

Projet individuel pour l'obtention de la 2<sup>nd</sup>e année de Master

## **Bilan des zones humides agricoles : extension, efficacité, perspectives**

**Application aux pesticides**



*Sources : Artwet et Cemagref*

**Pierre VINET**

Année 2011



*Géosciences  
Environnement*



*IMACOF*

Tuteur : Francesca DI PIETRO

*Université de TOURS  
Département IMACOF*

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui, de près comme de loin, ont apporté leur contribution à ce projet individuel. Je remercie tout d'abord Mme Francesca Di Pietro pour m'avoir assisté tout au long du projet, et permis d'obtenir quelques contacts auprès des acteurs des zones humides artificielles.

Je remercie également Julien Tournebize, du CEMAGREF Antony, pour m'avoir transmis un certain nombre de documentations relatives au projet ArtWet. Un merci va également à Elodie Passeport pour la mise à disposition de sa thèse. Je remercie ainsi toutes les personnes m'ayant donné de leur temps pour un entretien ou la fourniture de données.

Mes remerciements s'adressent enfin à Marie Lemoine, de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, pour m'avoir renseigné sur les projets et aménagements de zones humides tampons sur leur territoire, ainsi que sur des initiatives plus locales.

# SOMMAIRE

INTRODUCTION .....	4
1. LES PESTICIDES .....	5
2. LES BANDES ENHERBEES : UNE REPONSE LIMITEE FACE AU DRAINAGE .....	11
3. LES ZONES HUMIDES : INTERETS ET JUSTIFICATIONS .....	13
4. LES ZONES TAMPONS HUMIDES ARTIFICIELLES .....	16
5. PROJETS ET ETUDES EXPERIMENTALES .....	24
6. EFFICACITE DES ZONES HUMIDES AGRICOLES .....	29
7. PERSPECTIVES DES ZONES HUMIDES AGRICOLES .....	34
CONCLUSION .....	40
BIBLIOGRAPHIE .....	41
TABLE DES MATIERES .....	47
ANNEXES .....	49

## RESUME

Les zones humides artificielles peuvent être envisagées comme mesures curatives à la pollution des masses d'eau par les phytosanitaires. Leur pouvoir épurateur est en effet un atout pour le traitement des eaux issues du ruissellement agricole et du drainage, au regard de l'efficacité limitée de dispositifs pré-existants comme les bandes enherbées. La recherche scientifique a démontré l'efficacité des zones humides artificielles à travers un grand nombre d'études et d'expérimentation à l'échelle mondiale. En Europe, le projet LIFE Environnement ArtWet a permis d'optimiser la conception de ces aménagements et de mettre en évidence leur efficacité dans le traitement des pesticides, par l'intermédiaire de dispositifs expérimentaux et grandeurs nature en France, Allemagne et Italie. ArtWet a également développé les aspects techniques, juridiques, économiques et sociaux de la mise en œuvre de zones humides artificielles, qui permettront la future application de ces expérimentations dans des programmes de mesures visant à la reconquête de la qualité de l'eau. De tels projets restent à ce jour peu nombreux et spatialisés, car les résultats expérimentaux ne sont pas encore tous connus. Toutefois, l'efficacité de ces aménagements ne pourra que justifier leur futur développement et extension.

**Mots-clés :** zone humide artificielle, zone tampon agricole, pesticides, extension, efficacité, perspectives

## ABSTRACT

Artificial wetlands can be used for pesticide pollution mitigation of water bodies. Indeed, wetland capacity of purification is an asset to runoff and subsurface waterflow treatment, considering the limited efficiency of current systems as vegetated buffer strips. Scientific research demonstrated constructed wetlands efficiency through many studies and experimentations in the world. In Europe, LIFE Environment ArtWet project ensured design optimization of those systems, and proved its pesticide pollution treatment efficiency, through experimental and life size systems in France, Germany and Italy. ArtWet also developed technical, legal, economical and social sides of artificial wetland construction, which will ensure the future implementation of those experimentations on water quality improvement plans. There are today only a few of projects like those one, because experimental results aren't already known. However, the efficiency of those systems will justify its future development and expansion.

