

Réhabilitation des lagunes



- **Auteurs**

Sophie BESNAULT

INRAE – UR REVERSAAL

Stéphanie PROST-BOUCLE

INRAE – UR REVERSAAL

- **Contributeurs**

Le groupe de travail « Réhabilitation » du groupe Epnac :

Pierre ARTUIT

SATESE 53

Cécile BOST

DDT 24

Juliette CRUZ

DDTM 06

Sébastien DAVID

Ingénierie 28

Nadine DIMASTROMATTEO

MTECT (DEB)

Hosni DRIDI

AE Seine Normandie

Valentin ENJOLRAS

SATEA 43

Gaëlle FERNANDES

DDT 10

Laure FILLATRE

SATESE 43

Bérénice GUSLEVIC-LAGRANGE

SATESE 04

Sylvain LAUX

DDT 39

Sandrine LONJON

SATESE 01

David MARTEAU

SATESE 07/26

Pascal MOLLE

INRAE – UR REVERSAAL

Jean-Michel MONNET

DDT 26

Hervé PACOREL

SATESE 71

Anne-Cécile PHELIPOT

DDTM 06

Bruno REGHEM

MAGE 42

Marjorie ROUGÉ

Office Eau 973 (Guyane)

Mélanie THOMAS

MAGE 42

- **Remerciements**

Les auteurs remercient les SATESE, DDT et Offices de l'eau qui ont fourni des données et des retours d'expérience pour cette étude (SATESE 01, SATESE 04, SATESE 16, SATESE 29, SATESE 32, SATESE 33, SATESE 37, SATEA 43, SATEA 49, SATESE 71, SATESE 81, DDT 10, Office de l'eau 973) ainsi que les entreprises qui ont fourni des informations sur les lagunes et leurs réhabilitations (Syntea, CREA Step, SAUR, KERVEA, Polen').

Avec le soutien financier de l'OFB



SOMMAIRE

I. Introduction	8
II. Présentation du procédé de lagunage	10
II.1 Lagunage naturel.....	10
II.2 Lagunage aéré	11
III. Que faire si le rejet se dégrade ?	13
III.1 Importance de l'entretien	13
III.1.1 Lutte contre les espèces végétales envahissantes en surface	13
III.1.2 Fauçardage des berges	17
III.1.3 Curage de la zone du cône de sédimentation.....	18
III.2 Curage des bassins	18
III.3 Réhabilitation des berges	18
III.4 Lutte contre les animaux nuisibles	22
III.5 Ajout de chicanes	23
III.6 Etanchéité des bassins de lagunage.....	23
III.6.1 Quels matériaux pour les géomembranes ?	25
III.6.2 Drainage des eaux et des gaz avec géomembrane	26
III.7 Augmentation de la taille de la lagune	28
III.8 Ajout d'un Filtre Planté de Roseaux en amont.....	28
III.9 Réduction des eaux claires parasites, déconnexion des eaux pluviales	32
IV. Que faire si le niveau de rejet doit baisser ?	32
IV.1 Remplacement de la lagune 3 par un FPR vertical	32
IV.2 Radeaux flottants - macrophytes	35
IV.3 Tamisage tertiaire	36
IV.4 Filtres rocheux (rockfilters) aérés ou non aérés	37
IV.5 Aération de la lagune 1	37
V. Que faire de la lagune en cas de réhabilitation totale de la station ?	39
V.1 Cadre réglementaire	39
V.2 Bassin tampon/surverse de DO	39
V.3 Ouvrage de finition/stockage.....	39
V.4 Transformation en zone humide	39
V.5 Construction de la nouvelle station sur le site de la lagune.....	41
VI. Conclusions	43
VII. Bibliographie	45

LISTE DES FIGURES

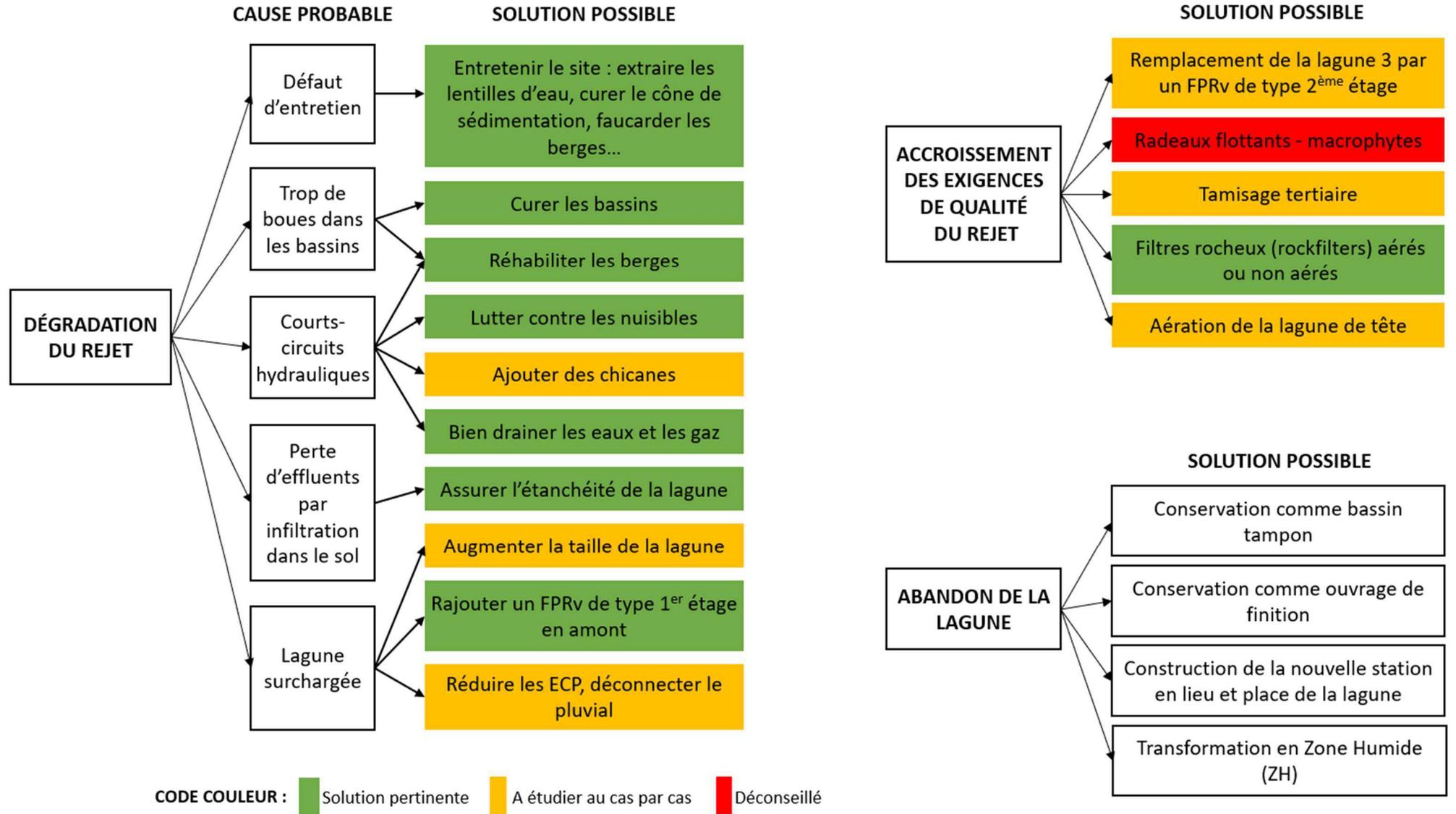
Figure 1 : Diagramme en violon représentant le nombre de lagunes construites en France par année (données issues du Portail assainissement - base de données sur les eaux résiduaires urbaines de 2021)..	8
Figure 2 : Diagramme en boîte à moustache représentant la capacité nominale des lagunes construites en France en Equivalents Habitants (EH) (données issues du Portail assainissement - base de données sur les eaux résiduaires urbaines de 2021)	9
Figure 3 : Schéma d'un procédé de lagunage naturel d'après Racault et al., 1997 (Atelier thématique Epnac « Guide d'exploitation » - Lagunage naturel, 2018)	10
Figure 4 : Rendements et concentrations de l'effluent de lagunages naturels installés à l'aval de réseaux d'assainissement non séparatifs (Liénard et al., 2004)	11
Figure 5 : Schéma d'un procédé de lagunage aéré (FNDAE 22, 1998)	12
Figure 6 : Lagune envahie par les lentilles d'eau	13
Figure 7 : Piège à lentilles d'eau (d'après MAGE 42, 2006)	14
Figure 8 : Seuil déversoir aménagé (gauche), pelle murale opérationnelle (centre), zone de récupération des lentilles (droite)	15
Figure 9 : Technique de concentration des lentilles d'eau pour faciliter leur évacuation (MAGE 42, 2006)...	15
Figure 10 : Raclage de surface et récupération des lentilles au godet étanche	16
Figure 11 : Aspiration des lentilles d'eau sur une lagune	16
Figure 12 : Lagune avant/après l'entretien des berges et l'aspiration des lentilles	17
Figure 13 : Berges dégradées et lentilles d'eau	19
Figure 14 : Réhabilitation des berges par reprofilage et empierrage	20
Figure 15 : Lagune avant/après la réhabilitation des berges	21
Figure 16 : Exemple de dégâts occasionnés sur les berges d'une lagune par des ragondins	22
Figure 17 : Dispositif de piégeage des ragondins	22
Figure 18 : Caïman gris dans une lagune en Guyane	23
Figure 19 : Exemple d'ajout de chicanes dans une lagune (d'après McLaughlin, 2015)	23
Figure 20 : Exemple de géomembranes en PP-F (gauche) et PEHD (droite)	26
Figure 21 : Succession de matériaux pour l'étanchéification des lagunes par géomembrane	26
Figure 22 : Poches de gaz ou d'eau sous la géomembrane	27
Figure 23 : Exemple d'événement de dégazage	27
Figure 24 : Augmentation de la surface des lagunes par création d'un 4 ^{ème} bassin (à droite, en cours de construction)	28
Figure 25 : Exemple de dimensionnement de lagunes réhabilitées avec un FPRv en tête de station pour un climat tempéré	29
Figure 26 : Exemple de lagunes réhabilitées avec un FPRv en tête de station	31
Figure 27 : Construction de 2 étages de FPR lors de la réhabilitation d'une lagune avec conservation de 2 lagunes	31
Figure 28 : Exemple de lagunes réhabilitées avec un FPR en aval des lagunes	35
Figure 29 : Exemple de végétaux recouvrant des lagunes, macrophytes (gauche) et radeaux flottants (droite) (Source inconnue)	35
Figure 30 : Couverture flottante végétalisée de lagunes	36
Figure 31 : Exemple de filtres pour le tamisage tertiaire (Drumfilter à gauche ; Discfilter à droite)	36
Figure 32 : Exemple de rockfilters aéré (gauche) et non aéré (droite) intégrés à une lagune	37
Figure 33 : Ajout de turbines de surface alimentées par des panneaux solaires sur une lagune 1	38
Figure 34 : Ajout d'aérateur de surface à vis hélicoïdale sur une lagune 1	38
Figure 35 : Reprofilage en déblai-remblai pour la transformation d'une lagune en zone humide	40

Figure 36 : Transformation d'une ancienne lagune en zone humide (avant, en haut ; après, en bas)..... 41
Figure 37 : Exemple de phasage de travaux pour la construction d'un FPR à la place d'une lagune (SATESE 32)..... 42

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Comparaison entre le traitement des sols et les géomembranes pour l'étanchéité dans les lagunes</i>	<i>24</i>
<i>Tableau 2 : Comparaison entre les matériaux pour les géomembranes</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 3 : Exemples de lagunes réhabilitées avec un FPRv en tête de station</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 4 : Exemples de lagunes réhabilitées avec un FPR en sortie après la lagune</i>	<i>34</i>

SYNTHESE



I. Introduction

En 2021, il y avait 4 290 lagunes (lagunage naturel et lagunage aéré) en France. Les premières lagunes ont été construites à partir des années 1960 mais ce procédé a commencé à prendre de l'ampleur dans les années 1980. Aujourd'hui, l'âge médian des lagunes françaises est de 30 ans, comme le montre le diagramme en violon de la *Figure 1*. La plupart des lagunes de France ont été construites entre 1988 et 2001.

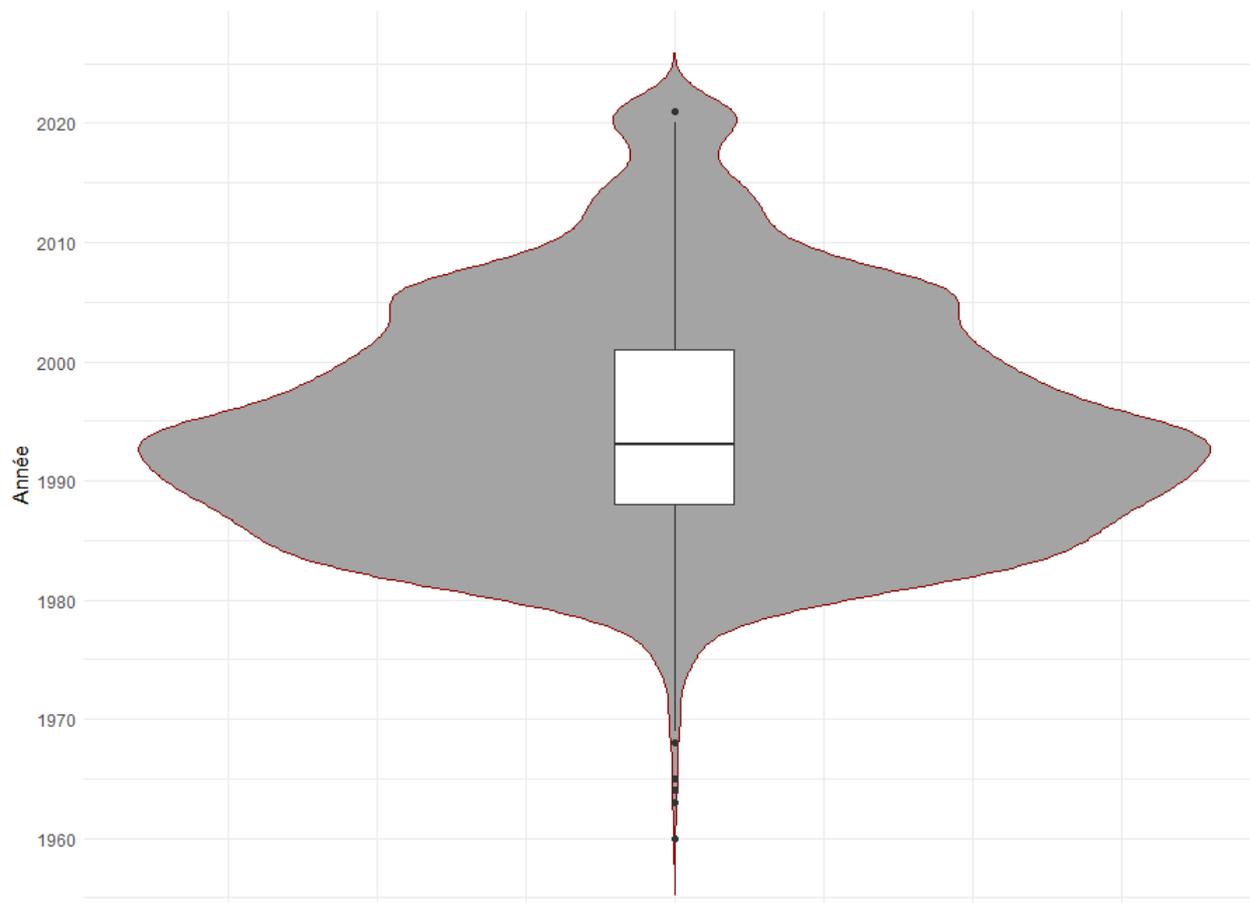


Figure 1 : Diagramme en violon représentant le nombre de lagunes construites en France par année (données issues du Portail assainissement - base de données sur les eaux résiduaires urbaines de 2021)

Le lagunage étant un procédé rustique adapté aux grandes surfaces disponibles, la majorité des lagunes est donc implantée dans des stations de traitement des eaux usées (STEU) de faible capacité (<500 EH, comme le montre la boîte à moustache en Figure 2). Néanmoins, certaines STEU avec un procédé de lagunage peuvent avoir des capacités nettement supérieures : 5 stations françaises ont une capacité nominale supérieure à 30 000 EH !

