

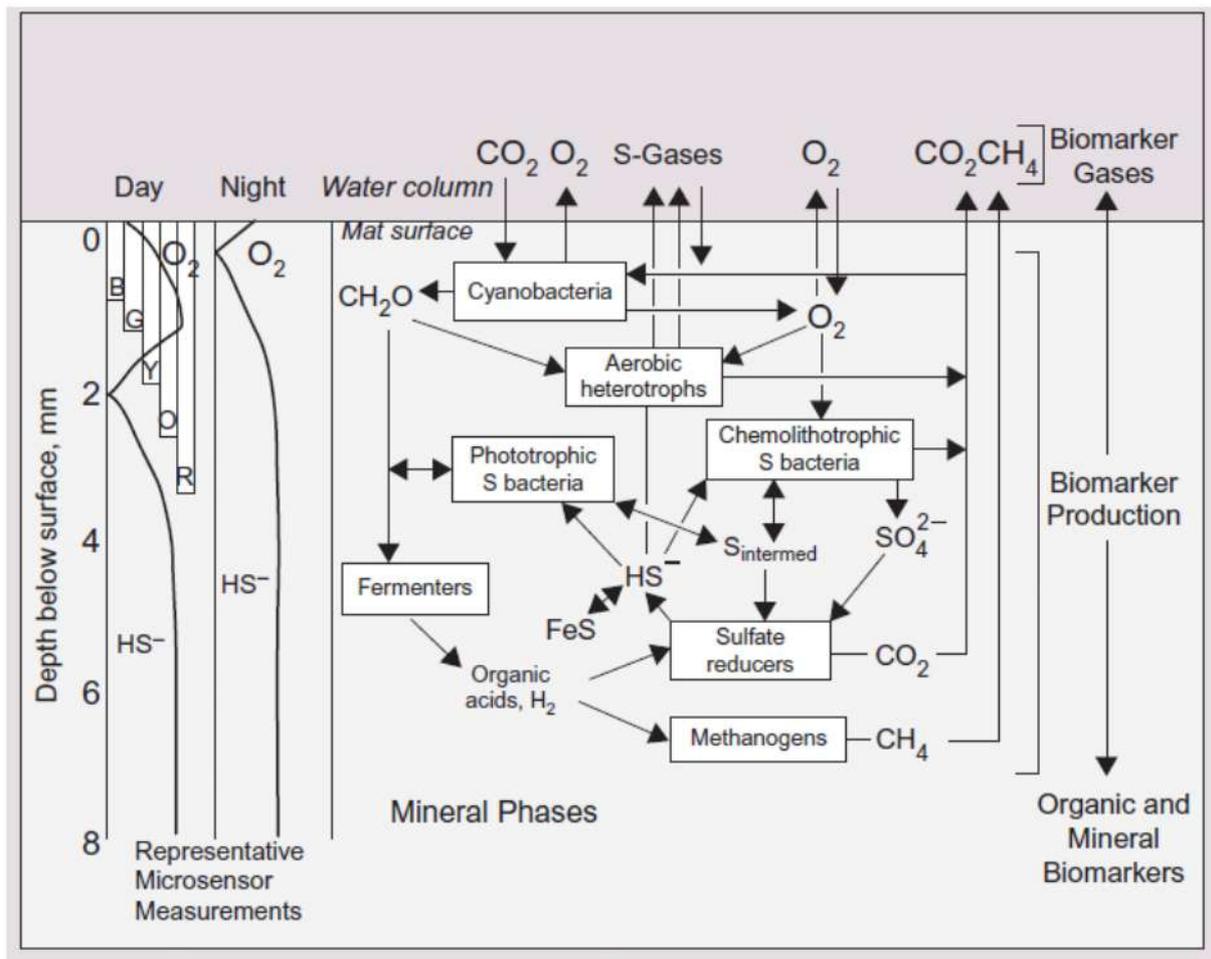
Chapitre I : La microbiologie des eaux

- Les eaux naturelles
- Les eaux usées
- Les eaux brutes et leur potabilité

Le domaine **de la microbiologie aquatique** couvre divers types de milieux aquatiques, notamment les eaux douces, estuariennes et marines, les eaux souterraines, les zones humides et les sédiments aquatiques.

