

EVOLUTION DE LA PHYTO-EPURATION COLLECTIVE **EN FRANCE**



Lits plantés de roseaux à Beynes (78)

REMERCIEMENTS

Cette notice sur la phyto-épuration collective est un travail du département « recherche et développement » de l'Agence AR ARCHITECTES.

Je remercie donc Madame Ruba ALABED, la gérante de l'Agence, pour m'avoir fait confiance pour mener ce travail qui correspond à un nouvel acte concret du développement de la politique environnementaliste de l'Agence.

Pour élaborer cette étude, j'ai dû faire appel aux supports internes à l'Agence et aux supports externes, comme des documents internet.

Mais je remercie également Monsieur Philippe MUSIAL professeur à l'Université de Cergy-Pontoise pour son cours sur la gestion alternative de l'eau ainsi que Monsieur Philippe BANET, professeur en chimie également à l'Université de Cergy-Pontoise.

Je tenais également à remercier Claire LACOMBRADÉ, Noé BODART, Chiraz GAFSIA, Virginie LECUYER, Céline ROCHAY, Nadine FELIX, Anaïs GUIMPIER, Marine D'ARCHIVIO, Carole DE MESANSTOURNE et Marie-Gabrielle LAFONT, membres de l'Agence, toujours présents pour répondre à mes questions et m'appuyer dans la rédaction.

Christophe KLUTH

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	2
1. INTRODUCTION	5
1.1. ENJEUX.....	5
1.1.1. DISPONIBILITE DE L'EAU, DE L'AIR ET DE LA TERRE.....	5
1.1.2. DIFFERENTS POLLUANTS.....	7
1.1.3. CADRE REGLEMENTAIRE.....	9
1.1.4. DEFINITION DE LA PHYTO-EPURATION.....	14
1.2. HISTORIQUE.....	15
1.2.1. LES PREMIERS SYSTEMES EPURATOIRES.....	15
1.2.2. L'EPURATION AUJOURD'HUI.....	17
1.2.3. HISTORIQUE DE LA PHYTO-EPURATION.....	19
1.2.4. LA PHYTO-EPURATION AUJOURD'HUI EN FRANCE.....	21
1.3. PRINCIPE GENERAUX DES DIFFERENTS TRAITEMENTS	23
1.3.1. LES TRAITEMENTS NON COLLECTIFS	23
1.3.2. LES LITS VERTICAUX.....	24
1.3.3. LES LITS HORIZONTAUX.....	25
1.3.4. LES TECHNIQUES D'EVAPOTRANSPIRATION.....	25
1.3.5. LES FILIERES A CHOISIR.....	28
2. PHYTO-EPURATION DES EAUX.....	32
2.1. PRINCIPES GENERAUX.....	32
2.1.1. PHYTO-EPURATION PAR LES MICRO-ORGANISMES.....	32
2.1.2. CHARGE HYDRAULIQUE ET APPORTS EN POLLUANTS.....	33
2.1.3. EXPLOITATION	35
2.2. LITS PLANTES VERTICAUX.....	36
2.2.1. GENERALITES ET UTILISATIONS.....	36
2.2.2. DIMENSIONNEMENT	37
2.2.3. ABATTEMENT DE LA POLLUTION.....	38
2.2.4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS.....	40
2.3. LITS PLANTES HORIZONTAUX.....	40
2.3.1. GENERALITES ET UTILISATIONS.....	40
2.3.2. DIMENSIONNEMENT	42
2.3.3. EFFICACITE.....	45
2.3.4. ETUDE DE CAS.....	46
2.4. BASSINS DE PHYTO-EPURATION	48
2.4.1. PRINCIPES	48
2.4.2. TAILLIS DE COURTE ROTATION.....	49
2.4.3. BASSINS PLANTES ET AUTRES LAGUNES	50
2.4.4. DIMENSIONNEMENT	54
2.4.5. ABATTEMENT DES POLLUANTS.....	58
2.4.6. ETUDE DE CAS	59
3. PHYTO-EPURATION DES BOUES D'EPURATION ET DES SOLS	62
3.1. PHYTO-EPURATION DES BOUES D'EPURATION	62
3.1.1. GENERALITES ET OBJECTIFS	62

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

3.1.2.	<i>FONCTIONNEMENT</i>	63
3.1.3.	<i>DIMENSIONNEMENT</i>	67
3.1.4.	<i>EFFICACITE</i>	68
3.1.5.	<i>DEVENIR DES CROUTES</i>	71
3.2.	<i>PHYTO-EPURATION DES SOLS ET HYPER ACCUMULATION</i>	72
3.2.1.	<i>PRINCIPE</i>	72
3.2.2.	<i>FILTRE A METAUX</i>	73
3.2.3.	<i>ABSORPTION DES METAUX PAR LES PLANTES</i>	74
4.	PHYTO-EPURATION DE L’AIR	77
4.1.	<i>PRINCIPE</i>	77
4.2.	<i>METHODOLOGIES</i>	79
4.3.	<i>EFFICACITE DE LA PHYTO-EPURATION DE L’AIR</i>	82
5.	PROCEDES DE PHYTO-EPURATION	84
5.1.	<i>COMPARAISONS TECHNIQUES ET ECONOMIQUES</i>	84
5.1.1.	<i>CRITERES CAPACITAIRES</i>	84
5.1.2.	<i>CRITERES SANITAIRES</i>	85
5.1.3.	<i>CRITERES ECONOMIQUES</i>	86
5.1.4.	<i>CHOIX DES FILIERES DE L’EPURATION</i>	87
5.2.	<i>PROCEDES INNOVANTS ETABLIS</i>	88
5.2.1.	<i>RHIZOPUR[®]</i>	88
5.2.2.	<i>MHEA[®]</i>	90
5.2.3.	<i>ORGANICA[®]</i>	91
6.	CONCLUSION	93
7.	LISTES DES FIGURES ET DES TABLEAUX, SOURCES ET ANNEXES	94
7.1.	<i>GLOSSAIRE</i>	94
7.2.	<i>LISTE DES FIGURES</i>	100
7.3.	<i>LISTE DES TABLEAUX</i>	103
7.4.	<i>ANNEXES</i>	105
7.4.1.	<i>PROBLEMES ET SOLUTIONS TECHNIQUES LIES A LA QUALITE DES SOLS</i>	105
7.4.2.	<i>TABLEAU DE SUIVI POUR UNE BONNE GESTION DU LAGUNAGE</i>	106
7.4.3.	<i>TABLEAU PRESENTANT LES AVANTAGES DU SECHAGE BIOLOGIQUE</i>	108
7.4.4.	<i>SCHEMA DES FILIERES DU DEVENIR DES BOUES D’EPURATION</i>	109
7.4.5.	<i>COUTS D’ENTRETIEN DANS DES VOIRIES D’ACHEMINEMENT DES EFFLUENTS</i>	110
7.5.	<i>SOURCES</i>	111

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

1. INTRODUCTION

1.1. ENJEUX

1.1.1. DISPONIBILITE DE L'EAU, DE L'AIR ET DE LA TERRE

L'eau, la terre et l'air sont autant de ressources indispensables qui paraissent inépuisables. Et pourtant, aujourd'hui, sur Terre, les océans, les terres et l'atmosphère sont de plus en plus pollués.

L'humanité a pris conscience que la préservation de l'environnement est une condition indispensable au développement durable.

Pourtant, si les ressources utilisables diminuent, la consommation augmente. L'exemple parfait est celui de l'eau dans le monde :

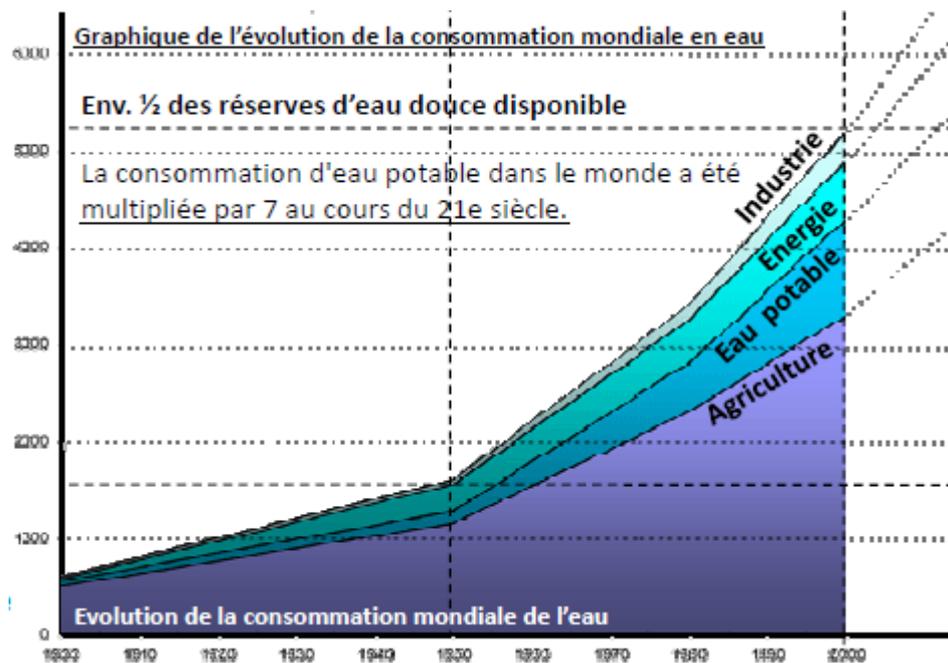


Figure 01 : Evolution des consommations en eau dans le monde

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

En France, la consommation d'eau potable est d'en moyenne environ 200 litres par jour et par Français. Cette eau est certes assainie, mais après consommation, elle doit être épurée pour éviter de polluer le milieu récepteur, là où l'eau sera rejetée. Il s'agit de conserver une bonne qualité de l'eau en France, qu'elle soit dans les bâtiments ou dans l'environnement.

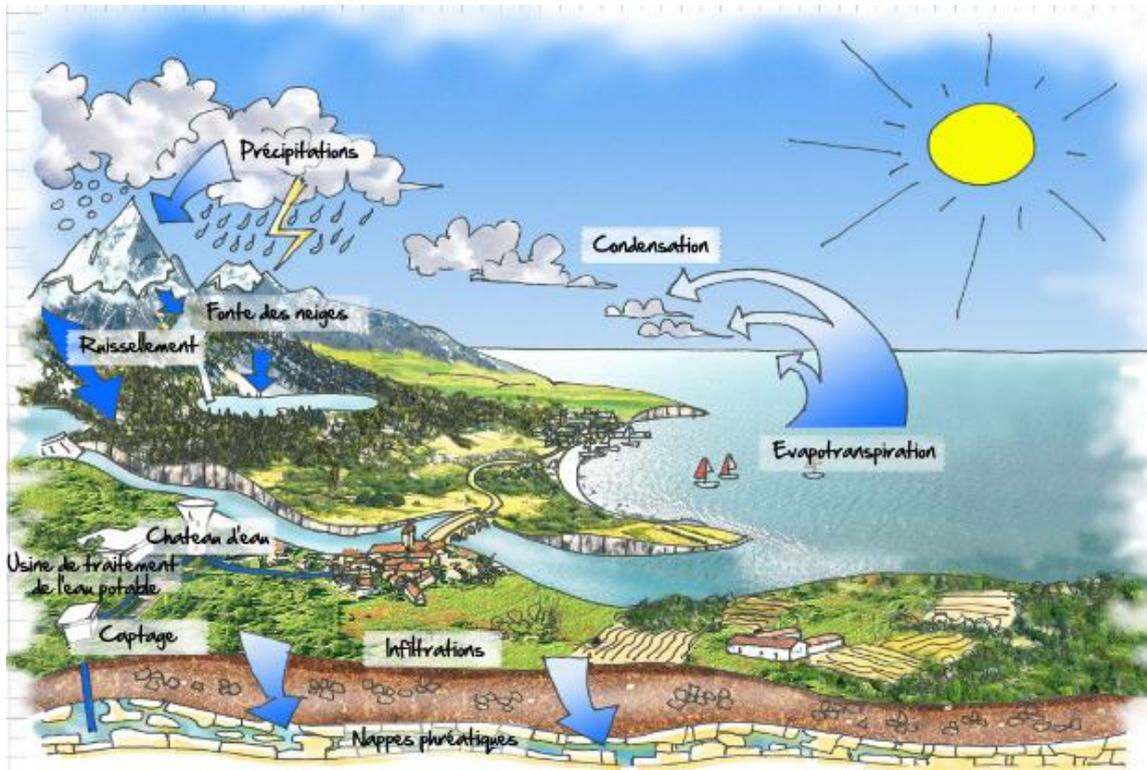


Figure 02 : Schéma simplifié du cycle de l'eau.

En comptant qu'une personne rejette 1 EH (équivalent habitant) d'eaux usées à son domicile (y compris arrosage de la pelouse, lavage de la voiture, etc) et 0,5 EH à son travail, cela donne un rejet d'eau de 1,5 EH par personne. A ces 1,5 EH s'ajoutent les activités liées au travail (exemple : agriculture, restauration, etc).

Cela représente à la marge en moyenne jusqu'à 150 litres d'eau par EH et par jour.

L'objectif de l'épuration des effluents pollués est de tenter de gérer la qualité des ressources naturelles au moins à l'échelle nationale afin que ces ressources « redeviennent » illimitées. Cela permettrait d'éviter de nouvelles restrictions.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
 54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
 N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

1.1.2. DIFFERENTS POLLUANTS

Epurer les eaux, cela signifie la dépolluer. Mais les polluants sont aussi nombreux que les méthodes de dépollution : quasiment infinis.

Il y a tout d'abord la pollution primaire. Elle comprend les polluants qui sont, décantables, isolables, filtrables de manière physique pour lesquels on effectue un traitement primaire ou prétraitement. La phyto-épuration permet de passer cette étape.

Il y a ensuite la pollution secondaire. Il s'agit de la pollution organique (carbonée, azotée, phosphorée ou soufrée) en grande partie soluble et qui peut être traitée de façon biologique pour lesquels on effectue un traitement secondaire.

Puis il y a la pollution tertiaire. Il s'agit de la pollution inorganique, principalement les nitrates et les phosphates qui peuvent être traités de façon biologique ou physico-chimique.

L'objectif est de transformer les molécules pollutant l'environnement en molécules saines :

- Sels minéraux + CO₂ + lumière → masse végétale + O₂
- (MO)_n + n O₂ → n CO₂ + n H₂O
- Acides aminés (hors lysine) → CO₂ + NH₃
- N_{org} → NH₄⁺ → NO₂ → NO₃ → N₂
- P_{org} → H₃PO₄ → PO₄²⁻
- S_{org} → SO₄²⁻

L'azote est particulier. Il est possible de le trouver sous de nombreuses formes. L'azote global regroupe l'azote réduit (azote Kjeldahl) et l'azote oxydé (nitrates NO₃⁻, nitrites NO₂⁻). Dans les eaux usées, qui sont un milieu acide et réducteur, il est rare d'avoir de fortes concentrations d'azote oxydé par rapport à l'azote Kjeldahl (rarement inférieur à 90% de l'azote global, à moins de recueillir les eaux d'un restaurant ou d'un bassin versant agricole, car les engrais sont riches en nitrates). C'est la raison pour laquelle l'azote Kjeldahl, également appelé azote total (et non global) est réduit. Il regroupe l'ammonium (NH₄⁺) et l'azote organique (exemple : l'urée).

En condition aérobie, c'est-à-dire en présence de dioxygène (O₂), les bactéries opèrent la nitrification. C'est-à-dire qu'elles transforment les produits de la fixation (NH₄⁺, NH₃) en NO_x (soient NO₂⁻ et NO₃⁻), des nitrites et nitrates. C'est une réaction d'oxydation qui se fait par catalyse enzymatique reliée à des bactéries dans les sols et dans l'eau. La réaction en chaîne est de type:



AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

Le nitrate qui ne sera pas absorbé par les végétaux pour se nourrir sera dénitrifié par les bactéries anaérobies. L'azote des nitrates revient alors sous sa forme atmosphérique le gaz diazote (N₂). La réaction est de type :

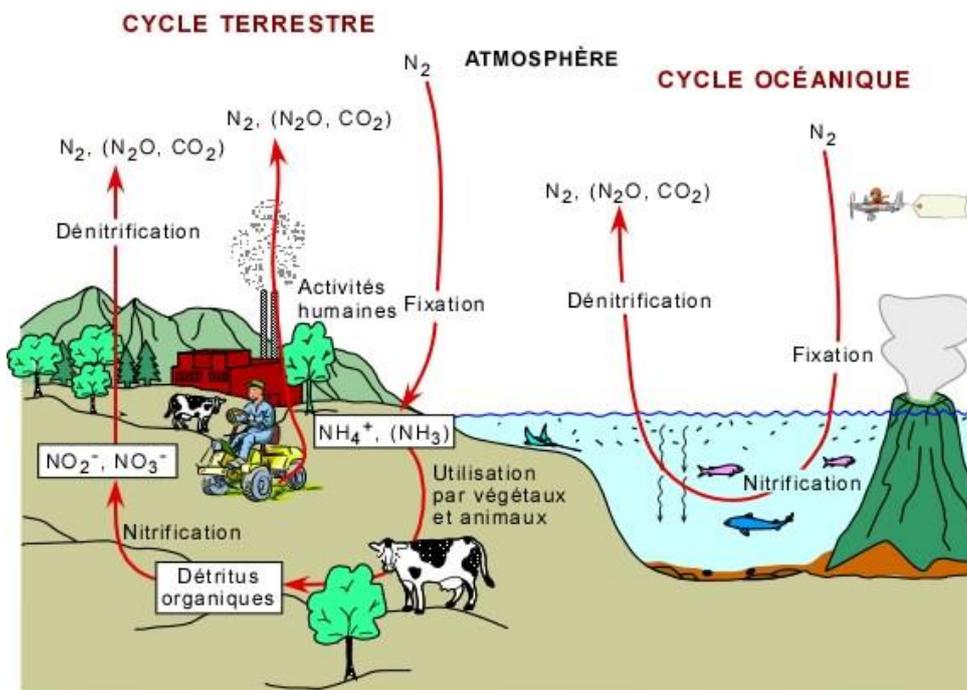
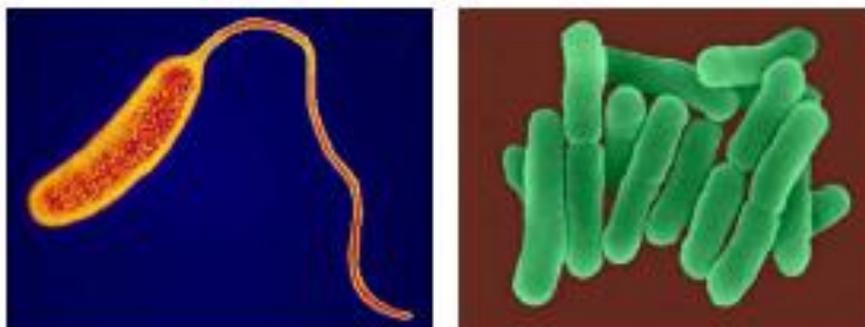


Figure 03 : Schéma du cycle de l'azote

Mais la plus gênante des pollutions, c'est la pollution quaternaire. Elle comprend tous les germes pathogènes (pouvant être traitée parfois biologiquement par compost) et les micropolluants : Pesticides, métaux lourds, détergents, hormones, médicaments, etc. Ces micropolluants ne se traitent généralement pas.

Cette quatrième catégorie de polluants est la plus dangereuse. En plus d'être difficile à traiter, ils sont souvent à l'origine de maladies diverses.



Bactérie du Choléra
©DJAMENA

Salmonella typhi
©Denis KUNKEL

Figure 04 : Observation au microscope de bactéries responsables du choléra et de la salmonelle

1.1.3. CADRE REGLEMENTAIRE

L'une des premières lois sur la qualité de l'eau pour la V^e République, la Loi n°64-1245 du 16 décembre 1964, a été promulguée afin de ralentir la pollution croissante commencée dans les années 1960. Elle est surtout la référence sur la lutte contre la pollution.

C'est ensuite la Directive européenne n°91/271/CEE du 21 mai 1991 sur les Eaux Résiduaires Urbaines (ERU), qui permet de donner une ossature à la législation et à la réglementation Française sur la gestion de l'eau.

Vint ensuite la Loi n°92-3 du 3 janvier 1992, dite loi sur l'eau. Cette loi a été promulguée pour garantir l'usage et une gestion équitable des ressources d'eau pour tous (industries, agriculture et ménages). Elle définit les enjeux en matière de police, le rôle des SDAGE et SAGE et l'intervention des collectivités territoriales (particulièrement le chapitre I sur l'intervention des collectivités territoriales dans la gestion de l'eau, le chapitre II sur l'assainissement et la distribution de l'eau et l'article 48 sur le délai de présentation, par le Gouvernement, des évolutions technologiques et scientifiques).

Vinrent ensuite, pour les systèmes d'assainissement collectif :

- la Directive européenne du 23 octobre 2000, la loi Cadre sur l'eau,
- la Loi sur l'eau du 30 décembre 2006,
- le Décret du 03 juin 1994 et circulaire du 13 septembre 1994 relatifs à l'assainissement des eaux usées,

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

- l'Arrêté du 23 novembre 1994 (plus les arrêtés de 2000 et 2006) délimitant les zones sensibles,
- l'Arrêté du 22 décembre 1994 relatif au système d'assainissement de plus de 2 000 EH et à l'auto surveillance des systèmes d'assainissement,
- l'Arrêté du 22 juin 2007 relatif à la collecte, au transport et au traitement des eaux usées des agglomérations d'assainissement ainsi qu'à la surveillance de leur fonctionnement et leur efficacité, et aux dispositifs non collectifs recevant une charge brute de pollution organique supérieure à 1,2 kg/j de DBO₅.

Vinrent, pour les systèmes d'assainissement non collectifs (ANC) :

- l'Arrêté du 6 mai 1996 relatif au contrôle de l'assainissement non collectif,
- la recommandation pour les systèmes individuels, d'après l'annexe II de la circulaire du 17 février 1997 relative aux systèmes d'assainissement de moins de 2 000 EH ;
- l'Arrêté du 7 septembre 2009 sur les règles de l'ANC.

Le SPANC (Service Public d'Assainissement Non Collectif) est un organisme public qui fixe notamment les prescriptions techniques applicables aux installations d'assainissement non collectifs recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO₅. Parmi ces prescriptions :

"Les installations mettant à l'air libre ou conduisant au ruissellement en surface de la parcelle des eaux usées brutes, prétraitées ou traitées, sont interdites".

Pour avoir l'autorisation d'installer une phyto-épuration, les critères réglementaires seuil de rejets des effluents sont les suivants (Articles 4 & 5 de la directive ERU) :

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
 54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
 N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

Paramètres	Concentration	Pourcentage minimal de réduction (1)	Méthode de mesure de référence
Demande biochimique en oxygène (DBO ₅ à 20 °C) sans nitrification (2)	25 mg/l O ₂	70-90 40 aux termes de l'article 4 paragraphe 2	Echantillon homogénéisé non filtré, non décanté. Détermination de l'oxygène dissous avant et après une incubation de 5 jours à 20°C ± 1°C, dans l'obscurité complète. Addition d'un inhibiteur de nitrification.
Demande chimique en oxygène (DCO)	125 mg/l O ₂	75	Echantillon homogénéisé non filtré, non décanté. Bichromate de potassium
Total des matières solides en suspension	35 mg/l (3) 35 aux termes de l'article 4 paragraphe 2 (plus de 10 000 EH) 60 aux termes de l'article 4 paragraphe 2 (de 2 000 à 10 000 EH)	90 (3) 90 aux termes de l'article 4 paragraphe 2 (plus de 10 000 EH) 70 aux termes de l'article 4 paragraphe 2 (de 2 000 à 10 000 EH)	- Filtration d'un échantillon représentatif sur une membrane de 0,45 µm, séchage à 105°C et pesée. - Centrifugation d'un échantillon représentatif (pendant 5 minutes au moins, avec accélération moyenne de 2.800 à 3.200 g), séchage à 105°C, pesée.

(1) Réduction par rapport aux valeurs à l'entrée.
(2) Ce paramètre peut être remplacé par un autre : carbone organique total (COT) ou demande totale en oxygène (DTO), si une relation peut être établie entre la DBO₅ et le paramètre de substitution.
(3) Cette exigence est facultative.
Les analyses relatives aux rejets provenant du lagunage doivent être effectuées sur des échantillons filtrés; toutefois, la concentration du total des matières solides en suspension dans les échantillons d'eau non filtrée ne doit pas dépasser 150 mg/l.

Paramètres	Concentration	Pourcentage minimal de réduction ⁽¹⁾
Phosphore total	2 mg/l (EH compris entre 10.000 et 100.000) ⁽⁴⁾	80 %
Azote total ⁽³⁾	15 mg/l (EH compris entre 10.000 et 100.000) ⁽⁴⁾	70-80 %

(1) En fonction des conditions locales, on peut appliquer un seul paramètre ou les deux. De plus, il est possible d'appliquer la valeur de concentration ou le pourcentage de réduction.
(2) Réduction par rapport aux valeurs à l'entrée.
(3) Total de l'azote dosé selon la méthode de Kjeldahl (cf. glossaire), de l'azote contenu dans les nitrates et de l'azote contenu dans les nitrites.
(4) Ces valeurs de la concentration sont des moyennes annuelles. Toutefois, pour l'azote, il peut être utilisé des moyennes journalières lorsqu'il peut être prouvé que le même niveau de protection est obtenu. Dans ce cas, la moyenne journalière ne peut pas dépasser 20 mg/l d'azote total pour tous les échantillons, quand la température de l'effluent dans le réacteur biologique est supérieure ou égale à 12°C. La condition concernant la température peut être remplacée par une limitation du temps de fonctionnement, tenant compte des conditions climatiques régionales.

Tableau 01 : Limite réglementaires en polluants des eaux usées rejetées selon la loi ERU

Bien que non pris en considération dans la loi ERU, d'autres paramètres physico-chimiques et biologiques sont intéressants à évaluer : le pH, la conductivité électrique, la turbidité, le NH₄⁺, le NO₃⁻, le NO₂⁻, le N_{Kt}, le Pt, le PO₄³⁻, etc.

Cependant, l'analyse de ces paramètres représente un coût supplémentaire et il est donc rare que ces analyses soient effectuées.

L'analyse bactériologique (dénombrements des Escherichia coli et des entérocoques) n'aurait d'intérêt que pour en faire la preuve ou si l'eau était rejetée à proximité d'une zone de baignade.

Date de prélèvement	Seuils réglementaires de qualités	
	Eau potable	Eaux de baignade
Paramètres Physico-chimiques		
pH (unité enpH)	6,5-9,0	6,5-9,0
Conductivité (µS/cm)	1500,00	
Température (°C)	25,00	
Oxygène dissous (mg/l)	6,50	(80 à 120)%
Calcium (mg/l)	270,00	
Magnésium (mg/l)	50,00	
	Adoucisseur pour	
Titre Hydrotrimétrique : TH (°F)	TH > 30 °F	
Titre Alcalimétrique Complet : TAC (°F)	50 °F	
MES (mg/L)	0,00	
Turbidité (NTU)	2,00	
Carbone Organique Total : COT(Mg/l)	2,00	
Fer (mg/l)	0,20	
Zinc (mg/l)	5,00	
Cuivre (mg/l)	2,00	
Azote amoniacale (NH4+) (mg/l)	0,50	
Paramètres Microbiologiques		
Salmonelles (nbr/5l)		
Coliformes totaux (nbr/100)	0	10000
Coliformes fécau x (nbr/100)	0	2000
Légionelle (UFC/litre)		

Tableau 02 : Paramètres réglementaires de qualité seuils pour l'eau potable et les eaux de baignade

Les objectifs de traitement des métaux lourds correspondent à des concentrations inférieures aux normes VDSS (Valeur de Définition de Source Sol) en vigueur. Elles sont répertoriées dans le tableau suivant :

	VDSS mg/kg MS	VCI sol		VCI eaux	
		Usage sensible	Usage non sensible	Usage sensible	Usage non sensible
METAUX ET ASSIMILES					
Aluminium total, Al	(6)	(6)	(6)	200 (21)	1 mg/l
Antimoine, Sb	50	100 (3)	250 (3)	5 (17)	25
Arsenic, As	19 (8)	37 (1) (8)	120 (1) (8)	10 (17)	100 (22)
Baryum, Ba	312	625 (4)	3125	700 (17)	2 mg/l
Beryllium, Be	250	500 (3)	500 (3)	(6)	(6)
Cadmium, Cd	10	20 (2)	60 (2)	5 (17)	25
Chrome total, Cr	65	130 (1)	7000 (1)	50 (17)	250
Cobalt, Co	120	240 (4)	1200	(6)	(6)
Cuivre, Cu	95	190 (4)	950	2 mg/l (17)	4 mg/l
Manganèse, Mn	(6)	(6)	(6)	50 (21)	250
Mercure, Hg	3,5	7 (1)	600 (1)	1 (17)	5
Molybdène, Mo	100	200 (4)	1000	70 (18)	350
Nickel, Ni	70	140 (2)	900 (2)	20 (17)	100
Plomb, Pb	200	400 (2)	2000 (2)	25 (17)	125
Sélénium, Se	(6)	(6)	(6)	10 (17)	50
Thallium, Tl	5	10 (3)	pvl (3)	(6)	(6)
Vanadium, V	280	560 (3)	pvl (3)	(6)	(6)
Zinc, Zn	4500	9000 (1)	pvl (1)	3 mg/l (18)	6 mg/l

Tableau 03 : Norme VDSS pour les métaux lourds

- L'eau rendue au milieu récepteur doit respecter l'arrêté du 21 juin 1996 et la circulaire du 17 février 1997,
- L'épandage des boues issues du traitement des eaux usées est évoqué dans le décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 (modifié le 30 juin 1998).

Le rejet des effluents doivent atteindre les qualités suivantes :

OBJECTIF DE QUALITÉ IA	Pe/Qe	≤1	≤1	≤5	>5
	Niveau	D1	D2	D3	D4
OBJECTIF DE QUALITÉ IB	Pe/Qe	≤5	≤5	≤10	>10
	Niveau	D1	D2	D3	D4
OBJECTIF DE QUALITÉ II	Pe/Qe	≤10	≤20	≤25	>25
	Niveau	D1	D2	D3	D4
OBJECTIF DE QUALITÉ III	Pe/Qe	≤25	≤50	≤100	>100
	Niveau	D1	D2	D3	D4

Tableau 04 : Qualité des milieux récepteurs

- Pe est la Population équivalente (1EH = 60g DBO5/j),
- Qe est le débit d'étiage en L/s,
- Le débit d'étiage Qe d'un cours d'eau est défini par la circulaire du 17 février 1997.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

1.1.4. DEFINITION DE LA PHYTO-EPURATION

La phyto-épuration, ou encore phyto-remédiation, phyto-traitement ou phyto-restauration, c'est l'ensemble des technologies utilisant des plantes pour traiter des pollutions.

L'application la plus courante de la phyto-épuration est le traitement des eaux usées. Mais certaines technologies de phyto-épuration sont appliquées pour dépolluer des terres ou encore l'air.

Les principaux avantages de la phyto-épuration sont la qualité paysagère et le développement de la biodiversité.



Figure 05 : Photographie d'une zone humide au niveau de la STEP de Bois-le-Roi

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

1.2. HISTORIQUE

1.2.1. LES PREMIERS SYSTEMES EPURATOIRES

Dès l'antiquité, à partir de 3200 avant J.C, les premiers réseaux connus apparaissent en orient. Le rôle principal est alors de protéger les constructions des dégâts susceptibles d'être provoqués par les eaux de pluie et de préserver la salubrité de la ville.

En 27 avant J.C, les Romains, héritiers des techniciens Etrusques et Grecs de l'époque classique ont su développer dans les villes des systèmes d'assainissement jusqu'alors inconnue dans le monde. Les égouts sont alors ici considérés comme le prolongement du fleuve.



Figure 06 : Les Egouts, un « prolongement des fleuves ».

En 500, à Paris, tout est à faire. Il n'y a ni gestion des déchets ni gestion des eaux. Les conditions de vie dans les villes sont alors favorables à la mortalité. Ce n'est qu'en 1200 qu'est prévu le pavage des rues de Paris, avec au milieu, une rigole d'évacuation. Le caniveau central permet de collecter et d'évacuer les matières avec les eaux de pluies en laissant le reste de la chaussée praticable.

