

# Aménager des zones humides pour épurer les eaux agricoles : quels enseignements tirer de l'existant ?

Estelle Sac<sup>1</sup>, Bénédicte Augeard<sup>1\*</sup>, François Birgand<sup>1</sup>, Julien Tournebize<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unité HBAN, Cemagref, Parc Tourvoie, BP 44, 92163 Antony

\* benedicte.augeard@cemagref.fr

## Sommaire

Introduction .....	2
1. Les principes de la dépollution des eaux agricoles par les Zones Humides Artificielles (ZHA) .....	2
1.1. Caractéristiques des eaux agricoles concernées par ces aménagements .....	2
1.1.1. <i>Les nitrates</i> .....	2
1.1.2. <i>Le phosphore</i> .....	3
1.1.3. <i>Les pesticides</i> .....	3
1.2. Mécanismes de dissipation des polluants agricoles .....	4
1.3. Les dispositifs étudiés .....	5
2. Les zones humides artificielles du bassin de la Seine .....	6
2.1. Usages anciens et actuels des mares, étangs et bassins du bassin versant de la Seine .....	6
2.2. Physionomie des mares et des étangs.....	8
2.2.1. <i>L'alimentation</i> .....	8
2.2.2. <i>L'étanchéité</i> .....	8
2.2.3. <i>Les berges</i> .....	8
2.3. Ecologie des mares : quelques cas d'étude .....	8
2.3.1. <i>La flore</i> .....	9
2.3.2. <i>La faune</i> .....	11
3. Dépollution par les bassins de rétention dans le bassin de la Seine : quelques cas d'étude .....	13
3.1. Le lagunage naturel .....	13
3.1.1. <i>Principe</i> .....	13
3.1.2. <i>Fonctionnement de l'écosystème « Lagunage naturel »</i> .....	15
3.1.3. <i>Rendement</i> .....	17
3.2. Les bassins de retenue d'eaux pluviales.....	17
3.2.1. <i>Principe</i> .....	17
3.2.2. <i>Fonctionnement</i> .....	18
3.2.3. <i>Rendement</i> .....	19
3.3. Les bassins de rétention routiers .....	20
3.3.1. <i>Principe</i> .....	20
3.3.2. <i>Fonctionnement</i> .....	20
3.3.3. <i>Rendement</i> .....	21
3.4. Les bassins d'épuration de sucreries .....	22
3.4.1. <i>Principes</i> .....	22
3.4.2. <i>Fonctionnement</i> .....	22
4. Informations apportées par les ouvrages de traitement étudiés en relation avec les zones tampons humides .....	24
Conclusion.....	24
Bibliographie .....	25

## Introduction

Les travaux des précédentes phases du PIREN ont mis en évidence l'importance du rôle joué par l'agriculture dans la dégradation de la qualité des eaux superficielles dans le bassin de la Seine. Pour permettre le retour au bon état écologique des eaux de surface prôné par la DCE pour 2015, trois types d'actions complémentaires peuvent être envisagées : la diminution des intrants dans les parcelles, l'adaptation des stratégies d'application pour limiter les exportations et l'implantation de petits aménagements limitant les transferts de la parcelle vers le réseau hydrographique.

C'est ainsi qu'ont été imaginés des systèmes compensatoires, ou systèmes tampons, situés entre les parcelles et les cours d'eau et capables d'amorcer l'épuration de ces eaux agricoles. L'exemple le plus courant est la bande enherbée, imposée par l'écoconditionnalité des aides de la PAC depuis 2005. Cependant, dans certains contextes comme celui des parcelles drainées artificiellement, ces dispositifs n'ont pas l'impact attendu, car les eaux de drainage court-circuitent les bandes enherbées et sont directement rejetées dans le réseau hydrographique. Dans ce cas, une solution possible serait d'aménager des zones humides recueillant les eaux de drainage et d'en optimiser la fonction épuratrice. Plus généralement, ce type d'ouvrage est envisageable sur des bassins agricoles aux écoulements majoritairement superficiels (ruissellement ou drainage).

Or, le bassin de la Seine compte d'ores et déjà bon nombre de zones humides "artificielles" (dans le sens aménagées par l'homme), plus communément appelées mares ou étangs. L'analyse de leurs caractéristiques physiques (hydrologiques, écologiques, éventuellement bio-géochimiques) et de leur fonctionnement (gestion, usage) constitue une première base de réflexion pour proposer l'aménagement de nouveaux dispositifs. En particulier, certains de ces ouvrages ont été justement construits dans un objectif d'épuration de l'eau autre qu'agricole (urbaine, industrielle...). Ils seront donc plus spécifiquement étudiés.

Cette étude a donc pour objectif de synthétiser les informations sur les zones humides artificielles du bassin de la Seine et d'en tirer des enseignements pour l'aménagement de zones tampons humides à vocation d'épuration des eaux agricoles. Après avoir rappelé les principes de fonctionnement de ces zones tampons, nous présentons les premiers résultats, issus pour l'essentiel de la bibliographie, sur les zones artificielles existantes.

## 1. Les principes de la dépollution des eaux agricoles par les Zones Humides Artificielles (ZHA)

### 1.1. Caractéristiques des eaux agricoles concernées par ces aménagements

Les zones humides artificielles doivent être implantées en amont dans le bassin versant, afin de capter la pollution agricole au plus près de sa source. A cette échelle (groupe de parcelles), les eaux agricoles captées (ruissellement comme drainage) sont caractérisées par une forte variabilité temporelle des débits et des concentrations.

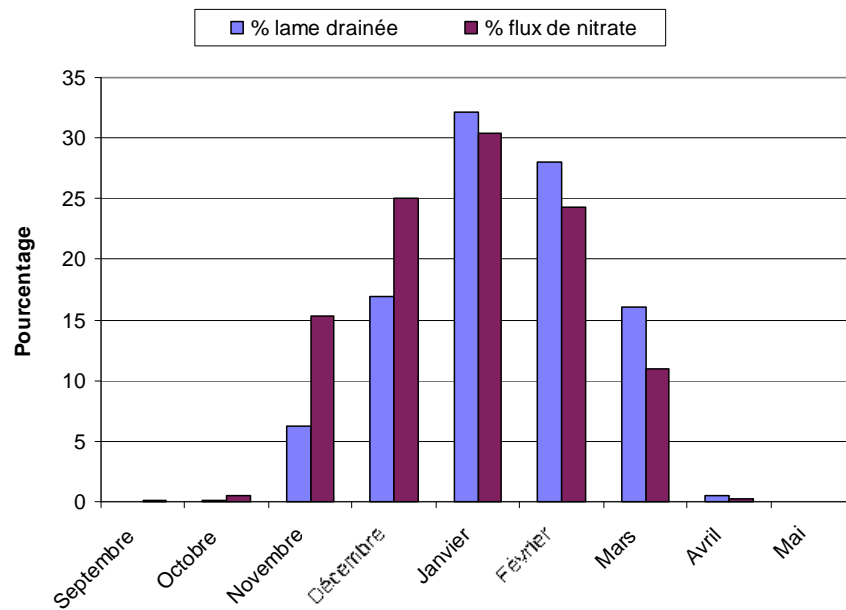
La variabilité du débit est liée au faible temps de réponse du bassin. En effet, comme seuls les écoulements superficiels sont collectés, l'effet tampon des compartiments du sous-sol du bassin versant est quasi nul. Cette variabilité temporelle est capitale car le fonctionnement hydraulique d'une zone humide détermine en grande partie son fonctionnement biogéochimique et écologique, à travers notamment le marnage et le temps de séjour des eaux.

La variabilité temporelle de la concentration en polluants se décline différemment suivant les polluants et les régions concernés. Les travaux effectués dans les différents projets PIREN ont permis d'avoir une bonne estimation des quantités de polluants.

#### 1.1.1. Les nitrates

Beaucoup de travaux ont été menés sur les exportations de nitrates par le drainage (Billy, 2007, et Tournebize *et al.*, 2005). Les concentrations en nitrates peuvent atteindre de très fortes valeurs lors des premiers écoulements (Figure 1), concentrant les nitrates issus de la minéralisation estivale et des

fertilisations de l'automne. Arlot (1991) présente une synthèse des gammes de concentration en ions mesurées en sortie de drainage sur tous les secteurs de référence français. La concentration moyenne annuelle oscille entre 10 et 90 mg/L N-NO<sub>3</sub>, alors que les pics de concentration peuvent atteindre 220 mg/L. Les exportations de nitrates par ruissellement seraient inférieures à celles d'un sol drainé. Simard (2005) montre que pour une période de deux ans d'étude, la charge moyenne de nitrates (NO<sub>3</sub>) a été respectivement de 5,64 kg/ha/an en ruissellement de surface et de 91,43 kg/ha/an en drainage. L'intérêt des zones humides artificielles pour abattre les taux de nitrates se justifie donc en sortie de drainage agricole.



**Figure 1 : Moyenne des contributions mensuelles des flux d'une saison complète de drainage, site de La Jaillière, Loire Atlantique (eau: 220 mm/saison et nitrate: 38 kgN/ha/saison, moyenne de 1989 à 1997) (Tournebize et al., 2005)**

### 1.1.2. Le phosphore

D'après les études effectuées sur le bassin de la Marne, les exportations de phosphore sont globalement faibles par rapport au stock dans les sols (moins de 0,01 %) et la contribution du ruissellement et des particules qui l'accompagnent serait majoritaire par rapport à celle du drainage (Nemery *et al.*, 2005). Ce résultat se retrouve dans la littérature (Simard, 2005). Dans cette dernière étude, les mesures sur le ruissellement atteignent des concentrations en phosphore total de 2,5 mg/L lors des épisodes estivaux, majoritairement sous forme particulaire, alors que selon Beauchemin *et al* (1998), le drainage présente une concentration moyenne inférieure 0,1 mg/L. La problématique du phosphore serait donc à prendre en compte essentiellement dans les zones humides artificielles alimentées par ruissellement.

### 1.1.3. Les pesticides

D'après l'expertise "pesticides, agriculture et environnement" de l'INRA et du Cemagref (2005), les quantités de pesticides exportées par le ruissellement sont de l'ordre de quelques pourcents de la quantité épanchée, la concentration pouvant aller jusqu'au mg/L (et parfois même plus) pour les événements pluvieux suivant les applications. L'exportation via le réseau de drainage serait plus faible (< 1% et 0,5% en moyenne mais sur plusieurs crues) du fait de la possibilité de rétention des molécules par la matrice du sol, mais les écoulements sont suffisamment concentrés pour induire un dépassement de la norme de potabilité. Les écoulements les plus concentrés sont ceux suivant les applications. L'aménagement d'une zone humide épuratoire peut se justifier pour les régions à ruissellement dominant comme les régions drainées.

## 1.2. Mécanismes de dissipation des polluants agricoles

L'intérêt d'aménager une zone tampon humide est de profiter des processus naturels d'épuration qui peuvent s'y produire. Ceux-ci ne sont pas contrôlés par les mêmes facteurs. Il sera donc nécessaire de dimensionner et de gérer les aménagements suivant les polluants concernés et l'objectif d'épuration prédéterminé.