**Keywords :** artificial wetland, constructed wetland, pesticides, expansion, efficiency, implementation

## TABLE DES FIGURES

FIGURE 1 : PRINCIPAUX MARCHES PHYTOPHARMACEUTIQUES EN EUROPE (A GAUCHE) ET DANS LE MONDE (A DROITE) EN 2006.....	8
FIGURE 2 : TONNAGE DES SUBSTANCES ACTIVES VENDUES EN FRANCE ENTRE 1999 ET 2006 .....	8
FIGURE 3 : COMPORTEMENT DES PESTICIDES DANS L'ENVIRONNEMENT.....	10
FIGURE 4 : CONCENTRATIONS EN PESTICIDES EN ENTREE ET SORTIE DE BANDE ENHERBEE .....	12
FIGURE 5 : ROLE EPURATEUR D'UNE ZONE HUMIDE.....	14
FIGURE 6 : AMENAGEMENT PONCTUEL D'UNE SORTIE DE DRAIN .....	19
FIGURE 7 : AMENAGEMENT DE GRANDE LONGUEUR DE PLUSIEURS SORTIES DE DRAINS .....	19
FIGURE 8 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE MARE ARTIFICIELLE .....	21
FIGURE 9 : MARE ARTIFICIELLE AGRICOLE EN INDRE-ET-LOIRE.....	22
FIGURE 10 : MARE ARTIFICIELLE AGRICOLE DANS LES VOSGES.....	22
FIGURE 11 : SCHEMAS DE PRINCIPE DE MARES ARTIFICIELLES PLANTEES .....	22
FIGURE 12 : MARE ARTIFICIELLE PLANTEE EN INDRE-ET-LOIRE.....	23
FIGURE 13 : MARE ARTIFICIELLE PLANTEE DANS LES VOSGES.....	23
FIGURE 14 : SCHEMAS DE PRINCIPE DE BASSINS DE RETENTION .....	23
FIGURE 15 : LES ACTEURS DU PROJET ARTWET EN EUROPE .....	25
FIGURE 16: EFFICACITÉ DE RÉDUCTION DES CHARGES DE PESTICIDES SUR LES ZTHA DE LOCHES.....	29
FIGURE 17 : COMPARAISON DE LA RETENTION DES TROIS ZONES HUMIDES SUR LE KROTTENBACH.....	30
FIGURE 18 : EFFICACITÉ DE RÉTENTION SELON DIFFÉRENTES DENSITÉS DE E. NUTTALLII.....	30
FIGURE 19 : EFFICACITE DE REDUCTION DES CHARGES EN PHYTOSANITAIRES A ROUFFACH.....	31
FIGURE 20 : COUT DES TRAVAUX PAR TYPES DE DISPOSITIFS.....	36
FIGURE 21 : EXEMPLES DE COUTS DE ZONES HUMIDES ARTIFICIELLES.....	36

## TABLE DES TABLEAUX

TABEAU 1 : MASSES D'HERBICIDES EXPORTEES DANS LES EAUX PAR RUISSELLEMENT ET DRAINAGE .....	13
TABEAU 2 : COMPARAISON DES ESTIMATIONS ECONOMIQUES D'UN SCENARIO DE CHANGEMENT DE PRATIQUES AGRICOLES ET D'UN SCENARIO DE CREATION DE ZONES HUMIDES .....	16
TABEAU 3 : LES DIFFERENTS TYPES DE FOSSES D'EPURATION.....	20
TABEAU 4 : SITES EXPERIMENTAUX ET DE DEMONSTRATION DU PROJET ARTWET EN EUROPE .....	25
TABEAU 5 : ETUDES ET PUBLICATIONS EUROPEENNES .....	27
TABEAU 6 : ETUDES ET PUBLICATIONS MONDIALES .....	28
TABEAU 7 : ESTIMATION DE LA PERTE DE PROFIT SUIVANT LE TYPE DE CULTURE.....	37

## INTRODUCTION

L'amélioration de la qualité des eaux d'un bassin versant ne saurait être envisagée sans une réflexion et une modification des pratiques qui s'exercent sur le territoire. L'usage agricole, en particulier, est à l'origine d'un certain nombre de transferts de nutriments (azote et phosphore) et de produits phytosanitaires jusqu'aux eaux de surface et de sub-surface, par l'intermédiaire des eaux de ruissellement et de drainage. Comprendre le devenir de ces éléments et les mécanismes d'assimilation dans les différents compartiments – eau, sol, plantes, air – s'avère donc primordial afin de mettre en place des mesures permettant la limitation de leurs impacts.