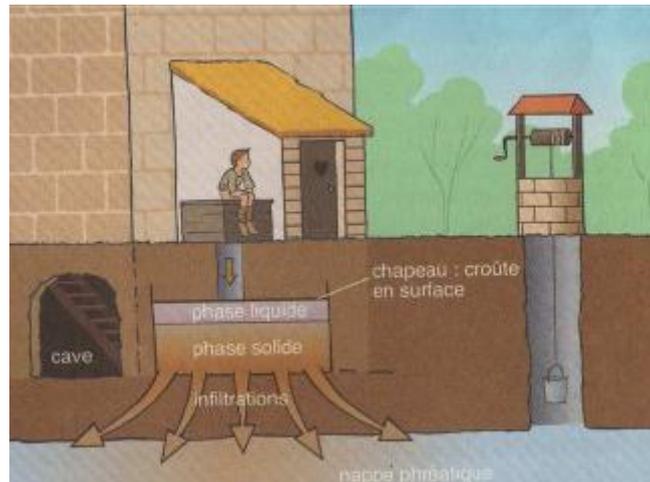


Figure 07 : Photographie de rue pavée avec égout central (CAUE 60)

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

Après la peste noire de 1347, en 1370, en pleine guerre de 100 ans, sous la tutelle de Jacques Aubriot, prévôt de Paris, le premier égout souterrain voit le jour rue Montmartre. Mais étant difficile à mettre en œuvre à l'époque, le système des fosses non étanches dans le sol était privilégié. Mais ce dernier provoqua la pollution des nappes phréatiques. La vidange de la phase solide, la « poudrette » est revendue comme engrais aux maraichers voisins.



©Illustration réalisé par Antoine DELOR

Figure 08 : Schéma de pollution des nappes phréatiques à cause des fosses non étanches

Au XVIIème siècle la situation commence à s'améliorer parce-que la police taxe lourdement les gens qui ne respectent pas la loi !

En 1809, devant l'évidence de l'empoisonnement des sols, l'étanchéité des fosses d'aisance devient obligatoire. Mais paradoxalement, la vidange de ces fosses augmente le volume de la phase liquide, ce qui provoque des difficultés de transport et de compostage, qui elles-mêmes entraînent une nouvelle grande crise d'insalubrité (choléra, typhoïde, polio, méningite, hépatites A et E, diarrhées, etc).

En 1850, le Baron Haussmann et l'ingénieur Eugene Belgrand, développent des collecteurs d'égouts qui suivent, en profondeur, les travaux d'urbanisme en surface. Les égouts sont **une solution à une échelle locale et généralisable.**

En 1878, environ 600 km d'égouts souterrains sont construits et concentrent la pollution. Les conséquences de cette généralisation, font que la Seine, exutoire final, est devenue un véritable cloaque.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

1.2.2. L'ÉPURATION AUJOURD'HUI

En 1904, les eaux sont redirigées vers Achères, où sera construite la première grande station d'épuration.



Figure 09 : Vue aérienne de la Station d'épuration d'Achères.

En France, en 1997, on estime qu'environ seulement 90% de la population est raccordée à un système d'épuration (collectif ou autonome). En comptant les anomalies des réseaux d'égouts, la dépollution des eaux usées de France est évaluée en moyenne à environ la moitié.

Le principe de l'épuration des eaux est le suivant. Il faut organiser la collecte des eaux usées et/ou pluviales depuis les logements jusqu'à une station collective d'épuration pour les eaux usées et jusqu'au bassin de stockage ou exutoire naturel pour les eaux pluviales.

Depuis la moitié du 20^e siècle, en France, une nouvelle préoccupation est le milieu récepteur. En effet, l'épuration étant rarement assurée à 100%, l'exutoire final des eaux à épurer est un milieu qui sera pollué. La préservation de l'environnement du milieu que constitue l'exutoire final est donc un objectif pris au sérieux par le législateur.

Aujourd'hui, il existe les réseaux séparatifs et les réseaux unitaires. Les réseaux séparatifs séparent les eaux de pluie des eaux usées censées être plus polluées. Les réseaux séparatifs sont plus chers en collectif, mais sont plus écologiques et rapportent à la collectivité. Mais environ 10 millions de Français, soit 15% de la population, ont un système d'assainissement non collectif (ANC).

Les filières classiques de l'épuration aujourd'hui en France suivent globalement le schéma suivant :

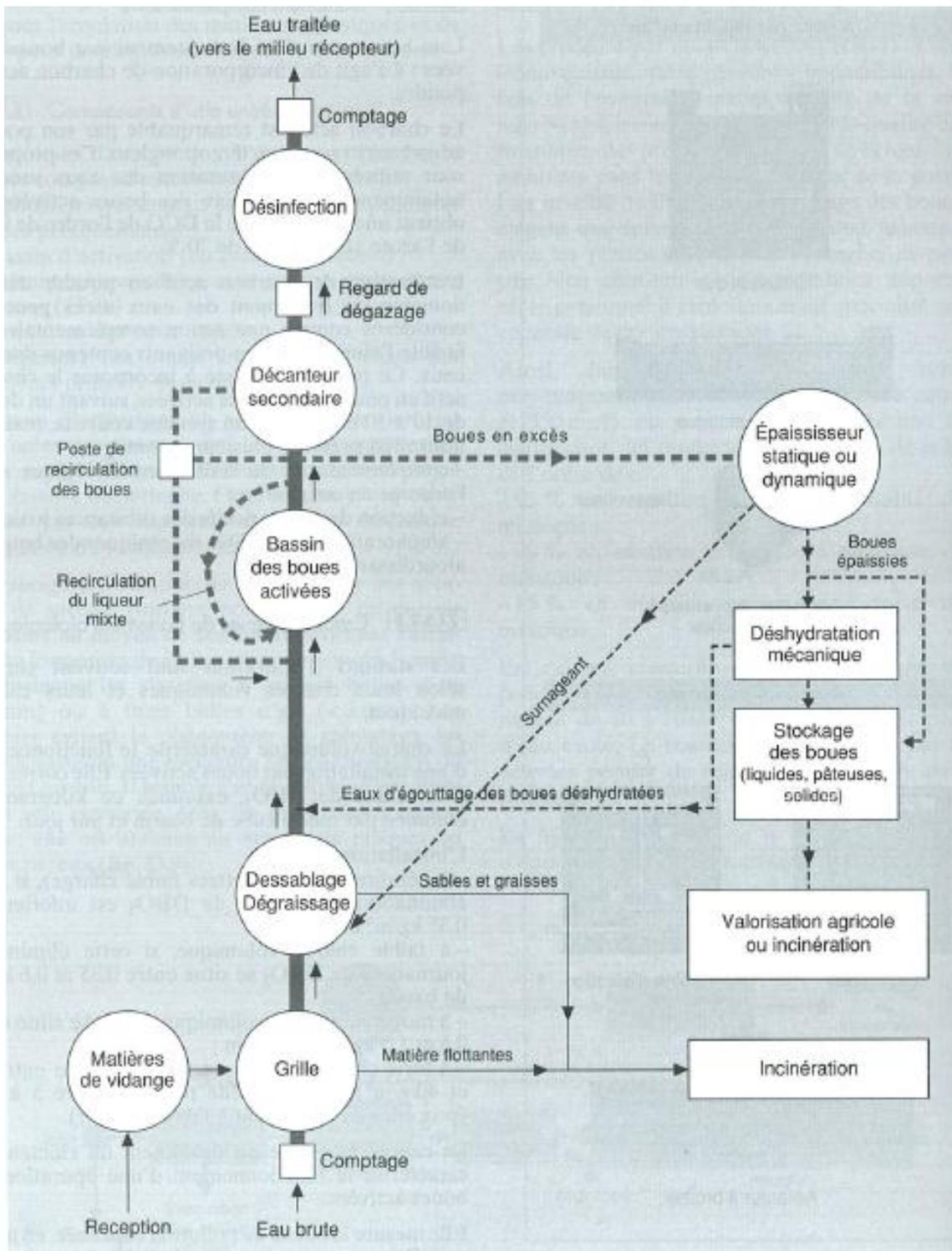


Figure 10 : Schéma d'une filière classique de l'épuration des eaux usées en France

D'abord, le prétraitement permet le dégrillage, le dégraissage-déshuilage et le dessablage. Le dégrillage consiste à épurer les gros déchets de taille visible, grâce à une ou plusieurs grilles avec des mailles de tailles allant jusqu'à moins de 3 mm. Ensuite, après calcul du débit d'eau (et éventuellement des prélèvements pour comptage des matières polluantes), le dégraissage-déshuilage et le dessablage consistent à éliminer les matières en suspension (pour le dégraissage-déshuilage) et les dépôts (pour le dessablage) qui ne sont pas en phase avec les eaux.

Le traitement primaire consiste à faire décanter les microparticules dissoutes dans l'eau, soit par une longue décantation soit chimiquement par coagulation-floculation.

Le traitement secondaire consiste ensuite à éliminer le reste de la pollution organique et microbienne. L'objectif est particulièrement d'éliminer les agents microbiens pathogènes vecteurs de maladies, la pollution carbonée (hydrocarbures), la pollution azotée (notamment les nitrates) et encore d'autres molécules (voir tableaux 02 et 03).

Ce traitement secondaire est possible grâce à différentes méthodes :

- Les méthodes d'ANC (assainissement non collectif), comme les micro-stations d'épuration, les tranchées d'épandage, les tertres d'infiltration et autres filtres ;
- La biofiltration (lits ou disques bactériens épurateurs) ;
- La méthode des boues activées (dans des conditions aérobie pour la digestion des boues par les micro-organismes) ;
- Le décanteur-digester anaérobie (il y en a aujourd'hui en France pour traiter 21 millions d'EH) ;
- Les systèmes extensifs et la phyto-épuration. C'est un système qui a commencé à se lancer à partir des années 1980 ;

Enfin, il y a les traitements tertiaires, qui regroupent l'ensemble des traitements complémentaires, par exemple pour réduire les nuisances olfactives, les concentrations en bactéries, en métaux, en phosphore ou en métaux. Les méthodes sont diverses et variées. Les techniques utilisées peuvent être les variations de pH, l'ozone, l'eau de Javel (avec de l'acide chlorhydrique), les ultra-violet, etc.

1.2.3. HISTORIQUE DE LA PHYTO-EPURATION

Dès l'antiquité chez les Grecs et les Romains, et en Chine depuis plusieurs siècles, l'utilisation des plantes pour traiter la pollution apparaît de façon concomitante avec les premières villes.

- En 1871, après les premières études scientifiques sur la dégradation des polluants des eaux usées par les cultures agricoles (Adolphe Mille et Alfred-Durand Claye), la Ville de Paris met en service un hectare de "jardin modèle" ouvert au public pour

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

convaincre les cultivateurs de la plaine de Gennevilliers des vertus fertilisantes de ces eaux d'égouts. Petit à petit, la Ville de Paris y consacre 5 100 ha ;

- En 1875, l'ingénieur Popoff met en œuvre un système d'épandage à Moscou, et, la même année, le Dr Hobrecht autour de Berlin sur plus de 25 000 ha ;

La phyto-remédiation pour l'eau :

- En 1875, l'ingénieur Popoff met en œuvre un système d'épandage à Moscou, et, la même année, le Dr Hobrecht autour de Berlin sur plus de 25 000 ha ;
- En 1901, la ville de San Antonio (Texas) construit une lagune de 200 ha, marquant ainsi les débuts de la technique des "zones humides construites" (constructed wetlands). Peu après, la ville de Munich réalise une lagune de 233 ha ;
- En 1912, la première zone humide pour l'épuration de l'eau usée naît près de Concord River à Lexington (Massachusetts) ;
- De 1920 à 1970, la technique se perfectionne en Amérique du Nord et en Allemagne avec Seidel (1946) et Kikuch (1970) ;
- Depuis les années 90, la phyto-remédiation pour le traitement de l'eau par le biais des eaux humides est en plein développement à travers le monde : la ville de New-York lance un grand programme visant à préserver ses ressources en eau qui illustre bien le formidable potentiel de technologies qui n'en sont pourtant encore qu'aux premiers pas.

La phyto-remédiation pour les sols :

- En 1910, la phyto-remédiation pour le traitement des sols pollués aux métaux lourds prend naissance en Russie avec la publication des travaux de Vernadsky ("la biosphère") ;
- En 1980, l'URSS met en place une directive nationale sur la phyto-remédiation et inscrit dans les plans quinquennaux un programme de "phyto-recultivation" des sols industriels contaminés qui traite plus de 1,4 million d'hectares entre 1980 et 1990 ;
- En 1990, aux États-Unis, le russe Ilya Raskin, s'inspirant des anciens travaux scientifiques soviétiques sur la phyto-accumulation (piégeage et fixation des métaux lourds à partir de la biomasse des plantes), développe le concept de phyto-extraction.

La phyto-remédiation pour l'air :

- En 1950, la NASA commence à étudier la phyto-restauration pour l'air. Il s'agit surtout d'évaluer la capacité de piégeage des polluants les plus courants dans l'atmosphère par certaines plantes (phyto-captation) ;
- En 1970, en Inde, en Corée et en Italie (Université de Turin), des scientifiques étudient le rôle des végétaux pour épurer l'air des villes. L'idée simple est de sélectionner les arbres et arbustes pour réaliser les meilleurs écrans végétaux de filtration des polluants (Biosink). Ces recherches seront par la suite développées par l'Université de Californie qui établira la première liste de végétaux épurateurs de l'atmosphère (140 espèces aujourd'hui recensées) ;

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

- En 1999, Thierry Jacquet met au point un concept de filtre végétalisé capable de traiter plusieurs milliers de mètres cubes viciés par heure dans un jardin filtrant d'une dizaine de mètres carrés ;
- En 2001, le Japon crée des sites de plus en plus nombreux pour essayer de lutter contre la pollution automobile.

La phyto-remédiation de façon générale fait, depuis les années 1990, l'objet de nombreux congrès internationaux. Elle élargit son spectre de traitement à presque toutes les pollutions et bénéficie du soutien de plusieurs gouvernements à travers le monde : Agence de Protection de l'Environnement, Départements de l'Énergie et de la Défense aux États-Unis (plus de 200 sites réalisés en 2000), Département du Commerce et de l'Industrie et Agence de l'Environnement en Angleterre, Ministère de l'Environnement et de l'Énergie au Canada, Bureau Environnement en Chine et au Japon...

L'Agence de Protection de l'Environnement des États-Unis publie le premier guide de phyto-remédiation en février 2000 et la Communauté Européenne lance le programme de recherche COST 837 pour mettre au point les premiers essais sur le terrain.

1.2.4. LA PHYTO-EPURATION AUJOURD'HUI EN FRANCE

Aujourd'hui, lorsque l'on parle de phyto-épuration en France, c'est l'épuration des eaux usées en assainissement non collectif qui vient à l'esprit.

Mais paradoxalement, quand il s'agit de l'eau, par exemple, la phyto-épuration se fait majoritairement par des micro-organismes et non par des macrophytes ! Certes, les macrophytes participent à la dépollution de l'élément à traiter, mais le traitement direct de certains éléments polluants dépasse rarement 10%.

En revanche, les feuilles des macrophytes dépolluent l'air des COV (composés organiques volatiles), et les racines consomment les phosphates et les nitrates présents dans l'eau ou la terre environnant les racines.

Certains micro-organismes, comme des mycorhizes, c'est-à-dire des champignons vivant sur les racines des plantes, aident ces plantes à accumuler des nutriments. La symbiose entre les mycorhizes et la plante n'est pas toujours vraie étant donné qu'avec certaines espèces de mycorhizes, les plantes accumulent également des métaux.

L'absorption des molécules par les plantes dépend également de nombreux autres facteurs (luminosité, saison, température, humidité, pH, autres conditions physico-chimiques et microbiennes).

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
 54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
 N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

Mais si les plantes ne dégradent directement que peu les polluants, elles permettent de :

- Constituer un biotope pour le développement des micro-organismes qui vont épurer les affluents ;
- Ramener le dioxygène à ces micro-organismes ;
- Parfois interagir en symbiose avec le biofilm créé par ces micro-organismes ;

Par ailleurs, les plantes utilisées en phyto-épuration présentent d'autres avantages :

- Qualité visuelle ;
- Qualité sonore (évite la présence de pompes bruyantes pour les postes de relevage) ;
- Préservation de la biodiversité (création de biotope de zone humide) ;
- Drainage vertical et horizontal des eaux sur support fin ;
- Aide à l'infiltration des eaux déjà épurées ;
- Aide à l'évapotranspiration en cas d'absence d'exutoire final ;
- Couverture par les feuilles de la boue pour éviter la dessiccation en été.

Depuis l'arrêté du 7 septembre 2009 fixant les prescriptions de l'ANC, le nombre de filtres à roseaux, à iris ou à joncs, 3 plantes phyto-épuratives parmi les plus utilisées n'a cessé de croître. Cette croissance est due aux 5 millions de foyers qui ne sont pas raccordés aux réseaux collectifs et qui doivent se mettre en conformité avant 2015.



Figure 11 : Photographie de roseaux dans une noue épurative à Claye-Souilly

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

1.3. PRINCIPE GENERAUX DES DIFFERENTS TRAITEMENTS

1.3.1. LES TRAITEMENTS NON COLLECTIFS

Aujourd'hui, près de dix millions de Français sont concernés par les systèmes d'épuration non collectifs. Ils représentent plus de 10% de la population.

Cependant, ce qui change entre l'assainissement non collectif (ANC) et l'assainissement collectif, ce n'est pas les méthodes de traitement, mais plutôt le choix de ces méthodologies. En effet, suivant la charge hydraulique à traiter, les contraintes économiques pour l'investissement et l'exploitation des installations épuratives ne sont pas proportionnelles.

Pour les installations phyto-épuratives, il en va de même. Les filtres à tourbe sont par exemple adaptés aux systèmes d'épuration d'ANC, mais le système n'est pas adapté pour supporter une charge hydraulique correspondant à plus de quelques dizaines d'EH.

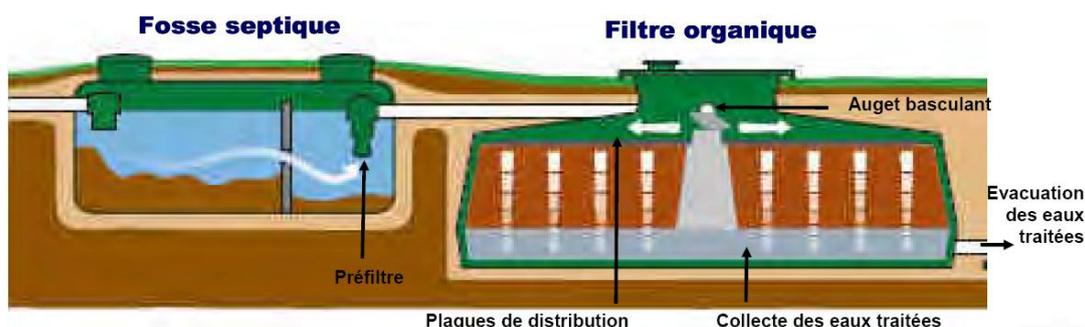


Figure 12 : Illustration de filtre à tourbe

Mais d'autres techniques de phyto-épuration sont adaptées pour traiter des charges hydrauliques plus importantes. Il y a par exemple les massifs filtrants plantés avec des roseaux ou d'autres plantes héliophytes (capables de vivre les racines sous la zone de saturation en eau) comme des variétés d'iris ou de joncs.

L'eau percole au travers de ce massif filtrant et l'eau qui en ressort est très claire. Elle n'a aucune odeur et peut techniquement être rejetée dans le milieu naturel. L'inconvénient, c'est la grande surface requise (environ 5 m² par personne). Il faut choisir des plantes capables de résister aux écarts de température ainsi qu'à la sécheresse. L'avantage, c'est que cette méthode ne nécessite que peu d'entretien (faucardage des roseaux une fois par an), il n'y a plus à payer la collecte des boues et les nuisances olfactives et sonores d'autres systèmes d'épuration sont évitées.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

L'innocuité des boues permet leur épandage ou encore leur utilisation en terreau dans les pots de fleur, selon Martin Werckmann, référent technique chez Aquatiris. Mais l'avantage majeur de cette technique phyto-épurative, c'est sa qualité paysagère. Une qualité qui peut être mise en avant pour développer la phyto-épurative dans les systèmes d'assainissement collectifs.

1.3.2. LES LITS VERTICAUX

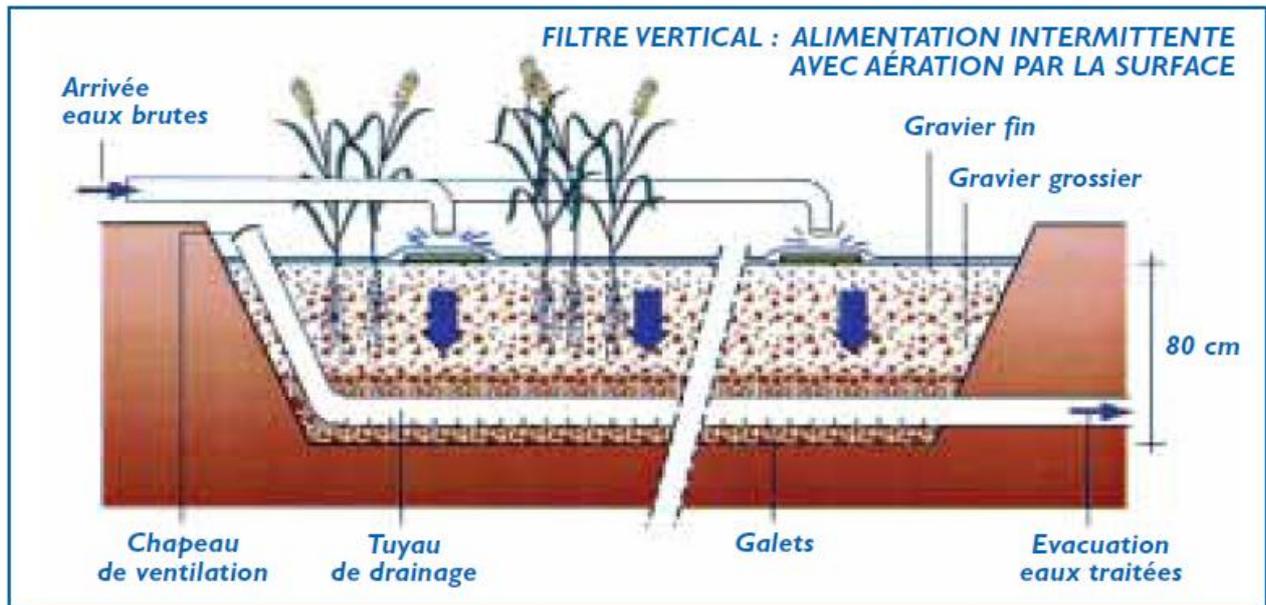


Figure 13 : Schéma d'un lit vertical en coupe transversale

Il s'agit d'un filtre où l'eau arrive directement en surface. Les eaux percolent ensuite verticalement, notamment grâce aux racines des plantes. L'écosystème en place va filtrer une majorité des matières polluantes dissoutes dans l'eau. Arrivée au fond du casier, l'eau percolée est ensuite évacuée, avec ou sans installation de drain. Généralement, c'est une géomembrane protectrice qui empêche l'eau de s'infiltrer en dehors du casier.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
 54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
 N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

1.3.3. LES LITS HORIZONTAUX

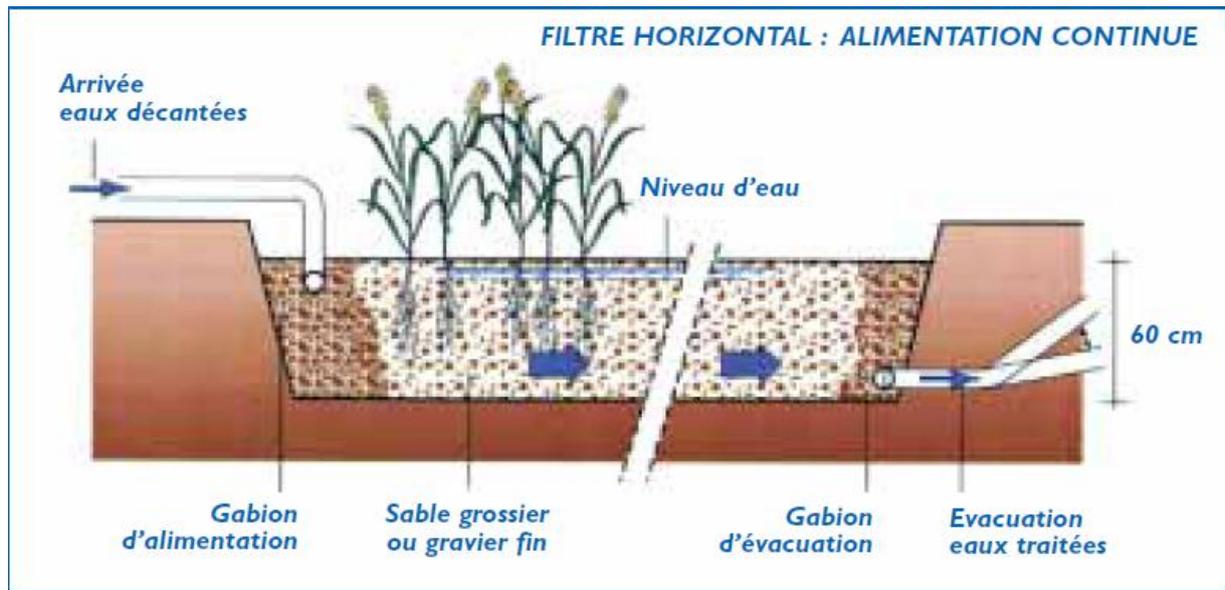


Figure 14 : Schéma d'un lit horizontal en coupe transversale

Il s'agit d'un filtre où l'eau arrive sur un côté d'alimentation en eau. Les eaux percolent ensuite horizontalement, notamment grâce aux racines des plantes. L'écosystème en place va filtrer une majorité des matières polluantes dissoutes dans l'eau. Arrivée au côté opposé à l'alimentation, le côté d'évacuation, l'eau percolée est ensuite évacuée. Pour éviter les reflux à la surface, l'installation d'un drain en fond de bassin est obligatoire. Généralement, c'est une géomembrane protectrice qui empêche l'eau de s'infiltrer en dehors du casier.

1.3.4. LES TECHNIQUES D'ÉVAPOTRANSPIRATION

L'objectif des techniques d'évapotranspiration est de réduire la charge hydraulique. Il y a :

- La toiture végétalisée et la noue végétalisée :

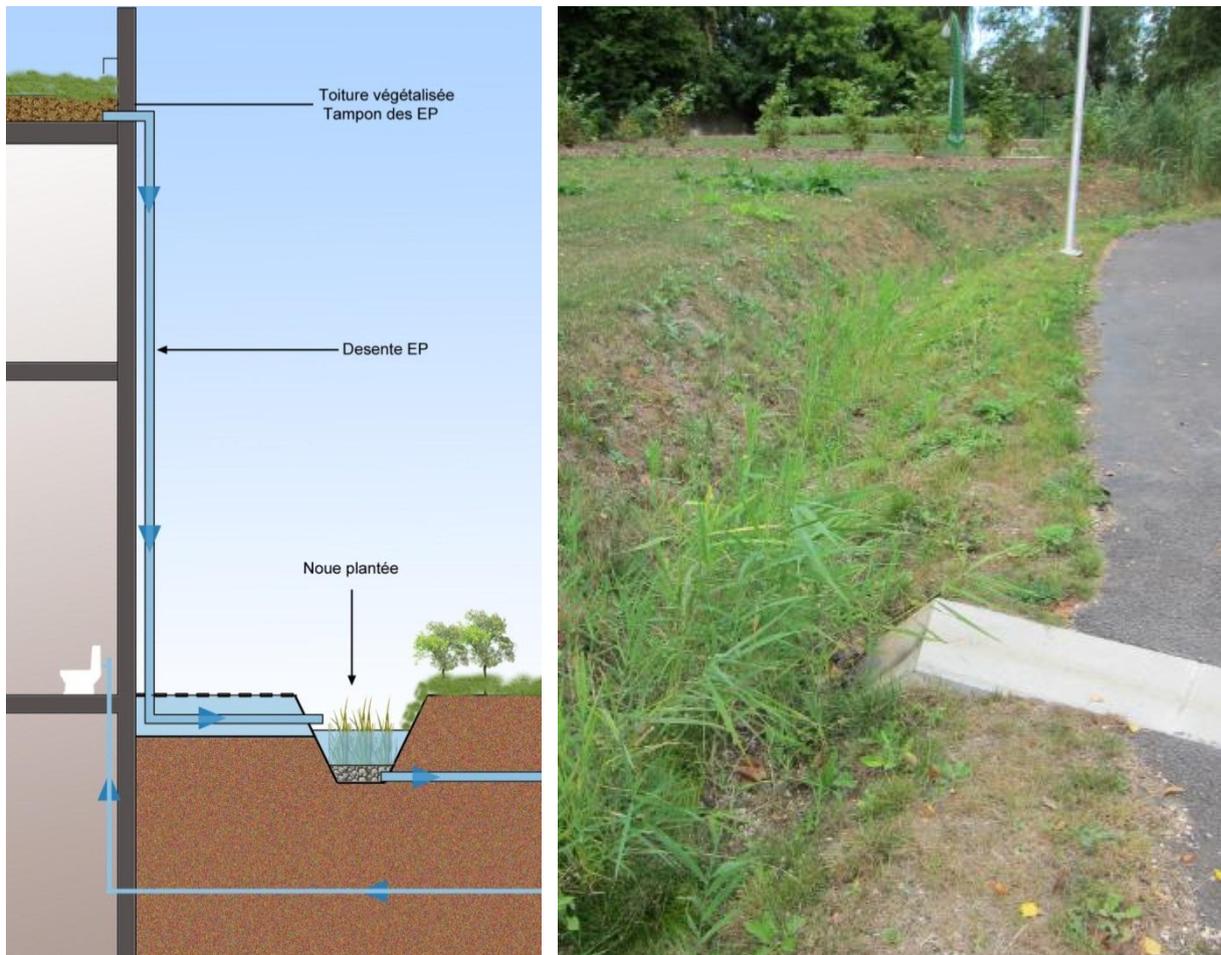


Figure 15 : Schéma d'une gestion de l'eau aboutissant à la noue végétalisée

La toiture végétalisée a plusieurs fonctions dans la qualité environnementale des bâtiments. Parmi ces fonctions, il y a le stockage de l'eau et l'évapotranspiration pour réduire les charges hydrauliques, ce qui va permettre de réduire les coûts de l'épuration. La noue végétalisée quant à elle, à l'extérieur des bâtiments, joue un rôle similaire. L'épuration en particules polluantes est négligeable.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
 54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
 N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

- Le Taillis Courte Rotation ou le Taillis Très Courte Rotation (TTCR) :



Figure 16 : Photographie de Taillis Courte Rotation ou le Taillis Très Courte Rotation

Il s'agit d'arbustes tels que des saules, mais aussi des peupliers ou encore des aulnes, etc. Leur rôle est d'absorber des polluants organiques tels que les phosphates ou les nitrates qui sont assimilés comme des nutriments. Ces nutriments permettent le développement de ces végétaux qui pourront servir par exemple de combustible sous forme de bois-énergie.

