



Procédés de dépollution écologique des eaux – synthèse de connaissances

Audrey Petiot

► To cite this version:

Audrey Petiot. Procédés de dépollution écologique des eaux – synthèse de connaissances. [0] 2017, 72 p. hal-02790780

HAL Id: hal-02790780

<https://hal.inrae.fr/hal-02790780>

Submitted on 5 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

SYNTHÈSE DE CONNAISSANCES

PROCÉDÉS DE DÉPOLLUTION ÉCOLOGIQUE DES EAUX



Audrey PETIOT

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	4
INTRODUCTION	5
PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	11
1. Cycles mis en jeu	11
2. Rôle des macrophytes	13
I. TRAITEMENT PRIMAIRE	16
1. Bassin tampon de sédimentation sans stockage (BTSss)	16
2. Bassin tampon de sédimentation avec stockage (BTSas)	18
3. Filtre à paille (FAP)	19
II. TRAITEMENT SECONDAIRE	21
1. Lagunage	22
1.1. Principe de fonctionnement	22
1.2. Avantages et inconvénients	25
1.3. Dimensionnement et construction	25
1.4. Gestion et entretien	26
2. Filtres planté de roseaux (FPR)	26
2.1. FPR à deux étages	27
2.2. FPR à un étage avec recyclage	32
2.3. Rôle de <i>Phragmites australis</i>	36
2.4. Comparaison des macrophytes	38
2.5. Avantages et inconvénients	39
2.6. Gestion et entretien	39
III. TRAITEMENT TERTIAIRE	40
IV. ZONE TAMPON HUMIDE ARTIFICIELLE (ZTHA)	42

V. ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE CES DISPOSITIFS.....	43
1. Traitement primaire	43
2. Lagunage	44
3. Filtre planté	44
4. ZTHA	47
VI. HYGIÈNE ET SÉCURITÉ	48
VII. RECUEIL D'EXPÉRIENCES	49
1. ZTHA	49
2. FPR.....	53
3. Dispositif installé chez un particulier	55
4. Commune	59
5. À l'étranger.....	60
5.1. République-Tchèque	60
5.2. Pays-Bas	61
CONCLUSION	64
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	65
ANNEXE 1.....	71

AVANT-PROPOS

L'objectif de cette synthèse est de connaître les différentes techniques écologiques utilisant les végétaux pour l'épuration de l'eau dans le but de mettre en place des aménagements sur la ferme expérimentale de l'INRA qui a à cœur la préservation de l'environnement. Ces aménagements seront destinés à dépolluer les eaux de drainage issues des activités agricoles dans le marais, les jus d'écoulement de la fumière et les eaux de la station de lavage.

Des recherches ont été effectuées principalement sur internet, mais aussi à partir d'articles issus de magazines (*La France agricole*) et de revues scientifiques (*Ecological engineering*, *Journal of soil and water conservation*). De nombreux mails ont été envoyés auprès d'organismes (chambre d'agriculture, mairie, entreprise, lycée agricole) et de personnes qualifiées dans le milieu de la dépollution et dans le domaine agricole afin d'avoir des compléments d'informations techniques.

Les recherches n'ont pas abouties aux résultats escomptés : il est difficile d'avoir des réponses concrètes (réelle efficacité de traitement, résultats d'analyses effectuées, avis d'agriculteurs), car il y a encore un manque important de connaissances sur ce sujet. $\frac{1}{3}$ des mails sont restés sans réponses.

Malgré cela, grâce aux contacts de l'INRA (le CIVAM¹ et la chambre d'agriculture de la Charente-Maritime), des réponses ont pu être apportées permettant l'avancement de la recherche.

¹ Centre d'Initiatives pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu rural.

INTRODUCTION

En France, il est **interdit** de rejeter ses eaux usées dans la nature, elles doivent être collectées (assainissement collectif ou non collectif) pour subir un traitement afin de les dépolluer avant leur rejet dans le milieu naturel en respectant les normes en vigueur. Toutes les habitations (immeubles ou maisons) doivent être raccordées au réseau d'assainissement collectif de la ville ou, pour les habitations ne pouvant être raccordées, être munies d'un système d'assainissement autonome. Il existe la fosse toutes eaux, dispositif de prétraitement des eaux usées le plus utilisé (*Ooreka*, s.d.²) ou des procédés basés sur l'écologie, le filtre planté de roseaux ou le lagunage, c'est ce qu'on appelle la **phyto-épuration**.

Après une description de l'origine et une définition de la phyto-épuration, dans un premier temps sera décrit le principe de fonctionnement général suivi des différents traitements et ouvrages permettant la dépollution de l'eau, l'évaluation des performances de ces dispositifs, l'hygiène et la sécurité décrivant les risques et enfin un recueil d'expériences présentant des aménagements déjà mis en place.

Petite histoire de la phyto-épuration :

La phyto-épuration est le résultat de la diversification des techniques de « marais artificiels », systèmes plantés d'espèces aquatiques pour le traitement des eaux usées. Ces techniques sont communément appelées « *constructed-wetlands* » en anglais (WANG, 2011).

Dans les années 1950, le Professeur allemand de biologie Käthe SEIDEL a effectué les premières expériences et recherches sur les filtres plantés de macrophytes³ à partir d'une observation rigoureuse de la vie des plantes des marais et des marécages. Elle mit en évidence l'activité biologique intense des zones d'interface (eau/terre, terre/air, les lisières, les berges, les haies, les côtes) (*Aquatiris*, s.d.). Avant elle, les experts ne supposaient pas que les plantes aquatiques pouvaient vivre dans de l'eau polluée et qu'elles avaient la capacité d'éliminer les substances toxiques des eaux usées. C'est d'ailleurs pour cela que les ingénieurs éradiquaient systématiquement les plantes qui apparaissaient dans les sites de

² Sans date

³ Végétaux aquatiques de grandes tailles

traitement. Grâce aux travaux de SEIDEL, la capacité d'autoépuration des écosystèmes naturels tels que les zones humides a commencé à être reconnue. Inspirés de ce phénomène naturel, des marais artificiels destinés à l'épuration des eaux usées ont été construits, tout en mettant en avant les processus naturels d'autoépuration. L'idée était alors de ne plus considérer nos rejets comme des déchets à éliminer, mais comme une ressource valorisable pour l'écosystème. Le premier marais artificiel fonctionnel (22,5 ha) a été installé à Othfresen en Allemagne en 1972, d'autres ont suivi en Europe (Pays-Bas et République-Tchèque) et en Amérique du Nord (WANG, 2011). Apparue en France dans les années 1980, le traitement des eaux usées par les marais artificiels a vu son développement s'accélérer depuis une quinzaine d'années (*ConsoGlobe*, 2015).

En effet, les techniques se sont diversifiées pour des applications différentes. Par exemple, les bambous peuvent également servir pour l'épuration des effluents municipaux, industriels ou agricoles (WANG, 2011). Cette technique repose sur les qualités épuratoires naturelles du bambou, la densité des rhizomes et la haute capacité à fixer les bactéries capables de dégrader les éléments polluants. En amont du traitement, les effluents à épurer sont prétraités et ensuite acheminés jusqu'aux bambous. Ce végétal ayant la particularité d'avoir un taux de croissance rapide (jusqu'à 1 m par jour), de ce fait, le traitement de la pollution est très performant rapidement (*Phytorem*, 2012).

La première station d'épuration française à utiliser des filtres plantés a été la commune de Pannessières dans le Jura, en 1987 (*Terr'eau*, s.d.). Elle est de type SEIDEL, c'est une station de filtres plantés de macrophytes à percolation verticale suivis de filtres à écoulement horizontal. Elle a une capacité de 550 EH (Équivalents Habitants). Les natures des eaux traitées sont domestiques et vinicoles (*Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse*, 1999 : 66).

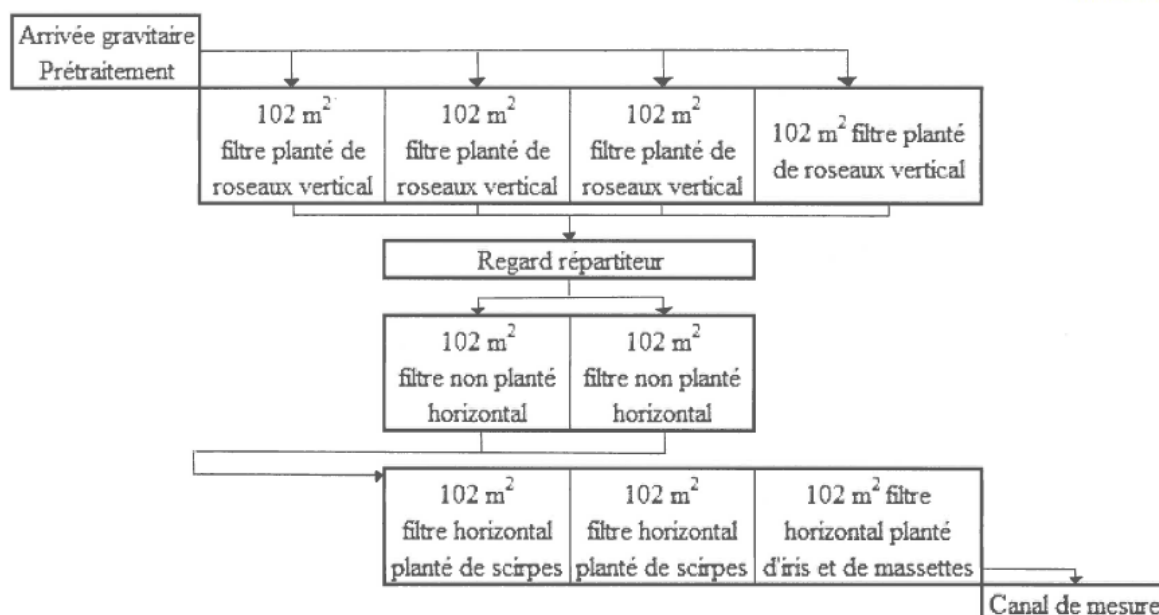


Figure 1 : Schéma de la station de filtres plantés à Pannessières dans le Jura

Source : Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, 1999 : 67

Le but des filtres plantés est de reconstituer des conditions d'interface optimales pour obtenir une activité biologique maximale (*Aquatiris*, s.d.).

Avant de rentrer dans le cœur du sujet, épurer une eau signifie la purifier afin d'éliminer toutes les impuretés qu'elle contient (*Larousse*, s.d.). Pour effectuer une bonne épuration de l'eau, plusieurs étapes sont nécessaires, on les appelle prétraitements, traitements primaire, secondaire et tertiaire. Elles s'effectuent dans une station d'épuration. Les prétraitements ne seront pas développés dans cette synthèse.

Il existe **trois lois** relatant les fondements de la politique de l'eau actuelle (*Eau France*, s.d.) :

- La **loi sur l'eau** du 16 décembre 1964 : organisation de la gestion décentralisée de l'eau par bassin versant. Les agences de l'eau et les comités de bassins ont été créés grâce à cette loi (*Eau France*, s.d.).
- La loi du 3 janvier 1992 (**loi n°92-3**) : l'eau est considérée « patrimoine commun de la Nation ». Renforcement de la protection et de la qualité des ressources en eau. Cette loi a mis en place dans chaque bassin un SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement

et de Gestion des Eaux) complété par des SAGE (Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux) dans chaque sous bassin (*Eau France*, s.d.).

- La loi sur L'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) du 30 décembre 2006 (**loi n°2006-1772**) : cette loi complète les deux premières. Son but est de s'assurer de la bonne qualité des eaux fixée par la **DCE** (Directive Cadre sur l'Eau) (*Eau France*, s.d.).

La DCE est une directive européenne adoptée le 23 octobre 2000. Elle a pour but de donner une cohérence à l'ensemble de la législation avec une politique communautaire globale dans le domaine de l'eau. Les objectifs de cette directive sont la protection, la préservation et la gestion de la ressource dans le cadre d'un développement durable (*Futura Planète*, s.d.).

Qu'est-ce que la phyto-épuration ?

Le mot phyto-épuration est composé de « phytón » qui, en grec ancien, signifie « végétal » et « espurer » qui, en français ancien, signifie « purifier » (*Wiktionnaire*, s.d.). Par définition, la phyto-épuration est un **ensemble de techniques** mettant à profit des **processus naturels** combinant les **végétaux et les microorganismes** dans un écosystème créé artificiellement pour **l'épuration des effluents**. Il y a plusieurs appellations possibles : « lagunage », « marais artificiel », « filtre planté », « lit de roseaux » (R. WANG, 2011). Ce système d'assainissement écologique peut être adapté en zone rurale pour les gens n'étant pas relié au réseau d'assainissement collectif, de plus, il est moins cher qu'une fosse toutes eaux classique et il a fait ses preuves dans de petites communes françaises depuis plusieurs années (*ConsoGlobe*, 2015), par exemple à Gensac-la-Pallue près de Cognac (16).

Dans un autre contexte, la phyto-épuration peut aussi être utilisée pour les effluents d'élevage peu chargées. Pour cela, il y a des réglementations à respecter : la directive nitrates et le plan ÉcoPhyto.

La **directive nitrates** est une directive européenne entrée en vigueur le 12 décembre 1991 (*Eau France*, s.d.). Elle concerne la protection des eaux à travers l'Europe contre la pollution des eaux souterraines et superficielles par les nitrates provenant de sources agricoles. Elle cherche également à promouvoir l'usage des bonnes pratiques agricoles (*Eau*

France, s.d.). La directive nitrates fait partie de la DCE et elle joue un rôle clé dans la protection des eaux en agriculture. Elle a deux objectifs à atteindre (*Chambres d'agriculture France, s.d.*) :

- Réduction de la pollution des eaux par les nitrates et l'eutrophisation issus des activités agricoles.
- Prévention de l'extension de ces pollutions.

La France ne se conforme pas totalement à cette directive, elle a été condamnée à trois reprises pour une mauvaise transposition (*Chambres d'agriculture France, s.d.*) :

- En 2012 : la désignation des zones vulnérables aux nitrates a été désignée insuffisante par la Cour de Justice de l'Union Européenne (CJUE)
- En 2014 : la CJUE a noté la non-conformité des plans d'action sur plusieurs points de la directive.
- En 2015 : de nombreux points ont été corrigés, tels que l'extension des zones vulnérables et l'évolution des programmes d'action, mais les contentieux n'ont pas tous été résolus.

Tous les quatre ans, les États membres remettent un rapport à la Commission européenne afin d'informer de la bonne mise en œuvre de la directive nitrates. Ce rapport permet de s'assurer que la campagne de surveillance des concentrations en nitrates dans les eaux douces, l'évolution de celles-ci et la délimitation des zones vulnérables est respectée (*Eau France, s.d.*).

Plus spécifiquement, lancé à la suite du Grenelle Environnement en 2008, le plan ÉcoPhyto, dirigé par le Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, a pour but la réduction de l'utilisation des pesticides en France et le maintien d'une agriculture économique et performante. À l'aide des agriculteurs, des chercheurs et des techniciens des chambres d'agriculture, les objectifs à atteindre d'ici 2025 sont :

- Réduction de 50 % des produits phytosanitaires sur les exploitations agricoles (TOURNEBIZE, PASSEPORT, et al., 2013 : 51).

- Expérimentation de systèmes de cultures économes en pesticides.
- Préservation de la production et des rendements des cultures.

Pour atteindre ces objectifs, une démarche volontaire des exploitations agricoles, les résultats sont positifs, mais contrastés, suite au bilan de fin janvier 2017, toutes filières confondues. En effet, une diminution moyenne de 20 % a été constatée, de 8 % pour la culture arboricole jusqu'à 75 % pour les cultures de fruits tropicaux (*Alim'agri*, 2015).

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La phyto-épuration reproduit un **écosystème épuratoire naturel**. Elle utilise les **bactéries naturellement présentes dans le système racinaire des plantes** pour épurer l'eau (*ConsoGlobe*, 2015). La matière organique est dégradée et transformée par les bactéries aérobies (ayant besoin d'oxygène pour vivre) en matière minérale assimilable par les plantes aquatiques.

Pour cela, les eaux usées passent à travers des bassins (verticaux et horizontaux) contenant un substrat minéral, sable ou graviers plus ou moins gros, sur lequel les bactéries se développent. Les bassins sont plantés de différents végétaux aquatiques appelés macrophytes, choisis en fonction de leur capacité d'absorption des polluants tels que les nitrates et les phosphates.

Lors de la dégradation de la matière organique, les microorganismes effectuent la nitrification (filtre vertical) et la dénitrification (filtre horizontal), en d'autres termes, ils éliminent les nitrates.

1. Cycles mis en jeu

- Le **cycle des nitrates** (MARCHAND, 2016) :

L'azote est un élément essentiel à la croissance des bactéries. Il existe sous différentes formes minérales : NH_4^+ (ion ammonium), N_2 (diazote), NO_2^- (nitrite), NO_3^- (nitrates) ; sous différentes formes organiques présentes dans tous les êtres vivants : protéines, ADN (acide désoxyribonucléique), ARN (acide ribonucléique), urine.