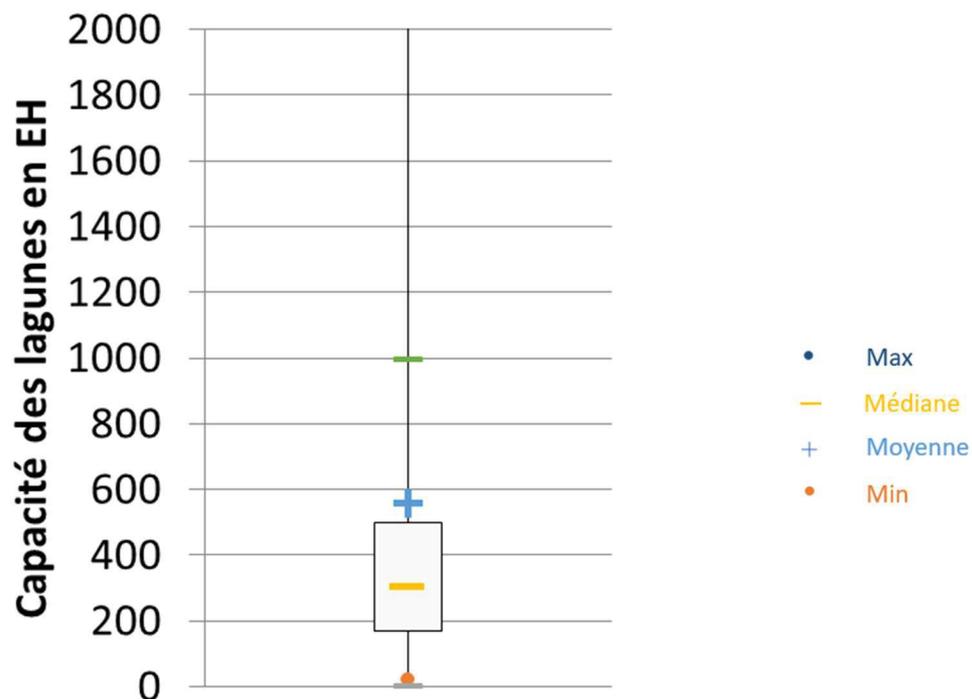


Figure 2 : Diagramme en boîte à moustache représentant la capacité nominale des lagunes construites en France en Equivalents Habitants (EH) (données issues du Portail assainissement - base de données sur les eaux résiduaires urbaines de 2021)

Le département français qui possède le plus de lagunes est la Saône et Loire (71) avec 383 lagunes. En termes de capacité de traitement, le département français qui possède la plus grande capacité de traitement par lagunage est l'Hérault (34), avec 191 717 EH pour 57 lagunes dont plusieurs de grande capacité.

FOCUS DROM Le département ultramarin qui possède le plus de lagunes est la Guyane dont presque la moitié de la capacité nominale est traitée par des lagunes.

De nombreuses lagunes sont vieillissantes ou ne respectent plus les niveaux de rejets imposés, à cause d'une augmentation de la charge reçue ou à cause de contraintes réglementaires plus importantes (niveaux de rejet plus bas exigés). C'est pourquoi, il est parfois nécessaire de réhabiliter ces lagunes. Les bureaux d'étude proposent souvent de changer de procédé lors de la réhabilitation d'une station, notamment de remplacer le lagunage par des filtres plantés de roseaux (FPR) ou des filtres plantés de végétaux (FPV) en outre-mer. Néanmoins, il peut être intéressant de conserver les lagunes car il s'agit d'un procédé très rustique, qui ne nécessite pas d'énergie une fois les effluents arrivés en tête de station, relativement facile à exploiter (mis à part les opérations de curage), adapté aux réseaux unitaires et qui permet un stockage des effluents traités. De plus, il possède des capacités d'élimination des pathogènes, ce qui peut être intéressant pour un objectif de réutilisation des eaux usées traitées (REUT). En outre, en été, grâce à l'évaporation, il peut y avoir peu (voire pas) de rejets d'eaux usées traitées, ce qui peut permettre de limiter l'impact de la station sur les cours d'eau à l'étiage.

C'est pourquoi le groupe Epnac a démarré une étude en 2020 sur la réhabilitation des lagunes dans le cadre de son atelier « Réhabilitation ». L'objectif de ce document est de fournir des recommandations pour les projets de réhabilitation des lagunes, basées sur des retours d'expérience de réhabilitation effectives, afin d'éviter si possible le recours systématique à une reconstruction totale de la station.

II. Présentation du procédé de lagunage

II.1 Lagunage naturel

L'épuration par lagunage naturel repose sur la présence équilibrée de bactéries aérobies en cultures libres et d'algues. L'oxygène nécessaire à la respiration bactérienne est produit uniquement grâce aux mécanismes photosynthétiques des végétaux en présence de rayonnements lumineux (FNDAE 22, 1998).

Le dimensionnement classique des stations n'a pas évolué depuis de nombreuses années : la surface de bassins recommandée est de 11 m²/EH en trois bassins (Figure 3) :

- La première lagune (6 m²/EH) permet l'abattement prépondérant de la charge carbonée et la décantation des MES. En sortie de ce bassin, la concentration en algues microscopiques peut être importante.
- La deuxième lagune (2,5 m²/EH) permet un abattement de l'azote, du phosphore et une réduction de la concentration en algues.
- La troisième lagune (2,5 m²/EH) permet l'affinage du traitement. Elle est aussi utile pour conserver une bonne qualité de traitement lors d'un incident (dysfonctionnement) ou d'une opération d'entretien (curage) survenant sur le premier bassin.

La forme de la lagune ne doit pas favoriser un comportement piston de l'écoulement pour limiter les surcharges organiques en tête. Une forme ramassée est donc recommandée avec ratio longueur/largeur ≤ 3 (Racault et al., 2006).

La profondeur des bassins est de 1 à 1,2 m au maximum afin d'éviter la pousse des végétaux supérieurs (macrophytes), de permettre une pénétration de la lumière et donc une oxygénation suffisante grâce à la photosynthèse, et de limiter les effets d'une éventuelle stratification thermique des bassins (risque d'inversion de couches et donc de remontées de boues de fond de bassin).

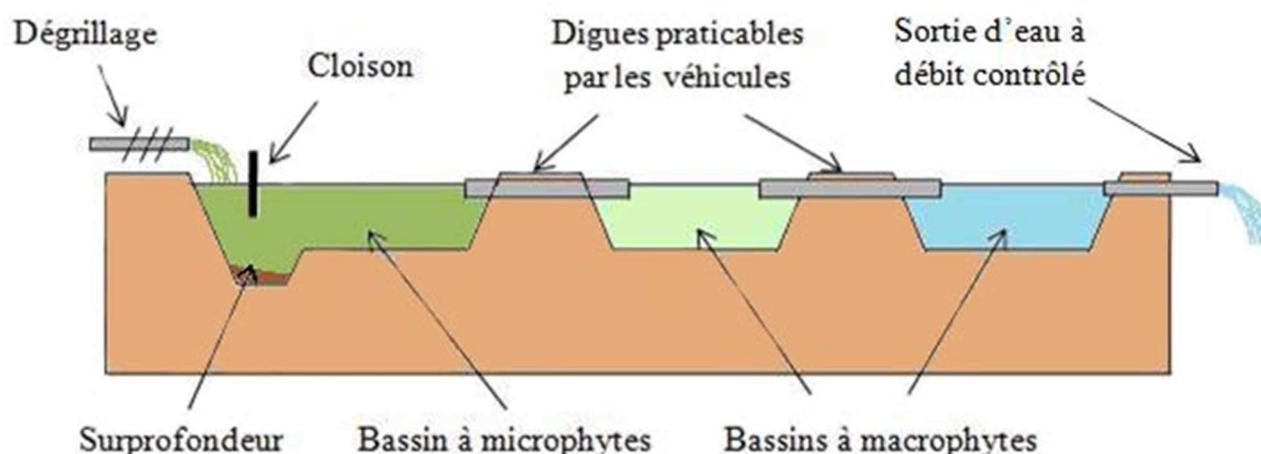


Figure 3 : Schéma d'un procédé de lagunage naturel d'après Racault et al., 1997 (Atelier thématique Epnac « Guide d'exploitation » - Lagunage naturel, 2018)

FOCUS DROM

Le dimensionnement des lagunes est assez différent en outre-mer du fait du climat : les lagunes peuvent être plus compactes. En Guyane par exemple, en général, les lagunes naturelles sont dimensionnées à 5 m²/EH au total (avec une répartition respective par bassin de 3, 1,5 et 1,5 m²/EH, appliquant la formule de Mara (Mara, 1997)) et des temps de séjour d'environ 30 jours.

Les avantages et les inconvénients du lagunage naturel sont les suivants :

- ✓ Procédé très rustique, facile à exploiter
 - ✓ Pas besoin d'électricité une fois les effluents arrivés en tête de station => économies d'énergie
 - ✓ Bons rendements d'élimination sur les nutriments (azote global et phosphore total)
 - ✓ Procédé adapté aux réseaux unitaires qui accepte les effluents dilués et les surcharges hydrauliques
 - ✓ Bonne élimination des germes pathogènes en été (si le développement d'algues et de lentilles d'eau est faible en surface)
- ! Emprise au sol très importante
 - ! Élimination moyenne de la matière organique (DCO, DBO)
 - ! Qualité du rejet variable selon les saisons
 - ! Forte sensibilité aux effluents concentrés et/ou septiques (virages bactériens, odeurs nauséabondes)
 - ! Rejet de MES potentiellement important, surtout avec le développement d'algues et de lentilles d'eau (accentué par le réchauffement climatique)
 - ! Contraintes d'exploitation ponctuelles lourdes (curages de boues liquides), contraintes d'exploitation après curage en cas de détérioration de la membrane
 - ! Maîtrise limitée de l'équilibre biologique et des processus épuratoires

Les performances attendues du lagunage naturel sont rassemblées en Figure 4 (Liénard et al., 2004) :

	DCO		DCOf		MES		NK		PT	
	% Rend.	Sortie mg.l ⁻¹								
Moyenne	78	141	86	85	79	54	72	19	66	7,5
Écart-type	16	69	9	37	20	41	23	11	24	6,0

Rendements en flux [(charge en entrée – charge en sortie)/charge en entrée].
DCOf = mesures réalisées sur échantillons filtrés.

Figure 4 : Rendements et concentrations de l'effluent de lagunages naturels installés à l'aval de réseaux d'assainissement non séparatifs (Liénard et al., 2004)

Les performances sont très variables (écarts-types élevés), notamment à cause de l'influence des conditions météorologiques saisonnières : l'abattement de l'azote global (NGL) et du phosphore total (Pt) est meilleur en été grâce à la photosynthèse algale mais des pics de DCO sont également observés en été.

Les performances des lagunes sur l'abattement du Pt diminuent avec l'accumulation de boues dans les bassins.

Le lagunage naturel permet un abattement des pathogènes en été (abattement de l'ordre de 3 à 4 Ulog) (FNDAE 22, 1998).

II.2 Lagunage aéré

Le lagunage aéré est un procédé de traitement biologique principalement aérobie, en cultures libres qui se différencie des boues activées par l'absence de recirculation des boues. La population bactérienne y est donc en équilibre avec le substrat carboné, ce qui a deux conséquences :

- la densité des bactéries y reste modeste, ce qui oblige à un temps de traitement long pour obtenir un résiduel dissous peu important ;
- la floculation est relativement peu prononcée ce qui contraint à la mise en œuvre d'une lagune de décantation largement dimensionnée, siège d'une séparation lente.

Une station avec un lagunage aéré comprend donc généralement deux bassins :

- une lagune aérée équipée d'aérateurs de surface ;
- puis une lagune de décantation.

La lagune aérée a une profondeur d'au moins 2,5 à 3 m (profondeur croissante avec la puissance unitaire

des aérateurs). La lagune de décantation a une profondeur typique de 2 m pour laisser 1 m d'eau libre avant le soutirage des boues.

Selon la taille de la station, il peut y avoir une seule lagune de décantation avec un temps de séjour de cinq jours, ou deux lagunes fonctionnant en alternance et possédant un temps de séjour plus faible (4 jours). Tous les deux ans environ, il est nécessaire de procéder à l'extraction des boues, ce qui est facilité par la configuration avec deux lagunes de décantation (FNDAE 22, 1998).

