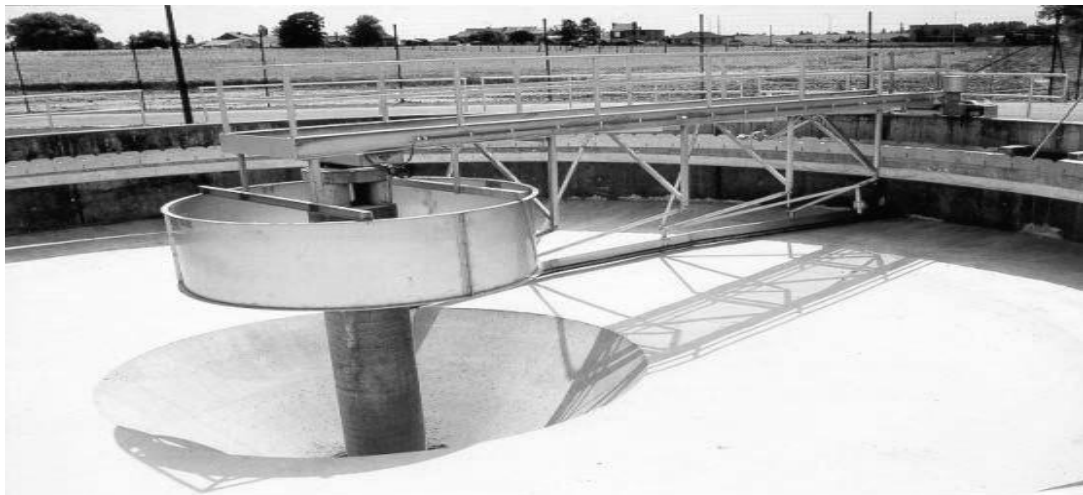


Figure 3b: Décanteur primaire avec pont raclateur à entraînement

2. **Décantation lamellaire** : qui est de plus en plus utilisée, notamment dans les procédés d'épuration physico-chimiques. La décantation lamellaire consiste à multiplier la surface de décantation à l'intérieur d'un ouvrage ; il en résulte un rendement épuratoire excellent.

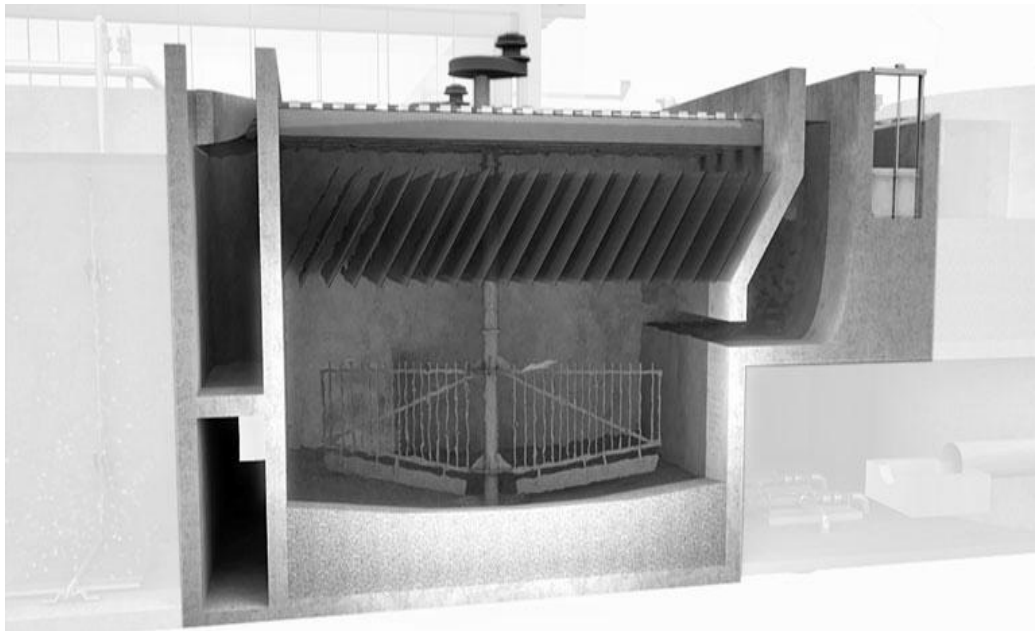


Figure 4 : Décanteur lamellaire à recirculation de boues

3. Dimensionnement de décanteur

1. Calcul la vitesse de sédimentation (décantation)

Selon la loi de Stokes

$$v_s = \frac{g(\rho_s - \rho_l)d_p^2}{18\mu_l}$$

d_p : diamètre de la plus petite particule (m)

ρ_s : poids spécifique des particules kg/m^3

ρ_l Poids spécifique de l'eau 1000kg/m^3

2. Calcul de la profondeur du décanteur

La sédimentation aurait lieu si le temps de rétention soit supérieur ou égal au temps de sédimentation

$$t_r > t_s \Rightarrow t_r \geq \frac{h}{v_s}$$

h = profondeur du décanteur (m)

t_s = temps de sédimentation (heure)

t_r = temps de rétention (heure)

3. Calcul le volume du décanteur

Soit V_c la capacité du bassin (volume d'eau dans le bassin)

$$V_c = Q \cdot t_r$$

Il convient d'ajouter le volume occupé par les boues estimé. Soit V_b volume de boues produites par les habitants pendant une année

$$V_{ex} = \frac{V_b}{\text{nbre d'extraction}}$$

Le volume décantation aura finalement comme $V_b = V_c + V_{ex}$

4. Surface (S) du bassin de décantation

$$S_b = \frac{V_b}{h}$$

5. Calcul du diamètre de décanteur

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi H}}$$

III.2. Décantation avec réaction chimique

1. **Élimination de la pollution colloïdale** : Ce traitement consiste à enlever leur stabilité aux matières colloïdales présentes dans l'eau en provoquant la neutralisation de leurs charges électriques superficielles et l'agglomération de ces particules pour former un flocon volumineux décantable appelé **floc**. La première étape est appelée **coagulation** et se réalise dans le traitement d'eau par l'utilisation essentiellement de sels de fer ou d'aluminium. La deuxième étape est la **floculation** et se réalise par l'ajout de polymère organique (macromolécule à longue chaîne). De l'addition de sels de fer ou d'aluminium vont résulter la formation d'un précipité d'hydroxyde $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ ou $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ et une chute d'alcalinité. Les taux de réactif à mettre en œuvre sont déterminés par des essais de floculation. L'ajustement du pH par ajout d'acide ou de base est parfois nécessaire pour obtenir le pH optimal de coagulation-floculation des réactifs employés :

$$\begin{aligned} \text{Al}^{3+} &: 6,0 \text{ à } 7,4 \\ \text{Fe}^{3+} &: 5 \text{ à } 8,5 \end{aligned}$$

Le choix des temps de contact, des énergies d'agitation et de la forme des turbines de mélange est également très important et permet des économies substantielles de réactif. Une coagulation-floculation, suivie d'une décantation appliquée sur une eau domestique, permet d'éliminer jusqu'à plus de 90 % des matières en suspension et de 40 à 65 % de la DBO_5 .

Les procédés de coagulation-floculation utilisés peuvent être de type classique avec décantation lamellaire ou non, mais peuvent faire également appel à de nouvelles techniques comme le décanteur lamellaire à recirculation de boues ou le décanteur lamellaire à floccs lestés.

2. Décanteur lamellaire à recirculation de boues (Densadeg)

Ce procédé est basé sur trois principes :

- un réacteur de coagulation-floculation intégré ;
- une recirculation des boues de la zone d'épaississement vers le réacteur ;
- une décantation lamellaire

Le réacteur est constitué de trois chambres successives. Les deux premières assurent la floculation rapide en réacteur agité et la dernière effectue la floculation lente en réacteur piston (figure 6). Le réacteur agité comporte deux zones : une zone cylindrique centrale équipée d'une hélice qui induit un débit de recirculation interne provenant de la seconde zone. Celle-ci, à flux ascendant, peut être coaxiale à la première ou être à base rectangulaire. L'eau brute préalablement coagulée est admise à la base du réacteur agité et le flocculant est injecté sous la turbine. Un apport de boues est effectué dans l'eau brute par un système de recirculation externe. Le réacteur piston à flux ascendant peut être constitué d'une chambre coaxiale aux deux précédentes ou par une chambre latérale à base rectangulaire. Cette zone de floculation lente permet d'obtenir les floccs de taille importante (plusieurs millimètres) présentant une grande homogénéité. Cette densité de flocc permet d'aborder la zone de décantation avec des vitesses apparentes bien supérieures à celles des appareils classiques. Le flocc aborde ensuite une zone de prédécantation et d'épaississement par des déversoirs. Cette zone assure la décantation de la majeure partie des matières en suspension présentes dans le réacteur. La partie cylindro-conique de cet organe est équipée d'une herse et d'un racleur de fond assurant un épaississement intégré des boues. Les boues épaissies sont extraites par la tuyauterie. Une partie de ces boues est recirculée à l'aide d'une pompe dans la tuyauterie d'amenée d'eau brute vers le réacteur.