La première étape du cycle est la nitrification, c'est-à-dire le passage de NH_4^+ à NO_3^- . Cette étape est divisée en deux avec la nitritation (passage d' NH_4^+ à NO_2^-) effectuée par la bactérie *Nitrosomonas* et la nitratisation (passage d' NO_2^- à NO_3^-) par la bactérie *Nitrobacter*. Ces deux étapes sont réalisées en présence d'oxygène par des bactéries aérobies. Les conditions optimales à cette étape sont un pH = 7,5, une T = 30 °C et une charge massique faible, c'est-à-dire une faible pollution.

La deuxième étape du cycle est la dénitrification, c'est-à-dire le passage d' NO_3^- à N_2 . Cette étape est effectuée dans des conditions anaérobies (les bactéries se développent en

absence total d'oxygène), plus précisément dans des conditions anoxiques, c'est-à-dire que les bactéries respirent grâce à l'oxygène des nitrates et non grâce à l' O_2 dissous, on appelle ce phénomène la « respiration des nitrates ». Par exemple, la bactérie *Pseudomonas* peut réaliser la dénitrification.

Pour une bonne efficacité d'élimination des nitrates, ces deux étapes doivent impérativement avoir lieu, alternance de zones aérées puis privées d'oxygène.

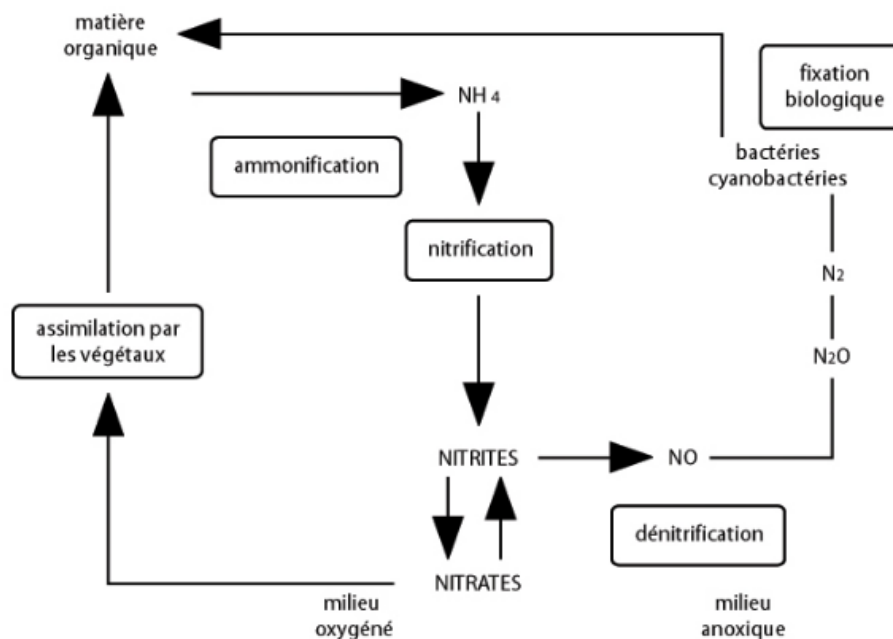


Figure 2 : Cycle de l'azote

Source : UVED, 2006

○ Le cycle du phosphore (MARCHAND, 2016) :

Le phosphore est également un élément essentiel à la croissance des bactéries. Il existe sous différentes formes minérales : PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$, H_3PO_4 ; sous différentes formes organiques : acide nucléique, ATP (adénosine triphosphate), phospholipides. Il a diverses origines : détergents, lessives, engrais phosphorés, industrie.

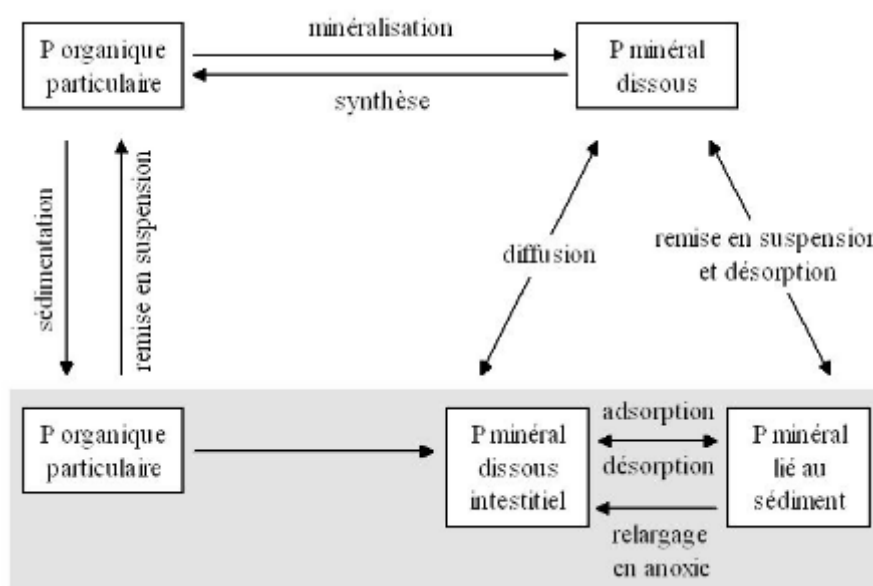


Figure 3 : Cycle du phosphore

Source : Bernard QUÉGUINER, s.d.

Pour une bonne efficacité d'élimination, les conditions doivent être une alternance de phases anaérobie puis aérobie.

2. Rôle des macrophytes

Il existe trois types de macrophytes (MARCHAND, 2016) :

- **Émergentes**, aussi appelés hélophytes : ce sont des plantes semi-aquatiques dont l'appareil racinaire se trouve dans l'eau, mais dont les parties végétatives se trouvent plus ou moins hors de l'eau, comme par exemple le roseau.
- **Submergées**, aussi appelé hydrophytes : ce sont des plantes fixées au fond de la rivière pouvant être soit flottantes, soit submergées.
- **Flottantes** comme les nénuphars par exemple.

L'utilisation des macrophytes dans l'épuration est un procédé très peu onéreux. Elle allie les processus aérobie et les processus anaérobies afin d'éliminer les matières organiques biodégradables et de produire de la biomasse (boues) et des composés minéraux (ARINO, ARNAUD, BOVE, 1995).

Dans les milieux naturels, ils servent d'indicateurs au niveau de la pollution, c'est l'Indice Biologique Macrophytes en Rivière (IBMR). En effet, cet indice permet d'évaluer la qualité de la rivière, notamment son degré d'eutrophisation⁴ (MARCHAND, 2016).

Ils jouent trois rôles (MARCHAND, 2016) :

- **Biochimique** : ce sont des producteurs primaires (= organismes qui produisent de la matière organique), ils réalisent la photosynthèse et ainsi permettent aux plantes d'assimiler la matière minérale.
- **Biologique** : leurs rhizomes servent de source de nourriture aux microorganismes. Aussi, les racines fournissent un substrat et de l'oxygène pour les bactéries.
- **Mécanique** : ils servent de filtre naturel.

Les macrophytes absorbent par leurs racines 10 % des sels minéraux (nitrates et phosphates) issus de la décomposition de la matière organique présente dans les eaux usées. Ils sont aussi capables d'assimiler les métaux lourds présents et nocifs pour l'environnement (DUPONT, 2008 : 16).

Pour une performance constante du système d'épuration, il est important que les végétaux forment une « couverture » afin d'assurer une bonne isolation en hiver. En effet, lorsque la neige recouvre le sol, celle-ci offre une très bonne isolation et ainsi évite que le sol ne gèle. Au printemps, les sols sont gorgés d'humidité par la fonte des neiges ce qui permet de garder les sols frais et une bonne pousse des plantes.

L'azote et le phosphore sont des nutriments essentiels pour la croissance et la reproduction des plantes. Ils exercent plusieurs rôles vis-à-vis des végétaux. Ils favorisent (Boues de Seine Aval, 2004) :

- Dans les zones humides, **6 à 48 % d'azote** sont conservés par les plantes. Les macrophytes ont la capacité d'absorber entre **30 et 150 kg_P/ha/an** et entre **200 et 2500 kg_N/ha/an** (LEE, SCHOLZ, 2007 : 88).

⁴ Pollution due à un apport excessif en nutriments, essentiellement nitrates et phosphates, et en matières organiques biodégradables, issu de l'activité humaine.

- Le **développement des racines** et **l'accroissement de la masse des racelles** favorisent l'alimentation et la croissance de la plante.
- La **précocité** favorise un développement racinaire rapide.
- La **rigidité des tissus** : ils sont plus résistants à la verse et aux maladies dues à des champignons.
- La **qualité des produits** (tissus riches en phosphore).
- La **température** et **l'ensoleillement** : en juillet et en août, lors des jours les plus longs, ces paramètres influencent positivement le taux de croissance des plantes.

Cette synthèse porte essentiellement sur les filières de traitement écologiques pour les effluents agricoles peu chargés. Jusqu'en 2007, les filtres plantés de roseaux étaient uniquement réservés pour le traitement des eaux blanches⁵ et des eaux vertes⁶. Depuis 2007, les dispositifs ont évolués, ils peuvent maintenant traiter également les eaux brunes⁷ (*Centre d'élevage de Poisy, s.d.*).

Les trois parties suivantes (textes et illustrations) ont été réalisées à l'aide du guide de la *Chambre d'agriculture des Pays de la Loire* intitulé « Le traitement des effluents peu chargés » (2007).

I. TRAITEMENT PRIMAIRE

En premier lieu, un traitement primaire est effectué. Cette première phase est une simple décantation. Son rôle est de séparer l'eau des matières polluantes organiques solides des effluents peu chargés. Divers ouvrages effectuent ce traitement.

1. Bassin tampon de sédimentation sans stockage (BTSss)

Le BTSss permet à tous les jus de se rejoindre par gravité en un même point et aux matières solides de l'effluent (la paille par exemple) de sédimenter dans un seul compartiment. Elle est équipée d'un regard de répartition avec des sorties dont chacune débouche sur une ligne de filtres plantés de roseaux à un étage avec recyclage. Il est nécessaire de permuter l'alimentation des filtres une fois par semaine afin d'éviter le colmatage des filtres et permet à la biomasse de se développer naturellement. Ce bassin sert également de cuve tampon pour les eaux de pluie.

Le BTS sans stockage peut être réalisé en auto-construction ou bien, par une entreprise. Il doit être étanche grâce à des parois maçonnées (blocs de béton banchés avec un enduit hydrofuge, parois préfabriquées) ou grâce à des bâches en géomembranes.

⁵ Eaux de lavage des laiteries et des salles de traite.

⁶ Eaux provenant de l'aire d'attente des vaches et du nettoyage des quais de la salle de traite. Elles sont traitées de la même manière que les eaux brunes.

⁷ Eaux pluviales tombant sur la fumière et les aires de transfert, écoulement des jus de fumière (lixiviats).

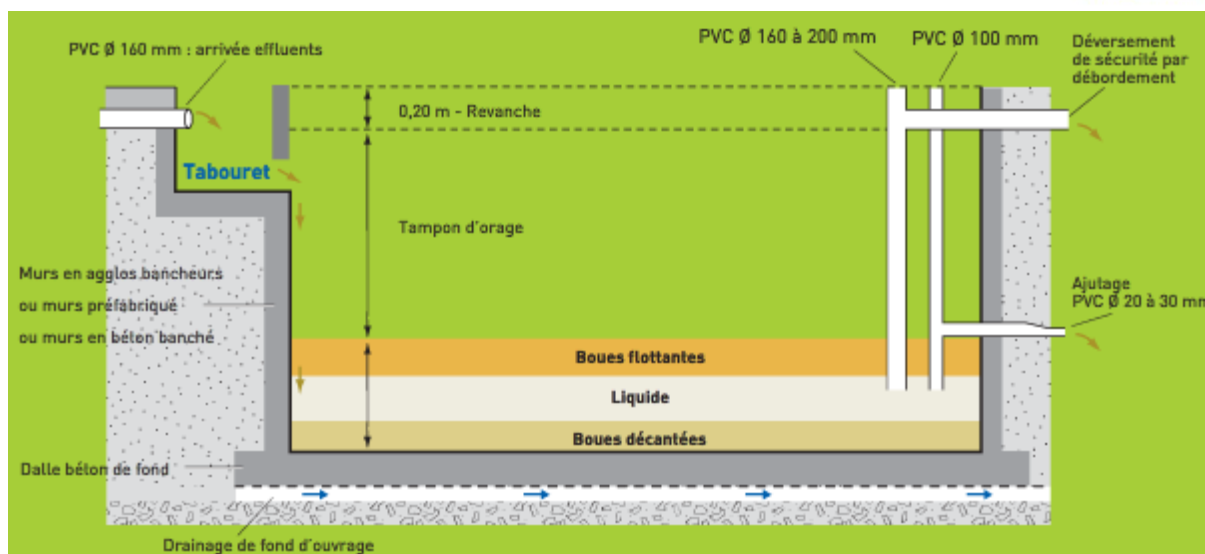


Figure 4 : Schéma d'un BTS sans stockage en béton

Fonctionnement et dimensionnement :

L'arrivée des effluents s'effectue sur le côté, le long de la paroi (à l'aide d'un tabouret ou d'un tuyau recourbé) de la cuve pour ne pas perturber la décantation. En fonction des effluents à traiter, il faut déterminer une hauteur de stockage minimum pour permettre une bonne sédimentation. Il faut prendre en compte les pluies qui apporteront un volume supplémentaire. Les boues décantées sont récupérées à l'autre extrémité du bassin. Le diamètre des tuyaux et la hauteur de sortie doivent être calculés et respectés. Afin de limiter les coûts, un écoulement gravitaire est souhaitable, mais si cela n'est pas possible, il faut placer une pompe de relevage qui déclenchera l'évacuation du liquide par bâchées vers le traitement secondaire. Pour une meilleure efficacité, une forme rectangulaire pour le bassin de sédimentation est à privilégier avec un rapport $\frac{\text{longueur}}{\text{largeur}} \geq 2$.

Coût estimé :

La construction par une entreprise s'élève à environ 10 000 € et environ 5 000 € si le filtre est auto-construit.

2. Bassin tampon de sédimentation avec stockage (BTSas)

Cet ouvrage assure le traitement primaire, mais également le traitement secondaire, il est placé avant l'épandage sur prairies. L'objectif ce BTS est d'épandre le plus souvent possible grâce à un volume de stockage minimal.

Le BTS avec stockage est composé d'un bassin de récupération et d'un bassin, plus petit, de stockage. Il peut être réalisé en auto-construction ou bien, par une entreprise. Il doit être étanche grâce à des parois maçonnées (blocs de béton banchés avec un enduit hydrofuge, parois préfabriquées) ou grâce à des bâches en géomembranes.

Fonctionnement et dimensionnement :

Pour un fonctionnement optimal, deux compartiments sont nécessaires.

- Dans le premier compartiment, tout comme pour le BTS sans stockage vu précédemment, l'arrivée des effluents s'effectuent sur le côté, le long de la paroi (à l'aide d'un tabouret ou d'un tuyau recourbé) de la cuve pour ne pas perturber la décantation et assurer une répartition homogène des boues. Pour un volume de stockage minimum dans le second compartiment, une hauteur minimale est à déterminer pour une bonne sédimentation et aussi pour les eaux de pluies complémentaires. L'effluent décanté est emmené dans le second compartiment grâce à un tube à mi-hauteur à l'autre extrémité du bassin.

Le volume de ce bassin tampon est calculé en fonction de la surface étudiée, du volume d'effluents produits quotidiennement, du volume de boues en fonction de la nature des effluents à traiter, de la pluviométrie et des orages.

- Dans le second compartiment, une pompe est installée pour alimenter le dispositif d'épandage (tuyau perforé, asperseur autotracté, etc.).

Le volume de ce deuxième bassin est déterminé de la même manière que le premier compartiment, à la seule différence qu'il faut tenir compte du volume de stockage complémentaire existant dans le premier compartiment.