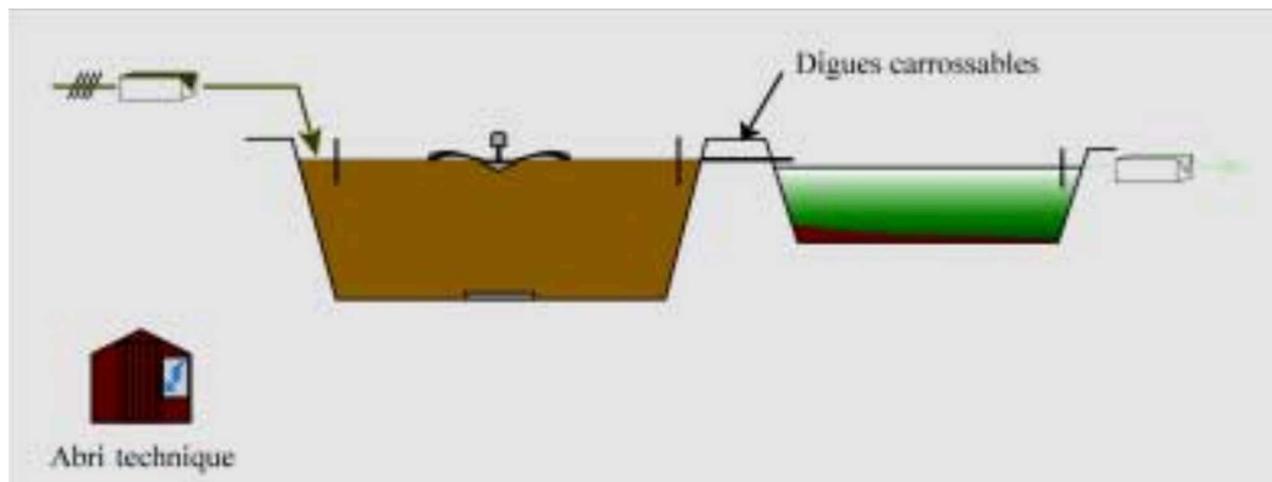


Figure 5 : Schéma d'un procédé de lagunage aéré (FNDAE 22, 1998)

Les avantages et les inconvénients du lagunage aéré sont les suivants :

- Procédé assez rustique
- Procédé adapté aux variations de charges hydrauliques ou organiques importantes
- Bonne tolérance face aux effluents très concentrés, déséquilibrés en nutriments ou même face à l'arrivée occasionnelle de produits toxiques

!

- Rejets d'une qualité moyenne sur tous les paramètres
- Présence de quelques matériels électromécaniques nécessitant un entretien spécifique
- Procédé énergivore (en comparaison avec le lagunage naturel)
- Sensibilité à un mauvais dégrillage en amont (problème sur les aérateurs en présence de lingettes par exemple)

Les performances attendues sont les suivantes :

- DBO₅ : 35 mg/l
- Azote et phosphore : élimination de l'ordre de 25-30% (très peu d'élimination au-delà de l'assimilation par les bactéries)

Le terme "lagunage aéré" pourrait conduire à penser que les processus en cause sont voisins de ceux du lagunage naturel, ce qui n'est pas le cas. Un développement d'algues microscopiques n'est réellement notable qu'en situation de nette sous-charge, aggravée par des apports d'eaux salées. L'absence d'algues conduit à une teneur faible du rejet en MES mais à un taux d'élimination réduit de l'azote et du phosphore. Les différences sont aussi notables en matière d'élimination de pathogènes (FNDAE 22, 1998).

III. Que faire si le rejet se dégrade ?

Une réhabilitation des lagunes peut être nécessaire en cas de dégradation du rejet. De nombreuses causes peuvent en être à l'origine : défaut d'entretien de la lagune, absence de curage, perte d'étanchéité, dégradation des berges, invasion de nuisibles, surcharge hydraulique ou organique... Des solutions à ces problématiques sont présentées dans les paragraphes suivants.

III.1 Importance de l'entretien

Le lagunage est un procédé rustique mais qui nécessite un minimum d'entretien. Un passage hebdomadaire sur la station est nécessaire afin de réaliser les opérations de suivi suivantes : relevés de compteurs, nettoyage du dégrilleur, du by-pass et du déversoir d'orage en tête de station ainsi que des ouvrages de mesure de débit, vérification du bon écoulement de l'eau et de l'absence de flottants, contrôle de la couleur de l'eau (Atelier thématique Epnac « Guide d'exploitation » - Lagunage naturel, 2018).

III.1.1 Lutte contre les espèces végétales envahissantes en surface

Le lagunage nécessite une surveillance accrue de la prolifération d'espèces végétales aquatiques envahissantes qui apprécient les eaux stagnantes : lentilles et azolla en surface de bassin, diverses espèces sur les berges (roseaux, massettes...). Pour des végétaux flottants de type lentilles ou azolla, la surface colonisée s'accroît rapidement et peut atteindre une couverture totale en quelques jours en période estivale.

FOCUS DROM

On retrouve également des lentilles en outre-mer (majoritaires) mais aussi d'autres végétaux moins connus : *Callitriche*, *Pistia stratiotes* (laitue d'eau), *Spirodela*, nénuphar, ipomée, *Ludwigia*...

La prolifération des végétaux flottants, comme les lentilles d'eau (Figure 6), bloque la photosynthèse des algues en suspension et les échanges atmosphériques, sources de l'oxygénation des bassins. Or l'oxygène est essentiel au traitement des eaux usées.

La présence de végétaux flottants peut entraîner :

- Une qualité d'eau traitée dégradée et non conforme ;
- Un développement de mauvaises odeurs ;
- Une augmentation de la production de boues.



Figure 6 : Lagune envahie par les lentilles d'eau

Les solutions préventives possibles pour limiter l'invasion d'espèces végétales flottantes sont les suivantes :

- **Implantation de canards qui vont brouter ces lentilles** (4 à 5 canards par site). Des mangeoires et nichoirs ou un îlot au milieu de la troisième lagune doivent être aménagés pour sédentariser les oiseaux. La présence de canards ne semble néanmoins pas être une garantie d'empêcher le développement de lentilles. Il reste toutefois utile d'encourager la présence de ces oiseaux pour combattre les lentilles d'eau au début de leur implantation (MAGE 42, 2007). Les canards peuvent cependant être à l'origine d'une hausse de la concentration en pathogènes dans les lagunes à cause de leurs déjections. Les îlots à canards facilitent la vie de ces animaux mais l'expérience a montré qu'ils génèrent des contraintes d'entretien supplémentaires à cause de la difficulté d'accès. Ils ne sont plus préconisés désormais, mais des nichoirs flottants peuvent les remplacer (Saône et Loire, 2018).
- **Communications entre bassins par batardeaux** ou avec un té siphon, de manière à limiter la contamination entre les différentes lagunes. Cette solution est à privilégier.

Ces végétaux flottants se développant principalement en eaux calmes, l'installation de brasseurs de surface alimentés à l'énergie solaire, afin de créer un clapotis qui empêcherait les lentilles de s'installer, a été testée par INRAE mais n'a pas donné de résultats satisfaisants. Ces tests ont été effectués sur une Zone de Rejet Végétalisée de type « bassin » avec des brasseurs d'une puissance allant jusqu'à 700 W/m²/brasseur (variable en fonction du rayonnement solaire du site). Il semble que ces brasseurs ne permettent pas de contrer le développement des lentilles d'eau mais retardent au mieux leur développement au printemps d'un mois ou deux (Boutin et al., 2019).

Les solutions curatives à mettre en place en cas d'invasion avérée d'espèces végétales flottantes sont les suivantes :

- **Réalisation d'un piège à lentilles** pour les recueillir et les évacuer, par exemple comme sur la Figure 7 (à positionner en fonction des vents dominants pour une meilleure efficacité). Le piège à lentilles est un ouvrage spécifique construit en dehors de la lagune, qui peut comporter un ouvrage de captage de type « déversoir » ou « entonnoir » placé sous le vent dominant et une zone de récupération des lentilles en contrebas, comme le montre l'exemple de la Figure 8 (Saône et Loire, 2018). Il est cependant nécessaire pour cela de disposer d'un dénivelé suffisant entre le bassin où sont stockées les lentilles et l'endroit où on souhaite les récupérer. Quand cela est possible, l'installation d'un piège à lentilles, couplé à l'évacuation de celles-ci, s'avère souvent être une solution efficace mais qui demande un important temps d'exploitation pour les opérations d'évacuation des lentilles piégées.

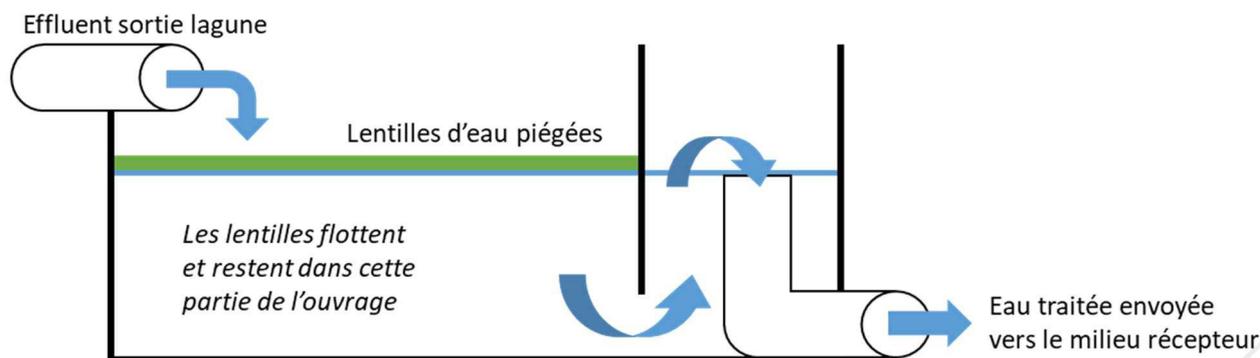


Figure 7 : Piège à lentilles d'eau (d'après MAGE 42, 2006)



Figure 8 : Seuil déversoir aménagé (gauche), pelle murale opérationnelle (centre), zone de récupération des lentilles (droite)

- **Concentration des lentilles dans une partie du bassin** comme détaillé en Figure 9. Pour que cette technique fonctionne de manière optimale, il est nécessaire d'appliquer ce protocole 1 fois par semaine de manière à éviter le retour des lentilles. Lorsque la concentration des lentilles en entrée des bassins devient trop importante, une extraction doit être prévue à l'aide d'un filet, par pompage ou au godet de fossé étanche (exemple en Figure 10). Renouveler l'opération une fois par semaine peut être fastidieux, cette solution est donc à utiliser dans l'attente d'une solution plus efficace.

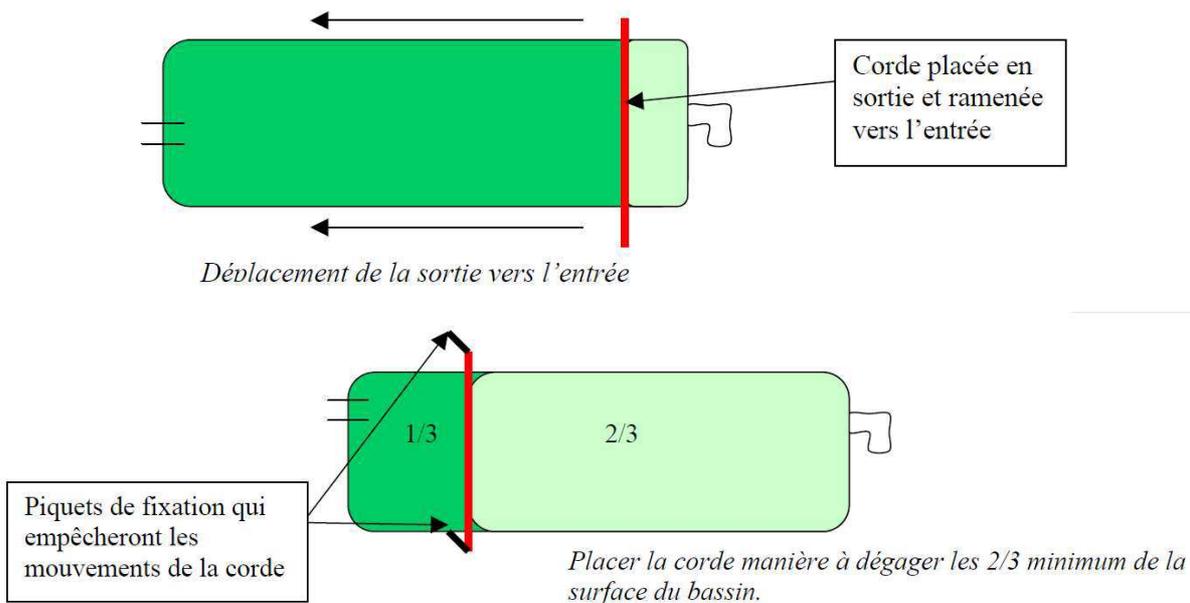


Figure 9 : Technique de concentration des lentilles d'eau pour faciliter leur évacuation (MAGE 42, 2006)



Figure 10 : Raclage de surface et récupération des lentilles au godet étanche

- **Extraction des lentilles par pompage pour tri mécanique** comme illustré sur la Figure 11. Différentes techniques existent pour extraire les lentilles après les avoir concentrées dans une partie du bassin : manuellement, véhicule amphibie, pelle hydraulique, aspirateur à lentilles... Parmi celles-ci, l'aspirateur à lentilles semble se démarquer comme une solution efficace et innovante qui permet de traiter de grandes surfaces de lagunes et de déshydrater les lentilles afin de faciliter leur transport et leur valorisation à des coûts raisonnables. Cette solution est particulièrement adaptée aux stations où les lentilles ont envahi tous les bassins et recouvert totalement leur surface, dans lesquelles un piège à lentilles ne suffit plus.



Figure 11 : Aspiration des lentilles d'eau sur une lagune

Il est cependant nécessaire de réaliser un entretien global de la station pour éviter le retour des lentilles. En effet, les anfractuosités des berges favorisent l'implantation des lentilles car ce sont des zones peu agitées. L'emploi de désherbants, y compris ceux « adaptés » aux milieux aquatiques, est à proscrire à cause de leur inefficacité et de leur impact environnemental.

Dans tous les cas, les lentilles récupérées ne doivent pas rejoindre le milieu naturel, ni stagner dans un fossé où elles se décomposeraient. Elles peuvent être utilisées en compostage ou épandues en couches minces sur le terrain afin qu'elles sèchent et s'incorporent progressivement dans la végétation. Si le lagunage reçoit des effluents autres que domestiques, il est conseillé de prévoir une analyse de type caractérisation des boues d'épuration (valeur agronomique, métaux lourds et micropolluants organiques) pour vérifier l'innocuité de l'épandage des lentilles (Saône et Loire, 2018).

III.1.2 Faucardage des berges

Les végétaux enracinés colonisant les berges (roseaux, joncs, îlots herbeux), s'ils ne sont pas contrôlés, risquent d'envahir en quelques années les bassins : ils empêchent l'accès aux berges, entraînent un apport de matière organique, favorisent le développement de végétaux flottants (lentilles) et l'installation de faune (rongeurs mais aussi canards...). Il est nécessaire de les faucarder puis de les extraire depuis les berges une fois par mois, particulièrement au printemps et en été (Atelier thématique Epnac « Guide d'exploitation » - Lagunage naturel, 2018). Il peut être intéressant de réaliser un faucardage raisonné permettant le maintien de l'accès aux bassins tout en préservant la biodiversité.

De même, la végétation des digues et le développement d'arbres ou arbustes en bordure du site doivent être contrôlés afin d'éviter un apport de matière organique par les feuilles mortes en automne. Les plantes coupées doivent être évacuées hors des lagunes.

Des berges mal entretenues, comme sur la photo du haut de la Figure 12, peuvent être à l'origine de dysfonctionnements de la station.