Après le prédécanteur, le décanteur lamellaire assure la décantation du flocc résiduel. Il est équipé de modules lamellaires ou tubulaires de décantation rapide dans lesquels l'eau circule à contre-courant des boues. Cet organe comporte habituellement, à sa partie inférieure, un dispositif de raclage ramenant les boues résiduelles dans une fosse de concentration. La faible concentration des matières en suspension envoyées vers le décanteur lamellaire et la forte densité du flocc permettent d'y appliquer des vitesses de décantation élevées (20 à 40 m/h sur la zone lamellaire). La concentration des boues extraites varie entre 40 et 80 g/L.

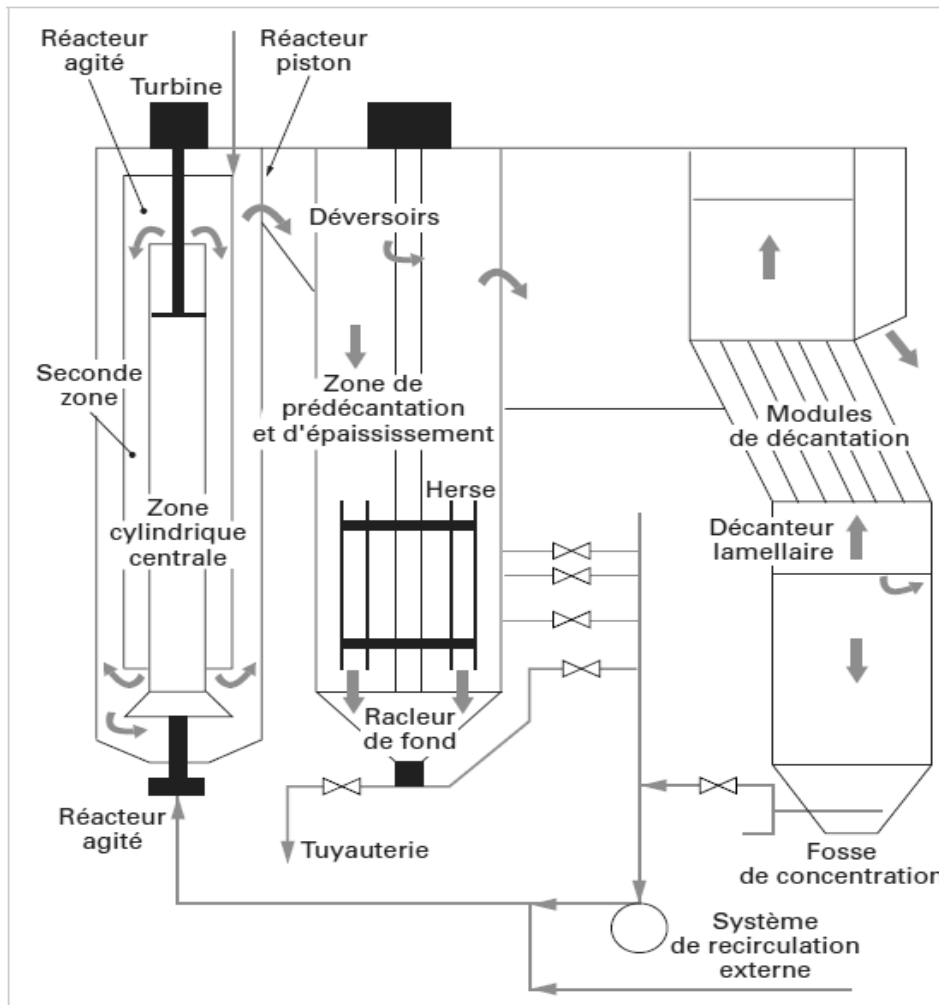


Figure 5 : Schéma de principe du Densadeg

3. Décanteur à floc lesté (procédé Actiflo) : Le procédé de décantation à floccs lestés consiste à injecter, dans l'effluent brut, du microsable pendant l'étape de coagulation-floculation. Cela permet plusieurs avantages dont notamment :

- une initiation de la réaction qui est augmentée par l'addition de microsable qui permet lui-même d'accroître le nombre de particules libres. De ce fait, le temps de contact est beaucoup plus court que dans un système conventionnel, induisant un volume de cuve plus petit ;
- une augmentation de la surface d'échange et donc des capacités d'adsorption par rapport à la floculation classique ;
- la formation de floccs plus lourds, décantant plus facilement. Les vitesses de passage sont alors plus élevées. L'eau brute dégrillée et dessablée traverse successivement (figure 6) :
- une étape de coagulation pendant laquelle est injecté un sel de fer ou d'aluminium ;
- une étape de floculation dans un ensemble constitué d'une cuve d'injection et d'une cuve de maturation. Dans la cuve d'injection, les matières en suspension sont mises en contact avec le microsable par l'intermédiaire d'un polyélectrolyte. Dans la cuve de maturation, le floc s'épaissit et termine sa maturation. Ces deux cuves sont équipées de mélangeurs dynamiques dont les caractéristiques sont définies afin d'obtenir les gradients de vitesse optimaux :

- une étape de décantation pendant laquelle l'eau floculée aborde la cuve de décantation lamellaire à contre-courant eau-boues. L'eau décantée est évacuée en partie supérieure par des éléments de collecte et d'équirépartition (goulottes).

Les boues et le microsable déposés au fond du décanteur sont collectés par un racleur ou des trémies avant d'être acheminés au moyen d'un dispositif de pompage vers des hydrocyclones où s'opère une classification granulométrique permettant de récupérer, dans la sous-verse, la quasi-intégralité du microsable à recycler.

Le débit de recirculation est inférieur à 4 % du débit entrant afin d'assurer un taux de sable de 3 à 5 kg/m³. La granulométrie du sable doit être inférieure à 160 µm pour être efficace. Le taux de traitement en sable est de l'ordre de 3 à 5 g/L dans le réacteur de floculation.

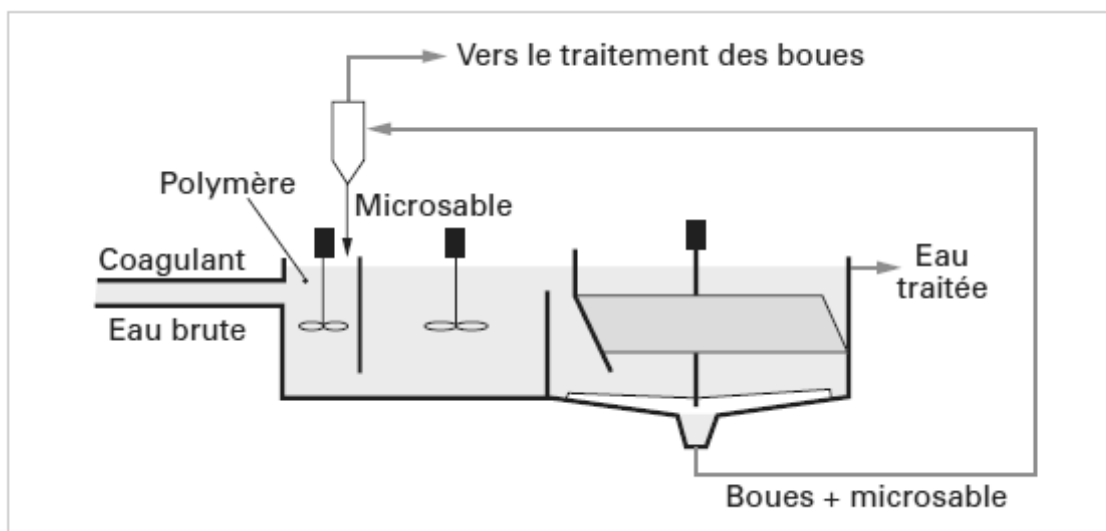


Figure 6: Schéma de principe de l'Actiflo

La concentration en MES de la surverse des hydrocyclones est en général de 5 à 10 g/L. Les pertes en sable sont d'environ 3 à 5 g/m³ d'eau traitée.