La majorité de notre planète est aquatique : plus de 80 % de la surface de la Terre est aquatique, et le volume d'habitat dans les systèmes aquatiques est vaste, couvrant une gamme d'environnements. Ces habitats regorgent de vie microbienne. Les micro-organismes sont des moteurs clés des cycles biogéochimiques de la planète, ce qui implique un rôle important pour les microbes aquatiques. Alors que la forêt amazonienne est surnommée le poumon de la planète, environ 50 % de l'oxygène que vous respirez est en réalité produit par la photosynthèse de producteurs primaires microbiens aquatiques. En outre, les microbes constituent la base des chaînes alimentaires aquatiques, qui fournissent environ 15 % des protéines mondiales, ce pourcentage devrait devenir encore plus important à l'avenir. L'eau elle-même dans les environnements aquatiques est une ressource vitale, fournissant de l'eau potable, ainsi que pour l'agriculture, la production d'électricité et pratiquement toutes les industries. Toutefois, les microbes aquatiques peuvent être considérés comme des contaminants. Pour l'eau potable, la contamination par des agents pathogènes fait qu'environ 11 % de la population mondiale n'a toujours pas accès à l'eau potable.

Le plancton, du grec ancien *Plagtós* qui signifie « errant », est un organisme qui vit suspendu dans la colonne d'eau emporté par les courants, avec peu ou pas de capacité à contrôler sa position horizontale. Il existe trois groupes fonctionnels de plancton, chacun comportant des membres microbiens : le phytoplancton, le bactérioplancton et le zooplancton. Les populations microbiennes pélagiques peuvent être appelées bactérioplancton (bien que, malgré leur nom, elles incluent les archéens ainsi que les bactéries), et comprennent les photoautotrophes, les chimioautotrophes et les hétérotrophes. Le phytoplancton est le plancton photoautotrophe, qui comprend les procaryotes (cyanobactéries) et les eucaryotes (algues, notamment les dinoflagellés unicellulaires et les diatomées). Le zooplancton est un plancton hétérotrophe plus grand, comprenant des protozoaires et des organismes plus grands tels que les copépodes.



1 Milieux aquatiques naturels

1.1 Environnements d'eau douce

Les environnements d'eau douce, tels que les sources, les rivières, les ruisseaux et les lacs, sont ceux qui ne sont pas directement influencés par les eaux marines. La science qui se concentre sur l'étude des habitats d'eau douce s'appelle la limnologie, et l'étude des micro-organismes d'eau douce s'appelle la microlimnologie. Il existe deux types d'environnements d'eau douce : **l'eau courante**, y compris les sources, les ruisseaux et les rivières ; et **l'eau stagnante**, y compris les lacs, les étangs et les tourbières. Ces environnements d'eau douce ont des caractéristiques physiques et chimiques très différentes et, par conséquent, des communautés et activités microbiennes différentes.

1.1.1 Sources, ruisseaux et rivières

Les sources se forment partout où l'eau souterraine atteint la surface de la Terre. Les micro-organismes, notamment les bactéries et les algues, sont souvent les seuls habitants des sources. En général, les bactéries photosynthétiques et les algues dominent les sources, avec

des communautés allant de 10^2 à 10^8 organismes/ml. Ces producteurs primaires sont présents dans les concentrations les plus élevées (10^6 à 10^9 organismes/ml) le long des bords les moins profonds de la source et en association avec les surfaces rocheuses, là où la lumière est disponible et où les nutriments inorganiques sont en concentrations les plus élevées.

1.1.2 Les lacs

Les lacs comptent parmi les environnements d'eau douce les plus complexes. Les lacs peuvent avoir une composition chimique unique et former des environnements extrêmes ; les exemples incluent les lacs salés, les lacs amers riches en $MgSO_4$, les lacs de borax riches en $Na_2B_4O_7$ et les lacs soda riches en $NaHCO_3$.

Les lacs abritent de vastes populations productrices primaires et secondaires qui interagissent de manière dynamique.

La productivité primaire dans les eaux peu profondes proches du rivage est élevée, assurée principalement par les algues et secondairement par les cyanobactéries. Les eaux centrales des lacs sont dominées par le phytoplancton, qui forme des gradients de communautés distincts en fonction de la longueur d'onde et de la quantité de lumière qui pénètre jusqu'à une profondeur donnée. Un exemple de phototrophe microbien lacustre avec une niche spécialisée est *le Chlorobium*, une bactérie soufrée verte. *Le chlorobium* peut utiliser des longueurs d'onde de lumière plus longues que de nombreux autres phototrophes, ce qui signifie qu'il peut vivre plus profondément. Ce sont également des organismes anaérobies, utilisant du H_2S plutôt que du H_2O pour la photosynthèse. Ainsi, ils ont un avantage compétitif en établissant une niche à des profondeurs plus basses dans la colonne d'eau ou même à la surface des sédiments, où seules de petites quantités de lumière pénètrent, où peu ou pas d'oxygène est présent, mais du sulfure d'hydrogène est disponible.