Figure 12 : Lagune avant/après l'entretien des berges et l'aspiration des lentilles

III.1.3 Curage de la zone du cône de sédimentation

Une surprofondeur d'une hauteur maximale de 2 m, positionnée au droit du débouché de la canalisation d'aménée des eaux dans le premier bassin, comme le montre la Figure 3, est utile pour faciliter la récupération des boues du cône de sédimentation. Son curage doit être intégré à l'exploitation courante et réalisé entre une fois par an et une fois tous les 5 ans (à adapter en fonction des dépôts effectifs constatés par sondage). En effet, dans cette zone où les vitesses d'écoulement sont plus faibles, une sédimentation plus importante que sur le reste du bassin est observée. Cette zone peut occuper quelques dizaines de m² pour des bassins de petite taille et 1 à 2% de la surface pour des grandes lagunes. La méthode conseillée pour ce curage est le pompage liquide avec ou sans abaissement du plan d'eau (Racault et al., 1997).

Le dépôt au niveau du cône de sédimentation, s'il n'est pas curé régulièrement, peut occasionner des nuisances perceptibles : affleurement en surface, odeurs, gêne à l'écoulement... et ainsi dégrader les performances de traitement dans la lagune (FNDAE 1, 1985).

Attention néanmoins, le curage régulier du cône de sédimentation ne permet pas de s'abstenir du curage des bassins car les boues s'accumulent tout de même dans tous les bassins.

III.2 Curage des bassins

Comme tout dispositif d'épuration, le traitement par lagunage conduit à la production de boues issues de la décantation, qui comprennent les MES présentes dans les eaux usées ainsi que les algues et les micro-organismes morts qui se développent dans les bassins. Les feuilles des végétaux présents à la périphérie des bassins ou sur le bassin (lentilles d'eau) s'ajoutent aux matières décantées (Racault et al., 1997).

La présence d'une masse de boue accumulée importante réduit le temps de séjour de l'eau dans la lagune. Elle n'est généralement pas à l'origine de dysfonctionnements tant que la hauteur de boue ne dépasse pas environ le tiers de la hauteur d'eau. La boue stockée est en principe très stabilisée ; cependant, après cinq à dix années sans enlèvement des boues, les abattements en phosphore ont tendance à diminuer en raison de phénomènes de relargage (anaérobiose). Une accumulation excessive de boues peut également entraîner des remontées de boues dans la lagune. Il est donc important de prévoir le curage des lagunes afin d'éviter d'observer une baisse de leurs performances de traitement (FNDAE 33, 2005).

Les curages doivent être réalisés lorsque le volume de boues atteint 25-35 % du volume utile du bassin ou que la hauteur de boues est proche de 0,25-0,30 m. Le rythme d'accumulation des boues étant très variable suivant les installations, il est difficile de donner un âge moyen ; en pratique, le curage des boues est à prévoir tous les 8 à 15 ans (Atelier thématique Epnac « Guide d'exploitation » - Lagunage naturel, 2018).

FOCUS DROM

De par le climat chaud et humide des zones tropicales et équatoriales, on peut observer une très forte minéralisation des boues et donc une accumulation plus lente dans les bassins en outre-mer (dans des conditions normales de fonctionnement). En Guyane, plusieurs lagunes qui ont entre 15 et 20 ans de fonctionnement n'ont jamais été curées sans que cela entraîne des dysfonctionnements.

Le curage doit être très précautionneux si l'étanchéité de la lagune est réalisée par une géomembrane. En effet, le percement de la membrane entraîne de nombreux problèmes (perte d'étanchéité, apparition de « cloques » ...).

III.3 Réhabilitation des berges

La dégradation des berges, suite à l'action des animaux (ragondins, rats musqués) ou du batillage (remous causés par le vent), peut entraîner des courts-circuits hydrauliques, une baisse d'étanchéité dans la lagune ou encore une accumulation de terre, à l'origine d'une baisse des performances de traitement.

La présence d'anfractuosités dans les berges favorise également l'implantation des végétaux flottants (qui trouvent alors des zones sans vent avec des nutriments favorables à leur développement), comme illustré en Figure 13.



Figure 13 : Berges dégradées et lentilles d'eau

Afin de réduire les périodes de fonctionnement dégradé et pour optimiser les coûts d'intervention, la réhabilitation des berges peut être réalisée lors de la réalisation d'un curage des boues. Ce phasage permet également de reprofiler les berges sans mobiliser de résidus de boues.

La procédure suivante peut être mise en œuvre, après vidange de chaque lagune (SATESE 81, 2022) :

1. Décapage soigné des berges, reprofilage jusqu'en fond ;
2. Comblement des secteurs effondrés en tout-venant (sans gravats ni déchets) avec une attention particulière sur le maintien de l'étanchéité (l'apport de bentonite ou d'argiles peut être une solution) ;
3. Création possible d'une tranchée d'ancrage en bas de berges afin de limiter le risque d'éboulement du matériau ;
4. Compactage ;
5. Mise en œuvre d'argile ou de bentonite pour garantir l'étanchéité en particulier si la lagune a été créée avec une étanchéité rapportée ;
6. Mise en œuvre de concassé de type et calibre "anti-batillage" (70/200 mm voire 70/400 mm), sur une épaisseur de 40 cm, jusqu'en fond de bassin soit environ 0,9 m³/ml de berge pour une berge de 0,6 m au-dessus du plan d'eau) ;
7. Calage du concassé au godet de pelle mécanique.

La Figure 14 détaille le principe de la réhabilitation des berges par reprofilage et empierrage.

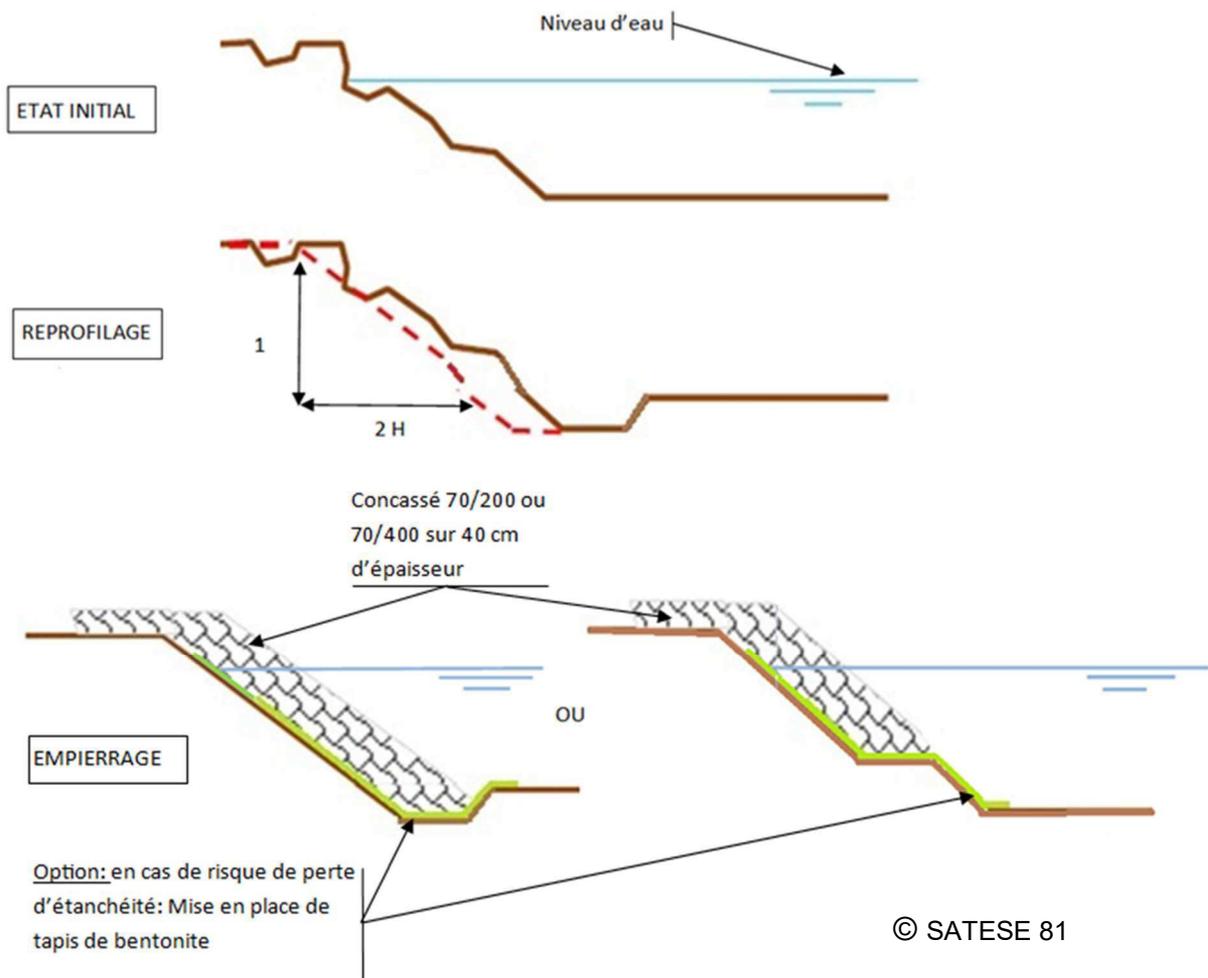


Figure 14 : Réhabilitation des berges par reprofilage et empierrement

La Figure 15 illustre l'exemple d'une lagune avant (haut) et après (bas) réhabilitation des berges.



Figure 15 : Lagune avant/après la réhabilitation des berges

Les montant des opérations s'échelonnent entre 50 et 80 € HT par mètre linéaire de berges traitées ; ce coût prend en compte la fourniture et mise en œuvre des matériaux (hors bentonite ou argile) (SATESE 81, 2022).

III.4 Lutte contre les animaux nuisibles

Les lagunes font souvent l'objet d'invasions par des rongeurs tels que les ragondins ou les rats musqués. Leurs galeries (Figure 16) peuvent créer des problèmes hydrauliques et de sécurité lorsqu'ils détériorent les digues (écroulement des digues lors du passage d'engins lourds).



Figure 16 : Exemple de dégâts occasionnés sur les berges d'une lagune par des ragondins

Pour lutter contre leur prolifération, des campagnes de piégeage régulières (2 fois/an environ), à l'aide de cages spécifiques (Figure 17), peuvent être réalisées par du personnel assermenté (se renseigner auprès de la Fédération de Chasse locale), sur demande du maître d'ouvrage. Certains départements recommandent un piégeage continu des ragondins, classés « espèces susceptibles d'occasionner des dégâts » sur l'ensemble du territoire métropolitain, tout au long de l'année.

Pour être efficace, les opérations de piégeages sont mises en place, de préférence en concertation avec les maîtres d'ouvrage qui assurent l'entretien des rives du cours d'eau limitrophe et avec les propriétaires de zones humides situées à proximité (Atelier thématique Epnac « Guide d'exploitation » - Lagunage naturel, 2018).



Figure 17 : Dispositif de piégeage des ragondins

FOCUS DROM

Comme pour les végétaux, des espèces animales moins connues sont retrouvées dans les lagunes en outre-mer : tortues, cabiai (ou capybara) ou encore caïmans (Figure 18) !



Figure 18 : Caïman gris dans une lagune en Guyane

III.5 Ajout de chicanes

L'ajout de chicanes dans une des lagunes permet de limiter les courts-circuits hydrauliques et par conséquent améliorer l'efficacité hydraulique de la lagune (Shilton, 2001). Réaliser un nombre important de chicanes n'est pas l'idéal car cela risque de créer une zone en entrée avec une charge organique excessive pour maintenir une activité aérobie. A partir d'une charge de $100 \text{ gDBO}_5/\text{m}^3/\text{j}$ dans la zone d'entrée, des conditions anaérobies peuvent s'installer. Les seuils ne doivent pas être placés trop près des berges pour limiter leur érosion et il y a un risque d'accumulation de sédiments dans les angles qui peuvent causer des nuisances (affleurement en surface, odeurs, gêne à l'écoulement, voir partie III.1.3). La présence de chicanes se révèle inutile dans le premier bassin, elle conduit souvent à un accroissement des zones mortes (Racault et Boutin, 1984). En tout état de cause, elles doivent être adaptées au dispositif d'entrée des eaux et en nombre limité pour garantir une hydraulique optimisée du système (Shilton, 2006).

Il y a peu de retours d'expérience sur l'ajout de chicanes dans des lagunes à taille réelle. Une étude hydraulique (par exemple par traçage) est nécessaire afin d'évaluer la pertinence de cette solution.

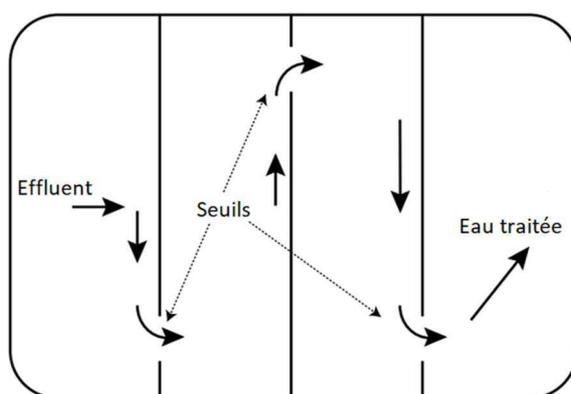


Figure 19 : Exemple d'ajout de chicanes dans une lagune (d'après McLaughlin, 2015)

III.6 Etanchéité des bassins de lagunage

L'étanchéité des bassins est très importante afin d'éviter la pollution de la nappe phréatique éventuelle par infiltration d'eaux usées dans les sols et d'assurer un fonctionnement hydraulique normal de la lagune (AERM, 2007).

Pour obtenir un fonctionnement correct de l'ouvrage, il convient de s'assurer que les débits des apports (eaux usées + pluviométrie) sont supérieurs à ceux des pertes (infiltration + évaporation) ou au moins égaux en période la plus défavorable (la plus sèche et/ou la plus chaude). Pour limiter l'infiltration à un niveau techniquement réaliste, une perméabilité maximale d'un fond de bassin de 10^{-8} m/s doit être respectée (Boutin et al., 1998). Si les terrains ont une perméabilité supérieure à cette valeur, il faudra prévoir, dès la conception, des travaux d'étanchéification (du fond et éventuellement des digues) pour ramener la perméabilité à la valeur acceptable mentionnée précédemment. Les méthodes possibles sont :

- le compactage dans les conditions de réalisation définies par les mesures de laboratoire complémentaires (solution la plus économique quand le sol en place le permet, sols argileux par exemple) ;
- le traitement des sols (on utilise souvent la bentonite, l'argile ou encore la latérite en outre-mer). Il est nécessaire d'apporter 20 à 30 cm de minéral argileux ; la teneur en argile à incorporer au matériau en place doit être déterminée en laboratoire (Boutin et al., 1998) ;
- la pose d'une géomembrane, ancrée au sommet des digues. La surface à couvrir doit être exempte de parties saillantes. La réalisation des joints entre les différents panneaux de la géomembrane est toujours une opération délicate (Boutin et al., 1998).