L'optimisation de cette technique, alliée à l'utilisation d'un polyélectrolyte de synthèse, permet de réduire considérablement le temps de floculation (< 10 min). Les floccs lestés ont une densité 2,5 fois supérieure à celle du floc classique et la vitesse de décantation peut atteindre la valeur exceptionnelle de 130 m/h (valeur minimale 80 m/h).

Les performances obtenues en traitement physico-chimique primaire sur des eaux usées domestiques sont variables selon la dose de coagulant et la qualité de l'eau brute.

Elles se situent ainsi :

- matières en suspension : 70 à 90 % ;
- DCO : 50 à 75 % ;
- DBO₅ : 55 à 80 % ;
- azote Kjeldahl : 10 à 30 % (azote Kjeldahl) qui correspond à la somme de l'azote sous forme ammoniacale et organique)
- phosphore total en sortie : < 1 ou 2 mg/L.

IV. Traitements secondaires

IV.1. Traitements biologiques

L'épuration biologique a pour but d'éliminer la matière polluante biodégradable contenue dans l'eau domestique (décantée ou non) en la transformant en matières en suspension. La dégradation peut se réaliser par voie aérobie (en présence d'oxygène) ou anaérobie (en l'absence d'oxygène). Dans ce dernier cas, où les réactions s'effectuent à l'abri de l'air, le carbone organique, après dégradation, se retrouve sous forme de CO₂, méthane et biomasse. Ce type de traitement appelé « digestion anaérobie » n'est utilisé que pour des effluents très concentrés en pollution carbonée, de type industriel (brasserie, sucrerie, conserverie...).

On peut décrire ce processus par l'équation :

Eau résiduaire + biomasse épuratrice + O₂ → eau purifiée + accroissement de biomasse + gaz résiduaire (CO₂...).

La biomasse existe dans l'eau brute (usée) :

- Bactéries : 10¹¹ à 10¹²
- Microfaune : 10⁶ à 10⁸

IV.2. Cultures libres (boues activées)

Le terme « cultures libres » regroupe les procédés où l'on provoque le développement d'une culture bactérienne dispersée sous forme de floes au sein du liquide à traiter. Pour cela, on utilise un bassin brassé, pour conserver en suspension la culture, dans lequel est maintenue :

- soit une concentration d'oxygène, pour les procédés aérobies ;
- soit une absence d'oxygène, pour les procédés anaérobies.

Le procédé par « boues activées » est le plus commun des procédés par « cultures libres ».

1. Caractéristiques : Différents paramètres permettent de définir le fonctionnement d'une boue activée :

- la charge volumique C_v qui correspond à la quantité journalière de DBO₅ (en kg/j) à dégrader dans le volume V (m³) de l'ouvrage. Elle s'exprime en kg DBO₅ / (j · m³) ;
- la charge massique (biologique) C_m qui est la quantité de DBO₅ (en kg/j) rapportée à la masse de matières en suspension totales contenues dans l'ouvrage de volume V. Elle s'exprime en kg DBO₅ / (kg MEST · j) ; la charge massique est parfois rapportée à la masse de micro-organismes ou pratiquement de matières volatiles sèches (MVS) contenues dans l'ouvrage. Elle s'exprime alors en kg DBO₅ / (kg MVS · j) ;

- l'âge des boues qui est le rapport entre la masse de boues présentes dans le réacteur et la masse journalière de boues extraites. Il s'exprime en jours.

Caractéristiques	Aération prolongée	Faible charge	Moyenne charge	Forte charge	Très forte charge
C_m [kg DBO ₅ / (kg MEST · j)]	< 0,08	0,08 à 0,25	0,25 à 0,5	0,5 à 1	> 1
C_v [kg DBO ₅ / (m ³ · j)]	< 0,32	< 0,4	0,8 à 1	1 à 1,5	> 5
Âge des boues (j)	> 18	13 à 18	3 à 7	1 à 3	0,3 à 0,7
Concentration des boues (kg/m ³)	4 à 6	3 à 5	3 à 4	2 à 3	< 3
Rendement d'élimination de la DBO ₅	> 90 % nitrification possible	90 % nitrification possible	80 à 90 %	< 80 %	

2. Schémas possibles : Une station de traitement par boues activées comprend dans tous les cas (figure 9) :

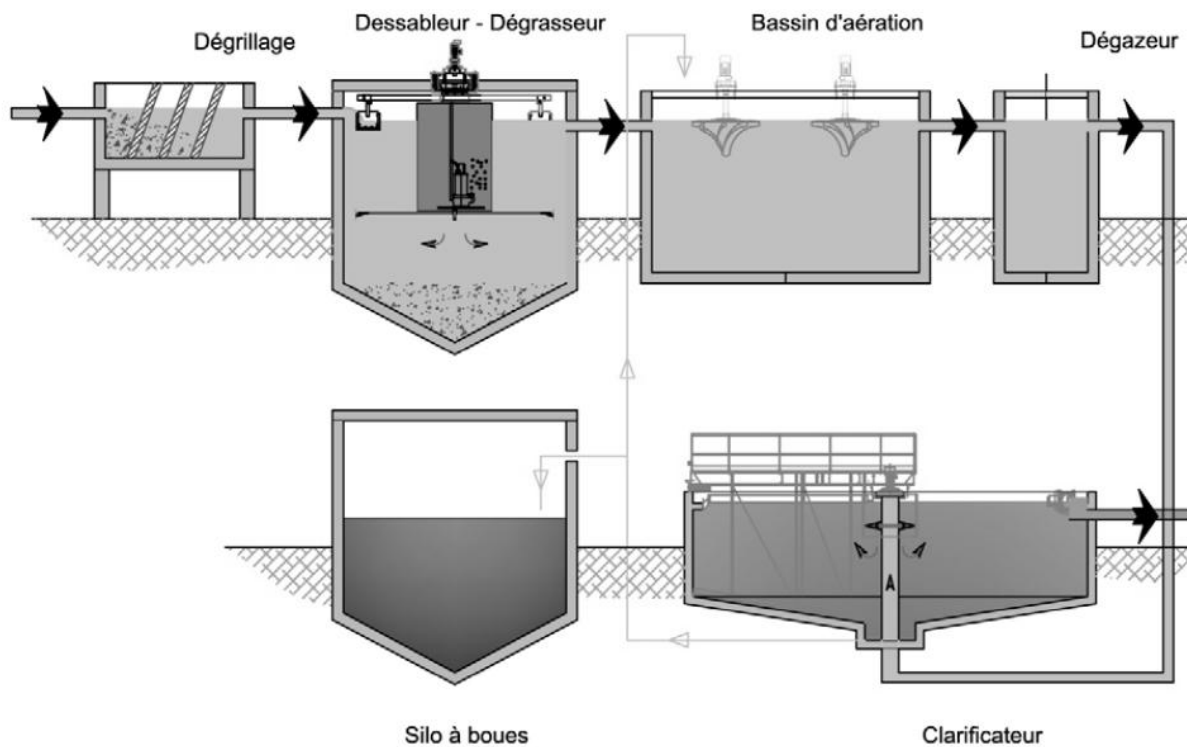


Figure 7 : Principe de la filière des boues activées

3. Le bassin d'aération : Il existe plusieurs solutions pour aérer les eaux usées : Les bassins « fines bulles et les bassins « à turbines »

a) Le bassin « fines bulles » : pour ce type de bassin l'injection d'oxygène est faite par un système de rampes d'aération situées en fond d'ouvrage. Les hauteurs de liquide avoisinent généralement les 6 m