- Le bassin planté :



Figure 17 : Photographie d'une lagune à Berlin

La principale vocation du bassin planté est une vocation paysagère. Les bassins plantés sont des lagunes où sont plantés des végétaux. Le rendement d'épuration des lagunes en présence de microphytes est nettement meilleur qu'avec des macrophytes.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
 54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
 N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

1.3.5. LES FILIERES A CHOISIR

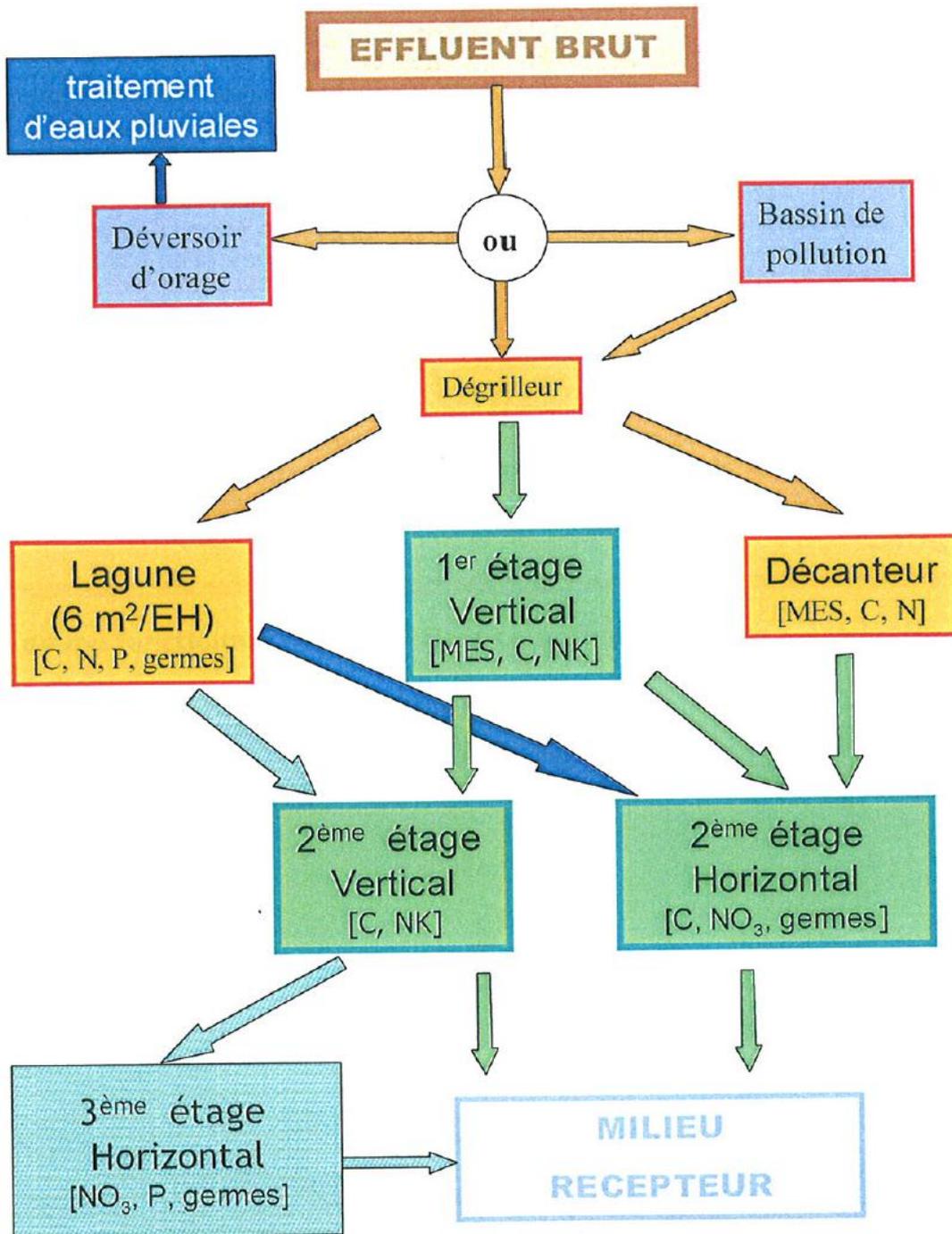


Figure 18 : Schéma de filières classiques 100% phyto-épuration pour la filière eau

Avec l'ensemble des techniques de phyto-épuration, plusieurs filières existent. Il y a les filières 100% phyto-épuration et les filières mixtes. Les principales techniques utilisées et qui composent ces filières sont :

- Les filtres plantés à écoulement vertical ;
- Les filtres plantés à écoulement horizontal ;
- Le lagunage naturel (ou aéré) ;
- Les taillis à très courte rotation (et les taillis à courte rotation) ;
- Les filtres à tourbe (réservé à l'ANC) ;
- Les lits bactériens suivis du traitement des boues par lits plantés de roseaux ;
- La phyto-épuration des sols pollués ;
- Les murs végétalisés pour améliorer la qualité de l'air.

Afin de sélectionner une filière, une comparaison de ces différents facteurs est à prendre en compte :

- La qualité des rejets (l'abattement en différents types de polluants, afin de répondre à la réglementation) ;
- L'espace disponible ;
- La perméabilité du sol ;
- L'adaptabilité des différentes filières aux conditions climatiques ;
- Les coûts,
- L'intérêt paysager ;
- L'intérêt pédagogique.
- Les avantages et inconvénients divers ;

Entre les filières phyto-épuration et les autres filières de l'épuration, les filières phyto-épuration, toutes extensives sont préférables dans la mesure où les besoins énergétiques sont moindres par rapport aux filières classiques.

Mais théoriquement, il existe un nombre quasiment infini de combinaisons possibles entre les différentes techniques épuration. Voici un tableau pour illustrer le rôle de quelques-unes des techniques de l'épuration extensive des eaux :

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

Filière Classique	Traitement primaire	Traitement secondaire	Traitement tertiaire
Infiltration - percolation	Décanteur digesteur	Infiltration - percolation	
Filtres plantés à écoulement vertical	Nécessaire (des filtres plantés à écoulement vertical peuvent être utilisés pour assurer ce traitement primaire)	Filtres plantés à écoulement vertical (1 ^{er} étage)	Filtres plantés à écoulement vertical (2 ^{ème} étage)
Filtres plantés à écoulement horizontal	Décanteur digesteur	Filtres plantés à écoulement horizontal	
Lagunage naturel	1 ^{er} bassin de lagunage	2 ^{ème} bassin de lagunage	3 ^{ème} bassin de lagunage
Lagunage à macrophytes	Déconseillé	Déconseillé	Un ou plusieurs bassins
Lagunage aéré	Lagune aérée + lagune de décantation		Lagune de finition
Systèmes mixtes, par exemple ...	1 ^{er} bassin de lagunage, 2 ^{ème} bassin de lagunage		Infiltration - percolation
	Lagune aérée + lagune de décantation		Infiltration - percolation
	Filtres plantés à écoulement vertical + Filtres plantés à écoulement horizontal		

Tableau 05 : Illustration du rôle de quelques-unes des techniques de l'épuration extensive des eaux

LES PLANTES

Les plantes qui font la phyto-épuration sont classiquement *Phragmites australis*, d'autres roseaux, *Scirpes lacustris*, *Iris pseudacorus*, *Typha*, *Carex*, d'autres graminée, ou encore la reine des prés, la prêle, l'épilobe hirsute, ainsi que pour les TTCR, classiquement les saules ou encore des algues pour le lagunage.

Pour la qualité paysagère du site, ces plantes peuvent être accompagnées de *Thalia*, de la Sauge bleue, de la Menthe poivrée ou aquatique, de la Laitue, de la Jacinthe d'eau ou encore du Nénuphar, etc.

La qualité des filières de la phyto-épuration évolue au fil des saisons. Comme beaucoup de plantes, les plantes utilisées par la phyto-épuration ont une croissance moindre, ce qui signifie un écosystème moins dense, donc une moins bonne épuration. Pour remédier à ce problème, la cohabitation des plantes consiste à planter en même temps des plantes dont la température optimale est celle des saisons chaudes pour les unes et celle des saisons froides pour les autres.

LA CHARGE HYDRAULIQUE

Les systèmes de phyto-épuration sont dimensionnés suivant la charge hydraulique, ou débit d'étiage. Les volumes d'eaux claires parasites et permanentes seront quantifiés en période creuse, par temps sec et par temps humide. Ces données permettent de vérifier l'adaptabilité de la station aux débits générés.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
 54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
 N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

Pour un réseau unitaire, seront comptés outre les débits journaliers de temps sec, ceux du temps de pluie ainsi que le débit converse à l'aval des dispositifs limitant les flux (tels des déversoirs d'orages) au regard des pluviométries de référence retenues.

LES CONDITIONS GEOLOGIQUES

Le choix de la filière épurative dépendra donc grandement du terrain. En effet, pour la conception d'infrastructures destinées à la phyto-épuration, plusieurs contraintes sont à prendre en considération :

- L'espace disponible en surface ;
- Les conditions topographiques, qui peuvent présenter des problèmes plus économiques que techniques il suffit de remblayer et de déblayer ;
- Les difficultés dues à la dureté des sols ;
- La disposition hydrogéologique du terrain, avec le risque de proximité des nappes phréatiques qui risquent de remonte ;
- Le climat. En effet, le gel empêche par exemple le fonctionnement des lits verticaux.

Pour répondre à ces problèmes, des solutions techniques sont proposées dans l'annexe 1 « Problèmes et solutions techniques liés à la qualité des sols ».

LES CHARGES POLLUANTES

Mais les problèmes de charge

En milieu rural, où même les fertilisants et les phytosanitaires sont présents en grande concentration, les apports en polluants à considérer sont les suivants :

- DBO5 : 45 g par jour et par habitant,
- DCO : 100 g par jour et par habitant,
- MES :
 - 40 à 45 g par jour et par habitant pour un réseau séparatif,
 - 50 à 55 g par jour et par habitant pour un réseau unitaire,
- N global : 9 g par jour et par habitant,
- P total : 3 g par jour et par habitant.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

Paramètres	MO*	NTK*	N Global	P total*	Désinfection bactériologique
Filtres plantés à écoulement vertical	Oui	Oui	Non	Non	Non
Filtres plantés à écoulement horizontal	Oui	Mauvaise nitrification	Bonne dénitrification	Non	Non
Lagunage naturel	Moyen	Oui	Oui	Oui, les premières années	Oui
Lagunage à macrophytes	Moyen	Oui	Oui	Oui, les premières années	Oui
Lagunage aéré	Moyen	Moyen	Non	Non	Non

Tableau 06 : Illustration du rôle de quelques-unes des techniques de l'épuration extensive des eaux

2. PHYTO-EPURATION DES EAUX

2.1. PRINCIPES GENERAUX

2.1.1. PHYTO-EPURATION PAR LES MICRO-ORGANISMES

La phyto-épuration des eaux repose globalement plus sur l'épuration par des micro-organismes que par les plantes, qui sont présentes pour aider cette épuration de différentes manières.

Ainsi, pour assurer une bonne qualité d'épuration, il faut assurer une bonne quantité en micro-organismes. Ces micro-organismes sont des êtres vivants (bactéries principalement) et ils ont besoin d'être nourris. Heureusement, leur nourriture, c'est la pollution dont on veut épurer les effluents !

Les besoins en nutriments des micro-organismes se composent globalement d'un rapport de 100 atomes de carbone pour 15 atomes d'azote et 1 atome de phosphore toutes molécules confondues. Il est important de maintenir ce rapport, car la loi de Liebig (1840) schématise les besoins nutritionnels des êtres vivants comme un tonneau d'eau :

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com



Figure 19 : Illustration de la loi de Liebig

Comme avec un tonneau percé, l'élément nutritif limitant d'un milieu va empêcher les espèces dépendantes de se reproduire. Par exemple, même si nous avons à manger à volonté, si nous n'avons plus d'eau à boire, fatalement, la population va diminuer.

Par ailleurs, pour survivre, les micro-organismes vont élaborer un biotope, un milieu de développement, au sein duquel ils pourront proliférer protégés tout en se nourrissant des nutriments extérieurs. Ce milieu, c'est le biofilm.

Ainsi, avant qu'une filière phyto-épurative des effluents liquides soit optimale, il faut attendre que ce biofilm se soit formé.

Par ailleurs, les bactéries entrent en phase de sommeil quand il fait trop froid, et de fait, en deçà de 8°C, il n'y a quasiment plus de nitrification (transformation des nitrates en ammoniac, gaz qui s'évapore en milieu acide et qui est partiellement absorbé par les pétioles des macrophytes).

2.1.2. CHARGE HYDRAULIQUE ET APPORTS EN POLLUANTS

Le volume journalier d'eau (charge hydraulique) produit en moyenne par équivalent-habitant (EH) en France est d'environ 150 litres par jour en France. A titre de comparaison, elle est de plus de 400 litres par jour en Amérique du Nord et de moins de 2 litres d'eau par jour dans les régions les plus en proie à la sécheresse, soit moins les besoins de l'organisme. Elle est de 20 litres par jour pour une consommation jugée raisonnée.

Il est communément admis que pour les eaux ménagères, un EH équivaut à :

- 60 g de DBO₅ (demande biologique en oxygène en 5 jours. Cette valeur correspond à la directive Européenne du 21 mai 1991 reprise par l'article R.2224-6 du code des collectivités territoriales) (contre 45 g relevés en milieu rural) ;

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
 54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
 N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

- 120 g de DCO (demande chimique en oxygène) (contre 100 g relevés en milieu rural),
- 90 g de MES (matières en suspension) (contre 50 g en milieu rural),
- 15 g d'azote global. L'azote global comprend l'azote oxydé (nitrates NO_3^- et nitrites NO_2^-) et l'azote réduit (appelé aussi azote total, azote Kjeldahl, noté N_{TK} et regroupant l'azote réduit inorganique, NH_4^+ et l'azote organique (urée, etc)) (contre 9 g en milieu rural),
- 1,5 g de phosphore total Pt (contre 3 g en milieu rural).

Ces valeurs seront différentes si une industrie rejette ses effluents, plus ou moins pollués, dans les eaux à épurer.

Il en résulte en moyenne entre 30 g et 60 g de matières sèches par jour et par EH, soit 1 à 3 litres de boues non épaissies.

Mais le dimensionnement des installations de phyto-épuration se fait selon la charge hydraulique. Or, cette charge hydraulique n'est pas constante. Elle dépend des précipitations, ainsi que des rejets des eaux ménagères.

Il faut donc déterminer :

- Le débit de pointe des effluents à recevoir,
- Le débit moyen des effluents à recevoir,
- Le débit d'étiage des effluents à recevoir.

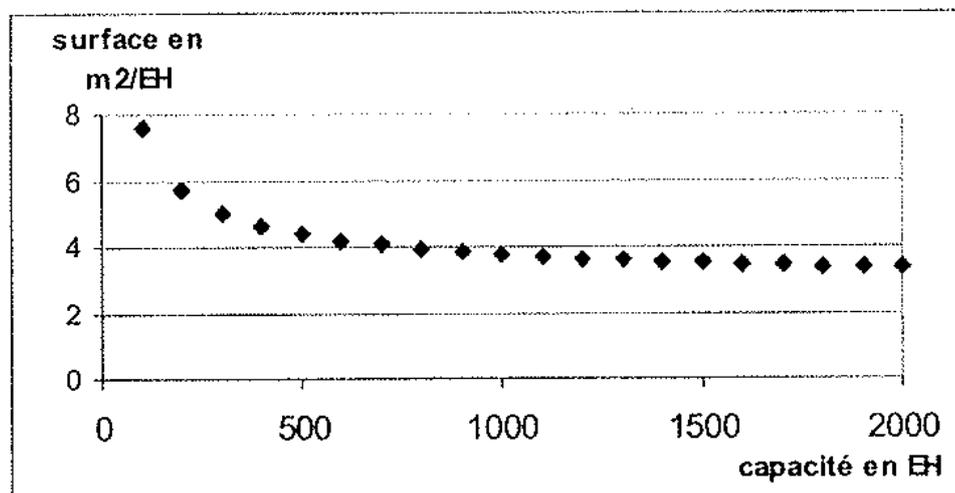


Figure 20 : Surface brute minimum nécessaire en fonction de la capacité en équivalents-habitants EH

Il faut compter environ 3 à 8 m² par habitant au minimum (pour environ 2 m² de surface utile de filtre par personne), pour les stations qui demandent le moins de surface (avec seulement

deux filtres à écoulement vertical), tandis que pour une installation avec un premier étage avec filtre vertical et un second étage à filtre horizontal, il faut compter entre 8 et 9 m² (pour environ 5 m² de surface utile de filtre par personne).

Ces surfaces sont considérables et c'est la raison pour laquelle la Directive Européenne sur les Eaux Résiduaires Urbaines n°91/271/CEE du 21 mai 1991 prescrit d'éviter la phyto-épuration pour les agglomérations de plus de 2000 EH.

2.1.3. EXPLOITATION

Le roseau *Phragmites australis* est la plante filtrante la plus utilisée au monde pour dépolluer les eaux usées, que cela soit sous forme de filtre alluvionnaire végétalisé ou sous forme de bassins plantés. Grâce au transport du dioxygène dans ses rhizomes, elle nourrit les micro-organismes aérobiose responsables de la dégradation des polluants organiques et biologiques. En règle générale, 3 à 6 de ces plantes sont plantées par mètre carré, sur les lits d'épuration.

Sur le point de l'exploitation, l'avantage principal de la phyto-épuration (et de l'ensemble des filières extensives), c'est que la gestion des boues est infiniment moins compliquée. En effet, les boues se déposent à la surface du premier étage et après environ une décennie d'exploitation, les croûtes de dépôt des boues atteignent environ 1 mètre de hauteur.

Cette hauteur de 1 mètre en une décennie est limitée grâce aux plantes qui se nourrissent de la boue. Pour conserver une bonne qualité paysagère, il est essentiel d'entretenir les plantes. Il faut les faucher régulièrement durant la période de végétation active ou à l'automne, soit une fauche par an environ, à 15 cm au-dessus de la surface.

Le faucardage des berges se fera uniquement si celles-ci sont envahies par des tiges adventices et gâchent la qualité paysagère. Eviter de faucher permet de laisser se développer une faune et une flore auxiliaire.

Pour l'entretien des installations de phyto-épuration, il faut compter environ 300 m² par jour et par ouvrier (équipé et formé quant aux risques spécifiques du travail dans l'eau).

La pertinence d'un projet de phyto-épuration pour traiter les effluents pollués dépend de nombreux critères techniques, économiques et paysagers qui sont souvent plus subjectifs qu'autre chose. L'expérience des études et la connaissance du site sur lequel sera disposé le système épuratoire sont le secret du meilleur choix de la filière épurative.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

2.2. LITS PLANTES VERTICAUX

2.2.1. GENERALITES ET UTILISATIONS

Le principe du lit vertical est de filtrer l'eau grâce à un écoulement vertical des effluents (voir Figure 13).

Après un dégrillage préalable pour enlever les matières avec un diamètre supérieur à par exemple 3 mm, le lit vertical permet un traitement primaire des eaux usées (dessablage, déshuilage et décantation) dans plusieurs techniques de phyto-épuration. Cependant, pour des eaux vraiment chargées en polluant, comme les eaux des restaurateurs, il est conseillé de précéder le lit vertical d'un décanteur primaire.

L'une des techniques les plus répandues est le lit vertical sur deux étages. C'est-à-dire que les percolats (eaux ayant traversé le massif filtrant) du premier étage, toujours végétalisé (pour aider à dégrader les boues) alimentent un deuxième filtre vertical (pas nécessairement végétalisé) pour compléter l'épuration. L'avantage de cette technique à double filtres verticaux est le gain de surface. L'inconvénient, c'est la mauvaise capacité d'épuration.

L'une des techniques les plus connues utilisant le filtre vertical, c'est l'utilisation d'un filtre vertical suivi d'un filtre horizontal. Après le lit horizontal, les eaux sont bien épurées et la qualité des effluents répond généralement aux contraintes réglementaires. Mais il est possible de faire suivre d'autres traitements (filtre à tourbe, bassins plantés et TTCR par exemple).

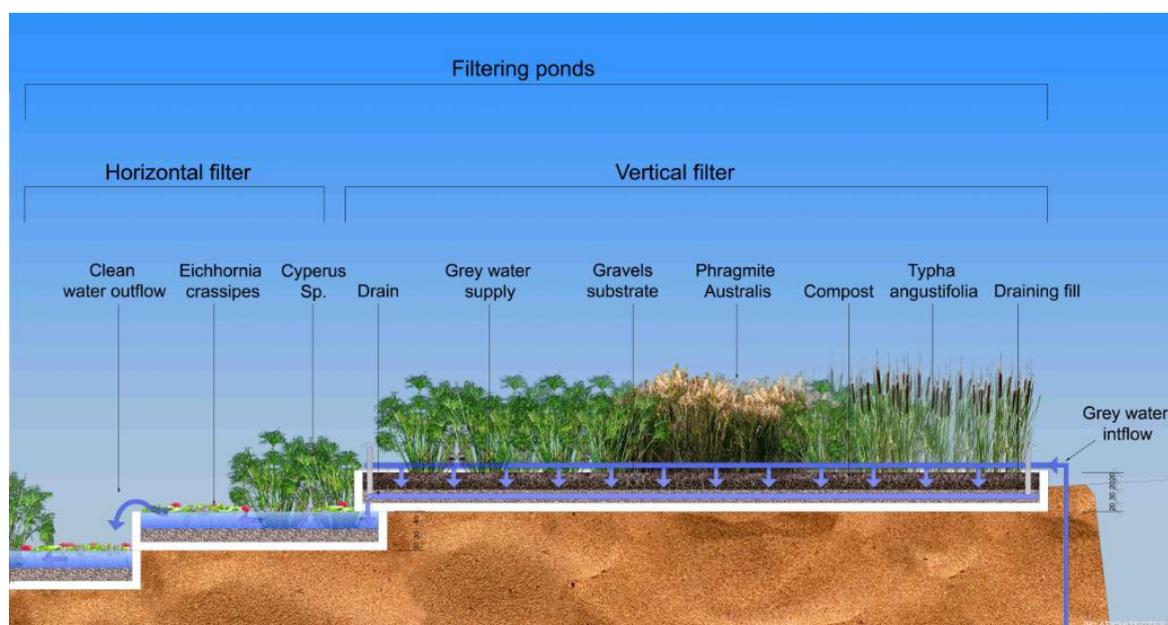


Figure 21 : Schéma de filtre vertical suivi de filtre horizontal

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

Le dernier type de filière avec des lits verticaux, c'est une épuration classique suivie d'un traitement complémentaire des boues liquides par phyto-épuration. C'est par exemple le cas de la méthode Rhizopur® qui utilise une épuration par lits bactériens, puis deux lits verticaux, dont le deuxième est planté de roseaux.

2.2.2. DIMENSIONNEMENT

Les effluents arrivent à au moins 0,6 m/s afin qu'il y ait auto-curage des réseaux d'alimentation. La répartition de l'effluent doit ensuite se faire sur l'ensemble de la surface du lit filtrant. Plus l'effluent est réparti et plus le rendement de filtration est amélioré. Il faut au moins un point d'alimentation pour 40 m², avec un débit minimum d'alimentation de 0,5 m³/m²/h qui soit plus important que le débit d'infiltration pour assurer une bonne répartition de l'infiltration sur l'ensemble de la surface du filtre. Mais l'idéal, c'est de disposer de diffuseurs ponctuels avec un point de répartition pour 5 m² de surface.

Les doubles lits verticaux sont dimensionnés pour une surface utile totale de 2 à 3 m² par habitant, avec 1,2 m² à 1,5 m² par habitant pour le premier étage et 0,8 m² à 1,5 m² par habitant pour le deuxième étage.

Le nombre de lits est compris entre 2 à 4 en parallèle afin de permettre l'alternance des bâchées (alimentation en eau des lits, généralement 5 à 10 fois par jour). Pour chacun de ces lits, des vannes permettent une alimentation ponctuelle et des clapets anti-retour permettent de ne pas avoir de retour d'effluents. Les rôles de l'alternance des bâchées d'alimentation en eau sont :

- De permettre d'avoir des bassins de secours s'il y a des travaux de gestion à réaliser sur l'un des lits ;
- De prévoir une pointe de charge hydraulique ;
- D'aérer et donc d'apporter de l'oxygène aux écosystèmes avec les micro-organismes aérobies responsables de la dépollution.

Mais le dimensionnement ne se fait pas que suivant les critères de charge hydraulique. En effet, empiriquement, les charges organiques surfaciques journalières acceptables sont de 20 à 25 g de DBO₅ par jour et par m² de surface totale plantée.

Généralement, les compositions granulométriques des lits verticaux sont les suivantes. De haut en bas :

- Une croûte de boues filtrées et minéralisées pour le premier étage (un peu moins d'un millimètre par jour pour les lits bien dimensionnés, soit environ 1 mètre par décennie) ;
- Des macrophytes plantés à la surface des lits filtrants (hors croûte) ;

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

- Une couche filtrante composée de 30 cm minimum d'épaisseur de gravier fin d'environ 5 mm pour le premier étage végétalisé et ou de sables alluvionnaires siliceux d'une granulométrie d'environ 0,3 mm pour le second étage ;
- Une couche de transition d'environ 10 à 20 cm d'épaisseur d'une granulométrie comprise entre 5 et 10 mm ;
- Une couche drainante d'environ 10 à 20 cm d'épaisseur d'une granulométrie comprise entre 20 et 40 mm ;
- Eventuellement de drains d'évacuation des effluents ;
- Une couche d'imperméabilité. Soit le sol est imperméable avec un coefficient de perméabilité inférieur à 10^{-7} m/s, soit il faut installer du béton, ce qu'AR ARCHITECTES ne fait jamais, soit installer une géomembrane d'imperméabilisation.

Après avoir pris en considération l'ensemble des facteurs, il faut donc compter un dénivelé de l'ordre de 3 à 4 m entre le premier étage à lit vertical et le deuxième étage pour ne pas gaspiller de l'énergie avec un poste de relevage des eaux. En effet, l'alimentation du deuxième étage par siphons ne nécessite pas d'énergie.

L'évacuation des percolats se fait ensuite par un tuyau de minimum 10 cm de diamètre, mais qui peut varier suivant le débit moyen d'alimentation.

Pour mémoire, les filtres verticaux en premier étage pour l'épuration des effluents sont pour les filières réservées à l'assainissement de réseaux comptant entre 50 à 1000 EH pour le Cemagef.

Que ce soit pour le premier étage de traitement primaire des effluents ou pour les lits recueillant les boues liquides des filières classiques de l'épuration, l'enlèvement des croûtes se fait en moyenne 1 fois tous les 5 à 10 ans.

2.2.3. ABATTEMENT DE LA POLLUTION

Théoriquement, plusieurs espèces de plantes peuvent être utilisées (*Scirpus*, *Typha*, etc), mais les roseaux (de type *Phragmites australis*), par leur résistance aux conditions rencontrées (longue période submergée du filtre, périodes sèches, fort taux de matières organiques), et la rapide croissance du chevelu de racines et rhizomes, sont les plus souvent utilisés dans les climats tempérés (Brix, 1987). La densité de plantation est de 4 plants par m².

Les performances réglementaires sont à atteindre pour la dépollution des effluents sont données dans le tableau 1.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
 54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
 N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

Le premier étage vertical peut atteindre des abattements de :

- 15 mg/L de MES,
- 15 mg/L de DBO₅,
- 5 mg/L de N_{Kt}.

Si c'est généralement suffisant pour répondre aux critères réglementaires, le temps de séjour des effluents est trop court et si les prélèvements d'échantillon sont faits au mauvais moment (par exemple en hiver quand beaucoup de germes fécaux sont à épurer), la décontamination n'est pas toujours suffisante.

Certes, c'est le premier étage qui assure la plus grosse partie de la dépollution puisqu'il est en tête de parcours dans ces filières 100% extensives.

Le premier étage de filtres verticaux a pour principales fonctions :

- La sédimentation en surface des matières en suspension (MES) et leur minéralisation avec des rendements de l'ordre de 85 à 95 % ;
- L'abattement de la DBO₅ et de la DCO à raison de 90 à 98 % ;
- La nitrification, qui permet d'oxyder l'ammoniac en nitrate.

Pour comparaison, le second étage de filtres à écoulement horizontal a pour principales fonctions :

- La dégradation des matières organiques, de la DBO₅, DCO, avec des rendements de jusqu'à 95 % ;
- L'abattement des coliformes et entérocoques fécaux, avec des rendements de 2 à 4 UL (Unités log : un rendement de l'ordre de 2 à 4 UL correspond à une division de la concentration par 10² à 10⁴, soit par 100 à 10000) ;
- La dénitrification, qui élimine les nitrates en azote gazeux ;
- Un abattement, de la charge en phosphore de l'ordre de 30%.

En considérant un effluent d'une qualité normale (pour des eaux usées) pour deux filtres verticaux :

- La sédimentation en surface des matières en suspension (MES) et leur minéralisation atteignent généralement de 30 à 35 mg/L ;
- La DBO₅ est réduite de 25 mg/L ;
- La DCO est réduite de 90 à 130 mg/L ;
- L'abattement de l'azote total est de l'ordre de 10 mg/L ;
- L'abattement en phosphore total est faible. Il dépend de la capacité d'adsorption du substrat et de l'âge de l'installation ;
- L'abattement des germes pathogènes n'est que de l'ordre de 1 à 2 UL.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

Mais toutes ces valeurs sont des moyennes et dépendent complètement de la pollution des affluents dans les systèmes de phyto-épuration.

2.2.4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Les filtres verticaux ne sont pas adaptés aux pays froids. En effet, ils peuvent supporter des périodes de gel sans chute importante de la qualité du traitement. Cependant l'alimentation alternée, de longues périodes de gel sans protection thermique, peuvent compromettre le système hydraulique et donc le traitement. Une isolation par de la paille peut éviter un gel excessif. Cependant, il n'y a aucune différence de rendement entre les saisons sur de nombreux sites au Danemark, pays froid.

Avantages :

- Facilité et faible coût d'exploitation. Aucune consommation énergétique si la topographie ne contraint pas à l'utilisation de poste de relevage ;
- Traitement des eaux usées brutes, sans prétraitement préalable ;
- Gestion réduite au minimum des dépôts organiques puisqu'ils sont retenus sur les filtres du premier étage ;
- Bonne adaptation aux variations saisonnières de population.

Inconvénients :

- Exploitation régulière (faucardage annuel des parties aériennes des macrophytes et enlèvement) ;
- Technique déconseillée pour le traitement de plus de 2000 EH (raisons de coût et de technique hydraulique) ;
- Risque de présence d'insectes et de rongeurs.

2.3. LITS PLANTES HORIZONTAUX

2.3.1. GENERALITES ET UTILISATIONS

Le principe du lit horizontal est de filtrer l'eau grâce à un écoulement des effluents d'un côté du lit vers le côté opposé (voir Figure 14).

Le lit horizontal demande une grande surface d'installation (de l'ordre de 10 m² par habitant) et est utilisé pour constituer le deuxième étage de lits plantés après, généralement, un premier étage avec des lits verticaux (1 à 3 m² par EH). Les eaux des bassins horizontaux peuvent subir d'autres traitements (par exemple le lagunage comme à la Cité de l'Ile, à

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

Nanterre) mais peuvent également être directement rejetées dans la nature, comme à Sir Ban Yas, au Moyen-Orient.

Après dégrillage préalable, les effluents d'alimentation subissent un traitement primaire (décantation, dessablage, dégraissage-déshuilage) avec un premier étage de lits plantés à écoulement vertical. Si le traitement primaire ne peut s'effectuer avec un premier lit vertical (pour cause de manque d'espace ou d'effluent trop pollué) il est possible d'utiliser un décanteur-digesteur vertical, au sens de la norme NF – EN 12-255-4-2002. (5m² par habitant),

Les lits horizontaux sont ensuite alimentés par alimentation gravitaire ou par poste de relevage. (Les normes NF EN 752-6, NF EN 809 et le Titre 1 du Fascicule 81 du CCTG donnent les prescriptions concernant les pompes et les postes de relevage).

Lorsque les lits horizontaux sont installés en parallèle, un répartiteur, placé en aval des installations de traitement primaire, permet d'avoir une modulation du débit dans chaque lit.

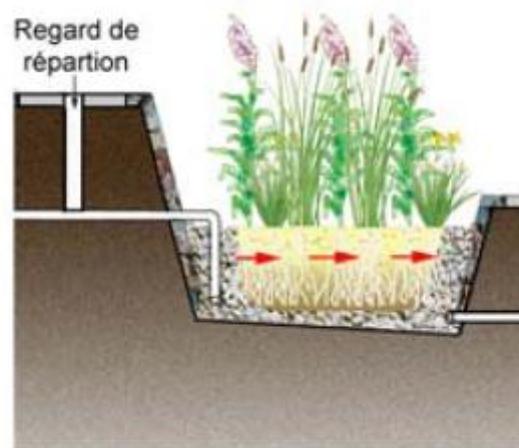


Figure 22 : Illustration d'un filtre horizontal avec un regard de répartition

Les systèmes d'alimentation doivent être accessibles à la surveillance et curables. Il en existe deux types : la rampe d'alimentation, avec plusieurs points d'alimentation ou la tranchée, un caniveau qui distribue l'effluent à travers un gabion de répartition.