Les matériaux argileux pour l'étanchéification des sols ne sont pas toujours disponibles selon les territoires. En France métropolitaine, les matériaux argileux viennent principalement du centre de la France. Leur coût peut donc être très élevé dans des régions éloignées, ce qui entraîne le risque que les fournisseurs proposent des matériaux déclassés pour limiter les coûts. Dans ces cas-là, l'étanchéité par membrane peut être la solution à privilégier.

Le Tableau 1 résume les avantages et les inconvénients de l'étanchéification des lagunes par traitement des sols ou par géomembrane.

Avantages /inconvénients	Traitement des sols (argile, bentonite) ou géomembranes
Coût	Surcoût très variable selon la disponibilité des matériaux argileux, le surcoût peut être de 20 à 30% pour les géomembranes si les matériaux argileux sont disponibles localement (FNDAE 22, 1998 ; Office de l'Eau de Guyane, 2022).
Biodiversité	Les lagunes avec des berges naturelles sont plus favorables au développement de la biodiversité (les oiseaux s'abritent plus facilement dans les berges par exemple, si elles ne sont pas systématiquement totalement fauchées)
Température	La géomembrane (souvent de couleur foncée) peut augmenter significativement la température dans la lagune, ce qui peut entraîner une présence plus importante de végétaux flottants mais qui est favorable pour l'activité biologique responsable du traitement dans la lagune
Végétaux flottants (lentilles)	Les végétaux flottants sont plus souvent observés dans les lagunes avec des géomembranes du fait des températures plus élevées, d'une sédimentation plus difficile à cause des échanges réduits entre le sol et les boues rendant le phosphore davantage biodisponible et des pertes de nutriments par infiltration réduites
Etanchéité	Etanchéité parfaite difficile à garantir avec un traitement des sols (craquèlement en cas de sécheresse)
Durée de vie	La durée de vie des géomembranes dépend du matériau utilisé (voir paragraphe ci-après)
Curage	Le curage des lagunes munies de géomembranes doit être extrêmement précautionneux pour éviter de percer la membrane

Tableau 1 : Comparaison entre le traitement des sols et les géomembranes pour l'étanchéité dans les lagunes

Sur les lagunes existantes non équipées de système de dégazage, les coûts de changement de la géomembrane et d'installation d'un système de dégazage peuvent être significatifs par rapport au coût du renouvellement total des ouvrages (avec changement de procédé de traitement).

III.6.1 Quels matériaux pour les géomembranes ?

Les géomembranes sont des membranes minces et souples dont la fonction est d'assurer l'étanchéité des bassins (Comité français des géosynthétiques, 2017). Les géomembranes habituellement utilisées par les constructeurs de stations de traitement des eaux usées sont des géomembranes polymériques dont il existe 4 grandes familles chimiques :

- le polychlorure de vinyle plastifié (PVC-P),
- le polyéthylène haute densité (PEHD),
- le polypropylène flexible (PP-F),
- et l'éthylène-propylène diène terpolymère (EPDM).

PVC, PEHD et PP sont des plastomères (ou polymères thermoplastiques) susceptibles d'être successivement ramollis par apport de chaleur et durcis par refroidissement pour en assurer l'assemblage. L'EPDM est un élastomère, polymère retrouvant rapidement sa dimension initiale après cessation des contraintes ; cette caractéristique est obtenue en usine par vulcanisation, opération qui rend en particulier le produit infusible (Comité français des géosynthétiques, 2017). La vulcanisation est un procédé chimique qui consiste à incorporer du soufre, ou tout autre agent vulcanisant, dans un élastomère brut. Cette opération rend notamment le matériau moins plastique mais plus élastique.

Les principales caractéristiques de ces matériaux sont définies dans le Tableau 2.

Matériau	Caractéristiques	Utilisation en stations de traitement des eaux usées
EPDM	Elasticité et flexibilité importantes, préfabrication de grandes bâches à la taille souhaitée permettant d'éviter les soudures sur place	L'EPDM n'est plus proposé par les constructeurs car les végétaux (roseaux notamment) percent la membrane. Faible résistance chimique et sensibilité aux UV Epaisseur recommandée : 1,5 mm
PEHD	Résistance chimique élevée, fabriqué en rouleaux de grande largeur permettant de réduire le nombre de soudures dans un ouvrage	Matériau très robuste, durée de vie très élevée (plusieurs centaines d'années !) avec toutefois des difficultés de pose pour les formes complexes de bassin, à cause de sa rigidité. Epaisseur minimum : 1,5 mm
PP-F	Compromis entre souplesse et résistance chimique, fabriqué en rouleaux de grande largeur permettant de réduire le nombre de soudures dans un ouvrage	Matériau souple qui épouse mieux les revanches mais moins résistant que le PEHD, durée de vie élevée (plusieurs dizaines d'années)
PVC-P	Souplesse, large choix de couleur, préfabrication possible	Ne résiste pas très bien aux UV, durée de vie limitée (de quelques années à quelques dizaines d'années) Epaisseur recommandée : 1,5 mm

Tableau 2 : Comparaison entre les matériaux pour les géomembranes

Les matériaux les plus souvent proposés par les constructeurs en 2023 sont donc le PP-F et le PEHD, illustrés sur les photos ci-dessous dans deux STEU.



Figure 20 : Exemple de géomembranes en PP-F (gauche) et PEHD (droite)

III.6.2 Drainage des eaux et des gaz avec géomembrane

Avant la pose d'une géomembrane, un système de drainage des eaux souterraines et de dégazage doit être installé, comme le montre la Figure 21, afin de permettre l'évacuation des eaux et des gaz qui peuvent s'accumuler sous la membrane.

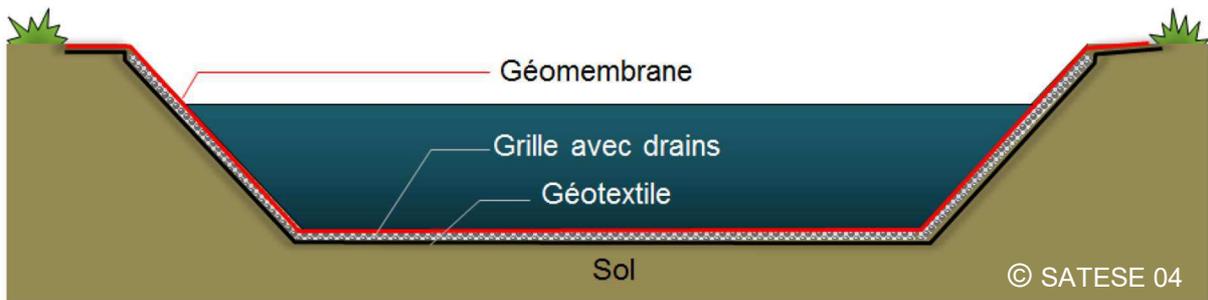


Figure 21 : Succession de matériaux pour l'étanchéification des lagunes par géomembrane

Si le drainage n'est pas correct des « cloques » (poches de gaz), parfois appelées « hippopotames », peuvent être observées dans les bassins, tel qu'illustré en Figure 22.



Figure 22 : Poches de gaz ou d'eau sous la géomembrane

Ces cloques, outre le fait de diminuer le volume utile des bassins, peuvent créer des chemins préférentiels et ainsi perturber l'hydraulique des lagunes, ce qui risque de favoriser l'accumulation des boues dans certains espaces et au final de dégrader le traitement.

Le dégazage, une fois la membrane posée, est réalisé par des événements de dégazage ou chapeaux de ventilation, comme sur la Figure 23. Si l'entretien des berges est fait de manière mécanisée (par épaveuse par exemple), il arrive fréquemment que les événements de dégazage soient cassés et ne puissent plus jouer leur rôle, ce qui peut mener à des situations comme celle de la Figure 22. Il est donc préférable de faire l'entretien des bordures où se trouvent les événements de dégazage manuellement.

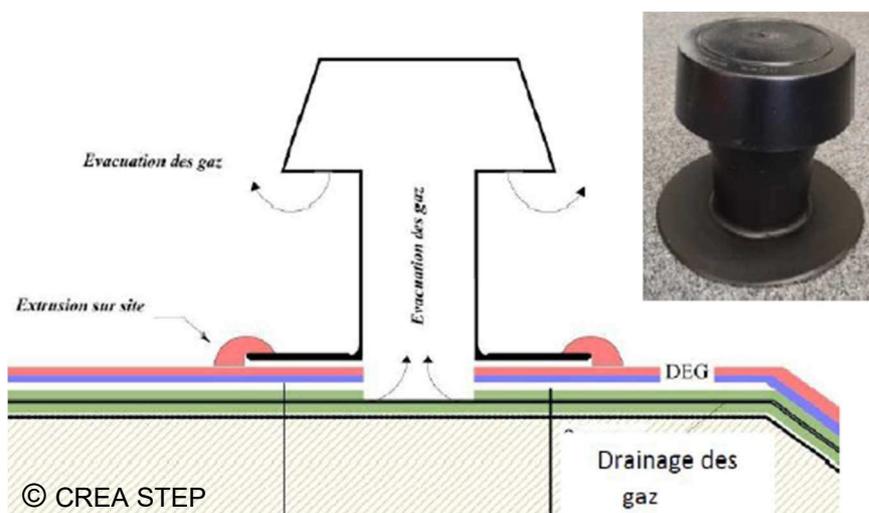


Figure 23 : Exemple d'événement de dégazage

Des retours d'expérience montrent que le souci d'apparition de « cloques » dans les lagunes étanchéifiées par géomembranes est récurrent, malgré un drainage correct des eaux et des gaz. Certains fournisseurs proposent d'ajouter des lestés (sacs de sable répartis tous les 4 m² en fond de bassin) pour lutter contre ce problème. L'ajout de lest peut augmenter significativement le coût de l'étanchéification (coût proche de celui de la géomembrane pour l'ensemble des lestés !). De surcroît, l'impact de cette solution sur l'accumulation et le curage des boues reste à évaluer.

III.7 Augmentation de la taille de la lagune

En cas de surcharge organique et hydraulique, si le foncier est disponible, une solution peut être d'augmenter la taille des lagunes pour augmenter la capacité de traitement. La photo de la Figure 24 illustre le quasi doublement de capacité d'une lagune (500 EH à 850 EH) grâce à la construction d'une nouvelle lagune à côté des 3 premières, soit un triplement de la surface totale des lagunes. Dans ce cas, les règles de dimensionnement en termes de surface et de charges organique par bassin restent identiques et basées sur la nouvelle capacité de traitement.



Figure 24 : Augmentation de la surface des lagunes par création d'un 4^{ème} bassin (à droite, en cours de construction)

III.8 Ajout d'un Filtre Planté de Roseaux en amont

Dans l'objectif d'accroître la capacité nominale initiale de la station d'épuration (augmentation des flux de pollution à traiter), il est possible de mettre en place en amont ou à la place de la première lagune un filtre planté de roseaux à écoulement vertical (FPRv) librement drainé ou bien avec fond saturé.

La filière se décompose alors comme ci-dessous :

1. Dégrillage des eaux usées brutes (manuel ou automatique) ;
2. Ouvrage d'alimentation séquentielle par bâchées ;
3. Création d'un étage de trois filtres plantés de roseaux alimentés en alternance ;
4. Conservation de 2 ou 3 bassins.

Le dimensionnement du FPRv est classique : 3 casiers garnis de gravier d'une surface de l'ordre de 1,2 à 1,5 m²/EH selon les charges arrivant à la station (Boutin et al., 2007).

Points de vigilance :

- Cette modification de conception/dimensionnement nécessite de vérifier que la charge organique de la première lagune à l'aval du filtre ne soit pas supérieure à 8 g de DBO₅ par m² de lagune et par jour pour en climat tempéré pour s'assurer d'un fonctionnement aérobie. Dans le cadre d'une mise en place des filtres dans la première lagune (la plus grande), cela correspond à un doublement de la capacité de la station au maximum (voir exemple ci-après en Figure 25). Pour des augmentations de capacité plus importantes, la première lagune doit être conservée.

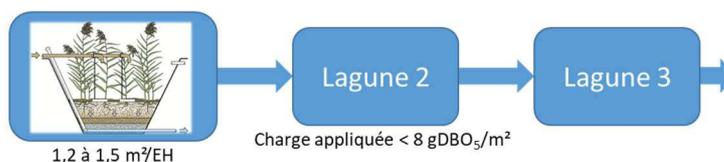
Configuration initiale :

3 bassins de lagunage
(exemple : 1 000 EH)



Doublement de la capacité :

remplacer la lagune 1 par un
FPR vertical classique
(exemple : 2 000 EH)



Forte augmentation de la capacité (x4) :

ajouter un FPR vertical
en tête de station
(exemple : 4 000 EH)

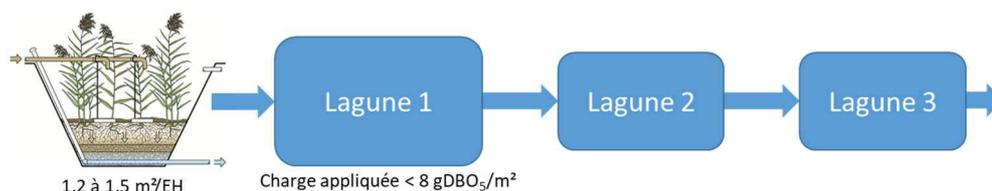


Figure 25 : Exemple de dimensionnement de lagunes réhabilitées avec un FPRv en tête de station pour un climat tempéré

FOCUS DROM

Comme pour le dimensionnement des lagunes, en climat tropical/équatorial, la capacité est encore doublée (acceptation de 16 gDBO₅/m²) d'après la formule de Mara (1997).

- Il convient d'être vigilant sur les charges hydrauliques apportées aux FPRv et de limiter les apports au même titre que ceux d'un premier étage d'une filière classique de FPRv. Les éventuels by-pass peuvent transiter par les bassins de lagunage sous réserve d'un temps de passage global au moins égal à 20 jours. Un dimensionnement plus large de cet étage de FPRv ajouté en amont des lagunes peut permettre de traiter des débits supplémentaires.

De nombreuses stations ont été réhabilitées depuis une quinzaine d'années avec ajout d'un FPR (1 ou 2 étages) en amont de lagunes existantes, comme le montre le Tableau 3 qui compile les retours d'expérience sur 11 stations réhabilitées, et tel qu'illustré en Figure 26. L'ajout d'un FPR en amont permet d'atteindre de bonnes performances de traitement (toutes les stations identifiées sont conformes sauf une). Les principales problématiques rencontrées sont liées au développement d'algues dans les lagunes à cause d'une sur-nitrification dans le FPR qui entraîne la présence de nitrates. Ces nitrates peuvent favoriser le développement des algues, voire entraîner des remontées de boues si une dénitrification a lieu dans la lagune.