- **Les nitrates :**

Dans les zones humides, deux processus peuvent permettre de dissiper les nitrates :

- **la dénitrification** : correspondant à une réduction des nitrates en produit gazeux (oxyde d'azote et diazote). C'est un processus essentiellement microbiologique qui permet, en l'absence d'oxygène libre, d'utiliser l'oxygène inclus dans la molécule du nitrate comme accepteur d'électrons. Cette réduction peut rester partielle et dégager du N<sub>2</sub>O (gaz à effet de serre). Elle est accompagnée d'une oxydation le plus souvent du carbone organique. Les capacités dénitrifiantes des zones humides comprennent d'une part la capacité intrinsèque du milieu à dénitrifier, et d'autre part la capacité des nitrates à être transportés près des sites de dénitrification dans les sédiments. Les capacités intrinsèques dépendent donc en particulier de la disponibilité en carbone organique autochtone ou allochtone, du taux d'oxygène dissous près des sites de dissipation, et de la température. Les capacités des nitrates à être transportés près des zones de dissipation dépendent notamment de la capacité de transport advectif et diffusif du milieu et donc en particulier de la hauteur de la colonne d'eau.

- **la fixation de l'azote par les plantes, bactéries et macrophytes** : la rétention est alors temporaire, une gestion (exportation) des macrophytes peut permettre d'éliminer cette part de l'azote.

- **Le phosphore :**

Dans les zones humides, les voies d'élimination des phosphates sont dues à différents processus :

- **la sédimentation** : dans le cas des zones tampons humides, la question du devenir des boues lors de curages éventuels devra être traitée en prenant en compte ce processus.

- **l'adsorption et la précipitation** dans le sol : Une partie du phosphore est rapidement adsorbée sur la surface des particules du sol ou régissent avec les minéraux (calcium, fer, aluminium...) pour former (en quelques semaines voire quelques mois) un phosphore très insoluble.

- **la fixation par les bactéries ou les plantes** : là encore, la rétention reste temporaire sauf si les plantes sont exportées.

- **Les pesticides :**

Il existe de nombreuses voies potentielles d'élimination des pesticides dans les zones humides :

- **la photodégradation** : provoquée par les rayonnements ultraviolets (longueurs d'onde comprises entre 10 et 450 nm) (Assier, 2001). Pour qu'elle soit réellement efficace, la lumière doit pouvoir pénétrer sur toute la colonne d'eau.

- **la biodégradation** : qui comprend la dégradation microbienne et la réaction de phytoremédiation. Le mécanisme principal est la phytodégradation par les enzymes des plantes et la phytostimulation permettant de limiter la migration des contaminants dans l'eau en pompant l'eau du sol et en conservant les molécules dans les tissus tout en rejetant l'eau par transpiration (assimilation). Ce processus est donc dépendant de la végétalisation de la zone.

- **la transformation chimique** : Les zones humides peuvent être en condition d'oxydation ou de réduction (en fonction de la hauteur de la nappe notamment). En condition aérobie, les microorganismes vivants dans le sol respirent et induisent des réactions chimiques d'oxydation en utilisant l'oxygène. Mais lorsque le sol est saturé en eau, le milieu présente alors des propriétés réductrices car la respiration classique des microorganismes est impossible, des processus de substitution se mettent donc en place (INRA, 2002).

- **la dégradation par les matières organiques ou les argiles** : la dégradation résulte de la réactivité chimique des groupements fonctionnels de la matière organique (principalement la fonction acide). Là encore, la richesse en matière organique dépendra de l'écosystème existant dans la zone humide.

- **l'adsorption sur les composés insolubles, par les argiles, et sur les matières organiques** : cela correspond à la fixation de molécules en solution par réactions physico-chimiques (principaux mécanismes d'adsorption des produits phytosanitaires : adsorption chimique (échange ionique...), ponts hydrogènes et adsorption physique (forces de Van Der Waal...)) sur une surface solide (Sac, 2007). Ce type de rétention peut rester temporaire (désorption possible), sauf si la molécule est dégradée par les micro-organismes (chaque molécule phytosanitaire correspond à une dégradation particulière).

Ces processus demandent donc une gestion hydraulique particulière pour que puissent s'établir les conditions d'une dégradation (conditions anaérobies pour la dénitrification, faible tirant d'eau pour la photodégradation, végétation et matière organique bien développée dans les deux cas).

Le temps de séjour des eaux nécessaire à la dégradation des pesticides peut être évalué à partir de la valeur de demi-vie ( $DT_{50}$ ) des pesticides. La demi-vie correspond à la durée à l'issue de laquelle la concentration initiale en pesticides est réduite de moitié. Les valeurs de  $DT_{50}$  varient selon les caractéristiques des pesticides et les conditions du milieu (température, ensoleillement, milieu aérobie ou anaérobie...). De plus, elles ont été obtenues à partir d'observations faites dans le sol ou dans l'eau et non dans les zones humides. Les métabolites issus de la dégradation des pesticides ne sont pas nécessairement moins polluants ou toxiques.

### 1.3. Les dispositifs étudiés

Les mécanismes décrits précédemment peuvent potentiellement se rencontrer dans les zones humides naturelles ou artificielles. Nous allons dans un premier temps définir les termes utilisés pour ces dernières et les situer par rapport à la définition classique des zones humides.

- **Zone humide** : Selon l'article 2 de la loi sur l'eau française de 1992, « on entend par zone humide les terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire ; la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année. »

- **Zone Humide Artificielle (ZHA)** : Dans le cadre de cette étude, on entend par zones humides artificielles les zones humides aménagées par l'homme pour des objectifs divers, qui peuvent aller de la lutte contre les inondations, à la nécessité d'abreuver le bétail (voir partie 2 du rapport).

- **Zone tampon humide** : Zone humide artificielle aménagée dans un but de dépollution des eaux.

- **Mare** : « Une mare est une étendue d'eau à renouvellement généralement limité, de taille variable et de 5 000 mètres carré au maximum. Sa faible profondeur qui peut atteindre environ deux mètres, permet à toutes les couches d'eau d'être sous l'action du rayonnement solaire et aux plantes de s'enraciner sur tout le fond. De formation naturelle ou anthropique, elle se trouve dans des dépressions imperméables, en contextes rural, péri-urbain voire urbain. Alimentée par les eaux pluviales et parfois phréatiques, elle peut être associée à un système de fossés qui y pénètrent et en ressortent ; elle exerce alors un rôle tampon au ruissellement. Elle peut être sensible aux variations météorologiques et climatiques. Dans ce cas c'est une mare temporaire. » (Dutilleul, 2003). La mare est souvent d'origine anthropique, elle correspond à un type de zone humide artificielle.

- **Étang** : « L'étang est contrôlé par l'homme par les bondes qui permettent une régulation hydraulique. La taille n'est pas un critère de différenciation par rapport à la mare, même si en général l'étang est plus important que la mare » (Sajaloli, 4 octobre 2003, l'Entracte) Les étangs, notamment peu profonds, correspondent donc également à des zones humides artificielles.

Nous avons donc vu les caractéristiques nécessaires aux zones humides pour avoir un rôle épurateur. Pour aménager une zone tampon humide, il est nécessaire de comprendre comment les processus interagissent dans les zones humides artificielles existantes, quel type de végétation s'installe, quelle gestion est nécessaire pour garder le caractère humide ou encore quel usage autre que celui d'épuration

de l'eau elle pourrait avoir. Afin de répondre à ces questions, nous avons rassemblé les études bibliographiques sur les mares, les étangs ou autres zones humides artificielles qui ont fait l'objet de recherche. Nous présentons dans la partie suivante les éléments qui peuvent servir pour l'aménagement de zones tampons humides.

## 2. Les zones humides artificielles du bassin de la Seine

Cette étude s'appuie en grande partie sur la bibliographie rassemblée par le « pôle relais mares et mouillères de France » (<http://www.pole-mares.org/>), que nous tenons à remercier pour son accueil et la mise à disposition des travaux existants. La Seine et Marne, la Haute Normandie, la Marne et l'Eure-et-Loir sont les principaux départements où se situent les études.

### 2.1. Usages anciens et actuels des mares, étangs et bassins du bassin versant de la Seine

L'étude de la bibliographie a permis de mettre en évidence un certain nombre de fonctions anciennes ou actuelles des mares, étangs ou bassins (Figure 2) :

- **Activités domestiques** : Autrefois, les mares pouvaient servir de réserve en eau de boisson, mais également en eau destinée à la cuisine, à la toilette et au ménage (Chaib, 1997).
- **Lavoir** : Sur les rives de certaines mares étaient construits des lavoirs communaux.
- **Bassin d'ornement** : Certaines mares ou petits étangs situés à proximité d'habitation ont pour fonction principale l'ornement.
- **Bassin de loisir** : Certaines retenues d'eau sont destinées aux loisirs comme la baignade ou les sports aquatiques, notamment à proximité des zones urbaines.
- **Pêche** : Historiquement, beaucoup d'étangs ont été aménagés pour la pisciculture (Rouillard *et al.*, 2004).
- **Glacière** : Autrefois on creusait des trous afin de conserver la glace récoltée sur les étangs. Lorsque cette pratique a été abandonnée, les trous n'ont pas tous été comblés, des mares ont pu y prendre place comme c'est le cas dans la commune de Jouarre (77) (Matras, 1999).
- **Forges** : Les forges disposaient d'une mare pour le trempage des outils (Chaib, 1997).
- **Utilisation des plantes aquatiques** : En Haute-Normandie, le jonc épars servait à la réalisation de « paillasons » pour protéger les bouteilles ou les jeunes arbres. Le rubanier ou le jonc servait à rempailler les chaises (Chaib, 1997). Les roseaux avaient de multiples usages. A Jouarre, ils étaient utilisés par les sœurs de l'abbaye pour le remplissage des chaises (Matras, 1999).
- **Cressonnière** : La culture du cresson, activité pratiquée notamment dans les vallées de l'Essonne et de ses affluents, nécessite la gestion des niveaux d'eau dans des bassins de faible profondeur.
- **Vannerie** : La culture de l'osier était parfois pratiquée sur le pourtour des mares et l'osier était mis à tremper dans l'eau pour être écorcé et assoupli avant d'être tressé, comme c'était le cas en Haute-Normandie (Chaib, 1997).
- **Rouissage du chanvre ou du lin** : Cette activité était réalisée notamment dans l'Eure et en Haute-Normandie. La fermentation butyrique liée à ce processus rendait les mares impropres à tout autre usage (Chaib, 1997).
- **Brassage du cidre** : Autrefois, en Haute-Normandie, l'eau des mares pouvait être utilisée pour le lavage des pommes lors du brassage du cidre. (Chaib, 1997).
- **Pétrissage du pain** : En Haute-Normandie notamment, les fours à pain étaient souvent situés près de la mare, l'eau servait à la fabrication du pain (Chaib, 1997).

- **Abreuvoir** : Certaines mares servent et/ou servaient à abreuver les animaux, on peut donc en rencontrer sur les anciennes routes de passage des troupeaux venant des régions d'élevage et allant à Paris (route de Normandie par exemple). Dans les secteurs où l'élevage a diminué comme c'est le cas en Seine et Marne, cette fonction a en grande partie disparu (Matras, 1999) et un grand nombre de ces mares auraient été comblées pour agrandir la surface de culture (Arevalo Moreno, 2004), il en reste seulement une partie.

