

Stage CNFPT :
Bases de dimensionnement des stations d'épuration rurales
17-19 mai 2004, Toulouse

Éléments de conception et de dimensionnement des lits bactériens

Y . RACAULT et F. SEURET

Cemagref Bordeaux, UR Qualité des Eaux

Généralités

Le lit bactérien est un procédé d'épuration biologique aérobie. L'épuration de la phase liquide repose sur l'activité biochimique de micro-organismes qui dégradent la matière organique en présence d'oxygène. Cette oxydation transforme une partie de la matière organique en eau, gaz carbonique et énergie. Le reste est transformé en biomasse, concentrée sous forme de boues.

Dans le lit bactérien, les micro-organismes sont retenus sur un support, appelé garnissage, sous la forme d'un biofilm. Il s'agit d'une couche dense de bactéries, qui ont la capacité de produire des polymères leur permettant de former un film et d'adhérer à un support. Le garnissage est arrosé avec l'eau usée à traiter, après une décantation primaire ou un simple tamisage fin. Le temps de passage de l'eau au sein du système est très court, de l'ordre de quelques minutes.

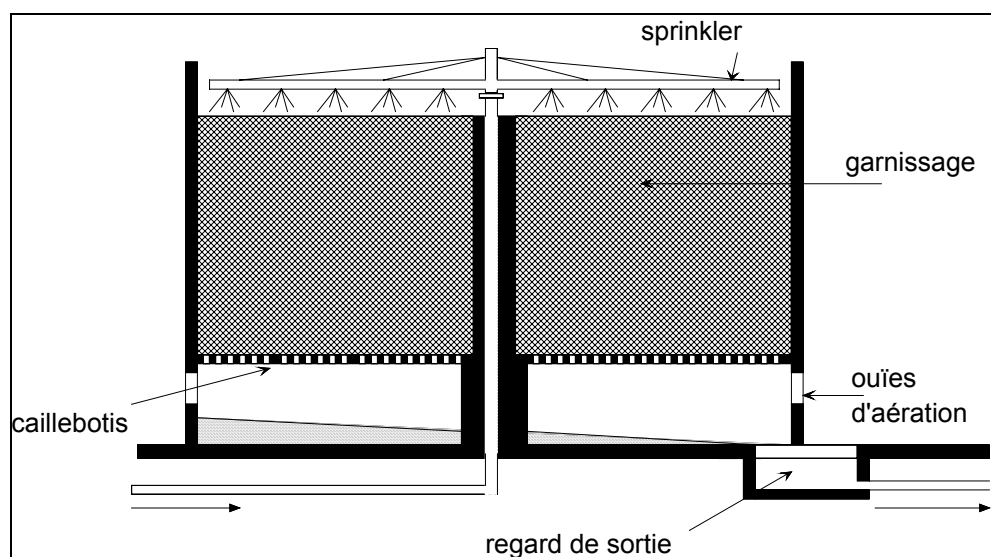


Figure 1. Lit bactérien.

Les effluents contiennent de la matière assimilable sous forme dissoute et particulaire. Dans la partie dissoute se trouve, la plupart du temps, une fraction immédiatement assimilable par les micro-organismes et une autre plus difficilement biodégradable. Ces différentes fractions n'ont pas le même devenir au sein du lit bactérien.

La matière organique facilement biodégradable ainsi que les substrats minéraux nécessaires à l'activité des bactéries sont transportés au sein du biofilm par diffusion. Ce phénomène de transport est particulièrement important. Les performances du système sont plus souvent limitées par la vitesse de diffusion au sein du biofilm, que par la cinétique de transformation des substrats par les micro-organismes.

La matière organique soluble difficilement biodégradable et en suspension peut être assimilée par adsorption à la surface du biofilm et hydrolyse. Le processus d'hydrolyse est mal connu, et l'on ne sait pas dans quelle mesure il peut être réalisé au sein des lits bactériens.

L'oxygène nécessaire à l'activité des micro-organismes est amené par convection naturelle (ou, exceptionnellement, forcée) d'air à travers l'espace vide du garnissage. Le transfert de

l'oxygène vers les micro-organismes se fait en plusieurs étapes de transport. Dans un premier temps, l'oxygène doit atteindre la surface du biofilm, soit directement, soit par diffusion à travers le film liquide qui ruisselle. Ensuite, il doit être transporté dans l'épaisseur du biofilm par diffusion. Dans certains cas, le transport de l'oxygène peut être le facteur limitant de l'activité de la biomasse.

Lorsque le matériau de garnissage n'est pas encore colonisé, le film bactérien est obtenu en laissant s'écouler l'effluent sur le garnissage pendant un temps suffisant. Deux modes de fonctionnement peuvent apparaître, en fonction des conditions d'exploitation :

- érosion continue de la biomasse,
- érosion de la biomasse avec détachement périodique du biofilm.

Lorsque les conditions d'arrosage le permettent, la force de cisaillement exercée par le film liquide en écoulement est suffisante pour maintenir une épaisseur constante de biofilm. L'épaisseur du film bactérien atteint un état d'équilibre, dans lequel la quantité de biomasse détachée par l'érosion est égale à sa vitesse de croissance.

Si au contraire les conditions d'arrosage ne permettent pas une érosion suffisante, la croissance du film bactérien n'est pas freinée. Il finit par atteindre une épaisseur telle que la diffusion de l'oxygène n'est plus possible jusqu'à la base du film. Il se crée alors une zone anaérobie profonde où des germes spécifiques se développent. Un équilibre s'établit entre la zone anaérobie et la zone aérobie, jusqu'à épuisement des réserves de la zone profonde. La masse du biofilm augmente et des métabolites gazeux se dégagent à sa base, qui diminuent la surface de contact avec le garnissage. Finalement le film se détache et le processus recommence.

Ces cycles de croissance suivie de décrochage sont peu favorables au traitement, car ils peuvent altérer temporairement la qualité du traitement, s'ils se produisent simultanément sur une large surface. De plus, la présence de micro-organismes anaérobies n'augmente pas l'élimination de la pollution. Un détachement continu et uniforme est donc préférable à un décrochage périodique. A ce titre, les conditions d'arrosage sont un facteur important pour expliquer les performances, car elles déterminent le détachement du biofilm.

