

Les filtres plantés de roseaux à écoulement vertical et alimentés en eaux usées brutes : bref historique et développements récents en France

Liénard A.*

* Cemagref, Unité de Recherche Milieux Aquatiques, Ecologie et Pollutions (MAEP), 3bis quai Chauveau, CP 220, 69336 LYON Cedex 09, France
(E-mail: alain.lienard@cemagref.fr)

Résumé

Cet article relate les 1^{ères} études conduites en France sur les filtres plantés de roseaux à écoulement vertical (FPRV). Le procédé a d'abord été conçu en Allemagne par le Dr. Käte Seidel qui a réalisé ses premiers travaux de recherche à l'Institut Max Planck de Krefeld. Il était connu des spécialistes sous l'acronyme anglais MPIP [Max Planck Institute Process]. En France, à partir d'études réalisées par le Cemagref en 1978 puis au cours des années 1980 à Saint Bohaire (Loir et Cher) et Pont-Rémy (Somme), il a pu être scientifiquement établi que les 1^{er} étages à écoulement vertical étaient beaucoup plus efficaces que ceux à écoulement horizontal, de surcroît plus sensibles au colmatage. Ce concept a pu être positivement utilisé à Gensac la Pallue où un 1^{er} étage de FPRV, mis en service en 1987, fonctionne toujours correctement 23 ans plus tard, alors que certains filtres ont été curés 3 fois de leurs boues. Les principales raisons qui ont fait le succès des FPRV auprès de nombreux élus des communes rurales dans leur "version classique" avec 2 étages en série sont aussi présentées ainsi que des arguments scientifiques qui expliquent ce bon fonctionnement. Les nombreuses recherches en cours pour élargir encore le créneau d'utilisation des FPRV sont résumées en conclusion.

Mots clefs

Eaux usées brutes, écoulement horizontal, écoulement vertical, filtres plantés de roseaux, *Phragmites australis*, traitement des eaux usées

INTRODUCTION

En France, le traitement des eaux usées domestiques des petites communes rurales de moins de 2 000 habitants a été marqué par plusieurs étapes : au cours des années 1970, le lagunage naturel, encouragé par le Cemagref et les Agences de l'Eau s'est beaucoup développé alors que les filtres à sable (lits d'infiltration-percolation sur sable) ont émergé au cours des années 80. Néanmoins, aucun de ces 2 systèmes n'était pleinement satisfaisant pour les élus qui essayaient de résoudre au mieux leurs problèmes d'assainissement, souvent avec l'aide de l'ingénierie publique des DDAF et DDE. Le lagunage naturel a une emprise au sol considérable (environ 15 m²/habitant dont 10 pour les bassins) et l'étanchéification artificielle est très coûteuse quand le sol n'est pas assez argileux, le niveau de traitement n'est également pas toujours optimal en raison des algues en suspension qui s'échappent avec l'effluent. Les 1^{ères} stations à lits d'infiltration-percolation ont été construites pour des stations balnéaires au début des années 1980 et fin 1989, on estimait leur nombre à une trentaine dont certaines pour des populations permanentes. Mais en raison de connaissances insuffisantes sur la qualité des sables notamment quelques unes ont rapidement colmaté et la gestion des boues primaires à extraire 2 fois par an du décanteur-digesteur demeurait un "problème épineux". De plus, un décanteur primaire n'est pas un équipement idéal pour traiter les surcharges hydrauliques de sections unitaires de réseaux d'assainissement que l'on trouve parfois dans parties anciennes et agglomérées des villages. Dans ce contexte, on comprend bien qu'aucun système ne donnait entière satisfaction et qu'un créneau était libre pour d'autres solutions.

LA RENCONTRE DE KÄTE SEIDEL ET DE SON "MAX PLANCK INTITUTE PROCESS" (MPIP)

1^{ère} tentative à Saint Bohaire

En 1978, le Cemagref, dont la réputation en traitement des eaux usées était déjà reconnue en France, fut demandé pour étudier le fonctionnement d'une petite station d'épuration implantée dans le parc d'un centre d'accueil de jeunes enfants en difficultés familiales à Saint Bohaire (Loir et Cher). Cette station avait été conçue et dimensionnée par le Dr. Käte Seidel de l'Institut Max Planck de Krefeld en Allemagne, qui était l'amie de la directrice du centre. Elle avait été réalisée en auto-construction par le personnel technique de ce centre qui en assurait aussi l'exploitation.