Les zones humides apparaissent comme un moyen intéressant de réduction de la pollution hydrique issue des pratiques agricoles, de part leur fonction « épuratrice ». Elles peuvent être une interface tampon entre les terres agricoles et les cours d'eau, et ainsi participer à la rétention et le traitement des fertilisants et pesticides. Cependant, il est clair que les zones humides naturelles ne peuvent à elles seules répondre à cet enjeu, notamment dans les secteurs fortement exploités où elles ne sont pas ou peu présentes. Ainsi, la création de zones tampons humides artificielles s'avère être un moyen intéressant pour traiter les eaux chargées en effluents agricoles, avant leur restitution à la masse d'eau.

Par ailleurs, si les zones humides peuvent être utilisées comme mesure curative, il est important de mettre en place un certain nombre de mesures préventives en amont, comme la limitation des intrants agricoles. En effet, la création de zones humides n'a d'utilité que si des techniques préventives garantissent des transferts raisonnables. Leur efficacité vis-à-vis d'une forte pollution reste restreinte, et le coût de leur mise en place bien plus important que celui d'un changement des pratiques agricoles.

Le présent rapport s'intéresse ainsi à la création de zones humides artificielles en tant qu'aménagements visant à la réduction de la pollution phytosanitaire dans les masses d'eau. Une première partie présentera des généralités sur les pesticides, avec notamment la législation et les modes de transferts. Les dispositifs tampons que sont les bandes enherbées seront ensuite étudiés, afin de justifier le rôle et l'efficacité des zones humides dans la réduction des phytosanitaires. Une quatrième partie présentera les zones tampons humides artificielles, en particulier les différents types ayant fait l'objet d'études et de projets de recherche. Après avoir synthétisé l'ensemble de ces projets, leur efficacité sera mise en évidence, afin dans une dernière partie d'étudier les perspectives de mise en place de zones humides artificielles dans un but non plus scientifique, mais appliqué à des plans de gestion par exemple.

# **1. LES PESTICIDES**

## **1.1. DEFINITIONS**

Dans la littérature, les pesticides sont généralement intégrés dans les produits phytosanitaires. Un produit phytosanitaire est « une substance active ou association de plusieurs substances chimiques, minérales ou organiques, d'origine naturelle ou issues de la chimie de synthèse, et servant à tuer ou repousser les pathogènes, les parasites, les plantes concurrentes ou les organismes nuisibles des cultures, afin de protéger les plantes et d'en augmenter le rendement (SAC, 2008). On entend ainsi par « phytosanitaires » l'ensemble des produits phytopharmaceutiques, des produits antiparasitaires et des pesticides.

Le projet Artwet, qui sera présenté par la suite, définit un pesticide comme étant « une substance ou un mélange de substances destiné(e) à lutter contre un organisme nuisible, qu'il s'agisse d'insectes, de rongeurs ou autres animaux, de plantes indésirables, de champignons ou micro-organismes tels que bactéries ou virus. Le terme pesticide désigne ainsi les herbicides, fongicides, insecticides et diverses autres substances utilisées pour combattre les organismes nuisibles ».

Dans la réglementation nationale et européenne, les pesticides et phytosanitaires concernent la même catégorie de substances. La différenciation de ces deux termes n'est pas bien définie, c'est pourquoi dans la suite de ce rapport le terme « produits phytosanitaires » sera employé au même titre que « pesticides ».

## **1.2. LES FAMILLES DE PESTICIDES**

Il existe un très grand nombre de molécules, et donc un très grand nombre de pesticides. On peut les classer en fonction de leur cible : bactéricides, insecticides, fongicides, herbicides, etc. Toutefois, ces derniers peuvent également être classés en fonction de leurs familles chimiques. On distingue six familles principales : les organophosphorés, les organochlorés, les carbamates, les triazines, les pyréthrynoïdes et les urées substituées.

### **1.1.1. Les organophosphorés**

Cette famille regroupe des pesticides dont la molécule agit sur l'acétylcholinestérase, enzyme essentielle aux transferts nerveux chez les insectes, la plupart des animaux, et l'homme. Ils sont utilisés majoritairement en milieu agricole comme insecticides. Les organophosphorés bloquent de manière irréversible cette enzyme, et sont donc caractérisés par une toxicité très importante, tant pour les espèces visées que pour les utilisateurs. Par ailleurs, leur grande facilité de dégradation – dans l'air et le sol – réduit le risque de retrouver les organophosphorés dans les eaux de surface, à l'inverse de familles de pesticides plus persistantes dans l'environnement. Toutefois, le risque d'intoxication lié à ces insecticides demeure un constat non négligeable pour adopter une logique de réduction de l'utilisation de ces composés.