La décantation primaire est nécessaire avec les lits bactériens à garnissage cailloux, pour éviter les problèmes de colmatage du matériau. Avec les garnissages en plastique, dont le taux de vide est important, il est possible de se passer du décanteur primaire à condition de placer en amont du lit un dégrillage fin. Ce dispositif doit être capable de retenir les objets de taille supérieure à 3 mm, en absence de décanteur primaire. Sauf cas particulier, il est nécessaire de disposer un clarificateur avant le rejet, afin de recueillir les boues produites par le lit bactérien.

Le recyclage de l'effluent traité en tête de réacteur est souvent pratiqué. Contrairement aux boues activées, il ne s'agit pas d'une condition indispensable au fonctionnement, mais le recyclage peut améliorer les performances. L'augmentation du débit provoquée par le recyclage réduit le risque qu'une partie du garnissage ne soit pas atteinte par l'effluent. L'efficacité du traitement, qui dépend de la surface de garnissage disponible, est ainsi maintenue au maximum. L'augmentation de débit permet aussi d'obtenir la force de cisaillement nécessaire à l'érosion continue de la biomasse, évitant les problèmes de décrochage périodique. Enfin, le recyclage permet à la matière organique qui n'aura pas été dégradée lors d'un premier passage d'être exposée à nouveau à l'action de la biomasse. Ce

dernier aspect est toutefois probablement secondaire dans un lit bactérien bien dimensionné et exploité.

Le lit bactérien est un procédé dans lequel on n'observe pratiquement jamais de problème d'adhésion de la biomasse, ni de problèmes d'aération. La seule difficulté est la conduite hydraulique du procédé, qui consiste à jouer sur le débit de recirculation et la fréquence d'arrosage. La conduite hydraulique est déterminante pour le contrôle de l'épaisseur de la biomasse, le mouillage complet du matériau, et permet de lutter contre le développement de mouches, le risque de colmatage et, éventuellement, les odeurs. Le recyclage est aussi un poste important de dépense énergétique. Le devenir du procédé sera probablement lié aux efforts de recherche et de développement qui seront consentis pour optimiser les conditions d'arrosage et de débit en tête de lit.

Paramètres de fonctionnement

Expression de la charge

Les lits bactériens sont placés dans différentes catégories, en fonction de la charge hydraulique et organique qu'ils reçoivent. La charge hydraulique (ou vitesse superficielle) est égale au débit admis sur lit, y compris le recyclage, divisé par la surface horizontale du lit (A) (à ne pas confondre avec la surface développée du garnissage). La charge hydraulique est communément exprimée en $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, parfois abrégé en m/h . La charge hydraulique est souvent notée C_h .

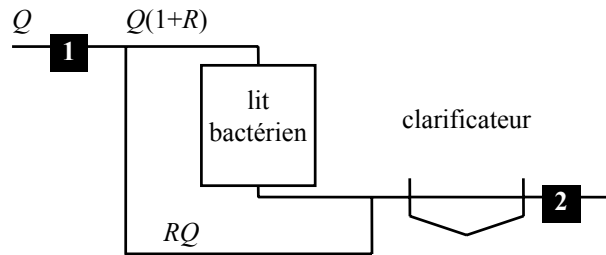
$$C_h = \frac{Q(1+R)}{A}$$

avec C_h = charge hydraulique [m/h]
 Q = débit d'effluent à traiter [m^3/h]
 R = taux de recyclage [-]
 A = surface horizontale du lit [m^2]

La charge organique en DBO et DCO est exprimée en kg par m^3 de matériau et par jour, ou en kg par m^2 de surface développée et par jour. La charge en N est plus souvent exprimée en $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{j}$ (surface développée).

Lorsque l'effluent traité est recyclé en tête, le calcul de la charge peut devenir assez complexe. La pratique générale est d'ignorer l'effet du recyclage, mais le supplément de charge peut être relativement important et, éventuellement, avoir une influence sur le fonctionnement.

La charge en DBO représente la « pollution carbonée », en excluant la demande en oxygène pour la nitrification. Elle comprend la DBO soluble et la DBO des matières en suspension. L'action du lit bactérien concerne essentiellement la DBO soluble, et une partie de la DBO colloïdale. Le décanteur primaire et le clarificateur assurent une partie de l'élimination de la DBO particulaire, en retenant les matières en suspension présentes dans l'effluent. C'est pourquoi l'efficacité d'un lit bactérien est en principe exprimée en incluant l'action du clarificateur.



$$B_{V,DBO} = \frac{24QC_{DBO,1}}{V}$$

avec $B_{V,DBO}$ = charge volumique appliquée en DBO [$\text{g}_{\text{DBO}}/\text{m}^3 \cdot \text{j}$]

Q = débit de l'effluent à traiter [m^3/h]

V = volume de garnissage [m^3]

$C_{DBO,1}$ = concentration en DBO soluble et particulaire de l'effluent à traiter [mg/l]

$$E_{DBO} = 1 - \frac{C_{DBO,2}}{C_{DBO,1}}$$

avec E_{DBO} = efficacité d'élimination de la DBO [-]

$C_{DBO,1}$ = concentration en DBO soluble et particulaire de l'effluent à traiter [mg/l]

$C_{DBO,2}$ = concentration en DBO soluble et particulaire de l'effluent clarifié [mg/l]

Sur certaines installations, les lits bactériens sont placés en série. Si un décanteur intermédiaire est intercalé entre les deux lits, on parle de lit bactérien à deux étages. En absence de décanteur intermédiaire, le système est peu différent d'un lit bactérien unique ayant une hauteur égale à la somme des hauteurs des deux lits. Par rapport à un lit seul, la ventilation peut être améliorée, mais en général ce n'est pas un paramètre limitant.

Anciennement, les lits bactériens étaient classés en faible, moyenne, forte et très forte charge, avec des valeurs correspondantes pour les charges hydrauliques et organiques. Le développement des matériaux de garnissage en plastique a permis d'admettre des charges bien supérieures, grâce à un taux de vide important éliminant les risques de colmatage, et à une grande surface développée. La plupart des lits de faible charge à forte charge utilisent un recyclage de l'effluent traité, généralement avant clarification. Le tableau suivant donne les gammes de charge.