La station était composée de 5 étages de traitement en série, les 2 premiers constitués de respectivement 4 et 2 filtres en parallèle étaient drainés, plantés de roseaux (*Phragmites australis*) et alimentés en alternance chaque jour ; ils étaient appelés "filtres en percolation ou à écoulement vertical" (Figure 1).

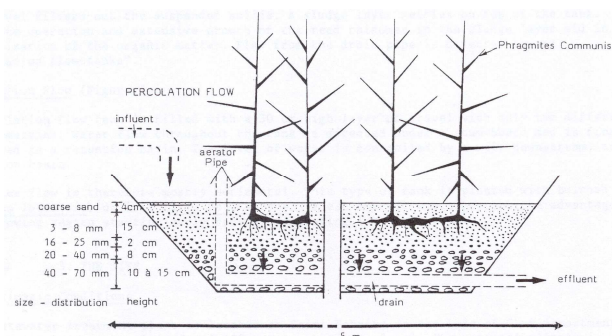


Figure 2: Coupe longitudinale d'un filtre en percolation ou à "écoulement vertical" à St Bohaire

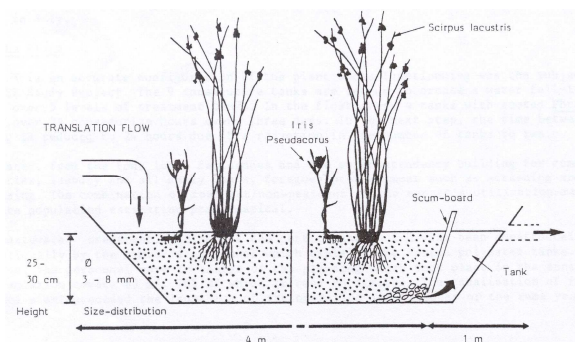


Figure 3: Coupe longitudinale d'un filtre en translation ou à "écoulement horizontal" à St Bohaire

Les 3 autres étages étaient chacun composé d'un filtre unique et presque complètement saturés d'eau. Les filtres des étages 3 et 4 étaient plantés de *Scirpus lacustris* alors que le dernier contenait des *Iris pseudacorus* (Figure 3). Étant donné que le niveau d'eau était maintenu constant, le flux effectuait une translation horizontale et étaient donc appelés "filtres à écoulement horizontal". Cette station avait une surface utile d'environ 80 m² et, en dépit de ses bonnes performances, sa charge spécifique et la surface qui en aurait résulté, de l'ordre de 5 m²/habitant, n'était pas suffisante pour être compétitive avec un lagunage naturel dont la réalisation était beaucoup plus simple, ainsi d'ailleurs que l'exploitation. Mais heureusement, l'histoire ne s'arrêta pas là

Seconde tentative à Saint Bohaire, ... couronnée de succès

En raison de modifications dans le centre et de réaménagements de services, Mme Seidel fut à nouveau contactée pour concevoir une 2^{ème} station ainsi que le Cemagref pour évaluer à nouveau son fonctionnement (Boutin, 1987). Elle était de conception identique à la 1^{ère} mais tous les bassins avaient cette fois étaient réalisés en résine polyester complètement étanche, ce qui offrait toutes garanties pour mesurer des flux.

La station était plus petite 63 m² et curieusement recevait une charge polluante plus élevée que celle de la première ; mais en raison du rythme scolaire les charges étaient très irrégulières. Plusieurs campagnes de mesures, y compris durant les week-ends, lorsque la quasi totalité des enfants étaient absents, furent nécessaires pour bien connaître les flux en toutes saisons.