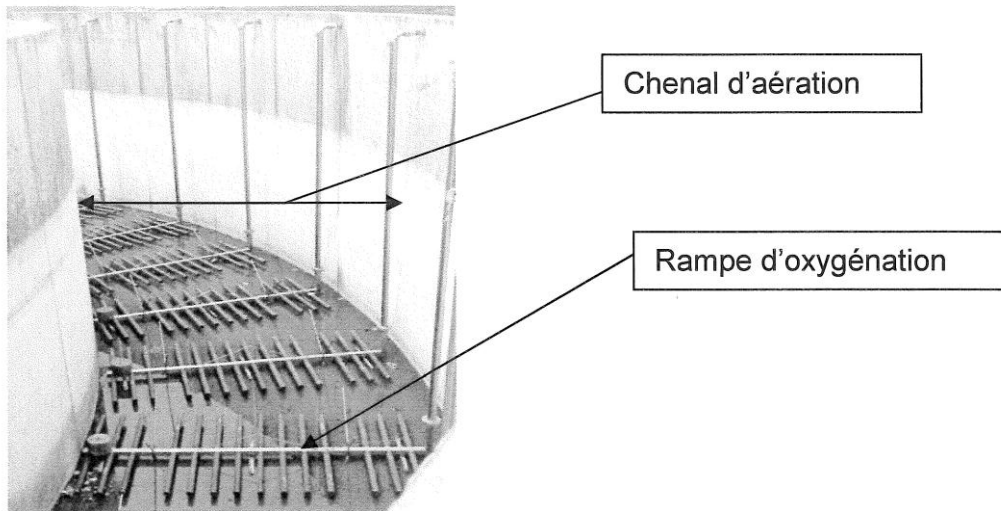


Figure 8: Bassin d'aérations fines bulles

En fond d'ouvrage des turbines sont fixées sur le radier afin de faire circuler l'eau. Pour ce type d'ouvrage, les diamètres peuvent varier de 10 à 20 mètres.

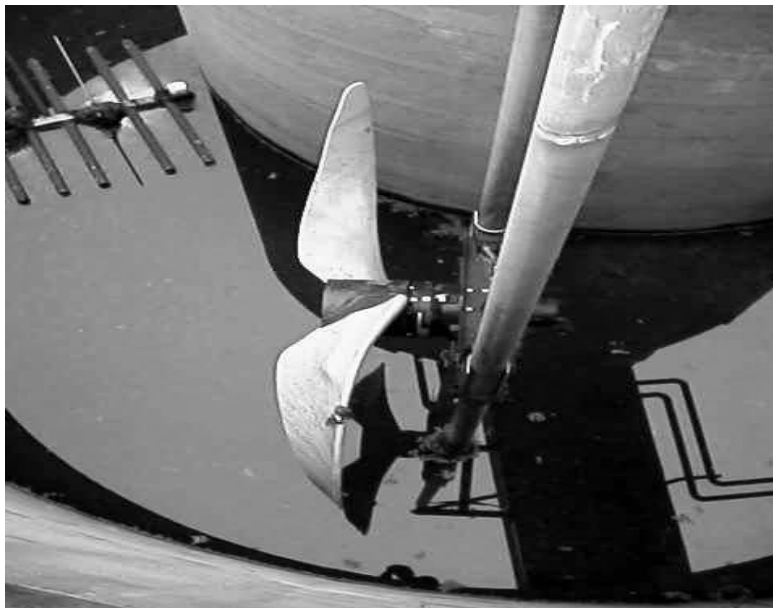


Figure 9: Aération et brassage séparées dans un bassin d'aération fines bulles

b) **Les bassins « à turbines »** : Pour ces ouvrages, l'addition d'oxygène aux eaux usées se fait par un brassage de surface. Cette méthode nécessite donc la construction d'une passerelle qui supporte les turbines.



Figure 10 : Bassin aéré mécaniquement par des turbines de surfaces

Pour un bon rendement, il est préférable que la hauteur d'eau ne soit pas trop importante. En général, elle est de 3,50m avec une hauteur de marnage de 1,00 à 1,50m

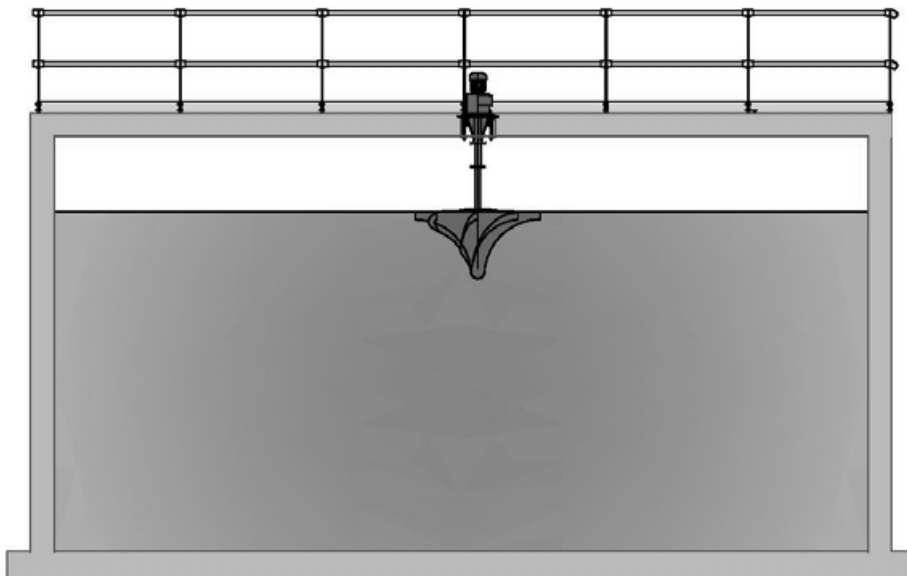


Figure 11 : Coupe sur bassin d'aération aéré mécaniquement

4. **Le clarificateur** : Le clarificateur se trouve en aval du bassin d'aération. Dans ce dernier, les bactéries ont consommé les pollutions. Le rôle du clarificateur est la séparation des boues en suspension et de l'eau traitée. Pour les ouvrages courants, le diamètre des radiers peut varier de 7.00 à 20.00m pour des hauteurs de voile variant de 3.00 à 4.00m.

a) **Le clarificateur raclé** : Dans le cas d'un clarificateur raclé, les boues tombées en fond d'ouvrage sont poussées mécaniquement par des racles de fond rotatives qui concentrent les matières au centre de l'ouvrage.

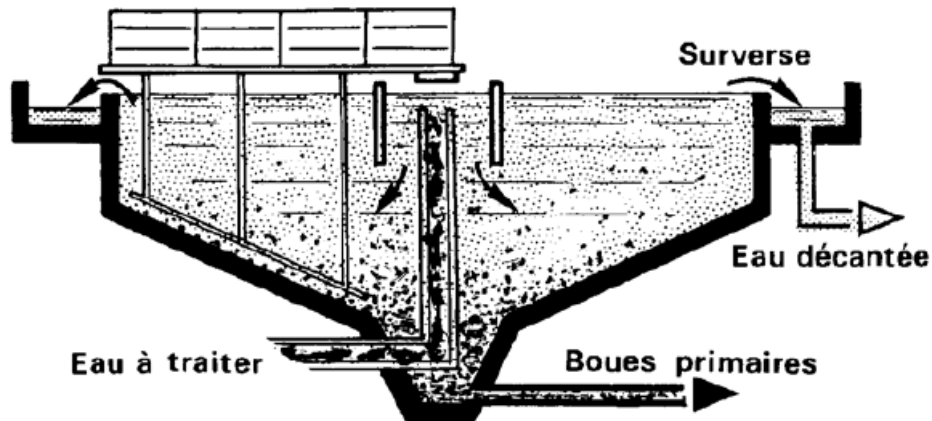


Figure 12 : principe de fonctionnement d'un clarificateur raclé

Les boues sont ensuite pompées vers le silo de stockage ou le centre de traitement. L'eau décantée passe par une surverse en tête de plan d'eau. Elle se dirige alors vers le canal de comptage. Ce type d'ouvrage demande la pose d'un pont racler. Celui-ci présente un axe au centre de l'ouvrage. Les moteurs entraînant le pont se trouvent sur le voile.



Figure 13 : Pont racler

Ce système nécessite la construction d'ouvrage à fond conique de pente comprise entre 10% et 15%.