Numéro STEU	Capacité initiale	Capacité station réhabilitée	Process	Mise en service	Date de réhabilitation	Conformité en performance 2021 et/ou 2022	Commentaires
1	Inconnue	1900	FPR 1 étage + 2 lagunes (FPR ajouté en amont)	1993	2012	Oui	Très bonnes performances épuratoires
2	400	Inconnue	FPR + 3 lagunes (1 lagune et FPR ajouté en amont des 2 lagunes existantes)	1999	2021	Inconnue	Dépassements en MES (algues vertes), beaucoup d'eaux claires parasites (le FPR peut être by-passé)
3	360	450	FPR 1 étage + 1 lagune (FPR ajouté en amont)	1992	2010	Oui	Très bonnes performances épuratoires sauf 1 bilan (septembre), non-conformité en MES (phéopigments et chlorophylle)
4	320	500	FPR 1 étage + 2 lagunes (FPR ajouté en amont)	2000	2010	Oui	Bonnes performances épuratoires
5	300	400	FPR 2 étage + ancienne lagune 1 pour infiltrer/évaporer eaux traitées	Inconnue	2016	Oui	Bonnes performances épuratoires sauf MES en été
6	Inconnue	450	FPR 2 étage + lagune 1	1984	2017	Oui	Très bonnes performances épuratoires sauf NK une fois
7	Inconnue	800	FPR 2 étages + ancienne lagune 3, l'ancienne lagune 1 sert de sortie A2	1990	2011	Oui	Très bonnes performances épuratoires, impact de la lagune de finition négligeable
8	100	220	FPR 1 étage + 1 lagune	2002	2016	Oui	Très bonnes performances épuratoires
9	800	1081	FPR 1 étage + 2 lagunes + FPR 2ème étage	1995	2022	Oui	Très bonnes performances épuratoires
10	200	550	FPR 2 étages + lagune (comme "ZRV")	1987	2009	Oui	Station très sous-chargée, la lagune permet un complément de dénitrification
11	400	850	FPR 1 étage + 2 lagunes	1995	2016	Oui	Très bonnes performances épuratoires tous paramètres confondus

Tableau 3 : Exemples de lagunes réhabilitées avec un FPRv en tête de station



Figure 26 : Exemple de lagunes réhabilitées avec un FPRv en tête de station

L'impact de la lagune de finition a été étudié sur plusieurs de ces stations par des analyses en entrée et en sortie de lagune. La ou les lagunes de finition permettent souvent d'obtenir un abattement complémentaire de l'azote et du phosphore. Il est donc intéressant de conserver ces lagunes existantes (pas de coût supplémentaire). Cela peut éviter un traitement physico-chimique du phosphore, coûteux et complexe à exploiter, si le niveau de rejet exigé sur le phosphore n'est pas trop strict. Une augmentation des MES après la lagune est néanmoins souvent observée, notamment à cause des algues.

Dans un des cas (Figure 27), les lagunes ont été conservées entre 2 étages de FPR ; l'objectif était d'obtenir un traitement du phosphore à moindre coût tout en garantissant la filtration des algues sur le deuxième étage de filtres plantés. Dans ce cas, le dimensionnement du deuxième étage de filtres ne se fait pas comme sur une station FPR classique (Durot et Molle, 2015) (voir partie IV.1).



Figure 27 : Construction de 2 étages de FPR lors de la réhabilitation d'une lagune avec conservation de 2 lagunes

III.9 Réduction des eaux claires parasites, déconnexion des eaux pluviales

En cas de surcharge hydraulique sur une lagune entraînant des dysfonctionnements, il peut être intéressant de limiter les volumes arrivant à la station grâce à des campagnes de réduction des eaux claires parasites (inspections télévisuelles, renouvellement de réseaux, vérification des branchements neufs, contrôle de branchements) et à une stratégie de déconnexion des eaux pluviales à la source.

Attention : les lagunes ne sont pas adaptées au traitement d'effluent concentrés. Il est souhaitable que la concentration initiale des eaux usées à traiter ne dépasse pas 300 mg/l de DBO₅ en moyenne annuelle (ce qu'on obtient aisément si les eaux transitent dans un réseau unitaire) (FNDAE 22, 1998). Il ne faut donc pas réduire trop fortement les volumes arrivant en tête de station et s'assurer de respecter également le temps de séjour minimum !

IV. Que faire si le niveau de rejet doit baisser ?

Les niveaux de rejet de lagunes nécessitent parfois d'améliorer les performances, surtout lorsque les exigences du milieu ont évolué depuis la construction de la lagune. La présence importante de MES en sortie de station est l'une des principales raisons de non-conformité. Associer au lagunage une étape finale de traitement, souvent basée sur de la filtration, peut donc être une solution intéressante (Neder et al., 2002 ; Kayser et al., 2002). Il peut également être pertinent de compléter le traitement de la matière organique ainsi que la nitrification (Durot et Molle, 2015).

IV.1 Remplacement de la lagune 3 par un FPR vertical

Afin d'améliorer le traitement après une lagune, il est possible d'ajouter un FPRv en aval ou à la place de la lagune 2 ou 3. L'objectif est de retenir les algues et les MES sur le FPR ainsi que de traiter le résiduel de pollution par voie biologique. **Cette solution ne permet pas d'augmenter la capacité de la lagune.**

Les préconisations de dimensionnement sont les suivantes (Durot et Molle 2015) :

- Filtre à écoulement vertical librement drainé avec un sable (45 cm minimum) de type deuxième étage.
- Une charge organique maximum de 200 g DCO/m²/j sur le filtre en fonctionnement.
- Une charge hydraulique maximale de 80 cm/j sur le filtre en fonctionnement.
- Trois filtres en parallèle avec une alternance d'alimentation tous les 3.5 jours.

Point de vigilance : il existe un risque de colmatage élevé, à cause des microalgues qui se développent naturellement dans les lagunes. Il convient donc d'être vigilant sur l'exploitation du filtre (respect des phases d'alternance alimentation/repos).

Une étude a été menée pendant plusieurs années par INRAE sur une station de 500 EH avec une lagune suivie d'un FPR (Durot et Molle, 2015) et a montré que les performances de traitement de la station étaient nettement améliorées grâce à la mise en place du FPR en sortie (DCO < 125 mg/l, DBO₅ < 25 mg/l, MES < 35 mg/l obtenues en sortie après le FPR). L'étude a, de plus, mis en évidence l'importance du respect des modes d'alimentation préconisés. Avec le mode 3-4 jours d'alimentation et 7 jours de repos pour chaque filtre (nécessité de travailler sur trois filtres en parallèle), aucun problème de colmatage n'est apparu et ce, même pour des charges hydrauliques de 80 cm/j. En revanche, lors d'alimentations trop longues (6 à 9 jours consécutifs) ou de périodes de repos trop courtes (3-4 jours), il est apparu que la faible minéralisation des dépôts provoquait une baisse des vitesses d'infiltration et donc une stagnation d'eau en surface des filtres, pouvant conduire à leur colmatage suivant le type d'algues rejetées par la lagune. De plus, pour assurer une nitrification quasi totale, malgré les longs temps de séjour de l'effluent dans la lagune, le FPR est apparu indispensable.

De nombreuses stations ont été réhabilitées depuis une quinzaine d'années avec ajout d'un FPRv à 1 étage en aval de lagunes existantes (Figure 28), comme le montre le Tableau 4 qui compile les retours d'expérience

sur 9 stations réhabilitées.

En pratique, les retours d'expérience sont assez mitigés sur cette solution. 5/9 stations réhabilitées sont non conformes en performance sur divers paramètres. Sur plusieurs stations, il semble que le FPR ne permette pas de retenir les microalgues, ce qui entraîne des non-conformités. Le FPR après les lagunes ne semble pas permettre d'obtenir un gain sur l'élimination des MES, même s'il permet une petite amélioration sur d'autres paramètres (nitrification notamment).

Un colmatage a été observé sur d'autres stations, particulièrement lors des premières années de fonctionnement. Néanmoins, les règles de dimensionnement et de gestion ne sont pas connues pour les stations du Tableau 4. Les dysfonctionnements observés peuvent donc être liés à un non-respect des règles de dimensionnement et d'exploitation.

Dans certains cas, il a été considéré que l'ajout du FPR permettait une augmentation de la capacité de la lagune, ce qui pourrait expliquer certains dysfonctionnements.

Attention, la réglementation sur l'autosurveillance en sortie de lagune implique une analyse des paramètres de rejets sur l'échantillon filtré (DCO et DBO₅ dissoutes) conformément à l'annexe 3 de l'arrêté du 21 juillet 2015 ; mais si un FPR est placé en sortie (après les lagunes), ces paramètres devront être analysés sur l'échantillon brut.

Numéro STEU	Capacité initiale	Capacité station réhabilitée	Process	Mise en service	Date de réhabilitation	Conformité en performances en 2021 et/ou 2022	Niveau de rejet réglementaire en MES	Commentaires
1	430	430	Lagune + infiltration-percolation transformé en FPR	2000	2003	Non (DBO ₅)	50%	Les microalgues qui se développent dans la lagune ne sont pas filtrées par le FPR et se retrouvent en sortie
2	2000	2000	Lagune 3 bassins + FPR 2 ^{ième} étage (1 m ² /EH)	2006	2009	Non (DBO ₅ , DCO)	50%	Problèmes de colmatage au départ, station très surchargée
3	150	270	Lagune monobassin + FPR en aval	1998	2015	Non (DBO ₅ , DCO, MES)	20 mg/l - 80%	
4	220	250	Lagune 2 bassins + FPR en aval	1984	2009	Oui	50%	
5	500	500	Lagune 3 bassins + FPR 2 ^{ième} étage (1 m ² /EH)	2015	Construction initiale	Non (DCO, MES)	35 mg/l - 90%	Aucun gain grâce au FPR sur les MES, limité sur les autres paramètres. Première année, développement de zooplancton de couleur rouge déposé à la surface des filtres (copépode), ralentissement de la vitesse d'infiltration mais pas de colmatage
6	Inconnue	500	Lagune 3 bassins + FPR 2 ^{ième} étage (1 m ² /EH)	1991	2009	Oui	120 mg/l - 60%	A l'exception du complément de nitrification, l'apport du FPR en traitement de finition est peu marqué
7	Inconnue	180	Lagune 1 bassin (conservation du premier bassin pour gérer l'hydraulique) + FPR 2 ^{ième} étage	1993	2012	N/A	50%	
8	Inconnue	500	Lagune monobassin + FPR	1995	Inconnue	Non (MES, DBO ₅ , DCO)	60 mg/l	Les microalgues présentes en sortie de lagune ne sont pas retenues en totalité dans le FPR
9	243	400	Lagune 2 bassins + 1 FPR	1995	2016	Oui	50%	Les microalgues qui se développent dans la lagune ne sont pas retenues en totalité dans les filtres plantés de roseaux

Tableau 4 : Exemples de lagunes réhabilitées avec un FPR en sortie après la lagune



Figure 28 : Exemple de lagunes réhabilitées avec un FPR en aval des lagunes

IV.2 Radeaux flottants - macrophytes

Les macrophytes flottants comme les jacinthes d'eau (Figure 29 à gauche) semblent permettre une amélioration de l'abattement en DBO₅ et MES, cependant ils entraînent des désagréments (odeurs, dégagements d'H₂S, virage de couleur) en lien avec la tendance du milieu à l'anoxie (Durot et Molle, 2015).

Dans le cas d'une utilisation bénéfique de ces macrophytes, une gestion adaptée de la charge admise dans les bassins selon la saisonnalité des espèces est à prévoir, ainsi qu'une gestion des végétaux (récolte, export de la biomasse produite).

La couverture par des macrophytes flottants est à différencier de la mise en œuvre de radeaux flottants (Figure 29 à droite ; Figure 30). L'utilisation de macrophytes, positionnés sur des radeaux flottants, vise à améliorer les performances épuratoires des lagunes grâce à un développement accru et localisé de biomasse sur la surface du système racinaire. Ce type de procédé permet également une rétention importante de MES au travers du système racinaire. Les radeaux flottants sont utilisés principalement au niveau international pour les lagunes de traitement des eaux pluviales (Headley et Tanner, 2012). Les bénéfices en termes de traitement semblent faibles pour les lagunes (Durot et Molle, 2015).

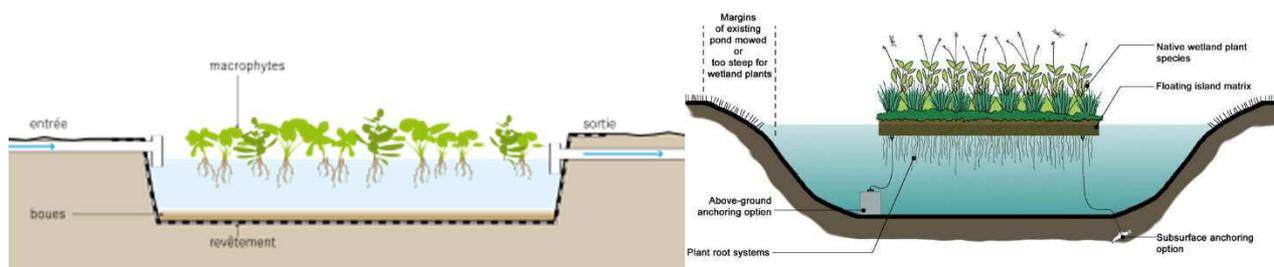


Figure 29 : Exemple de végétaux recouvrant des lagunes, macrophytes (gauche) et radeaux flottants (droite) (Source inconnue)

Le principal problème lié à l'utilisation des macrophytes, flottants ou sur des radeaux, est l'exploitation lourde qu'ils entraînent pour la gestion des végétaux (récolte, export de la biomasse produite hors du bassin, transport de végétaux chargés en eau). Un faucardage régulier est indispensable afin d'éviter l'apport de matière organique.



Figure 30 : Couverture flottante végétalisée de lagunes

Dans les conditions de mises en œuvre pour le traitement des eaux usées domestiques, les végétaux ne traitent pas l'eau, ils gênent l'exploitation et augmentent le volume de boue (sénescence des végétaux à l'automne et en hiver). Ainsi, le groupe Epnac déconseille cette solution.

IV.3 Tamisage tertiaire

Le tamisage tertiaire (Figure 31) est une option régulièrement envisagée afin de retenir les algues et les MES dans un tamis en sortie de lagune. Avec l'ajout d'un module physico-chimique (coagulation au chlorure ferrique puis floculation), le tamisage tertiaire semble en mesure de permettre l'obtention de bonnes performances de traitement sur les MES ainsi que sur le phosphore (Durot et Molle, 2015).