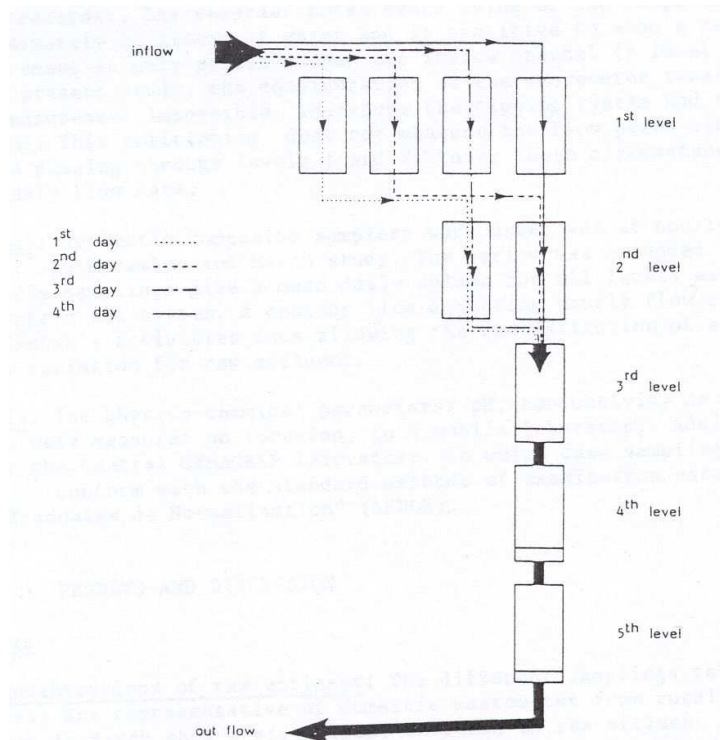


Figure 4: Schéma de principe des stations d'épuration au Logis à Saint Bohaire (Boutin, 1987)

Néanmoins, ces conditions de fonctionnement nous convainquirent que les filtres à écoulement vertical étaient beaucoup plus efficaces que les autres et que les roseaux avaient une action pour prévenir le colmatage superficiel en dépit d'eaux usées domestiques concentrées, et ceci même dans des conditions a priori défavorables étant donné que les charges étaient plus élevées en hiver en raison de vacances plus courtes.

Avec des charges calculées sur une base annuelle, la surface spécifique s'établissait à environ $2,5 \text{ m}^2$ par Equivalent-Habitant, ce qui correspondait peu ou prou au $\frac{1}{4}$ de la surface utile d'un lagunage naturel. L'expérience devenait intéressante ... mais il fallait valider ces mesures à une échelle plus importante (en moyenne, la station de Saint Bohaire traitait moins d'1 kg de DCO/jour) et dans un contexte d'habitat permanent.

PONT-REMY (... ENCORE DIFFICILE DE S'AFFRANCHIR DE K. SEIDEL)

Cette station a été construite en 1985 sur la base d'une surface active de $2,5 \text{ m}^2/\text{EH}$ pour un nouveau lotissement qui devait comprendre à terme 500 habitants. Elle était aussi constituée de 5 étages en série, les 2 premiers à écoulement vertical avec respectivement 8 et 4 filtres en parallèle pour une alimentation alternée alors que les 3 derniers, en série, sont à écoulement horizontal.

Pour accélérer la collecte de données avec une charge suffisamment importante, il a été décidé de séparer les 1^{er} et 2^{ème} en 2 parties et de n'en alimenter que la moitié au début. Grâce aux résultats déjà acquis à Saint Bohaire, la granulométrie des matériaux a été modifiée comme le montre la figure suivante.

Pour répartir correctement l'eau usée, un processus d'alimentation par bâchées a été mis en place grâce aux pompes du poste de relèvement et distribuée par un jeu de canaux et de vannes dans les FPRV où l'eau usée était répartie à l'aide de goulottes à débordement. Avec ces aménagements certes esthétiques mais assez complexes et moyennement fonctionnels, le socle et les parois des filtres en béton, la construction s'est révélée coûteuse.

On retiendra surtout que le sable a été supprimé sur le 1^{er} étage et qu'il n'en reste que 2,5 cm sur les filtres du 2^{ème} étage (Figure 4).

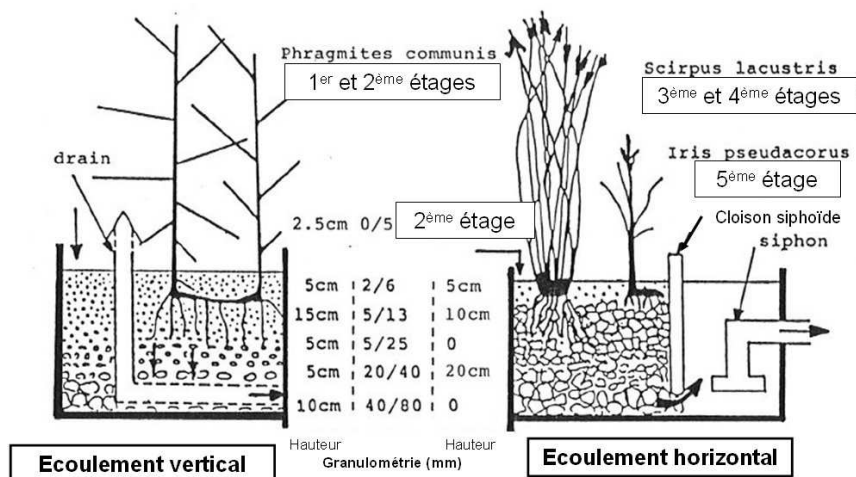


Figure 4 : Représentation schématique des granulats en place dans les divers filtres de la station de Pont-Rémy (Somme)

Sur les filtres à écoulement horizontal, différentes couches de granulométrie croissante vers le fond ont aussi été mises en place pour tenter de prévenir le colmatage progressif qui apparaissait à Saint Bohaire. Néanmoins, en dépit des relativement faibles charges qu'ils recevaient des signes de septicités sont rapidement apparus dans les FPRH. Il était donc évident que le développement du système racinaire et les seuls apports d'oxygène des plantes n'étaient pas suffisants pour prévenir un entretenir des conditions de fonctionnement satisfaisantes.