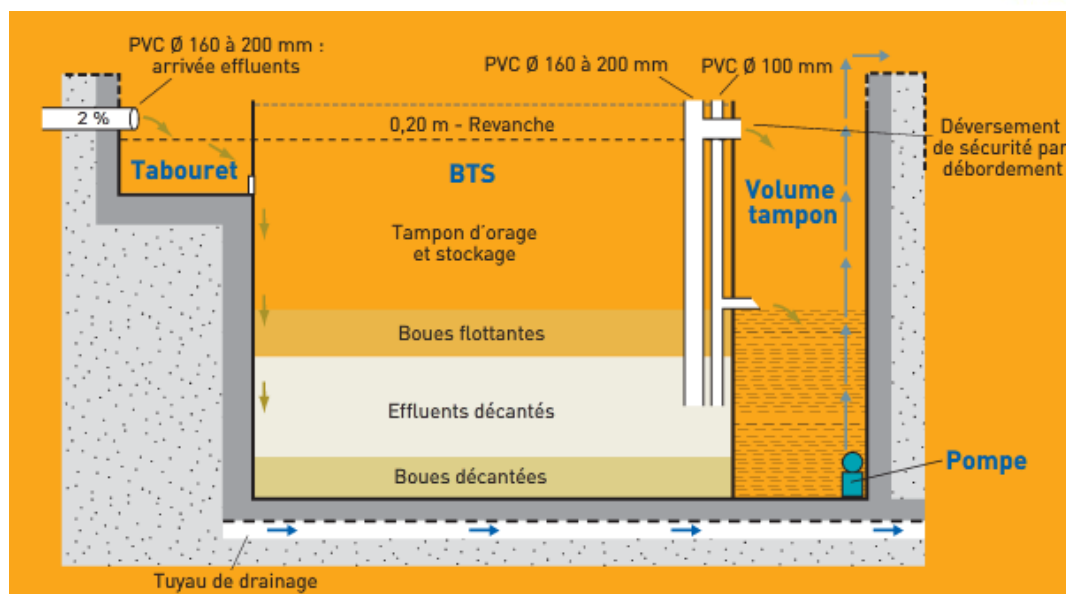


Figure 5 : Schéma d'un BTS avec stockage en béton avec deux compartiments

Coût estimé :

La construction par une entreprise s'élève à environ 15 000 € et environ 8 000 € si le filtre est auto-construit. Ces prix sont très approximatifs, ils dépendent du volume de l'ouvrage nécessaire.

Entretien :

Le BTSSs et le BTSas sont sécurisés par une clôture, l'accès du côté de l'arrivée des effluents doit être facile. Selon le volume d'arrivée, la vidange des boues sera plus ou moins fréquente. Afin d'éviter les odeurs, il faut vidanger les $\frac{2}{3}$ des cuves pour que la croûte en surface se reforme rapidement. À la sortie des bassins, un regard d'écoulement est indispensable afin de vérifier l'absence de matières solides et par conséquent, le bon fonctionnement de l'ouvrage.

3. Filtre à paille (FAP)

Il est généralement en forme de U et est mis avant une lagune pour filtrer et stocker les matières grossières décantées tout comme le BTS et permet de réguler le débit de sortie avant le traitement secondaire.

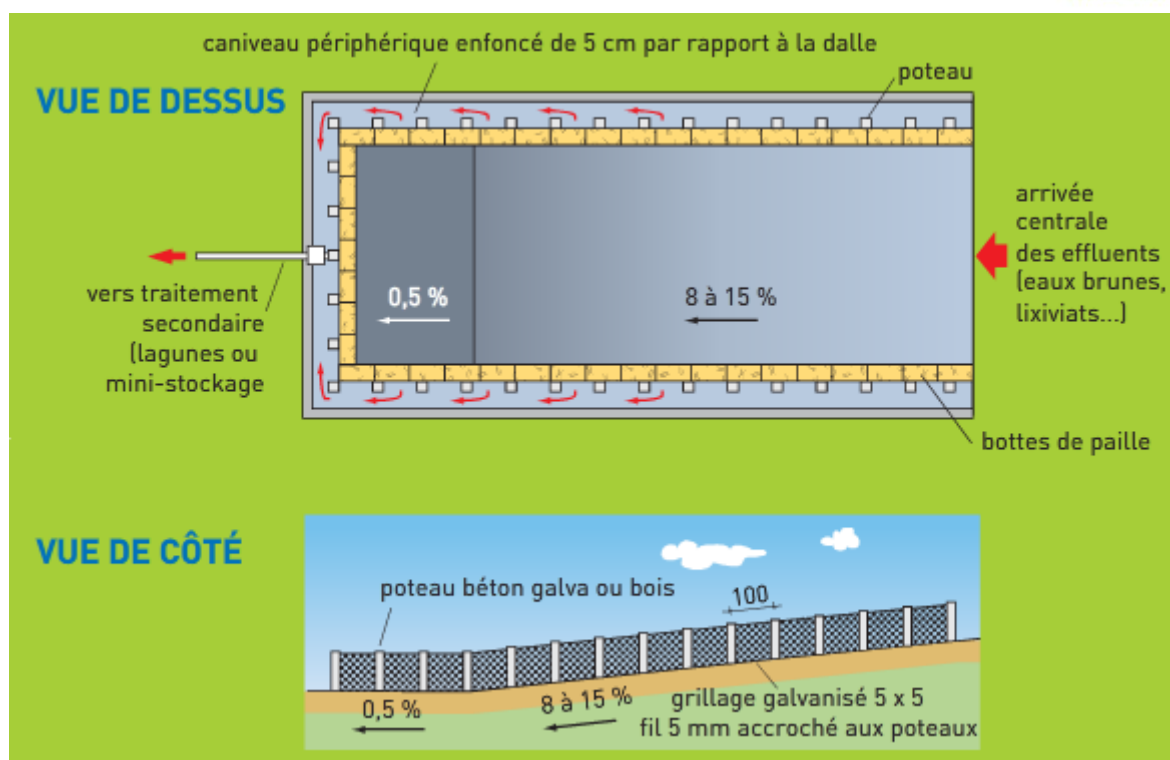


Figure 6 : Schéma d'un filtre à paille

Fonctionnement et dimensionnement :

Les bottes de paille, posées sur une aire bétonnée étanche, forment une **paroi filtrante pour les déchets**. La dalle en béton suit une pente de 8 à 15 % dans la partie supérieure (dépôt des effluents) et de 0,5 à 1 % dans la partie qui piège les matières en suspension. Tous les mètres, des poteaux en bois, en métal galvanisé ou en béton de la hauteur des bottes de paille utilisées et de diamètre de 100 à 150 mm, entourent le filtre, auxquels est accroché un grillage galvanisé avec un maillage au minimum de 5 × 5 cm. Un **caniveau périphérique**, de 5 à 15 cm de profondeur et de minimum 40 cm de large, récupère les effluents filtrés qui sont par la suite collectés par un regard avant d'être stockés dans une cuve et emmenés vers le traitement secondaire.

Entretien :

C'est un ouvrage facile à auto-construire. De préférence, il faut choisir une paille de bonne qualité (paille longue, sèche et pas trop serrée). Après la mise en place des bottes en U, mettre de la paille libre à la base des bottes pour améliorer le pouvoir filtrant les premières semaines de filtration. Il faut veiller à ce qu'il n'y ait aucune fuite entre chaque

botte de paille, car cela créerait un courant préférentiel et donc un dysfonctionnement du dispositif. Dès le départ, il faut s'assurer que les bottes forment une bonne jonction entre elles et ainsi une paroi filtrante homogène (couper les ficelles inférieures). Le filtre à paille est à vidanger 1 fois/an vers la fin de l'été, nettoyé et la paille est entièrement renouvelée. La paille souillée est mélangée avec les boues et épandues. Le caniveau et la grille filtrante placée au niveau du regard sont nettoyés régulièrement afin d'éviter une accumulation de matière en suspension et par conséquent un débordement.



Figure 7 : Nettoyage du caniveau

Coût estimé :

La construction par une entreprise s'élève à environ 8 000 € et environ 5 000 € si le filtre est auto-construit.

II. TRAITEMENT SECONDAIRE

Dans un deuxième temps, un traitement secondaire est effectué. Cette phase permet de réaliser le traitement biologique de l'eau par une grande variété de microorganismes (bactéries, algues, zooplancton). Ceux-ci convertissent la matière organique (MO) biodégradable (le rapport de biodégradabilité⁸ $\frac{DCO^9}{DBO_5^{10}} < 3$) contenue dans l'eau usée en

⁸ Capacité de l'effluent à se dégrader. Lorsqu'il est inférieur à 3, il est biodégradable.

⁹ Demande Chimique en Oxygène : elle représente la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder toute la matière organique contenue dans une eau. Elle permet d'évaluer la charge polluante des eaux usées.

matière minérale (MM). Plusieurs types de procédés biologiques existent comme le procédé par boues activées¹¹ par exemple, mais ici seront étudiés les procédés de traitement biologique écologique tel que le lagunage et les filtres plantés de roseaux.

À la suite du BTS sans stockage ou du FAP, un système de lagunage ou deux types de filtres plantés de roseaux peuvent être mis en place :

- Filtres plantés à un étage avec recyclage.
- Filtres plantés à deux étages.

1. Lagunage

Le lagunage est un système de traitement des eaux qui se sert des mécanismes naturels de l'environnement (sédimentation et photosynthèse) où l'eau est épurée par des communautés de microorganismes variés. L'épuration par lagunage naturel repose sur la présence de bactéries aérobies en cultures libres et d'algues et elle est assurée par un long temps de séjour dans plusieurs bassins en série (*Traitement des eaux*, 2012).

Les lagunes doivent être situées en un point bas où les vents dominants contribuent à aérer la tranche d'eau superficielle. Le terrain doit être de type limono-argileux.

1.1. Principe de fonctionnement

Le principe est de recréer des milieux ou des bassins tampons dans lesquels les eaux usées ou polluées vont transiter, avant d'être rejetées dans le milieu naturel. Les bactéries présentes dans le système consomment la pollution organique dissoute dans l'eau pour respirer. L'oxygène est produit grâce aux mécanismes photosynthétiques des algues qui poussent et se développent grâce aux rayonnements lumineux (*Eau Rhin-Meuse*, 2007 : 1).

Avant le premier bassin, l'effluent subit un prétraitement (dégrillage, dessablage, deshuilage).

¹⁰ Demande Biochimique en Oxygène : c'est la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes présents dans un milieu pour oxyder (dégrader) les substances organiques contenues dans un échantillon d'eau maintenu à 20° et dans l'obscurité, pendant 5 jours.

¹¹ Équation générale du procédé par boues activées : $MO + \text{microorganismes} + O_2 \rightarrow MM + CO_2 + \uparrow \text{biomasse}$ (= boues). Une partie de la biomasse est recirculée vers le bassin d'aération et une autre partie est extraite afin d'être valorisée.

Ces eaux traversent trois bassins successifs d'environ un mètre de profondeur :

- **Premier bassin** : il y a intrusion d'un polluant, il y a donc un apport de matière organique (MO). Elle va sédimenter dans le fond du bassin pour être dégradée par les bactéries anaérobies (n'ayant pas besoin d'oxygène pour vivre) par fermentation. La MO soluble en suspension va se minéraliser grâce aux bactéries aérobies. Elles consomment de l'oxygène et produisent du CO₂. Le processus qui s'effectue dans ce premier bassin s'appelle l'**autoépuration**.

Les bactéries retrouvées sont :

→ Des bactéries **épuratrices** : les espèces varient en fonction de la composition des eaux et du taux de nitrates et de phosphates. Elles ont le **rôle le plus important** dans les lagunes.

→ Des bactéries **pathogènes** : elles proviennent de la flore microbienne intestinale de l'homme et des animaux. Elles sont présentes dans les lagunes en faible quantité.

- **Deuxième bassin** : les bactéries se multiplient, elles transforment la matière organique en matière minérale (sels minéraux et CO₂). Grâce à l'ensoleillement, les algues croissent, il y a une production d'oxygène (photosynthèse) et le phytoplancton se développe. Les bactéries pathogènes sont éliminées grâce à l'effet bactéricide des UV des rayonnements solaires (les bassins sont de faible profondeur pour une bonne pénétration des rayons).
- **Troisième bassin** : le zooplancton se développe. Il se nourrit du phytoplancton produit dans le second bassin et de bactéries. Il consomme l'oxygène produit dans le second bassin. La clarification de l'eau peut être assurée par le développement de petits crustacés comme par exemple des daphnies aussi appelées puce d'eau.

Traitement des eaux (2012) et MARCHAND (2016)

La lagune représente un écosystème varié de faune et de flore :

- Les **producteurs primaires** : ce sont des végétaux microscopiques (phytoplancton) et macroscopiques (algues et plantes épuratrices) qui utilisent les rayons du soleil, le

CO₂ et une partie de la matière organique entrante pour fabriquer leur propre matière minérale. Grâce à ce processus, il y a une libération d'oxygène.

- Les **herbivores** : ce sont les archées (microorganismes unicellulaires procaryotes) et le zooplancton qui endiguent la prolifération des végétaux.
- Les **consommateurs primaires** et les **détrivores** : ce sont les bactéries. Elles profitent de l'oxygénation des bassins pour pouvoir dégrader la pollution organique et participer à la minéralisation des sédiments.
- Les **carnivores** : ce sont le zooplancton et les prédateurs qui participent à l'épuration par la consommation des herbivores, des consommateurs primaires et d'autres carnivores.

Eau Rhin-Meuse (2007 : 1)

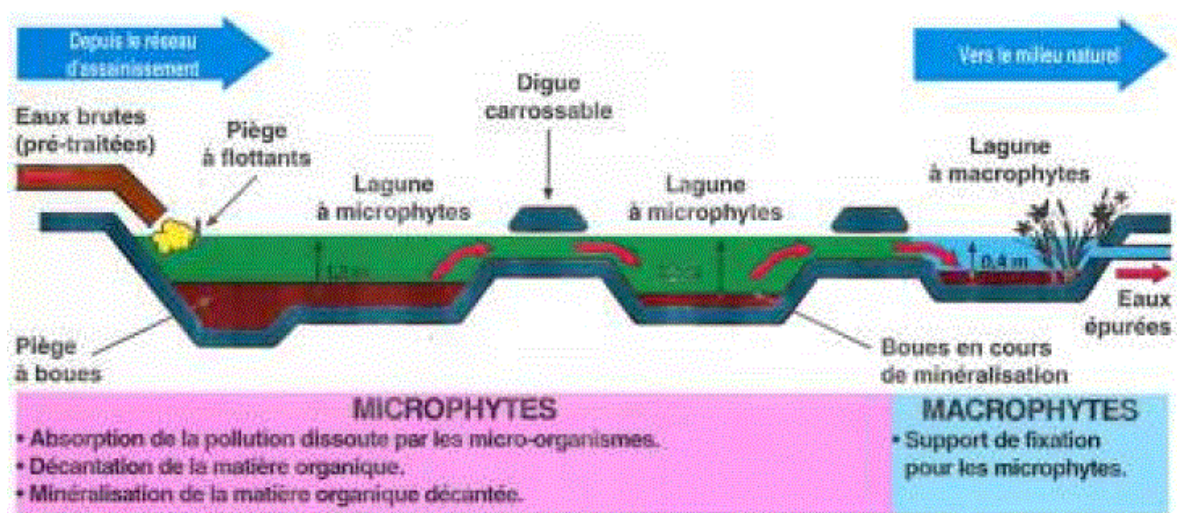


Figure 8 : Schéma du lagunage

Source : Traitement des eaux (2012)

1.2. Avantages et inconvénients

Le lagunage possède divers avantages et inconvénients (*Traitement des eaux*, 2012) :

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Bonne élimination de la pollution bactériologique	Place importante
Efficace sur des effluents peu concentrés	Épuration moins efficace en hiver
Très faible consommation énergétique	Sensible aux effluents concentrés (proscrire le raccordement d'industries ou d'élevage et éviter les effluents trop concentrés ou septiques)
Bonne intégration paysagère	Curage tous les 10 ans (les boues peuvent ensuite être épandues sur les terrains agricoles)
Bonne élimination de l'azote, du phosphore	Pas de maîtrise humaine du processus
Excellente élimination de la production microbiologique	Entretien des berges des bassins
Exploitation simple	Moustiques
La qualité de l'eau épurée est conforme aux normes des eaux de baignade	

1.3. Dimensionnement et construction

Dimensionnement :

On utilise le lagunage depuis 25 ans en France et celui-ci est de plus en plus performant avec les observations et retours d'expériences. Une surface de bassin de 12 m²/EH est recommandée. Les trois bassins nécessaires au lagunage doivent respectivement représenter 60, 20 et 20 % de la surface totale. La profondeur est d'environ 1 m afin d'éviter la pousse des végétaux comme les macrophytes, qui entraîneraient une oxygénation insuffisante des bassins et par la suite, l'eutrophie des eaux (MARCHAND, 2016).

Construction :

- Les digues doivent être assez larges pour permettre la circulation d'engins lourds (4 m).
- Un fossé de drainage des eaux de ruissellement tout autour du bassin est nécessaire.

- Un prétraitement sera effectué afin de piéger les matières les plus grossières par un dégrilleur et les flottants par une cloison placée à l'arrivée des eaux résiduaires.
- Chaque bassin sera équipé de façon à ce qu'il puisse être curé.
- Chaque bassin devra posséder une canalisation de trop-plein.
- L'entrée et la sortie de la station devront être équipées de dispositifs adaptés pour la mesure de débits, pour le calcul de rendement et le contrôle de l'étanchéité.
- La géométrie des bassins doit être régulière afin d'éviter les zones mortes.
- Les derniers bassins devront être orientés dans le sens du vent afin d'accumuler les lentilles dans une zone du bassin facile d'accès.

MARCHAND (2016)

1.4. Gestion et entretien

Un procédé d'épuration par lagunage génère de faible contrainte d'entretien et ne nécessite pas de personnel qualifié. Les tâches à effectuer sont (MARCHAND, 2016) :

- Faucardage des bordures de bassins.
- Surveillance de la prolifération des plantes aquatiques.
- Entretien des installations.
- Curage des bassins tous les 10 à 15 ans.