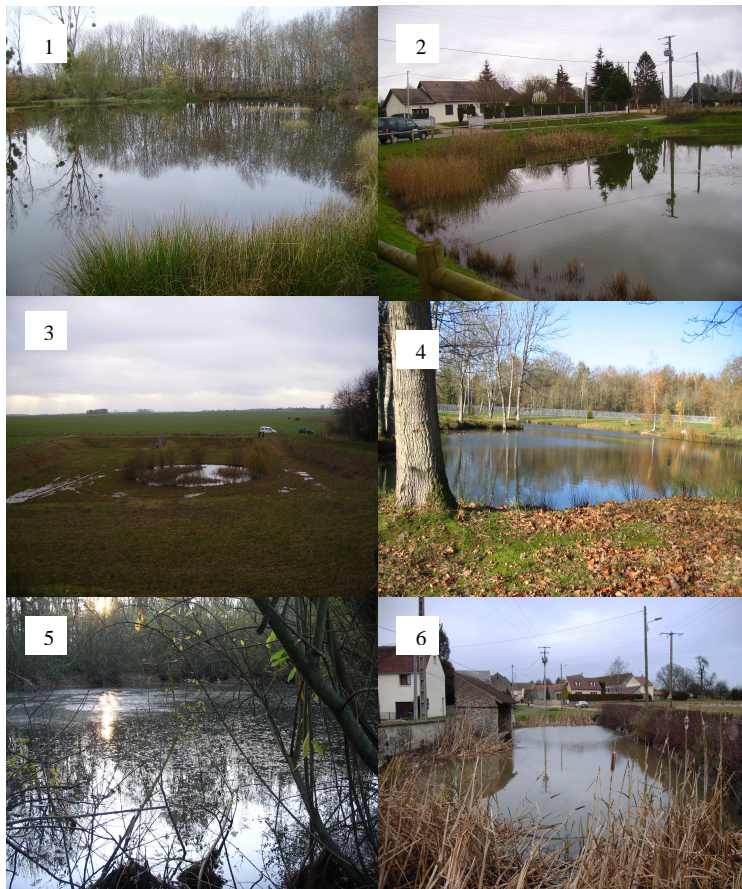
- **Lutte contre l'érosion** : Des bassins de rétention sont parfois utilisés comme moyen de lutte contre l'érosion et contre les coulées de boues. Ce système est ainsi employé depuis 20 ans dans le bassin de la Viosne (André & Fouassier, 2001).

- **Carrières** : Les anciennes carrières à ciel ouvert (comme pour l'extraction de granulats ou de meulières) sont devenues des étangs ou des mares. Si les carrières de granulats font l'objet d'une réflexion sur la réhabilitation du site (Dasnias, 2002), les carrières à meulières, qui ont fait la fierté de la Ferté-sous-Jouarre (77) depuis le XV<sup>ème</sup> siècle (Matras, 1999), ont généré la formation de mares forestières non entretenues.

- **Bassin de lutte contre les inondations** : Des bassins sont parfois aménagés dans le but de retenir les eaux pluviales et donc de limiter les inondations dans les secteurs à risque, comme c'est le cas notamment des bassins de rétention routiers.

- **Lutte contre les incendies** : Bon nombre de mares, ayant ou non une des fonctions citées précédemment, servent également de réserve en eau pour la lutte contre les incendies (Chaib, 1997).

Ainsi, dans le bassin de la Seine, il existe un nombre très important de zones humides artificielles servant ou ayant servi à l'homme. Les réflexions sur les zones tampons humides peuvent donc s'appuyer sur l'expérience du fonctionnement de ces systèmes.



*Figure 2: quelques mares du bassin de la Seine*

**1: mare qui servait au rouissage du lin et du chanvre textiles (Fumechon, 27)**

**2 : mare utilisée pour la lutte contre les incendies (Tilleul Lambert, 27)**

**3 : mare utilisée pour la lutte contre les inondations (Berville la Campagne, 27)**

**4 : mare d'ornement (L'Hermitière, 77)**

**5 : mare provenant d'une ancienne carrière à meules (Le Pont Cablin, 77)**

**6 : ancien lavoir (Mauroy, 77)**

## 2.2. Physionomie des mares et des étangs

### 2.2.1. *L'alimentation*

Ces zones peuvent être alimentées de différentes manières :

- **Les précipitations et le ruissellement** : Toutes ces zones sont alimentées par les précipitations, par les eaux de ruissellement
- **Les eaux de drainage** des champs.
- **Les sources** : Les sources font l'objet d'une réglementation qui permet à leur propriétaire de s'en servir à des fins personnelles et donc pour le stockage d'eau dans une mare.
- **Les nappes phréatiques** : certaines mares, ou certains étangs sont aménagés en bordure de cours d'eau et peuvent être alimentés par une nappe phréatique.
- **Connexion à d'autres mares ou étangs** : des mares ou étangs sont parfois construits pour évacuer le trop-plein d'une autre mare ou d'un étang.

Chaib (1997) propose une typologie des mares en Haute Normandie suivant leur position dans le paysage. Les mares de plateau sont plutôt alimentées par le ruissellement et les eaux de pluie, alors que les mares de fond de vallée bénéficient de l'eau des nappes. Les zones tampons humides doivent être aménagées et gérées en tenant compte de cet apport de nappe : en effet, si elle veut garder son rôle d'épuration en amont de la pollution, les eaux de ruissellement ou de drainage doivent rester le principal contributeur de la zone.

### 2.2.2. *L'étanchéité*

La plupart des mares ou des étangs doivent leur étanchéité à la nature du sol (limons argileux par exemple). Mais lorsque l'étanchéité n'est pas présente naturellement, il a été nécessaire de la créer à partir de matériaux comme l'argile, le béton et les bâches ou géomembranes (bâche en PVC recouverte d'une couche de sable).

### 2.2.3. *Les berges*

Un certain nombre de mares de ferme sont bordées par un muret de pierres, ce qui permet de retenir la terre au bord de la mare. Dans certains cas, le fond de la mare est pavé ce qui rend le nettoyage de la vase plus facile. Cependant, ce type d'aménagement n'est pas préconisé lors de la réalisation d'une zone tampon humide. En effet, un fond naturel et des berges en pente douce favorisent le développement de la végétation. Or les plantes sont des éléments essentiels dans la dépollution des eaux. Il faut donc plutôt préférer des aménagements avec des berges végétalisées à pente douce, nous allons d'ailleurs étudier plus précisément le type de végétation rencontré dans ces systèmes.

## 2.3. Ecologie des mares : quelques cas d'étude

De par leur fonctionnement hydrologique et biogéochimique, les zones humides, artificielles comme naturelles, permettent à un écosystème particulier de se mettre en place. Or, comme nous l'avons évoqué dans le premier paragraphe, la végétation est un facteur essentiel dans les processus de dépollution des eaux. De plus, la présence de ce type de zone dans un contexte peu riche en biodiversité, comme c'est le cas des zones agricoles, peut induire une diversification de l'habitat favorable à la diversité aussi bien floristique que faunistique. Il y a ainsi un intérêt à étudier les principales espèces trouvées dans les zones humides artificielles existantes.



### 2.3.1. La flore

Dans les mares, la végétation d'organise en ceinture. Chaque ceinture correspond à un besoin en eau spécifique. Cette répartition graduelle se fait selon la dénivellation et le marnage (Figure 3).

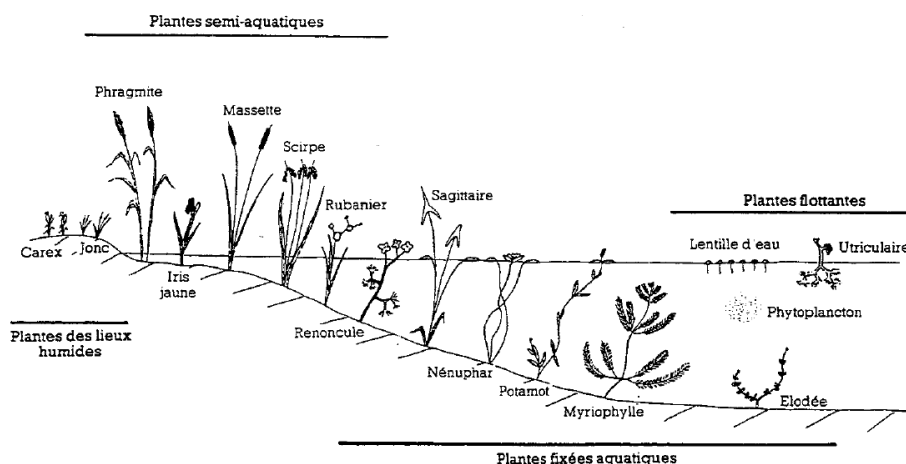


Figure 3: Répartition des végétaux au sein d'une mare (Matras C., 1999)

Les végétaux communément retrouvés dans les zones humides naturelles et artificielles du bassin de la Seine peuvent être classés en deux groupes :

- **Les hydrophytes :** Il s'agit des plantes se développant entièrement dans l'eau ou en partie à sa surface. Ces plantes ne peuvent survivre sans eau.

On compte trois groupes d'hydrophytes :

- Les plantes totalement submergées comme le Cératophylle épineux (*Ceratophyllum demersum*) ou l'Elodée du Canada (*Elodea canadensis*, plante envahissante)
  - Les plantes enracinées dans le fond de la mare mais flottante en surface comme le Nénuphar blanc (*Nymphaea alba*), le Potamot pectiné (*Potamogeton pectinatus*), ou la Renoncule aquatique (*Ranunculus aquatilis*) ;
  - Les plantes totalement flottantes et non enracinées comme la petite lentille d'eau (*Lemna minor*).
- **Les hélophytes :** Les hélophytes sont des plantes qui ne se développent que sur des terrains gorgés d'eau comme le Plantain d'eau commun (*Alisma plantago-aquatica*), la Glycérie (*Glyceria* gr), l'Iris jaune (*Iris pseudocarus*), le Juncus épars (*Juncus effusus*), ou encore la Massette à larges feuilles (*Typha latifolia*). On les retrouve donc au bord des mares. Certaines ont toujours leur base dans l'eau, d'autres ne l'ont que périodiquement.

Dans certains cas, on peut retrouver des espèces non aquatiques comme les espèces rudérales telles que la Grande Ortie (*Urtica dioica*). Cela peut être le cas lorsque le niveau de l'eau varie car ce sont des espèces qui tolèrent des variations du niveau d'humidité.

Des études visant à inventorier la végétation de mares montrent des résultats de diversités faunistiques différents (Tableau 1). Cette hétérogénéité inter-études est à mettre en relation notamment avec les caractéristiques des milieux étudiés (localisation, types et dimensions des zones humides artificielles), le nombre variable de sites répertoriés (de 4 à 55 zones humides artificielles), ainsi que la fréquence, la période et les conditions d'inventaire.

Une certaine hétérogénéité intra-étude a également été constatée, notamment sur le site de Châteauneuf-en-Thymerais. En effet, la diversité spécifique de chaque mare y est très variable tant en nombre qu'en espèces.