Dans les filtres à écoulement horizontal, le massif filtrant est quasi-totalement saturé en eau. L'effluent est réparti sur toute la largeur et la hauteur du lit par un système répartiteur situé à une extrémité du bassin ; il s'écoule ensuite dans un sens principalement horizontal au travers du substrat. La plupart du temps, l'alimentation s'effectue en continu car la charge organique apportée est faible.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

L'évacuation se fait par un drain placé à l'extrémité opposée du lit, au fond et enterré dans une tranchée de pierres drainantes. Ce tuyau est relié à un siphon permettant de régler la hauteur de surverse, et donc celle de l'eau dans le lit, de façon à ce qu'il soit saturé pendant la période d'alimentation. Le niveau d'eau doit être maintenu environ à 5 cm sous la surface du matériau. En effet, l'eau ne doit pas circuler au-dessus de la surface pour ne pas court-circuiter la chaîne de traitement ; il n'y a donc pas d'eau libre et pas de risque de prolifération d'insectes.

2.3.2. DIMENSIONNEMENT

La surface des lits est principalement fonction de la charge hydraulique à traiter. Elle est de l'ordre de 5 m² de surface utile par équivalent habitant :

- Pour des concentrations initiales de l'ordre de 150 à 300 mg/l de DBO5, les surfaces plantées sont de l'ordre de 5 m²/EH en traitement secondaire (Vymazal et al. 1998) ;
- Pour des concentrations plus élevées ou pour utiliser les sols en place, ce qui est rarement recommandé, il semble préférable d'opter pour la pratique danoise qui consiste à dimensionner le filtre à 10 m²/EH (Vymazal et al. 1998) ;
- En traitement d'effluents de réseaux pluviaux (Cooper - 1996) l'emprise est de 0,5 m²/EH.

Pour des lits horizontaux de plus de 500 m², un fractionnement en plusieurs unités de taille réduite facilitera l'entretien et améliorera la répartition hydraulique.

La géométrie du lit horizontal est essentiellement basée sur la perméabilité des matériaux de garnissage, qui vont influencer le débit d'eau, suivant la Loi de Darcy :

$$Q_j = A * K_s * (dH/dL)$$

Avec :

- Q_j : Débit journalier moyen des effluents (m³/s) ;
- $A = H * l$: Aire moyen de la section transversale du lit (m²) ;
- H : Différence de hauteur entre le point d'alimentation et le point d'évacuation ;
- K_s : Conductivité hydraulique à saturation théorique du matériau neuf (m/s) ;
- dH/dL : Gradient hydraulique (sans unité) correspondant à la pente de la ligne d'eau. La règle de l'Homme de l'art est de prendre cette pente à 5%.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

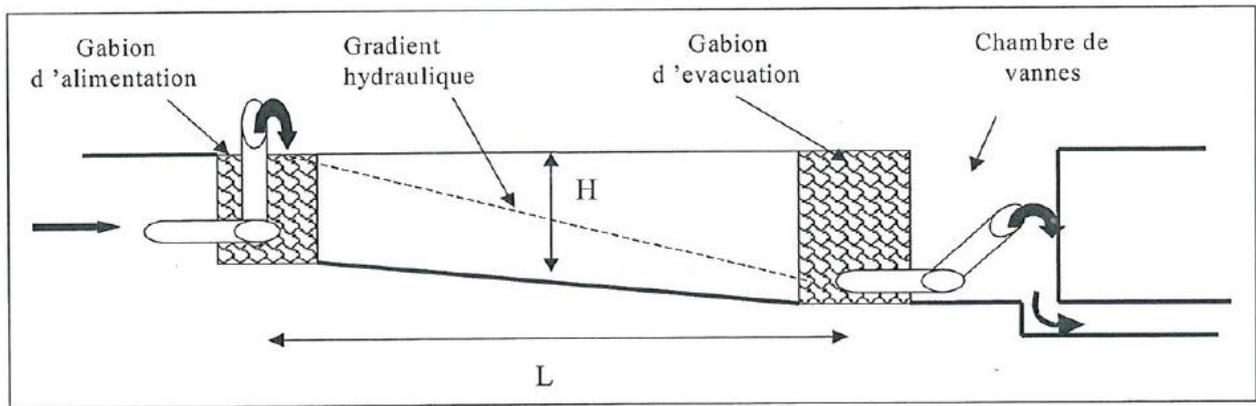


Figure 23 : Loi de Darcy appliquée aux lits d'écoulement horizontal

Les dimensionnements préconisés sont les suivants :

- La profondeur H du lit est à partir de 0,6 m de matériaux et la surface du lit est plate. La hauteur d'eau dans le massif filtrant est alors de l'ordre de 0,5 m ;
- La longueur L du lit est de l'ordre de 10 à 30 mètres ;
- Le ratio longueur L / largeur l est classiquement comprise entre 50% et 100% ;
- La pente du fond est comprise entre 5% et 10%. Cela signifie par exemple que pour un lit long de 15 m, il faudra une hauteur plus importante d'au moins 60 cm pour le gabion d'évacuation que pour le entre les niveaux bas du gabion d'alimentation ;
- La conductivité hydraulique Ks est liée à la granulométrie des matériaux du massif filtrant qui donne un Ks moyen de 1 à 3.10⁻³ m/s :
 - Gravier roulé : 20 à 30 mm : 1 m/s ;
 - Gravillons d'environ 5 mm : 10⁻² m/s ;
 - Sables : ½*10⁻³ m/s ;
 - Sables fins, limons : ½*10⁻⁵ m/s.

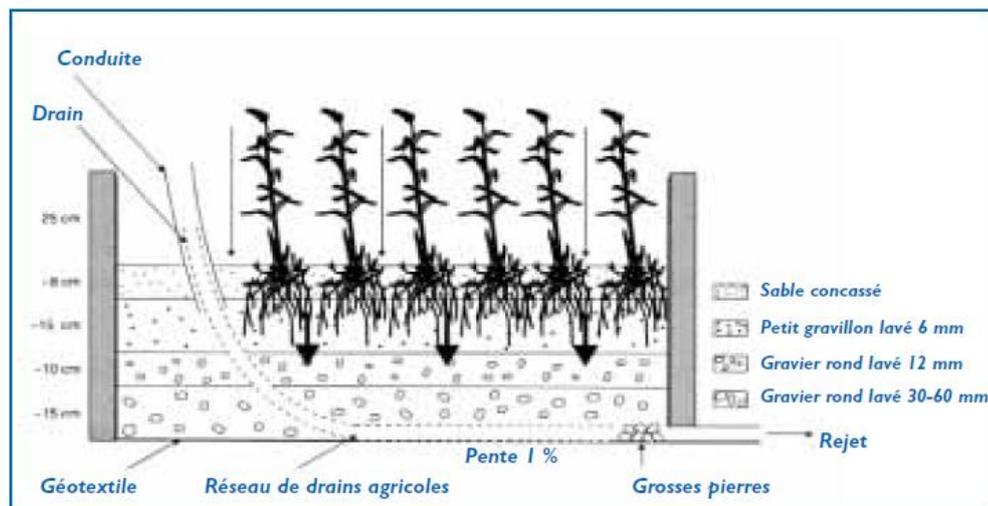


Figure 24 : Coupe des étages de filtres verticaux (Source : CEMAGREF)

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

Avant de calculer le dimensionnement, il faut déterminer les matériaux présents au sein du lit, ainsi que leur Ks. Une granulométrie de l'ordre de 4 mm est conseillée.

Mais le développement des micro-organismes responsables de la dégradation de polluants vont se développer. Cela entrainera la formation d'un film bactérien qui permettra de diminuer les perméabilités des matériaux. Cette imperméabilisation dont la vitesse dépend des apports en nutriments (présents parmi les polluants) de ces micro-organismes va améliorer la qualité de filtration. Mais paradoxalement, le débit hydrique sera diminué ; tout comme, par conséquent, la charge hydraulique pouvant être traitée.

Cette imperméabilisation va abaisser la conductivité hydrique d'un facteur de 10 à 100, voire plus si les eaux usées sont vraiment riches en nutriments.

Pour les filtres verticaux, comme pour le premier étage, la diminution de Ks n'est que de l'ordre de 10 à cause d'une moindre disponibilité de la matière organique qui s'écoule plus vite.

Dans la configuration des filtres à écoulement horizontal, les plantes ont un rôle capital puisqu'elles permettent de retrouver une certaine perméabilité grâce à laquelle les colmatages trop importants des filtres sont partiellement évités.

Le dimensionnement des lits horizontaux est parmi les plus approximatifs de toutes les techniques de phyto-épuration, même pour un apport fixe en charge hydraulique. Il faut donc prévoir beaucoup de lits horizontaux pour peu de lits alimentés. Le risque serait de voir les eaux infiltrées remonter à la surface et faire ruisseler la pollution dans la nature. C'est surtout pour éviter ce risque que des drains de récupération des eaux sont installés au fond des bassins ces lits horizontaux. Pour éviter le colmatage de ces drains, ceux-ci doivent être curés et inspectés régulièrement.

Les filtres horizontaux supportent quant à eux aisément de longues périodes de gel. Plusieurs facteurs permettent d'isoler thermiquement les eaux des températures extérieures : les roseaux faucardés maintenus à la surface et, pour les périodes critiques de gel, la couche d'air bloquée sous la glace formée à la surface du filtre. Les rendements risquent cependant d'être moins performants qu'en période estivale. Dans des climats extrêmes, il convient de prendre en compte un facteur de sécurité au niveau du dimensionnement.

Pour le choix du terrain, plus encore que pour les lits verticaux, les casiers doivent être imperméables (le coefficient de perméabilité K d'infiltration des eaux ne doit pas être supérieur 10^{-8} m/s). La dénivellation souhaitable du côté d'alimentation au côté d'évacuation des effluents du lit est de l'ordre de 1 à 2 m.

La variété la plus largement utilisée est le roseau *Phragmites australis* en raison de sa vitesse de croissance, de développement racinaire et de sa résistance aux conditions de saturation du sol. La plantation peut se faire à l'aide de graines, de jeunes pousses ou de

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

rhizomes avec une densité de l'ordre de 4 par m². La profondeur du filtre sera égale à la profondeur maximale de pénétration des racines. Cette profondeur est de 60 cm pour les phragmites (Marsteiner, 1996).

La maintenance de ces systèmes ne nécessite pas de qualification particulière, mais contraint l'exploitant à des passages fréquents et réguliers. Dans la gamme de population qui nous intéresse, il faut néanmoins penser à l'entretien des ouvrages de décantation primaire (évacuation des boues) et de l'étage de traitement biologique dans le cas où le filtre assurerait un traitement tertiaire.

Tâche	Fréquence	Observations
Entretien des ouvrages de prétraitement	1/semaine	Le but est de s'assurer de leur bon fonctionnement et qu'ils ne rejettent pas trop de MES pouvant provoquer un colmatage.
Ajustement du niveau de sortie	1/semaine	L'ajustement régulier du niveau d'eau de sortie permet d'éviter les écoulements de surface, Pour des stations importantes (> 500 m ³ /j), la vérification du niveau de sortie pourrait demander un passage quotidien. L'hydraulique de ce genre de procédé est un point clef. Il convient de vérifier la bonne distribution de l'effluent dans le filtre. Le curage du dispositif d'alimentation doit être prévu lors de la conception.
Végétation Désherbage	1 ^{ère} année	Lors de la première année (voire de la deuxième) il est utile de réaliser un désherbage manuel des adventices pour ne pas gêner le développement des roseaux (Kadlec R.H. et al, 2000). Cette opération peut également se faire en noyant légèrement la surface du filtre (10 cm) au détriment des rendements d'épuration (Cooper - 1996). Une fois la prédominance établie, cette opération n'est plus nécessaire.
Faucardage	inutile	L'absence d'écoulement de surface permet d'éviter le faucardage. Les végétaux morts ne gênent en rien l'hydraulique des filtres et de plus permettent d'isoler thermiquement le filtre.
Autres opérations d'entretien	Chaque visite	Tenir un cahier d'entretien notant toutes les tâches effectuées et les mesures de débit (canal débitmétrique, temps de fonctionnement des pompes), pour une bonne connaissance des flux. Cela permet en outre de produire des bilans de fonctionnement.

Tableau 07 : Inventaire de l'entretien d'un filtre horizontal

2.3.3. EFFICACITE

En termes de performance sur la DBO₅ pour des concentrations d'entrée variant de 50 à 200 mg/l, et pour un dimensionnement de 3 à 5 m² par EH, des systèmes à écoulement de type horizontal et garni de gravier obtiennent des rendements de l'ordre de 70 à 90 %. Ces concentrations sont cependant trop faibles pour être considérées comme représentatives d'une eau usée urbaine et il semble plus prudent de suivre l'exemple danois.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

En effet, 80 sites danois, dimensionnés à environ 10 m² par EH, obtiennent des rendements de l'ordre de 86 % sur la DBO₅ et sur les MES, de 37 % pour l'azote total, et de 27 % sur le phosphore total (Cooper - 1996).

D'une manière générale, en traitement secondaire, la nitrification est limitée mais la dénitrification (qui s'opère en milieu anaérobie) est très bonne. Les rendements sur le phosphore sont dépendants du type de sol utilisé, mais restent relativement faibles (environ 30% seulement). L'abattement des germes pathogènes tels que les coliformes et les entérocoques fécaux est de l'ordre de 2 à 4 UL.

Avantages :

- Faible consommation énergétique ;
- Pas de nuisance sonore et bonne intégration paysagère ;
- Pas besoin de qualification poussée pour l'entretien ;
- Bonne capacité de répondre aux variations de charges.

Inconvénients :

- Forte emprise au sol, abords compris (environ 10 m² / EH, équivalent à une lagune naturelle) ;
- Technique réservée aux stations à moins de 2000 EH. Cependant, avec une conception d'ouvrages hydrauliques spécifiques, il est possible de construire des installations allant jusqu'à 15 000 EH.

2.3.4. ETUDE DE CAS

L'étude porte sur le système hybride couplant un filtre planté à écoulement vertical et un filtre planté à écoulement horizontal à Oaklands Park (Royaume-Uni).

Le système d'Oaklands Park a été initialement conçu pour desservir 98 EH mais traite, en réalité, seulement les rejets correspondant à 65 EH. Le système que l'on peut observer dans le schéma ci-dessous présente deux étages de filtres verticaux, alimentés par intermittence, d'une surface totale de 63 m² suivis de deux étages de filtres horizontaux alimentés en continu et présentant une surface totale de 28 m². La surface totale utilisée est de seulement 1,4 m²/EH. Le schéma en coupe ci-après montre la structure des filtres verticaux utilisés dans les premier et deuxième étages.

Chaque filtre vertical est alimenté pendant 1 à 2 jours puis laissé au repos pendant 10 jours environ. Cela permet aux filtres de se dessécher entre les alimentations et d'empêcher le colmatage par la biomasse épuratrice. L'alimentation est commandée manuellement par des membres de la communauté. Les filtres horizontaux sont alimentés en continu.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

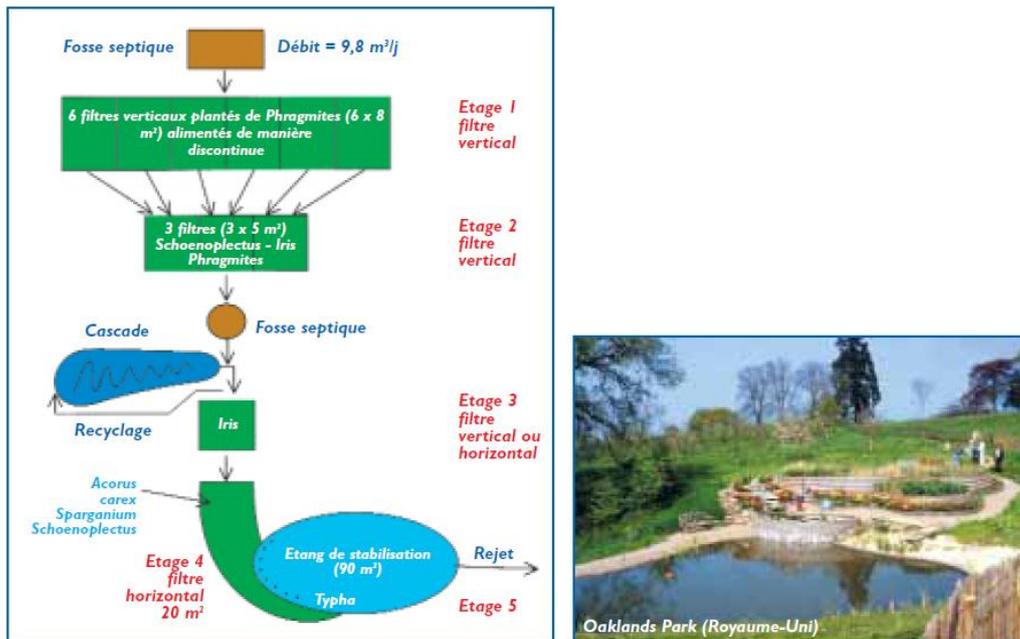


Figure 25 : Système mixte d'Oaklands Park (Source : Cooper et al, 1996)

Les performances épuratoires du système mixte d'Oaklands Park ont été calculées à partir de 47 mesures réalisées en août 1989 et mars 1990 est présentée ci-dessous (Bryan et Findlater / WRc - 1991, Cooper et al - 1996 et Cooper - 2001).

Paramètre, mg/litre	Influent	Etage I	Etage II	Etage III	Etage IV	Etage V
DBO ₅	285	57	14	15	7	11
Matières en suspension	169	53	17	11	9	21
NH ₄ N	50,5	29,2	14,0	15,4	11,1	8,1
NO ₃ N + NO ₂ N	1,7	10,2	22,5	10,0	7,2	2,3
Orthophosphate	22,7	22,7	16,9	14,5	11,9	11,2

- Etage I : 6 filtres verticaux utilisés par intermittence (rotation => 1 en service, 5 en repos)
- Etage II : 3 filtres verticaux utilisés par intermittence (rotation => 1 en service, 3 en repos)
- Etage III : 1 filtre horizontal
- Etage IV : 1 filtre horizontal
- Etage V : Etang de stabilisation

Tableau 08 : Performances du système mixte d'Oaklands Park

2.4. BASSINS DE PHYTO-EPURATION

2.4.1. PRINCIPES

Il existe différents types de techniques de phyto-épuration utilisant des bassins (lagunes de décantation, taillis courtes et très courtes rotations, bassins plantés d'hélophytes, lagunage avec microphytes, lagunage avec macrophytes, lagunage mixte, etc).

Les bassins de phyto-épuration sont classiquement utilisés pour épurer :

- Les plans d'eaux eutrophiées ;
- Les eaux industrielles provenant par exemple des boucheries, etc ;
- Les eaux de vannes et les eaux urbaines.

Les effluents traités pourront ensuite servir pour :

- Les besoins d'appoint d'une ville (arrosage, fontaines publiques, nettoyage, WC) ;
- La restitution aux nappes souterraines pour alimentation en eau potable ;
- L'irrigation agricole ;
- L'alimentation des plans d'eau ;
- L'usage industriel (refroidissement, climatisation) ;
- La réduction de l'eutrophisation (anoxie provoquée par une surabondance des nutriments pour les plantes aquatiques) des lacs.

La principale différence entre les bassins de phyto-épuration et les lits verticaux et horizontaux, c'est que les micro-organismes sont immergés sous la surface de l'eau. Il faut donc soit une aération artificielle (coûteuse, bruyante et inesthétique) ou des végétaux qui opèrent la photosynthèse pour apporter l'oxygène nécessaire à maintenir les conditions aérobies.

C'est la raison pour laquelle ce sont des hélophytes (plantes aquatiques, pouvant vivre en milieu humide) pour les macrophytes (plantes visibles à l'œil nu) ou des microphytes (par opposition à macrophytes) immergées, comme des algues, qui sont utilisés pour les techniques phyto-épuratives.

Il existe deux catégories de bassins plantés : d'un côté les bassins épuratifs imperméabilisés, parmi lesquels il y a les bassins de régulation des charges hydrauliques et de l'autre côté les bassins recueillant des effluents suffisamment épurés et qui ne sont pas nécessairement imperméabilisés. Cette deuxième catégorie de bassins est appelée jardin de finition.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

2.4.2. TAILLIS DE COURTE ROTATION

Les taillis de courte rotation, TCR (associés aux taillis de très courte rotation, TTCR), sont un traitement épuratoire suivant généralement une épuration par lit vertical.

L'unité de taillis courte rotation a pour principales fonctions:

- Un traitement de finition des germes avec un abattement complémentaire de 2 à 3 UL (division de la concentration en germes par 100 voire 1000) ;
- Un traitement de finition des nutriments notamment les nitrates et les phosphates, grâce aux saules, plantes les plus utilisées pour cette technique, qui permettent un traitement complémentaire après percolation des effluents au travers de lits verticaux ;
- L'évapotranspiration, permettant de tendre vers le zéro rejet d'effluents en été. C'est la raison principale de l'installation de ce système par AR ARCHITECTES à Thoiry.

Les TTCR sont souvent préférés aux TCR pour trois raisons :

- Un besoin d'espace moins important (de l'ordre de 5 m² par habitant pour les deux méthodes) ;
- Un biotope plus dense et donc plus favorable au développement de la biodiversité ;
- Une récolte de bois utilisé pour le bois-énergie plus fréquente (de l'ordre de 2 à 4 ans pour les TTCR contre 4 à 10 ans pour les TCR).

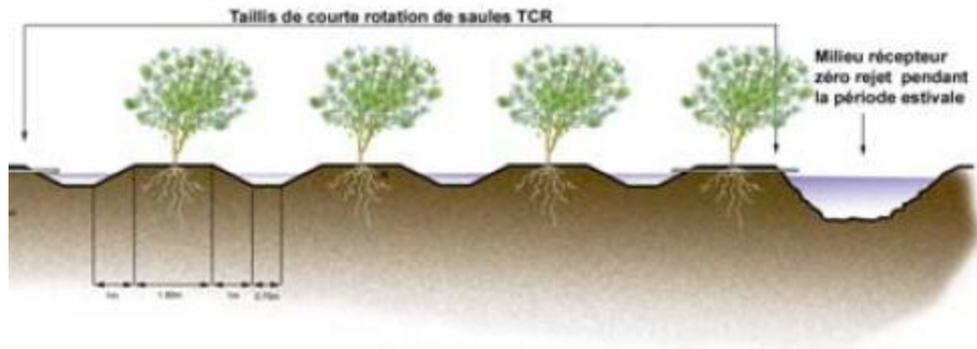


Figure 26 : Coupe verticale de Taillis de courte rotation

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

2.4.3. BASSINS PLANTES ET AUTRES LAGUNES

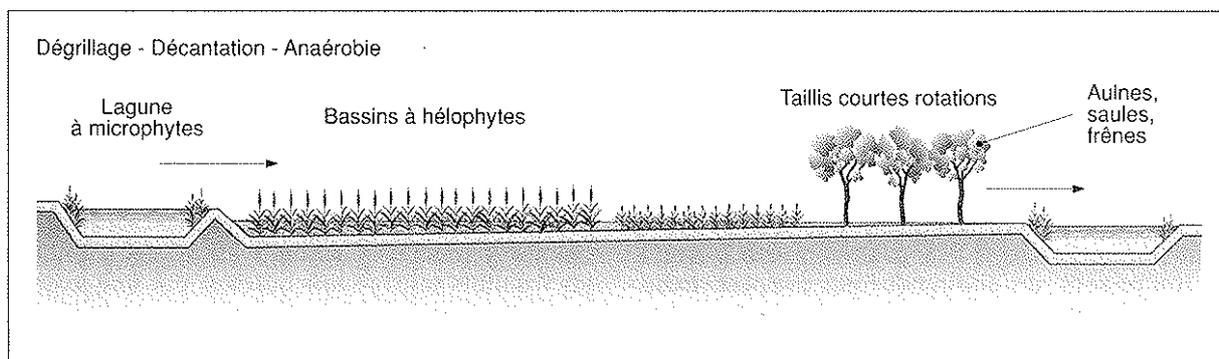


Figure 27 : Schéma d'une filière utilisant le lagunage à microphytes, le bassin planté d'hélophytes, les TCR et le jardin de finition

Les techniques de phyto-épuration utilisant les bassins plantés et les autres techniques de lagunage ont commencé à se développer en France à partir des années 1980.

Outre les bassins plantés, avec un peu moins d'1 mètre de hauteur d'eau et 2 à 5 m² par EH, (ou lagunage à macrophytes), les techniques de lagunage peuvent utiliser les microphytes (algues, daphnies, etc...) qui ne disposent pas de la même qualité paysagère mais qui sont des techniques plus efficaces dans l'abattement des polluants organiques et microbiens.

Il existe également le lagunage mixte faisant cohabiter les microphytes et les macrophytes ainsi que les lagunages non phyto-épuratifs (soit le lagunage aéré soit le lagunage profond avec 3 à 4 mètres de hauteur d'eau, qui traite les effluents par fermentation dans des conditions anaérobies).

Les bassins plantés à hélophytes utilisent des plantes aquatiques, dont le milieu naturel se rapproche des mangroves (par exemple, les nymphéas, etc). Les TCR sont des bassins plantés à hélophytes, mais ceux-ci sont particuliers étant donné que leur rôle principal n'est que l'élimination de la pollution organique.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com



Figure 28 : Photographies d'iris et de nénuphars des bassins plantés sur la Cité de l'Ile à Nanterre

Les lagunes à macrophytes reproduisent des zones humides naturelles comportant une tranche d'eau libre, tout en essayant de mettre en valeur les intérêts des écosystèmes naturels. Elles sont peu utilisées en Europe, mais sont souvent réalisées pour des traitements tertiaires à la suite de lagunage naturel, de lagunes facultatives ou de lagunage aéré aux Etats-Unis. Cette filière est généralement utilisée en vue d'améliorer le traitement (sur les paramètres DBO₅ ou MES) ou de l'affiner (nutriments, métaux,...). Cependant l'utilisation d'une lagune de finition à microphytes permettra d'obtenir de meilleurs rendements et sera plus commode d'entretien.

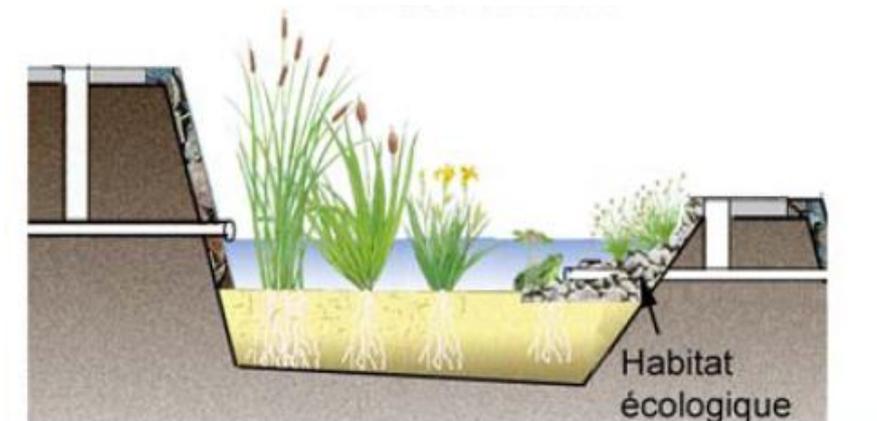


Figure 29 : Schéma de principe du bassin planté de l'irisaie de Nanterre

Avant le lagunage, un dégrillage doit être installé avant traitement sur les grosses installations. Pour les installations inférieures à 500 EH, il est possible d'utiliser une cloison siphonoïde (dégraisseur rustique) immergée sur 30 à 40 cm, permettant de retenir les flottants, à l'entrée du premier bassin, comme sur un lit vertical.

Les différentes techniques de lagunage peuvent être utilisées soit pour initier une épuration extensive des effluents soit, plus classiquement, pour finir une épuration. Plusieurs bassins peuvent se succéder et utiliser des techniques de lagunage différentes.



Figure 30 : Photographie d'une zone humide plantée pour le traitement des eaux pluviales d'Auray

L'épuration est assurée grâce à un long temps de séjour, dans plusieurs bassins étanches disposés en série. Le nombre de bassins le plus communément rencontré est de 3. Cependant, utiliser une configuration avec 4 voire 6 bassins permet d'avoir une désinfection plus poussée.

Le mécanisme de base sur lequel repose le lagunage naturel est la photosynthèse. La tranche d'eau supérieure des bassins est exposée à la lumière. Ceci permet l'existence d'algues qui produisent l'oxygène nécessaire au développement et maintien des bactéries aérobies. Ces bactéries sont responsables de la dégradation de la matière organique.

Le gaz carbonique formé par les bactéries, ainsi que les sels minéraux contenus dans les eaux usées, permettent aux algues et aux plantes héliophytes de se multiplier. Il y a ainsi prolifération de deux populations interdépendantes : les bactéries et les algues planctoniques, également dénommées "microphytes". Ce cycle s'auto-entretient tant que le système reçoit de l'énergie solaire et de la matière organique.

En fond de bassin, où la lumière ne pénètre pas, ce sont des bactéries anaérobies qui dégradent les sédiments issus de la décantation de la matière organique. Un dégagement de gaz carbonique et de méthane se produit à ce niveau.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

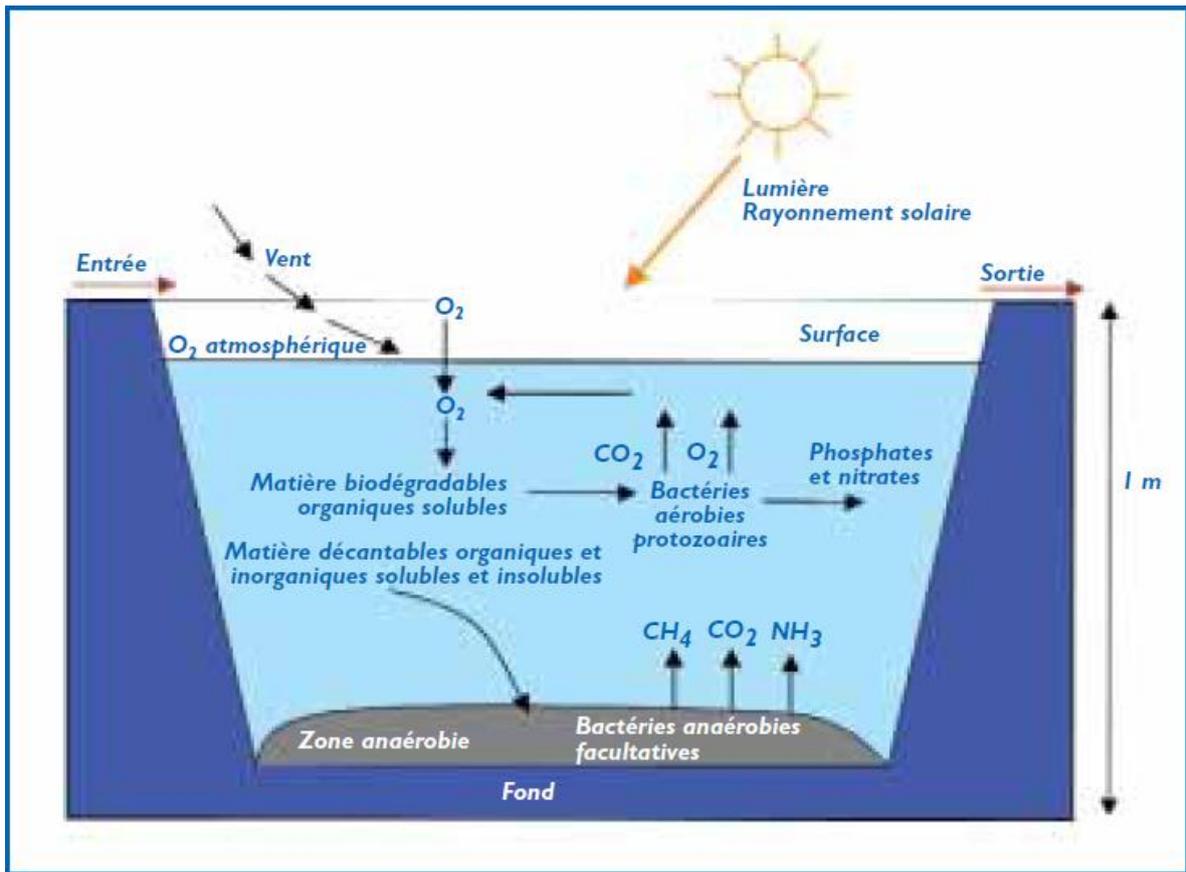


Figure 31 : Schéma de principe d'un bassin de lagunage naturel (Agences de l'Eau, CTGREF)

Un lagunage naturel est composé, le plus souvent, de plusieurs bassins étanches ou "lagunes à microphytes", fonctionnant en série.