En plus de leurs populations phototrophes, les lacs possèdent de vastes communautés hétérotrophes. En effet, les ruisseaux, les rivières et les lacs contiennent également des champignons, des protozoaires et des virus, qui interagissent et contribuent au fonctionnement du réseau trophique : les champignons servent de parasites aux algues planctoniques, empêchant la surpopulation et permettant à la lumière de pénétrer plus loin dans la colonne d'eau, alors que les protozoaires et les virus sont d'importants prédateurs des micro-organismes aquatiques.

1.2 Les eaux marines

Les eaux marines représentent environ 97 % du milieu aquatique de la Terre. Ceci explique l'attention portée à cet environnement. Les micro-organismes planctoniques des océans et des mers servent de nourriture aux organismes supérieurs et constituent la base de la chaîne alimentaire.

Le plancton marin comprend des algues, des bactéries, des champignons, des virus et des protozoaires. Les algues sont responsables de la productivité primaire dans la colonne d'eau tandis que les bactéries jouent un rôle crucial dans le cycle des nutriments (N, P, S) et des métaux dans la colonne d'eau et dans les sédiments.

Le milieu marin abrite un large éventail de micro-organismes, dont beaucoup peuvent être exploités pour des applications biotechnologiques, notamment des produits pharmaceutiques, des enzymes, des suppléments nutritionnels et d'autres produits utiles.

1.3 Microbiologie souterraine

L'objectif de la **microbiologie souterraine** est l'étude de la microbiologie des sédiments et des eaux souterraines. Les micro-organismes existent dans des environnements souterrains s'étendant jusqu'à une profondeur d'environ trois kilomètres et éventuellement au-delà de cette profondeur. Les sources d'énergie, tant organiques qu'inorganiques, se trouvent à des concentrations relativement très faibles, suffisantes pour soutenir les micro-organismes dans cet environnement oligotrophe. Les micro-organismes souterrains affichent une activité métabolique très faible et restent dans un état de dormance pendant de très longues périodes (des milliers, voire des millions d'années).

2 Microbiologie des eaux usées

Les objectifs du **traitement des eaux usées** sont :

- la réduction des composés organiques (c'est-à-dire la réduction de la DBO) et des matières en suspension dans les eaux usées, l'élimination/la réduction des nutriments (N, P) et des métaux toxiques pour prévenir ou au moins réduire la pollution des eaux réceptrices,
- et élimination/inactivation des micro-organismes pathogènes et des parasites.

Les micro-organismes (bactéries, champignons, protozoaires) jouent un rôle crucial dans le traitement biologique des eaux usées.

2.1 Matière organique

Les eaux usées domestiques sont principalement une combinaison d'excréments humains, d'urine et d'« eaux grises ». Les eaux grises proviennent du lavage, du bain et de la préparation des repas. L'eau provenant de diverses industries et entreprises peut également pénétrer dans le système.

La quantité de matière organique présente dans les déchets domestiques détermine le degré de traitement biologique requis. Trois tests sont utilisés pour évaluer la quantité de matière organique : **la demande biochimique en oxygène (DBO) ; demande chimique en oxygène (DCO); et le carbone organique total (COT)**. L'objectif majeur du traitement des déchets ménagers est la réduction de la DBO, qui peut être soit sous forme solide (matières en suspension), soit soluble. La DBO est la quantité d'oxygène dissous consommée par les micro-organismes lors de l'oxydation biochimique des matières organiques (DBO carbonée) et inorganiques (ammoniac).

2.2 Types et nombres de micro-organismes généralement trouvés dans les eaux usées domestiques non traitées

Organisme	Concentration (par ml)
Coliformes totaux	$10^5 - 10^6$
Coliformes fécaux	$10^4 - 10^5$
Streptocoques fécaux	$10^3 - 10^4$
Entérocoques	$10^2 - 10^3$
<i>Shigella</i>	Présent
<i>Salmonella</i>	$10^0 - 10^2$
<i>Clostridium perfringens</i>	$10^1 - 10^3$
Kystes de <i>Giardia</i>	$10^{-1} - 10^2$
Kystes de <i>Cryptosporidium</i>	$10^{-1} - 10^1$
Ovules d'helminthes	$10^{-2} - 10^1$
Virus entériques	$10^1 - 10^2$

2.3 Traitement des eaux usées

L'objectif principal du traitement des eaux usées est l'élimination et la dégradation des matières organiques dans des conditions contrôlées. Le traitement complet des eaux usées

comprend trois étapes principales : le traitement primaire, secondaire et tertiaire, comme le montre la figure.