Pour tenter d'enrayer ce processus et la survenue d'un colmatage à court ou moyen terme, des siphons auto-amorçants ont été placés dans la partie aval des filtres afin de faire varier le niveau d'eau et ainsi d'introduire de l'air dans la partie haute qui était régulièrement dénoyée sur une trentaine de cm.

Si les acquis scientifiques n'ont pas été à la hauteur des espoirs placés dans ce site, il a néanmoins fourni la preuve qu'il fallait simplifier la conception élaborée par Mme Seidel en se focalisant sur les seuls filtres à écoulement vertical et notamment ceux du 1^{er} étage alimentés en eau usée brute.

On notera accessoirement que ce site a été choisi en juin 1987 pour la visite technique de la 1^{ère} rencontre du groupe spécialisé de l'EWPCA [European Water Pollution Control Association] européen créé à l'initiative du WRc [Water Research Centre] au Royaume Uni. Des représentants d'Angleterre, d'Autriche, du Danemark, d'Allemagne et de Belgique y participaient. Des rencontres régulières, environ tous les 6 mois, auront lieu dans chacun des pays jusqu'à ce que le groupe intègre l'IWA [International Water Association] en 1990 (Cooper, 2009) et que se déroule une conférence exclusivement focalisée sur le thème des marais artificiels pour l'épuration des eaux usées à Cambridge (Royaume Uni). Depuis, ce même type de conférences se déroule régulièrement tous les 2 ans dans un pays différent sur tous les continents, elle fut hébergée en Avignon à l'automne 2004 et la prochaine se tiendra en octobre 2010 à Venise.

GENSAC LA PALLUE (UN SITE EXPERIMENTAL TOUJOURS ACTIF APRES 23 ANS)

Cette commune de Charente disposait d'une station par lagunage naturel, dimensionnée pour environ 1 million d'habitants, comportant 2 bassins surchargés et voulait étendre son réseau d'assainissement pour collecter les eaux usées de 1700 personnes. La commune et la DDAF ont accepté la proposition du Cemagref de placer 8 filtres à écoulement vertical en tête la station (ce grand nombre de filtres permettait d'optimiser l'utilisation du terrain disponible et permettait de ne pas trop augmenter le débit des pompes du dernier poste de refoulement pour réaliser une

alimentation par bâchées convenable) et de construire une 3^{ème} lagune. L'ensemble de la surface des lagunes ne représente que la moitié de la surface spécifique préconisée (5 m²/EH).

La station a été mise en eau en juillet 1987 et les filtres donnent toujours satisfaction. Les granulats filtrants et les drains n'ont pas été modifiés bien que certains d'entre eux aient été curés pour la 3^{ème} fois cette année. La hauteur de boues extraites a varié de 20 à 30 cm pour un accroissement annuel qui a oscillé entre 2 et 4 cm ; les valeurs les plus fortes ayant été observées ces dernières années. Elles peuvent trouver leur origine : 1) dans des faucardages moins soigneux (les roseaux sont coupés mais pas ne sont pas tous enlevés de la surface des filtres), 2) l'enlèvement des paniers dégrilleurs dans les 9 postes de refoulement du réseau qui augmente le volume des MES arrivant en surface des filtres, 3) l'augmentation de la population raccordée qui approche désormais 2 000 habitants.

L'ARRIVEE DE DIRK ESSER ET UNE PERSPECTIVE DE DEVELOPPEMENT MAITRISE

A l'aube des années 1990, les instances scientifiques du Cemagref doutent de l'utilité de ces recherches et de leur application. C'est donc une conjoncture heureuse qui a permis la rencontre de Dirk Esser et son souhait de commercialiser une filière moyennant un transfert de savoir-faire entre le Cemagref et la SINT [Société d'Ingénierie Nature et Technique] qu'il se proposait de créer. Moyennant royalties indexées sur le chiffre d'affaires, ce contrat est signé le 1^{er} juillet 1991 pour une durée de 7 ans, puis il est prorogé pour une durée de 5 ans jusqu'au 30 juin 2003.