- b) **Le clarificateur sucé** : Dans ce cas, lorsque le diamètre de l'ouvrage est supérieur à 20.00m, il est préférable de réaliser un clarificateur sucé. Les boues sont aspirées au fond par siphonage.



Figure 14 : Clarificateur à pont suceur

L'inconvénient de cette méthode est le coût plus élevé du pont par rapport à un pont racleur

5. **Le silo à boue** : Le silo à boue est un ouvrage de stockage. Il se présente sous la forme d'un réservoir couvert avec un fond conique pour permettre le pompage des boues. Pour les stations adaptées aux petites collectivités, les diamètres peuvent varier de 8.00 à 15.00m. Les hauteurs de stockage peuvent atteindre 8.00m.

6. Dimensionnement du bassin d'aération

- 1) Calcul l'âge des boues (θ_c) : C'est le temps de renouvellement de la biomasse dans le bassin d'aération

$$\theta_c = 6,5 \cdot [0,914]^{(T-20^\circ)}$$

θ_c = âge des boues (en jours)

T : température de l'effluent

2) Calcul la charge massique (C_m en kg DBO₅/kg MVS. j)

$$\theta_c = 1,224 C_m^{-1,125}$$

Ce qui donne:

$$C_m = \left(\frac{\theta_c}{1,224} \right)^{-\frac{1}{1,125}}$$

3) Calcul la concentration des boues (B en mg/l): Elle exprime la teneur en boues dans le bassin d'aération

$$C_m = \frac{QS_0}{BV}$$

Avec $Q=V/\theta_t$: volume du bassin, ce qui permet d'écrire

$$C_m = \frac{VS_0}{BV\theta_t} = \frac{S_0}{B\theta_t} \Rightarrow B = \frac{S_0}{C_m \cdot \theta_t}$$

θ_t : la durée d'aération (1 heure < θ_t < 8 heures)

4) Calcul la DBO₅ à la sortie du bassin (S en mg/l)

$$\frac{S}{S_0} = \exp(-KB\theta_t)$$

K : constante de Ekenfelder (0,15)

5) Calcul de l'efficacité du traitement (r en %): La qualité de l'effluent est appréciée par la DBO₅ à la sortie du bassin d'aération qui est calculée à partir de la relation :

$$r = \frac{S_0 - S}{S_0}$$

6) Calcul le volume du bassin d'aération (V en m³)

$$V = Q \cdot \theta_t$$

La hauteur du bassin d'aération comprise entre 3 et 5 m. Si le bassin rectangulaire alors

$$L=1,5 \times l. \text{ Si circulaire } D = \sqrt{\frac{4.V}{H.\pi}}$$

7) Calcul la quantité de boues produite « P en kg/j »

$$P = \frac{B.V}{\theta_c} = \frac{1,870.1781,25}{4,15}$$

8) La quantité O₂ requise « O₂ »

$$O_2 = \frac{Q(S_0 - S).10^{-3}}{f} - 1,42P$$

f : facteur de conversion ($0,45 < f < 0,68$)

9) Calcul l'énergie requise (E en kwh) et la puissance d'aération requise (W en kw)

Le taux de transfert d'oxygène pour des aérateurs de surface est compris entre 1,94 et 2,3 kg O₂/j /KWh..
L'énergie requise (E) est calculée comme suivant

$$E = \frac{O_2}{\text{Taux } O_2}$$

La puissance requise pour l'aération est donnée par :

$$W = \frac{E}{24}$$

IV.3 Lagunage

- Principe :** Le lagunage naturel est un procédé de traitement de type culture libre. Les effluents sont dirigés dans des bassins étanches, à l'air libre. Sous l'action du soleil, les algues photosynthétisent leur matière première en fournissant de l'oxygène à la population bactérienne.
- Dimensionnement :** Le lagunage est destiné pour les petites collectivités : 250 à 1500 EH (conseillé) voire 100 à 2000 EH (possible).

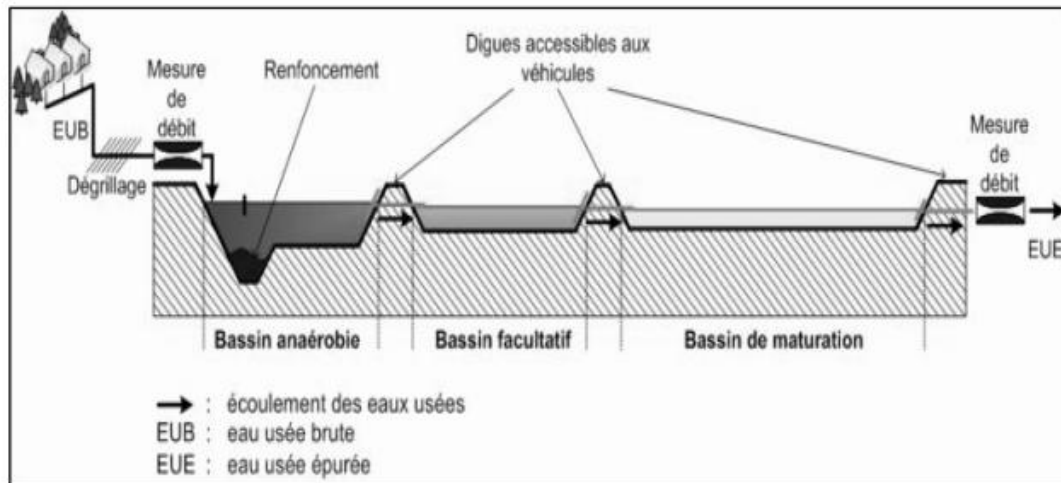


Figure 15 : Lagunage

- Le prétraitement réduit la DBO₅ jusqu'à 10%
- Le bassin anaérobie réduit la DBO₅ jusqu'à 40%
- Le bassin facultatif réduit DBO₅ jusqu'à 50%
- Le bassin maturation réduit DBO₅ jusqu'à 80%

a) Calcul la charge de pollution journalière en (kg/j)

- Charge journalière DBO₅ : Charge DBO₅ = DBO₅ × Q_j
- Charge journalière DCO: Charge DCO = DCO × Q_j
- Charge journalière MES: Charge MES = MES × Q_j

b) Vérification si les eaux usées sont biodégradable

Pour accepter que l'eau est biodégradable il faut que $\frac{DCO}{DBO_5} < 1,5$

c) Calcul la charge polluante en EH

On prend 1éq.hab=57 g de DBO₅

$$EH = \frac{DBO_5 \left(\frac{kg}{j}\right) \times Q_{moy.j} \left(\frac{m^3}{j}\right)}{57}$$

d) Dimensionnement du bassin anaérobie

- Calcul du temps de séjour du bassin anaérobie :

$$T_{s.an} = \frac{1}{\beta \cdot K} \cdot \log \left(\frac{S}{S_{an}} \right)$$

Où, $T_{s.an}$: temps de séjour des eaux usées dans le bassin anaérobie (jours) ;
 β : Coefficient d'utilisation de la capacité des bassins de lagunage, $\beta = 0,9$;
 K : constante de la vitesse de dégradation des polluants organiques (j^{-1})
 S_{an} : la DBO₅ à la sortie du bassin anaérobie
 S : la DBO₅ à la sortie du prétraitement

$$S_{an} = S \times 0,6$$

$$K = (1,2 \cdot 1,085)^{T-35}$$

- Le volume du bassin anaérobie

$$V_{an} = Q_{moy} \times T_{s.an}$$

- La surface du bassin anaérobie

Nous fixons la profondeur à 4 m, donc :

$$S_{an} = \frac{V_{an}}{H_{an}}$$

On a

$$\frac{L_{an}}{l_{an}} = 2$$

e) Dimensionnement du bassin facultatif

$$T_{s.an} = \frac{1}{\beta \cdot K} \cdot \log \left(\frac{S_{an}}{S_f} \right)$$

$$S_f = S_{an} \times 0,5$$

Avec,

S_f : DBO₅ à la sortie du bassin facultatif.