**Tableau 1: Diversité floristique des ZHA selon sept études réalisées sur le bassin de la Seine**

Localisation	Type(s) de ZHA	Taille et Profondeur des ZHA	Nombre de ZHA étudiées	Nombre d'espèces végétales recensées	Principales espèces recensées	Remarques
<b>Châteauneuf-en-Thymerais (28)<sup>1</sup></b>	Mares à fonctions diverses	200 à 500 m <sup>2</sup> -	55	<b>21</b>	<i>Nymphaea alba</i> , <i>Glyceria aquatica</i> , <i>Iris pseudocarus</i> , <i>Lemna minor</i> , <i>Lycopus europaeus</i> , <i>Potamogeton crispus</i> , <i>Typha latifolia</i>	Importante hétérogénéité
<b>Jouarre (77)<sup>2</sup></b>	Mares à fonctions diverses	- -	24	<b>29</b>		
<b>Picardie et Champagne Ardenne<sup>3</sup></b>	Bassins d'épuration de sucreries désaffectées	1 à 15 ha -	5 sites d'environ 10 à 25 ZHC chacun	<b>12</b>	<i>Urtica dioica</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Typha latifolia</i>	
<b>Bassin de la Seine (27, 51, 60, 77)<sup>4</sup></b>	Carrières à granulats	4 à 50 ha 1,5 à 6 m	4	<b>≥ 250</b>	<b>3 espèces rares :</b> <i>Potamogeton perfoliatus</i> , <i>Carex pseudocyperus</i> , <i>Plantago scabra</i>	≥ 12 espèces rares en Ile-de-France par ZHA
<b>Haute-Normandie et Ile-de-France<sup>5</sup></b>	Bassins autoroutiers	50 à 10 000 m <sup>2</sup> 50 à 120 cm	20	<b>266</b> dont ≥ 46% inféodées aux zones humides	<i>Glyceria fluitans</i> , <i>Potamogeton pectinatis</i> , <i>Lemna minor</i>	Espèces communes à très communes
<b>Forêt de Sénart (91)<sup>6</sup></b>	Bassins routiers	- -	11	<b>144</b>	<i>Glyceria fluitans</i> , <i>Lemna minor</i> , <i>Ranunculus australis</i>	Sur 8 formations végétales, 3 sont liées aux mares
<b>Champagne humide<sup>7</sup></b>	Etang du PNR de la Forêt d'Orient	1 à 17 ha 2 à 4 m	11	<b>277</b> dont 122 inféodées aux zones humides	<b>3 des 14 espèces patrimoniales :</b> <i>Gratiola officinalis</i> , <i>Ranunculus lingua</i> , <i>Carx bohemica</i>	Importante hétérogénéité Recensement de 14 espèces patrimoniales

<sup>1</sup> Limoges, 1997<sup>2</sup> Matras, 1999<sup>3</sup> Abraham, 2002<sup>4</sup> Ecosphère<sup>5</sup> Quillet & Pierron, 1998<sup>6</sup> Cerezo, 2004<sup>7</sup> Becu & Ferment, 2005<sup>7</sup> PNR Forêt d'Orient, 2004

- non répertorié

Dans la plupart des cas, les espèces recensées sont communes voire très communes comme le Nénuphar blanc (*Nymphaea alba*), la Glycérie aquatique (*Glyceria aquatica*), la Lentille d'eau (*Lemna minor*) ou encore la Massette à larges feuilles (*Typha latifolia*). Les carrières étudiées sur le bassin de la Seine révèlent cependant la présence de quelques espèces rares en Ile-de-France et les bassins autoroutiers de Haute-Normandie et d'Ile-de-France comptent des espèces rares ou originales. De plus, les étangs du Parc naturel régional de la Forêt d'Orient abritent 14 espèces présentant un intérêt

patrimonial (2 protégées au niveau national, 1 au niveau régional, et 13 inscrites sur la liste rouge de Champagne-Ardenne).

Ainsi, les zones humides artificielles sont principalement colonisées par des espèces communes. Mathieu (2006) précise que 4% des espèces particulièrement menacées en France sont inféodées aux mares.

La fonction principale des plantes dans les zones humides étant de créer un environnement adéquat pour les populations microbiennes (bactéries, champignons, algues, protozoaires), un fort couvert végétal, de l'ordre de 60-80%, est à mettre en place pour une bonne efficacité épuratoire du système (Tanner & Sukias, 2003). Ainsi, avec le temps les mares et étangs peuvent présenter une couverture végétale suffisante pour opérer une épuration des eaux. En effet, certaines espèces comme les roseaux, joncs, massettes et ou encore iris des marais (ou iris jaune) sont favorables à la dépollution des eaux.

### 2.3.2. La faune

La physionomie et la colonisation végétale des zones humides artificielles ou naturelles sont des facteurs influençant la diversification faunistique.

Parmi les espèces communément rencontrées dans les zones humides, on peut citer :

- les **Insectes**, classe qui regroupe notamment :
  - Les Odonates comprenant les Zygoptères (demoiselles) et les Anisoptères (libellules) comme *Ischnura elegans*, *Coenagrion puella* ou encore *Anax imperator* ;
  - Les Hétéroptères (punaises d'eau) comme *Notonecta glauca* ou *Gerris lacustris* ;
  - Les Coléoptères comme *Dytiscus marginalis* ;
  - Les Diptères (moustiques) comme *Chironomus* ;
- les **Amphibiens** comme la Grenouille verte (*Rana esculenta*), le Crapaud commun (*Bufo bufo*), le Triton alpestre (*Triturus alpestris*), ou encore la Salamandre tachetée (*Salamandra salamandra*) ;
- les **Oiseaux** comme le Canard colvert (*Anas platyrhynchos*), la Poule d'eau (*Gallinula chloropus*), ou le Foulque macroule (*Fulica atra*) ;
- les **Poissons** comme le Rotengle (*Carassius auratus*), la Carpe (*Cyprinus carpio*) ou le Gardon (*Rutilus rutilus*) ;
- les **Mammifères** comme le Lapin de garenne (*Oryctolagus cuniculus*), le Ragondin (*Myocastor coypus*) ou le Rat musqué (*Ondatra zibethica*).

Plusieurs études proposent des inventaires faunistiques (Tableau 2).

**Tableau 2: Diversité faunistique des ZHA selon sept études réalisées sur le bassin de la Seine**

Localisation	Type(s) de ZHA	Taille des ZHA	Nombre d'espèces animales recensées				
			Insectes	Amphibiens	Oiseaux	Poissons	Mammifères
<b>Châteauneuf-en-Thymerais (28)<sup>1</sup></b>	Mares à fonctions diverses	200 à 500 m <sup>2</sup>	6	3	2	1	-
<b>Jouarre (77)<sup>2</sup></b>	Mares à fonctions diverses	-	8	8	-	-	-
<b>Picardie et Champagne Ardenne<sup>3</sup></b>	Bassins d'épuration de sucreries désaffectées	1 à 15 ha	-	-	21	4 (sur un seul site)	12
<b>Bassin de la Seine (27, 51, 60, 77)<sup>4</sup></b>	Carrières à granulats	4 à 50 ha	≥ 17	≥ 9	≥ 169	≥ 6	≥ 21
<b>Haute-Normandie et Ile-de-France<sup>5</sup></b>	Bassins autoroutiers	50 à 10 000 m <sup>2</sup>	16 Odonates ; 31 autres insectes	1	41	-	2
<b>Forêt de Sénart (91)<sup>6</sup></b>	Bassins routiers	-	13 Odonates ; 10 autres insectes	8	28	-	6
<b>Champagne humide<sup>7</sup></b>	Etang du PNR de la Forêt d'Orient	1 à 17 ha	54 Odonates ; 75 autres insectes.	-	-	13	4

<sup>1</sup> Limoges, 1997<sup>2</sup> Matras, 1999<sup>3</sup> Abraham, 2002<sup>4</sup> Ecosphère<sup>5</sup> Quillet & Pierron, 1998<sup>6</sup> Cerezo, 2004<sup>7</sup> PNR Forêt d'Orient, 2004

- non répertorié

Les variations inter-études de la diversité, évoquées dans l'analyse de la flore (2.3.1. La flore), sont encore plus vraies pour la faune. En effet, les inventaires ne portent que sur quelques classes animales et n'ont pas fait l'objet du même effort de recensement.

Il faut noter également qu'il est possible de ne pas retrouver certaines espèces tous les ans. En effet, ceci dépend des particularités de reproduction de certaines espèces, comme les odonates qui ne se reproduisent que tous les deux à trois ans, ou encore des facteurs extérieurs favorables ou non à la reproduction de certaines espèces.

Certaines études sont plus axées sur une classe en particulier comme c'est le cas des travaux réalisés sur des carrières du bassin de la Seine qui concernent principalement les oiseaux.

Les travaux d'inventaires portant sur Châteauneuf-en-Thymerais et Jouarre présentent un nombre d'espèces restreint. Cependant les études réalisées sur les carrières à granulats du bassin de la Seine, sur les bassins autoroutiers de Haute-Normandie, d'Ile-de-France et de la Forêt de Sénart et sur les Etangs de la Champagne humide présentent des diversités faunistiques supérieures, et révèlent la présence d'espèces remarquables.

Certains oiseaux recensés possèdent un statut de grande rareté. Ainsi, dans un bassin autoroutier de l'Aisne, sur 107 espèces, 67 sont protégées au niveau national, 54 sont inscrites dans la Directive oiseaux et 16 sont inscrites dans la liste rouge française.

De plus, sur les 54 espèces d'odonates identifiées sur les étangs piscicoles de la Champagne Humide, plus d'une trentaine présentent un degré de rareté ou un degré de menace particulier soit plus de 55 % des espèces recensées.

Quillet et Pierron (1998) ont montré que, dans le cas de bassin autoroutiers, la diversité avifaunistique est dépendante de la végétation et généralement de la surface en eau.

Les zones tampons humides seraient principalement localisées dans les zones agricoles. Ainsi la colonisation par une faune spécifique serait un atout dans ces milieux peu diversifiés.

### 3. Dépollution par les bassins de rétention dans le bassin de la Seine : quelques cas d'étude

Dans cette partie, nous présentons une synthèse bibliographique des exemples d'utilisation de zones tampons humides pour la dépollution. Ces études portent sur l'analyse de quelques éléments tels que les MES ou l'azote Kjédahl et non sur la pollution diffuse agricole.

#### 3.1. Le lagunage naturel

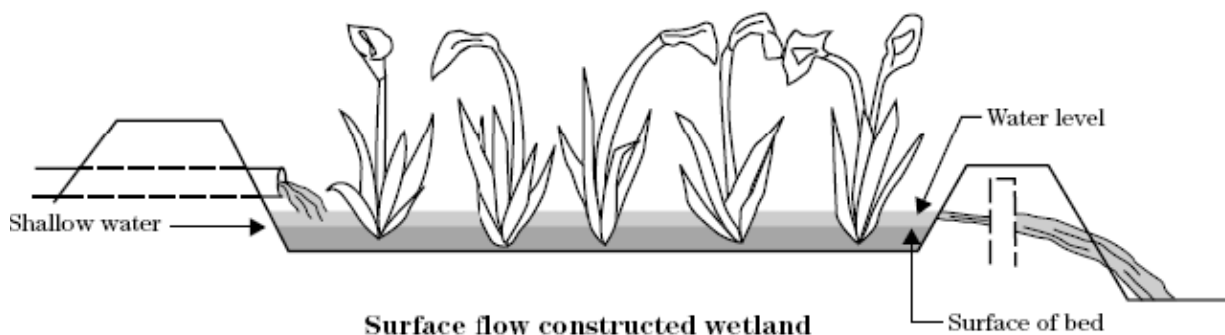
##### 3.1.1. Principe

Le lagunage naturel a pour principe d'optimiser la circulation de l'énergie solaire dans les chaînes alimentaires d'un écosystème aquatique simplifié avec un recyclage accéléré, par les décomposeurs, des matières organiques issues d'effluents domestiques (Fischesser & Dupuis-Tate, 1996).