2. Filtres planté de roseaux (FPR)

Contrairement au lagunage, les systèmes de filtres plantés de roseaux sont peu consommateur d'espace. Il est recommandé une surface de bassin de 2 à 5 m²/EH à raison de 4 pieds de roseaux au m² (DUPONT, 2008 : 18).

Deux catégories de filtres existent, les filtres plantés de roseaux à écoulement vertical et à écoulement horizontal. Les stations de filtres plantés sont souvent des combinaisons de lits à écoulement vertical et/ou horizontal, en série, qui permettent d'assurer le prétraitement (traitement primaire) et le traitement des eaux usées (secondaire) (STOUKOV, 2008).

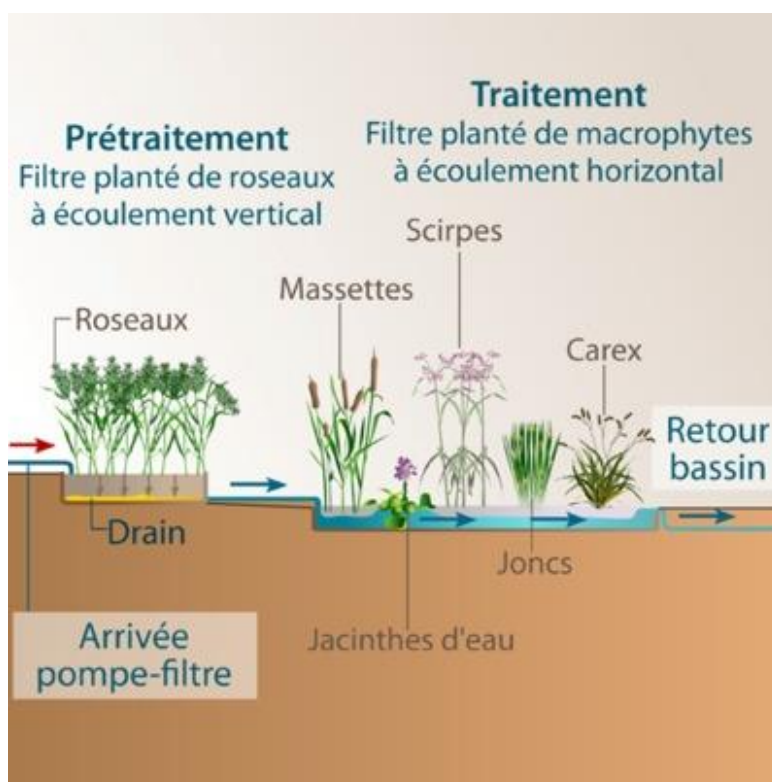


Figure 9 : Schéma d'un filtre planté

Source : Ooreka, s.d.

2.1. FPR à deux étages

Ce système d'épuration à deux étages est le procédé le plus développé en France. Il ne nécessite pas obligatoirement un traitement primaire en amont, le premier étage l'effectuant.

Quel(s) type(s) d'eau pour ce système :

Ce type de filtre est utilisable pour les eaux domestiques, mais aussi pour les eaux agricoles blanches et vertes, mais n'est pas réalisable pour le traitement des eaux brunes (Chambre d'agriculture des Pays de la Loire, 2007).

Fonctionnement et dimensionnement :

○ Filtre vertical :

Il est **alimenté en surface, par bâchée** (alimentation non continue), ce qui permet d'assurer une oxygénation permanente (condition aérobie) et d'effectuer la **nitrification**. L'effluent circule par percolation verticale à travers un massif de graviers fins et ressort par le fond. Le filtre est composé de plusieurs bassins disposés parallèlement afin de créer une alternance (1 fois par semaine) de phase d'activité et de repos (DUPONT, 2008 : 19). Les périodes de repos sont nécessaires pour la digestion de la matière organique et elles permettent également aux dépôts de matière organique accumulés à la surface du lit de se déshydrater et de se minéraliser (STOUKOV, 2008). Un filtre planté de roseau vertical peut donc effectuer à la fois le prétraitement, en retenant les matières solides, et le traitement, grâce à l'action des micro-organismes (STOUKOV, 2008). Ce système est adapté pour tous types de climats.

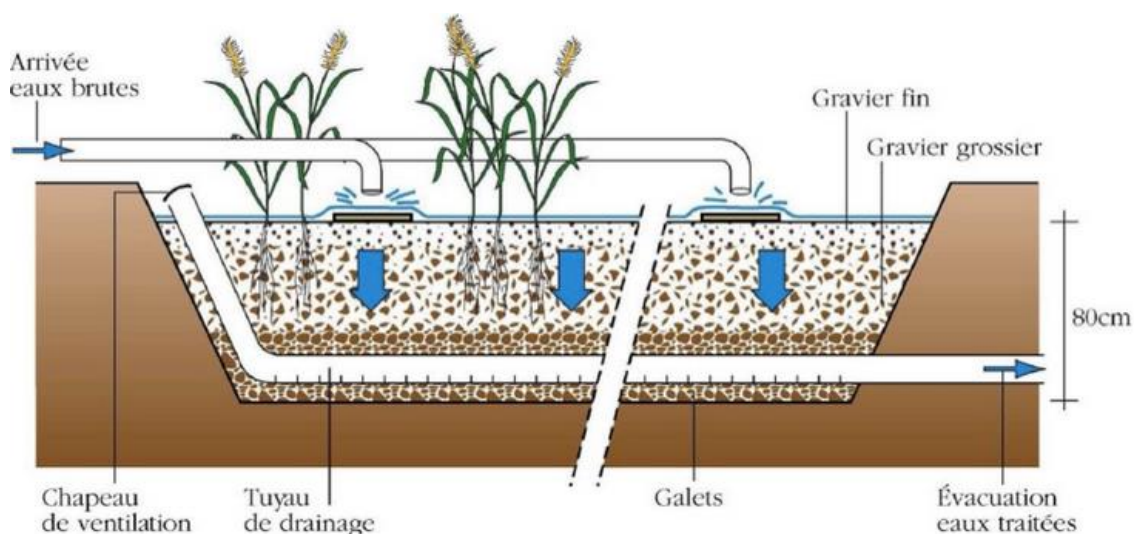


Figure 10 : Filtre planté à écoulement vertical

Source : ANC, s.d.

→ Types de végétaux utilisés :

Pour ce filtre, les végétaux utilisés sont les roseaux.

- Filtre horizontal (STOUKOV, 2008) :

Le filtre planté de roseaux à écoulement horizontal est **saturé en eau**. L'alimentation se fait en **continue** et la circulation de l'eau est horizontale, sous la surface du substrat (de 5 à 10 cm sous la surface). Un système de siphon en sortie permet de régler la hauteur d'eau dans le filtre, afin que ce dernier soit toujours rempli d'eau. En maintenant ainsi des conditions anaérobies, favorables au processus de **dénitrification**, un filtre planté de roseaux à écoulement horizontal permet d'assurer le traitement secondaire des effluents (élimination des nitrates). Pour que cette étape ait lieu, il faut qu'il y ait eu une étape de nitrification en amont.

L'aération de ce milieu filtrant saturé en eau résulte de l'apport d'oxygène par les racines des plantes. Cet apport est faible, l'action des bactéries aérobies est réduite, contrairement à celle des bactéries anaérobies qui sont très actives.

Le filtre planté à écoulement horizontal ne peut recevoir que des eaux prétraitées, ou très peu chargées en matière en suspension. Cela permet d'éviter tout risque de colmatage du massif filtrant. Ce prétraitement est souvent réalisé dans une fosse toutes eaux ou par un filtre planté de roseaux à écoulement vertical placé en amont.

Ce système est plus sensible au froid.

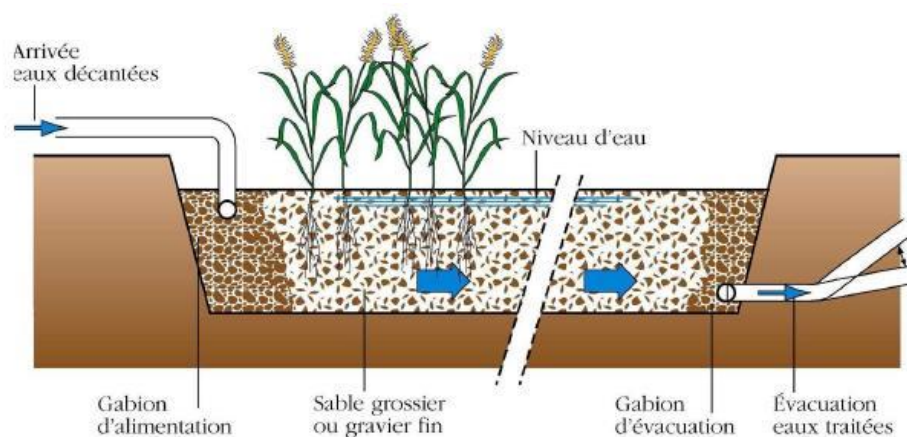


Figure 11 : Filtre planté à écoulement horizontal

Source : ANC, s.d.

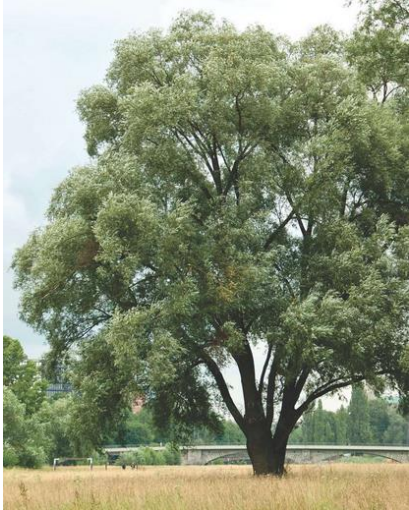
Entre les deux systèmes de filtration (verticale et horizontale), un dénivelé naturel d'environ 2 m est souhaitable afin de s'assurer du bon écoulement des effluents du filtre vertical au filtre horizontal. Si cela n'est pas le cas, une pompe de relevage devra être installée afin d'éviter toute stagnation des effluents dans le filtre.

→ Types de végétaux utilisés :

Contrairement aux filtres verticaux plantés uniquement de roseaux, les filtres horizontaux sont plantés d'une grande diversité d'espèces végétales, dont en voici quelques-unes (ARINO, ARNAUD, BOVE, 1995 et *Ecologs*, 2008) :

Roseau commun (<i>Phragmite australis</i>) <u>Lieux</u> : France, Corse, dans tout le globe. <u>Caractéristiques</u> : rhizomes rampants et envahissants, tiges s'élevant jusqu'à 3 m, fleurs en forme de plumet de mai à juillet, profondeur d'eau de 0,1 à 0,4 m. <u>Fonctions</u> : transforme tout type de boue polluée en terreau.	 <u>Source</u> : <i>Aquaportail</i>, 2014
Massette (<i>Typha latifolia</i>) <u>Lieux</u> : France, Corse, Europe, Afrique, Amérique et Asie. <u>Caractéristiques</u> : hauteur de 2 m et plus, souche rampante, fleurs en épi brun noir de 10 à 15 cm de juin à août, feuilles rubanées, profondeur d'eau de 0,05 à 0,20 m. <u>Fonctions</u> : fort traitement de polluants, riche en sel et en hydrocarbures.	 <u>Source</u> : <i>Parc national des Écrins</i>, s.d.

Iris d'eau (<i>Iris pseudacorus</i>) <u>Lieux</u> : France, Corse, Europe, Asie occidentale, Afrique septentrionale. <u>Caractéristiques</u> : racines fasciculées et épaisses, feuilles ensiformes atteignant 0,8 m de long, fleurs jaune vif d'avril à juillet, hauteur de 0,4 à 1 m, profondeur d'eau de 0,05 à 0,2 m. <u>Fonctions</u> : traite les métaux lourds.	 <u>Source</u> : Mes arbustes, s.d.
Scirpes (<i>Scirpus validus</i>) <u>Lieux</u> : France, Corse, dans tout le globe. <u>Caractéristiques</u> : racines latérales très nombreuses, tiges dressées de 1 à 4 m, feuilles jonciformes, profondeur d'eau de 0,3 à 1 m. <u>Fonctions</u> : capacité de purge de forte teneur en polluant.	 <u>Source</u> : Jardiplante, s.d.
Jonc (<i>Juncus effusus</i>) <u>Lieux</u> : Europe, Asie, Amérique du Nord. <u>Caractéristiques</u> : touffe de tiges de 40 à 80 cm, tiges dressées, glabres et creuses. <u>Fonctions</u> : tolérant dans les conditions humides ou sèches.	 <u>Source</u> : Pinterest, s.d.

Jacinthe d'eau (<i>Eichhornia crassipes</i>) <u>Lieux</u> : régions tropicales. <u>Caractéristiques</u> : les tiges forment des tapis flottants denses. <u>Fonctions</u> : nettoie les excès de nitrate et de phosphate, les métaux lourds et les polluants organiques.	 <u>Source</u> : Le jardin d'eau, s.d.
Saule Blanc (<i>Salix alba</i>) <u>Lieux</u> : Afrique du Nord, Asie, Europe. <u>Caractéristiques</u> : grand arbre pouvant atteindre les 25 m de haut. <u>Fonctions</u> : traite les pollutions aux métaux lourds, l'azote, les polluants organiques.	 <u>Source</u> : Bruns, s.d.

Coût estimé :

La construction par une entreprise s'élève à environ 12 000 € et environ 8 000 € si le filtre est auto-construit.

2.2. FPR à un étage avec recyclage

Quel(s) type(s) d'eau pour ce système :

Ce système est utilisable pour les eaux domestiques et est validé depuis le 14 janvier 2007 par le comité national de pilotage (*Cap élevage*, 2007) pour les effluents d'élevage peu chargés : eaux blanches issues du lavage du matériel de traite et de fromagerie, ensemble des eaux vertes (quais de traite et aire d'attente), eaux brunes (aire extérieure d'exercice et

aire de raclage découvertes de déjections) et lixiviats de fumière (purin dilué) (*Chambre d'agriculture des Pays de la Loire, 2007*).

Le tableau ci-dessous répertorie l'efficacité de chaque dispositif en fonction de l'effluent à traiter (*Chambre d'agriculture de Picardie et du Nord Pas-de-Calais, s.d.*) :

Tableau 1 : Filière adaptée aux types d'effluents à traiter

Dispositifs	EBI seules	EBI + EV des quais	EBI + EV des quais et aire d'attente	EBI + EV + laits non commercialisables	EBI + EV + EBr + purin dilué
Fosse toutes eaux avec épandage sur prairies	++++	×	×	×	×
FPR à 2 étages	+++	++++	×	×	×
BTS ou FAP avec épandage sur prairies	+	++++	++++	++++	+++
BTS ou FAP avec lagunage	+	+	+	×	++++
BTS avec FPR à un étage	+	+	+	×	++++

FPR	Filtre planté de roseaux	EBI	Eaux blanches
BTS	Bassin tampon de sédimentation	EV	Eaux vertes
FAP	Filtre à paille	EBr	Eaux brunes

LÉGENDE :

++++	Filière très adaptée
+++	Filière adaptée
+	Filière peu adaptée
×	Filière pas adaptée

Fonctionnement et dimensionnement :

L'effluent liquide récupéré est envoyé par bâchées sur trois bassins successifs de filtres alimentés alternativement. Les eaux subiront une filtration et un traitement grâce aux bactéries présentes dans le substrat minéral (sable, graviers, cailloux). Deux étapes sont effectuées lors de ce traitement secondaire (*Chambre d'agriculture des Pays de la Loire*, 2007) :

- La première étape est la nitrification et le traitement de la charge organique. Le système d'aération et les différentes couches drainantes de graviers assurent les conditions aérobies nécessaires au processus de nitrification. L'aération est également favorisée par les racines des roseaux qui permettent une meilleure répartition des effluents dans tout le filtre et ainsi activent le rôle des microorganismes fixés sur les racines. Au fond des bassins, des drains collectent les effluents pour les diriger vers un regard où va s'effectuer une double séparation : 80 % de l'effluent traité est recyclé vers le traitement primaire et 20 % est épandu en gravitaire vers un traitement tertiaire final.
- La deuxième étape est la dénitrification des 80 % d'effluent traité recyclé effectuée au niveau du traitement primaire soit au niveau du BTS soit dans la cuve de sortie en aval du filtre à paille.

Chaque bassin a la même surface. Connaissant celle-ci, le volume de la bâchée sera déterminé pour une précision optimale. Un débit réel minimal de $0,6 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ va permettre d'obtenir une meilleure répartition de l'effluent sur le bassin et de réaliser un « flaquage ».