S_{an} : DBO₅ à la sortie du bassin anaérobie.

$$V_f = Q \times T_{s,f}$$

$$S_f = \frac{V_f}{H_f}$$

$$\frac{L_f}{l_f} = 3$$

f) Dimensionnement du bassin de maturation

$$T_{s.m} = \frac{1}{\beta \cdot K} \cdot \log \left(\frac{S_f}{S_m} \right)$$

$$S_m = S_f \times 0,2$$

Avec,

S_f : DBO₅ à la sortie du bassin facultatif.

S_m : DBO₅ à la sortie du bassin de maturation.

$$V_m = Q \times T_{s.m} = 1255 \times 24,26 = 30446,3 \text{ m}^3$$

a) **La surface du bassin de maturation :**

Nous fixons la profondeur à 1,2 m, donc :

$$S_m = \frac{V_m}{H_m}$$

$$\frac{L_m}{l_m} = 2$$

IV.4. Epuration biologique à biomasse fixée (Cultures fixées)

Ce terme regroupe tous les procédés où la biomasse épuratrice est accrochée sur un support solide à travers lequel percole l'eau à traiter.

- 1. Lit bactérien :** Le plus ancien procédé à biomasse fixée est le lit bactérien (figure 16 et 17). La biomasse est fixée sur un matériau de grosse granulométrie (3 à 8 cm) sur lequel percole l'effluent à traiter. L'air est transféré par diffusion à travers le film d'eau ruisselant à la surface du matériau. Une vitesse hydraulique suffisante, assurée par un recyclage d'eau traitée, permet l'évacuation des boues en excès qui sont séparées de l'effluent traité dans un ouvrage de décantation situé en aval.

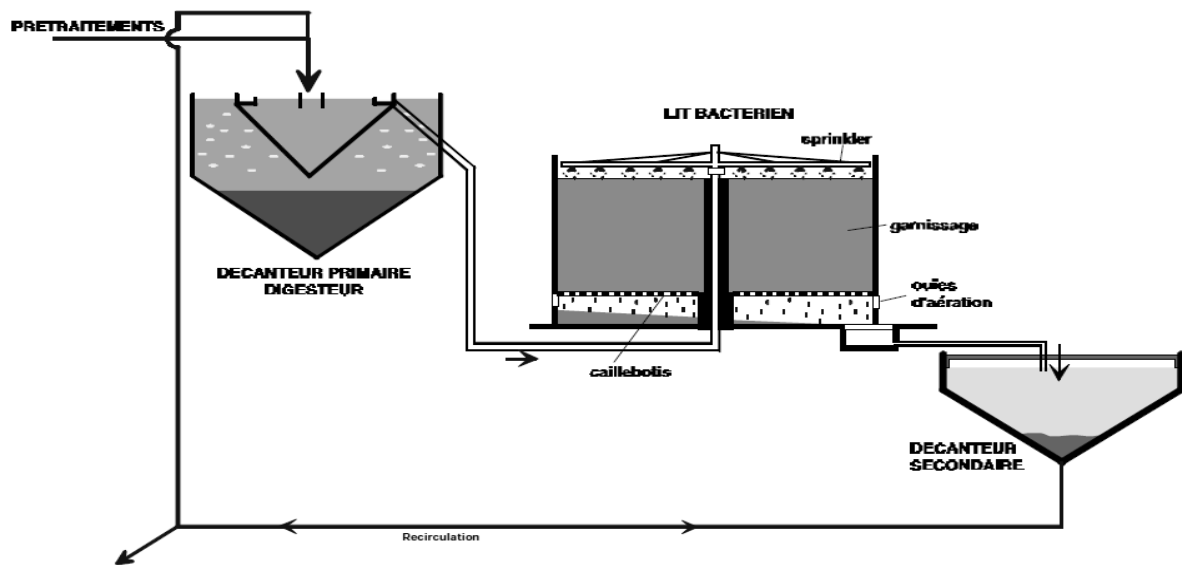


Figure 16 : Schéma de principe d'une filière type par lit bactérien

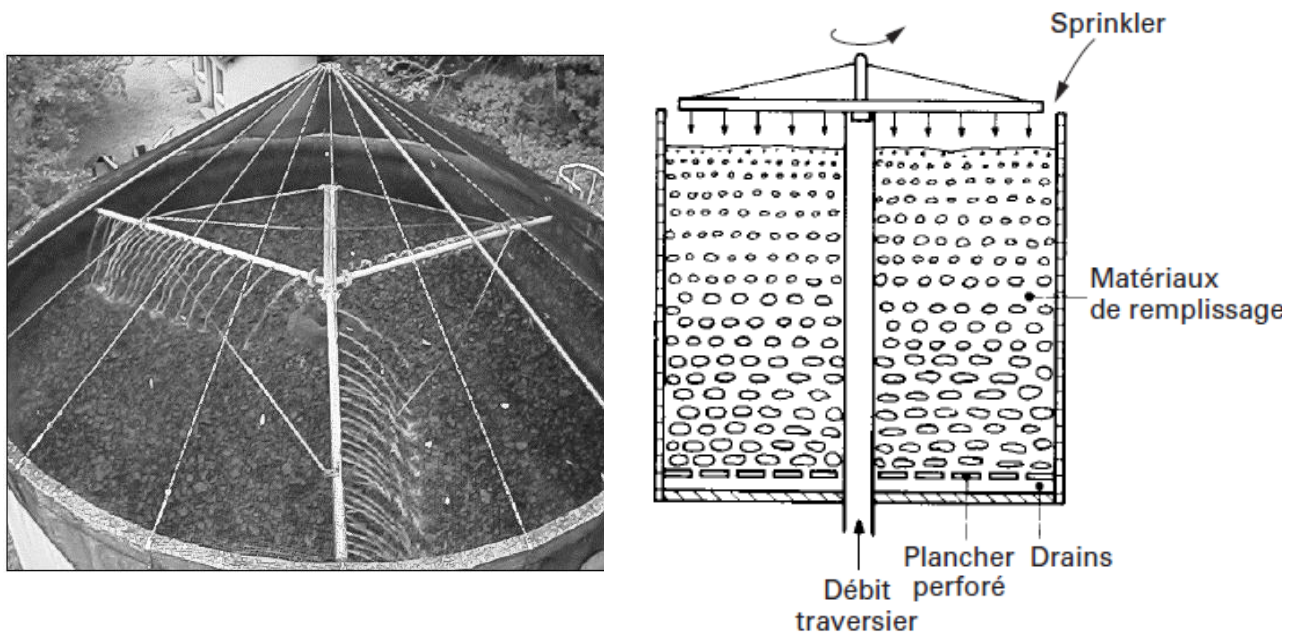


Figure 17 : Lit bactérien

Les charges volumiques appliquées sont de l'ordre de $0,8 \text{ kg DBO}_5 / (\text{m}^3 \cdot \text{j})$ pour des rendements proches de 90 % sur la pollution carbonée.

2. Lit immergé fixé (biofiltre) : Ce procédé permet une concentration de la biomasse épuratrice par utilisation d'un milieu granulaire fin et l'apport d'oxygène par insufflation d'air. L'ouvrage de clarification est supprimé.

- **Principe :** Les biofiltres se présentent comme des filtres garnis en matériau de granulométrie suffisamment faible pour obtenir un effet de filtration efficace. Lors du fonctionnement, le

biofiltre se colmate progressivement du fait du développement de la biomasse et des matières en suspension retenues. Des lavages périodiques sont donc nécessaires.

- **Intérêt** : La technique des biofiltres permet de concentrer une biomasse active, ce qui accroît les cinétiques d'élimination de la pollution
- **Domaine d'application** : Les biofiltres se placent après une décantation primaire (traitement secondaire) ou après un traitement biologique type boues activées (traitement tertiaire) pour éliminer des matières en suspension, matières oxydables, nitrification-dénitrification (en traitement secondaire) ;
- **Technologie et dimensionnement** : le biofiltre est composé de lit granulaire (1 à 4 m de hauteur) repose sur un plancher crépiné et l'alimentation de l'eau à traiter est réalisée soit à flux descendant [procédé Biocarbone (OTV) (figure 18)], soit à flux ascendant [procédé Biofor (Degrémont), (figure 19)]. La granulométrie du matériau est comprise entre 2 et 6 mm suivant le niveau de traitement recherché.