Les organophosphorés les plus courants sont : le parathion, le malathion, le méthyl-parathion, le chlorpyrifos, le diazinon, l'OMPA, le TEPP, la phosphidrine, le dichlorvos et le phosmet. On retrouve également entre autres l'acéphate, l'azinphos-méthyl, le diméthoate, le disulfoton, et le phosalone, utilisés couramment.

#### **1.1.2. Les organochlorés**

Les organochlorés sont également utilisés en milieu agricole comme insecticides. Ce sont d'ailleurs les plus puissants et les plus efficaces. Cette famille regroupe les composés chimiques dont on a substitué un à plusieurs atomes d'hydrogène par des atomes de chlore. Les organochlorés sont extrêmement persistants dans les sols – on les appelle également POPs (Polluants Organiques Persistants) – et possèdent une forte neurotoxicité. Ces composés ont en effet la particularité de se concentrer dans les tissus biologiques, et de perturber la transmission de l'influx nerveux. C'est pourquoi un certain nombre de ces produits ont été interdits d'emploi dans les pays industrialisés.

On retrouve comme pesticides organochlorés : le DDT, le chlordane, le pentachlorophenol, le HCB (hexa chlorobenzène), l'aldrine, la dieldrine, le lindane, le metolachlore, etc.

#### **1.1.3. Les carbamates**

Les carbamates agissent selon le même mécanisme d'action que les organophosphorés, dont ils présentent des caractéristiques similaires. Ce sont principalement des insecticides et des fongicides, ainsi que quelques herbicides. Leur toxicité apparaît également moins importante que celle des pesticides organophosphorés.

On peut classer les carbamates selon l'acide dont ils dérivent. On distinguera ainsi les carbamates à proprement parler (acide carbamique) comme l'asulame, les thiocarbamates (acide thiocarbamique) comme le diallate et le triallate, les biscarbamates (acide biscarbamique) comme le desmédiphane, etc.

#### **1.1.4. Les triazines**

La plupart des triazines sont utilisées comme herbicides, bien que cette famille ait une large gamme de groupes-cibles. Comme son nom l'indique, cette famille de pesticides regroupe trois composés : l'atrazine, la simazine et la terbuthylazine. Ils possèdent un caractère sélectif, leur métabolisation étant variable d'une plante à une autre. Leur toxicité et leur rémanence dans l'environnement ont entraîné l'interdiction d'utilisation de certaines substances, comme l'atrazine depuis 2003.

Outre ces trois composés, on peut classer dans cette famille l'ensemble des dérivés des triazines, tels que le chlorure et l'acide cyanurique, la mélamine, l'irgarol, etc.

#### **1.1.5. Les pyréthrynoïdes**

Fréquemment utilisés en raison de leur bonne efficacité et de leur toxicité modérée, les pyréthrynoïdes sont employés comme insecticides. Ce sont des composés de synthèse, qui se basent sur la pyréthryne naturelle contenue dans certaines plantes, ayant la propriété de



s'attaquer au système nerveux des insectes. S'ils restent « modérément dangereux » pour l'homme, la toxicité de ces pyréthrynoïdes demeure importante.

Ces composés portent en suffixe la particule « thrine ». On retrouve ainsi la cyperméthrine, la cyfluthrine, la perméthrine, etc.

#### **1.1.6. Les urées substituées**

Les urées substituées sont principalement des herbicides sélectifs inhibant la photosynthèse. On retrouve également quelques fongicides. Ces composés sont relativement peu solubles dans l'eau, et présentent une persistance assez longue dans l'environnement. Leur toxicité est modérée pour l'homme, mais demeure dangereuse.

Les urées substituées se terminent par la particule « uron ». On retrouve ainsi le diuron, l'isoproturon, le fénuron, le monuron, etc.