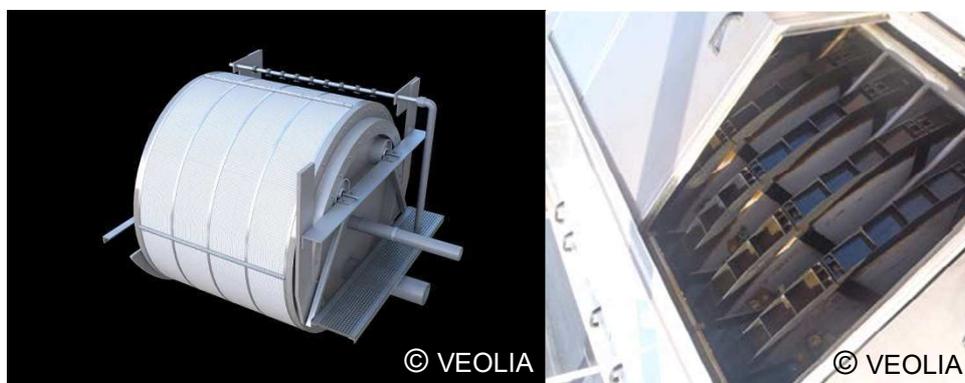


Figure 31 : Exemple de filtres pour le tamisage tertiaire (Drumfilter à gauche ; Discfilter à droite)

Le fonctionnement et les résultats obtenus sont stables et fiables dans le temps et les tamis sont généralement peu bruyants. Le coût d'investissement est modéré mais les coûts de fonctionnement sont non négligeables. Il est nécessaire d'avoir l'électricité sur site pour faire fonctionner le tamis tertiaire, ce qui n'est pas toujours le cas sur les lagunes.

En revanche, de nombreux retours de terrain indiquent que ces tamis sont sujets à des dysfonctionnements fréquents avec des casses, des colmatages ou des by-pass. Si le tamis n'est pas couvert, les algues peuvent se développer très rapidement. Ce procédé mécanique semble donc peu rustique et demande un entretien assez lourd, peu compatible avec la fréquence habituelle d'exploitation d'une lagune (FNDAE 40, 2014).

IV.4 Filtres rocheux (rockfilters) aérés ou non aérés

Les rockfilters sont utilisés depuis de nombreuses années aux Etats-Unis pour filtrer les algues des lagunes. Ils consistent en la mise en place d'un filtre de galets (matériaux de granulométrie généralement comprise entre 75 et 200 mm) saturé en eau. Ils peuvent être à écoulement vertical ou horizontal et permettent la rétention des algues (par sédimentation et filtration) qui sont par la suite dégradées par l'activité biologique (Durot et Molle, 2015). La simplicité du fonctionnement fait de ce procédé un choix pertinent pour une étape d'affinage/stabilisation du rejet en sortie de lagune.

Le milieu étant saturé en eau, les teneurs en oxygène dissous ne sont pas suffisantes pour oxyder l'azote ammoniacal. Pour cela, des adaptations ont été également proposées en incluant une aération forcée lorsque le milieu récepteur le requiert (Figure 32). L'intérêt annoncé dans les différentes études est lié également à son faible coût d'investissement par rapport à d'autres procédés (Durot et Molle, 2015).



Figure 32 : Exemple de rockfilters aéré (gauche) et non aéré (droite) intégrés à une lagune

L'étude Epnac (Baesa et al., 2017) a montré que les rockfilters des deux sites étudiés (aéré et non-aéré) semblaient permettre d'assurer un rôle de filtration avec une concentration maximum observée de 20 mg/l de MES en sortie de filtre, néanmoins avec des effluents peu chargés pour les deux sites.

La comparaison entre les deux rockfilters a mis en évidence l'intérêt de l'ajout d'aération lorsque les niveaux de rejets nécessitent un traitement plus poussé pour l'azote (nitrification). De plus, cette oxygénation permet la dégradation d'une partie des résidus présents dans l'ouvrage et devrait, de fait, limiter l'arrivée du colmatage même si la jeunesse des installations ne permettait pas de quantifier correctement le gain de l'aération forcée sur le retard du colmatage.

Le colmatage est une problématique importante des rockfilters (réduction de la porosité du massif par surdéveloppement de la biomasse), dont il est nécessaire de prendre la mesure. Son apparition peut être aggravée lors d'un défaut de conception et d'un mauvais entretien du filtre, pouvant entraîner de lourds dysfonctionnements (Baesa et al., 2017).

Il est à noter que depuis l'étude Epnac de 2017, qui avait recensé 8 rockfilters en France, il ne semble pas y avoir d'autres sites équipés. Il y a donc peu de retours d'expérience sur cette solution en France.

IV.5 Aération de la lagune 1

L'ajout de brasseurs dans la lagune 1 permet d'augmenter l'apport en oxygène et ainsi de dégrader plus rapidement la matière organique par les bactéries aérobies. Cette technique est adaptée aux effluents particuliers (apports importants en effluents industriels, déséquilibre en nutriments) (FNDAE 22, 1998).

La puissance spécifique d'aération est de 5 à 6 W.m⁻³. Il existe de multiples possibilités pour l'aération : aérateurs de surface, aérateurs immergés, diffuseurs...

L'aération empêchant la décantation des MES, il n'est pas recommandé d'implanter les aérateurs dans les lagunes 2 et 3. De plus, la profondeur des lagunes naturelles étant inférieure à celles des lagunes aérées,

l'installation d'aérateurs de surface peut causer des dégradations en fond de lagune, notamment en présence d'une géomembrane. Il peut être nécessaire de placer des blocs anti-affouillement sous les turbines ou encore de rehausser le niveau de la lagune. Il peut également y avoir un risque de dégradation des berges suite à la mise en place de brasseurs ; leur emplacement doit donc être soigneusement étudié.

Deux exemples de lagunes sur lesquelles ont été implantés des aérateurs de surface sont présentés en Figure 33 et Figure 34. L'objectif dans ces deux cas est d'augmenter la capacité de la lagune, la charge reçue ayant dépassé la capacité nominale de la station. Les retours d'expérience ne sont pas toujours satisfaisants. En effet, l'ajout de turbines ne permet pas forcément d'atteindre le niveau de traitement requis.



Figure 33 : Ajout de turbines de surface alimentées par des panneaux solaires sur une lagune 1



Figure 34 : Ajout d'aérateur de surface à vis hélicoïdale sur une lagune 1

V. Que faire de la lagune en cas de réhabilitation totale de la station ?

V.1 Cadre réglementaire

Selon l'article L214-3-1 du Code de l'Environnement, « Lorsque des installations, ouvrages [...] sont définitivement arrêtés, l'exploitant ou, à défaut, le propriétaire remet le site dans un état tel qu'aucune atteinte ne puisse être portée à l'objectif de gestion équilibrée de la ressource en eau défini par l'article L211-1. Il informe l'autorité administrative de la cessation de l'activité et des mesures prises. Cette autorité peut à tout moment lui imposer des prescriptions pour la remise en état du site [...] ».

L'article L181-23 du Code de l'Environnement indique que « Lorsque des installations, ouvrages [...] sont définitivement arrêtés, l'exploitant ou, à défaut, le propriétaire remet le site dans un état tel qu'aucune atteinte ne puisse être portée aux intérêts protégés mentionnés à l'article L181-3 ».

En pratique :

- Dans l'idéal, la réhabilitation des anciennes lagunes est à prévoir pendant les études de la nouvelle station d'épuration ou au moment du dernier curage, en particulier si elles sont implantées dans des zones humides connues.
- Dans le cas contraire, le préfet peut prendre un arrêté pour cette réhabilitation, mais dans la pratique, en l'absence d'incidence sur le milieu aquatique, les travaux n'ont pas obligatoirement un caractère urgent et le maître d'ouvrage peut prendre l'initiative à tout moment (DDTM 29, 2020).
- Il semble recommandé (mais pas obligatoire) de curer les boues à la fin de l'exploitation de la lagune.

V.2 Bassin tampon/surverse de DO

Si la lagune est abandonnée et que la nouvelle station est construite à un autre emplacement ou sur une partie du terrain, il peut être intéressant de conserver une des lagunes comme bassin tampon ou surverse de déversoir d'orage afin d'accepter petit à petit les effluents sur la nouvelle station. Cet ouvrage peut être particulièrement intéressant si la nouvelle station est un FPR car il permet de réaliser une montée en charge progressive de la nouvelle installation (notamment dans le cas d'un démarrage de FPR en hiver).

V.3 Ouvrage de finition/stockage

S'il y a une volonté de réutiliser les eaux usées traitées et que la nouvelle station est construite à un autre emplacement ou sur une partie du terrain, une des anciennes lagunes peut être conservée comme ouvrage de stockage des effluents traités. Le procédé de lagunage permet en outre un abattement des germes pathogènes grâce à l'action des UV (FNDAE 22, 1998), ce qui peut être intéressant pour la réutilisation des eaux usées traitées. Le stockage dans un ancien bassin permet également de disposer d'une quantité d'eau suffisante au moment où en on a besoin et de ne pas dépendre uniquement du débit traité sur la station.

V.4 Transformation en zone humide

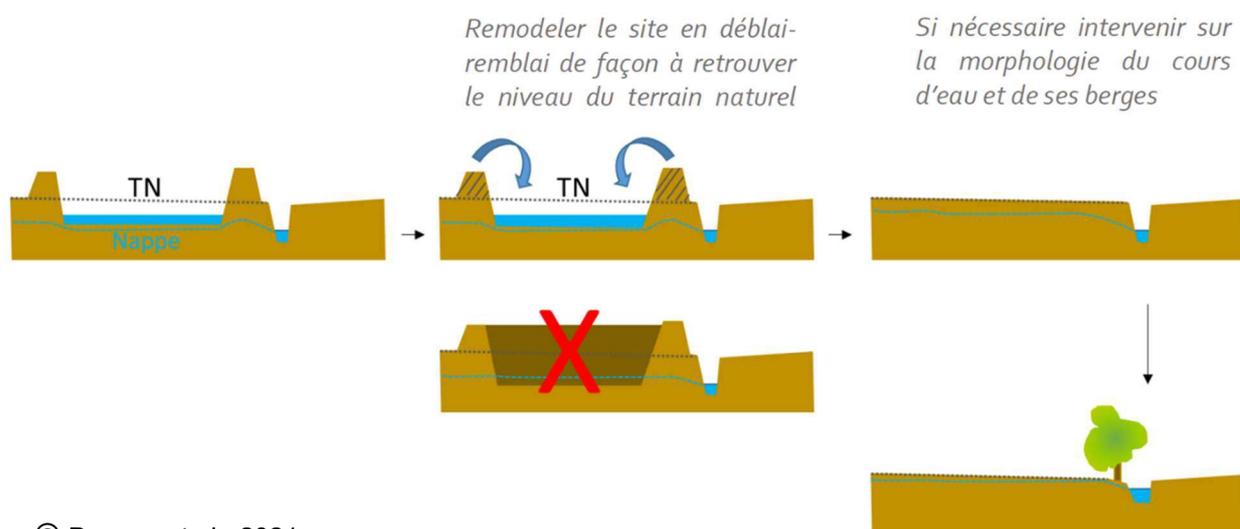
Si la nouvelle station a été construite sur un autre terrain que celui de la station déjà existante, le site de la lagune peut être transformé en zone humide. En effet, il s'agit souvent d'un site d'intérêt écologique, situé en fond de vallée ou à proximité d'un cours d'eau car les stations sont généralement alimentées de façon gravitaire et nécessitent un rejet dans le milieu naturel après traitement. Le site de la lagune présente donc une opportunité intéressante pour la restauration d'une zone humide.

Il existe en général peu d'opportunités sur les territoires de restaurer les zones humides. Les anciennes lagunes pour le traitement des eaux usées :

- sont des sites majoritairement publics, ce qui permet la maîtrise foncière du site ;
- ont un impact local fort sur le milieu (zone humide et cours d'eau), ainsi des travaux sur le site auront une forte plus-value écologique ;
- sont souvent situées en périphérie urbaine et peuvent ainsi devenir un site d'intérêt pédagogique (Dausse et al., 2021).

Si le site le permet, transformer l'ancienne lagune en zone humide présente de multiples avantages : restaurer la capacité de débordement du cours d'eau (dissiper l'énergie du cours d'eau, limiter l'érosion des berges), restaurer la continuité hydrologique ainsi que restaurer des habitats favorables au développement d'une biodiversité – faune (amphibiens, oiseau) et flore (végétation aquatique et terrestre).

Le schéma de la Figure 35 présente la restauration d'un site de lagune en zone humide (Dausse et al., 2021).



© Dausse et al., 2021

Figure 35 : Reprofilage en déblai-remblai pour la transformation d'une lagune en zone humide

Les photos de la Figure 36 montrent une lagune transformée en zone humide après l'abandon de la station.



Figure 36 : Transformation d'une ancienne lagune en zone humide (avant, en haut ; après, en bas)

V.5 Construction de la nouvelle station sur le site de la lagune

Dans la majorité des cas de projets de réhabilitation des lagunes, les constructeurs proposent d'implanter des FPR dans les anciens bassins. En effet, les FPR permettent d'obtenir de meilleures performances de traitement ainsi qu'un rejet plus stable dans le temps et moins sensible aux variations saisonnières que lors du traitement par lagunage.

Les FPR nécessitent en outre une surface plus réduite qu'une lagune (FPR : 2 à 2.5 m²/EH pour une filière 2 étages, 1.2 à 1.5 m²/EH pour une filière 1 étage ; lagune : 11 m²/EH) (Dotro et al., 2017, Boutin et al., 2007). La quantité de boues à évacuer d'un FPR est également plus réduite que celle d'une lagune car leur siccité est plus élevée et que la minéralisation des boues est plus importante dans un FPR que dans une lagune. Après 13 à 14 ans de fonctionnement, il a été calculé que la quantité de boues à évacuer était d'environ 110 L/hab/an pour le lagunage naturel soit approximativement 12 kg MS/hab/an contre environ 20 L/hab/an pour un FPR soit approximativement 6 kg MS/hab/an (Boutin et al., 2007).

En revanche, le traitement par FPR peut nécessiter d'installer l'électricité sur le site si l'écoulement ne peut pas être réalisé de manière gravitaire. Les FPR nécessitent également une exploitation plus rigoureuse et contraignante que les lagunes (respect de l'alternance d'alimentation des lits, faucardage des roseaux).

Afin de garantir une continuité de traitement pendant les travaux de la nouvelle station, il est important de respecter un bon phasage (Figure 37). Le premier étage de FPR peut être construit par exemple dans la lagune 1 préalablement vidangée et curée tandis que le traitement est assuré dans les lagunes 2 et 3. Puis une fois le premier étage terminé, le traitement peut être assuré par ce premier étage de FPR (et éventuellement la lagune 3) pendant que le deuxième étage est construit dans la lagune 2.

Il peut être intéressant pour la continuité de traitement, et si la capacité de la station n'a pas beaucoup augmenté, d'insérer les 2 étages de FPR dans la lagune 1 (possible car la première lagune est dimensionnée en théorie à 6 m²/EH pour 2 à 2,5 m²/EH pour un FPRv à deux étages voire 0.8 à 1.2 m²/EH pour un FPR avec aération forcée).