Dans le domaine de l'assainissement domestique, il existe plusieurs types de zones humides artificielles selon leur fonctionnement hydraulique (Sac, 2007) :

- **Les zones humides à écoulement de surface : SF wetland (Surface Flow wetland) ou FWS (Free Water Surface)**

Ce sont des bassins (Figure 4) peu profonds dont le niveau de l'eau est au-dessus du sol. Ils sont plantés de végétation émergente (Passeport, 2006). La profondeur varie de 15 à 45 cm en général. Le traitement des eaux est principalement dû à l'activité microbienne. En effet, beaucoup de micro-organismes sont liés à la litière, la matrice sol/racine et aux tiges submergées des plantes (National engineering handbook, 2002).

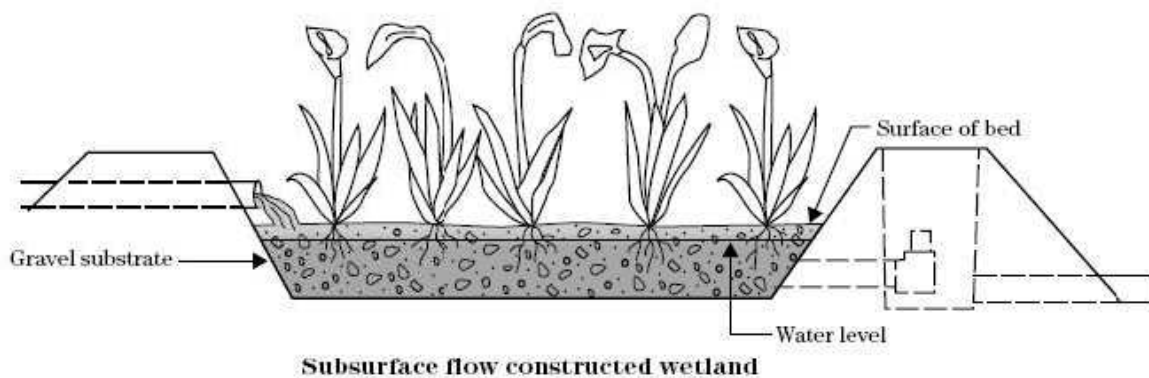


*Figure 4: Zone humide à écoulement de surface  
(National engineering handbook, 2002)*

- **Les zones humides à écoulement subsurface : SSF wetland (SubSurface Flow wetland)**

Ce sont des bassins (Figure 5) dont le niveau de l'eau est en dessous d'un substrat poreux. La pente est comprise entre 1 et 3% (Bidois, 1999). L'eau circule à travers du sable, du gravier, des pierres et le sol afin de créer un système saturé. Les eaux à traiter arrivent à mi-hauteur du lit (National engineering handbook, 2002). De la végétation hydrophyte émergente est plantée à la surface de la zone humide. Ce type d'aménagement est utilisé pour réduire la DBO<sub>5</sub> (Demande Biologique en Oxygène à 5 jours) des eaux usées domestiques mais n'est généralement pas utilisé pour les eaux agricoles car l'écoulement de l'eau entrant dans l'aménagement doit être uniforme ce qui n'est pas le cas avec les eaux de drainage. De plus, les particules solides risqueraient de colmater le système (Passeport, 2006). Ces filtres peuvent être traversés par un écoulement vertical ou par un écoulement horizontal.

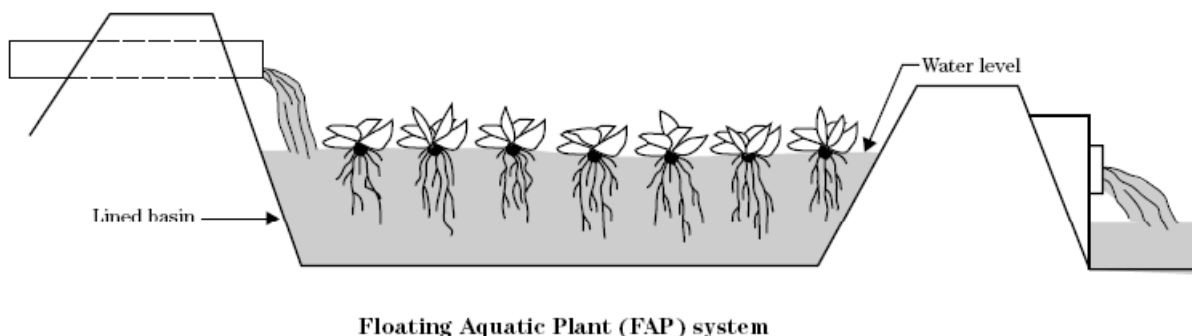
*Remarque :* Des zones humides artificielles peuvent combiner les deux types d'écoulement : écoulement de surface et écoulement subsurface.



**Figure 5: Zone humide à écoulement subsurface**  
(National engineering handbook, 2002)

- **Système à plantes aquatiques flottantes : FAP (Floating Aquatic Plant system)**

Ce sont des étangs ou séries d'étangs (Figure 6) où poussent des plantes aquatiques flottantes comme la Hyacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*). La profondeur permet un contact entre les racines et les eaux à traiter : 90 cm à 1,5 mètres environ. Les plantes utilisées ont une croissance rapide et produisent généralement suffisamment d'ombre pour inhiber la croissance algale, ce qui permet de maintenir un pH et une concentration en oxygène dissous adéquates (National engineering handbook, 2002)



**Figure 6: Système à plantes aquatiques flottantes**  
(National engineering handbook, 2002)

### 3.1.2. Fonctionnement de l'écosystème « Lagunage naturel »

Le lagunage naturel a pour but de traiter les effluents domestiques chargés en matières organiques, en MES (matières en suspension), en matières azotées et en phosphore (Tableau 3).

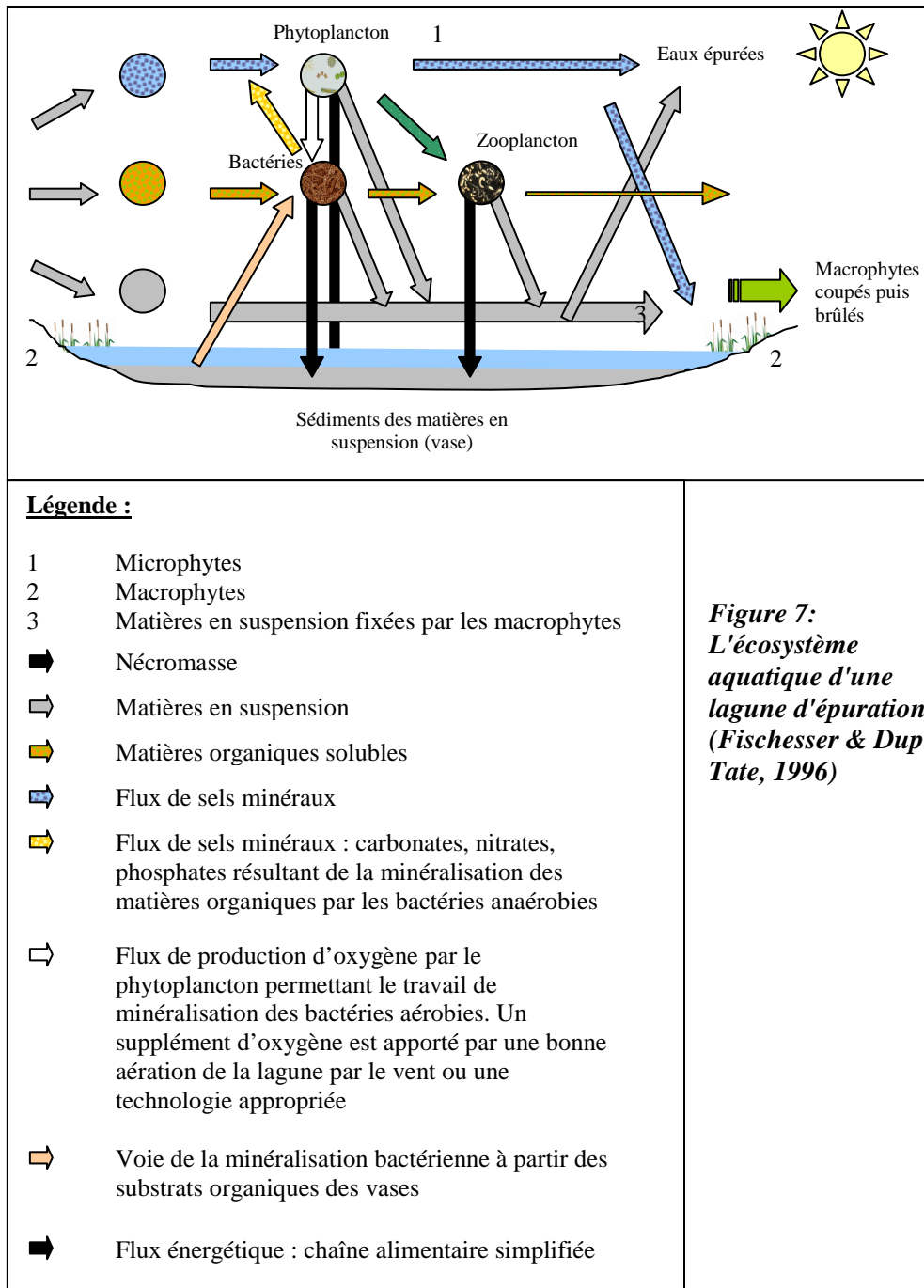
**Tableau 3: Concentrations moyennes minimales et maximales des effluents domestiques entrant dans les lagunages naturels (AERM, 2007)**

Polluants	Concentrations (mg/L)	
	Minimum	Maximum
<b>DBO<sub>5</sub></b> (Demande Biologique en Oxygène à 5 jours)	50	300
<b>DCO</b> (Demande Chimique en oxygène)	100	700
<b>MES</b> (Matières en suspension)	50	400
<b>NTK</b> (Azote Kjeldahl)	10	65
<b>Pt</b> (Phosphore total)	2	10

Un lagunage est composé généralement de 3 bassins ou lagunes disposés en série (Figure 8), de profondeur relativement faible (1,20 m environ). Le premier bassin (lagune primaire) est une lagune à microphytes (phytoplancton) servant à la dégradation de la charge polluante carbonée, et les deux autres (lagunes secondaire et tertiaire) sont des lagunes à macrophytes utilisées pour induire un abatement de l'azote, du phosphore et des algues (provenant du premier bassin). L'épuration est assurée par un long temps de séjour (Tableau 4) (AERM, 2007)

**Tableau 4: Règles de dimensionnement préconisées pour le lagunage naturel, EH : Equivalent Habitant (AERM, 2007)**

	Lagune primaire	Lagune secondaire	Lagune tertiaire
<b>Dimensionnement préconisé (m<sup>2</sup>/EH)</b>	9	4,5	4,5
<b>Temps de séjour (jours)</b>	50 à 55	15 à 20	5 à 15



**Figure 7:**  
*L'écosystème aquatique d'une lagune d'épuration (Fischesser & Dupuis-Tate, 1996)*

Le mécanisme de base est la photosynthèse (Figure 7). La lumière permet l'apparition d'algues qui produisent de l'oxygène nécessaire au développement de bactéries aérobies (AERM, 2007). L'agitation de l'eau par le vent ou par un dispositif d'aération augmente l'oxygénation de l'eau.