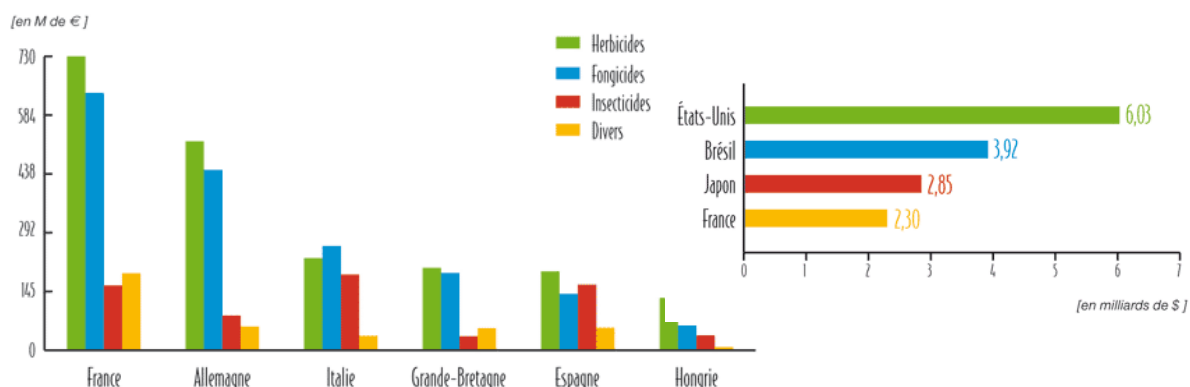
### **1.3. DE L'UTILISATION MASSIVE A LA PRISE DE CONSCIENCE**

L'utilisation de pesticides en Europe est liée à la croissance démographique du 19<sup>ème</sup> siècle. En effet, l'agriculture n'est plus alors vivrière, mais cherche à répondre à la demande de la population mondiale non agricole par une production alimentaire massive (ArtWet, 2010). L'intensivité de l'agriculture a été de paire avec un emploi de produits phytosanitaires destinés à l'amélioration des rendements.

Ce n'est qu'à partir des années 1960 qu'a émergée une prise de conscience collective des risques liés à l'utilisation massive de pesticides. Il faudra attendre les années 80 pour que soit scientifiquement mis en évidence l'impact potentiel de ces produits sur la santé humaine. Par ailleurs, la nocivité des pesticides sur l'environnement a également été démontrée, plus particulièrement au niveau des écosystèmes aquatiques. De surcroît, le parallèle entre qualité de l'eau et santé humaine a été un des déclencheurs de cette prise de conscience. Certaines molécules ont ainsi été interdites, comme le Dichloro Diphényl Trichloroéthane (DDT) et certains organochlorés (SAC, 2007).

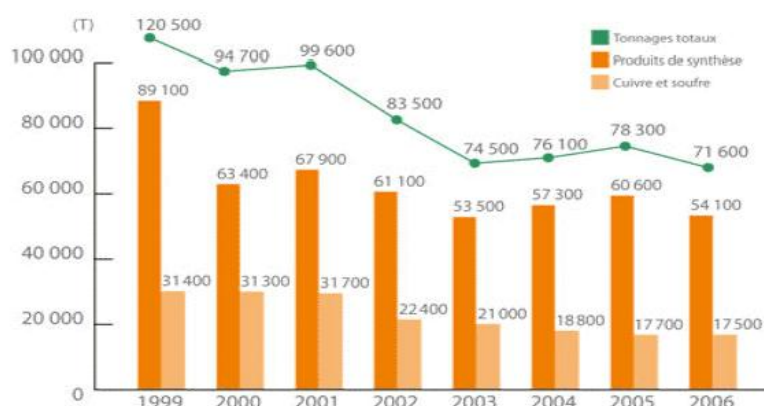
Toutefois, l'apparition constante de molécules plus efficaces et garantissant de meilleurs rendements a entraîné un renouvellement rapide des pesticides utilisés. Ce constat explique le retard de mise au point de protocoles d'analyse par les organismes de surveillance de la qualité de l'eau (DOMANGE, 2001). Il faudra attendre la Directive Cadre Européenne sur l'Eau de 2000 pour mettre en œuvre une politique de réduction de l'usage de pesticides à l'échelle européenne, afin de préserver la qualité de l'eau et la santé humaine.

La France demeure le premier consommateur européen de produits phytosanitaires, avec plus de 34% de la quantité de substances utilisées en Europe en 2001. Elle est par ailleurs le 4<sup>ème</sup> consommateur mondial, devant les Etats-Unis, le Brésil et le Japon (FIGURE 1 : PRINCIPAUX MARCHES PHYTOPHARMACEUTIQUES EN EUROPE ET DANS LE MONDE EN 2006).