2.3.1 Traitement primaire

Le traitement primaire est la première étape du traitement des eaux usées municipales et implique la séparation physique des **gros solides** du flux de déchets. Lorsque les eaux usées brutes entrent dans la station d'épuration, elles passent à travers une grille métallique qui élimine **les gros débris**, tels que les branches. Un tamis mobile filtre ensuite **les petits objets** tels que les bouteilles de plastique, après quoi un bref séjour dans un bac à sable permet au sable et au gravier de se déposer. Le flux de déchets est ensuite pompé dans le bassin de décantation primaire (également appelé bassin de décantation ou clarificateur), où environ la moitié des matières organiques en suspension se déposent au fond sous forme de boues. Les boues obtenues sont appelées boues primaires. Les agents pathogènes microbiens ne sont pas efficacement éliminés des effluents lors du processus primaire, bien qu'une certaine élimination se produise.

2.3.2 Traitement secondaire

Le traitement secondaire consiste en **une dégradation biologique**, dans laquelle les matières en suspension restantes sont décomposées par des micro-organismes et le nombre d'agents pathogènes est réduit. À cette étape, l'effluent issu du traitement primaire subit généralement un traitement biologique dans un lit filtrant ruisselant, un bassin d'aération (ou un bassin d'épuration).

2.3.2.1 Filtres percolateurs

Dans les stations d'épuration modernes, le filtre percolateur est composé d'unités en plastique. Dans les usines plus anciennes ou dans les pays en développement, le filtre est simplement un lit de pierres ou de feuilles de plastique ondulées à travers lesquelles s'égouttent les eaux usées. Il s'agit de l'un des premiers systèmes introduits pour le traitement des déchets biologiques. L'effluent est pompé via un pulvérisateur aérien sur le lit filtrant, où les bactéries et autres micro-organismes ont formé un biofilm sur les surfaces du filtre. Ces micro-organismes interceptent la matière organique lorsqu'elle s'écoule et la décomposent de manière aérobie.