Tableau 1. Gammes de charges des lits bactériens. Ancienne classification.

| | faible charge | moyenne charge | forte charge | très forte charge |
|---------------------------------|---------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| garnissage | traditionnel | traditionnel | traditionnel | plastique |
| charge hydraulique m/h | 0,04 - 0,2 | 0,2 - 0,4 | 0,4 - 1,5 | 0,5 - 3,5 |
| charge DBO kg/m ³ .j | 0,08 - 0,25 | 0,25 - 0,50 | 0,50 - 2,5 | 0,5 - 2,5 |
| Recyclage | parfois | Souvent | Toujours | Souvent |
| Hauteur m | 1,5 - 2,5 | 1,5 - 2,5 | 1 - 2,5 | ≤ 12 |
| Elimination de la DBO* | 80 - 85 | 50 - 70 | 40 - 80 | 65 - 85 |
| Azote ammoniacal | bien nitrifié | nitrif. partielle | nitrif. absente | nitrif partielle |

Note * : A titre indicatif ; après clarification

Au lieu de ces catégories, il est préférable de classer les lits bactériens en fonction de l'usage auxquels ils sont destinés. Les 4 grands types d'application sont :

- le lit bactérien de traitement primaire, qui permet d'abattre 30 à 45% de la DBO, dont 50 à 75% de la DBO soluble,
- le lit de traitement « complet » qui produit un effluent aux normes en DBO et en MES (niveau D2, circulaire du 17 février 1997)
- le lit bactérien de traitement simultané de l'azote ammoniacal et la DBO, qui produit un effluent avec nitrification poussée ;
- le lit de nitrification tertiaire, qui permet de nitrifier des effluents préalablement traités.

Garnissage

Les garnissages plastiques sont apparus vers 1975. Ils permettent d'appliquer sur les lits bactériens des charges bien supérieures à celles qui sont pratiquées avec les matériaux traditionnels (cailloux, graviers, ...). Les trois propriétés intéressantes d'un matériau de garnissage sont :

- sa surface spécifique (notée A_S ou a),
- son taux de vide (noté ϵ),
- son poids spécifique.

Une surface spécifique plus élevée permet l'accrochage de plus de biomasse, pour un volume de matériau donné. L'augmentation du taux de vide permet d'appliquer des charges hydrauliques plus importantes, facilite la circulation de l'air et diminue le risque de colmatage. Enfin, le poids spécifique plus faible des garnissages plastique permet de réduire le génie civil nécessaire à leur support, et de réaliser des grandes hauteurs d'empilage.

Il existe deux types principaux de remplissages plastiques : les garnissages « en vrac », souvent composés d'anneaux de PVC, de polyéthylène ou de polypropylène de formes diverses. L'écoulement à l'intérieur de ces garnissages se rapproche de ce qui se passe dans les lits à garnissage traditionnel. L'autre type de matériau, dit ordonné, est présenté sous forme de modules à empiler (Flocor, Plasdek, ...), de tubes (Cloisonyle), ou de bandelettes suspendues (Sessil).

Tableau 2 : caractéristiques de quelques garnissages commerciaux ou traditionnels

| nom commercial | type | poids volumique (kg/m ³) | surface spécifique (m ² /m ³) | taux de vide (%) |
|--------------------------|-----------------|--------------------------------------|--|------------------|
| Flocor E | ordonné | 38 | 90 | 98 |
| Plasdek B27060 | ordonné | 35 | 100 | 95 |
| Sessil | ordonné | 8 à 12 | 100 à 300 | |
| Surfpac | ordonné | 65 | 80 | 94 |
| Cloisonyle ϕ 102,5 | ordonné (tubes) | 70 | 180 | |
| Cloisonyle ϕ 80 | ordonné (tubes) | 88 | 225 | 94 |
| <i>Cailloux 25-75 mm</i> | traditionnel | 1400* | 65* | 50* |
| <i>Brique creuse</i> | traditionnel | 800* | 80* | 50* |
| Actifil 90 | vrac | 44 | 100 | 95 |
| Biopac | vrac | 75 | 124 | 93 |
| Filterpak 1120 M | vrac | 45 | 95 | 96 |
| Filterpak CR50 | vrac | 56 | 220 | 95 |
| Filterpak | vrac | 40 | 118 | 93 |
| Flocor R | vrac | 40 | 230 | 97 |
| Flocor RC | vrac | 70 | 330 | 95 |
| NSW | vrac | 41 | 73 | 96 |

note * : environ

Surface spécifique, surface accessible et surface mouillée

Les vendeurs de garnissages plastique mettent parfois en avant une surface spécifique élevée. Cependant :

- toute la surface spécifique n'est pas nécessairement accessible au fluide,
- toute la surface potentiellement accessible au fluide n'est pas toujours mouillée.

On définit ainsi deux facteurs d'accessibilité du garnissage : l'accessibilité statique et l'accessibilité dynamique. L'accessibilité statique est le rapport entre la surface potentiellement accessible au fluide, et la surface spécifique. Il est proche de 1 pour des matériaux cailloux et modulaires (Type Plasdek par exemple). Pour les garnissages plastiques en vrac ce rapport n'est plus que de 0,6 à 0,7, autrement plus de 30% de la surface de ces garnissages est inutilisable.

L'accessibilité dynamique représente la fraction de surface accessible qui est mouillée par le liquide. Contrairement à l'accessibilité statique, l'accessibilité dynamique n'est pas un paramètre intrinsèque du garnissage mais dépend de la distribution des débits locaux dans le garnissage, autrement dit de la charge hydraulique et des conditions d'arrosage. L'étude réalisée sur plusieurs garnissages commerciaux a montré que, plus la surface spécifique du garnissage est élevée, plus il nécessite des débits locaux élevés pour être correctement mouillé. La croissance de la biomasse est également un facteur de réduction de la surface active du matériau. Il est donc important d'imposer des conditions hydrauliques permettant de maîtriser l'épaisseur de biomasse.