**Figure 1 : Principaux marchés phytopharmaceutiques en Europe (à gauche) et dans le Monde (à droite) en 2006**  
(Source : UIPP, 2011)

Toutefois, la prise de conscience, corrélée à une politique de réduction de l'usage de phytosanitaires, s'observe depuis 1999 par une diminution de la vente de substances actives, qui est passée de 120 500 à 71 600 tonnes entre 1999 et 2006 sur le territoire national (FIGURE 2 : TONNAGE DES SUBSTANCES ACTIVES VENDUES EN FRANCE ENTRE 1999 ET 2006). L'année 2007 fait état d'une légère augmentation à 77 300 tonnes de substances actives vendues.



**Figure 2 : Tonnage des substances actives vendues en France entre 1999 et 2006**  
(Source : UIPP, 2011)

#### 1.4. LEGISLATION RELATIVE AUX PHYTOSANITAIRES

La réglementation relative à la mise sur le marché et l'utilisation des pesticides en Europe se fonde sur des directives européennes. Elle fixe les conditions d'autorisation des phytosanitaires, et établit les procédures pour l'évaluation scientifique des substances actives.

En raison de la faiblesse de données écotoxicologiques pour la plupart des substances, la législation suit pour les eaux superficielles le principe de précaution (SAC, 2007). Au niveau des eaux souterraines, la directive 80/68/CEE du 17 décembre 1979 concernant la protection des eaux souterraines contre la pollution causée par certaines substances dangereuses imposait déjà aux états membres la prise de mesures nécessaires pour limiter les transferts de polluants prioritaires dans le sol et le sous-sol. Cette directive sera abrogée d'ici 2013 par l'article 22 de

la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE) du 23 octobre 2000, qui précise la liste de familles et groupes de substances considérés comme prioritaires (site internet de l'INERIS).

La mise sur le marché et le suivi post-homologation des produits phytosanitaires et des substances actives qui les composent ont été strictement encadrés et harmonisés au niveau européen par la directive 91/414/CEE concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques, mise en application en 1993 (site internet de l'ORP). Les substances actives autorisées sont inscrites à l'annexe 1 de la directive.

La commission européenne a présenté le 12 juillet 2006 une stratégie concernant l'utilisation durable des pesticides, ainsi qu'un projet de directive cadre instaurant un « cadre d'action communautaire pour parvenir à une utilisation durable des pesticides », et la volonté d'une « harmonisation européenne de la mise sur le marché et de l'utilisation des pesticides » (site internet du MEDDTL).

Ainsi, la directive de 1991 a été abrogée le 21 octobre 2009 par l'adoption d'une nouvelle législation appelée « le paquet pesticides ». Cette réglementation vise à « réduire de façon sensible les risques liés aux pesticides ainsi que leur utilisation, et ce dans une mesure compatible avec la protection des cultures » (site internet de l'ORP). Elle entrera en vigueur le 14 juin 2011. Ce « paquet pesticides » comprend deux règlements et deux directives :

- ✓ Règlement 2009/1107/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques et abrogeant les directives 79/117/CEE et 91/414/CEE du Conseil ;
- ✓ Directive 2009/128/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 instaurant un cadre d'action communautaire pour parvenir à une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable ;
- ✓ Directive 2009/127/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 modifiant la directive 2006/42/CE concernant les machines destinées à l'application des pesticides ;
- ✓ Règlement 2009/1185/CE du Parlement européen et du Conseil du 25 novembre 2009 relatif aux statistiques sur les pesticides.

La France a par ailleurs mis en place un plan interministériel 2006-2009 de réduction des risques liés aux pesticides. Ce plan avait pour objectif « la réduction des risques que l'utilisation des pesticides [...] peut générer sur la santé, notamment celle des utilisateurs, l'environnement et la biodiversité (site internet de l'ORP) ». Il prévoyait par ailleurs la réduction de 50% des quantités vendues de substances les plus dangereuses.

En août 2000, le Ministère de l'Environnement avait lancé le Plan Phyto 2000, programme de réduction des pollutions par les produits phytosanitaires. Le Grenelle de l'Environnement a poursuivi cette action en mettant en place le plan Ecophyto 2018, visant à réduire de 50% d'ici 10 ans l'usage des pesticides au niveau national (site internet du Ministère de l'Agriculture).