Les recherches lancées à Pont-Rémy pour adapter un siphon utilisé en Italie pour l'irrigation aboutissent à un prototype dont le principe est également cédé à Dirk Esser. Ce dernier l'améliorera pour qu'il puisse vidanger complètement la bêche de stockage recevant des eaux usées brutes quand la dénivelée du terrain permet une alimentation gravitaire. Ce siphon a été breveté et est actuellement distribué par AQUASAF.

Avec cette caution scientifique du Cemagref, quelques maires audacieux acceptent de prendre le risque d'équiper leur commune d'une installation qui comporte désormais souvent 2 étages composés chacun de 3 filtres à écoulement vertical alimentés en alternance 2 fois par semaine. Néanmoins, comme cela a été montré en 2004 à Avignon, le développement permettant à la SINT d'en vivre exclusivement ne s'épanouira qu'en 1998.

PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES FPRV

Une station de ce type comporte normalement 2 étages en série dont l'ensemble des filtres est généralement dimensionné sur la base de 2 m²/habitant.

Le 1^{er} étage est composé de 3 filtres en parallèle, chacun étant dimensionné à 0,4 m²/habitant et alimenté en alternance 2 fois par semaine (3,5 jours d'alimentation pour 7 jours de repos).

Le massif filtrant est généralement composé, du haut vers le bas, de :

- Une couche filtrante (la plus active) de 0,4 à 0,8 m (en fonction de la nitrification recherchée) de gravillons 2/6 mm,
- Une couche de transition (10-15 cm de gravier 5/20 mm) pour prévenir la migration des gravillons vers la couche drainante et pour compenser la pente du fond,
- Une couche drainante d'environ 15 cm d'épaisseur, réalisée avec des graviers grossiers (20/40-60 mm) dans laquelle les drains sont enchâssés avec une pente d'environ 0,5%.

Le 2^{ème} étage (0,8 m²/habitant) est désormais composé de 2 filtres en parallèle et également alimentés en alternance (3,5 jours d'alimentation pour 3,5 jours de repos) dans laquelle une partie des gravillons est remplacée par 0,4 m de sable siliceux, roulé (d_{10} 0,25 à 0,4 mm, CU [Coefficient d'Uniformité : d_{60}/d_{10}] < 5 et une teneur en fines [particules < 0,063 mm] < 3% en masse).

Les autres matériaux de filtration peuvent provenir de roches dures concassées si leur teneur en fines est < 1 ou 2% et que la teneur en calcaire n'excède pas 20 % en masse (exprimée sous forme de Ca CO₃).

Si la pente du site le permet (environ 4 mètres entre l'arrivée des eaux usées et le rejet dans le milieu naturel), le traitement peut être complètement gravitaire, sans apport d'énergie, à l'aide de 2 siphons auto-amorçants.

Tous les filtres sont plantés de roseaux (*Phragmites australis*) achetés chez des horticulteurs spécialisés à raison de 4 pots/m². Après la 2^{ème} saison de pousse, la partie aérienne est faucardée chaque année, généralement en novembre. Un recensement réalisé en 2003 (Molle et al., 2005) a permis d'évaluer les performances globales de cette filière et de confirmer sa conception et son dimensionnement pour une nitrification presque complète (NK < 10 mg/L).

UN SUCCES QUI NE SE DEMENT PAS

Le Cemagref est régulièrement en contact avec les services départementaux qui aident les exploitants des stations d'épuration à les gérer correctement et avec les services chargés de la police des eaux qui sont chargés de veiller à la conformité de la qualité des rejets par rapport aux exigences des milieux récepteurs. Tous ces acteurs, ainsi que des représentants des agences de l'eau, de l'ONEMA (office national de l'eau et des milieux aquatiques) et du ministère de l'écologie sont désormais rassemblés dans une structure commune le groupe EPNAC (<http://epnac.cemagref.fr/>).

Si l'on ne dispose pas aujourd'hui d'une base de données à jour de toutes les stations équipées de filtres plantés de roseaux alimentés en eaux usées brutes, on peut estimer que le nombre de stations de ce type en fonctionnement sur le territoire national est compris entre 1500 et 2000 unités.

Le nombre de constructeurs qui proposent la filière à 2 étages à écoulement vertical avoisine vraisemblablement la dizaine. Les entreprises SINT-Epure et EpurNature (filiales créées par Dirk Esser) en conçoivent ou réalisent à elles seules environ 70 chaque année.