L'installation de trois lagunes est fréquente et permet d'assurer un bon niveau de fiabilité de fonctionnement pour l'élimination de la matière organique. Les performances les plus élevées, en ce qui concerne la désinfection, ne sont atteintes qu'avec une compartimentation plus grande (jusqu'à six lagunes en série).

Le rôle respectif des différents bassins est le suivant :

- le premier permet, avant tout, l'abattement de la charge polluante carbonée ;
- le second permet l'abattement de l'azote et du phosphore ;
- le troisième affine le traitement et fiabilise le système, en cas de dysfonctionnement d'un bassin amont ou lors d'une opération d'entretien.

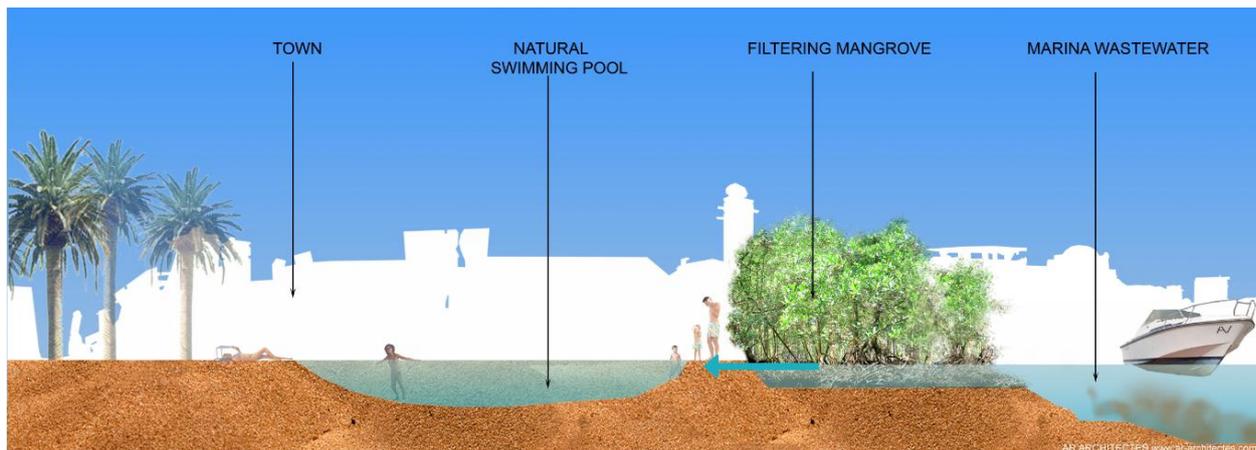


Figure 32 : Schéma de filtration de l'eau d'une lagune vers un bassin de finition à Sir Ban Yas

Pour passer d'un bassin à l'autre, les effluents peuvent être drainés, mais il est également possible de les faire percoler à travers un massif filtrant afin de les épurer d'avantage (c'est le cas à Sir Ban Yas).

Afin d'éviter le colmatage par les boues de ces massifs filtrants, il est important d'enlever ces boues régulièrement (de l'ordre d'une fois par décennie).

L'eau qui ressort des bassins de finition est censée être potable et peut être s'infiltrer dans les sols sans risque majeur pour l'environnement.

2.4.4. DIMENSIONNEMENT

Espace nécessaire

Le choix du terrain est conditionné par l'importance de l'emprise au sol du système de lagunes. La surface du lagunage comprend les plans d'eau, ainsi que les abords qui doivent être conçus pour permettre un entretien facile. A titre d'exemple, il faut compter environ 15 m² par EH d'emprise globale pour construire les 4 400 m² de bassins nécessaire pour traiter les eaux usées émises par 400 EH. Un terrain de 0,6 hectare est donc nécessaire.

Localisation

L'ouvrage doit être situé en un point bas, à un emplacement où les vents dominants contribuent à aérer la tranche d'eau superficielle. Il ne doit pas y avoir d'arbre à moins de 10 mètres, les racines pouvant engendrer des cheminements préférentiels au niveau des

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
 54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
 N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

digues. Par ailleurs, la chute de feuilles dans les bassins peut générer une surcharge organique ainsi qu'un risque d'obstruction des ouvrages de communication.

Le terrain doit être de type limono-argileux. Le sous-sol ne doit surtout pas être karstique ou fissuré. Cependant, si un sol plus imperméable est disponible dans une plus haute position, l'emploi d'une pompe peut être envisagé.

Topographie

Le terrain doit être choisi de manière à ce qu'il puisse y avoir un écoulement gravitaire jusqu'au milieu récepteur. Un emplacement engendrant un minimum de travaux de terrassement doit être recherché. Enfin, les terrains exagérément pentus doivent être proscrits en raison des risques d'éboulement, d'érosion et d'alimentation par le bassin versant (un bassin versant trop pentu engendrera une très forte et subite augmentation de débit des eaux pluviales suite à un événement pluvieux).

Volumes d'eau à traiter

Les volumes à traiter sont, à un même instant, totalement différents des volumes évacués vers le milieu naturel. Afin de s'assurer du bon fonctionnement hydraulique des ouvrages (et de détecter les éventuelles introductions d'eaux de nappe ou, à l'inverse, des fuites), il convient donc de toujours pouvoir comparer les débits amont et aval par l'intermédiaire de dispositifs appropriés (débitmètres ou temps de fonctionnement des pompes).

Pour une filière d'épuration 100% lagunage, la conception de la première lagune, la valeur de 6m² par EH est utilisée avec succès, ce qui correspond à une charge surfacique nominale de l'ordre de 8,3 g DBO₅ par m² et par jour.

Pour les installations à population variable, et par temps chaud et ensoleillé, le dimensionnement peut être effectué en se basant sur la fréquentation maximale du mois de pointe, ce qui donne, pour une surface de 6 m² et une profondeur de 1 m, un temps de séjour des effluents dans un bassin de l'ordre de 2 jours minimum.

Conception

Pour les lagunes à microphytes, la forme de la lagune ne doit pas favoriser la croissance bactérienne aux dépens de celle des algues. L'équilibre entre les deux doit être respecté afin que l'apport en oxygène reste suffisant. Pour ce faire, on privilégiera une forme du bassin ramassée par rapport à une forme trop longitudinale. Le ratio L/l inférieure à 3 est utilisé en France.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

La profondeur du bassin doit permettre :

- d'éviter la pousse de végétaux supérieurs qui se nourriraient des mêmes nutriments ;
- la pénétration de la lumière et l'oxygénation d'une fraction maximale de volume ;

La hauteur d'eau doit donc être de 1 mètre ($\pm 0,2$ m). Cependant, afin de faciliter le curage du cône d'accumulation des dépôts qui se développent habituellement au niveau du point d'alimentation, une zone de dépression peut être réalisée. Cette zone, d'une hauteur supplémentaire de 1 mètre maximum, peut occuper quelques dizaines de m². Elle doit toujours être accessible depuis la berge ou depuis une passerelle construite à cet effet.

Les deux bassins en aval doivent être de dimensions voisines et la surface totale des deux plans d'eau doit être égale à 5 m² par EH.

La hauteur d'eau doit être de 1 mètre ($\pm 0,2$ m). Leur forme générale peut être assez variable en fonction notamment des contraintes topographiques et des règles à respecter afin d'obtenir une bonne intégration paysagère.

Les suivis de débit d'entrée d'eau, de sortie des effluents traités, de la météorologie, de l'état des écosystèmes en présence ainsi que des paramètres physico-chimiques et microbiens sont la clé d'une bonne gestion des bassins de lagunage (voir Annexe 2 : Tableau de suivi pour une bonne gestion du lagunage).

Le système de lagunages à macrophytes est sensible aux conditions de température de l'eau. Les cinétiques de dégradation sont amoindries par une baisse de température. Concernant les lagunes à microphytes, la photosynthèse peut continuer à avoir lieu sous 1 ou 2 cm de glace.

Dans le dimensionnement des lagunes à macrophytes, la constante de dégradation est dépendante de la température. Cependant, la variabilité des débits et des concentrations en fonction des saisons rend difficile l'interprétation de l'impact de la température. Le taux d'abattement de l'azote global dépend clairement des variations de températures, c'est moins évident pour la DBO₅ et l'abattement des MES est clairement indépendant de la température.

Le temps de séjour dans les bassins varie en fonction des conditions climatiques et donc indirectement, affecte les rendements attendus. Les fortes évapotranspirations rencontrées pendant les saisons chaudes peuvent augmenter considérablement le temps de séjour et, par voie de conséquence, le rendement. Le gel d'une tranche d'eau supérieure en hiver, au contraire, réduit le temps de séjour.

L'implantation de lagunes aérées dans des zones de climat froid extrême est à éviter.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

La mise en œuvre

La pente des digues étanchées naturellement doit respecter un rapport H/l d'au moins 1/2,5 afin :

- de limiter l'action érosive du batillage ;
- de faciliter l'entretien courant ;
- de permettre aux engins de curage d'accéder à tous les bassins.

Afin de prévenir l'érosion par le batillage et éventuellement les dégradations dues aux rongeurs, il est utile d'engazonner les berges avant mise en eau ou d'employer des dalles autoblocantes, des géogrilles ou tout autre matériau de protection des berges.

Les digues doivent être érigées par compactages successifs de tranches de 15 à 20 cm, afin d'assurer un tassement homogène jusqu'au "cœur du remblai".

Le compactage du radier doit être réalisé après celui des digues.

La pose d'une géomembrane est possible mais présente l'inconvénient d'accroître le coût d'investissement de l'ouvrage. De toute façon, une imperméabilité avec un coefficient Ks de 10^{-8} m/s est nécessaire.

Dans cette situation, la pente des digues pourra être plus forte (jusqu'à 1/1,5), l'emprise totale des ouvrages sera ainsi plus faible.

Il faut prévoir des liaisons siphonnées entre les bassins afin de bloquer les hydrocarbures et les lentilles d'eau.

Il est préférable d'installer un by-pass fixe sur chaque bassin afin de faciliter les opérations de vidange et curage.

La dernière étape de la réalisation est la mise en eau claire très rapide des différents bassins afin de pérenniser la perméabilité obtenue en évitant tout risque de dessèchement de l'ouvrage, de vérifier l'étanchéité et de favoriser la mise en place de l'écosystème.

Des mauvaises odeurs peuvent apparaître aux changements de saison (liées au phénomène d'anaérobiose) si l'effluent présent dans la première lagune est trop concentré. En effet, trop de nutriments vont provoquer une eutrophisation responsable du manque de O₂ dans le milieu qui permettra le développement des micro-organismes anaérobies qui se développent grâce à l'énergie issue de la fermentation de la matière organique et cette même fermentation est responsable des nuisances olfactives. Il est possible de remédier à cette situation en faisant recirculer de l'eau du dernier bassin ou en diluant l'effluent à l'aide d'un dispositif de chasse sur le réseau.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

L'entretien des lagunes est complexe :

Tâche	Fréquence	Observations
Surveillance générale - points contrôlés : <ul style="list-style-type: none"> ● présence de rongeurs ; ● obstruction des ouvrages de communication ; ● développement des lentilles d'eau ; ● bon écoulement de l'eau ; ● absence de flottants ; ● couleur de l'eau ; ● absence d'odeurs ; ● état des digues. 	1/semaine	Cette vérification doit se faire par un parcours de l'ensemble des digues, méthode qui a l'avantage de dissuader l'installation des rongeurs. Par ailleurs, les méthodes de lutte contre les lentilles d'eau sont soit préventives par la sédentarisation de canards soit curatives par l'enlèvement de végétaux (par madrier flottant par exemple).
Entretien des ouvrages de prétraitement	1/semaine	Il s'agit d'empêcher la mise en charge du réseau ou le by-pass des effluents et d'éviter les mauvaises odeurs;
Fauchage des digues et des berges et de la ceinture végétale (ou broutage par moutons)	2 à 4/an	L'enjeu est de maintenir l'accès aux plans d'eau, de limiter l'installation de rongeurs et le développement de larves d'insectes et de contrôler l'état des berges.
Curage partiel du cône de sédimentation (entrée du premier bassin)	1 à 2/an	Doit être réalisé par pompage liquide.
Curage des bassins	Tous les 5 à 10 ans, selon la charge réellement reçue pour le premier bassin, tous les 20 ans pour les bassins suivants	Doit être mis en œuvre lorsque le volume de boue atteint 30% du volume du bassin. Deux méthodes de curage sont habituellement utilisées : <ul style="list-style-type: none"> ● par engins de chantier, après vidange du bassin. Ce qui implique la présence d'un by-pass fixe sur chaque bassin ; ● par pompage, sans vidange préalable, dit "vidange sous eau".

Tableau 09 : Exploitation des lagunes

L'analyse de suivi des lagunes dure minimum 2 ans et coûte environ 300 000 € HT depuis l'étude de faisabilité jusqu'au suivi de la zone humide végétalisée.

2.4.5. ABATTEMENT DES POLLUANTS

Les rendements, calculés sur les flux de matière organique, atteignent en moyenne près de 70 % (plus de 85 % en ne prenant en compte que la DCO filtrée en sortie, brute en entrée), ce qui correspond à une concentration en DCO filtrée de 125 mg/l. De plus, le débit, et donc le flux rejeté, est souvent réduit en été (-50 %) par l'évapotranspiration.

Les concentrations en azote total au niveau du rejet sont très faibles en été, mais peuvent atteindre plusieurs dizaines de mg/l en hiver.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

L'abattement du phosphore est remarquable les premières années ($\geq 60\%$), puis diminue pour atteindre un rendement nul au bout de 20 ans environ. Cette baisse est due à un relargage du phosphore depuis la vase du fond. Les conditions initiales seront restaurées par le curage des bassins (lorsque le milieu est sensible au phosphore, le curage doit avoir lieu au terme d'un délai plus court que les 10-12 ans généralement estimés et sur l'ensemble des lagunes).

La désinfection est importante, particulièrement en été (abattement supérieur à 4 UL). Cette performance est liée au long temps de séjour de l'effluent (de l'ordre de 70 jours pour un traitement complet), à la compétition biologique et aux ultraviolets solaires.

Avantages :

- Pas besoin d'énergie en cas de topographie favorable ;
- Peu d'entretien ;
- Elimine les nutriments azotés et phosphorés également en hiver ;
- Elimine les germes pathogènes également en été ;
- Adapté aux fortes variations de charges hydrauliques ;
- Pas besoin de construction « en dur » : il y a donc moins de contraintes en génie civil ;
- Bonne intégration paysagère (visuelle et sonore) ;
- Boues de curages bien stabilisées (hormis celles présentes en tête du premier bassin).

Inconvénients :

- Forte emprise au sol (10 à 15 m² / EH) ;
- Coût d'investissement dépendant de la nature du sous-sol ;
- Faible taux d'abattement des matières organiques et des concentrations en micro-organismes ;
- Qualité des rejets variables selon les saisons ;

2.4.6. ETUDE DE CAS

Le lagunage naturel de Vauciennes, dans l'Oise (60), comporte trois bassins en série. La succession des bassins est la suivante :

- une lagune à microphytes ;
- une lagune à macrophytes ;
- une lagune mixte.

Les performances de cette installation ont été suivies très précisément d'octobre 1981 à juillet 1991 par le SATESE de l'Oise et le CEMAGREF, à la demande de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (Schetrite S. - 1994).

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

Le dimensionnement est caractérisé par les paramètres suivants :

- capacité nominale : 1000 équivalent habitants ;
- débits journaliers : 150 m³/jour ;
- débit de pointe : 24,5 m³/h ;
- charge journalière : 54 kg DBO₅ / jour.

Le réseau collectant les eaux usées est, d'une part, pseudo-séparatif (équipé de déversoirs d'orages) et, d'autre part, séparatif.

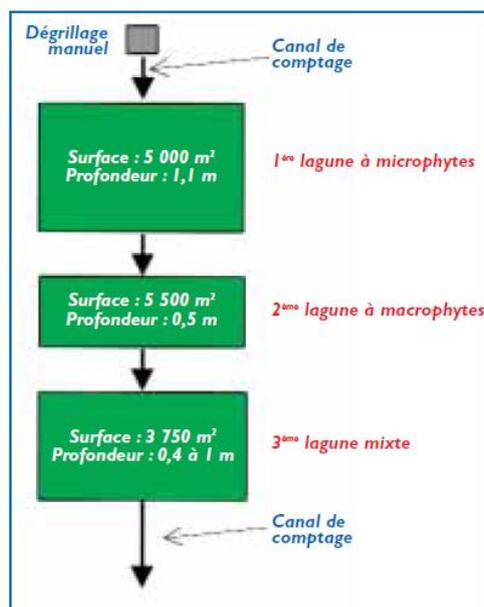


Figure 33 : Schéma du système de lagunage des effluents de Vauciennes

Les performances, calculées sur des valeurs moyennes issues de 11 campagnes de mesures réalisées entre octobre 1981 et juillet 1991, sont présentées ci-dessous.

	DBO ₅ (mg/l)	DCO (mg/l)	MES (mg/l)	Azote Kjedhal (mg/l)	NH ₄ (mg/l)	Phosphore total (mg/l)
Concentrations moyennes des eaux brutes	175	546	302	55	38	20
Concentrations moyennes de l'effluent de sortie	- *	83,6	34,7	13,9	9	4,6

* le paramètre de la DBO₅ a été faussé par des plantes intrusives

Tableau 10 : Performances épuratives des lagunes de Vauciennes

Après la mise en eau, les rendements moyens sur la DCO et les MES s'accroissent progressivement et se maintiennent dans une fourchette relativement stable au-delà de la 3ème campagne de mesures, soit entre 60 et 90 % et 70 à 95 % pour les MES. Les mauvaises performances des premiers mois ont pour origine le très faible taux de charge des installations (15 à 20 % seulement à la 3ème campagne).

Les rendements sur l'azote global mesurés en période estivale sont remarquablement stables quelle que soit la charge à l'entrée (rendement = 70 %). On n'observe pas de dégradation du traitement pour cette période, pendant les 10 années de suivi.

En hiver, les rendements sur l'azote global sont en décroissance continue au fil des années (60 à 10 %). Les concentrations en sortie sont fonction de la charge admise par les installations. Toutefois, le lagunage ne reçoit encore en janvier 1990, que 25 % de sa charge nominale. Pendant cette saison, les rendements d'élimination en azote global sont en moyenne de 50 % pour des installations généralement soumises à des charges plus importantes. On peut donc supposer que le traitement de la charge en azote se dégrade progressivement durant les mois d'hiver.

Les rendements d'élimination du phosphore total décroissent régulièrement depuis la première campagne de mesure.

Ils sont passés de 75 % en 1981 à 30 % en janvier 1990 et cela indépendamment de la saison. Néanmoins, lors de la dernière campagne de mesures, en juillet 1991, les rendements ont semblé exceptionnellement performants (81 % en juillet 1991 contre 32 % en janvier 1990). L'hypothèse la plus vraisemblable pour expliquer cette subite remontée des performances est liée à l'apparition récente d'une couverture de lentilles d'eau qui capturerait en phase de croissance une grande quantité du phosphore présent dans l'eau et provoquerait la mortalité et la décantation du phytoplancton par manque de lumière.

En ce qui concerne les aspects bactériologiques, les abattements moyens se situent tous au niveau de 4 UL (unités log) et ne marquent pas de tendances significatives à diminuer lorsque l'ensoleillement décroît.

Mais le lagunage en zone plantée humide, c'est un outil très utilisé par AR ARCHITECTES qui l'utilise comme avec des bassins d'infiltration à Marines (95) pour les effluents venant de la station d'épuration de la Commune.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

3. PHYTO-EPURATION DES BOUES D'EPURATION ET DES SOLS

3.1. PHYTO-EPURATION DES BOUES D'EPURATION

3.1.1. GENERALITES ET OBJECTIFS

En 2008 en France, une fois les boues d'épuration séchées, c'est environ 1,3 millions de tonnes de matières sèches (MS) qui sont produites (dont 94% de déjections animales).

Cela correspond à environ 15 kg par an et par équivalent habitant (EH) :

station de 3 000 EH	station de 50 000 EH	station de 200 000 EH
50 t boues MS/an	750 t boues MS/an	3000 t boues MS/an
30 ha au total	500 ha au total	2000 ha au total

Tableau 11 : Equivalence entre les EH, les surfaces demandées et les boues produites en France

Les objectifs de la phyto-épuration des boues d'épuration par les filières classiques sont :

- Réduire le pouvoir fermentescible (pour stabiliser les boues et limiter les odeurs);
- Réduire le volume par assèchement (pour diminuer le poids des lixiviats lors du transport des boues) ;
- Réduire la concentration en polluants chimiques et microbiologiques afin de pouvoir valoriser au mieux les boues produites.

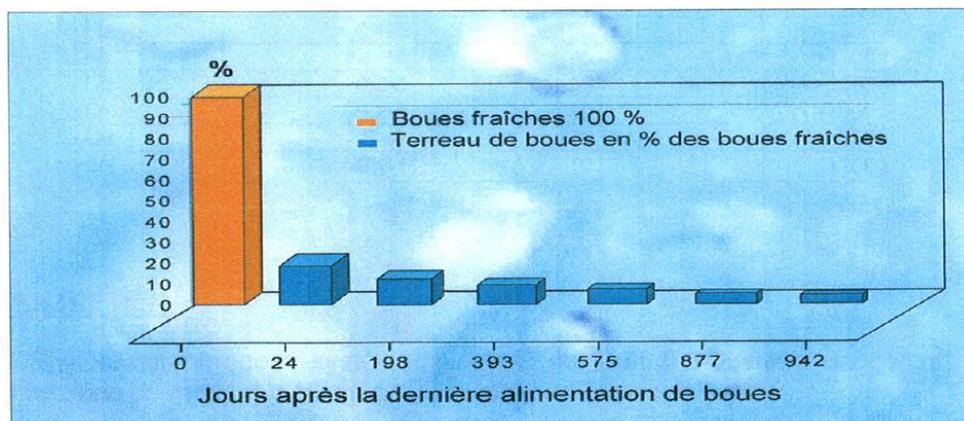


Figure 34 : Histogramme de l'évolution de la siccité des boues

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

La siccité des boues fraîches qui affluent vers les massifs de filtration, c'est-à-dire le volume de matières sèches (MS) divisé par le volume total des boues est de l'ordre de moins de 1 à moins de 10%. Les MVS (matières volatiles solubles) représentent quant à elles entre un tiers et deux tiers de la masse totale des MS.

Au sein des massifs filtrants, les boues sont épurées et minéralisées. La siccité augmente à la vitesse donnée par la figure 34 ci-dessus.

La composition de la MS n'évolue quasiment pas, comme le confirme le tableau ci-dessous :

	Texture	Matières organiques	C/N	P ₂ O ₅	N Kj	NH ₄	Azote total	Ca	Mg	K	pH
Boues en entrée	aucune	90	7	4/5	7	0,5	7/8	3,7	0,3	0,3	7
Terreau 3 ans	10 %	80	10	3/4			6	3-4	0,6	0,1-0,2	8
Matériau après mélange des roseaux fauchés	Bonne	60/70	12	3/4	5 – 6,5	0,4-0,6	5	3 – 4	0,6	0,1-0,2	7/8

Tableau 12 : Contenu de la matière sèche (pourcentages en masse)

Le choix des filières de traitement des boues d'épuration dépend :

- De l'origine des boues ;
- De la composition des boues ;
- De la possibilité de traiter (hygiénisation possible, voir arrêté du 08 octobre 1998 à propos de l'épandage) ;
- Des facteurs économiques (disponibilité et coût des terrains, dimensionnement, main d'œuvre, transport, réactifs (chaux), etc ;
- Des contraintes environnementales et administratives locales.

Mais les pour les boues liquides issues des stations classiques d'épuration, les massifs filtrants avec lits plantés de roseaux représentent l'un des meilleurs choix.

3.1.2. FONCTIONNEMENT

Les rôles des lits étanches plantés de roseaux sont à la fois :

- Le stockage des boues ;
- La filtration des effluents ;
- L'épaississement des boues par phyto-déshydratation ;
- Une parfaite traçabilité des stockages et gestion éventuelle des accidents

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

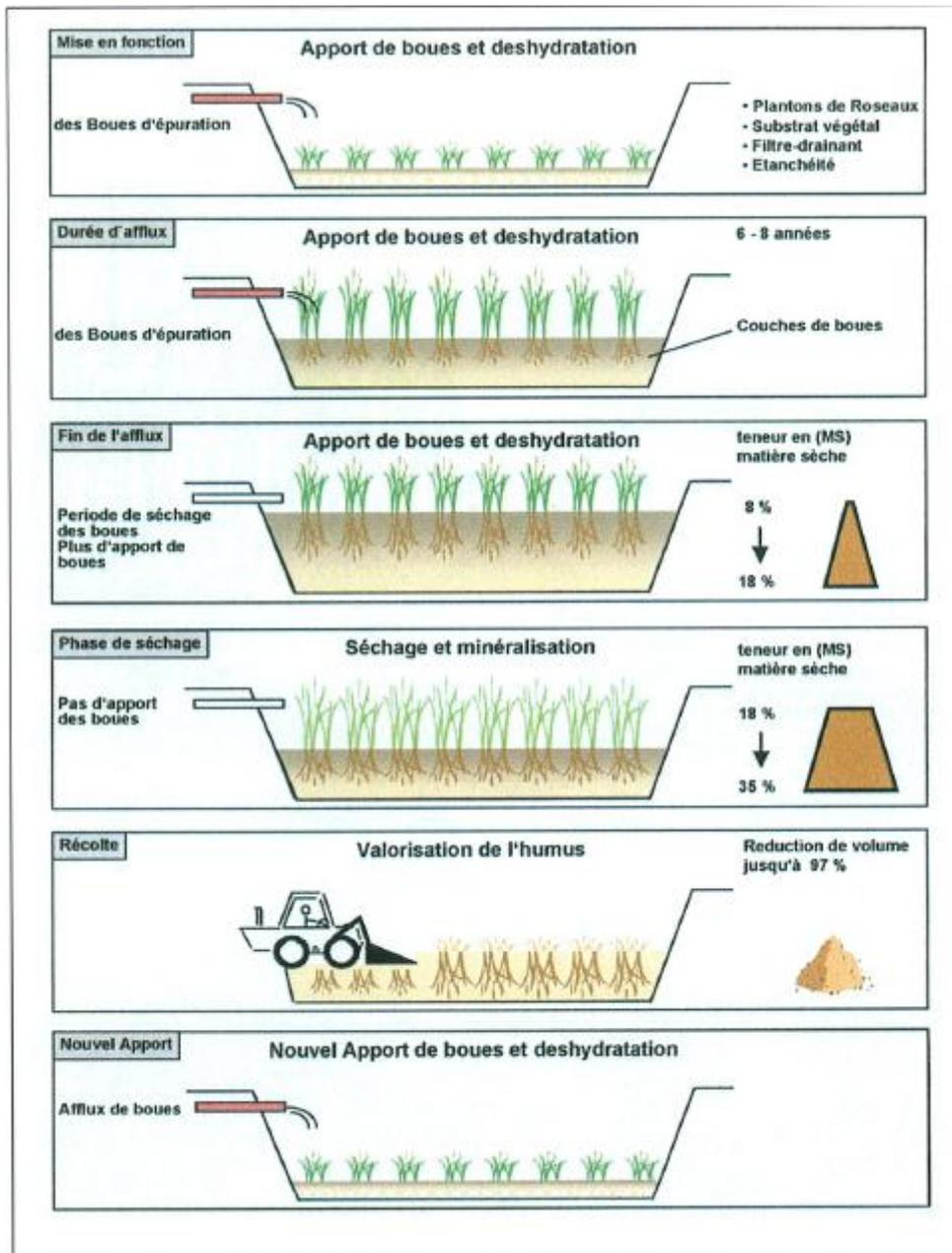


Figure 35 : Illustration des étapes du traitement par phyto-épuration des boues d'épuration

Afin d'assurer l'auto-curage des réseaux d'alimentation des massifs filtrants, l'arrivée des eaux se fait à une vitesse minimum de 0,8 m/s.

Les massifs filtrants sont ensuite conçus comme les lits verticaux : le principe de fonctionnement est le même, à la différence près que la charge hydraulique est bien moindre.

Les lits à macrophytes sont des ouvrages en béton ou constitués d'une membrane étanche de 2,5 m de profondeur. Dans la partie inférieure, le massif filtrant, non colmatant, est composé de couches superposées de galets, graviers et sable grossier. Les roseaux sont plantés à raison de 4 à 9 plants par m². Après une période d'enracinement, les boues liquides issues du bassin biologique sont introduites par le haut de l'ouvrage de façon la plus uniforme possible. Le développement des roseaux crée un réseau de tiges et de racines (rhizomes) qui favorisent l'écoulement des eaux interstitielles des boues jusqu'au système de drainage. Cette eau est ensuite recyclée en tête de la station d'épuration. La présence de roseaux permet l'épandage de couches successives de boues. Les périodes de reprise des boues se trouvent ainsi plus espacées. Les boues peuvent être stockées sur l'ensemble des lits présents sur le site de la station d'épuration pendant 5 années avant la première intervention. Ensuite, le curage sera plus régulier (un à deux ans). Ce décalage s'explique par le fait que ce type de traitement est constitué de plusieurs casiers, en fonction de la capacité de la station d'épuration, alimentés avec un différé d'un an.

C'est un procédé de traitement des boues de station d'épuration qui associe en un seul ouvrage les fonctions d'épaississement, de minéralisation et de stockage. Le massif filtrant est constitué de couches successives de sable de granulométrie adapté, dans lequel sont plantés directement les roseaux : en effet, le choix des matériaux filtrants (nature et qualité) est très important. Il faut proscrire tout ce qui peut conduire à un colmatage et qui limiterait ainsi les performances hydrauliques du dispositif. Un radier étanche assure la collecte des percolats (ou lixiviats), qui sont renvoyés en tête de station d'épuration.

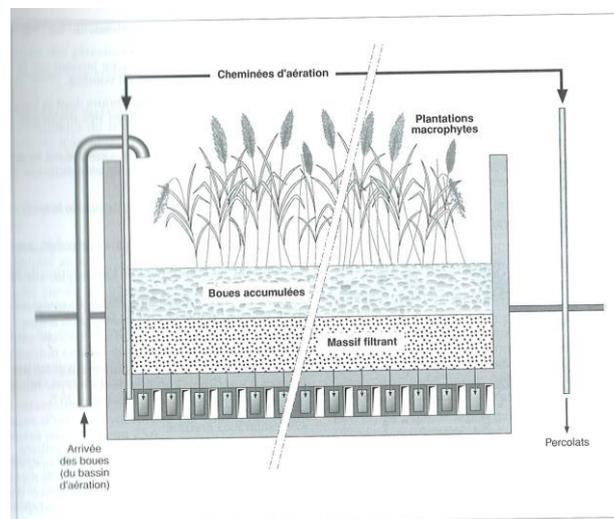


Figure 36 : Coupe du massif filtrant pour boues d'épuration (doc. Saur)

L'aération est un point sensible du procédé. C'est elle qui garantit la bonne pousse des roseaux et le maintien des conditions d'oxydoréduction satisfaisantes dans les boues accumulées. C'est aussi un facteur primordial pour garantir l'obtention de percolats aérobies.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

La ventilation est assurée par l'installation de cheminées d'aération et par le plancher aéré (ainsi que par les racines des plantes dont l'autre rôle est de participer à l'épaississement des boues en transpirant l'eau qu'elles y puisent).

Ce procédé permet de bien répondre aux problèmes de gestion des boues d'épuration des petites collectivités confrontées à la nécessité d'adopter de bonnes pratiques de valorisation agricole et à la sévérité accrue de la réglementation qui, d'une part, limitent les périodes d'épandage et, d'autre part, impliquent le stockage des boues sur des durées pouvant atteindre neuf mois.

Les principaux avantages de ce procédé sont les suivants :

- Procédé automatisable ;
- Produit final stabilisé ;
- Absence de nuisances auditive, ni olfactive ;
- Valorisation agricole ponctuelle ;
- Bon fonctionnement même en période hivernale ;
- Réduction du volume des boues ;
- Stockage de longue durée (de l'ordre de 5 ans) ;
- Réduction du coût de transport ;
- Siccité du produit (10 % à 20 %) ;
- Enlèvement et évacuation simples et rapides ;
- Pas de risque de repousses des rhizomes dans les champs si l'épandage est direct, à condition de respecter certaines consignes : épandage d'été sur sol sain.