Le tableau ci-après détaille le phasage de la construction d'un FPR à 2 étages suivi d'une Zone de Rejets Végétalisés (ZRV) à la place d'une lagune à 2 bassins à titre d'exemple.

Phase	Travaux	Traitement	Durée
Phase 1a	Bypass lagune 2 vers rejet Vidange lagune 2	Dégrillage+Lagune 1	1 semaine
Phase 1b	Pompage eau claire lagune 1 vers lagune 2 – 600m ³	Dégrillage+Lagune 1	2 jours
Phase 1c	Bypass lagune 1 vers lagune 2 Vidange lagune 1	Dégrillage+Lagune 2	1 semaine
Phase 2	Construction 1 ^{er} étage de filtration	Dégrillage + Lagune 2	2 mois
Phase 3	Canalisation de liaison Vidange fond lagune 2	Dégrillage + Etage 1	1 semaine 1 semaine
Phase 4	Construction 2 ^{ème} étage de filtration + ZRV	Dégrillage + Etage 1	2 mois
			Total = 5 mois

Figure 37 : Exemple de phasage de travaux pour la construction d'un FPR à la place d'une lagune (SATESE 32)

Il est préférable de commencer les travaux de la nouvelle station après l'été afin d'éviter la période d'étiage et d'affecter la sensibilité du milieu durant un fonctionnement généralement en mode dégradé lors de la réhabilitation.

VI. Conclusions

En 2021, il y avait 4 290 lagunes (lagunage naturel et lagunage aéré) en France, dont l'âge médian est de 30 ans. Ces nombreuses lagunes vieillissantes ne respectent parfois plus les niveaux de rejets imposés, à cause d'une augmentation de la charge reçue ou à cause de contraintes réglementaires plus importantes sur les concentrations de sortie. C'est pourquoi, il est fréquemment nécessaire de réhabiliter ces lagunes. Les bureaux d'étude proposent souvent de changer de procédé lors de la réhabilitation d'une station, notamment de remplacer le lagunage par des filtres plantés de roseaux (FPR). Néanmoins, il peut être intéressant de conserver les lagunes car il s'agit d'un procédé très rustique, qui ne nécessite pas d'énergie une fois les effluents arrivés en tête de station, facile à exploiter, adapté aux réseaux unitaires, et qui permet un stockage des effluents traités ainsi qu'une élimination des pathogènes (ce qui peut être intéressant pour un objectif de réutilisation des eaux usées traitées).

Il n'est pas toujours nécessaire d'abandonner les lagunes qui sont une solution bien adaptée aux petites collectivités qui disposent de suffisamment de foncier disponible. Le rapport coût/bénéfice est à adapter au cas par cas avant une réhabilitation de la station. En fonction des contraintes, il existe une grande variété de solutions :

Si le rejet se dégrade :

- Il est important de vérifier que l'entretien de la lagune est correct : lutte contre les espèces végétales envahissantes en surface, faucardage des berges, curage de la zone du cône de sédimentation... Une accumulation excessive de boues dans les lagunes peut entraîner des remontées de boues ainsi qu'une baisse des performances au niveau du traitement du phosphore à cause de phénomènes de relargage. Il est donc important de curer les boues des lagunes si nécessaire (en pratique, environ tous les 8 à 15 ans).
- La dégradation des berges, suite à l'action des animaux (ragondins, rats musqués) ou du batillage (remous causés par le vent), peut entraîner des courts-circuits hydrauliques, une baisse d'étanchéité dans la lagune ou encore une accumulation de terre, à l'origine d'une baisse des performances.
- L'étanchéité des bassins est très importante afin d'éviter la pollution de la nappe phréatique éventuelle par percolation des eaux usées et d'assurer un fonctionnement hydraulique normal de la lagune. Les lagunes peuvent être étanchéifiées par traitement des sols (argile, bentonite) ou géomembranes.
- L'ajout de chicanes dans une des lagunes permet de limiter les courts-circuits hydrauliques en augmentant le temps de séjour dans la lagune. Une étude hydraulique (par exemple par traçage) est nécessaire afin d'évaluer la pertinence de cette solution.
- En cas de surcharge organique et hydraulique, si le foncier est disponible, une solution peut être d'augmenter la taille des lagunes pour augmenter la capacité de traitement. S'il n'y a plus beaucoup d'espace disponible, dans l'objectif d'accroître la capacité nominale initiale de la station d'épuration (augmentation des flux de pollution à traiter), il est possible de mettre en place en amont ou à la place de la première lagune un filtre planté de roseaux à écoulement vertical (FPRv). L'ajout d'un FPR en amont permet d'atteindre de bonnes performances de traitement.
- En cas de surcharge hydraulique sur une lagune entraînant des dysfonctionnements, il est nécessaire de limiter les volumes arrivant à la station grâce à des campagnes de réduction des eaux claires parasites et à une stratégie de déconnexion des eaux pluviales à la source.

S'il est nécessaire d'améliorer les performances :

- Afin de diminuer les concentrations du rejet, lorsque les exigences du milieu ont évolué depuis l'investissement pour la construction de la lagune, associer au lagunage une étape finale au traitement, souvent basée sur de la filtration, peut être une solution intéressante. En effet, la présence importante de MES est l'une des principales raisons de non-conformité.
- Afin d'améliorer le traitement après une lagune, il est possible d'ajouter un FPRv en aval ou à la place de la lagune 2 ou 3. L'objectif est de retenir les algues et les MES sur le FPR ainsi que de traiter le résiduel de pollution par voie biologique. Des règles strictes de dimensionnement, de conception et de gestion doivent alors être respectées pour garantir les performances attendues de ce type d'ouvrage. Dans le cas contraire, la filtration peut s'avérer décevante ou le système colmater.

- L'utilisation des macrophytes flottants ou sur des radeaux entraîne une exploitation lourde du fait de la gestion des végétaux (récolte, export de la biomasse produite, évacuation par transport). Un faucardage régulier est indispensable afin d'éviter l'apport de matière organique.
- Le tamisage tertiaire est une option régulièrement envisagée afin de retenir les algues et les MES dans un tamis en sortie de lagune. Avec l'ajout d'un module physico-chimique (coagulation au chlorure ferrique puis floculation), le tamisage tertiaire semble théoriquement en mesure de permettre l'obtention de bonnes performances de traitement sur les MES ainsi que sur le phosphore. Néanmoins, de nombreux retours de terrain indiquent que ces tamis sont sujets à des dysfonctionnements fréquents avec des casses, des colmatages ou des by-pass. Ce procédé mécanique semble donc trop peu rustique et demande un entretien assez lourd, peu compatible avec la fréquence habituelle d'exploitation d'une lagune.
- Les rockfilters (filtres saturés en eau de granulats, à écoulement vertical ou horizontal, aérés ou non aérés) permettent la rétention des algues (par sédimentation et filtration) qui sont par la suite dégradées par l'activité biologique. La simplicité du fonctionnement fait de ce procédé un choix pertinent pour une étape d'affinage/stabilisation du rejet en sortie de lagune. Cependant, le retour d'expérience reste faible sur cette solution et discordant.
- Enfin, l'ajout de brasseurs de surface dans la lagune 1 permet d'augmenter l'apport en oxygène et ainsi une dégradation plus rapide de la matière organique par les bactéries aérobies. Il s'agit néanmoins d'une solution transitoire pour pallier à une légère surcharge de la station.

Si la lagune est abandonnée :

- Si la nouvelle station est construite à proximité de l'ancienne lagune ou sur une partie du terrain, il peut être intéressant de conserver une des lagunes comme bassin tampon ou surverse de déversoir d'orage ou encore comme ouvrage de stockage des effluents traités.
- Si la nouvelle station a été construite sur un autre terrain, le site de la lagune peut être transformé en zone humide. En effet, il s'agit souvent d'un site d'intérêt écologique, situé en fond de vallée ou à proximité d'un cours d'eau car les stations sont généralement alimentées de façon gravitaire et nécessitent un rejet dans le milieu naturel après traitement. Le site de la lagune présente donc une opportunité intéressante pour la création ou la restauration d'une zone humide.

S'il est toutefois décidé de réhabiliter totalement la station :

- Par exemple en FPR classique, il peut être intéressant pour la continuité de traitement d'insérer l'ensemble des 2 étages de FPR dans la lagune 1, à condition que la capacité de la station n'ait pas beaucoup augmenté.
- Selon la sensibilité du milieu récepteur, il peut être préférable de commencer les travaux de la nouvelle station après l'été afin d'éviter la période d'étiage (la réhabilitation de la station provoquant un fonctionnement dégradé durant la phase de travaux).

VII. Bibliographie

Références scientifiques

AERM (2007) Procédés d'épuration des petites collectivités du bassin Rhin-Meuse. Fiche 7 « Lagunage naturel ». 13 p.

Atelier guides d'exploitation d'Epnac - Boutin C., Caquel C., Dimastromattéo N., Durot M.A., Molle P., Fernandes G., Parotin S., Prost-Boucle S., Tschertter C. (2018) Ouvrages de traitement par Lagunage naturel - Guide d'exploitation. Epnac. 38 p.

Baesa A., Houdebine S., Durot M.A., Molle P. (2017) Expérimentation de rock filter aéré et non aéré. Epnac. 49 p.

Boutin C., Lassus C., Hubaille, Bonvillain, Lesavre J., Schaegger. (1998) Le lagunage naturel : conception et réalisation, les règles de l'art. [Rapport de recherche] Cemagref, pp.28. fihal-02577628

Boutin C., Liénard A., Molle P. (2007) Les filtres plantés de roseaux, le lagunage naturel et leurs associations : comment ? pourquoi ? Sinfotech – Les fiches. 6 p.

Boutin C. (coordination) (2019) Les zones de rejet végétalisées : analyse du fonctionnement et aide à la conception et à l'exploitation. AFB, collection *Guides et protocoles*, 92 p.

Comité français des géosynthétiques (2017) Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par géomembranes. 81 p. Document téléchargeable directement sur le site du CFG : www.cfg.asso.fr

Dausse A., Jungas E., Kergoulay S. (2021) Restauration de zones humides et de cours d'eau sur d'anciens sites de lagunage – Synthèse de retours d'expérience. Réseau sur la restauration des zones humides de Bretagne. 26 p.

DDTM 29 Gaël Mélan (2020) Restauration des zones humides et des cours d'eau sur les sites de lagunage en fin d'activité. Présentation Power Point à l'occasion d'une journée d'échanges organisée dans le cadre de la cellule d'animation des milieux aquatiques du Finistère, en lien avec le SEA 29. Direction départementale des territoires et de la mer du Finistère

Dotro G., Langergraber G., Molle P., Nivala J., Puigagut J., Stein O., von Sperling M. (2017) Biological Wastewater Treatment Series, VOLUME SEVEN Treatment Wetlands. IWA Publishing. 172 p.

Durot M.A. et Molle P. (2015) Amélioration du rejet des lagunes d'épuration. Epnac. 62 p.

FNDAE 1 – Vuillot M., Boutin C. (1985) L'exploitation des lagunages naturels – Guide technique à l'usage des petites collectivités. Document technique FNDAE n°1. Ministère de l'agriculture. CEMAGREF. 70 p.

FNDAE 22 – Alexandre O., Boutin C., Duchène P., Lagrange C., Lakel A., Liénard A., Orditz D. (1998) Filières d'épuration adaptées aux petites collectivités. Document technique FNDAE n°22. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. CEMAGREF Editions. 96 p.

FNDAE 33 – Canler, J. P. et al. (2005) Dysfonctionnements biologiques des stations d'épuration – Origines et solutions. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. CEMAGREF Editions. 59 p.

FNDAE 40 - Perret J. M., Canler, J. P. (2014) Affinage du traitement de la pollution particulière par les procédés mécaniques « rustiques ». Document technique FNDAE n°40. ONEMA - IRSTEA. 84 p.

Headley T.R., Tanner C.C (2012) Constructed wetlands with floating emergent macrophytes: An innovative stormwater treatment technology (Review). In *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Volume 42, Issue 21, 1 January 2012, Pages 2261-2310

Kayser, K., Kunst, S., Fehr, G., Voermanek, H. (2002) Nitrification in reed beds – Capacity and potential

control methods (Conference Paper). Water Science and Technology, Volume 46, Issue 6-7, pp 363-370

Liénard A., Boutin C., Molle P., Racault Y., Brissaud F., et al. (2004) Filtres plantés de roseaux à flux vertical et lagunage naturel en traitement d'eaux usées domestiques en France : comparaison des performances et des contraintes d'exploitation en termes de pérennité et fiabilité. Ingénieries eau-agriculture-territoires, spécial Assainissement, marais artificiels et lagunage : retours d'expérience en Europe, pp.87-99. hal-02586490

MAGE 42 (2006) Fiches d'exploitation des stations d'épuration. Conseil général de la Loire. 70 p.

MAGE 42 (2007) Les lagunages – Eléments de diagnostics. Conseil général de la Loire. 40 p.

Mara D.D. (1997) Design manual for waste stabilisation ponds in India. Lagoon Technology International Ltd. Leeds. 135 p.

Neder, K.D. et al. (2002) Selection of natural treatment processes for algae removal from stabilization ponds effluents in Brasilia, using multicriterion methods. Water Science and Technology, Volume 46, Issue 4-5, pp 347-354

Office de l'Eau de Guyane (2022) Référentiel « Coût en maintenance AEP/EU »

Racault Y. et Boutin P. (1984). Etude par traçage du comportement hydraulique d'une lagune d'épuration ; influence de la géométrie du bassin. Rev. Fr. Sci. Eau, 3(2), pp 197-218.

Racault Y., Bois J.-S., Carré J., Duchêne P., Lebaudy B., Lesavre J., Lickel P., Rateau M., Vachon A. (1997) Le lagunage naturel – Les leçons tirées de 15 ans de pratique en France. CEMAGREF. 64 p.

Racault Y., Boutin C., Molle P. (2006) Le lagunage naturel en France : retour d'expérience et évolutions de la technique. 85ème Congrès de l'ASTEE. pp.12. fhal-02588045

Saône et Loire Pôle Appui Technique Assainissement (2018) Techniques d'élimination des lentilles d'eau sur un lagunage. 6 p.

SATESE 81 (2022) Réhabilitation des berges par reprofilage et empierrage des lagunages du département du Tarn. Présentation Power Point. Direction de l'Eau – SATESE du Tarn

Shilton A. (2006). Pond treatment technology. Integrated Environmental Technology series. IWA publishing. 496 p

Shilton A. (2001) Studies into the hydraulics of waste stabilisation ponds. Thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy in Environmental Engineering at Massey University, Turitea Campus, Palmerston North, New Zealand.

Références électroniques

McLaughlin (2015) Using Baffles to Improve Sediment Basins | NC State Extension Publications (ncsu.edu). [En ligne]. Consulté le 13 novembre 2023 dans : <https://content.ces.ncsu.edu/using-baffles-to-improve-sediment-basins>

<http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/services.php>, export des données ERU 2021