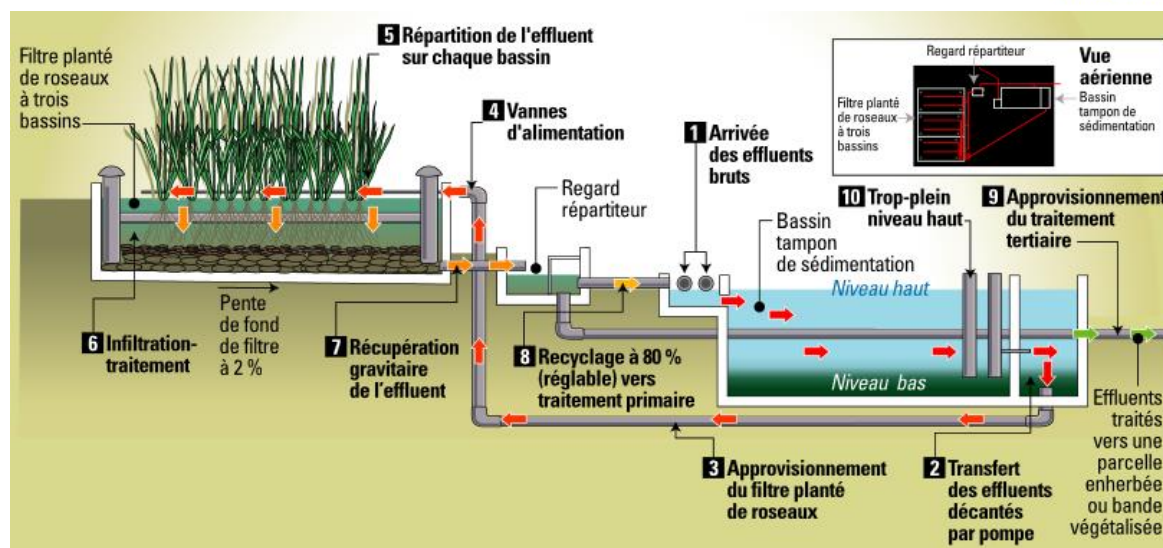


Figure 13 : Schéma du filtre planté à un étage avec recyclage

Source : La France agricole, 2007.

Remarque 1 : les bassins (Chambre d'agriculture des Pays de la Loire, 2007).

L'étanchéité des filtres est assurée par la pose d'une géomembrane ou par la construction de parois maçonnées en blocs de béton banché ou des parois préfabriquées. Ces éléments peuvent être auto-construits.

Des cloisons rigides en bois ou en parpaings banchés séparent les trois bassins. Elles doivent dépasser 20 cm au-dessus du substrat et être enfouies sur une profondeur de 30 cm au minimum, il n'y a pas d'obligation que les cloisons touchent le fond des filtres.

Remarque 2 : les granulats et la végétation (Chambre d'agriculture des Pays de la Loire, 2007).

Les filtres sont composés de trois couches superposées différentes de substrat, de la granulométrie la plus faible au-dessus, à la granulométrie plus forte en-dessous. Mesurant environ 1,45 m (1,25 m de granulat + 20 cm de hauteur de séparation), ils sont composés de :

- 1 m de graviers fins de 3/6 mm en surface.
- 10 cm de graviers de 10/20 mm au milieu.
- 15 cm de galets de 20/40 mm au fond.

L'espèce végétale la plus adaptée pour ce système d'épuration est le roseau commun, planté au printemps, à raison de 4 pieds minimum par m².

Entretien :

Le maintien de la planéité des granulats est important afin d'éviter les écoulements préférentiels. Le faucardage des roseaux de 15 à 20 cm de haut est à effectuer 1 fois/an à l'automne. Retrait de l'accumulation de matière organique en surface du filtre. Alternier l'alimentation des filtres chaque semaine. Vérifier régulièrement que les tuyaux de drainage ne soient pas colmatés.

Au bout de 10 ans, éclaircir la végétation et changer la couche superficielle du filtre.

Coût estimé :

Pour une surface de 100 m², la construction par une entreprise s'élève à environ 20 000 € et environ 15 000 € en auto-construction.

2.3. Rôle de *Phragmites australis*

Le *Phragmites australis* est l'espèce de roseau la plus répandue dans le monde (LEE, SCHOLZ, 2007 : 87). Elle est présente sur tous les continents et est cosmopolite dans les zones tempérées. En Europe, elle est considérée comme une plante invasive, car elle est implantée partout. Le roseau commun est une plante très répandue dans les estuaires, en zones humides, en formant une roselière (*Aquaportail*, 2014). Il peut supporter un taux de salinité maximal d'environ 45 g/L (LEE, SCHOLZ, 2007 : 88) ce qui est bien supérieur au taux de salinité dans les océans qui est d'environ 35 g/L.



Figure 12 : Roselière

Source : Marais de l'INRA de Saint Laurent de la Prée

C'est une graminée vivace robuste qui peut atteindre une hauteur de 6 m, mais elle ne dépasse pas 2 m en Europe. C'est une plante semi-aquatique avec un système racinaire très développé. Ces racines, spécialisées dans l'absorption de l'eau et des sels minéraux contenus dans le sol, accumulent des réserves et permettent à la plante de se fixer au substrat minéral. Elles abritent également une flore bactérienne importante. La partie du sol où vivent ces microorganismes aérobies s'appelle la rhizosphère. L'activité microbienne à ce niveau dépend de la teneur en eau et en oxygène (VYMAZAL, 2011) qui favorisent la minéralisation de l'azote et du phosphore qui est ensuite disponible pour la plante. Une coopération est créée entre les microorganismes et la plante. De plus, elle leur offre également une protection contre les faibles températures et contre les rayons ultraviolets du soleil qui anéantiraient la vie des bactéries (STOUKOV, 2008).

Les *Phragmites australis* ont aussi une action mécanique : leur taille permet une bonne prise au vent des tiges. Elles cassent la « croûte » de boues qui s'est formée à leurs pieds, en surface du filtre vertical. Cela permet de limiter les phénomènes de colmatage et de garantir la perméabilité en surface du filtre (STOUKOV, 2008).

Efficacité d'épuration : des études antérieures ont rapporté l'efficacité des macrophytes pour l'élimination des polluants (LEE, SCHOLZ, 2007 : 87).

- Meilleure efficacité d'élimination de la DBO (Demande Biochimique en Oxygène) dans les systèmes plantés (70-75 %) que dans les systèmes implantés (63 %) et pour la DCO (Demande Chimique en Oxygène), le rendement d'élimination est de 75 % contre 48 % dans les zones humides de surface (LEE, SCHOLZ, 2007 : 87-88).
- Pour les MES (Matières En Suspension), l'efficacité d'élimination dans les filtres à écoulement horizontal est de 88 à 90 % contre 46 % pour les filtres non végétalisés (LEE, SCHOLZ, 2007 : 88).
- Absorption de l'azote par les rhizomes des roseaux ce qui contribue de façon significative à son élimination (LEE, SCHOLZ, 2007 : 87). L'efficacité de l'**élimination de l'azote** est **plus performante** et **stable** sur les filtres plantés que sur les filtres non plantés. En revanche, l'élimination de l'azote total est plus faible pour les lits végétalisés que pour les lits non végétalisés (LEE, SCHOLZ, 2007 : 88).
- Assimilation des polluants dans les tissus afin de fournir une surface et un environnement propice pour que les microorganismes puissent grandir (LEE, SCHOLZ, 2007 : 88).
- Les macrophytes permettent de réduire la vitesse de l'eau afin d'empêcher une érosion trop importante des berges.

2.4. Comparaison des macrophytes

Des études ont tenté de comparer différents végétaux dans leur capacité à éliminer les polluants dans les filtres horizontaux (J. VYMAZAL, 2011) :

- Pour l'**azote ammoniacal** (N-NH_4^+) :
 - **54 à 56 %** pour les scirpes (*Scirpus validus*).
 - **12 à 26 %** pour les roseaux (*Phragmites australis*).
 - **3 à 14 %** pour un mélange de massettes (*Typha orientalis* et *Typha domingensis*).
- Pour le **phosphore total** (P_T) :
 - **61 %** pour les scirpes.
 - **53 %** pour les massettes.
 - **37 %** pour les roseaux.

D'après ces résultats, le *Scirpus validus* est l'espèce la plus efficace pour l'élimination de l'azote et du phosphore contrairement aux *Phragmites australis*.

2.5. Avantages et inconvénients

La phyto-épuration présente de nombreux avantages, notamment écologique dans la mesure où elle réduit la pollution des eaux de surface et des nappes phréatiques. C'est un système fiable et performant (ConsoGlobe, 2015).

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Pas de production de boues	
Épuration efficace	
Absence d'odeur	
Bonne intégration paysagère	Place importante
Facile d'entretien	Entretien régulier (faucardage des roseaux)
Faible coût d'exploitation	Construction élaborée
Production d'un compost valorisable	
Un système durable	
Installation performante	

STOUKOV (2008)

2.6. Gestion et entretien

Une fois par an, en automne, il faut effectuer l'opération de faucardage, c'est-à-dire qu'il faut couper la partie végétative des roseaux, ce qui permet d'apporter de l'oxygène aux bassins. En hiver, les roseaux sont secs et ne peuvent plus apporter de l'oxygène par leurs racines. Les rhizomes, tiges souterraines et subaquatiques remplies de réserve alimentaire, étant creux et toujours en place quelques soit la saison, l'air circule à l'intérieur et c'est ainsi que se fait l'aération des bassins, essentielle à la vie des bactéries (STOUKOV, 2008).

Les roseaux doivent être coupés à 20-30 cm de la surface du bassin afin que les effluents n'entrent pas dans les tiges coupées (STOUKOV, 2008).

Les filtres plantés de roseaux verticaux sont compatibles avec les climats rigoureux tandis que les filtres plantés de roseaux horizontaux sont plus sensibles au froid (STOUKOV, 2008).

Environ 4 fois par an (*Chambre d'agriculture des Pays de la Loire*, 2007) :

- Il faut vérifier l'état des géomembranes. Si celles-ci sont abîmées, elles n'effectuent plus leur rôle d'étanchéité, il faut les réparer rapidement.
- Il faut vérifier le bon drainage des eaux en sortie des bassins. Si celui-ci n'est pas correct, il faut procéder au nettoyage des drains de collecte des eaux filtrées.

III. TRAITEMENT TERTIAIRE

Avant le rejet dans le milieu naturel, un traitement tertiaire peut être mis en place. Son rôle est d'achever le traitement de l'effluent et de renforcer le rendement global du dispositif d'épuration. Il reçoit l'effluent traité, affine la nitrification et le traitement du carbone organique en milieu aérobie.

Fonctionnement et dimensionnement :

Les eaux traitées s'écoulent gravitairement vers une zone enherbée, des massifs filtrants végétalisés, une mare artificielle végétalisée ou des bosquets épurateurs. Le choix est déterminé en fonction du traitement secondaire, de la surface disponible, de la proximité du réseau électrique si l'installation d'une pompe est nécessaire.

La surface de ce dernier traitement est calculée à partir de la charge résiduelle et hydraulique (quantité d'eau/m²) en sortie de traitement secondaire.

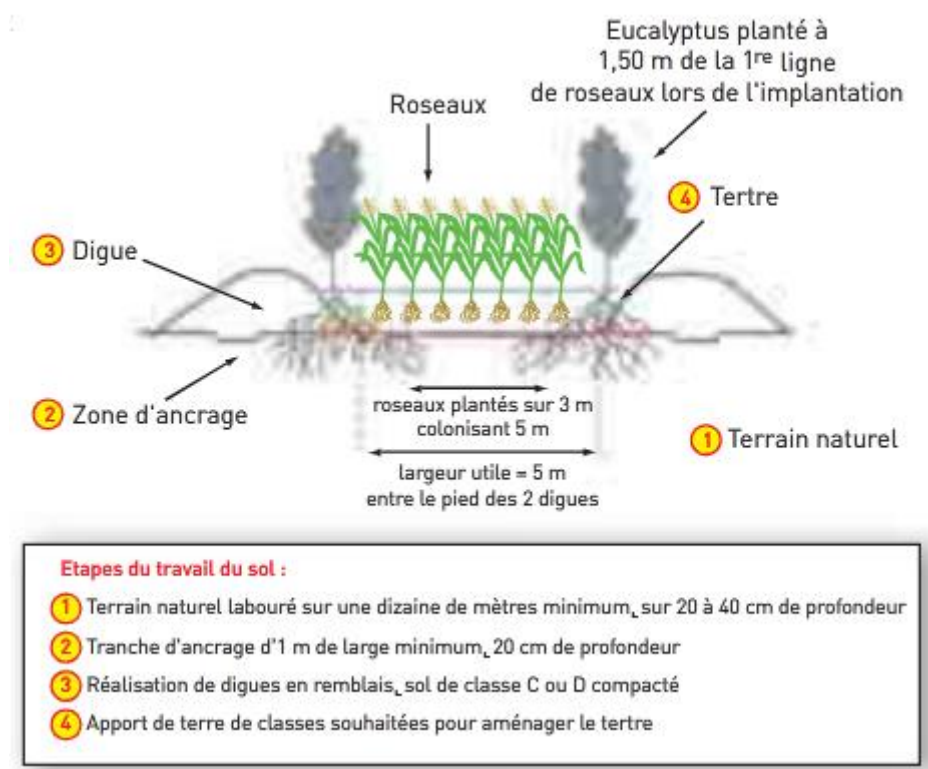


Figure 14 : Schéma de massif filtrant végétalisé

Il y a divers avantages à traiter ces eaux d'élevage peu chargées par un système autonome écologique :

- Réduire le coût d'investissement par rapport à une fosse classique.
- Diminuer le temps de travail, des volumes à stocker et des coûts d'épandage.
- Améliorer la valeur fertilisante des lisiers à épandre.
- Intégration de la structure dans le paysage, sans nuisances pour les riverains.

IV. ZONE TAMPON HUMIDE ARTIFICIELLE (ZTHA)

Ce dernier dispositif est basé sur les mêmes principes évoqués ci-dessus, à la seule différence que des matériaux ne sont pas utilisés.

Par définition, une zone tampon humide désigne un espace interstitiel du paysage rural mis en place dans le but d'assurer une fonction d'**interception** ou d'**atténuation** des transferts de pollution d'origine agricole vers les milieux naturels aquatiques, de préserver la biodiversité et de lutter contre des inondations. Il s'agit de dispositifs qui permettent de **gérer les ruissellements** des **eaux de drainage**, qui sont faciles à concevoir et à aménager, qui nécessitent peu d'entretien et qui engendrent un minimum de coûts (*Onema*, s.d.). Une mare, une roselière, un fossé végétalisé, un bassin d'orage sont considérés comme des ZTHA (*IRSTEA*, 2014). Elles sont généralement peu profondes ce qui permet une meilleure pénétration des rayons du soleil et l'enracinement éventuel de macrophytes, comme par exemple des roseaux, des scirpes, des massettes, des nénuphars, vont favoriser l'épuration de l'eau (*Onema*, s.d.).

La mise en place d'une zone tampon est une solution adaptée pour **limiter la dispersion des contaminants** dans l'environnement (nitrates et pesticides) avant qu'ils retournent dans la nappe pour les traiter et les épurer (*Le Parisien TV*, 2014). Les modes de transferts ciblés sont le ruissellement concentré et le drainage agricole (*Onema*, s.d.).

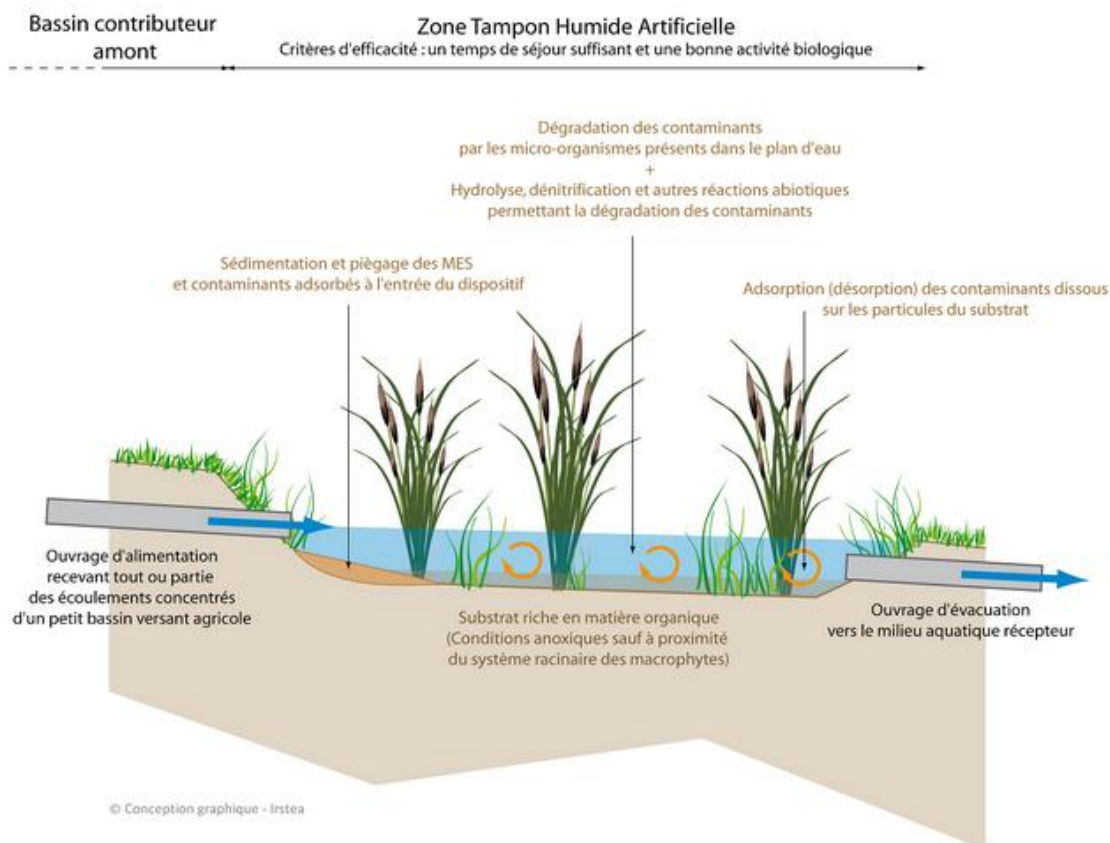


Figure 15 : Schéma d'une ZTHA

Source : IRSTEA (2014)

V. ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE CES DISPOSITIFS

1. Traitement primaire

Le taux d'abattement moyen, exprimé en %, des charges entrantes est répertorié dans le tableau ci-dessous (COILLARD et al., 2003) :

Tableau 2 : Taux d'abattement (%) après le traitement primaire

	MES	DCO	Azote total	N-NH ₄ ⁺	Phosphore
BTS	60	45	30	0	20
FAP	60	45	30	0	20

À la vue de ces résultats, un traitement secondaire est indispensable afin d'avoir un meilleur taux d'abattement avant le rejet dans le milieu naturel.