Globalement, on peut affirmer qu'à quelques exceptions près qui tiennent à des erreurs de réalisation ou de dimensionnement pour lesquelles les recommandations données par le Cemagref n'ont pas été suivies, la très grande majorité de ces stations fonctionne correctement à la satisfaction de leurs maîtres d'ouvrage.

Pourquoi un tel succès ?

A la différence des boues activées, les FPR sont peu sensibles aux variations de débits qui émanent de portions de réseaux d'assainissement unitaires car issues d'anciens réseaux pluviaux préexistants. Ils peuvent traiter correctement des eaux usées diluées mais surtout l'évacuation des boues peut être programmée à des intervalles d'environ une dizaine d'années et pour des volumes très inférieurs et une qualité intrinsèque de la boue qui la fait ressembler à un terreau stable et sans odeur. Leur exploitation est tout à fait accessible à du personnel local, formé mais non spécialisé, et les coûts qui en résultent sont donc faibles.

Par ailleurs, la qualité de l'eau traitée, par le fait qu'il s'agit d'une filtration, est remarquablement constante car non sujette à des entraînements intempestifs de boues. Il n'est donc pas étonnant que ce type de dispositif ait été adopté ne serait ce que pour ces raisons techniques et économiques. Mais les filtres plantés de roseaux paraissent aussi adaptés au contexte sociologique de ces collectivités : le fond culturel agricole, toujours présent chez la majorité des responsables des communes rurales, correspond au savoir-faire nécessaire pour exploiter correctement les FPR. Dans le même ordre d'idées leur fonctionnement est compris (ou au moins ils pensent le comprendre, car la réalité est un peu plus compliquée). Cette filière répond aussi, pour les décideurs "néo ruraux" à une aspiration à un "retour à la nature", à la mise en place de "méthodes écologiques", compatible avec un développement durable auquel ils aspirent, aussi bien en termes de consommation d'énergie fossile que d'utilisation de matériaux.

C'est donc bien le bon sens des élus locaux qui explique la mode des filtres plantés parmi eux et l'on constate désormais quelques communes de plus de 4000 habitants qui s'équipent de FPR alimentés en eaux usées brutes.

Quelques ombres au tableau ?

L'apparente simplicité du système laisse croire qu'une connaissance scientifique et un savoir-faire spécifique ne seraient pas nécessaires pour concevoir et réaliser les stations d'épuration de ce type. Dans un contexte de forte demande, les constructeurs augmentent logiquement, la concurrence s'installe et des variantes du système d'origine sont proposées, souvent pour des coûts inférieurs, grâce à la mise en place d'innovations pas toujours heureuses. L'innovation devient alors un objectif pour emporter des parts de marché, mais n'est pas forcément dictée par un besoin en terme de protection environnementale.

Même si le danger de voir discréditer la filière est désormais écarté, les réalisations malheureuses peuvent encore, localement, faire du tort.

POURQUOI, LES FILTRES DU 1^{ER} ETAGE FONCTIONNENT-T-ILS AUSSI BIEN ?

Deux raisons principales apportent un début d'explication :

Un équilibre subtil entre MES des eaux usées brutes et action physique directe et indirecte des roseaux

Les MES apportées par les eaux usées sont dispersées sur toute la surface du filtre alimenté si le débit spécifique du siphon auto-amorçant ou des pompes atteint au moins $0,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ de filtre alimenté. Elles forment rapidement une couche colmatante qui favorise une équi-distribution. Quand les roseaux ont atteint leur développement optimal, cette couche colmatante est percée par les tiges qui sont émises par les nœuds des rhizomes (environ $300 \text{ tiges}/\text{m}^2$). Comme cela a déjà été dit, autour de chaque tige, il se forme un anneau libre au sein duquel l'eau peut s'infiltrer et s'écouler le long du système racinaire densément colonisé par des bactéries avant de rejoindre la couche drainante (Molle, 2003). La vitesse d'infiltration est d'ailleurs influencée par le développement de la partie aérienne des roseaux : plus forte en juin, septembre et octobre et plus faible en février et mars (Molle, 2003).

Néanmoins en toutes saisons, les MES qui restent en surface à la fin d'un cycle d'alimentation de 10,5 jours, forment une couche de seulement 5,3 mm d'épaisseur si l'on se base sur les valeurs suivantes :

- Un apport spécifique de MES de 60 g/habitant et par jour,
- Une surface spécifique du 1^{er} étage de $1,2 \text{ m}^2/\text{habitant}$,
- Une teneur en matière sèche de ces MES de 10% quand l'eau s'est écoulée sous l'influence de la gravité et en considérant une masse volumique de 1 kg/L.