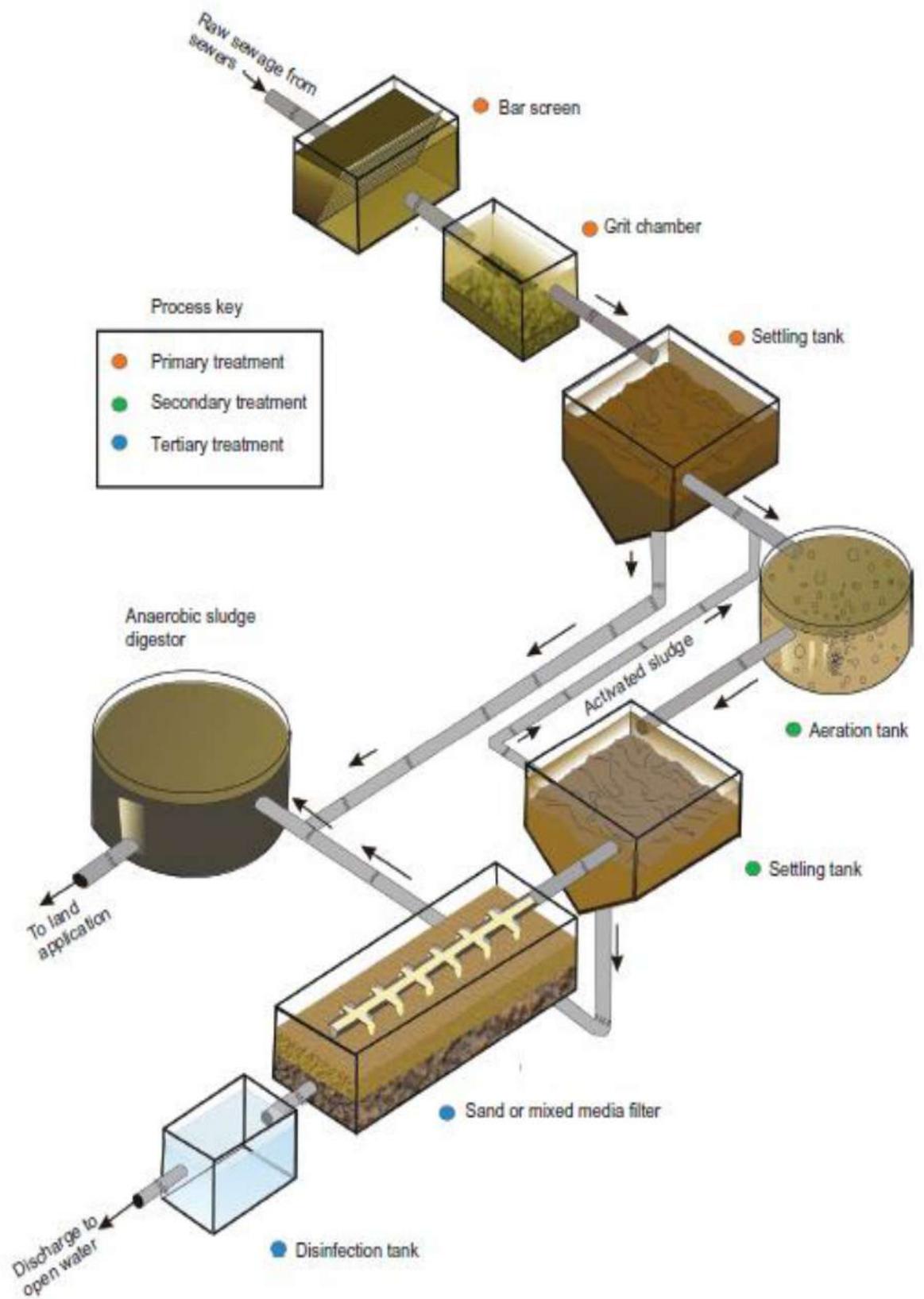


FIGURE 25.3 Schematic of the treatment processes typical of modern wastewater treatment.



FIGURE 25.4 Removal of large debris from sewage via a “bar screen.”

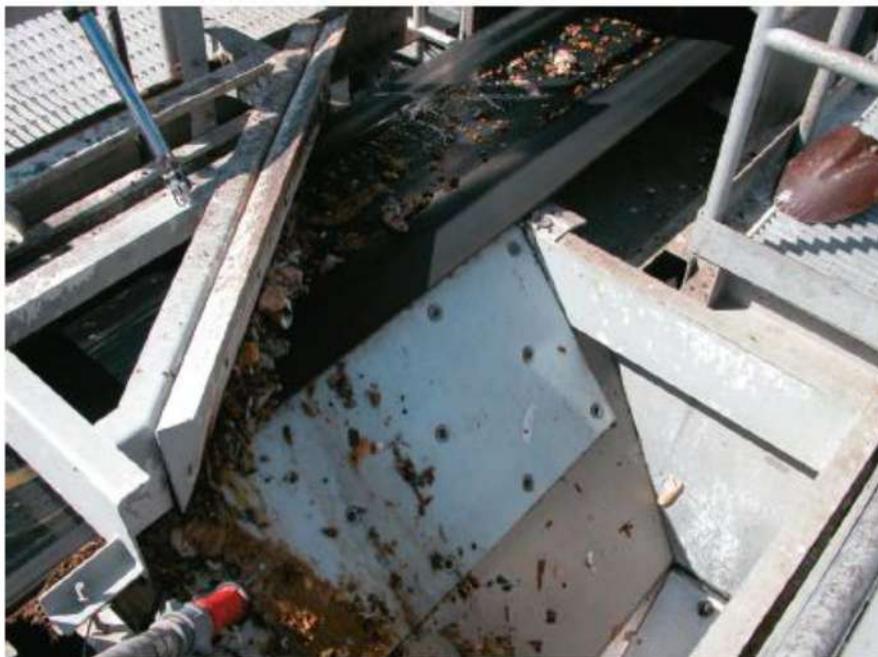


FIGURE 25.5 Removal of small debris via a “moving screen.”

Lorsque la matière organique traverse le filtre percolateur, elle est convertie en biomasse microbienne, qui forme un biofilm épais sur le média filtrant. Le biofilm qui se forme à la surface du média filtrant est appelé film zooléal. Il est composé de bactéries, champignons, algues et protozoaires. Au fil du temps, l’augmentation de l’épaisseur du biofilm entraîne une diffusion limitée de l’oxygène vers les couches plus profondes du biofilm, créant ainsi un

environnement anaérobie à proximité de la surface du média filtrant. L'élimination de la DBO par les filtres percolateurs est d'environ 85 % pour les filtres à faible débit.