2. Lagunage

Ce tableau est basé sur un exemple de station bien dimensionnée. Dans ce cas, l'effluent traité est domestique (*Eau Rhin-Meuse*, 2007 : 9).

Tableau 3 : Caractéristiques qualitatives de l'eau traitée après lagunage

Efficacité de l'élimination de la pollution carbonée	Très bonne DBO ₅ : 90 % - 15 mg.L ⁻¹ DCO : 75 % - 85 mg.L ⁻¹
Efficacité de l'élimination de la pollution en matières en suspension	Très bonne 80 % - 25 mg.L ⁻¹
Efficacité de l'élimination de la pollution azotée (NTK ¹² et NGL ¹³)	Bonne 70 % - 10 mg.L ⁻¹
Efficacité de l'élimination de la pollution phosphorée	Acceptable 60 % - 3 mg.L ⁻¹
Efficacité de l'élimination bactériologique (E. Coli)	Excellente 3 à 4 unités log (4 UL = 99,99 %)

3. Filtre planté

Pour de bonnes performances épuratoires, il faut dimensionner correctement les ouvrages (STOUKOV, 2008) :

- Un bon rendement d'élimination des MES se joue sur la granulométrie du substrat, plus elle est fine, meilleur sera le rendement, mais le risque de colmatage est plus élevé.

¹² Azote Total Kjeldahl : quantité (mg/L) correspondant aux formes réduites de l'azote soit à l'azote organique et ammoniacal.

¹³ Azote global : c'est la somme de toutes les formes d'azote différentes contenues dans un prélèvement.

- Un bon rendement d'élimination de la matière organique se joue sur la flore microbienne développée au sein du système racinaire des plantes (jusqu'à 98 % de rendement pour la DBO₅).
- Un bon abattement des bactéries fécales se joue sur le temps de séjour. Trois jours sont nécessaires, car les conditions ne sont pas favorables à leur développement.
- Une bonne dénitrification est possible avec la combinaison des FPRV puis des FPRH, car l'épuration se poursuit dans un milieu pauvre en oxygène.

Le tableau ci-dessous est basé sur un exemple de station bien dimensionnée. Dans ce cas aussi, l'effluent traité est domestique (*Eau Rhin-Meuse*, 2007 : 8).

Tableau 4 : Caractéristiques qualitatives de l'eau traitée après FPR vertical

Efficacité de l'élimination de la pollution carbonée	Très bonne DBO ₅ : 90 % - 15 mg.L ⁻¹ DCO : 85 % - 40 mg.L ⁻¹
Efficacité de l'élimination de la pollution en matières en suspension	Très bonne 90 % - 10 mg.L ⁻¹
Efficacité de l'élimination de la pollution azotée NTK	Très bonne 85 % - 5 mg.L ⁻¹
Efficacité de l'élimination azotée en NGL	Acceptable 45 % - 30 mg.L ⁻¹
Efficacité de l'élimination de la pollution phosphorée	Acceptable 40 % - 4 mg.L ⁻¹
Efficacité de l'élimination bactériologique (E. Coli)	Bonne 1 à 3 unités log

D'après le site du *Centre d'Élevage de Poisy* (ferme péri-urbaine), près d'Annecy (74), une station expérimentale pour traiter les effluents peu chargés a été construite. Elle utilise la technique d'épuration du filtre planté de roseaux à un étage avec recyclage pour traiter les eaux blanches, vertes et brunes. Quatre objectifs ont été fixés :

→ Traitement des effluents de l'exploitation par un système autonome dans le but d'avoir un lisier plus fertile.

→ Diminution des volumes de lisiers à épandre.

→ Intégration de la structure dans le paysage sans aucune nuisance olfactive et visuelle pour les riverains.

→ Transposition de la station sur d'autres exploitations.

La station est composée d'un bassin tampon de sédimentation en traitement primaire, d'un filtre planté de roseaux composés de trois bassins en traitement secondaires et d'une mare artificielle en traitement tertiaire.

Le dimensionnement a été calculé par l'Institut de l'Élevage et le Cemagref en fonction du nombre d'animaux, des logements et des pratiques de la ferme.

Un suivi rigoureux de la station est effectué (voir tableau ci-dessous). Chaque mois, une quinzaine de paramètres sont analysés en trois points de prélèvement : les effluents bruts, la sortie du bassin de sédimentation, la sortie du filtre planté. L'analyse est réalisée sur 144 prélèvements / 24h. Un prélèvement ponctuel en sortie de mare est réalisé afin d'avoir une idée de son rôle épuratoire. Cependant ce prélèvement n'est pas effectué de manière aussi rigoureuse que les autres paramètres (*Centre d'élevage de Poisy, s.d.*).

Tableau 5 : Résultats d'analyses

Paramètres	Moyenne de mai à octobre		Moyenne de novembre à avril	
	2006 (sans aération)	2007 (avec aération)	2006 (sans aération)	2007 (avec aération)
MES	71 %	83 %	72 %	72 %
DCO	74 %	89 %	71 %	77 %
NG	52 %	68 %	59 %	60 %

MES : Matières En Suspension.

DCO : Demande Chimique en Oxygène.

NG : Azote Global.

Le coût total des travaux s'est élevé à 82 000 €.

4. ZTHA

Via le drainage agricole, des fossés végétalisés vont permettre la réduction des transferts d'azote, sous réserve de favoriser aussi la dénitrification. Il est prouvé que la vitesse d'écoulement à travers le fossé et le temps de séjour des polluants constitue un paramètre important. Plus cet écoulement est lent, plus les possibilités de rétention et de dégradation des contaminants sont élevées. En conditions favorables de température et de pH, les conditions anaérobies et la richesse du substrat en matière organique, libérée par la végétation, sont particulièrement propices au processus de dénitrification (*Onema*, s.d.).

Le système racinaire va permettre l'absorption de l'eau et des nutriments et la régulation des concentrations de nitrates. Grâce aux macrophytes, l'azote assimilé par les racines est retenu temporairement avant d'être restitué au sol sous forme de matière organique dès la sénescence du végétal (*Onema*, s.d.).

Grâce à divers processus de traitements biologiques et chimiques, tels que la sédimentation, la filtration, la précipitation chimique, l'action microbienne et l'absorption par les végétaux, des études ont montré que les systèmes de zones humides permettaient la diminution de concentration de nombreux contaminants de l'eau tels que l'azote et le phosphore (les polluants les plus critiques dans le domaine agricole), les pesticides, les MES, la DBO, les traces de métaux, les oligo-éléments ainsi que les agents pathogènes. Même si la concentration en azote diminue grâce à l'action des plantes, le processus d'élimination le plus efficace reste néanmoins la nitrification et la dénitrification (WOLTEMADE, 2000).

Les facteurs de contrôle importants pour ces zones humides sont le taux d'afflux d'eau riche en azote, le temps de séjour de l'eau dans la zone humide, la concentration de matière organique et la superficie disponible des plantes et autres substrats pour la croissance des microbes (ZEDLER, 2003 : 67-68).

Quelques pourcentages relevés dans les zones humides construites pour le traitement des eaux usées municipales (WOLTEMADE, 2000) :

- Pour l'élimination de l'azote, les pourcentages sont très variables, ils varient selon les études de 3 à 99 %, ce qui n'est pas très représentatif d'une réelle efficacité et jusqu'à 44 kg/j/ha de taux de charge d'azote.

- Plus de 95 % de rendement pour les nitrates.
- 96 % d'élimination pour les nitrites.
- Entre 14 et 98 % d'élimination pour l'ammonium.

VI. HYGIÈNE ET SÉCURITÉ

Les installations de filtres de roseaux sont des stations d'épuration, par conséquent, il y a de nombreux risques professionnels à connaître et à éviter grâce au port des EPI (Équipement de Protection Individuelle). Les risques principaux sont (*Office national de l'eau*, 2008) :

- **Risques de chutes** : en l'absence du personnel, le site de la station doit être clôturé, les accès fermés à clé et les ouvrages refermés après chaque intervention (poste de relevage, regards) pour éviter les chutes verticales. Un autre risque de chute est possible, ce sont les glissades
- **Risques bactériologiques** : les eaux usées sont porteuses d'agents pathogènes, il faut donc éviter tout contact avec la peau (port des gants et lavage des mains après intervention).
- **Risques électriques** : les postes de relevage et les pompes pour assurer le système d'alimentation par bâchées sont des systèmes électriques. Le personnel exploitant doit être habilité afin d'intervenir sur ces équipements. Il y a différents degrés d'habilitation électrique selon les types d'interventions à faire.

Pour cela, le technicien en charge de la station doit suivre une formation afin d'être sensibilisé à l'hygiène et à la sécurité, car des contrôles annuels sont réalisés. Si l'entreprise est certifiée pour la sécurité (OHSAS 18001), ces contrôles seront d'autant plus stricts.

VII. RECUEIL D'EXPÉRIENCES

1. ZTHA

En France, des ZTHA ont été mises en place, dans le cadre de projets de recherches de l'IRSTEA, afin de tester leur efficacité sur plusieurs bassins versants :

- À Rampillon, en Seine-et-Marne : implantation de plusieurs ZTHA, en 2010, récupérant les eaux d'un bassin versant de 355 ha. Vidéo visualisée sur le site de *La France agricole* dans l'article « Une initiative collective pour dépolluer les eaux de drainage », publié le 17 juin 2016.

François BIRMANT : responsable des actions préventives à Aqua'Brie, association pour la protection de la nappe du Champigny.

Régis TAILLEU : agriculteur.

Julien TOURNEBIZE : hydrologue à l'IRSTEA (Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture) et responsable du site pilote de Rampillon.

Le reportage se déroule dans la ville de Rampillon (77). Il montre des agriculteurs, des chercheurs et des gestionnaires de l'eau qui travaillent ensemble à la dépollution des eaux agricoles. Les propos ci-dessous sont rapportés de la vidéo.

L'objectif : préserver la nappe du Champigny qui approvisionne en eau potable près d'un million de franciliens.

Problème présenté :

La ville de Rampillon est un territoire de grande culture avec du drainage, ce qui implique des transferts rapides vers la ressource en eau. La ressource en eau supérieure et les captages, tous les deux connectés par des zones d'engouffrement, sont fortement impactés par les pesticides.

Solution :

Chez des agriculteurs volontaires, une opération pilote a été lancée en 2005 en mettant en place des zones tampons humides artificielles. Elles permettent de concentrer et

dégrader les nitrates et les pesticides en amont du cours d'eau. Une mare déjà existante a été retravaillée afin d'augmenter les capacités épuratoires de ces zones. En sortie, il y a un bassin qui récupère ces eaux pour réaliser l'épuration finale et récupérer les eaux en cas de crues.

L'enjeu principal est l'amélioration de la qualité de l'eau, donc de réduire l'impact sur la ressource en eau.

En 10 ans : **moins 25 % de nitrates** en entrée de dispositif et une efficacité variable selon les conditions climatiques en sortie.

Entre l'entrée et la sortie, un abattement entre **40 et 50 % est observé pour les pesticides et une réduction de 20 mg.L⁻¹ pour les nitrates**. Cette concentration varie en fonction des saisons plus ou moins pluvieuses.

L'aménagement a permis de mettre en évidence les différences de comportement entre les molécules. Certaines ressortent sans être dégradées tandis que d'autres sont transformées en de nouveaux métabolites qui suscitent des questions par rapport à la dégradation et l'élimination des pesticides.

Ce site sert de démonstration pour les agriculteurs qui sont dans les mêmes problématiques de gestion des eaux de drainage, de visualiser et de se rendre compte de ce que sont des zones humides en terme d'aspect paysager, d'emprise foncière.

Les données de ce site serviront de références de comparaison d'efficacité pour des ZTHA construites sur la France.



*Figure 16 : ZTHA de Rampillon (77)
Source : Le Parisien TV (2014)*

- Expérience menée sur deux bassins versants drainés en vue de comparer leur efficacité de rétention des pesticides sur deux types de ZTHA (TOURNEBIZE, PASSEPORT, et al., 2013).

→ Deux types de zones tampons humides artificielles : in-stream et off-stream.

Le concept in-stream signifie que **toute l'eau de drainage** est retenue dans une ZTHA située en aval.

Au contraire, le concept off-stream signifie qu'il y a seulement une **partie de l'eau de drainage** qui est retenue, les ZTHA ne pouvant pas traiter tout le flux d'eau. Le but étant « d'intercepter et de traiter un maximum de flux possible de pesticides tout en déviant le moins d'eau de drainage dans la zone humide ». Cette alternance est effectuée à l'aide d'une commande manuelle. La zone humide est donc alimentée lors des périodes d'application de pesticides et est fermée lors de période de drainage sans pesticides (forte précipitation).

→ 1^{ère} ZTHA située en amont à Aulnoy, en Seine et Marne : récupération des eaux de l'exutoire d'un bassin versant drainé de 36 ha. Concept in-stream (cf. figure 17).

→ 2^{ème} ZTHA située en aval à Bray, en Indre et Loire : constituée de trois bassins végétalisés en série peu profond. Concept off-stream (cf. figure 17).

Ces deux ZTHA récupèrent les eaux de bassins versants agricoles cultivés de blé d'hiver, d'orge, de colza et de betterave à sucre. Les eaux ont été analysées et les résultats ont montré une efficacité sur l'abattement des concentrations en pesticides (une réduction de respectivement 54 et 45 %). Dans la 2^{ème} zone humide, les résultats ont montré une importante **adsorption**¹⁴, **désorption**¹⁵ et **dégradation** des pesticides contrairement à Aulnoy où une dilution importante a rendu difficile de savoir si une dégradation de pesticides s'était produite ou non.

¹⁴ Phénomène physique de fixation de molécules sur la surface d'un solide. Ce phénomène est utilisé pour "récupérer" des molécules indésirables de fluide (liquides ou gazeuses) dispersées dans un solvant (EMSE, s.d.).

¹⁵ Phénomène inverse de l'adsorption : les liaisons ioniques entre ions, molécules et substrat se brisent et les ions ou molécules précédemment adsorbées se détachent du substrat (Futura science, s.d.).

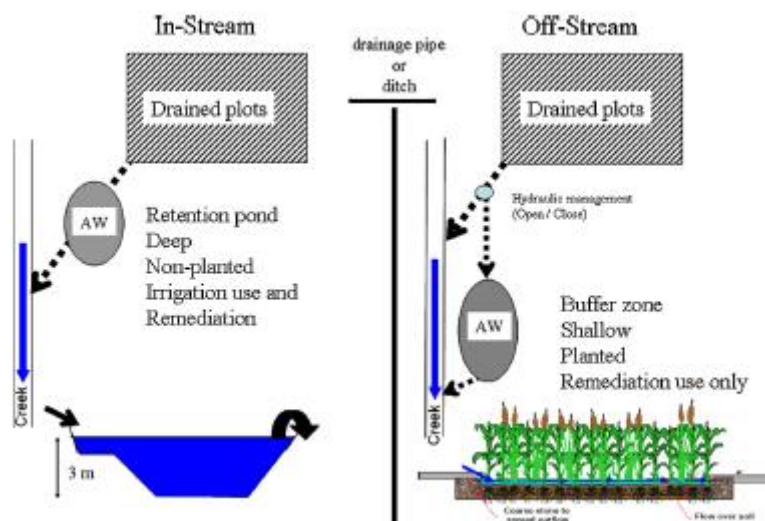


Figure 17 : Deux types de ZTHA

Source : TOURNEBIZE, PASSEPORT, et al. (2013)

→ Résultats :

Les eaux du bassin d'Aulnoy ont été analysées après avoir fait une sélection de différents pesticides parmi ceux qui ont été appliqués. L'Institut Pasteur de Lille a procédé à une extraction liquide-liquide et aux analyses par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC / MS)¹⁶ et à une extraction solide-liquide et aux analyses par chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse (LC / MS)¹⁷. Pour les deux techniques, la limite de quantification¹⁸ était de 0,02 g/L.