Ainsi une lagune bien aérée est très favorable aux bactéries aérobies qui minéralisent la matière organique et libèrent des sels nutritifs. Ces derniers, associés à la charge minérale des effluents, stimulent le développement des microphytes et du zooplancton (Fischesser & Dupuis-Tate, 1996).

Les bactéries anaérobies, présentes en fond de bassin, dégradent les sédiments issus de la décantation de la matière organique. Ce processus entraîne la formation de gaz carbonique et de méthane (AERM, 2007).



La charge minérale excédentaire est récupérée dans les lagunes suivantes plantées de macrophytes qui ont pour but d'être des supports pour les bactéries, les algues et le zooplancton. Ces lagunes sont donc composées de roseaux, de joncs, de massettes ou d'iris des marais (AERM, 2007). Par l'activité photosynthétique, les macrophytes assimilent les minéraux pour leur croissance. La végétation est régulièrement fauchée, exportée puis brûlée. (Fischesser & Dupuis-Tate, 1996).

### 3.1.3. Rendement

Du fait de phénomènes d'infiltration et d'évaporation, les débits entrée-sortie ne sont pas conservés. Les rendements présents ont donc été calculés sur les flux (Tableau 5).

**Tableau 5: Rendement en flux (Réduction en %) (Racault. et al., 1997)**

Polluants	Moyenne	Ecart type
<b>DCO</b>	78	16
<b>MES</b>	79	20
<b>NTK</b>	72	23
<b>Pt</b>	66	24



**Figure 8: Lagunage naturel à Lille (69) ([www.lillemetropole.fr](http://www.lillemetropole.fr))**

## 3.2. Les bassins de retenue d'eaux pluviales

### 3.2.1. Principe

La fonction première de ce type d'équipement est la protection contre les inondations. Mais, les bassins de retenue des eaux pluviales peuvent avoir comme deuxième objectif la dépollution des eaux. Notons cependant que ces deux objectifs nécessitent certaines caractéristiques contradictoires. En effet, pour lutter contre les inondations, il est nécessaire de disposer d'un volume de stockage important, alors que pour effectuer une dépollution il est indispensable d'avoir une faible hauteur d'eau pour favoriser la pénétration de la lumière. La surface de ses bassins doit donc être importante, ce qui devient difficile notamment dans les zones urbaines.

Dans certains cas, les bassins sont enterrés. Nous nous intéresserons ici uniquement aux bassins à ciel ouvert.

### 3.2.2. Fonctionnement

La pollution dans les bassins d'eaux pluviales (Tableau 6) est en grande partie fixée sur les matières en suspensions présentes dans les eaux de ruissellement (AE & STU, 1994). Ces particules ont une vitesse de sédimentation élevée, ce qui est favorable à la décantation opérée dans les bassins de retenue.

**Tableau 6: Concentrations annuelles et flux annuels des eaux pluviales de réseaux séparatifs. Valeurs moyennes de 3 campagnes de mesures à Maurepas (78), Les Ulis Nord (91) et Vélizy (78) (AE & STU, 1994)**

Polluants	Concentration moyenne (mg/L)	Charge spécifique annuelle (kg/ha/an)
<b>DBO5</b>	21	59
<b>DCO</b>	119	343
<b>MES</b>	273	813
<b>NTK</b>	4,4	1,4
<b>Pb</b>	0,23	0,57

Si la majeure partie de la pollution est fixée sur les matériaux solides, les nitrates, nitrites et phosphates sont essentiellement présents sous forme dissoute. Ainsi, outre la décantation, des processus biologiques ont lieu dans les bassins de retenue, ce qui induit une diminution de la DBO<sub>5</sub>, de la DCO, une consommation des nutriments (azote et phosphore) et une augmentation de l'oxygène dissous (échange avec l'atmosphère et photosynthèse).

Selon que les bassins soient en eau (Figure 9) ou secs, on obtient des effets différents sur la qualité de l'eau (Tableau 7). La protection de la qualité du milieu récepteur est obtenue de manière généralement moins complète avec les bassins secs (sauf dispositions particulières) (AE & STU, 1994).

**Tableau 7: Comparaison des effets sur la qualité de l'eau des bassins en eau et des bassins secs**

	Bassins en eau	Bassins secs
<b>Processus</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dilution des eaux</li> <li>- Sédimentation</li> <li>- Décomposition des matières organiques (bactéries anaérobies)</li> <li>- Assimilation des nutriments par les végétaux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Restitution lente des eaux polluées au milieu récepteur</li> <li>- Piégeage des matières en suspension et des déchets flottants</li> </ul>

Le volume d'un bassin de retenue d'eaux pluviales est égal à la somme du volume occupé par le plan d'eau permanent (bassin en eau), du volume utile correspondant généralement à la crue décennale, et du volume de sécurité. Ainsi, le dimensionnement du bassin est fonction de la période de retour des déversements par l'évacuateur de crue. Pour les bassins versants auxquels l'apport supplémentaire de débit ne conduit pas à des conséquences dommageables, la période de défaillance souvent choisie est de 10 ou 20 ans. Pour les bassins où les débordements risqueraient d'entraîner des dommages, les périodes de défaillance préconisées sont de 30, 50, 100 ans voire plus (AE & STU, 1994).

Le volume utile des bassins de retenue des eaux pluviales peut être déterminé par les méthodes dites simplifiées, c'est-à-dire la méthode des pluies et la méthode des volumes, ainsi que par la méthode des débits. Dans le cas des méthodes simplifiées, on admet que le débit de fuite est constant. La surface active est déterminée par la somme des petites surfaces homogènes auxquelles on affecte un coefficient de ruissellement décennal (généralement). La méthode des pluies consiste à travailler à partir de l'étude statistique des précipitations (hauteur d'eau précipitée, durée et fréquence des pluies)

alors que la méthode des volumes s'appuie sur l'étude du même échantillon de pluies mais en déduisant à chaque fois le volume correspondant au débit de fuite. Ces méthodes sont utilisées uniquement pour des bassins versants de surfaces limitées. Pour ce qui est de la méthode des débits, elle consiste à simuler les écoulements au moyen de modèles mathématiques représentant chacun une ou plusieurs étapes du cycle des eaux pluviales. Le volume de la retenue est calculé par la résolution numérique d'un système d'équations basé soit sur la base de pluies de projet d'occurrence donnée et de différentes durées, soit sur la base de pluies observées sur les bassins versants ou sur d'autres bassins versants dont le régime climatique est sensiblement identique. Cependant cette dernière approche est rarement utilisée (AE & STU, 1994).

L'entretien de ces aménagements consiste notamment en un faucardage annuel des végétaux qui sont ensuite mis en décharge ou incorporés dans des composts. Les amas d'algues filamenteuses sont également éliminés. Les boues curées peuvent être mises en décharges, transférées en station d'épuration ou être traitées en centre spécialisé (hydrocarbures dépassant les seuils d'acceptabilité). Dans certains cas, en mélange avec des boues de station d'épuration, elles peuvent faire l'objet d'une valorisation agricole (AE & STU, 1994).

### 3.2.3. Rendement

Lors de la sédimentation, les particules ont tendance à s'agglomérer. Ainsi leur vitesse réelle de chute est plus importante que leur vitesse théorique. Cette propriété permet d'obtenir un abattement de pollution relativement important après quelques heures de décantation seulement (Tableau 8) (AE & STU, 1994).

**Tableau 8: Rendement de la décantation dans les bassins de retenue des eaux pluviales (Bachoc & Chebbo,, 1992 cités sans EA & STU, 1994))**

Polluants	Réduction de la pollution par décantation (en % de la pollution totale)
<b>DBO<sub>5</sub></b>	75 à 90%
<b>DCO</b>	60 à 90%
<b>MES</b>	80 à 90%
<b>NTK</b>	40 à 70%
<b>Hb (Hydrocarbures)</b>	35 à 90%
<b>Pb</b>	65 à 80%



**Figure 9: Bassin de rétention des eaux pluviales à Levallois-Perret (92)**  
([www.cavaou-gnl.com](http://www.cavaou-gnl.com))

### 3.3. Les bassins de rétention routiers

#### 3.3.1. Principe

Le rôle principal de ces bassins est d'abattre la charge polluante mais également de confiner une pollution accidentelle. La rétention des eaux permet en effet d'assurer la rétention des pollutions par piégeage des flottants et des hydrocarbures, la décantation des MES et l'épuration des eaux (grâce à l'aération).

#### 3.3.2. Fonctionnement

La plupart des surfaces imperméables accumulent des dépôts secs qui seront mobilisés par la pluie. La circulation automobile est à l'origine de plusieurs polluants (tableau 9) : hydrocarbures (huile et essence), oxydes d'azote (issus des gaz d'échappement), chlorures (sels de déverglaçage), métaux provenant des pneus (zinc, cadmium), des freins (cuivre), ou de la chaussée (érosion de revêtements en bitume, zinc des glissières de sécurité) (Wattez, 2002).

**Tableau 9: Concentrations en polluants dans les eaux de ruissellement des autoroutes de Nantes (Wattez, 2002)**

Polluants	Concentrations eau de ruissellement autoroutes	
	Moyenne	Maximum
<b>DCO</b> (mg/l)	80	507
<b>MES</b> (mg/l)	71	267
<b>Hc</b> (mg/l)	1,2	4,2
<b>Pb</b> (ug/l)	58	188
<b>Cu</b> (ug/l)	45	145
<b>Cd</b> (ug/l)	1	4,2
<b>Zn</b> (ug/l)	355	1544

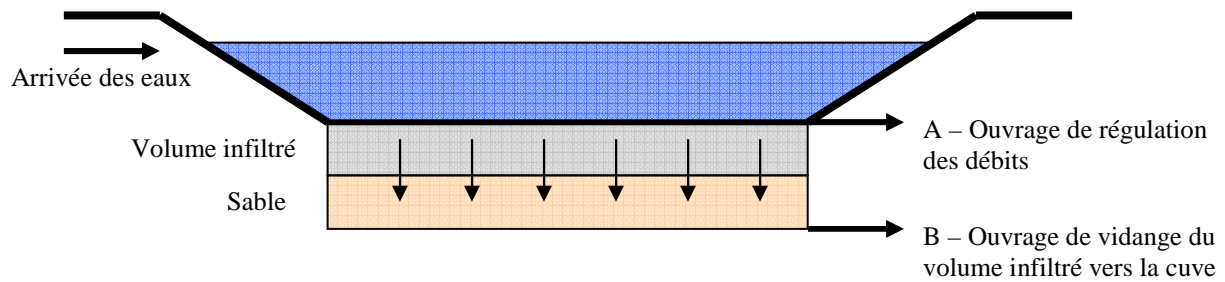
Les bassins routiers (Figure 11) sont dotés d'un bippasse en entrée qui permet de court-circuiter le bassin soit après y avoir piégé une pollution accidentelle soit pour assurer les opérations d'entretien.