De plus, cette fine couche de boues est en contact avec l'oxygène atmosphérique pendant 95% du temps d'un cycle d'alimentation/repos, même lorsque la couche de boues atteint une vingtaine de centimètres et que la vitesse d'infiltration chute à la valeur la plus faible ($0,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}/\text{sec}$) mesurée à Gensac la Pallue en mars (période la plus critique pour l'infiltration, quand le maximum de boues s'est accumulée au cours de l'hiver, avec une minéralisation moindre en raison des faibles températures et avant l'émergence de nouvelles pousses de roseaux au printemps).

Ce contact quasi permanent entre la boue et l'oxygène atmosphérique explique l'importante minéralisation bactérienne aérobie à l'ombre des roseaux et dans une hygrométrie adaptée qui est ensuite complétée par l'activité considérable des vers de terre. Aussi, en dépit du faible nombre d'études spécifiques, on peut imaginer l'importance de l'effet rhizosphère récemment présenté par Münch *et al.* (2005) et Gagnon *et al.* (2007) mais il serait intéressant de quantifier dans quelle mesure cette symbiose contribue à réduire de façon très significative la production de boues à extraire de la surface des filtres du 1^{er} étage tous les 10-12 ans.

Eviter le sable

Une des différences majeures entre les filtres à sable et ceux du 1^{er} étage des FPRV est la taille des grains de la couche filtrante la plus active (0,4 à 0,8 m d'épaisseur) qui est, pour ces derniers, constituée de gravillons de 2 à 6 mm de diamètre. Dans ce matériau, les forces de capillarité qui retiennent l'eau sont plus faibles que dans le sable et, sous l'action de la pesanteur, l'eau peut s'écouler plus facilement des pores inter-granulaires et l'air peut la remplacer, principalement par diffusion. Ce processus de diffusion est effectif à la fois :

- Depuis la surface, entre 2 bâchées quand l'eau usée s'est infiltrée pendant la période d'alimentation ainsi que durant la période de repos qui est 2 fois plus longue que la précédente.
- Mais aussi et de façon quasi permanente, depuis le fond du filtre dont la couche drainante est connectée à l'atmosphère via les drains et les cheminées d'aération parce que le front de saturation à la base de la couche filtrante est beaucoup plus faible et ne crée pas de barrière capillaire qui s'oppose à la pénétration de l'air. En été, l'évapotranspiration des roseaux accroît encore ce processus. L'ensemble du filtre est ainsi bien aéré.

Molle *et al.*, (2008) ont montré que la saturation de la couche drainante qui empêche l'oxygène de pénétrer dans le filtre par les drains conduit à une chute significative des concentrations d'oxygène dans les pores de la partie supérieure du filtre (la plus active) durant les périodes d'alimentation et de repos. Ces mesures réalisées avec un analyseur de gaz (Dräger Xam7000) coïncidaient avec une baisse sensible de la nitrification.

RECHERCHES EN COURS

Appuyées financièrement par l'ONEMA, évaluées avec l'aide du groupe EPNAC et étayées scientifiquement par le Cemagref en collaboration éventuelle avec d'autres organismes de recherche, les études nécessaires à l'évolution de la technologie sont certes prudentes, mais nombreuses pour adapter le procédé à des conditions particulières.

On mentionnera les communications qui vont être très prochainement présentées à la 12^{ème} conférence de l'IWA à Venise en octobre 2010 qui permettent d'adapter cette technique à des contextes variés :

- Réduction de l'emprise globale par la recirculation d'effluent sur les filtres du 1^{er} étage (Prost-Boucle and Molle, 2010) ou en superposant les 2 étages (Troesch *et al.*, 2010).
- Dimensionnement réduit en cas de surcharge organique estivale comme pour les campings (Boutin *et al.*, 2010) ou des adaptations au climat tropical qui intéressent les départements et territoires français d'Outre-Mer (Esser *et al.*, 2010).
- Adaptation du système pour la rétention du phosphore à l'aide d'apatites (Molle *et al.*, 2010).

Sur le plan hydraulique, deux thèses viennent aussi de démarrer pour :

- évaluer le fonctionnement et, si nécessaire, adapter le dimensionnement et l'exploitation des FPRV à une commune dont le réseau est intégralement unitaire,
- mettre au point des filtres adaptés au traitement des surverses de déversoirs d'orage implantés sur des réseaux unitaires et donc à des régimes de fonctionnement discontinus et très fluctuants.

Enfin, une autre thèse est également en cours pour comprendre plus intimement les mécanismes en jeu dans les FPR et tenter de les modéliser (Morvannou *et al.*, 2010).