Ainsi, la législation relative à la mise sur le marché et l'utilisation de produits phytosanitaires, qu'elle soit européenne ou nationale, vise à réduire le risque lié à l'emploi de pesticides sur l'environnement et la santé humaine, tout en cherchant à maintenir une production agricole à qualité et quantité élevées.

### 1.5. LES TRANSFERTS DE PESTICIDES

Il est important de préciser que la pollution phytosanitaire n'est pas uniquement causée par l'usage agricole. Les pesticides peuvent en effet être utilisés à des fins non agricoles, au niveau des particuliers, des communes, de la SNCF, etc. Toutefois, l'agriculture reste la cause prioritaire de dispersion des phytosanitaires, c'est pourquoi on s'intéressera particulièrement ici aux transferts au niveau de la parcelle agricole.

On distingue deux types de transferts des pesticides vers les eaux superficielles et souterraines : le ruissellement et la lixiviation. On entend par ruissellement le transport physique de polluants sur la surface du sol par l'eau de pluie qui s'écoule. La lixiviation quant à elle correspond au processus par lequel la pluie ou l'eau d'irrigation s'infiltre lentement dans le sol, entraînant avec elle les polluants (ArtWet, 2010).

Les modes de transfert et de dégradation des phytosanitaires dans les différents compartiments – sol, air, eau – sont présentés ci-dessous (FIGURE 3 : COMPORTEMENT DES PESTICIDES DANS L'ENVIRONNEMENT).

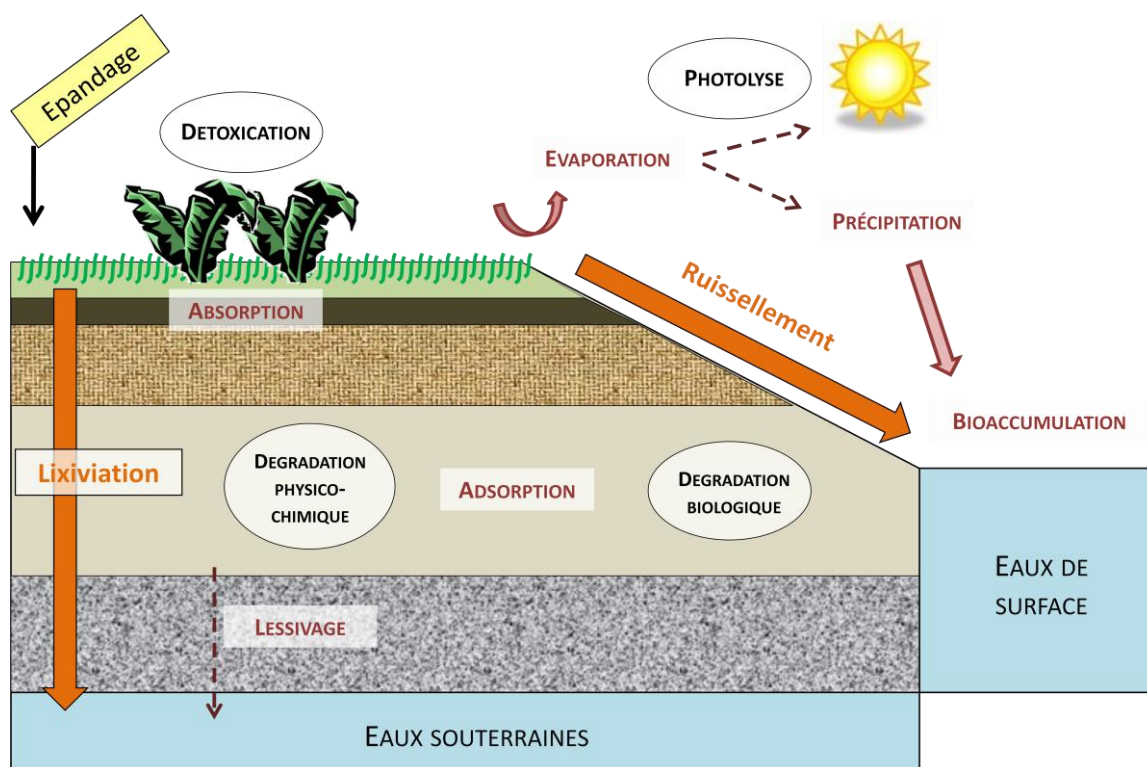


Figure 3 : Comportement des pesticides dans l'environnement (d'après DUNINGAN E. et al., 1971 ; modifié Pierre VINET)

Le ruissellement peut être de surface, lié à l'état du sol : sol déjà saturé en eau, sous-sol imperméable, capacité d'absorption inférieure à l'intensité de la pluie, etc. On distingue

également un ruissellement dit « hypodermique », qui correspond à une circulation latérale de l'eau sous la surface du sol. L'absence d'infiltration en profondeur peut être traduite par une imperméabilité du sous-sol. On peut signaler également que le drainage accentue ce processus en favorisant la circulation rapide de l'eau (KHADIJA et al., 2008).