Le recyclage

Dans la plupart des installations, l'effluent traité subit un retour en tête du lit bactérien. Cette opération est appelée recyclage, ou parfois « recirculation ». Le rapport entre le débit recyclé et le débit de l'effluent est appelé taux de recyclage. Dans les lits

bactériens à remplissage traditionnel, le recyclage pourrait améliorer les performances d'élimination de la DBO. Avec les matériaux plastique, le recyclage permet d'augmenter la charge hydraulique, ce qui améliore le mouillage du matériau. Toutefois, cette fonction pourrait aussi être assurée par une augmentation de la force d'irrigation.

Configuration

De nombreux schémas ont été utilisés pour la recirculation en lit bactérien. A notre connaissance, les études comparatives des divers systèmes de recyclage sont peu nombreuses et ne permettent pas de conseiller une technique particulière. Aussi le choix doit être guidé par des considérations d'ordre pratique.

Lit à simple étage

Le schéma suivant (figure 2) montre des configurations courantes pour un lit bactérien simple étage. La configuration (a) permet de regrouper dans le même poste de pompage les fonctions de recyclage de l'effluent traité et de retour des boues. Tous les autres schémas nécessitent deux postes de pompage séparés. Les schémas (a) et (d) nécessitent de dimensionner le décanteur primaire pour le débit d'entrée plus le débit de recyclage ; dans le cas (c) c'est le clarificateur qui reçoit un débit plus important.

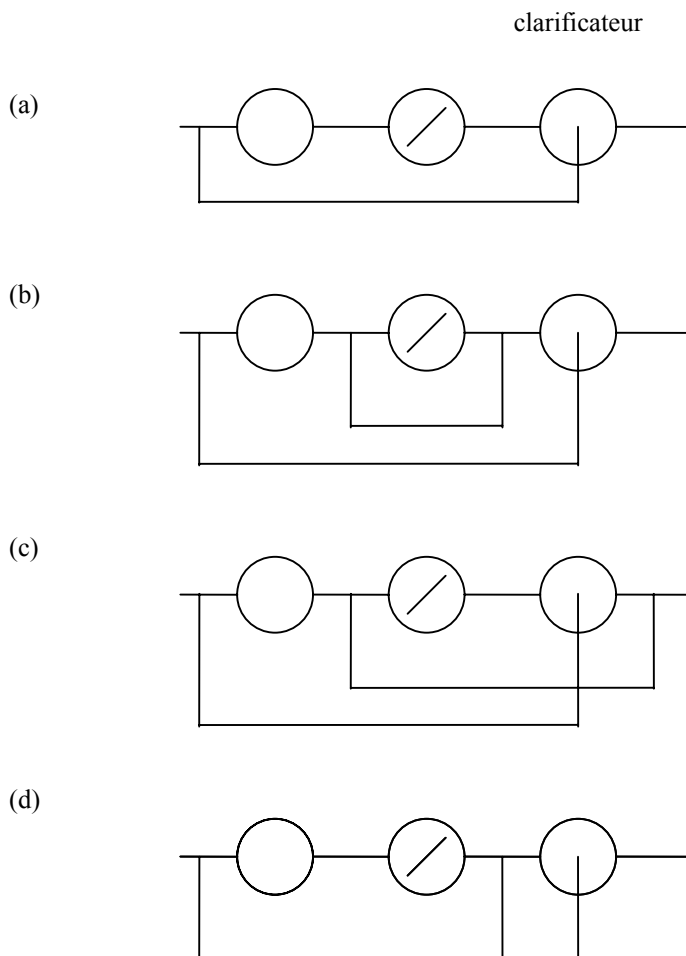


Figure 2 : Schémas de recyclage à un étage

La configuration (b) permet de dimensionner le décanteur primaire et le clarificateur pour le débit des eaux brutes seulement, ce qui peut produire une économie importante sur le coût d'investissement. L'effluent recyclé contient une partie des boues détachées du lit bactérien.

Lorsqu'une partie des boues secondaires est recyclée sur le lit, la concentration en MES de l'effluent peut fortement augmenter. Des études sur pilote ont montré que cela est susceptible de réduire l'efficacité du traitement de la DBO lorsque la concentration en substrat est élevée. Cela n'a pas été confirmé sur des installations réelles. En revanche, il a été confirmé que la nitrification diminue. La forte concentration en MES augmente aussi le risque de colmatage ; c'est pourquoi cette configuration n'est pas conseillée avec les lits à garnissage traditionnel.

Finalement, la configuration (b) peut convenir avec les garnissages plastique, si on ne recherche pas une nitrification poussée.

Lit à 2 étages

Avec deux étages, l'étendue des combinaisons possibles est assez large. La figure 3 donne quelques exemples. Les choix à effectuer portent sur la construction ou non d'un décanteur primaire, d'un décanteur intermédiaire, ainsi que sur la position du ou des recyclages.

Le décanteur primaire est souvent remplacé par un dégrillage fin lorsque le premier lit bactérien est à garnissage plastique. Cela permet de réaliser une économie importante sur l'investissement. Si le second lit bactérien est à garnissage traditionnel, il convient de placer au moins un décanteur (primaire ou intermédiaire) en amont pour diminuer les risques de colmatage (configurations a, b, d).

Le décanteur intermédiaire est parfois également supprimé, ce qui a pour conséquence que de la boue détachée du premier lit est admise sur le second lit. Cela augmente la charge sur le second lit, et pourrait avoir une influence sur son écologie. On obtiendrait ainsi un fonctionnement plus proche d'un lit à simple étage (dont la hauteur serait la somme des hauteurs des deux lits) qu'un véritable système à double étage. Or, l'observation du fonctionnement des lits bactériens nitrifiants à garnissage traditionnel en Grande-Bretagne a montré que, à volume de matériau égal, la nitrification est plus performante sur deux étages (avec décanteur intermédiaire). Cette constatation, qui n'a pas été signalée pour l'élimination de la DBO, rejoint les observations de plusieurs auteurs qui ont montré que la nitrification est d'autant meilleure que l'effluent est pauvre en MES. Lorsqu'on recherche une nitrification poussée sur le deuxième étage, le clarificateur intermédiaire semble donc indiqué.