FIGURE 25.7 A trickling filter bed. Here, rocks provide a matrix supporting the growth of a microbial biofilm that actively degrades the organic material in the wastewater under aerobic conditions.

2.3.2.2 Digestion par bassin d'aération

La digestion par bassin d'aération est également connue sous le nom de procédé à **boues activées**. Aux États-Unis, les eaux usées sont le plus souvent traitées par ce procédé. Les effluents du traitement primaire sont pompés dans un réservoir et mélangés à une boue riche en bactéries appelée boue activée. L'air ou l'oxygène pur pompé à travers le mélange favorise la croissance bactérienne et la décomposition de la matière organique. L'effluent est ensuite acheminé vers un bassin de décantation secondaire, où l'eau est siphonnée par le haut du réservoir et les boues sont évacuées par le bas. Une partie des boues est utilisée comme inoculum pour les effluents primaires. Le reste des boues, appelées boues secondaires, est éliminé. Ces boues secondaires sont ajoutées aux boues primaires issues du traitement primaire et sont ensuite digérées de manière anaérobie pour produire des biosolides. La concentration d'agents pathogènes est réduite dans le processus de boues activées par des micro-organismes antagonistes ainsi que par adsorption ou incorporation dans les boues secondaires.



FIGURE 25.8 Secondary treatment: an aeration basin.

2.3.3 Traitement tertiaire

Le traitement tertiaire des effluents implique une série d'étapes supplémentaires après le traitement secondaire pour réduire davantage les matières organiques, la turbidité, l'azote, le phosphore, les métaux et les agents pathogènes. La plupart des processus impliquent un certain type de traitement physico-chimique tel que la coagulation, la filtration, l'adsorption de matières organiques sur charbon actif, l'osmose inverse et une désinfection supplémentaire. Le traitement tertiaire des eaux usées est pratiqué pour une protection supplémentaire de la faune après leur rejet dans les rivières ou les lacs.



FIGURE 25.6 Three clarifiers (foreground—blue) where suspended organic solids settle out as primary sludge. Also see the two anaerobic sludge digesters in the background (white).

3 Microbiologie de l'eau potable

Les microbiologistes de l'eau potable cherchent à comprendre les mécanismes à l'origine de l'élimination/inactivation des agents pathogènes et parasites microbiens, des toxines cyanobactériennes, des algues et des micro-organismes responsables des problèmes de goût et d'odeur, par divers processus impliqués dans les usines de traitement de l'eau. Ces procédés comprennent la coagulation-floculation, la filtration (sable, charbon actif), l'adoucissement de l'eau, la désinfection (ex. chloration, ozonation, irradiation UV) et, plus récemment, le traitement biologique de l'eau.

Les rivières, ruisseaux, lacs et aquifères souterrains sont autant de sources potentielles d'eau potable. Aux États-Unis, toute l'eau provenant de sources de surface doit être filtrée et désinfectée pour protéger le consommateur contre la menace des contaminants microbiens. Un tel traitement des eaux de surface améliore également les valeurs esthétiques telles que le goût, la couleur et les odeurs. De plus, les eaux souterraines sous l'influence directe des eaux de surface telles que les rivières voisines doivent être traitées comme s'il s'agissait d'un approvisionnement de surface. Cependant, dans de nombreux cas, les eaux souterraines ne nécessitent aucun traitement ou seulement une désinfection avant d'être utilisées comme eau potable. En effet, le sol lui-même a agi comme un filtre pour éliminer les micro-organismes pathogènes, réduisant ainsi les risques de contamination des réserves d'eau potable.

De nombreuses études en laboratoire ont montré que la microflore des eaux naturelles et des eaux usées est antagoniste à la survie des pathogènes entériques. Il a été démontré, par exemple, que les pathogènes entériques survivent plus longtemps dans l'eau stérile que dans l'eau des lacs, des rivières et des océans.

3.1 Traitement de l'eau potable

Les procédés modernes de traitement de l'eau constituent des barrières, ou des lignes de défense, entre le consommateur et les maladies d'origine hydrique. Ces barrières, lorsqu'elles sont mises en œuvre sous la forme d'une succession de processus de traitement, sont connues collectivement sous le nom de train de processus de traitement (Figure 28.2).