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- Coût d'investissement (génie civil, nombre de lits de plantations,...) ;
- Nécessité d'une superficie importante pour l'implantation des lits ;
- Chantier d'épandage difficile ;
- Possibilité de repousse des rhizomes, en particulier sur des sols hydromorphes ;
- Coût élevé de l'épandage des boues issues de ce procédé (boues pâteuses) par rapport à des boues classiques (25 € par mètre cube) ;
- Filière moins écologique à la construction : utilisation de beaucoup de géomembrane imperméable (plastique) ;
- Fragilité des ouvrages en cas de bassin équipés de membranes d'étanchéité ;
- La reprise des boues est difficile et risque d'endommager l'étanchéité des casiers ;
- Nécessité d'une grande rigueur dans la conception et l'installation.

Le séchage biologique présente plus d'avantages que d'inconvénients par rapport aux autres filières de traitement des boues d'épuration (voir Annexe 3 : Tableau présentant les avantages du séchage biologique).

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

3.1.3. DIMENSIONNEMENT

Il s'agit de procédés adaptés aux stations rurales. Au-delà de 2000 EH, les coûts d'investissement deviennent prohibitifs dans le cas de casiers construits en béton (contre 4000 EH pour les bassins étanchéifiés avec une membrane).

Il faut compter un dimensionnement d'environ 1 à 2 m² par EH de surface totale pour 0,8 m² de surface utile (étanchéité avec géomembrane, contre 0,4 m² pour une structure béton).

A Beynes, par exemple, les boues rejetées de la Station des Plantins pouvant accueillir jusqu'à 10 800 EH sont réceptionnées dans les 8 bassins à raison de 4 à 8 g de boues par litre d'eau, soit 660 kg de boues par jour en moyenne pour 4000 m².

Les macrophytes utilisés sont exclusivement des roseaux (*Phragmites australis*), avec des racines d'une profondeur pouvant atteindre 0,2 à 1 m. Aucune massette (*Typha latifolia*), bonne pour éliminer la pollution carbonée n'a été utilisée.

Pour chacun des 8 lits, un débitmètre, 3 vannes manuelles, 1 vanne pour l'évacuation des percolats et 1 pompe à 2,5 kW ont été mis en place.



Figure 37 : Photographie des lits plantés de roseaux de Beynes (78) juste avant l'inauguration de la station d'épuration

Les casiers sont terrassés en déblais/remblais. Les talus des casiers seront pentés à 3 de base pour 2 de hauteur. Et le fond de forme des casiers est penté à 1% maximum de façon à favoriser l'évacuation des percolats.

Le fond de forme compacté, est étanché par une géomembrane associée à un feutre antipoinçonnant, de façon à protéger le sol support de toute contamination éventuelle.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

L'objectif d'imperméabilisation est de 10^{-8} m/s. L'étanchéité est mise en œuvre sur la totalité du parement du fond de forme. Et le complexe d'étanchéité recouvert du massif filtrant doit pouvoir supporter le passage d'un véhicule agricole avec des pneus basse pression lors de la vidange des casiers. Le complexe d'étanchéité sera ensuite recouvert d'un massif filtrant de 0,50 m d'épaisseur moyenne composé depuis le fond vers la surface de gravier de granulométrie 40/60 (sur 0,30 m) et de tourbe (sur 0,20 m).

Les bases de dimensionnement des massifs filtrant des boues d'épuration à macrophytes sont les suivantes :

- Charge massique appliquée de 35 à 60 kg de MS/m²/an ;
- Hauteur de l'accumulation des boues de l'ordre de 1,5 m maximum ;
- Toujours 15 t MS / an et / 1 000 EH ;
- Minimum 3 lits et progressivité de l'outil par rapport à la charge ;
- Aération pour apport de dioxygène ;
- Mode d'alimentation ;
- Durée de stockage de l'ordre de 5 ans.

La hauteur maximale du remplissage de boues liquide des casiers est donnée à 20 cm par jour, à raison d'une fois par jour pendant 1 semaine d'alimentation entre 2 périodes de repos. Il s'agit d'éviter des débordements des effluents en dehors des casiers.

Après un an de stockage, la siccité des boues est de 10% et après 5ans de stockage, la siccité atteint 40 à 50%. Ainsi, après un optimum de 2 à 3 ans de maturation, les boues obtiennent une texture pâteuse (voir figure 34).

3.1.4. EFFICACITE

Les objectifs des lits plantés de filtration des boues d'épuration sont la stabilisation, la déshydratation et l'hygiénisation des boues.

La stabilisation des boues est un traitement qui conduit à une production de boues dont la fermentation est soit achevée, soit bloquée entre la sortie du traitement et la réalisation de l'épandage. La notion de stabilisation renseigne sur le niveau d'odeur de la boue (absence d'odeur, ou odeur faible, moyenne, forte). Plus une boue est riche en matière organique (MO) moins elle sera stabilisée.

Les boues hygiénisées sont des boues qui ont subi un traitement qui réduit à un niveau non détectable les agents pathogènes présents dans les boues. Une boue est considérée comme hygiénisée quand, à la suite d'un traitement, elle satisfait aux exigences définies pour ces boues à l'article 16 de l'arrêté du 8 janvier 1998 sur l'épandage des boues d'épuration. L'hygiénisation des boues ne s'impose que dans certains contextes d'utilisation agronomique : la plupart des boues épandues en France ne sont pas certifiées hygiénisées.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

La maîtrise du risque sanitaire repose de façon satisfaisante sur l'application de règles de bonnes pratiques (voir le site de l'ADEME).

Les traitements d'hygiénisation suivant la phyto-épuration des boues peuvent donc être envisagés.

Les seuils de références pour les teneurs en micro-organismes pathogènes dans les boues hygiénisées sont indiquées dans le tableau suivant (selon l'arrêté du 8 janvier 1998 relatif aux épandages de boues sur les sols agricoles) :

Salmonelles	Entérovirus	œufs d'helminthes pathogènes viables
< 8 NPP/10 g MS	< 3 NPPUC/10 g MS	< 3/10 g MS

- NPP : Nombre le Plus Probable
- NPPUC : Nombre le Plus Probable d'Unités Cytopathiques (cellules pathogènes)
- MS : Matière Sèche

Tableau 13 : Seuils de référence des teneurs en micro-organismes dans les boues hygiénisées

En pratique, seule l'analyse des coliformes thermotolérants est demandée tous les 15 jours pendant la période d'épandage, en faisant référence aux valeurs obtenues lors du contrôle de mise en service du dispositif d'hygiénisation.

Les teneurs-limites réglementaires pour les boues et les sols sont fixées en France par la norme NF U-44 095 (quantités admissibles de polluants dans les boues résiduelles après compostage). Le législateur a retenu un certain nombre d'éléments-traces et de composés-traces comme indicateurs de la qualité réglementaire des boues d'épuration et en a fixé les valeurs limites.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

	Boues Teneur limite	Apports au sol maximum totaux cumulés sur 10 ans (g/ha)	Teneur limite du sol	
	en g/t MS	Terres labourables et pH >6	Prairies ou sols pH<6	en g/t terre (MS)
Cadmium	20 _a	300 _d	150	2
Chrome	1 000	15 000	12 000	150
Cuivre	1 000	15 000	12 000	100
Mercure	10	150	120	1
Nickel	200	3 000	3 000	50
Plomb	800	15 000	9 000	100
Zinc	3 000	45 000	3 000	300
Sélénium	-	-	1 200	-
PCB	0,8	12	12	-
Fluorenthène	5 _b	75	60	-
Benzo(a)pyrène	2 _c	30	20	-
Benzo(b) fluoranthène	2,5	40	40	-

- a teneur abaissée à 15 au 1er janvier 2001 et à 10 au 1er janvier 2004
- b 4 si prairies
- c 1,5 si prairies
- d 150 au 1er janvier 2001

Tableau 14 : Seuils de référence des teneurs en polluants chimiques dans les boues résiduaires

Dans les massifs filtrants des boues de Kourou (973), les taux d'abattement mesurés des polluants sont de 80 à 95% pour la DBO5, 95 % pour la DCO, 98% pour les MES, 80% pour les matières azotées et 40 à 70% pour les matières phosphorées.

Lors de son extraction, la boue présente un aspect hétérogène de type pâteux à solide. La siccité moyenne attendue devrait être au minimum de 15 %, ne permettant pas l'obtention d'une bonne qualité d'épandage. Par contre, le produit se prête bien au compostage.

3.1.5. DEVENIR DES CROUTES

Tous les 2 à 10 ans, les boues des massifs filtrants, devenues pâteuses (c'est-à-dire avec une siccité supérieure à 10%, jusqu'à 40% à Honfleur), sont raclées avec des engins à pneus basse pression, afin de ne pas endommager l'étanchéité des casiers et de ne pas colmater les filtres par entassement.

Les analyses de boues et de sol doivent être réalisées systématiquement avant l'épandage. Leur nombre est fonction de la quantité de boues à épandre, donc de la taille de la station : plus elle est grande, plus le nombre d'analyses doit être élevé.

Paramètre	Résultats proposés	Valeur Source sol VDSS	Valeur Arrêté 1998
Cd (mg/kg)	0,5	0,8	15
Cr (mg/kg)	50	65	1000
Cu (mg/kg)	80	95	1000
Hg (mg/kg)	0,5	3,5	10
Ni (mg/kg)	50	70	200
Pb (mg/kg)	25	200	800
Zn (mg/kg)	70	140	3000

Tableau 15 : Seuils proposés des teneurs en polluants chimiques dans les boues résiduaire

Si l'un de ces indicateurs dépasse la valeur fixée, l'épandage des boues est interdit. En complément, des quantités maximum d'apport à l'hectare (flux-limites) ont été fixées. Par ailleurs, pour des raisons environnementales et administrative, la réglementation du Code de l'Environnement impose notamment :

- L'article R₂₁₆₋₇, pour le respect des articles R_{211-29S}. R₂₁₁₋₂₉ qui préconisent de ne pas mélanger les boues d'épuration. Il est interdit d'épandre les sables et les graisses

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
 54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
 N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

issues du traitement des eaux d'épuration. Parle également de la qualité agronomique des boues et la possibilité de les mélanger à d'autres déchets.

- L'article R₂₁₁₋₂₅ qui interdit de rejeter les boues d'épuration en milieu aquatique.

Après filtration des boues d'épuration sur massifs filtrants plantés de macrophytes, les croûtes peuvent connaître une valorisation agricole par épandage ou l'incinération avant stockage (voir annexe 4 : Schéma des filières du devenir des boues d'épuration).



Figure 38 : Croquis avec les 8 lits plantés de roseaux de la station d'épuration de Beynes (78)

3.2. PHYTO-EPURATION DES SOLS ET HYPER ACCUMULATION

3.2.1. PRINCIPE

La phyto-épuration des sols est généralement utilisée pour éliminer les métaux lourds (non biodégradables) infiltrés. Ce principe s'appelle le phyto-minage, car il s'agit d'accumuler les polluants non dégradables des sols dans les plantes.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

Lorsqu'un sol est pollué, la lixiviation de ce sol par les eaux aboutit à l'apport de polluants dans les nappes souterraines, puis dans l'eau que nous consommons. Lorsque c'est possible, il faut donc prévoir une couche d'étanchéité sous les sols qui seront pollués.

Pour dépolluer partiellement en surface des ETM (éléments traces métalliques) un site non étanchéifié, il est tout de même possible de pratiquer le phyto-minage. D'abord sur site afin de limiter les infiltrations et ensuite en aval, où les lixiviats peuvent être conduits dans des noues puis des bassins de dépollution, le même type de bassins de dépollution des métaux qui peuvent être utilisés après un lit de filtration des pollutions biodégradables des boues d'épuration.

Les lixiviats des substrats présents dans ces bassins de dépollution doivent repasser en tête de filière d'épuration. Les plantes où sont accumulés les métaux sont polluées et ne pourront donc être réemployées. Des recherches sont actuellement en cours pour extraire, incinérer et centrifuger les plantes avant d'extraire les ETM.

3.2.2. FILTRE A METAUX

Le filtre est un casier terrassé en déblais/remblais, étanché. Il sera penté à 3 de base pour 2 de hauteur. Il est rempli de substrat susceptible de piéger les métaux lourds. Le volume de substrat sera de type tourbe ou mélange équivalent sur 0,4 m et un gravier 20/40 en fond sur 0,3 m. Le fond de forme compacté, est étanché par une géomembrane associée à un feutre antipoinçonnant, de façon à protéger le sol support de toute contamination éventuelle. L'objectif d'imperméabilisation est de 10^{-8} m/s.

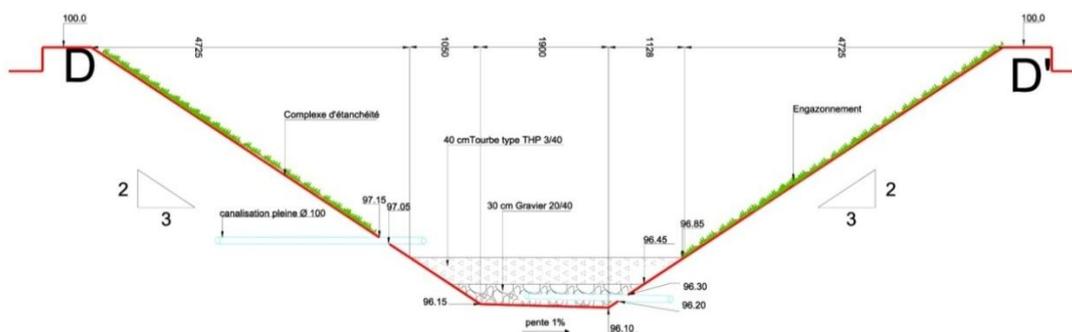


Figure 39 : Principe du filtre à métaux descendant

Ouvrages	Matériaux
Massifs filtrants filtres à métaux	Mélange tourbes/limons + graviers 20/40
Massif filtrant filtre à boues	Tourbe + graviers 40/60

Le mélange tourbe – limon est une tourbe granulaire THP 3/40.

Tableau 16 : Comparaisons des massifs filtrants à filtre à boues et à filtres à métaux



Figure 40 : Casier rempli de roseaux

L'entretien des filtres à métaux n'est pas contraignant :

- Surveillance ;
- Entretien des jardins ;
- Suivi analytique des eaux ;
- Travaux exceptionnels en cas de problème avec le filtre ;
- Remplacement périodique des substrats filtrants, leur évacuation, leur stockage et leur retraitement...

Selon Alain Manceau, la dépollution en métaux se fait en deux temps, dans des casiers filtrants successifs. Dans les premiers, les métaux lourds, fortement retenus par les matières solides, sont libérés par l'action des plantes et l'ajout de substances chimiques complexantes « inoffensives » pour l'environnement. Celles-ci les « arrachent » puis les transportent sous forme dissoute : c'est la phytolixiviation. Dans les seconds casiers, « les métaux dissous dans l'eau sont immobilisés et accumulés dans la rhizosphère, c'est ce qu'on appelle la phytofixation. À la sortie, l'eau est de qualité piscicole, type "eau de baignade" que l'on peut déverser dans la nature sans risques ».

3.2.3. ABSORPTION DES METAUX PAR LES PLANTES

Physiologiquement, les plantes ont des phytochélatines (peptide constitué des acides aminés, de séquence $(EC)_nG$) qui leur permettent de chélater, c'est-à-dire de tenir avec des « pinces » les métaux. Ces phytochélatines permettent aux plantes la phytolixiviation naturelle et la phytofixation qui aboutit à l'absorption.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

Eléments traces	Plantes herbacées	Plantes arbustives	Hyper Accumulation A éviter
Fe	60-600	2500	
Mn	20-400	2000	>10 000
Zn	15-400	2000	>10 000
Cd	0.1-3	20	>100
Pb	0.1-5	100	>1000
Ni	1-10	100	>1000
Co	0.2-5	50	>1000
Cr	0.2-5	50	>1000
Cu	5-40	100	>1000
Se	0.1-1	10	>100

Tableau 17 : Comparaison de l'efficacité du phyto-minage avec différents types de plantes

	Flux entrants	Effluents traités
MES (mg/L)	11 500	11
DCO (mg/L)	11 200	20
DBO ₅ (mg/L)	8 700	40
Hydrocarbures dissous	51	0,2
HAP (mg/L)	0,1	0,002
N _{TK} (mg/L)	2,1	1,1
Pt (mg/L)	1,7	0,3
Cu (mg/L)	360	-
Pb (mg/L)	211	0,01

Tableau 18 : Abattement des polluants pour les effluents de l'entreprise Decons

Concrètement, l'hyper-accumulation consiste à un phyto-minage de grande efficacité. Pour stimuler des plantes déjà adaptées au phyto-minage (*Streptanthus polygaloides*, *Silene vulgaris*, *Thlaspi montanum*, *Thlaspi caerulescens*, etc), plusieurs méthodes sont possibles :

L'utilisation d'agents correcteurs de pH qui mettent les plantes en état de stress et qui amplifient l'absorption racinaire ;

L'utilisation de symbiotes mycorhizes épiphytes (champignons dont le biotope est la racine des plantes et vivant en dehors des cellules végétales) à arbuscules qui vont provoquer une absorption accélérée de nutriments (et autres molécules dont les ETM).

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

De nombreuses précautions sont à prendre avec les filières de l'hyper-accumulation. En effet, après dégradation des végétaux, les métaux qui se retrouvent à l'air libre peuvent être diffusés dans la nature à cause du vent. Dans le même état d'esprit, la faune qui se nourrit de ces plantes peut se déplacer et évacuer la pollution aux alentours du filtre.

Mais de faibles quantités de métaux n'étant pas jugées dangereuses, certaines entreprises ou collectivités peu scrupuleuses font pousser par exemple de la lavande sur d'anciens sites pollués et invitent la population à venir cueillir les fleurs.



Figure 41 : Cueillette de lavande sur un ancien site industriel

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

4. PHYTO-EPURATION DE L'AIR

4.1. PRINCIPE

Les filtres végétaux permettent la mise en œuvre de procédés de dépollution par voies biologiques, par l'utilisation de plantes sélectionnées, des gaz viciés et les gaz à effet de serre, éliminer les mauvaises odeurs et de détruire une grande partie des germes.

En effet, les plantes sont de nos jours souvent utilisées à des fins de dépollution, notamment pour la décontamination des sols pollués, le traitement des eaux usées et depuis quelques années, on applique aussi ce procédé au traitement des polluants présents dans l'air.

Le phénomène de dégradation des polluants se produit d'une part grâce à l'activité de croissance de la plante, qui prélève des éléments dans le milieu et d'autre part par l'émission de molécules au niveau racinaire.

Ces échanges sont spécifiques et conditionnent le milieu, ce qui induit l'installation de populations bactériennes sélectionnées, et qui vont participer à la dégradation des polluants.

Ainsi c'est par une action conjuguée de plantes et de bactéries spécifiques, que la dégradation de polluants variés est possible.

Des études ont déjà pu prouver l'efficacité des végétaux pour l'amélioration de la qualité de l'air. Une sélection de plantes d'intérieur, reprise en France a ainsi été étudiée afin de montrer leurs capacités de dégradation des polluants tels que le formaldéhyde, le xylène et l'ammoniac.

Ces études ont permis de mettre en évidence l'habilité de certaines espèces à la dépollution. De nombreuses plantes sont connues pour ces types de traitements, dont ces trois espèces dont l'utilisation est répandue :



Chlorophytum

Spathiphyllum

Dracaena

Figure 42 : Photographie de plantes efficaces pour la biofiltration de l'air

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

Parallèlement à ce phénomène de métabolisation, les feuilles des plantes retiennent naturellement les poussières et absorbent du dioxyde de carbone (CO_2), le principal gaz à effet de serre.

La biofiltration est une technologie actuellement plutôt utilisée dans le domaine du traitement de rejets industriels gazeux odorants et il existe beaucoup d'études concernant une grande diversité de polluants tels que :

- Les composés organiques volatils (COV) à transformer en CO_2 et H_2O (benzène, formaldéhyde, toluène, xylène, monoxyde de carbone, issu d'une mauvaise évacuation des produits de combustion. Pour y remédier, la plante la plus recommandée est Chlorophytum) ;
- Les matières azotées (oxydes d'azote, NO_x , ammoniac, NH_3) ;
- L'hydrogène sulfuré (H_2S), à transformer en soufre organique puis en SO_4^{2-} ;
- Les molécules carbonées chlorées (pentachlorophénol (polluant industriel), trichloroéthylène).

L'agence AR ARCHITECTES par exemple utilise des filtres végétaux sur la plupart des stations d'épuration qu'elle conçoit.

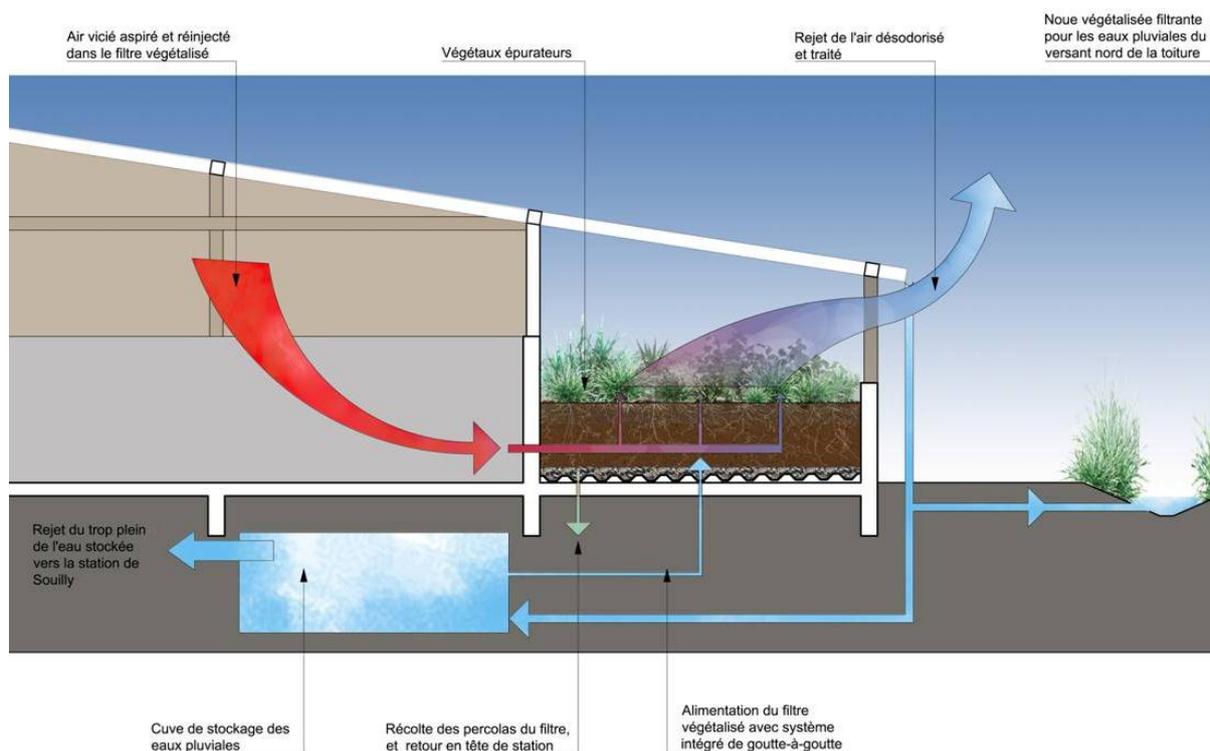


Figure 43 : Principe de filtration de l'air horizontale au niveau du hangar de stockage des boues de Claye Souilly (72 000 m^3/h , 145 m^2 de filtre)

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
 54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
 N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

4.2. METHODOLOGIES

Les deux principales méthodologies rencontrées pour la filtration de l'air par phyto-épuration sont l'infiltration de l'air et les façades végétalisées (murs et toitures).

L'air à traiter est forcé à travers le substrat et la rhizosphère. Le milieu riche en oxygène permet la dégradation des molécules grâce à l'action des micro-organismes fixés sur le substrat et les racines. C'est la phytodégradation. Les polluants inorganiques sont piégés et séquestrés dans le substrat de plantation sous des formes non «bio-disponibles» et donc non toxiques. L'irrigation forcée du substrat permet le traitement par des polluants non biodégradables présents dans les lixiviats. Cette solution est obligatoire dans le cas des polluants très toxiques pour les plantes (soufres, cyanures, arsenics).

Cette technique est applicable principalement pour les stations d'épuration, les parkings et les industries.

La biofiltration est une technique éprouvée depuis une cinquantaine d'années. De nombreuses publications et études portant sur cette technique ont permis de mettre en évidence des taux de traitement importants, parfois supérieurs à 90%, sur des composés biodégradables tels que l'ammoniac (NH_3) et l'hydrogène sulfuré (H_2S).

La conception du biofiltre végétalisé de l'entreprise Canevaflor[®] intègre toutes ces données afin de garantir les meilleurs résultats de traitement en minimisant les coûts écologiques et économiques de l'installation.

Compte-tenu des débits et concentrations donnés nous vous garantissons des taux de traitement supérieurs à 90 %. Concernant l'ammoniac, les objectifs impliquent un taux de traitement de 90%, qui sera garanti seulement pour une concentration maximale de 6,5 mg/m^3 définie lors de l'étude.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

Paramètres	Charges entrantes (g/h)	Concentrations du flux sortant (mg/Nm ³)
SO ₂	27	41
NH ₃	43	0,1
H ₂ S	41,5	< 2
HCl	1,1	11
NO ₂	26	321
CO	7	111
COV	13,4	0,5
CO ₂	2193	<2
Mercaptans	10,8	<0,1
Particules PM ₁₀	81	<2
Hydrocarbures légers	89	0,05
Germes	51200/m ³	<50/m ³

Tableau 19 : Exemple de l'efficacité du système de phyto-épuration de l'atmosphère à Honfleur.

Dans le bâtiment technique de la station d'épuration des Plantins à Beynes, AR ARCHITECTES a par exemple dimensionné le biofiltre à air. Sur un lit de pouzzolane repose un mélange de 2 mètres de tourbe et d'écorce de pin, avec régulation du pH, pour avoir des conditions favorables au développement d'un écosystème optimal avec les bactéries de dégradation des matières polluantes. Les caractéristiques d'infiltration dues aux pompes sont les suivantes :

- 100 m³ d'air par m² de filtre et par heure (avec surveillance d'une bonne homogénéisation du milieu) ;
- Un temps de séjour de 30 s à 50 s pour 2 mètres de matériaux actif au maximum ;
- Un taux d'humidité du filtre raisonnable et constant ;
- Une perte de charge due à la pompe de 60 à 80 mm CE (colonne d'eau) soit environ 700 Pa (pascals), pour une aspiration à environ 5100 m³ par heure.

Les plantes sont sélectionnées pour leur pouvoir de fixation du carbone : elles grandissent bien et ont un meilleur rendement en termes de biomasse produite.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com



Figure 44 : Photographie du biofiltre dans la serre de Beynes

Pour le hangar de stockage des boues de Claye-Souilly où AR ARCHITECTES a participé à la conception-réalisation, les objectifs de réduction de la pollution de l'air étaient les suivants :

Polluants	Concentrations (mg/m ³)	Objectifs à atteindre (mg/m ³)
Ammoniac (NH ₃)	6,5	0,7
Amines (R-NH)	N.C.	0,1
Hydrogène sulfuré (H ₂ S)	0,05	0,1
Mercaptans (R-SH)	0,013	0,05

Tableau 20 : Abatement de la pollution de l'air à atteindre à Claye-Souilly

Pour y parvenir, le dimensionnement du biofiltre était le suivant :

Débit (m ³ /h)	72 000
Profondeur du lit filtrant (m)	1,1
Temps de résidence minimal de l'air dans le filtre (s)	7,425
Volume du lit filtrant (m ³)	148,5
Surface du lit filtrant (m ²)	135
Longueur du biofiltre (m)	30
Largeur du biofiltre (m)	4,5

Tableau 21 : Dimensionnement du biofiltre du hangar de stockage des boues de Claye-Souilly

Le traitement par biofiltration a lieu en deux étapes. Tout d'abord les polluants se fixent dans l'eau du sol, puis les microorganismes vont dégrader ces polluants.

L'application de la biofiltration implique un aménagement particulier permettant l'intégration d'un réseau d'air permettant d'amener la pollution au cœur du mur, siège du processus de traitement.

Les biofiltres végétalisés ont fait l'objet d'une thèse canadienne publiée en 2000 au sujet d'un mur végétal constitué uniquement de mousses. Ce qui a permis de mettre en évidence les interactions positives entre plantes et populations bactériennes.

Les analyses portaient sur la dégradation de deux COV, la méthyléthylcétone et le toluène pour lesquels des taux de dégradation de respectivement 50 et 20% ont été observés. Les chercheurs ont conclu que la mousse était principalement le support des microorganismes dégradant les COV, tout en leur apportant un environnement stable. Une étude plus précise des microorganismes présents a également permis de mettre en évidence un champignon qui dégrade la méthyléthylcétone.

4.3. EFFICACITE DE LA PHYTO-EPURATION DE L'AIR

Polluants	Concentrations air à traiter (mg/m ³)	Normes de rejet dans l'air (mg/m ³)	Concentration sortie (mg/m ³)	Taux d'abattement
Ammoniac NH ₃	6,5	0,7	0,65	90%
Amines (R-NH)	NC	0,1	NC	80%
Hydrogène sulfuré (H ₂ S)	0,05	0,1	0,01	80%
Mercaptans (R-SH)	0,013	0,05	0,0026	80%

Tableau 22 : Exemple de rendements d'épuration obtenus par filtre végétalisé à air

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

Pour augmenter les rendements de dégradation des COV, l'ozone (O₃), le méthyl-vinyl-cétone ou encore les blessures physiques vont faire stresser la plante. Ce type de stress aura pour conséquence la libération d'enzyme de dégradation des COV (composés organiques volatiles).

Mais pour la dégradation du méthane (CH₄), la filière de son exploitation en tant que biogaz est économiquement plus intéressante, même si les coûts d'investissement peuvent être plus prohibitifs.

La qualité épurative de quelques plantes sont données sur le site de Plantes Dépolluantes : http://www.plantes-depolluantes.com/polluants/monoxyde_de_carbone.php

Attention cependant à ces plantes dépolluantes : elles dégradent des polluants mais il arrive, pour certains polluants, qu'elles les stockent. Ainsi, en intérieur, une plante va généralement provoquer une diminution de la concentration en formaldéhydes (un COV très volatile) moyenne dans une salle. Mais paradoxalement, elle va provoquer une augmentation de la concentration en formaldéhyde dans son milieu immédiat, par exemple à moins d'1 mètre.

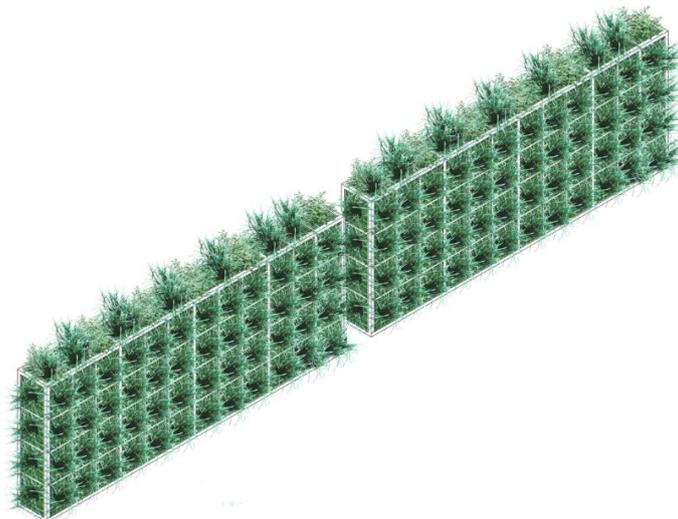


Figure 45 : Schéma d'un mur de filtration par phyto-épuration

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

5. PROCÉDES DE PHYTO-EPURATION

5.1. COMPARAISONS TECHNIQUES ET ECONOMIQUES

5.1.1. CRITERES CAPACITAIRES

	capacité (en EQH)					Nature du réseau d'assainissement				Nature des effluents				
	de 1 à 50	de 50 à 200	de 200 à 500	de 500 à 2000	de 2000 et +	séparatif	unitaire	Tolérance aux eaux parasites	Tolérance aux apports pluviaux	Tolérance aux variations de charge	Domestiques	Agroalimentaires	Agricoles	Industriels
Tranchées d'infiltration	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Lit d'épandage	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Terre d'infiltration	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
● Filtration sur laine de roche	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
● Filtre textile - tourbe	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
● Lit planté de roseaux individuel	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Filtre à sable à flux vertical	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Filtre à sable à flux horizontal	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
● Filtre à tourbe	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
● Système compact à boues activées	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
● Lit bactérien compact	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
● Lit à massif de zéolite	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Réacteur Biologique Séquentiel	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Lit fixe immergé aérobie	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Décanteur-Digesteur	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
● Taillis à très courtes rotations	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
● Système compact à disques biologiques	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Lit d'infiltration-percolation sur sable	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
● Jardin filtrant	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Filtre planté de roseaux	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
● Lombrifiltration	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Lit bactérien	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Lagunage naturel	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Lagunage aéré	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Lit bactérien et lit planté de roseaux	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Disques biologiques	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
● Filtre à sable compact	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Boues activées à décantation séparée	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Légende : ● : procédé innovant ● : adapté ● : adapté sous condition ● : inadapté

Tableau 23 : Critères capacitaires pour le choix de la filière de l'épuration des eaux

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

Il apparaît que les solutions d'assainissement tant collectives qu'individuelles procèdent aux mêmes traitements mais selon la nature de ces effluents et des réseaux existants et la densité de la population concernée, doit répondre à des exigences sanitaires différentes pour s'adapter à leur environnement.