Certaines configurations du recyclage conduisent à faire passer des boues sur les lits. Les boues sont ainsi en contact avec une forte concentration d'oxygène, ce qui permettrait d'augmenter leur minéralisation. Le recyclage des boues peut se faire sur le premier étage seulement (d) ou sur les deux étages à la fois (c). Deux stations à lits bactériens plastique ordonné ont été observées en France avec ce mode de fonctionnement, et elles donnent satisfaction pour le traitement de la DBO, avec une nitrification partielle. Avec deux étages en garnissage plastique ordonné, la

configuration (c) peut donc être choisie, avec l'avantage de ne nécessiter qu'un seul clarificateur, dimensionné pour le débit de l'effluent seulement.

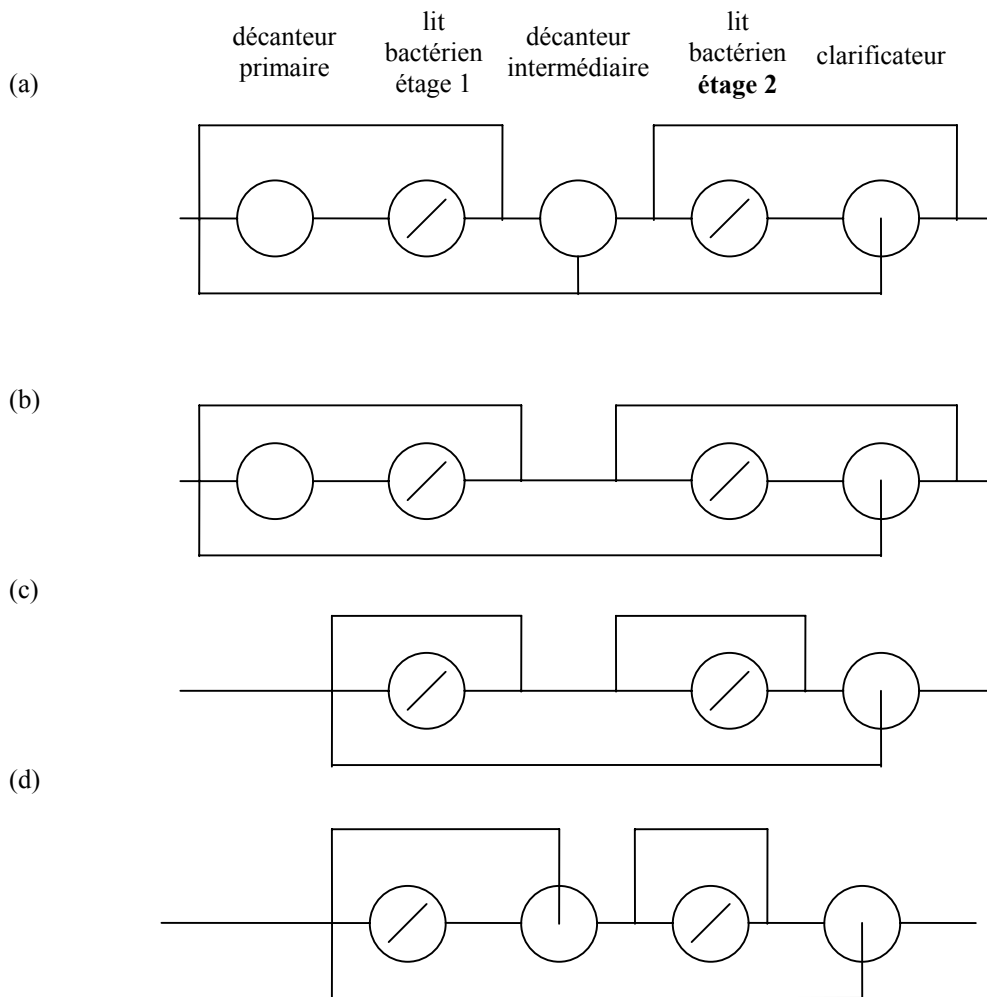


Figure 3. Quelques schémas de recyclage à deux étages.

Le fonctionnement du recyclage peut être assuré de diverses manières. On trouve le plus souvent deux (ou plusieurs) pompes, permettant en général :

- le recyclage en période de faible débit seulement (horloge)
- un recyclage à débit constant en permanence
- un débit constant sur le lit (donc un débit de recyclage variable avec le débit d'entrée, souvent contrôlé par une vanne à flotteur)

Effets du recyclage

Le recyclage est réputé augmenter l'efficacité de l'élimination de la DBO. On peut avancer diverses explications.

- La matière organique effectue plusieurs passages au sein du lit. Cela augmente la probabilité de rencontre entre le substrat à éliminer et la variété de micro-organismes capable de le dégrader.

- Les études hydrauliques sur pilote et en grandeur réelle montrent que le recyclage augmente le temps de séjour moyen au sein du lit.
- Si l'effluent recyclé passe à travers un décanteur ou un clarificateur, cela tamponne les variations de charge appliquées au lit bactérien sur un cycle de 24 heures. Cela aide à l'adaptation de l'activité bactérienne au moment des variations de charge.
- L'effluent traité est riche en oxygène, ce qui diminue la septicité des eaux brutes, particulièrement lorsque l'effluent recyclé est admis en amont du décanteur primaire.
- L'augmentation de charge hydraulique provoquée par le recyclage améliore la distribution du liquide dans le filtre, permet de lutter contre le colmatage, et réduit les nuisances comme les mouches ou les escargots.
- Enfin, et c'est peut-être le plus important, le recyclage augmente la charge hydraulique appliquée sur le filtre. Cela permet d'améliorer l'accessibilité dynamique du garnissage, autrement dit la surface accessible au fluide.

L'effet d'amélioration du mouillage est surtout perceptible aux faibles charges hydrauliques. Au delà d'une certaine valeur de la charge hydraulique, presque toute la surface accessible est mouillée, et une augmentation du débit n'apporte pas d'amélioration sensible.