Les eaux du bassin de la Bray, quant à elles, ont subi une micro-extraction en phase solide (SPME) et ont été analysées à l'aide d'une GC / MS. Cette technique a permis de déterminer 16 pesticides. La limite de quantification se situait en 0,05 et 0,5 µg/L.

¹⁶ De l'anglais « Gas Chromatography Mass Spectrometry » est une technique d'analyse et de quantification des composés organiques volatiles et semi-volatils. L'analyse GC / MS peut travailler sur des liquides, des gaz et des solides (EAG Laboratoires, s.d.).

¹⁷ De l'anglais « Liquid Chromatography Mass Spectrometry » est une technique de laboratoire de chimie analytique pour l'identification, la quantification et l'analyse de masse des matériaux (EAG Laboratoires, s.d.).

¹⁸ Valeur correspondant au seuil de quantification, c'est-à-dire la valeur au-dessous de laquelle le laboratoire n'est plus en mesure de déterminer avec exactitude la quantité du paramètre recherché. La limite de quantification est la plus petite valeur à partir de laquelle il existe un résultat de mesure avec une fidélité suffisante (Eau France, s.d.).

→ Conclusion :

Les deux expériences ont montré des résultats positifs pour l'abattement des concentrations en pesticides dans les ZTHA : 54 % pour le concept in-stream et 45 % pour le concept off-stream. L'efficacité dépend de la profondeur des bassins (phénomène de dilution qui réduit la dégradation biologique des pesticides), des conditions climatiques et des saisons.

2. FPR

- « Un filtre à roseaux avec recyclage depuis trois ans », publié en avril 2007 dans la revue *Réussir lait élevage*, « Les nouvelles filières pour traiter les effluents peu chargés » publié en avril 2007 dans le magazine *La France agricole* et « Filtres avec roseaux : une nouvelle filière pour épurer les effluents d'élevage » publié en mai 2007 dans le magazine *L'éleveur laitier*.

Ces deux articles expliquent le témoignage de trois frères agriculteurs (M Jacques, Laurent et Olivier ABILY) à Guipavas dans le Finistère, qui ont investi dans un filtre à roseaux avec recyclage, en 2004, pour le traitement des eaux blanches, brunes et de lixiviats de fumière issus de leurs 90 prim'holsteins. Au total, un volume annuel de 950 m³ est traité, soit quasiment 1,5 fois plus que le volume calculé lors de la période la plus pluvieuse sur la ferme expérimentale de St Laurent de la Prée (± 630 m³).

Principe de fonctionnement :

En traitement primaire, ils ont mis en place un BTS (27 m²) et un second compartiment (3 m²) où se trouve une pompe de relevage (27 m³/h), car le bassin est situé en contre-bas des filtres à roseaux.

En traitement secondaire, le filtre planté de roseaux (102 m²) est séparé en 3 bassins identiques de 34 m² et d'1,40 m de profondeur. La pompe envoie l'effluent par bâchées à la surface du bassin en fonctionnement où la nitrification va s'effectuer. Des drains récupèrent l'effluent traité jusqu'à un regard répartiteur qui renvoie 80 % de l'effluent traité au niveau du BTS pour subir la dénitrification et les 20 % restants vers le traitement tertiaire, un verger enherbé de 1200 m².

Les agriculteurs ont construit eux-mêmes le BTS et le filtre planté de roseaux en parpaings bancheurs avec un enduit intérieur hydrofuge pour assurer l'étanchéité du système. Hors main d'œuvre, le coût s'élève à 18 000 €.

Pour l'entretien, ils curent le BTS 2 fois/an, fauchent les roseaux à l'automne, nettoient la surface du filtre au râteau et au jet pour limiter les risques de colmatage, brossent régulièrement les parois du regard répartiteur. Ces opérations durent environ 30 h/an.

Avis : ils sont très satisfaits du système, même lors de pluies importantes, il fonctionne de manière autonome.

En parallèle de la filière de phyto-épuration, ils valorisent leur lisier. Il est de meilleure qualité, de 0,5 unité d'azote minéral/m³, il est aux alentours d'1,5 unité d'azote minéral/m³¹⁹, car celui-ci est plus concentré en azote du fait d'une conservation dans la fosse à lisier plus longue (de 6 mois, il est conservé 10 mois).

- Lors de la visite de l'INRA de Lusignan le 13 avril 2017, le dispositif expérimental Patuchev (conçoit et évalue des systèmes d'élevage caprins performants et durables) utilise le filtre planté pour le traitement des effluents depuis 2012 :

Tout d'abord, les eaux vertes (eaux de lavage du sol) et blanches (eaux de lavage du tank à lait) représentent un volume moyen de 750 L/j. Il n'y a pas de jus fumier, mais 120 L_{eau}/j y est ajouté pour le compostage. En traitement primaire, ces eaux passent sur un dégrilleur pour les séparer des matières grossières, comme la paille par exemple, puis sont stockées dans une fosse toutes eaux de 10 m³ pour y subir une décantation. Ensuite, à l'aide d'une pompe, ces eaux vont sur le filtre planté à un étage avec recyclage (63 m²) séparé en trois bassins de surface équivalente (21 m²). L'alternance des bassins est faite chaque semaine. Pour finir, après percolation à travers le filtre, l'eau épurée s'écoule en gravitaire dans une fosse : 1/10 est rejetée dans un étang et 9/10 est recirculée à l'aide d'une pompe dans la fosse de départ. En moyenne, l'effluent sera traité 7 fois avant de partir dans la nature.

Le bureau d'étude qui a établi la surface des filtres a surdimensionné le système.

¹⁹ Une unité d'azote correspond à 1 kg d'azote.



Figure 18 : Photo du filtre planté de roseaux à Patuchev

Entretien : les roseaux sont coupés en février et sont disposés de nouveau sur le filtre pour éviter la pousse de mauvaises herbes. Une clôture a été installée pour éviter toutes intrusions de personnes ou d'animaux.

Coût : tout compris, la construction s'est élevée à 45 000 €.

3. Dispositif installé chez un particulier

- Visite chez M Julien ANCELIN, assistant ingénieur à l'INRA de St Laurent de la Prée et agriculteur, le 17/03/2017 à St Médard d'Aunis.

Julien ANCELIN a décidé de créer chez lui, il y a 4 ans, une station d'assainissement individuelle basée sur le système de la phyto-épuration pour les eaux grises et les eaux peu chargées. C'est une construction individuelle, la société Aquatiris est venue vérifier la bonne installation des filtres à chaque étape.

Il y a 2 types de filtres : le premier filtre est un filtre vertical séparé en 2. Le deuxième filtre est un filtre horizontal.

→ **FILTRE VERTICAL** : prétraitement (traitement primaire).

Celui-ci sert de composteur, il est séparé en 2 filtres. Il y a une cuve en amont avec une pompe qui fonctionne à partir de 50 L d'effluent, celle-ci l'envoie dans le filtre, les

déchets grossiers sont également broyés pour que les microorganismes procèdent à une meilleure décomposition de la matière organique. Les 2 filtres communiquent ensemble par le dessous. Toutes les semaines, il y a un changement de filtre afin qu'il n'y ait pas de risque de colmatage avec l'apport important de matière organique. Il y a aucune odeur émanant de ce filtre, hormis quelques secondes lors du largage des effluent dans le filtre, le temps que l'effluent s'infiltre.

Végétation utilisée : le roseau commun → il permet d'effectuer une bonne aération des sols (compost), car celui-ci pouvant mesurer d'1,50 m à 3 m, à une bonne prise au vent, il permet une meilleure oxygénation de la terre et donc un meilleur développement des bactéries aérobies. Il permet également un meilleur bilan carbone, car il n'y a pas de dégagement de méthane, donc pas de développement de bactéries anaérobies. Le propriétaire faucarde avant le printemps.

Aménagement du filtre :

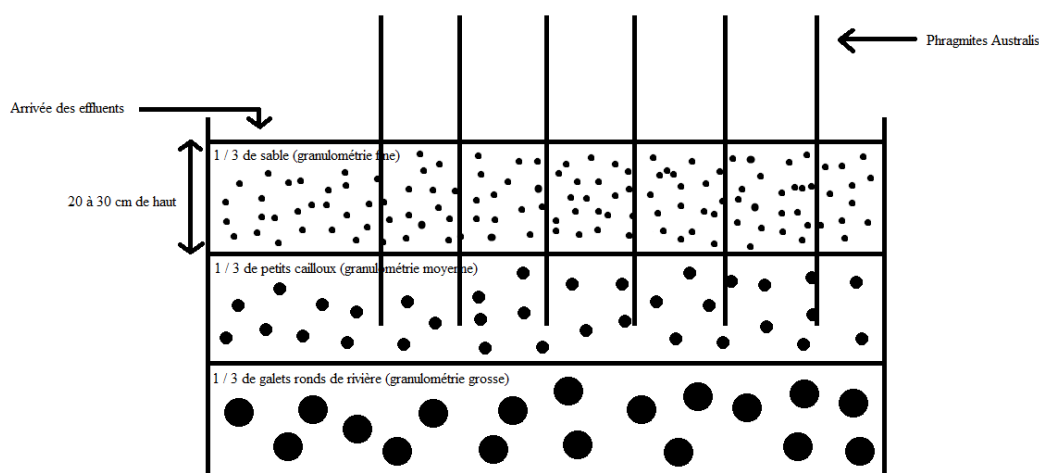


Figure 19 : Dessin du filtre vertical



Il ne faut pas mettre de calcaire, sinon, il y a un risque de colmatage dû aux particules fines. Il faut également faire attention à arroser régulièrement les plantes en cas d'absence prolongée.

Dimensionnement : le filtre est dimensionné pour 5 EH, il fait à peu près 9 m² de surface.

Temps de séjour de l'eau : environ 20 minutes.

Entretien : la première année est celle qui demande le plus d'entretien, le temps que le processus d'épuration se mette en place et que les roseaux soient suffisamment développés pour une bonne efficacité. À partir de la deuxième année, la stabilité du filtre se met en place. Il y a très peu d'accumulation de boues.

Ce premier filtre sert à éliminer les particules les plus grossières avant le passage sur le deuxième filtre, qui lui, va effectuer le traitement de l'eau.



Figure 20 : Photos du 1^{er} filtre

→ **FILTRE HORIZONTAL** : traitement secondaire.

Celui-ci fait 50 cm de profondeur.

Végétation utilisée : pour ce filtre, les plantes utilisées sont des plantes de bords de berges et non des plantes aquatiques. Il y a de la scabieuse, de l'iris jaune des marais, du jonc, de la menthe aquatique.

Aménagement du filtre : il y a 2 types de granulométrie : des petits cailloux dessus et des galets ronds dessous. Le bassin est toujours en eau contrairement au filtre vertical, mais il n'y a pas d'eau en surface afin d'éviter les insectes indésirables (moustiques).

Sur les filtres plantés, il n'y a pas d'analyses effectuées sur l'eau traitée. L'eau est évacuée dans le réseau d'eau pluviale.

Avis : Julien ANCELIN est très content de ce système, il demande peu d'entretien (quelques heures par an pour le faucardage et la suppression des mauvaises herbes).

Remarque 1 : le sol est composé de terre arable et d'argile blanche en dessous. De ce fait, pour construire les filtres, il a fallu mettre des plaques en béton et des tuiles pour avoir un sol stable, EPM et ensuite les cailloux, le sable et les plantes.

Remarque 2 : à la suite du filtre horizontal peut être mis un troisième filtre, un bassin à l'air libre, végétalisé ou non afin d'affiner la qualité de l'eau avant le rejet en milieu naturel.



Figure 21 : Photos du 2^{ème} filtre



Figure 22 : Vue générale du dispositif

4. Commune

- Dans la Vienne, à Gençay :

La station Organica à Gençay, près de Poitiers, a été ouverte en 2012. C'est la troisième station de France utilisant le principe de la phyto-épuration afin de préserver l'environnement et s'inscrire dans une démarche de développement durable. Cette station associe un traitement classique par boues activées à un traitement par les plantes sous serre. Ces plantes participent à la hauteur de 20 % au traitement des eaux usées qui sont rejetées dans la Belle. Elle a une capacité de 6000 EH, elle s'intègre très bien dans le site urbain (elle est implantée au pied du château), elle n'entraîne aucune nuisance olfactive ni aucune gêne visuelle (*La Nouvelle République*, janvier 2012).



Figure 23 : Station Organica

Source : *La Nouvelle République*, janvier 2012

5. À l'étranger

5.1. République-Tchèque

Pendant plus de 30 ans, le sujet des zones humides a été intensément étudié en République-Tchèque. Les études faites portaient principalement sur l'écologie des zones humides, l'écophysiologie des plantes des milieux humides (productivité primaire, biomasse, nutrition minérale, évapotranspiration, recyclage des éléments nutritifs) et le rôle des algues dans les eaux peu profondes. Des expériences ont été faites avec des plantes flottantes (lentilles d'eau et jacinthe d'eau) dans le but de montrer leur efficacité dans les zones humides pour le traitement des eaux usées. Les résultats de celles-ci ont montré qu'elles étaient efficaces lorsque la température de l'eau était supérieure à 18°C (VYMAZAL, 2002 : 633-646).

À Petrov, près de Prague, en 1989, pour le traitement des eaux usées, la première zone humide construite à grande échelle, a été conçue pour le traitement des eaux de ruissellement de fumier. Avant la conception de ce grand projet, en 1988, des expériences avaient été menées sur les eaux usées municipales et les eaux usées agricoles. Après le projet Petrov en 1991, de nombreuses zones humides ont été construites en République-Tchèque pour le traitement secondaire des eaux usées municipales, domestiques, industrielles

(papeterie, abattoir, boulangerie) et aussi des eaux de ruissellement. Elles assurent une élimination élevée des MO, MES et de la pollution microbienne. La superficie végétale des zones humides est comprise entre 18 et 4 493 m² pour une variation de 4 à 1 000 EH. Les zones humides construites entre 1989 et 1991 avaient des coûts de construction égale, mais des coûts d'exploitation et d'entretien plus faible par rapport aux systèmes de traitement conventionnel. Le coût des zones humides comporte le matériel de filtration, l'excavation du sol, le revêtement du bassin et les plantes (VYMAZAL, 2002 : 633-646).

La plupart des constructions sont conçues horizontalement et quelques-unes sont conçues en série avec un lit d'écoulement vertical puis un lit d'écoulement horizontal. Les effets physiques du tissu végétal (contrôle de l'érosion, effet de filtration, aire de surface des microorganismes attachés) sont les effets les plus importants des macrophytes par rapport aux procédés de traitement des eaux usées dans les zones humides horizontales. Celles-ci offrent une bonne efficacité de traitement d'élimination de la matière organique (DBO₅, DCO) et MES tandis que l'élimination de l'azote et du phosphore est plus faible. La rétention des coliformes et des coliformes fécaux est très élevée et est supérieure aux valeurs des systèmes conventionnels (VYMAZAL, 2002 : 633-646).

5.2. Pays-Bas

Contrairement à la République-Tchèque, les Pays bas ont très peu d'expérience dans la construction des zones humides. Le but de leurs constructions est de réduire les concentrations en azote dans les terres agricoles et de répondre à la « directive nitrates » mis en place en Europe en 1991. Les problèmes des Pays-Bas sont les fortes précipitations qui ne permettent pas aux diverses cultures (maraîchères, arables et plantes ornementales) une bonne absorption des nitrates du fait de la dilution et par conséquent les normes fixées par le gouvernement néerlandais, pour se conformer à la directive, ne peuvent pas être respectées. Dans un premier temps, pour pallier à ce problème, les producteurs de légumes ont réduit les intrants d'engrais, sans arriver aux résultats escomptés et cela a entraîné des pertes de rendement. Dans un deuxième temps, la construction de zones humides pour le traitement de l'eau agricole a été conseillée par les gouvernements de divers pays européens.

Ce système a donc été testé dans la ferme expérimentale de Vredepeel au sud-est des Pays-Bas, en 2005, sur un sol composé à 92 % de sable, 7 % de limon et 1 % d'argile. Les eaux de drainage riches en nitrates sont collectées et stockées dans un réservoir afin d'être rejetées dans trois types de construction :

- En premier lieu sur un bassin vertical planté de roseaux (*Phragmites australis*).
- Puis dans un bassin horizontal planté de roseaux.
- Et pour finir, dans un bassin horizontal rempli de paille.

À la suite de la mise en place du projet, le laboratoire de l'université de Wageningen a effectué des analyses du sol des zones humides pour mesurer les concentrations de l'azote total, NO_3^- , NH_4^+ , P_T et PO_4^{3-} toutes les deux semaines. Les potentiels redox à 15, 30 et 45 cm de profondeurs sont également mesurés à trois reprises.