REMERCIEMENTS

A la fin de ma carrière, je remercie tous mes collègues plus jeunes qui poursuivent les études nécessaires à l'amélioration des connaissances et au développement, toujours plus grand et dans des contextes variés, de ce procédé qui connaît déjà un important succès. Je souhaite notamment partager cette reconnaissance avec Catherine Boutin avec qui j'ai passé la majeure partie de ma carrière au Cemagref.

Je remercie également Arthur Iwema, précédemment à l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée & Corse, pour son soutien décisif aux FPRV et qui m'a aussi fourni de la littérature grise dans laquelle il a analysé finement les raisons sociologiques qui expliquent le succès des FPRV auprès des élus.

BIBLIOGRAPHIE

- Boutin, C. (1987). Domestic Waste-Water Treatment in Tanks Planted with Rooted Macrophytes - Case-Study - Description of the System - Design Criteria - and Efficiency. *Water Science and Technology*, **19**(10), 29-40.
- Boutin, C., Prost Boucle, S. and Boucher, M. (2010). Robustness of Vertical Flow Constructed Wetlands facing loads variations : the particular case of campsites. 12^{ème} conférence internationale de l'IWA sur les Marais Artificiels. 4-9 octobre 2010, Venise (Italie).
- Cooper, P. (2009). What can we learn from old wetlands? Lessons that have been learned and some that may have been forgotten over the past 20 years. *Desalination* **246**, 11-26.
- Esser, D., Riegel, C., Boura, S. and Liénard, A. (2010). The use of Constructed Wetlands for the Treatment of Effluents from Housing Schemes and Villages in an Island in the Tropics: New Results from Mayotte. 12^{ème} conférence internationale de l'IWA sur les Marais Artificiels. 4-9 octobre 2010, Venise (Italie).
- Gagnon, V., Chazarenc, F., Comeau, Y. and Brisson, J. (2007). Influence of macrophyte species on microbial density and activity in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, **56**, 249-254.
- Liénard, A. (1987). Domestic wastewater treatment in tanks with emergent hydrophytes : latest results of a recent plant in France. *Water Science and Technology*, **19**(12), 373-375.
- Liénard, A., Boutin, C. and Bois, R. (1993). Coupling of reed bed filters and ponds : an example in France. *Water Science and Technology*, **28**(10), 159-167.
- Molle, P. (2003). Filtres plantés de roseaux : limites hydrauliques et rétention du phosphore, Thèse de doctorat. Université de Montpellier II, 280p.
- Molle, P., Liénard, A., Boutin, C., Merlin, G. and Iwema, A. (2005). How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems. *Water Science and Technology*, **51**(9), 11-21.
- Molle, P., Liénard, A., Grasmick, A. and Iwema, A. (2006). Effect of reeds and feeding operations on hydraulic behaviour of vertical flow constructed wetlands under hydraulic overloads. *Water Research*, **40**(3), 606-612.
- Molle, P., Liénard, A. and Prost-Boucle, S. (2008). Potential for total nitrogen removal by combining vertical flow and horizontal flow constructed wetlands: a full-scale experiment study. *Ecological Engineering*, **34**, 23-29.
- Molle P., Martin S., Esser D., Besnault S., Morlay C., Harouiya N. (2010). Phosphorus removal by the use of apatite in constructed wetlands: design recommendations. 12^{ème} conférence internationale de l'IWA sur les Marais Artificiels. 4-9 octobre 2010, Venise (Italie).
- Morvannou A., Choubert J.M., Forquet N., Philippe N., Vanclooster M., Molle P. (2010). Solid respirometry to characterise the biodegradation kinetics in Vertical Flow Constructed Wetland (VFCW): a better insight for modelling. 12^{ème} conférence internationale de l'IWA sur les Marais Artificiels. 4-9 octobre 2010, Venise (Italie).
- Münch, C., Kusch, P. and Roske, I. (2005). Root stimulated nitrogen removal: Only a local effect or important for water treatment? *Water Science and Technology*, **51**, 185-192.
- Prost-Boucle, S. and Molle, P. (2010). Recirculation on a single stage of vertical flow constructed wetland: treatment limits and operation modes. 12^{ème} conférence internationale de l'IWA sur les Marais Artificiels. 4-9 octobre 2010, Venise (Italie).
- Troesch S., Prost-Boucle S., Molle P., Leboeuf V., Esser D. (2010). Reducing the footprint of vertical flow constructed wetlands for raw sewage treatment: the Bi-filter® solution. 12^{ème} conférence internationale de l'IWA sur les Marais Artificiels. 4-9 octobre 2010, Venise (Italie).