Un ouvrage d'entrée est aménagé pour ralentir l'écoulement et éviter l'érosion des berges. Dans le bassin principal, le fond est horizontal (profondeur  $\leq 1,5$  m) afin de permettre un entretien mécanisé. Les berges et le fond des bassins sont recouverts d'un revêtement peu perméable d'au moins 30 cm. L'ouvrage de sortie, précédé d'une grille à barreaux, régule les débits de fuite et fixe la cote de débordement du bassin. Il est situé le plus loin possible de l'ouvrage d'entrée. Un déversoir est aménagé en prévision d'événements pluvieux exceptionnels. Il existe deux principaux types de bassins routiers : les bassins routiers avec volume mort et les bassins routiers de type sanitaire (Sétra, 2007).

Les bassins autoroutiers avec volume mort sont des bassins en eau dont le volume, situé sous le fil d'eau de l'orifice de fuite, n'est pas vidangé (profondeur 40 à 60 cm). Ce volume mort confère au bassin une certaine inertie qui diminue la vitesse de propagation des polluants. De plus, il favorise le développement de la végétation, l'abattement de la pollution liée aux matières en suspension et permet la dilution de la pollution (Sétra, 2007).

Les bassins routiers de type sanitaire (Figure 10 et 11) fonctionnent comme les bassins avec volume mort mais leur fond est constitué par un massif filtrant (lit de sable), d'une épaisseur au moins égale à 50 cm, recouvrant des drains. Les bassins sont plantés de roseaux qui assurent le colmatage grâce au développement des tiges et à leurs oscillations sous l'effet du vent. Deux ouvrages de sortie contrôlent la régulation des débits et la vidange du bassin (A et B). Les eaux provenant de l'ouvrage B sont déversées dans une cuve, constituant alors un volume mort créant une inertie à la propagation d'une

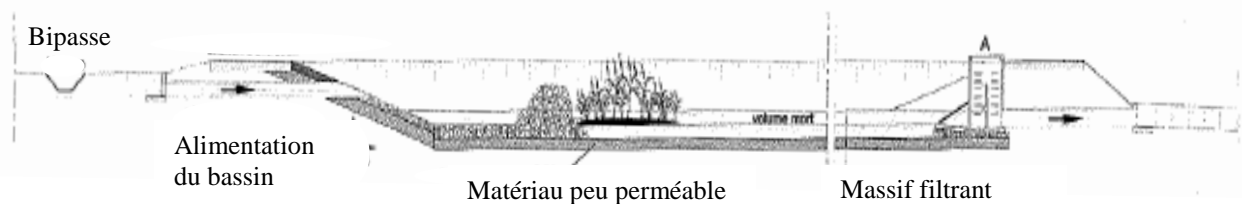
pollution. Ce type de bassin est utilisé pour limiter les nuisances potentielles telles que des mauvaises



odeurs ou encore la prolifération de moustiques (Sétra, 2007).

**Figure 10: Coupe transversale de bassin routier de type sanitaire (Sétra, 2007)**

Afin de garantir un bon niveau de performance pour lutter contre les pollutions accidentelles et chroniques et pour écrêter les crues, les bassins de rétention routiers doivent être dimensionnés en fonction de la surface de l'impluvium, des intensités de pluies pour les périodes de retour retenues pour la protection du milieu, du débit du réseau de collecte des eaux pluviales, du débit de fuite maximum autorisé, du volume de pollution accidentelle à retenir et de la classe de vulnérabilité au point de rejet. Le dimensionnement des bassins routiers vis-à-vis de la pollution chronique dépend du choix de la période de retour des pluies, une période de 2 ans représentant une exigence élevée. De plus, le bassin doit également être conçu pour permettre une sédimentation compatible avec l'objectif de dépollution fixé et doit tenir compte des phénomènes de propagation des panaches de pollution. Pour cela, le temps de propagation d'une pollution miscible est calculé à partir de deux fois le débit réel traversant l'aménagement (Sétra, 2007).



**Figure 11: Schéma d'un bassin routier de type sanitaire (Sétra, 2007)**

Pour ce qui est de l'entretien, il consiste notamment en un faucardage de la végétation allant de deux fois par an à une fois tous les 2 ou 3 ans. Les végétaux sont ensuite broyés (les résidus sont épandus sur les dépendances routières par exemple), incorporés dans du compost, ou encore brûlés en centrale. Les boues curées sont utilisées sous forme de remblais dans des zones non vulnérables ou sous forme de compost, ou elles sont épandues sur les sites entretenus par l'exploitant routier. Cependant, en cas de pollution avérée elles sont mises en décharge (Sétra, 2007).

### 3.3.3. Rendement

Ces ouvrages ont donné des résultats probants sur le long terme vis-à-vis de la pollution routière (Tableau 10).

**Tableau 10: Taux d'abattement des ouvrages de traitement selon plusieurs études effectuées depuis 1992 par le réseau scientifique de l'Équipement et l'Asfa (Sétra, 2007)**

Polluants	Bassin routier avec volume mort	Bassin routier de type sanitaire
<b>MES</b>	72	85
<b>DCO</b>	65	70
<b>Cu, Cd, Zn</b>	70	85
<b>Hc (Hydrocarbure) et HAP</b>	50	90



**Figure 12: bassin de rétention routier dans le Val d'Oise (95) ([www.val-d-oise.equipement.gouv.fr](http://www.val-d-oise.equipement.gouv.fr))**

### 3.4. Les bassins d'épuration de sucreries

#### 3.4.1. Principes

Les sucreries produisent deux types d'effluent : les eaux provenant du lavage des betteraves et les eaux servant au refroidissement des machines et au lavage des cheminées. Selon la sucrerie, les bassins d'épuration des eaux peuvent être constitués de bassins de décantations, de bassins de lagunage, de bassins d'infiltration et de bassins à écumes. La surface de ces bassins dépend de la quantité d'eau à traiter et donc de la capacité journalière traitée par la sucrerie. En fonction de leur origine, les eaux sont traitées de deux manières différentes : décantation ou lagunage

Les informations qui suivent sont issues d'une étude, réalisée par Abraham (2002), portant sur plusieurs sites situés en Champagne-Ardenne et en Picardie.

#### 3.4.2. Fonctionnement

Les systèmes d'épuration (Figure 12), situés à proximité des cours d'eau ou sur les plateaux, sont constitués de plusieurs bassins, d'une superficie oscillant entre 50 et 100 hectares, séparés par des digues. La perméabilité est assurée par l'ajout de chaux compactées et d'argile au fond des bassins (sauf pour les bassins d'infiltration dont le fond s'appuie directement sur la roche-mère).

Les eaux ayant servies au lavage des betteraves sont chargées de terres et de résidus végétaux. Ainsi, elles contiennent notamment de la matière organique et des nutriments. Les eaux internes de la sucrerie (refroidissement des machines, lavage des cheminées...) sont quant à elles chargées principalement de matières organiques.

Ainsi, selon leurs origines, les eaux subissent des traitements différents :

- **La décantation**

La décantation concerne les eaux servant au lavage des betteraves. Elle s'effectue au sein d'une succession de bassins. Une fois l'eau déchargée de ces matières en suspension, elle est stockée dans un ou plusieurs bassins à grande capacité volumétrique qui sert de réserve d'eau pour la nouvelle campagne de production de sucre.

Une fois la réserve d'eau constituée, l'excédent peut retourner dans la rivière ou dans le canal si la sucrerie est alimentée par les eaux de rivière ou encore en bassin d'infiltration si l'alimentation en eau provient d'un forage dans la nappe.

- **Le lagunage**

Le lagunage est employé pour les eaux provenant du refroidissement des machines et du lavage des cheminées ainsi que les eaux de diffusion auxquelles sont additionnées les eaux pluviales. Il a pour but de décharger ces eaux des substances et matières organiques qu'elles ont accumulées.

Ce processus consiste en un lent écoulement de l'eau dans un ou plusieurs bassins de faible profondeur (1 à 2 mètres). Les eaux sont oxygénées par des aérateurs artificiels et par le vent. Ces conditions favorisent le développement d'algues et de bactéries qui minéralisent la matière organique. De plus, l'eau de pluie permet une certaine dilution.

La dégradation des matières organiques s'effectue donc grâce au développement des microphytes dont la présence est favorisée par l'azote et le phosphore présents dans l'eau. Ces microphytes produisent de l'oxygène par photosynthèse et font donc chuter les taux de DCO et de DBO<sub>5</sub>. L'oxygène produit favorise le développement de micro-organismes qui à leur tour dégrade les matières par aérobiose.

Dans ce type de traitement, l'eau n'est pas réutilisée dans le cycle de transformation du sucre. Elle est cependant infiltrée dans la nappe, rendue à la rivière ou utilisée pour l'irrigation des champs environnants.



**Figure 13: Bassin d'épuration de sucrerie à Clermont Ferrand**  
([www.waternunc.com](http://www.waternunc.com))

L'entretien de ces aménagements comprend notamment un curage de la vase s'accumulant au fond des bassins. La terre récupérée est ensuite utilisée pour le rehaussement et la réfection des digues.



#### **4. Informations apportées par les ouvrages de traitement étudiés en relation avec les zones tampons humides**

Les ouvrages de traitement étudiés dans cette partie sont des sources d'informations importantes pour la conception de zones tampons humides. En effet, certains paramètres du dimensionnement et du mode de fonctionnement de ces dispositifs peuvent être appliqués aux ouvrages de traitement des eaux agricoles.

Comme les bassins de rétention des eaux pluviales et les bassins de retenue autoroutiers, l'alimentation des zones tampons humides est totalement dépendante des précipitations. Ainsi leur dimensionnement peut s'inspirer de ces ouvrages et doit tenir compte du volume occupé par le plan d'eau permanent, des intensités de pluies pour une période de retour retenue pour la protection du milieu, des débits du ruissellement et du système de drainage du bassin versant concerné, et du débit de fuite dans le cours d'eau. L'objectif étant d'intercepter le maximum de flux de pollutions dans un minimum d'eau.

Si le dimensionnement peut s'inspirer des bassins de rétention d'eaux pluviales ou autoroutiers, les processus d'épuration nécessaires pour traiter les eaux agricoles s'apparentent davantage à ceux employés dans le lagunage naturel. En effet, la présence d'une végétation aquatique spécifique composée de massettes, joncs, roseaux et iris des marais est un facteur essentiel pour la dépollution des eaux agricoles notamment pour la biodégradation des pesticides. Les plantes mortes peuvent de plus constituer une source de matières organiques nécessaire à la dénitrification. La faible profondeur des lagunes est également un point intéressant car, dans le cas des zones tampons humides, ce paramètre permet le développement de la végétation, ainsi que la pénétration de la lumière et donc la photodégradation des pesticides, et le réchauffement des eaux favorable à la dénitrification. Enfin, le temps de séjour préconisé dans les lagunes est primordial dans les zones tampons humides notamment pour la dégradation chimique des pesticides. Cependant les effluents domestiques sont plus chargés en matières organiques que les eaux agricoles, il serait donc envisageable d'effectuer des apports en cas de limitation en quantité de matière organique.