- ✚ Le processus de traitement le plus simple, appelé **chloration**, consiste en un seul processus de traitement, la désinfection par chloration (Figure 28.2A).

- ✚ Le processus de traitement appelé **filtration** comprend une chloration suivie d'une filtration sur du sable ou du charbon, qui élimine les particules de l'eau et réduit la turbidité (Figure 28.2B).
- ✚ Au niveau de traitement suivant, **la filtration en ligne**, un coagulant est ajouté avant la filtration (Figure 28.2C). La coagulation modifie l'état physique et chimique des matières dissoutes et en suspension et facilite leur élimination par filtration.
- ✚ Les usines de traitement de l'eau plus conservatrices ajoutent une étape de floculation (agitation) avant la filtration, ce qui renforce l'agglomération des particules et améliore encore l'efficacité de l'élimination dans un processus de traitement appelé **filtration directe** (Figure 28.2D). En filtration directe, la désinfection est améliorée par l'ajout de chlore (ou d'un désinfectant alternatif, tel que le dioxyde de chlore ou l'ozone) au début et à la fin du processus.
- ✚ Le processus de traitement le plus courant des approvisionnements en eaux de surface, connu sous le nom de **traitement conventionnel**, comprend la désinfection, la coagulation, la floculation, la sédimentation, la filtration et la désinfection (Figure 28.2E).

Coagulation

La coagulation implique l'ajout de produits chimiques pour faciliter l'élimination des matières dissoutes et en suspension par sédimentation et filtration. Les coagulants primaires les plus courants sont les sels métalliques hydrolysants, notamment l'alun $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}]$, sulfate ferrique $[\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3]$ et chlorure ferrique (FeCl_3) . Des produits chimiques supplémentaires qui peuvent être ajoutés pour améliorer la coagulation sont des molécules organiques chargées appelées polyélectrolytes comme ceux-ci les polyacrylamides. Ces produits chimiques assurent l'agrégation des matières en suspension lors de l'étape suivante du traitement, la floculation. La coagulation peut également éliminer les composés organiques et inorganiques dissous. Les sels métalliques hydrolysants ajoutés à l'eau peuvent réagir avec la matière organique pour former un précipité, ou ils peuvent former des particules de floculation d'hydroxyde d'aluminium ou d'hydroxyde ferrique sur lesquelles les molécules organiques s'adsorbent. Les substances organiques sont ensuite éliminées par sédimentation et filtration, ou par filtration seule si une filtration directe ou une filtration en ligne est utilisée.