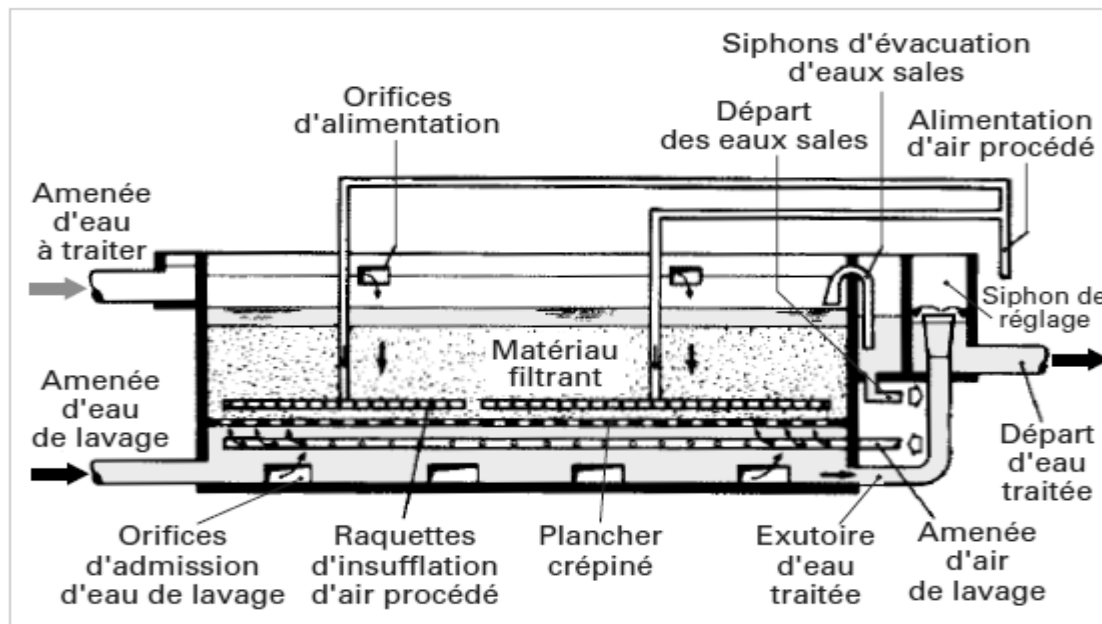


Figure 18 : Biofiltre à flux descendant biocarbone (Degrémont)

3. Les bio-disques (les disques biologiques)

▪ **Principe** : Ce procédé consiste à alimenter en eau usée, préalablement décantée voire tamisée, une cuve contenant des disques en rotation sur un axe horizontal. Ces disques sont les supports d'un développement de microorganismes épurateurs (biofilm).

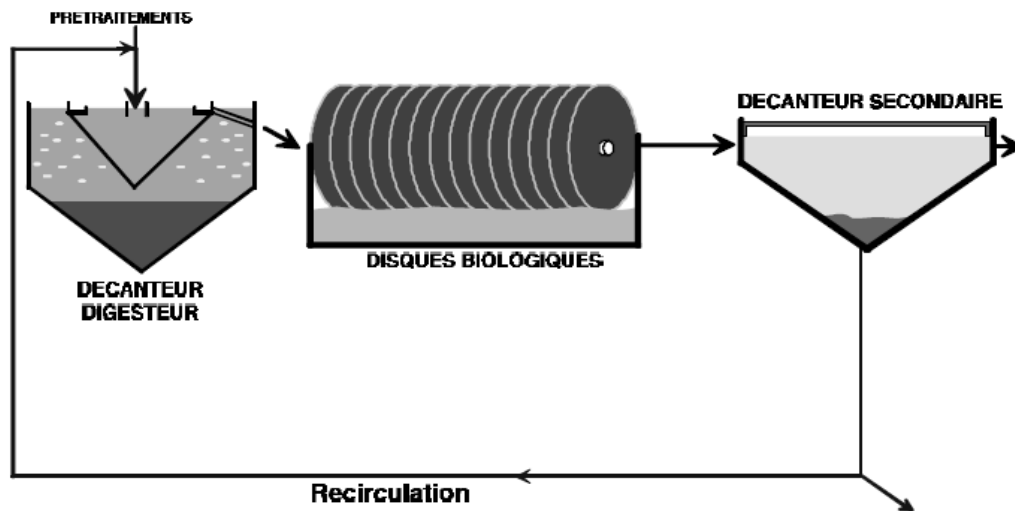


Figure 19 : Schéma de principe d'une filière type de disques biologiques

Dispositions constructives

- La biomasse est fixée sur des disques en rotation immergés à 40 % dans l'eau à traiter
- L'espace entre le fond de la cuve et le bas du support devra être compris entre 10 et 25 cm pour limiter les dépôts.
- L'épaisseur du biofilm 1 à 3 mm
- diamètre des disques 2 à 4 m
- vitesse de rotation 1 à 2 t/minute
- l'espacement entre les disques 2 à 3 cm
- Le fond de la cuve doit être en pente vers une purge en point bas.
- Les mises en service en plein hiver sont à éviter.



Figure 20 : disque biologique rotatif

V. Traitement complémentaires

V.1. Le traitement des boues

Il existe différents types de boues selon l'étape de traitement des eaux duquel elles sont issues. On rencontre ainsi des boues primaires, secondaires et des boues physico-chimiques. Trois étapes de traitement sont ici distinguées : la réduction de la teneur en eau via l'épaississement et la déshydratation, la stabilisation et l'hygiénisation.

1. **L'épaississement et déshydratation des boues** : il permet de réduire trois à six fois le volume des boues, réduisant ainsi les coûts de stockage, d'élimination et de transport. Cet épaississement peut se faire soit par simple égouttage, par flottation comme présenté sur la Figure 22, par centrifugation ou par voie gravitaire au moyen d'un concentrateur. Cette étape a pour effet d'augmenter la proportion en matières sèches dans les boues.



Figure 22 : Etape d'épaississement des boues par flottation

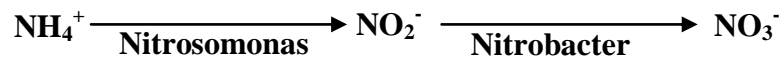
La déshydratation est une étape de réduction de volume d'eau également, mais encore plus poussée que l'épaississement. Au moyen de centrifugeuses, filtres-presses ou des filtres à bandes, la siccité,

2. **La stabilisation** : Les boues d'épuration sont composées de matières organiques dégradables, de matières minérales et d'organismes pathogènes. La stabilisation induit la stabilisation du caractère fermentescible des boues, en dégradant les matières organiques ou en bloquant les réactions. On distingue, en effet, différents procédés de stabilisation : par voie aérobie, anaérobie, et chimique. La stabilisation par voie aérobie peut se faire dans des bassins d'aération. Le procédé s'effectue en deux étapes majeures : la première durant laquelle la matière organique fraîche est dégradée à hautes températures (50 à 70 °C) sous l'action de bactéries. Cette élévation de température est essentiellement d'origine biologique due à l'activité microbienne ; la deuxième phase dite de maturation est une phase de dégradation moins soutenue. C'est après la phase de maturation que le compost peut être utilisé comme

amendement pour les sols. La stabilisation par voie chimique est également employée et se réalise par chaulage. Contrairement au compostage, le chaulage ne transforme pas la matière organique mais bloque toute évolution des boues par augmentation du pH. Les boues sont ainsi déshydratées et stabilisées (blocage de tous les micro-organismes provoquant l'arrêt des fermentations et l'émission de mauvaises odeurs). Comme son nom l'indique, la digestion anaérobie permet la digestion de l'essentiel de la matière organique contenue dans les boues.

V.2. Mécanisme de l'élimination biologique de l'azote : L'élimination de l'azote repose sur la nitrification de NH_4^+ , qui est transformé en NO_3^- .

- 1. La nitrification biologique :** Dans un premier temps, les ions ammonium sont nitrifiés à l'aide de deux bactéries :

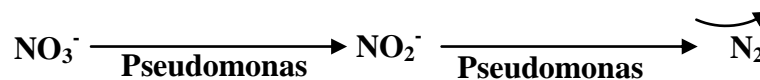


La nitrification dépend de plusieurs facteurs, dont les principaux sont :

- **La charge massique :** le développement des bactéries autotrophes est plus lent que celui des bactéries hétérotrophes.
- **la concentration en oxygène dissous (influence forte) :** On considère généralement qu'une concentration d'au moins 2 mg O_2/l est souhaitable.
- **la température :** se situe autour de 30°C.
- **le pH :** en dehors de la gamme 6,0 à 9,6, le procédé de nitrification est totalement inhibé.
- **le phosphore :** minimum de 0,5 mg/l.