5.1.2. CRITERES SANITAIRES

	Niveau sanitaire								
	Abattement bactériologique (Log)	DBO5 (mg/L)	DCO (mg/L)	MES (mg/L)	NH4 (mg/L)	NK (mg/L)	NO3 (mg/L)	NGL (mg/L)	PT (mg/L)
Tranchées d'infiltration		30		40					
Lit d'épandage		30		40					
Terre d'infiltration		30		40					
● Filtration sur laine de roche		< 25	< 125	< 35	< 40				
● Filtre textile - tourbe	2	< 5	< 50	< 5		11	33	< 45	
● Lit planté de roseaux individuel	2	20	70	10		50%			40%
Filtre à sable à flux vertical	2 à 4	10 à 30	25 à 55	< 20	< 40	< 40			5 à 15
Filtre à sable à flux horizontal	2 à 4	10 à 30	25 à 55	< 20	< 40	< 40			5 à 15
● Filtre à tourbe	2	< 5	< 50	< 5		11	33	< 45	
● Système compact à boues activées	0	< 25	< 125	< 35	< 20				
● Lit bactérien compact		< 25	< 125	< 30	< 15				
● Lit à massif de zéolite		30		40					
Réacteur Biologique Séquentiel	0	< 25	< 90	< 1	< 10		< 25		< 2
Lit fixe immergé aérobie	0	25	125	25	65 à 85 %		65 à 85 %	65 à 85 %	35%
Décanteur-Digesteur	0	30%		50%					
● Taillis à très courtes rotations		< 25	< 125						
● Système compact à disques biologiques	0	25	125	40					
Lit d'infiltration-percolation sur sable	2 à 4	15 à 50	30 à 150	< 50	< 40	< 40			5 à 15
● Jardin filtrant	2 à 3	15	60	15	20	20	0,7		4
Filtre planté de roseaux	1 à 2	< 25	< 90	< 30	< 10			70%	30%
● Lombrifiltration	1 à 2	10	125	21	9	14	0,7		9
Lit bactérien	1	< 35	80 à 200	50	15 à 45	20 à 50		40 à 60	15
Lagunage naturel	3 à 4	30 à 60	75 à 150	140		30 à 35		55 à 60	10
Lagunage aéré		35	< 470						
Lit bactérien et lit planté de roseaux	1 à 2	< 25	< 125	< 30	< 10		< 30	< 40	2
Disques biologiques	1	< 25	50 à 80	< 30	15 à 45	20 à 50		40 à 60	15
● Filtre à sable compact	0	< 25	< 125	< 35	< 7		< 8	< 15	< 2
Boues activées à décantation séparée	0	< 20	90	30		< 5		10 à 15	7

Légende : ● : procédé innovant

Tableau 24 : Critères d'abattement des polluants pour le choix de la filière de l'épuration des eaux

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
 54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
 N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

Les performances sanitaires listées sont celles figurant dans les objectifs attendus de la circulaire du 17/02/97. La DBO₅ et la DCO sont données pour une température des effluents à 20°C.

5.1.3. CRITERES ECONOMIQUES

	Coût d'investissement (H T)						Exploitation	
	< 10 EHQ	de 10 à 100 EHQ	de 100 à 200 EHQ	de 200 à 500 EHQ	de 500 à 1000 EHQ	de 1000 EHQ et +	Coût (H T)	Difficulté
Tranchées d'infiltration	750 €	-	-	-	-	-	5 à 10 € / EHQ / an	+
Lit d'épandage	1 000 €	-	-	-	-	-	5 à 10 € / EHQ / an	+
Terre d'infiltration	1 150 €	-	-	-	-	-	5 à 10 € / EHQ / an	+
● Filtration sur laine de roche	1 000 €	850 €	-	-	-	-	5 à 10 € / EHQ / an	+
● Filtre textile - tourbe	1 200 €	1 200 €	-	-	-	-	40 à 50 € / EHQ / an	++
● Lit planté de roseaux individuel	900 €	650 €	-	-	-	-	10 à 15 € / EHQ / an	+
Filtre à sable à flux vertical	1 100 €	800 €	650 €	550 €	-	-	10 à 30 € / EHQ / an	+
Filtre à sable à flux horizontal	1 100 €	800 €	650 €	550 €	-	-	10 à 30 € / EHQ / an	+
● Filtre à tourbe	750 €	1 000 €	1 000 €	1 000 €	-	-	10 à 15 € / EHQ / an	+
● Système compact à boues activées	730 €	400 €	300 €	290 €	-	-	60 € / EHQ / an	+++
● Lit bactérien compact	-	550 €	400 €	250 €	-	-	20 à 40 € / EHQ / an	+
● Lit à massif de zéolite	1 500 €	650 €	650 €	650 €	-	-	10 € / EHQ / an	+
Réacteur Biologique Séquentiel	1 500 €	1 000 €	900 €	800 €	750 €	700 €	15 à 55 € / EHQ / an	++
Lit fixe immergé aérobie	580 €	350 €	190 €	190 €	130 €	130 €	20 à 60 € / EHQ / an	++
Décanteur-Digesteur	-	400 €	400 €	400 €	150 €	90 €	3 à 8 € / EHQ / an	+
● Taillis à très courtes rotations	-	450 €	450 €	450 €	-	-	55 € / EHQ / an	+
● Système compact à disques biologiques	-	425 €	425 €	330 €	-	-	20 € / EHQ / an	++
Lit d'infiltration-percolation sur sable	-	530 €	650 €	550 €	550 €	500 €	25 à 40 € / EHQ / an	+
● Jardin filtrant	-	1 100 €	900 €	700 €	500 €	400 €	25 à 40 € / EHQ / an	+
Filtre planté de roseaux	-	750 €	750 €	600 €	450 €	350 €	9 à 20 € / EHQ / an	+
● Lombrifiltration	-	-	1 300 €	1 300 €	600 €	600 €	10 à 15 € / EHQ / an	++
Lit bactérien	-	-	-	720 €	360 €	250 €	7 à 12 € / EHQ / an	+
Lagunage naturel	-	-	-	600 €	250 €	150 €	5 à 10 € / EHQ / an	+
Lagunage aéré	-	-	-	-	300 €	180 €	6 à 10 € / EHQ / an	++
Lit bactérien et lit planté de roseaux	-	-	-	450 €	300 €	200 €	10 à 22 € / EHQ / an	++
Disques biologiques	-	-	-	420 €	420 €	280 €	7 à 12 € / EHQ / an	++
● Filtre à sable compact	-	-	-	-	600 €	550 €	25 € / EHQ / an	++
Boues activées à décantation séparée	-	-	-	-	750 €	700 €	60 € / EHQ / an	+++

Légende : ● : procédé innovant + : Niveau de compétence exigé du personnel

Tableau 25 : Critères économiques pour le choix de la filière de l'épuration des eaux

Les coûts d'investissement et de fonctionnement sont des ordres de grandeur issus de la bibliographie de la SATESE et peuvent fortement varier selon les exemples.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

Le coût d'exploitation annuel théorique intègre les frais de main d'œuvre, les frais énergétiques liés au process de traitement et les frais d'extraction et valorisation en agriculture des boues d'épuration liquides dans un rayon de 5km autour de la station d'épuration. Ce coût ne comprend pas les frais financiers d'investissement (remboursements d'emprunts) et de renouvellement (amortissements et provisions).

Les coûts d'entretien des voiries d'acheminement des effluents sont donnés en annexe 5 (Coûts d'entretien dans des voiries d'acheminement des effluents).

5.1.4. CHOIX DES FILIERES DE L'EPURATION

C'est l'adéquation des différentes caractéristiques de la filière au contexte local qui doit guider le décideur. Dans cette optique, l'adaptabilité des filières aux conditions climatiques doit être étudiée au détail.

Quelle que soit la filière retenue, dans des climats extrêmes, il conviendra de prendre en compte un facteur de sécurité au niveau du dimensionnement. Un travail complémentaire pour déterminer plus précisément ces facteurs restent encore aujourd'hui à faire.

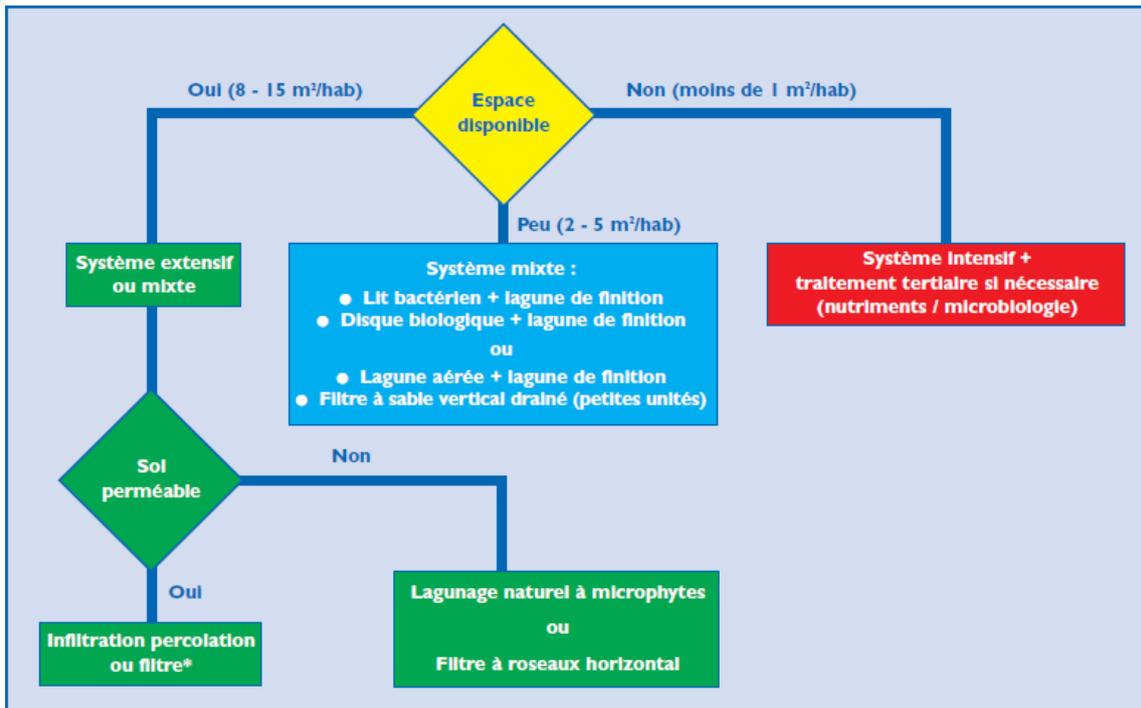
Mais cela reste plus l'espace disponible et la perméabilité du sol que le climat ou le choix des plantes et leur capacité d'évapotranspiration qui seront les principaux facteurs déterminants.

A Beynes, par exemple, avec un site de 16 460 m² pour 10 800 EH, le rapport donné est de 1,5 m² disponible par équivalent-habitant. Le système d'épuration qui a été choisi est un système mixte avec des bassins Cyclor[®] rejetant des boues activées destinées à 8 lits plantés de roseaux de 500 m² chacun et avec une hauteur utile de 1,70 m.

Mais il existe d'autres filières innovantes de phyto-épuration des effluents dont les plus connues (et les plus développées) sont présentées dans la partie suivante.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com



* filtre vertical si on cherche l'élimination du NH₄⁺ et des germes (pas d'action sur NO₃⁻) ; filtre vertical + filtre horizontal ou filtre horizontal si c'est la dénitrification qui est recherchée. Le risque d'une concentration élevée en NH₄⁺ au niveau du rejet est alors plus important.

Figure 46 : Arbre de décision (d'après Jean Duchemin - Commission Européenne - 2001)

5.2. PROCÉDES INNOVANTS ETABLIS

5.2.1. RHIZOPUR®

La méthode de traitement Rhizopur® est un procédé type à la Lyonnaise des Eaux qui a déposé le brevet en 1999 (PCT/FR99/01970). Cette filière assure un traitement complet des effluents et des boues produites en associant les trois techniques connues individuellement suivantes et dans l'ordre :

- Le Lit Bactérien ;
- La Percolation/infiltration ;
- Le Rhizocompostage sur lit planté de roseaux.

Les principaux avantages de ce système d'épuration sont le faible coût d'investissement et d'exploitation ainsi que la simplicité de fonctionnement. D'autre part aucun sous-produit n'est à gérer vu que les boues sont traitées sur place.

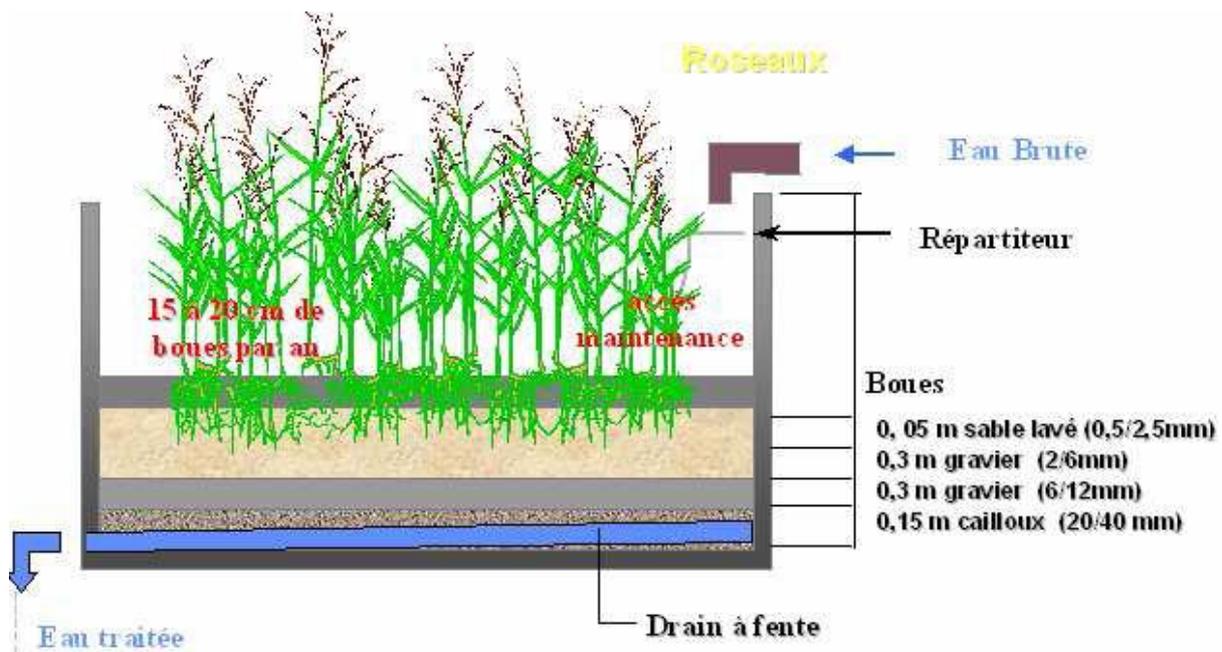
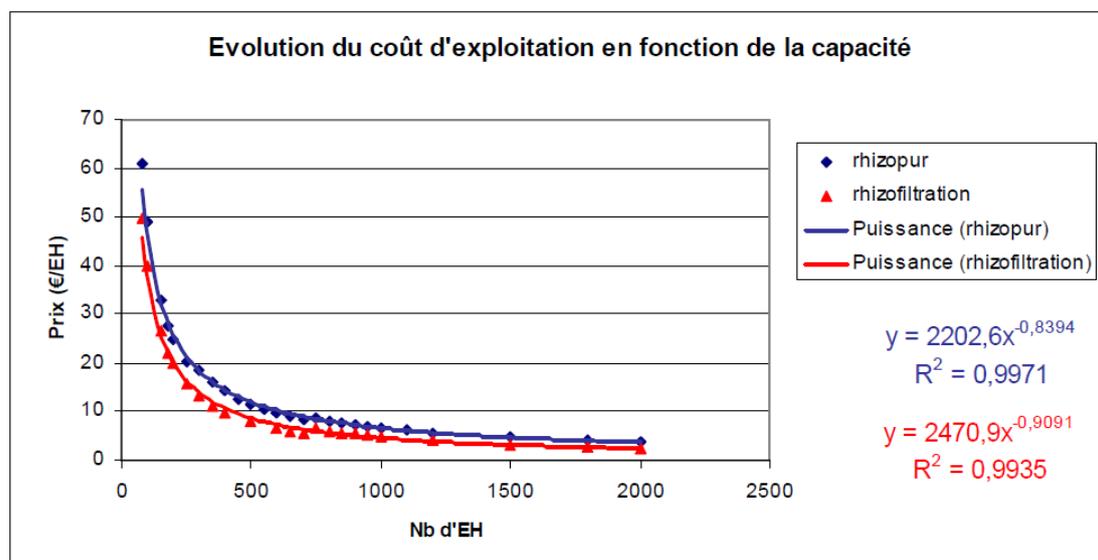


Figure 47 : Etape de rhizocompostage de la méthode Rhizopur®

Dans son mémoire sur la filière Rhizopur®, Julie MEUNIER livre les conclusions suivantes à propos des coûts d'exploitation de la filière.



L'épuration par Rhizopur® est meilleure, que par seule rhizofiltration, mais coûte significativement plus cher.

Figure 48 : Graphique de comparaison des coûts de la phyto-épuration des eaux par Rhizopur® et par rhizofiltration seule en fonction de la capacité de la station en amont

Comparaison des coûts des lits de roseaux remblai/béton sur les stations existantes

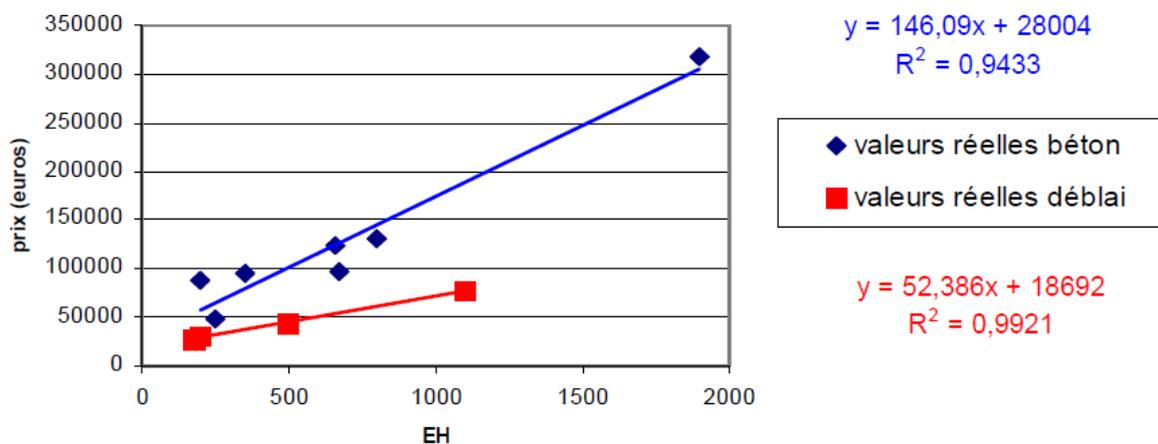


Figure 49 : Graphique de comparaison des coûts de la filière Rhizopur[®] en déblai/remblai ou en béton

5.2.2. MHEA[®]

La MHEA[®] (Mosaïque Hiérarchisée d'Ecosystèmes Artificiels) est une solution innovante car elle utilise trois compartiments : un écosystème « eau libre », un écosystème semi aquatique (type filtre planté) et un écosystème terrestre (plantation de saules et d'aulnes).

Etant donné la grande diversité des types de MHEA[®], dont le principe est d'associer différentes techniques épuratives et notamment phyto-épuratives, il s'agit plus d'une filière laboratoire qu'une filière commerciale.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
 54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
 N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com



Figure 50 : Vue d'ensemble de la station de Cambérène

5.2.3. ORGANICA®

La société Organica, fondée à Budapest, il y a une quinzaine d'années, est née de l'idée de proposer une station d'épuration offrant un certain esthétisme architectural.



Figure 51 : Schéma de fonctionnement d'une station d'épuration Organica®

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
 54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
 N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

La société hongroise installe des stations de traitement de l'eau qui ont l'apparence de jardins d'hiver. Aujourd'hui associée à Veolia Water, Organica exporte sa technologie, associant boues activées et plantations végétales, sur le territoire français. Basée sur le fonctionnement classique d'une station d'épuration à boues activées, avec bassin anaérobie et aérobie, la spécificité du système d'Organica repose sur l'association de plantes. En plantant à la surface des bassins enterrés, Organica offre en surface un jardin sous serre, tout en optimisant le traitement de l'eau en sous-sol. Le système racinaire qui s'enfonce dans les boues jusqu'à plus de 1m50 représente plusieurs milliers de m² de surface. Il permet donc d'obtenir un vaste écosystème, composé de bactéries mais aussi de crevettes, crabes, escargots... qui viennent compléter le travail des bactéries de la boue activée. Cet éco-système doit aussi permettre de mieux gérer les variations des charges hydrauliques.

En surface, n'est visible qu'une serre en verre accueillant les plantes formant le système racinaire. Pour Pascal PLUYAUD, directeur Centre-Ouest de MSE, filiale de Veolia Water spécialisée dans les stations de traitement de petite taille, les stations Organica n'ont pas besoin d'être cachées. Elles peuvent être installées dans la ville, et ainsi permettre d'économiser plusieurs dizaines de kilomètres de canalisations. L'avantage d'Organica par rapport aux stations utilisant uniquement les pouvoirs nettoyant des plantes, comme celles développées par Phytorestore, c'est que pour une ville de 5 000 habitants, une station Organica ne demande que 500 m² alors qu'une station Phytorestore nécessite 10 000 m².

Plusieurs dizaines d'installations sont déjà plantés en Europe, dont une existante et plusieurs en cours de construction en France.



Figure 52 : Organica[®], un procédé d'épuration avec une intégration paysagère soignée

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

6. CONCLUSION

En France comme dans le monde, le développement durable n'est pas un effet de mode mais vraiment une politique de réflexion pour l'avenir. Les enjeux du développement durable sont les paramètres sociaux, économiques, culturels et bien sûr environnementaux.

Il faut cesser polluer les eaux (ni l'ensemble de l'environnement) avec des polluants comme ces métaux lourds des industries, ces phytosanitaires de l'agriculture et toutes ces autres molécules qui ne sont ni biodégradables ni possible d'éliminer par les filières de l'épuration.

Les récentes évolutions juridiques internationales, la multiplication des procès, la pression publique et l'augmentation des épidémies et maladies dans les pays développés incitent désormais les villes, gouvernements, industriels, grandes compagnies ou même particuliers à intégrer la préservation de l'environnement et de la santé dans leur stratégie.

Mais la réflexion finale appartient au législateur. En effet, les principes de précaution, de prévention et d'information permettent d'éviter de se servir de ces polluants et donc de les libérer dans l'environnement.

Par ailleurs, si toutefois l'utilisation de ces molécules se présente comme une contrainte obligatoire, tout doit être mis en œuvre pour récupérer le polluant le plus en amont possible de l'épuration afin de permettre une concentration amoindrie en fin de filière.

Le choix de la filière de l'épuration d'eaux usées, de terres souillées ou d'air vicié va donc fortement dépendre des types de polluants à traiter ainsi que de leurs concentrations et leurs quantités.

Les principaux avantages d'intégrer les techniques de la phyto-épuration dans ces filières sont la qualité paysagère, l'appui à la biodiversité, la qualité économique, la qualité sanitaire de l'air sans utilisation de réactifs chimiques, etc.

Mais les inconvénients de ces techniques sont le besoin en espace et une performance épurative qui reste parfois à démontrer (voire à augmenter). C'est la raison pour laquelle il existe des filières mixtes et des filières innovantes, dont certaines utilisent exclusivement la phyto-épuration, qui se développent en France et dans le monde entier.

C'est donc un signe encourageant pour le développement des filières avec la phyto-épuration en France.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

7. LISTES DES FIGURES ET DES TABLEAUX, SOURCES ET ANNEXES

7.1. GLOSSAIRE

Aérobic	Milieu en présence de dioxygène / micro-organisme pouvant vivre avec oxygène.
Anaérobic	Milieu en absence de dioxygène / micro-organisme pouvant vivre sans oxygène.
ANC	Assainissement non collectif.
Assainissement collectif	Réseau de collecte des eaux usées collectif.
Aval	Côté vers lequel va un réseau ou un cours d'eau.
Bâchée	Volume d'eau déversé séquentiellement lors d'une phase d'alimentation.
Bassin d'infiltration	Bassin perméable dans lequel l'eau est déversée et d'où elle percole dans le sol. Utilisé en assainissement pour ré-infiltrer les eaux pluviales.
Bassin de décantation	Bassin destiné au traitement de l'eau au fond duquel les matières en suspension se déposent.
Bassin de rétention	Bassin de stockage de l'eau de pluie avant son rejet vers le milieu naturel ou le réseau d'assainissement.
Bassin versant	Territoire dont les eaux de ruissellement vont se concentrer dans un ensemble de cours d'eau ou d'égouts qui les acheminent vers un point appelé exutoire : cours d'eau, lac, mer (ou station d'épuration).
Boues	Boues primaires accumulées au fond d'un ouvrage de décantation OU dépôts accumulés sur les filtres du 1 ^{er} étage des filtres plantés de roseaux. Les deux boues n'ont pas la même qualité.
By-pass	Canalisation permettant de court-circuiter un ouvrage.
Casier	Portion de massif filtrant d'un filtre à surface libre délimité par des cloisons. Le casier est alimenté en totalité lors d'une bâchée.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

Certification ASQUAL	Certification de respect des règles de chantier et des responsabilités liées à l'étanchéité des géomembranes.
Charge hydraulique	Débit d'eau.
Clapet anti-retour	Dispositif évitant le retour d'eau dans les réseaux.
Collecteur	Egout recevant les canalisations des branchements appartenant aux particuliers.
Coefficient d'uniformité (CU)	Rapport d_{60}/d_{10} .
d_{10}	Diamètre laissant passer 10% de la masse d'un sable.
d_{60}	Diamètre laissant passer 60% de la masse d'un sable.
DBO ₅	Demande biochimique en oxygène pour 5 jours : mesure de la consommation naturelle d'oxygène dissous dans l'eau. Il s'agit de dissolution de la pollution par oxydation en aérobie.
DCO	Demande chimique en oxygène : la DCO est la mesure de la quantité d'oxygène apportée par un réactif chimique pour oxyder toutes les matières organiques biodégradables et non biodégradables. La DCO inclut donc la DBO
DDE	Direction Départementale de l'Équipement. Elle est notamment chargée de la police des eaux sur les grands cours d'eau.
Débit	Quantité d'eau qui s'écoule pendant un temps donné.
Débit journalier	Q journalier = 15% x nombre d'EH.
Débit de pointe	Q pointe = Q journalier / 24 x 4,5.
DEG	Dispositifs d'Étanchéité des Géomembranes.
Dénitrification	Conversion des nitrates (NO_3^-) en nitrites (NO_2^-) puis en azote atmosphérique (N_2).
Décantation	Action de laisser reposer un liquide pour le séparer des matières solides qu'il contient en suspension.
Dimensionnement	Détermination de la taille d'un ouvrage afin de lui permettre d'être opérationnel dans les conditions fixées par l'étude.
Drainer	Faciliter l'écoulement de l'eau dans un sol trop humide au moyen de dispositifs enterrés.
Eau potable	Une eau potable est considérée comme telle lorsqu'elle peut être bue par l'homme sans nuire à sa santé.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

Eaux de ruissellement	Ce sont les eaux pluviales de surface, qui coulent sur une pente.
Eaux ménagères	Egalement eaux grises. Eaux en provenance des appareils sanitaires (lessive, cuisine, salle d'eau...), à l'exclusion des WC.
Eaux pluviales	Eaux résultant des pluies
Eaux usées	Ce sont les eaux chargées de matières polluantes rejetées par les particuliers ou les industriels. Les eaux usées ménagères comptent les eaux ménagères et les eaux-vannes.
Eaux urbaines résiduaires	Eaux ménagères usées ou mélange des eaux ménagères usées avec des eaux industrielles usées et/ou des eaux de ruissellement.
Eaux-vannes	Egalement eaux noires. Eaux en provenance des WC. Elles contiennent urines et matières fécales.
EH	Equivalent habitant : unité de mesure permettant d'évaluer la capacité d'une station d'épuration. Elle se base sur la quantité de pollution émise par personne et par jour. 1 EH correspond, selon la directive Européenne du 21 mai 1991 à la charge organique biodégradable ayant une DBO5 de 60 grammes d'oxygène par jour.
Épuration	Action de dépolluer l'eau sans la rendre potable, afin de pouvoir la rejeter dans le milieu naturel sans le polluer.
Étiage	En hydrologie, l'étiage correspond statistiquement à la période de l'année où le débit d'un cours d'eau atteint son point le plus bas (basses eaux).
ÉTM	Eléments traces métalliques : il s'agit de l'ensemble des molécules avec un ou plusieurs atomes métallique(s).
Eutrophisation	Croissance excessive des algues dans l'eau due à l'excès en nutriments tels que les nitrates et provoquant la consommation de l'oxygène du milieu qui devient anaérobie.
Evapotranspiration	Emission de vapeur d'eau (rosée) par les feuilles des plantes ou des arbres (transpiration), mais aussi par la surface du sol (évaporation).
Exutoire	Ouvrage permettant de rejeter l'eau dans le milieu naturel.
Filtre à sable	Ensemble des massifs filtrants.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

Géogrille	Grille synthétique perméable.
Géomembrane	Membrane synthétique imperméable.
Géosynthétique	Ensemble des géogrilles, géomembranes et géotextiles.
Géotextile	Textile synthétique perméable.
Fosse septique	Dans le cas d'un assainissement autonome, réservoir fermé de décantation dans lequel les boues décantées sont en contact direct avec les eaux usées traversant l'ouvrage.
Fosse septique	Dans le cas d'un assainissement autonome, réservoir fermé de décantation dans lequel les boues décantées sont en contact direct avec les eaux usées traversant l'ouvrage.
Hélophyte	Plante pouvant vivre avec les racines et les rhizomes sous la surface de l'eau. Mais ses tiges sont souvent aériennes.
Hydrocarbures	Liquides insolubles très inflammables restant à la surface de l'eau.
K (m/s)	Coefficient de perméabilité. Sert à connaître la vitesse d'infiltration des eaux dans les sols (en m/s).
Limiteur de débit	Dispositif permettant de réguler le débit en sortie d'un ouvrage de stockage.
Lixiviat	Eau ayant percolé par exemple un massif filtrant.
Macrophyte	Plante visible à l'œil nu.
Massif filtrant	Ensemble de la surface irriguée lors d'une phase d'alimentation.
MES	Matières en suspension : ensemble des matières solides non dissoutes (matières organiques et matières minérales).
Micro-organisme	Etre vivant microscopique. La plupart des micro-organismes sont des unicellulaires, dont les bactéries et certaines espèces fongiques.
Microphyte	Végétal microscopique (souvent unicellulaire). Notion opposée à macrophyte.
Milieu récepteur	Lieu où sont déversées les eaux épurées ou non.
MO	Matière organique, composée principalement d'atomes d'hydrogène, d'oxygène, de carbone, mais aussi d'azote, de phosphore, de soufre et d'oligo-éléments.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

MO	Matières oxydables : $(DCO + 2 DBO_5) / 3$.
MS	Matière sèche correspondant à la boue 100% déshydratée.
MVS	Matières volatiles solubles. Son taux est donné en fonction de la MS. Le suivi de ce taux permet de connaître la stabilité d'une boue sur une échelle.
Nappes phréatiques	Nappes d'eaux souterraines formées par l'infiltration des eaux de pluie et des nappes d'accompagnement des cours d'eau.
Nitrates	D'un point de vue chimique, les nitrates sont le résultat final de l'oxydation de l'azote. C'est la principale source nutritive des végétaux. À de fortes concentrations, c'est aussi un polluant qui provient essentiellement de l'utilisation des engrais agricoles.
N global	L'azote global regroupe l'azote réduit (azote Kjeldahl) et l'azote oxydé (nitrates NO_3^- , nitrites NO_2^-).
Nt _K	L'azote Kjeldahl regroupe l'ensemble des azotes réduits. Il s'agit de l'azote organique et de l'ammonium (NH_4^+). L'azote Kjeldahl exclue les molécules d'azotes telles que les nitrates.
P total	Le phosphore total regroupe les orthophosphates (PO_4^{3-}) et le phosphore organique.
Percolation	Pénétration lente des eaux de pluie dans le sol.
Permittivité	Caractéristique physique d'un géotextile influent sur les flux hydriques.
Phyto-épuration	Épuration des eaux, des sols ou des airs avec des plantes.
Plantule	Jeune plante généralement destinée à multiplier de volume.
Pluviomètre	Instrument servant à mesurer la quantité d'eau de pluie tombée dans un lieu donné.
Pompage	Action d'élever un liquide (à l'aide d'une pompe) à un niveau supérieur.
Puits d'infiltration	Ouvrage permettant le rejet d'eaux pluviales dans une couche de terrain perméable non saturé par l'eau de la nappe phréatique.
Siccité des boues	Les boues sont constituées d'eau et de matières sèches . La siccité est le pourcentage massique de matière sèche (ainsi

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

une boue avec une siccité de 10% présente une humidité de 90%).