Enfin, les zones tampons humides devraient faire l'objet d'un entretien régulier. Or, les aménagements étudiés ici nous donnent une idée des opérations à mener. Ainsi, il serait nécessaire de curer le fond des bassins et de faucher une partie de la végétation présente afin d'en contrôler la prolifération. Les boues, une fois curées, pourront être traitées en station d'épuration ou en centre spécialisé selon les contaminants présents. Elles pourront éventuellement faire l'objet d'une valorisation agricole (absence ou faible quantité de polluants). Pour ce qui est des végétaux fauchés, une partie pourrait éventuellement être maintenue dans les bassins pour constituer un apport en matière organique, le reste pourrait être exporté pour être incorporé à du compost (absence ou faible quantité de polluants).

## **Conclusion**

Les eaux agricoles sont principalement caractérisées par trois types de pollution : les nitrates majoritairement transportés par les eaux de drainage, le phosphore essentiellement sous forme particulaire exportée par ruissellement et les pesticides en proportion plus faible dans les eaux de drainage que dans les eaux ruisselées mais dépassant malgré tout les normes de potabilité. Ainsi, ces eaux chargées en polluants sont responsables de la dégradation qualitative des eaux superficielles du bassin de la Seine.

Une solution à ce problème de pollution est de traiter ces eaux via des zones tampons humides situées entre les parcelles agricoles et les cours d'eau. Or le bassin de la Seine compte déjà un grand nombre de mares et d'étangs pouvant apporter des informations sur le fonctionnement de ce type d'aménagement. De plus, ces zones humides artificielles déjà existantes, recevant des eaux issues du drainage et du ruissellement de terres agricoles, pourraient être aménagées de façon à optimiser l'épuration de ces eaux. En effet, pour des risques de contamination, les zones humides artificielles alimentées par les nappes d'eaux souterraines ne sont pas intégrées dans cette étude.



La bibliographie sur les zones humides artificielles du bassin de la Seine met en évidence les usages et les fonctionnements hydrologiques et biogéochimiques de ces systèmes. Elle montre également que ces mares et étangs rendent un service supplémentaire relatif à l'écologie. Ainsi, étant généralement situés dans des zones agricoles habituellement pauvres en matière de diversité écologique, les zones tampons humides favoriseraient la diversification des habitats.

Certaines zones humides artificielles ont déjà pour objectif l'épuration d'eaux autres qu'agricoles (domestiques, pluviales ou industrielles). Les études menées sur ces aménagements sont sources d'informations pour la conception de nouveaux ouvrages de traitement des eaux agricoles. En effet les zones tampons humides sont susceptibles d'être régies par les mêmes conditions hydrologiques que les autres aménagements destinés à recevoir des eaux pluviales. Ainsi leurs dimensionnements peuvent s'inspirer de ceux préconisés pour la construction de bassins de retenue des eaux pluviales ou de bassins autoroutiers. Comme dans le cas du lagunage naturel, le traitement des eaux agricoles nécessite un écosystème particulier. Les plantes sont des éléments essentiels dans le processus d'épuration de ces eaux et, pour une bonne colonisation de la végétation, il est nécessaire de prévoir des bassins de profondeur relativement faible, ayant également l'avantage de laisser pénétrer la lumière sur toute la colonne d'eau et donc de permettre la photodégradation des pesticides. Enfin, le temps de séjour est un autre élément primordial à prendre en compte.

Ce rapport présente les résultats intermédiaires d'une étude sur le recensement et la localisation des différents types de zones humides « artificielles » du bassin de la Seine. Suite à ce travail bibliographique, une étude de terrain sera menée pour préciser les types de faune/flore rencontrés sur les zones humides « artificielles » existantes, et une cartographie de la densité de ces aménagements sera effectuée.

## Bibliographie

- Abraham B., 2002. La réhabilitation des bassins d'épuration de sucreries désaffectées en Picardie et en Champagne-Ardenne : aspects et enjeux naturels et sociaux, Mémoire, Université Paris 8 Vincennes-Saint-Denis, 217 p.
- Agence de l'eau Rhin-Meuse (AERM), 2007. Fiche 7 : Lagunage naturel.
- Agences de l'eau (AE) & Service technique de l'urbanisme (STU), 1994, Guide technique des bassins de retenue d'eaux pluviales, Lavoisier
- André P. & Fouassier H., 2001. Les mares de rétention ou les ambiguïtés de la lutte contre l'érosion des terres agricoles en périphérie de l'agglomération parisienne : exemple du bassin versant de la Viosne (Oise et Val d'Oise), Rapport d'étude, Centre Biogéographie-Ecologie de l'ENS LSH, 41 p.
- Arevalo Moreno S., 2004. Evolution diachronique du semis de mares (1936-2001) dans la commune de Jouarre (Seine-et-Marne), Mémoire, Université d'Orléans, Pôle relais Mares et Mouillères de France
- Arlot, M.P., 1991. Lessivage d'éléments nutritifs par les eaux de drainage, Mise en valeur des sols difficiles. Drainage et après-drainage des argiles vertes, étude "Hydraulique agricole" n° 11, pp. 47-61.
- Assier J.M., Juin 2001. Etude du pouvoir des zones tampons à limiter la pollution des eaux par les produits phytosanitaires, rapport de stage, Cemagref Lyon, ENGEES.
- Bachoc A. & Chebbo G., 1992. Caractérisation des solides en suspension dans les rejets pluviaux urbains. Actes des 3<sup>èmes</sup> journées du DEA, Sciences et Techniques de l'Environnement, Paris.
- Beauchemin S., Simard R.R., & Cluis D., 1998. Forms and concentration of phosphorus in drainage water of twenty-seven tile-drainage soils, J. Environ. Qual., 27, p. 721-728
- Becu D. & Ferment A., 2005. Etude de la végétation sur 10 étangs du Parc naturel régional de la Forêt d'Orient, PNR de la Forêt d'Orient, 81 p.
- Bidois J., 1999. Aménagement de zones humides ripariennes pour la reconquête de la qualité de l'eau – expérimentation et modélisation, Thèse, université de Rennes, 221 p.
- Billy C., 2007, Rétention de l'azote dans les bassins versants agricoles artificiellement drainés, rapport PIREN
- Cerezo S., 2004. Faune et flore, site « Routes nationales 91 », [http://www.routes-nationales91.fr/article.php3?id\\_article=142](http://www.routes-nationales91.fr/article.php3?id_article=142)

- Chaib J., 1997. La mare en Haute Normandie, article issu du livre : Radioscopie des mares, L'Harmattan, p. 117 à 127.
- Dasnias P., 2002. Aménagement écologique des carrières en eau, Guide pratique, Comité National de la Charte, Union Nationale des Producteurs de Granulats, Museum d'histoire naturelle
- Dutilleul C., Thulie A., Limoges O., Sajaloli B., 2003. Avez-vous une mare près de chez vous ?, manuel explicatif, Pôle-relais mares et mouillères de France.
- Ecosphère, Carrières et zones humides, 2001. La patrimoine écologique des zones humides issues de l'exploitation des carrières, Présentation résumée des 17 expertises écologiques, 134 p.
- Fischesser B. & Dupuis-Tate M.F., 1996, Le Guide illustré de l'écologie, Cemagref Edition, 319 p.
- Expertise scientifique INRA et Cemagref, 2005. Pesticides, agriculture et environnement, réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux, 64 p.
- INRA, 2002. Fiche de dossier de presse, Epurer les eaux chargées en pesticides : le rôle des bandes enherbées et des zones humides. [www.inra.fr](http://www.inra.fr)
- Limoges O., 1997. Biodiversité des mares du canton de Châteauneuf-en-Thymerais (Eure-et-Loir), Mémoire, Université de Poitiers, 91 p.
- Quillet S. & Pierron V., 1998. Etude de la biodiversité animale et végétale de quelques bassins autoroutiers en Haute-Normandie et Ile-de-France, rapport d'étude, ASFA, Centre de Biogéographie-Ecologie (UMR 8505 CNRS - ENS LSH), 92 p.
- Mathieu S., 2006. Evaluation de l'intérêt des zones humides ordinaires, Arguments pour les valoriser auprès du public, ENGREF Montpellier, Office International de l'Eau Paris.
- Matras C., 1999. La variété des mares de la commune de Jouarre, Mémoire, Université Paris-Sorbonne (Paris IV), 150 p.
- National engineering handbook, sept 2002. part 637, Chapter 3, part 1
- Némery J., Garnier J., Billen G., Morel C., 2002. Bilan du phosphore à l'échelle du bassin de la Seine, Détermination de la fraction mobile pour la croissance algale, rapport PIREN Seine, 23 p.
- Passeport E., 2006. Pollution diffuse de la nappe de calcaires de Champigny : propositions d'aménagements hydro-agricoles, Mémoire, INSA Toulouse, Cemagref, 47 p.
- PNR Forêt d'Orient, 2004. Etude de dix étangs du Parc naturel régional de la Forêt d'Orient, Micromammifères, Chiroptères, entomofaune et végétation, Etude, suivis et expérimentations.
- Racault Y., *et al.*, 1997. Le lagunage naturel : les leçons tirées de 15 ans de pratique en France, Cemagref Editions, 60 p.
- Rouillard J., Maupoum V., Monvoisin J.M., Bauchet-Cabadda V., Benoit P., Cayla O., Bauchet O., Eve-Berthaud E., Berthier K., Billen G., Garnier J., 2004. La pêche en eau douce au Moyen Age et à l'époque moderne, rapport PIREN
- Sac E., 2007. La création de zones humides artificielles : Un outil pour la réduction des effets polluants des réseaux de drainage agricole ?, Mémoire, Université Paul Verlaine Metz, INRA, 65 p.
- Sajaloli B., 4 octobre 2003. Mares et étangs, pourquoi donc ne pas les assécher ? débat, l'Entracte.
- Sétra, 2007, Pollution routière, Conception des ouvrages de traitement des eaux, Guide technique, référence 0738.
- Simard, G., 2005. Monitoring and simulation of nutrient transport from agricultural fields, McGill University, Montreal, Quebec.
- Tanner C.C. & Sukias J.P.S., 2003. Linking poold and wetland traetment of farm dairy wastewaters in New Zealand, NIWA Science and Technology Series, 48 p.
- Tournebize J., Arlot M.P., Birgand F., Kao C., 2005. Synthèse Drainage et Qualité de l'eau, Cas des nitrates, rapport Cemagref pour le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Direction de l'eau, 60 p.
- Wattez J.L., 2002. L'eau de pluie sur les autoroutes et les aéroports, rapport d'une commission du Sénat.
- [www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)
- [www.waternunc.com](http://www.waternunc.com)
- [www.val-d-oise.equipement.gouv.fr](http://www.val-d-oise.equipement.gouv.fr)
- [www.cavaou-gnl.com](http://www.cavaou-gnl.com)
- [www.lillemetropole.fr](http://www.lillemetropole.fr)
- [www.pole-mares.org](http://www.pole-mares.org)