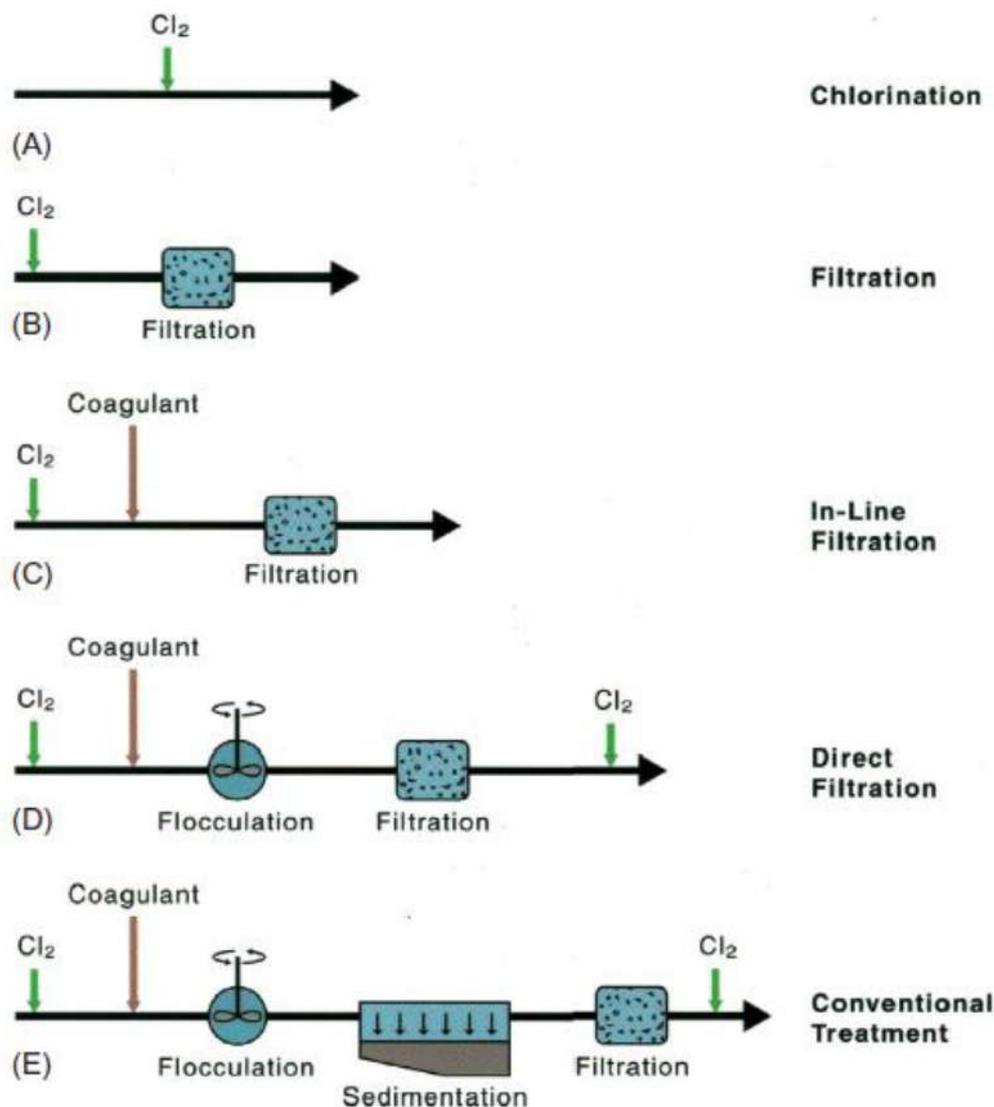


FIGURE 28.2 Typical water treatment process trains.

Flocculation

La flocculation est un processus purement physique dans lequel l'eau traitée est doucement agitée pour augmenter les collisions interparticulaires, favorisant ainsi la formation de grosses particules. Après une flocculation adéquate, la plupart des agrégats décantent pendant les 1 à 2 heures de sédimentation. Les micro-organismes sont piégés ou adsorbés sur les particules en suspension et éliminés lors de la sédimentation.

Sédimentation et filtration

La sédimentation est un autre processus purement physique, impliquant la sédimentation gravitationnelle de particules en suspension plus denses que l'eau. L'effluent résultant est

ensuite soumis à **une filtration rapide ou lente** pour séparer les solides encore en suspension dans l'eau. Les filtres rapides sont généralement constitués de 50 à 75 cm de sable et/ou d'antracite, d'un diamètre compris entre 0,5 et 1,0 mm. Les filtres lents à sable contiennent une couche de sable (60 à 120 cm de profondeur) soutenue par une couche de gravier (30 à 50 cm de profondeur).

Désinfection

Ensemble, la coagulation, la floculation, la sédimentation et la filtration éliminent efficacement de nombreux contaminants. Tout aussi important, ils réduisent la turbidité, produisant une eau d'une bonne clarté et donc une efficacité de désinfection améliorée. Si elles ne sont pas éliminées par de telles méthodes, les particules peuvent abriter des micro-organismes et rendre la désinfection finale plus difficile. La filtration constitue une barrière particulièrement importante dans l'élimination des parasites protozoaires *Giardia lamblia* et *Cryptosporidium*. Les kystes et oocystes de ces organismes sont très résistants à l'inactivation par les désinfectants, de sorte que la désinfection seule ne peut pas être utilisée pour prévenir les maladies d'origine hydrique. Cependant, en raison de leur petite taille, les virus et les bactéries peuvent passer par le processus de filtration. L'élimination des virus par filtration et coagulation dépend de leur fixation sur les particules (adsorption), qui dépend de la charge superficielle du virus. Ceci est lié au point isoélectrique (le pH auquel le virus n'a pas de charge) et dépend à la fois de la souche et du type. Les variations des propriétés de surface ont été utilisées pour expliquer pourquoi différents types de virus sont éliminés avec des efficacités différentes par coagulation et filtration. Ainsi, la désinfection reste l'ultime barrière contre ces micro-organismes.

Généralement, la désinfection s'effectue par l'ajout d'un oxydant. Le chlore est de loin le désinfectant le plus couramment utilisé pour traiter l'eau potable, mais d'autres oxydants, tels que les chloramines, le dioxyde de chlore et l'ozone, sont également utilisés. Bien que les ultraviolets puissent être utilisés, ils ne laissent aucun résidu et un désinfectant secondaire (c'est-à-dire du chlore) est généralement ajouté.