Un autre effet du recyclage est de diluer l'effluent brut. Or, une étude sur pilote sur garnissage plastique a montré que l'efficacité de l'élimination de la DBO peut chuter pour des concentrations inférieures à 40 mg/l en DBO soluble. Ceci pourrait s'expliquer par une modification de la cinétique de dégradation des substrats. A faible concentration, la réaction est d'ordre 1 ou $\frac{1}{2}$, et sa vitesse varie donc dans le même sens que la concentration. A forte concentration, la réaction est d'ordre zéro, et est donc indépendante de la concentration. La limite entre « faible » et « forte » concentration, pour le passage d'une cinétique à l'autre, serait vers 40 mg/l de DBO, ce qui correspond bien au phénomène observé en pilote. Il est donc préférable de ne pas pratiquer un taux de recyclage qui conduit à une dilution excessive de l'effluent d'entrée.

Les taux de recyclages utilisés en pratique sont fréquemment compris entre 0,5 et 5. Il semble qu'un taux de recyclage supérieur à 4 ne puisse rien apporter, et représente donc un surcoût énergétique.

L'arrosage

Un des effets positifs de la recirculation est d'augmenter la surface mouillée du garnissage. Il est possible d'obtenir le même effet en réduisant la vitesse de rotation du système d'arrosage (*sprinkler*) en dessous de la vitesse de propulsion hydraulique habituelle.

Des travaux ont montré depuis longtemps qu'il existe une fréquence d'arrosage ou une vitesse de rotation des bras permettant d'optimiser l'efficacité des lits. La diminution de la fréquence de rotation des bras (entre 10 et 30 minutes par tour) permet d'augmenter la charge hydraulique instantanée appliquée localement sur le garnissage.

Plusieurs explications ont été suggérées pour expliquer l'amélioration des performances :

- meilleur mouillage du garnissage conduisant à l'utilisation de toute la surface accessible au fluide
- probablement, amélioration du transfert d'oxygène
- contrôle de l'épaisseur du biofilm permettant d'éviter les décrochages anarchiques ainsi que le développement de zones anaérobies dans le film bactérien
- meilleure distribution de la biomasse au sein du lit (colonisation de la zone inférieure)

L'augmentation des débits locaux permet de réduire de manière importante la quantité de biofilm dans le lit. Cette réduction d'épaisseur ne doit pas faire craindre une baisse de performance, car l'épaisseur du biofilm qui est réellement active est très faible.

En revanche, l'augmentation des débits locaux s'accompagne d'une diminution du temps de contact entre l'effluent et la biomasse, susceptible de réduire les performances. La fréquence d'arrosage ne doit donc pas être trop faible ; il existe pour chaque installation une valeur optimum.

Ce n'est que récemment que le concept de force d'irrigation (SK, *Spülkraft*) est apparu en Allemagne. La force d'irrigation du matériau est définie par la relation suivante, dans le cas d'un arrosage rotatif.

$$SK = \frac{1000(q + r)}{60 \cdot a \cdot n}$$

où

SK = intensité de l'arrosage instantané mm d'eau/passage de bras

q + r = charge hydraulique, m³/m².h

a = nombre de bras du sprinkler

n = vitesse de rotation t/mn

Les principaux avantages d'une valeur suffisante de SK sont :

- un contrôle de la croissance de la biomasse et de l'épaisseur de biofilm,
- une meilleure efficacité dans le mouillage
- un effet de curage avec élimination des cycles de détachement important de biofilm.

Les SK observés avec les bras à propulsion hydraulique habituellement utilisés varient entre 2 et 6 mm par bras. Les SK recommandés en pratique varient dans la gamme de 50 à 500 mm par tour. Le retour d'expérience des États Unis est positif : l'adoption de forts SK permet d'améliorer les performances du lit, de réduire les odeurs, et d'éliminer les détachements anarchiques du film bactérien.

Lorsque la vitesse des bras est réduite pour obtenir un SK élevé alors que le lit fonctionnait jusque là avec un faible SK, il se produit un lessivage de la biomasse en excès, qui peut durer de quelques semaines à plusieurs mois. Cela peut temporairement augmenter les MES en sortie de station, ainsi que la DBO, le temps que l'épaisseur de la biomasse se stabilise.

Le SK optimal varie en fonction de divers paramètres, parmi lesquels la charge organique et le matériau utilisé. Un SK trop faible ne permet pas de tirer parti de l'ensemble des bénéfices dus à l'augmentation des débits locaux (meilleur mouillage, épaisseur de biomasse plus faible, ...), tandis qu'un SK trop élevé réduit le temps de contact entre la biomasse et l'effluent à des valeurs trop faibles. Pour réduire les inconvénients liés à la diminution de temps de séjour, il est proposé d'utiliser deux valeurs de SK. La valeur forte (*flushing SK*) permet de réguler l'épaisseur du biofilm. Elle est appliquée en période de faible charge (par exemple la nuit). La valeur faible (*design SK*) n'est pas suffisante pour maintenir l'épaisseur du biofilm, mais permet de garder un mouillage optimal, tout en ayant un temps de séjour long, pendant les périodes de forte charge. La mise en œuvre de ce système nécessite donc une horloge pour commuter entre les SK faibles et forts. Compte tenu des limitations technologiques des systèmes d'entraînement mécanique des bras, le ratio entre les vitesses de rotation lente et rapide ne doit pas dépasser 15:1.

L'épaisseur du biofilm est régulée par un équilibre entre deux facteurs antagonistes :

- d'une part, la vitesse de croissance du biofilm, qui dépend de la charge organique éliminée;
- d'autre part, de la capacité du film liquide à éroder et entraîner une partie du biofilm par les forces de cisaillement induites par l'écoulement, qui dépend entre autres paramètres du SK et de la surface spécifique.

Le SK doit donc être déterminé en fonction de la charge organique appliquée et des caractéristiques du matériau. Jusqu'ici, les recommandations pour le SK ne font pas intervenir les caractéristiques du matériau, faute de données suffisantes. En première approche, le tableau suivant donne les recommandations américaines .