→ Résultats :

Pour l'azote, le taux d'abattement est de 58 % pour le premier filtre (1655 $\text{kg}_N/\text{ha}/\text{year}$), 25 % pour le deuxième filtre (1447 $\text{kg}/\text{ha}/\text{year}$) et 63 % pour le dernier filtre horizontal constitué de paille (3622 $\text{kg}_N/\text{ha}/\text{year}$). En été, jusqu'à 90 % de nitrates sont éliminés, en revanche, cette valeur n'est pas atteinte en hiver, car l'activité bactérienne est ralentie par le froid. Or pour le phosphore, celui-ci est négatif en raison de la minéralisation de la paille (16 kg_P/ha).

→ Coût :

La construction des différentes zones humides ont coûté :

- 86 € au m^2 pour le bassin vertical.
- 233 € au m^2 pour le deuxième bassin.
- 106 € au m^2 pour le troisième bassin.

La rentabilité annuelle de l'entretien est comprise entre 10 et 20 %. Le rapport $\frac{\text{coût}}{\text{efficacité}}$ varie entre 52 et 104 €/kg_N pour le filtre vertical, entre 161 et 322 €/kg_N pour le filtre horizontal planté de roseaux et entre 29 et 58 €/kg_N pour le filtre horizontal à paille.

D'après les mesures effectuées, il est observé une bonne efficacité d'élimination de l'azote dans les trois systèmes de filtration, notamment en période estivale et une bonne rentabilité.

Pour le filtre à paille, celle-ci doit être remplacée tous les ans pour garder son efficacité.

DE HAAN, VAN DER SCHOOT, VERSTEGEN (2010 : 139-144)

CONCLUSION

Aujourd'hui, la filière de gestion des effluents tend vers des solutions plus écologiques, économiques et simplifiées qui permettent d'assurer la pérennité des exploitations, tout en respectant le cadre de vie des populations environnantes (absence de nuisance olfactive et visuelle). La phyto-épuration se développe de plus en plus, des communes ont mis en place ce système pour l'assainissement collectif et de nombreux particuliers ont recours à cette technique pour l'assainissement non collectif.

Les agriculteurs disposent d'une gamme d'outils qui leur permettent de mieux maîtriser les déchets et les effluents de leur élevage. Le sujet des coûts et des pratiques adaptables à chaque type d'exploitation restent des questions importantes, mais certains commencent à mettre en place des filtres plantés de roseaux pour le traitement des effluents qui tend vers une agriculture durable et plus respectueuse pour l'environnement.

Le tableau ci-dessous représente un comparatif entre la filière écologique et la filière classique (*Ooreka*, s.d).

Tableau 6 : Comparaison entre la phyto-épuration et la fosse toutes eaux

	PHYTO-ÉPURATION	FOSSE TOUTES EAUX
Coût	Environ 10 000 €	Environ 10 000 €
Entretien	Faucardage 1 fois par an	Vidange tous les 4 ans par une entreprise Nettoyage régulier du préfiltre et du bac à graisse Élimination du tartre dans les canalisations Déblayage des déchets accumulés sur les parois (graisse, sable, etc)
Durée de vie	Illimité	10 à 20 ans
Surface	4 m ² /hab	3 m ² /hab
Odeur	Aucune odeur Dégradation en milieu aéré	Dégagement de gaz possible, car la dégradation s'effectue dans un milieu sans oxygène Principe de la fermentation

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, « Épuration des eaux usées par des filtres plantés par des macrophytes », Étude bibliographique, 1999, [en ligne], http://www.eaurmc.fr/espace-dinformation/guides-acteurs-de-leau/lutter-contre-la-pollution-domestique/traitemement-domestique.html?eID=dam_frontend_push&docID=734

Alim'agri, « Le plan ÉcoPhyto, pour réduire l'utilisation des produits phytosanitaires en France », octobre 2015, *Site du Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt*, [en ligne], <http://agriculture.gouv.fr/le-plan-ecophyto-pour-reduire-lutilisation-des-produits-phytosanitaires-en-france>

ANC, *Filtres plantés de roseaux*, [en ligne], <http://www.anc-assainissement.fr/filtres-plantées-de-roseaux/>

Anonyme, « Traitement des effluents peu chargés : trois nouvelles filières validées », *Cap élevage*, juin 2007, n°15.

Anonyme, *La France agricole*, [en ligne], http://www.lafranceagricole.fr/r/Publie/FA/p1/Infographies/Dossier/2007-04-18/07528_1.pdf

Anonyme, « « Organica », un procédé vert pour la station d'épuration », janvier 2012, *La Nouvelle République*, [en ligne], <http://www.lanouvellerepublique.fr/Vienne/Communes/Gen%C3%A7ay/n/Contenus/Articles/2012/01/27/Organica-un-procede-vert-pour-la-station-d-epuration>

Aquaportail, *Phragmites australis : roseau commun*, <https://www.aquaportail.com/fiche-plante-3513-phragmites-australis.html>

Aquatiris, *Choisir la phytoépuration*, [en ligne], <http://www.aquatiris.fr/fr/une-demarche-eco-citoyenne.aspx>

Boues de Seine aval, *Quel est le rôle du phosphore pour la plante ?*, [en ligne], <http://bouesseineaval.siaap.fr/?p=46>

Bruns, *Saule blanc*, [en ligne], <http://web03.bruns.de/bruns/fr/EUR//Pflanzen/SALIX-alba-L-%2C-saule-blanc/p/1691>

Calaméo, *Le traitement des effluents peu chargés*, [en ligne], <http://fr.calameo.com/read/00151967433d467d662ef>

Centre d'élevage de Poisy, « Une station expérimentale pour traiter les effluents d'élevage peu chargés », [en ligne], http://www.elevage-pois.org/index.php?option=com_content&view=article&id=14:etuderoceaux&Itemid=14

Chambre d'agriculture de Picardie et Nord Pas-de-Calais, « Le traitement des effluents liquides peu chargés : une alternative au stockage et à l'épandage », [en ligne], http://www.hautsdefrance.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Hauts-de-France/029_Inst-Hauts-de-France/Techniques-et-productions/Elevage/Conception_b%C3%A2timent/fiche_14_alternative_stockage_epandage_2015.pdf

Chambre d'agriculture France, *Directive nitrates*, [en ligne], <http://www.chambres-agriculture.fr/agriculteur-et-politiques/politiques-environnementales/directive-nitrates/>

COILLARD J. et al, « Conception et performances d'une filière en trois étapes incluant le lagunage pour le traitement des effluents peu chargés issus des élevages de bovins », *Rencontre autour des recherches sur les ruminants*, 2003, page 419-422.

Conso globe, *Phytoépuration : une solution d'épuration individuelle naturelle*, [en ligne], <http://www.consoglobe.com/phytoepuration-une-solution-d%E2%80%99epuration-individuelle-naturelle-cg>

DE HAAN J., VAN DER SCHOOT J.R., VERSTEGEN H., « Removal of nitrogen leaching from vegetable crops in constructed wetlands », *Acta Horticulturae*, 2010, page 139-144.

DUPONT D., « L'assainissement écologique des eaux usées domestiques », Mémoire formation environnementale ENSAL, 2008, [en ligne], <http://www.cms-habiter.eu/SMS/Revue%20de%20projet%202/Recherches/Les%20eaux/Textes%20references/Lassainissement%20ecologique%20des%20eaux%20usees%20domestiques.pdf>

EAG Laboratoires, *Chromatographie en phase gazeuse - Spectrométrie de masse, analyse GC-MS*, [en ligne], <http://www.eaglabs.fr/cm/gc-ms.html>

EAG Laboratoires, *LC-MS*, [en ligne], <http://www.eag.com/liquid-chromatography-mass-spectrometry-lc-ms/>

Eau France, *La loi sur l'eau et les milieux aquatiques*, [en ligne], <http://www.eaufrance.fr/comprendre/la-politique-publique-de-l-eau/la-loi-sur-l-eau-et-les-milieux>

Eau France, *Directive nitrates*, [en ligne], <http://www.rapportage.eaufrance.fr/directive-nitrates>

Eau France, *Limite de quantification*, [en ligne], <http://www.glossaire.eaufrance.fr/concept/limite-de-quantification>

Eau Rhin-Meuse, *Lagunage naturel*, [en ligne], http://www.eau-rhin-meuse.fr/tlch/procedes_epuration/F07_lagunage_naturel.pdf, page 9.

Eau Rhin-Meuse, *Filtre planté de roseaux à écoulement vertical*, [en ligne], http://www.eau-rhin-meuse.fr/tlch/procedes_epuration/F10_filtres_plantes_de_roseaux_a_ecoulement_vertical.pdf, page 8.

Ecologs, *Plantes filtrant l'eau pour le traitement en phytoépuration*, [en ligne], <http://www.ecologs.org/vegetation/plantes-filtrant-l-eau-pour-le-traitement-en-phytoepuration-et-les-piscines-ecologiques.html>

EMSE, *Adsorption*, [en ligne], https://www.emse.fr/~brodhag/TRAITEME/fich8_1.htm

Futura planète, *Directive cadre sur l'eau*, [en ligne], <http://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-directive-cadre-eau-7215/>

Futura sciences, *Désorption*, [en ligne], <http://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-desorption-7109/>

HUE C., « Filtres avec roseaux : une nouvelle filière pour épurer les effluents d'élevage », *L'éleveur laitier*, Mai 2007, n°147, page 56-59.

IRSTEA, *Les zones tampons*, [en ligne], <http://www.irstea.fr/les-zones-tampons>

Jardiplante, *Scirpe des marais*, [en ligne], <http://www.jardiplante.fr/eleocharis-palustris-ou-scirpe-des-marais-godet-9cm>

Larousse, [en ligne], <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/%c3%a9puration/30635?q=%c3%a9puration#30548>

LEE Byoung-Hwa, SCHOLZ Miklas, « What is the role of Phragmites australis in experimental constructed wetland filters treating urban runoff ? », *Ecological Engineering*, 2007, page 87-95.

Le jardin d'eau, *Jacinthe d'eau*, [en ligne], <http://www.lejardindeau.com/aquatiques-et-de-marais/47693-eichornia-crassipes.html>

Le Parisien TV, « Les zones humides artificielles, des barrages aux pesticides », [en ligne], <http://videos.leparisien.fr/video/les-zones-humides-artificielles-des-barrages-aux-pesticides-18-12-2014-x2csvpf#xtref=https%3A%2F%2Fwww.google.fr%2F>

MAGNARD A., « Une initiative collective pour dépolluer les eaux de drainage », Juin 2016, *La France agricole*, [en ligne], <http://www.lafranceagricole.fr/videos/zones-tampons-une-initiative-collective-pour-depolluer-les-eaux-de-drainage-1,0,1697670874.html>

MALTERRE M-F., « Les nouvelles filières pour traiter les effluents peu chargés », *La France agricole*, Avril 2007, [en ligne], <http://www.lafranceagricole.fr/article/mises-aux-normes-les-nouvelles-filieres-pour-traiter-les-effluents-peu-charges-1,0,15780085.html>

MARCHAND A., « Microbiologie des eaux », BTS Métiers de l'Eau 2^{ème} année, 2016.

Mes arbustes, *Iris pseudacorus*, [en ligne], <https://www.mesarbustes.fr/iris-pseudacorus-iris-jaune-des-marais.html>

Office national de l'eau, « Recommandations pour l'exploitation des filtres plantés de roseaux à écoulement vertical », 2008, <https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/08/Recommandations-pour-l%E2%80%99exploitation-des-filtres-plant%C3%A9s-de-roseaux-%C3%A0-%C3%A9coulement-vertical-Bilan-de-fonctionnement-du-bassin-Loire-Bretagne.pdf>, page 9-10.

Onema, *Qu'est-ce qu'une zone tampon ?*, [en ligne], <http://zonestampons.onema.fr/qu-est-ce-qu-une-zone-tampon>

Ooreka, *Fosse toutes eaux*, [en ligne], <https://assainissement.ooreka.fr/comprendre/fosse-toutes-eaux>

Parc national des Écrins, *La petite massette*, [en ligne], <http://www.ecrins-parcnational.fr/patrimoine/la-petite-massette>

PETIT D., *Effluents d'élevage et mise aux normes*, [en ligne], <http://www.haute-marne.chambagri.fr/kit/fileadmin/documents/technique/effluentsliquides.htm>

Phytorem, *La bamboo assainissement*, [en ligne], <http://www.phytorem.com/Qui-sommes-nous/Le-Bambou-Assainissement-R>

Pinterest, *Juncus effuses*, [en ligne], <https://fr.pinterest.com/pin/560346378613562189/>

QUÉGUINER B., « Océanographie & Biogéochimie marine », [en ligne], <http://slideplayer.fr/slide/1204726/>

RYCHEMBUSCH V., « Un filtre à roseaux avec recyclage depuis trois ans », *Réussir lait élevage*, Avril 2007, n°202, [en ligne], <https://www.agrireseau.net/bovinsboucherie/documents/Un%20filtre%20C3%A0%20roseaux%20avec%20recyclage%20depuis%20trois%20ans.pdf>

SLOOTS K., VAN DER VLIES A.W., « Emission reduction by multipurpose buffer strips on arable fields », *Water Science & Technology*, 2007, page 81-88.

STOUKOV A., « Description et principe de fonctionnement d'un filtre planté de roseaux à écoulement vertical », 2008-2009, *Éco-gestion d'habitats*, [en ligne], <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0809/bei/beiere/groupe3/node/195>

TOURNEBIZE J., PASSEPORT E., et al., « Pesticide decontamination of surface waters as a wetland ecosystem service in agricultural landscapes », *Ecological Engineering*, 2013, page 51-59.

Traitement des eaux, *Lagunage*, [en ligne], <http://traitementdeseaux.fr/techniques-traitement/lagunage/>

Uved, *Dynamique des ressources naturelles*, [en ligne], http://www.uved.fr/fileadmin/user_upload/modules_introductifs/module2/site/html/m2c3_m2c3p1_m2c3p1sp1_1.html

VYMAZAL Jan, « The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic : 10 years experience », *Ecological Engineering*, 2002, page 633-646.

VYMAZAL Jan, « Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow : a review », *Hydrobiologia*, 17 Mai 2011, page 133-156.

WANG R., *La phytoépuration, qu'est-ce que c'est ?*, [en ligne], <http://www.inspire-institut.org/tribune-libre-la-muse-avril-2011-la-phytoepuration-quest-ce-que-cest.html#.W0tWnGekLcs>

Wiktionnaire, [en ligne], <https://fr.wiktionary.org/wiki/phyto->

Wiktionnaire, [en ligne], [https://fr.wiktionary.org/wiki/%C3%A9pur](https://fr.wiktionary.org/wiki/%C3%A9pur%C3%A9r)

WOLTEMADE C.J., « Ability of restored wetlands to reduce nitrogen and phosphorus concentrations in agricultural drainage water », *Journal of soil and water conservation*, 2000, page 303-309.

ZEDLER Joy B, « Wetlands at your service : reducing impacts of agriculture at the watershed scale », *The Ecological Society of America*, 2003, page 65-72.

ANNEXE 1

CONTACTS

Les contacts par mails sont :

- Mairie du Gué d'Alleré (17) : le-gue-dallere@mairie17.com
- IRSTEA (Julien TOURNEBIZE) : julien.tournebize@irstea.fr
- Chambre d'agriculture des Deux-Sèvres (Thierry PELOQUIN) : thierry.peloquin@deux-sevres.chambagri.fr
- SPANC Bandiat Tardoire (16) (Sandra ROJO-DIAZ) : sandra.rojo-diaz@bandiat-tardoire.fr
- Lycée agricole de l'Oisellerie à Angoulême (16) : expl.angouleme@educagri.fr
- Lycée agricole de Barbezieux (16) : lpa.barbezieux@educagri.fr
- CIVAM (Romain DIEULOT) : romain.dieulot@civam.org
- Responsable des services techniques de la Rochefoucauld (16) (Arnaud LE MEUR) : arnaudleumeur@larochefoucauld.fr
- Chambre d'agriculture de la Charente-Maritime (17) (Florence AIMON-MARIE) : florence.aimon-marie@charente-maritime.chambagri.fr
- La France agricole : webmaster@gfa.fr
- Adèle MAGNARD (La France agricole) : Adèle Magnard Gfa (messenger).
- Aquatiris (Adrien GAGNAIRE) : adrien.gagnaire@aquatiris.fr
- Dominique GUITTON : lebeausoleil44@orange.fr

Les contacts par téléphone sont :

- Chambre d'agriculture de la Charente (16)
- Chambre d'agriculture de la Vienne (86)
- Chambre d'agriculture de la Gironde (33)
- Chambre d'agriculture de la Charente-Maritime (17)
- Chambre d'agriculture des Deux-Sèvres (79)
- Lycée professionnel de Barbezieux
- Mairie d'Agris (16)
- Mairie de Rivières (16)

- Mairie de Taponnat (16)
- Mairie de la Rochefoucauld (16)
- Dominique GUITTON - Éleveur (44)
- Gaëtan DUBREIL - Éleveur (35)