- 2. La dénitrification biologique :** La dénitrification consiste en la réduction des nitrates formés en azote gazeux par des bactéries hétérotrophes placées dans un milieu pauvre en oxygène.

Les principaux facteurs influençant la dénitrification sont :

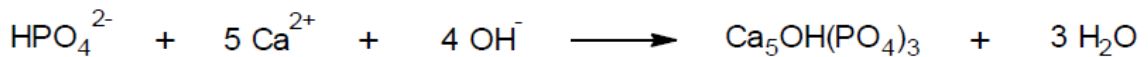
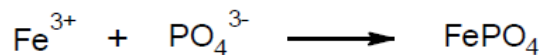
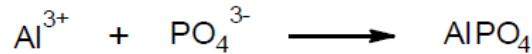


- **le substrat :** la concentration en carbone est un facteur limitant dans la mesure où un apport insuffisant entraîne une dénitrification incomplète.
- **la concentration en oxygène dissous :** Il faut donc une absence totale d'oxygène.
- **la température :** l'optimum se situe dans la gamme 25 à 30°C, mais le processus peut avoir lieu entre 5 et 50 °C.
- **le pH :** l'efficacité de la dénitrification diminue fortement en dehors de la gamme 6,0 à 8,0, avec un optimum se situant aux alentours de 7,0 – 7,5.

Pour une bonne dénitrification, il faut un rapport pollution carbonée $\text{DBO}_5/\text{NO}_3^-$ minimal >2

V.3. La déphosphoration : Il est nécessaire de limiter l'apport de phosphore dans les eaux urbaines. Il existe deux types de déphosphorations : le premier est la déphosphoration chimique qui est plus adaptée aux petites installations, la seconde est la déphosphoration bactériologique plus adaptée aux grandes installations.

- 1. Déphosphoration chimique :** Il s'agit d'une précipitation des phosphates par des sels de fer ou d'aluminium, ou encore par de la chaux ; on obtient alors des précipités insolubles de phosphates métalliques, comme le montrent les réactions chimiques suivantes :



Pour éliminer 1 g de P, il faut : 1,8 à 5,4 g de Fe soit, exprimé par exemple en FeCl_3 pur, de 5,2 à 15,7 g ou 0,87 à 2,61 g d'Al soit, exprimé en sulfate d'alumine, de 9,3 à 28 g de produit commercial $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3, 18 \text{H}_2\text{O}]$. La précipitation chimique du phosphore peut se réaliser à plusieurs étapes dans la filière de traitement :

- 2. Déphosphoration biologique :** Le métabolisme des bactéries fait intervenir le phosphore au niveau des phénomènes régissant le stockage ou l'utilisation de l'énergie (figure 22). Il suffit alors éliminer les bactéries pour éliminer du phosphore. Cela est possible par ultrafiltration par exemple.

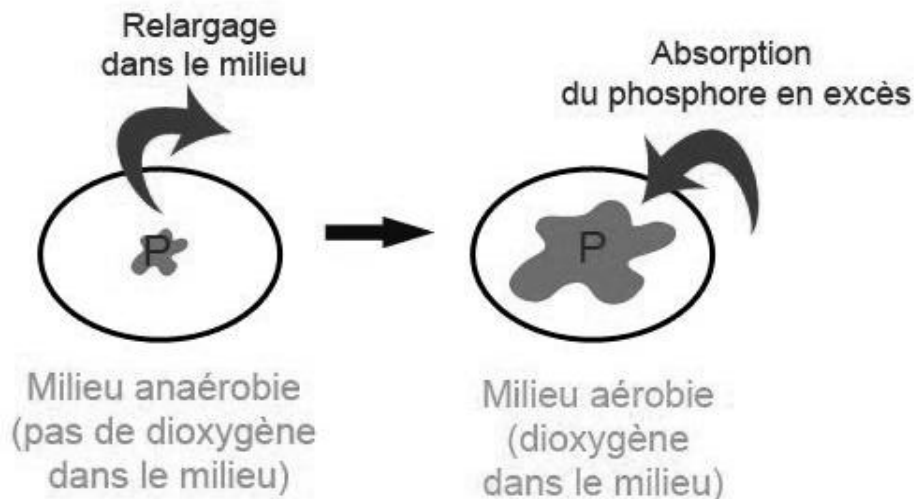


Figure 22 : Processus de déphosphatation biologique

V.4. Désinfection : La réduction de la pollution bactériologique des effluents avant rejet dans le milieu récepteur peut se justifier dans un certain nombre de cas : protection sanitaire des zones de baignade et de loisirs, protection sanitaire des zones littorales, réutilisation d'effluents à des fins d'irrigation, etc. Les germes pathogènes présents dans les effluents sont très divers ; ils restent cependant peu nombreux par rapport aux germes d'origines tellurique et fécale non pathogènes qui les accompagnent.

- L'utilisation du **chlore** est la plus ancienne mais elle présente des contraintes de transport et de manutention. Pour agir correctement, le chlore impose d'une part que l'eau soit préalablement bien épurée et, d'autre part, qu'un temps de contact de 30 min soit respecté. Le chlore se combine à l'ammoniac contenu dans l'eau pour former des chloramines qui deviennent alors l'agent désinfectant. Les doses habituellement adoptées se situent entre 5 et 10 g/m³ de chlore.
- Dérivé du chlore, le **bioxyde de chlore** (ClO₂) peut être produit directement sur le site. Plus puissant que le chlore en termes d'efficacité désinfectante, il agit directement sur les germes pathogènes. Toutefois, sa mise en œuvre est très délicate et nécessite une surveillance continue et permanente.
- L'**ozone** offre un large spectre d'action. Il est efficace aussi bien contre les virus que contre les bactéries et agit avec un temps de contact de courte durée (10 min). Produit sur site, il nécessite pour son exploitation du personnel qualifié. Les doses habituellement adoptées se situent entre 2 et 5 g/m³ d'ozone.
- **La désinfection aux ultraviolets** : Le principe d'action des UV repose sur le fait que les rayons ultraviolets sont des ondes électromagnétiques qui correspondent à une gamme de longueur d'onde comprise entre 100 et 400 nm. L'absorption de ces rayons par les micro-organismes provoque une modification de leur ADN qui bloque toute répllication du matériel génétique et engendre leur mort. La puissance des lampes varie selon les techniques entre 3 kW et 16 kW.

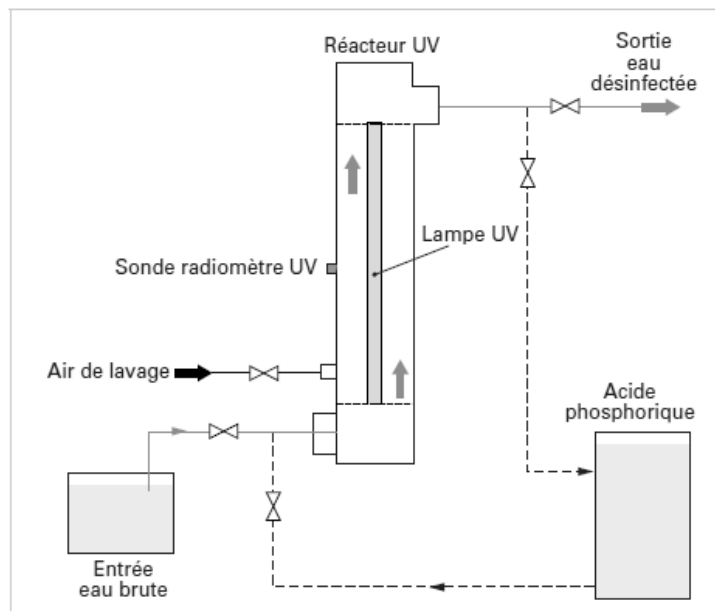


Figure 23: Schéma de principe d'une désinfection UV avec une lampe moyenne pression (procédé Uvaster®) (OTV)