Tableau 3 : Suggestion de SK en fonction de la charge organique

D'après WEF, ASCE 1992 *Design of municipal wastewater treatment plants, volume I*, WEF manual of practise No. 8, ASCE manual and report on engineering practise No. 76, 829 p [0].

| charge organique kg- DBO/m ³ .j | SK faible (<i>design SK</i>) mm/tour | SK fort (<i>flushing SK</i>) mm/tour |
|--|--|--|
| 0,25 | 10 - 100 | ≥ 200 |
| 0,50 | 15 - 150 | ≥ 200 |
| 1,00 | 30 - 200 | ≥ 300 |
| 2,00 | 40 - 250 | ≥ 400 |
| 3,00 | 60 - 300 | ≥ 600 |
| 4,00 | 80 - 400 | ≥ 800 |

Une autre relation a été proposée :

$$\text{flushing } SK = 240 + 125L_B \text{ (autocurage)}$$

$$\text{design } SK = \frac{\text{flushing } SK}{15} \text{ (dimensionnement)}$$

avec L_B = charge organique [kg DBO/m³.j]

La détermination du SK optimal n'est pas aisée, demande une longue période de mise au point et nécessite une bonne connaissance du problème. En fait, la détermination de valeurs de SK optimums en fonction de divers paramètres et il faut se réserver la possibilité de plusieurs réglages.

D'un point de vue technologique, le ralentissement de la vitesse de rotation des bras peut être réalisé à l'aide de moteurs électriques. L'entraînement peut être périphérique, comme pour les ponts de décanteurs, ou central. Pour l'amélioration du fonctionnement des stations existantes, il a aussi été proposé de ralentir la rotation des bras propulsés par la force de réaction hydraulique en pratiquant des trous opposés aux orifices d'aspersion. Bien que cette méthode permette d'améliorer le fonctionnement à moindres frais, elle ne peut être pratiquée que si le lit est alimenté à débit constant et que les orifices des bras sont souvent débouchés. Sinon, la rotation pourrait cesser pour des débits faibles, ou lorsque les trous sont bouchés. Cette méthode ne permet pas non plus d'obtenir des SK très élevés.

Bases de dimensionnement pour le traitement du carbone

La variabilité des contraintes extérieures et principalement de la composition des eaux usées, du climat et la qualité exigée du traitement permet difficilement d'établir des bases de dimensionnement uniques.

En matière d'élimination du carbone trois cas peuvent être différenciés :

- les collectivités de plus de 2000 éq.hab. pour lesquelles, en simplifiant, l'eau traitée doit avoir une DBO inférieure à 25 mg/l,
- les collectivités de moins de 2000 éq.hab. pour lesquelles le "traitement approprié" peut permettre de viser un niveau de qualité moins contraignant (l'absence d'imposition de la nitrification, examinée au plan de l'impact des eaux traitées sur le milieu récepteur, milite pour ne pas fixer de valeur limite en DBO sévère). L'adéquation entre les possibilités des lits bactériens et ce type de réflexion nous conduit à examiner le cas où la qualité imposée au rejet serait de 35 mg/l,
- les cas où le lit bactérien est utilisé à un dégrossissage (1er étage de traitement) destiné à alimenter un étage complémentaire assurant la nitrification. Les bases de dimensionnement conseillées d'un tel lit sont établies pour un deuxième étage à culture fixée, dont l'optimum de fonctionnement suppose un très faible niveau de carbone dans son influent.

S'agissant de recommandations pratiques visant des qualités qui résultent de l'ensemble *traitement primaire - lit bactérien - décanteur secondaire*, nous nous fonderons à la fois sur les séries de résultats nationaux de stations réelles et sur les résultats de la modélisation du groupe européen lit bactérien en prenant en compte le "coefficient de sécurité" motivé notamment par la variabilité des charges à traiter.

Ces valeurs guides de dimensionnement sont retenues conformément à l'optimum fourni par la modélisation sur la base de charges volumiques et en y associant une charge superficielle du décanteur secondaire.

Tableau 4 : Propositions de dimensionnement pour l'élimination de la DBO (étude Union Européenne, 1994)

| | | Bases de dimensionnement selon les objectifs | | |
|---------------|--|--|---------------|--------------------------------------|
| | paramètre | DBO < 25 mg/l | DBO < 35 mg/l | Lit à deux étages (1 ^{er}) |
| Lit bactérien | charge organique kg DBO/m ³ .j | 0.4 | 0.7 | 1 - 1.2 |
| Clarificateur | Vitesse ascensionnelle m ³ /m ² .h | 1 | 1.2 | 1.5 |

Ces valeurs s'écartent notamment des pratiques anglaises et françaises antérieurement pratiquées. Les britanniques semblent en effet avoir pris une grande marge de sécurité et obtiennent d'ailleurs des DBO résiduelles très faibles.

Ces recommandations devraient s'appliquer essentiellement aux matériaux traditionnels et plastiques en vrac; l'adéquation des matériaux ordonnés, notamment ceux ayant la surface spécifique la plus élevée, conduisant à la quasi obligation de lits à deux étages (sauf en dégrossissage) et paraissant peu adaptés aux eaux usées domestiques, pour le seul traitement du carbone.

Concernant la conception générale, quelques recommandations peuvent être rappelées.

Les hauteurs fortes de matériau favorisent le mouillage de la totalité de celui-ci et l'atteinte de vitesses d'autocurage, il semble ainsi préférable de s'approcher de 3 m.

La recirculation nécessaire est variable et nécessite des taux d'autant plus élevés que la charge volumique est forte et que le matériau présente un taux de vide élevé. Un bon point de départ serait de considérer une recirculation minimale de 100 % avec les dimensionnements préconisés.

Bases de dimensionnement pour la nitrification de l'azote

La nitrification en lit bactérien est fonction :

- de la charge volumique appliquée et de la concentration en DBO. Les populations nitrifiantes tendent à dominer quand la DBO est réduite à une concentration inférieure à 50 mg/l.
- de la charge appliquée en azote ammoniacal. La phase d'ammonification doit être réalisée au préalable.
- de la surface développée, mais surtout utile, du matériau. La qualité de mouillage est donc essentielle et la charge hydraulique est un facteur important. Les charges à appliquer demandent des recherches complémentaires pour être optimisées.
- d'une bonne oxygénation du liquide percolant dans le matériau de garnissage ce qui suppose un tirage d'air suffisant.
- de la température. Si la nitrification est bien établie, ce paramètre semble peu jouer au moins pour des climats tempérés et pour des matériaux traditionnels (cas de l'Angleterre par exemple où les charges organiques appliquées sont suffisamment faibles pour permettre une nitrification efficace en hiver).