- Boues liquides : siccité de 0 à 10 % ;
- Boues pâteuses : siccité de 10 à 25 % ;
- Boues solides : siccité de 25 à 85 % ;
- Boues sèche : siccité supérieure à 85 %.

Surface unitaire	Surface alimentée en eau lors d'une bûchée. Une surface unitaire peut correspondre à un ou plusieurs casiers.
Symbiose	Association de plusieurs être vivants qui apporte des bénéfices à chaque partie.
Turbidité	Qualité d'une eau plus ou moins trouble (turbide). Plus la turbidité est forte, moins elle est pure.
Vanne	Dispositif permettant de régler l'écoulement d'un fluide. Existe sur les réseaux d'eau et d'assainissement.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

7.2. LISTE DES FIGURES

Première de couverture : Lits plantés de roseaux à Beynes (78)

Page 5 : Figure 01 : Evolution des consommations en eau dans le monde

Page 6 : Figure 02 : Schéma simplifié du cycle de l'eau

Page 8 : Figure 03 : Schéma du cycle de l'azote

Page 9 : Figure 04 : Observation au microscope de bactéries responsables du choléra et de la salmonelle

Page 14 : Figure 05 : Photographie d'une zone humide au niveau de la STEP de Bois-le-Roi

Page 15 : Figure 06 : Les Egouts, un « prolongement des fleuves ».

Page 15 : Figure 07 : Photographie de rue pavée avec égout central (CAUE 60)

Page 16 : Figure 08 : Schéma de pollution des nappes phréatiques à cause des fosses non étanches

Page 17 : Figure 09 : Vue aérienne de la Station d'épuration d'Achères.

Page 18 : Figure 10 : Schéma d'une filière classique de l'épuration des eaux usées en France

Page 22 : Figure 11 : Photographie de roseaux dans une noue épurative à Claye-Souilly

Page 23 : Figure 12 : Illustration de filtre à tourbe

Page 24 : Figure 13 : Schéma d'un lit vertical en coupe transversale

Page 25 : Figure 14 : Schéma d'un lit horizontal en coupe transversale

Page 26 : Figure 15 : Schéma d'une gestion de l'eau aboutissant à la noue végétalisée

Page 27 : Figure 16 : Photographie de Taillis Courte Rotation ou le Taillis Très Courte Rotation

Page 27 : Figure 17 : Photographie d'une lagune à Berlin

Page 28 : Figure 18 : Schéma de filières classiques 100% phyto-épuration pour la filière eau

Page 33 : Figure 19 : Illustration de la loi de Liebig

Page 34 : Figure 20 : Surface brute minimum nécessaire en fonction de la capacité en équivalents-habitants EH

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

Page 36 : Figure 21 : Schéma de filtre vertical suivi de filtre horizontal

Page 41 : Figure 22 : Illustration d'un filtre horizontal avec un regard de répartition

Page 43 : Figure 23 : Loi de Darcy appliquée aux lits d'écoulement horizontal

Page 43 : Figure 24 : Coupe des étages de filtres verticaux (Source : CEMAGREF)

Page 47 : Figure 25 : Système mixte d'Oaklands Park (Source : Cooper et al, 1996)

Page 49 : Figure 26 : Coupe verticale de Taillis de courte rotation

Page 50 : Figure 27 : Schéma d'une filière utilisant le lagunage à microphytes, le bassin planté d'hélophytes, les TCR et le jardin de finition

Page 51 : Figure 28 : Photographies d'Iris et de nénuphars des bassins plantés sur la Cité de l'Île à Nanterre

Page 51 : Figure 29 : Schéma de principe du bassin planté de l'irisaie de Nanterre

Page 52 : Figure 30 : Photographie d'une zone humide plantée pour le traitement des eaux pluviales d'Auray

Page 53 : Figure 31 : Schéma de principe d'un bassin de lagunage naturel (Agences de l'Eau, CTGREF)

Page 54 : Figure 32 : Schéma de filtration de l'eau d'une lagune vers un bassin de finition à Sir Ban Yas

Page 60 : Figure 33 : Schéma du système de lagunage des effluents de Vauciennes

Page 62 : Figure 34 : Histogramme de l'évolution de la siccité des boues

Page 64 : Figure 35 : Illustration des étapes du traitement par phyto-épuration des boues d'épuration

Page 65 : Figure 36 : Coupe du massif filtrant pour boues d'épuration (doc. Saur)

Page 67 : Figure 37 : Photographie des lits plantés de roseaux de Beynes (78) juste avant l'inauguration de la station d'épuration

Page 72 : Figure 38 : Croquis avec les 8 lits plantés de roseaux de la station d'épuration de Beynes (78)

Page 73 : Figure 39 : Principe du filtre à métaux descendant

Page 74 : Figure 40 : Casier rempli de roseaux

Page 76 : Figure 41 : Cueillette de lavande sur un ancien site industriel

Page 77 : Figure 42 : Photographie de plantes efficaces pour la biofiltration de l'air

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

Page 78 : Figure 43 : Principe de filtration de l'air horizontale au niveau du hangar de stockage des boues de Claye Souilly (72 000 m³/h, 145m² de filtre)

Page 81 : Figure 44 : Photographie du biofiltre dans la serre de Beynes

Page 83 : Figure 45 : Schéma d'un mur de filtration par phyto-épuration

Page 88 : Figure 46 : Arbre de décision (d'après Jean Duchemin - Commission Européenne - 2001)

Page 90 : Figure 47 : Etape de rhizocompostage de la méthode Rhizopur[®]

Page 90 : Figure 48 : Graphique de comparaison des coûts de la phyto-épuration des eaux par Rhizopur[®] et par rhizofiltration seule en fonction de la capacité de la station en amont

Page 91 : Figure 49 : Graphique de comparaison des coûts de la filière Rhizopur[®] en déblai/remblai ou en béton

Page 92 : Figure 50 : Vue d'ensemble de la station de Cambérène

Page 92 : Figure 51 : Schéma de fonctionnement d'une station d'épuration Organica[®]

Page 93 : Figure 52 : Organica[®], un procédé d'épuration avec une intégration paysagère soignée

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

7.3. LISTE DES TABLEAUX

Page 11 : Tableau 01 : Limite réglementaires en polluants des eaux usées rejetées selon la loi ERU

Page 12 : Tableau 02 : Paramètres réglementaires de qualité seuils pour l'eau potable et les eaux de baignade

Page 13 : Tableau 03 : Norme VDSS pour les métaux lourds

Page 13 : Tableau 04 : Qualité des milieux récepteurs

Page 30 : Tableau 05 : Illustration du rôle de quelques-unes des techniques de l'épuration extensive des eaux

Page 32 : Tableau 06 : Illustration du rôle de quelques-unes des techniques de l'épuration extensive des eaux

Page 45 : Tableau 07 : Inventaire de l'entretien d'un filtre horizontal

Page 47 : Tableau 08 : Performances du système mixte d'Oaklands Park

Page 58 : Tableau 09 : Exploitation des lagunes

Page 60 : Tableau 10 : Performances épuratives des lagunes de Vauciennes

Page 62 : Tableau 11 : Equivalence entre les EH, les surfaces demandées et les boues produites en France

Page 63 : Tableau 12 : Contenu de la matière sèche (pourcentages en masse)

Page 69 : Tableau 13 : Seuils de référence des teneurs en micro-organismes dans les boues hygiénisées

Page 70 : Tableau 14 : Seuils de référence des teneurs en polluants chimiques dans les boues résiduaires

Page 71 : Tableau 15 : Seuils proposés des teneurs en polluants chimiques dans les boues résiduaires

Page 73 : Tableau 16 : Comparaisons des massifs filtrants à filtre à boues et à filtres à métaux

Page 75 : Tableau 17 : Comparaison de l'efficacité du phyto-minage avec différents types de plantes

Page 75 : Tableau 18 : Abattement des polluants pour un filtre à métaux pour les effluents de l'entreprise Decons

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

Page 80 : Tableau 19 : Exemple de l'efficacité du système de phyto-épuration de l'atmosphère à Honfleur.

Page 81 : Tableau 20 : Abatement de la pollution de l'air à atteindre à Claye-Souilly

Page 82 : Tableau 21 : Dimensionnement du biofiltre du hangar de stockage des boues de Claye-Souilly

Page 83 : Tableau 22 : Exemple de rendements d'épuration obtenus par filtre végétalisé à air

Page 84 : Tableau 23 : Critères capacitaires pour le choix de la filière de l'épuration des eaux

Page 85 : Tableau 24 : Critères d'abattement des polluants pour le choix de la filière de l'épuration des eaux

Page 86 : Tableau 25 : Critères économiques pour le choix de la filière de l'épuration des eaux

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

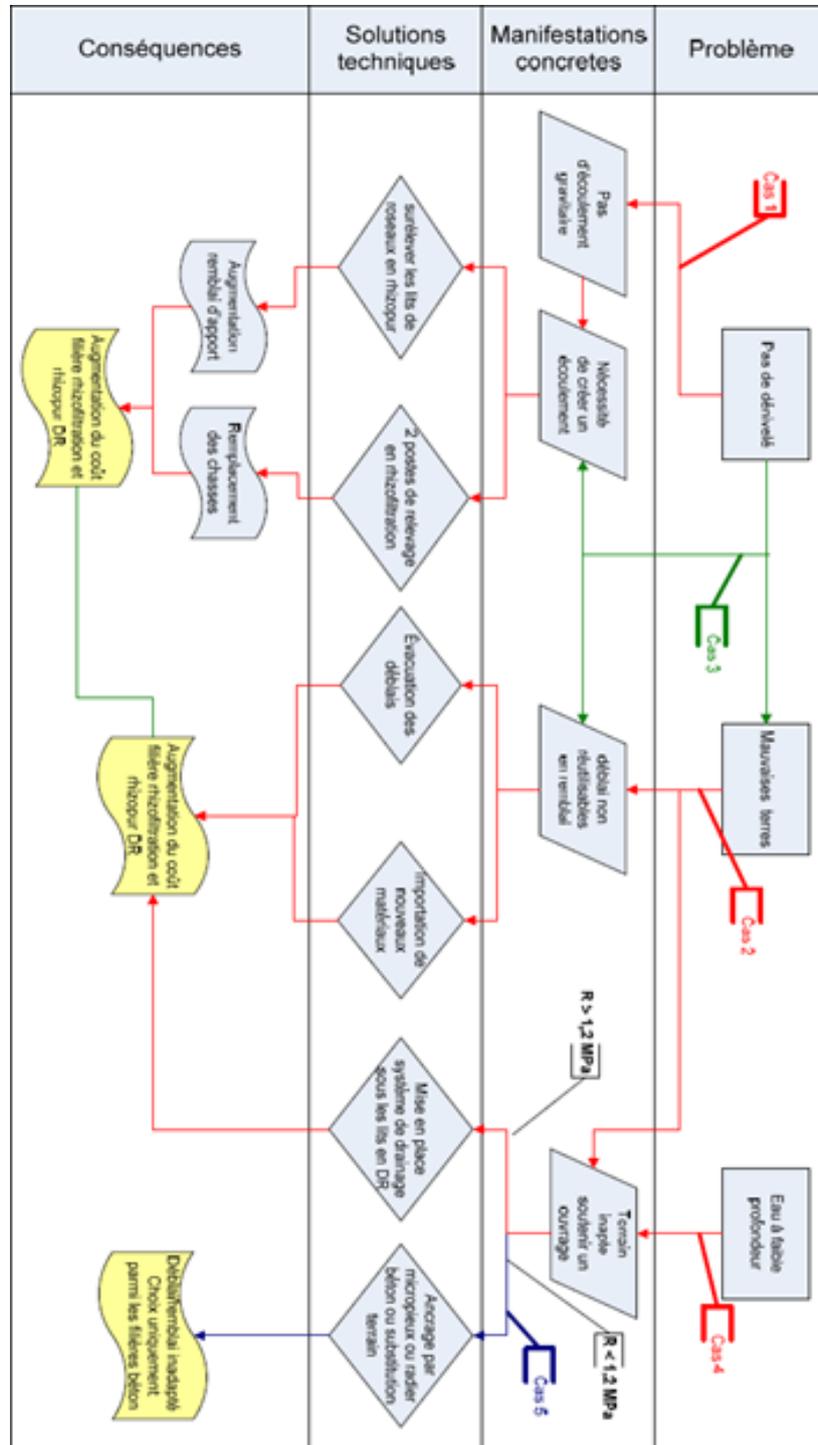
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

7.4. ANNEXES

7.4.1. PROBLEMES ET SOLUTIONS TECHNIQUES LIES A LA QUALITE DES SOLS



AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

7.4.2. TABLEAU DE SUIVI POUR UNE BONNE GESTION DU LAGUNAGE

Type de suivi	Paramètres	Nature du suivi	Fréquence
Suivi journalier	– Débit (entrée-sortie) – Pluviomètre	– Mesures en continu, installation de capteurs et de sonde de suivi – Étalonnage des appareils de mesure – Corrélation avec le débit global traité sur la station	Journalière
	– État de fonctionnement de la station d'épuration (départ de boues...) – Intervention sur le pilote (entretien, implantation, dysfonctionnement, défaut d'étanchéité...)	– Analyse ponctuelle <i>in situ</i> (intervention de l'exploitant) en entrée/sortie du pilote – Constat visuel de fonctionnement	
	– Coefficient de marée – Ensoleillement – Vent – Inondation – Inondabilité du site pilote	– En collaboration avec les services météorologiques – Tenue du registre de suivi des événements (type, durée, constat...)	Journalière

Pour évaluer les abattements biologiques des germes, deux calculs sont effectués pour l'ensemble des échantillons :

- Les moyennes géométriques (c'est-à-dire $10\mu\log$ ($\mu\log$ = moyenne des données transformées en \log_{10}) ;
- Le 90^e centile des concentrations bactériennes.

Aucune de ces 2 mesures ne doit dépasser les valeurs règlementaires.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

Type de suivi	Paramètres	Nature du suivi	Fréquence
Bilans réguliers	Paramètres physico-chimiques (MES, DCO, DBO ₅ , NTK, Pt) en entrée/sortie du pilote	– Bilan des prélèvements ponctuels en entrée/sortie de la station – Adaptation des prélèvements en corrélation avec les conditions météorologiques	Période estivale (phase de croissance des végétaux) : fréquence très rapprochée sur une période de trois mois à partir du démarrage de la station (une fois par mois, soit six échantillons au total en entrée-sortie).
	Paramètres bactériologiques : germes témoins (en plus des paramètres physico-chimiques)	Bilan des prélèvements ponctuels en entrée/sortie de la station	Période estivale : fréquence très rapprochée sur une période de trois mois à partir du démarrage du pilote (quatre fois par mois soit vingt-quatre échantillons au total), en corrélation avec la croissance des végétaux.
	Paramètres physico-chimiques (MES, DCO, DBO ₅ , NTK, Pt) en entrée/sortie du pilote	– Bilan des prélèvements ponctuels en entrée/sortie de la station – Adaptation des prélèvements en corrélation avec les conditions météorologiques	Période automne-hiver : fréquence allégée sur une période de six mois à partir du troisième mois de mise en service (mois d'octobre), en corrélation avec la baisse de l'activité touristique (une fois tous les trois mois, soit quatre échantillons par an au total)
	Paramètres bactériologiques : germes témoins (en plus des paramètres physico-chimiques)	– Bilan des prélèvements ponctuels en entrée/sortie de la station – Adaptation des prélèvements en corrélation avec les conditions météorologiques	Période automne-hiver : fréquence allégée sur une période de six mois à partir du troisième mois de mise en service (mois d'octobre) en corrélation avec la baisse de l'activité touristique (une fois par mois, soit douze échantillons par an au total)
	Paramètres physico-chimiques (MES, DCO, DBO ₅ , NTK, Pt) en entrée/sortie du pilote	– Bilan des prélèvements ponctuels en entrée/sortie de la station – Adaptation des prélèvements en corrélation avec les conditions météorologiques	Période du printemps (phase de croissance des végétaux et d'accroissement de l'activité domestique) : fréquence normale sur une période de trois mois (deux fois tous les trois mois, soit quatre échantillons au total).
	Paramètres bactériologiques : germes témoins (en plus des paramètres physico-chimiques...)	– Bilan des prélèvements ponctuels en entrée/sortie de la station. – Adaptation des prélèvements en corrélation avec les conditions météorologiques	Période du printemps (phase de croissance des végétaux et d'accroissement de l'activité domestique) : fréquence normale sur une période de trois mois (deux fois par mois soit douze échantillons au total en entrée-sortie).
Récapitulatif	– Paramètres physico-chimiques – Paramètres bactériologiques		– Vingt échantillons – Soixante-douze échantillons
Bilans trimestriels	Paramètres physico-chimiques (MES, DCO, DBO ₅ , NTK, Pt, PO) en entrée/sortie du pilote	– Bilan des prélèvements ponctuels en entrée/sortie du pilote. – Adaptation des prélèvements en corrélation avec les conditions météorologiques	→ Intervention d'un organisme agréé
	Paramètres bactériologiques : germes témoins (en plus des paramètres physico-chimiques)	– Bilan des prélèvements ponctuels en entrée/sortie du pilote – Adaptation des prélèvements en corrélation avec les conditions météorologiques	

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503

54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com

N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071

www.ar-architectes.com

7.4.3. TABLEAU PRESENTANT LES AVANTAGES DU SECHAGE BIOLOGIQUE

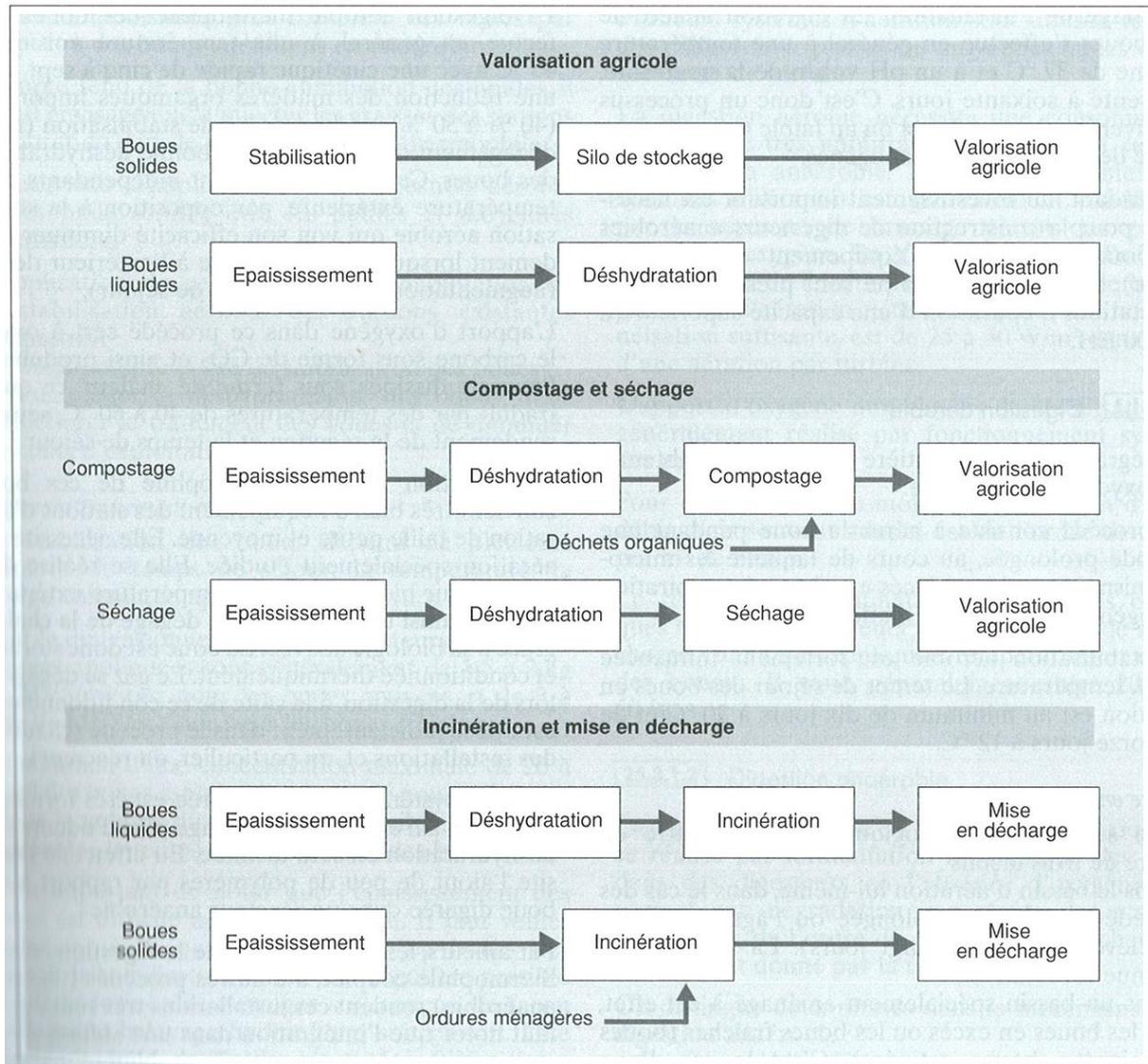
	Coûts d'exploitation	Coûts d'investissement	Pérennité du débouché agricole	Tonnage à gérer	Possibilité de mise en CET	Possibilité d'incinération	Stabilisation du produit	Facilité d'épandage
Boues actuelles + stockage ouvert	xxxx	xxxx	-	-	-	-	-	-
Chaulage + stockage ouvert	xx	xxx	x	-	-	-	x	x
Chaulage + stockage couvert	xx	xx	x	-	-	-	x	x
Chaulage + stockage ventilé	x	-	x	-	-	-	x	x
Centrifugation/ chaulage + stockage ouvert	x	xx	x	x	-	-	x	x
Centrifugation/ chaulage + stockage couvert	x	x	x	x	-	-	x	x
Centrifugation/ chaulage + stockage ventilé	x	-	x	x	-	-	x	xx
Chaulage/ pressage + stockage ouvert	xx	xx	xx	xx	xxx	?	xx	xx
Chaulage/ pressage + stockage couvert	xx	x	xx	xx	xxx	?	xx	xx
Chaulage/ pressage + stockage ventilé	x	-	xx	xx	xxx	?	xx	xx
Bioséchage	-	xxx	xxxx	xx	xxx	xx	xxxx	xxxx
Séchage thermique	x	-	xxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xx

- : solution défavorable.
 x : solution peu favorable.
 x x : solution moyennement favorable.
 x x x : solution favorable.
 x x x x : solution très favorable.
 ? : à déterminer.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
 54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
 N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

7.4.4. SCHEMA DES FILIERES DU DEVENIR DES BOUES D'EPURATION



AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
 54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
 N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

7.4.5. COÛTS D'ENTRETIEN DANS DES VOIRIES D'ACHEMINEMENT DES EFFLUENTS

	Coût d'exploitation (HT)	Entretien nettoyage (HT)
Dalle béton gazon	24,42 à 25,56€ / m2	0,20 à 0,40€ / m2 / an
Toiture verte extensive	96,00 à 170,37€ / m2	0,10 à 0,30€ / m2 / an
Toiture verte intensive	136,30 à 184,5€ / m2	0,10 à 0,20€ / m2 / an
Caniveau	22,95 à 26,05€ / m	0,05 à 0,10€ / m2 / an
Bassin sec	12,00 à 110,00€ / m3	0,20 à 0,60€ / m3 / an
Bassin eau	11,70 à 78,00€ / m3	0,20 à 0,60€ / m3 / an
Noüe	15 à 30€ / m3	1,15 à 3,70€ / m3 / an
Citerne	200,00 à 300,00€ / m3	0,40 à 2,00€ / m3 / an
Structure alvéolaire	200,00 à 300,00€ / m3	0,60 à 2,00€ / m3 / an
Puit d'infiltration	900,00 à 1300,00 €	2,00€ à 3,00 / m3 / an
Tranchée drainante	39,00 à 49,00€ / m3	0,40 à 0,60€ / m3 / an

Les coûts indiqués ci-dessous sont renseignés à titre indicatif. Ils correspondent à des ouvrages réalisés à une plus grande échelle que ceux concernés par le présent guide. Ils donnent néanmoins des ordres de grandeurs qui peuvent être utiles.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
 54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
 N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

7.5. SOURCES

Interview téléphonique :

- Martin Werckmann, référent technique d'Aquatiris (03 88 12 34 87) ;

Webographie générale

- Documents AR ARCHITECTES ;
- Site de Phytorestore : www.phytorestore.com
- **Optimisation du choix de la filière la mieux adaptée pour les STEP par lits plantés de roseaux.** Mémoire de Julie MEUNIER, 2006. http://engees-proxy.u-strasbg.fr/202/01/rapport_complet.pdf
- **Gestion alternative de l'eau.** Cours de Monsieur Philippe MUSIAL de Master 2 de Sciences de l'Environnement à l'Université de Cergy-Pontoise, 2012
- **Assainissement de l'eau.** Cours de Monsieur Philippe BANET de Master 1 de Sciences de l'Environnement à l'Université de Cergy-Pontoise, 2011
- **Organica, une station d'épuration qui soigne son intégration paysagère.** <http://www.lemoniteur.fr/197-eau-energie/article/a-suivre/702110-organica-une-station-d-epuration-qui-soigne-son-integration-paysagere>
- Présentation de la phyto-épuration en non collectif, par Aquatiris : <http://www.aquatiris.fr/silencecapousse-/index.html>
- Site d'Eau vivante : <http://eouvivante.net/>
- Site d'Epur Nature : www.epurnature.com
- Site de REEB Atelier : www.atelier-reeb.com
- Site de Marcanterra : www.marcanterra.com
- Site de Légifrance : www.legifrance.gouv.fr
- Site du Ministère de l'Ecologie : www.developpement-durable.gouv.fr

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

- Site des Agences de l'Eau : www.lesagencesdeleau.fr
- Sites de l'ADEME :
www.ademe.fr ; <http://www.ademe.fr/partenaires/boues/pages/f42.htm>
- Site du Cemagref : www.eaurmc.fr
- Site du CSTB : www.cstb.fr

Bibliographie générale

- **Documents AR ARCHITECTES ;**
- **Epuration des eaux usées domestiques par filtres plantés de macrophytes. Recommandations techniques pour la conception et la réalisation.** Agence de l'eau (Rhône-Méditerranée-Corse), groupe Macrophytes et traitement des eaux, 2003 ;
- **Guide technique de l'assainissement.** De Marc SATIN et Béchir SELMI, sous la direction scientifique et technique de Régis BOURRIER ; 3^e édition Le MONITEUR 2006 ;
- **Veille technologique des filières d'assainissement des eaux usées & de collecte des eaux pluviales pour collective et individuelle.** De José FERT, Brahim BESSA, Mathew AMALORPAVADAS, du CESI), 2008 ;
- **Traitement des boues de Kourou en Guyane (973) par Jardins Filtrants[®],** Notice technique descriptive, Phytorestore[®], Février 2006 ;
- **Guide Procédés extensifs d'épuration des eaux usées adaptés aux petites et moyennes collectivités (500 – 5000 EH).** Commission Européenne, Ministère de l'Aménagement, du Territoire et de l'Environnement, 2001 ;

Informations et illustrations ponctuelles :

- Aide à l'absorption des métaux par des micorhizes : Al-Karaki et al., 2004; Zhang et al., 2006) ;

- Filières d'assainissement et d'épuration : Cours de 2011 de Biochimie de Monsieur Damien SEYER en Master 1 de Sciences de l'Environnement à l'Université de Cergy-Pontoise ;
- Documentation DFA sur la phyto-épuration à Beynes
- Réglementation ANC : <http://epigetal.over-blog.com/article-reglementation-anc--la-phytoepuration-en-regime-d-exception-37449392.html>
- Règlementation sur les débourbeurs – déshuileurs : <http://www.cnidep.com/D412.pdf>
- Loi de Liebig : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Minimum-Tonne.svg>
- Cycle de l'azote : http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Cycle_azote_fr.svg
- Chiffres de l'épandage en France : <http://www.inra.fr/dpenv/lesboues.htm>
- Données sur le cycle de l'azote : http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/cycle_azote.html
- Qualité épurative de quelques plantes données sur le site de Plantes Dépolluantes : http://www.plantes-depolluantes.com/polluants/monoxyde_de_carbone.php
- Définition MHEA[®] : http://www.econet.ulg.ac.be/urba/index.php?pg=10001&guide_page=1001&fiche=160&theme=2
- Illustration de la MHEA[®] de Cambérène : http://www.pseau.org/epa/gdda/Actions/Action_A10/Recherche%20vol%20A10.pdf
- Technique Organica[®] : <http://www.lemoniteur.fr/197-eau-energie/article/a-suivre/702110-organica-une-station-d-epuration-qui-soigne-son-integration-paysagere>

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
 54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
 N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com

RESUME

En France comme dans le monde, le développement durable n'est pas un effet de mode mais vraiment une politique de réflexion pour l'avenir.

La pertinence d'un projet de phyto-épuration pour traiter les eaux usées, les sols souillés et l'air vicié dépend des types de polluants à traiter ainsi que de leurs concentrations et leurs quantités. Mais le choix de la filière dépendra également de nombreux critères techniques, économiques et paysagers qui sont souvent plus subjectifs qu'autre chose.

Les différentes filières de dépollution de l'environnement sont quasiment infinies et intègrent aujourd'hui de plus en plus en France les techniques phyto-épuratives, c'est-à-dire les méthodes utilisant à un ou plusieurs moments la technologie végétale :

- Lits verticaux plantés, lits horizontaux plantés,
- Filtres à tourbe,
- Taillis à courte ou très courte rotation,
- Bassins plantés, autres techniques de lagunage,
- Hyper-accumulation,
- Biofiltres à air et façades végétalisées,
- Autres techniques innovantes.

ABSTRACT

In France and in the world, sustainable development is not a fad but a really political thinking for the future.

The relevance of a phytoremediation project to treat wastewater, contaminated soils and polluted air depends on the types of pollutants to be treated as well as their concentrations and quantities. But the choice of the sector will also depend on many technical, economic and landscape that are often more subjective than anything else.

The various branches of environmental cleanup are almost endless and include today more phytoremediation techniques in France, that is to say methods using one or more times crop technology :

- Twin vertical planted, horizontal beds planted,
- Filters peat,
- Coppice short or very short rotation,
- Basins planted, other techniques lagoons,
- Hyper-accumulation,
- Biofiltres air and facades vegetated,
- Other innovative techniques.

AR ARCHITECTES

SARL d'architecture au capital de 15 000 € inscrite au RCS de Paris sous le n° 510 413 503
54 rue Merlin 75 011 Paris – Tél/Fax : 01 44 23 89 48 – contact@ar-architectes.com
N°de SIRET : 510 413 503 00010 – N°Ordre des Architectes : S13071
www.ar-architectes.com