Suivant les objectifs que l'on veut atteindre, on distinguera plusieurs types de filières permettant soit une nitrification partielle ou poussée en simple étage soit une nitrification dans un lit bactérien positionné en deuxième étage.

Nitrification en simple étage

-Matériau traditionnel

L'analyse statistique des résultats de fonctionnement d'une série de lits bactériens en Angleterre par Thames Water Utilities a permis d'établir une relation liant la concentration en azote ammoniacal en sortie aux charges appliquées.

Avec des charges volumiques inférieures à 0.2 kg DBO/m³.j pour le carbone et inférieures à 0.08 kg NTK/m³.j pour l'azote appliquées sur des matériaux traditionnels (roches) d'une hauteur comprise entre 1.7 et 2.3 m, Thames Water a pu établir la relation suivante :

$$(N - NH_4^+)_s = 210 \cdot C_N \cdot \frac{C_{DBO}}{C_h}$$

$(N - NH_4^+)_s$ = moyenne mensuelle en azote ammoniacal en sortie en mg/l

C_N = moyenne mensuelle en charge en NH_4^+ par unité de surface de matériau en $\text{g/m}^2 \cdot \text{j}$

C_{DBO} = moyenne mensuelle en charge volumique en DBO en $\text{kg DBO/m}^3 \cdot \text{j}$

C_h = moyenne mensuelle en charge hydraulique (recirculation incluse) en m/j

La comparaison des lots de résultats récoltés en hiver et en été n'est pas suffisamment différente pour que l'influence de la température soit notable.

Une autre relation prenant en compte la température a été établie par le CEBEDEAU en Belgique à partir d'un pilote de plusieurs mètres cubes avec garnissage pouzzolane et recevant des charges sensiblement plus élevées en DBO (0.3 - 0.35 $\text{kg DBO/m}^3 \cdot \text{j}$).

$$(\text{N} - \text{NH}_4^+)_s = 0.56 + \frac{244 \cdot C_{\text{DBO}}}{T}$$

avec :

$(\text{N} - \text{NH}_4^+)_s$ = concentration moyenne en azote ammoniacal en mg/l

C_{DBO} = charge moyenne en DBO par unité de surface $\text{g/m}^2 \cdot \text{j}$

T = température moyenne de l'effluent en $^\circ\text{C}$

Ces deux relations conduisent à des résultats différents mais permettent de prédire l'ordre de grandeur de la nitrification en simple étage. Un paramètre essentiel reste cependant l'utilisation optimale de la surface développée par le matériau, on recherchera donc les conditions hydrauliques donnant le meilleur mouillage.

Matériau plastique

Bien qu'on ne puisse utiliser directement la surface théorique développée pour comparer les matériaux entre eux, il apparaît que les garnissages plastiques sont plus performants que les matériaux traditionnels pour une même charge et en utilisant de l'eau décantée. Des charges hydrauliques plus élevées et une hauteur de matériau plus importante sont nécessaires pour l'utilisation optimale du matériau plastique, en particulier pour bénéficier de sa plus grande surface spécifique.

Bases de dimensionnement pour la nitrification en simple étage

Les travaux du groupe européen sur les lits bactériens conduisent à proposer les charges suivantes en fonction du matériau de garnissage et de la concentration en azote ammoniacal requise au rejet.

Tableau 5 : Bases de dimensionnement pour la nitrification en simple étage

| | matériau traditionnel (cailloux) | | matériau plastique | |
|--|-------------------------------------|------|--------------------|------|
| | | | | |
| Azote ammoniacal en sortie (mg l ⁻¹) | 10 | 2 | 10 | 2 |
| Charge maximum en DBO (kg m ⁻³ j ⁻¹) | 0.20 | 0.07 | 0.30 | 0.15 |
| Charge maximum en NTK (kg m ⁻³ j ⁻¹) | 0.06 | 0.02 | 0.08 | 0.04 |
| Charge hydraulique minimale (m h ⁻¹) (Recyclage inclus) | 0.15 | 0.06 | 0.45 | 0.45 |
| Surface spécifique du matériau (m ² m ⁻³) | 100 | 150 | 150 | 150 |

Les recommandations de l'ATV (Allemagne) pour les matériaux plastiques conduisent à des charges hydrauliques plus élevées que celles du tableau, des valeurs de 0.8 à 1.2 m/h sont préconisées pour une surface spécifique de 150 m²/m³.

Lorsque l'objectif est la nitrification totale il a été démontré qu'un lit à double étage est plus performant.

Nitrification en double étage

Bases de dimensionnement pour la nitrification dans le deuxième étage d'un lit à deux étages

La double filtration est la méthode la plus efficace pour obtenir la nitrification la plus poussée. Cet avantage par rapport à la solution simple étage doit cependant être pondéré par l'investissement supplémentaire dû à la nécessaire présence d'un décanteur intermédiaire pour assurer le bon fonctionnement du 2^{ème} étage.

Les recommandations de dimensionnement sont résumées dans le tableau 6 :

Tableau 6 : Bases de dimensionnement pour la nitrification en 2^{ème} étage

| | Matériau traditionnel | Matériau plastique |
|--|-----------------------|--------------------|
| Azote ammoniacal (mg l ⁻¹) | 2 | 2 |
| Charge maxi en DBO (kg m ⁻³ j ⁻¹) | 0.2 | 0.25 |
| Charge maxi en NTK (kg m ⁻³ j ⁻¹) | 0.25 | 0.30 |
| Charge hydraulique mini (m h ⁻¹) (Recyclage inclus) | 0.18 | 3.0 |
| Surface spécifique (m ² m ⁻³) | 150 | 200 |