Il est difficile de prévoir la dégradation des pesticides, car celle-ci résulte d'une interaction complexe entre le mode de transfert, la nature et la charge du polluant et son comportement dans l'environnement. Toutefois, la connaissance du processus de transfert des phytosanitaires jusqu'aux masses d'eau permet d'appréhender leur future remédiation (ArtWet, 2010).

Le transfert dans les eaux de surface est principalement issu du ruissellement, qu'il soit de surface ou hypodermique. L'érosion générée par ce ruissellement est également susceptible d'apporter des polluants adsorbés sur les sédiments à la masse d'eau. Au niveau des eaux souterraines, le transfert est plus complexe et varie selon l'interaction entre le sol et le polluant. En effet, les pesticides infiltrés peuvent être absorbés par les végétaux et la faune édaphique dans les premières tranches du sol (*absorption*). Au niveau du sous-sol, ils peuvent être adsorbés par les argiles (*adsorption*), sur la matière organique ou autres composés insolubles suivant des réactions physico-chimiques : échanges ioniques, force de Van Der Waal, etc. (SAC, 2007). Cette adsorption sera temporaire si la substance n'est pas dégradée. On observera ainsi deux types de dégradation : la dégradation physico-chimique et la dégradation biologique par les micro-organismes. Le transfert jusqu'à la nappe phréatique sera entraîné par infiltration directe des particules, ou par *lessivage* sous l'effet de l'écoulement des eaux d'infiltration.

On peut également signaler qu'une partie des composés est dégradée sous l'effet du rayonnement solaire, après évaporation (*photolyse*) ou dérive éolienne. La part non dégradée redistribuée par précipitation participera aux transferts dans les masses d'eau. Les composés phytosanitaires seront ainsi bioaccumulés tout au long de la chaîne trophique (*bioaccumulation*).

## **2. LES BANDES ENHERBEES : UNE REPONSE LIMITEE FACE AU DRAINAGE**

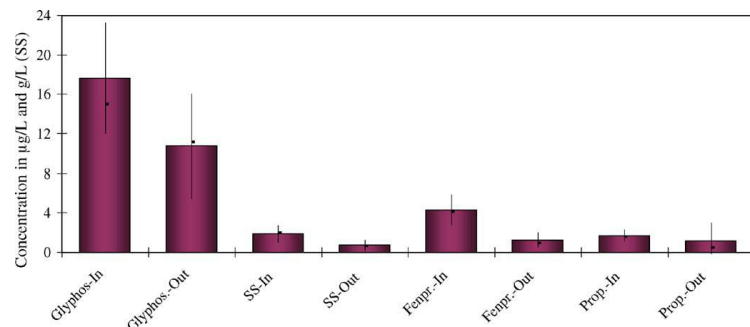
Utilisées comme zones tampons, les bandes enherbées sont des dispositifs efficaces pour réduire les concentrations de phytosanitaires exportés dans les eaux ou les sédiments par ruissellement. Toutefois, ces dispositifs sont court-circuités par le drainage, et présentent ainsi une limite à la rétention et la réduction des pesticides.

### **2.1. EFFICACITE SUR LES TRANSFERTS DE PESTICIDES**

Un certain nombre d'études ont permis de montrer l'efficacité des bandes enherbées sur la rétention des flux de pesticides. Le taux de rétention est variable suivant le type de substances analysées, et les conditions du milieu.

SYVERSEN (2003) a expérimenté la rétention de trois phytosanitaires (*glyphosate*, *fenpropimorph* et *propiconazole*) par une zone tampon enherbée, après simulation d'un ruissellement. Elle s'est également intéressée à la rétention des particules de sol, les pesticides pouvant s'adsorber sur les sédiments et être exportés lors du ruissellement.

Les résultats mettent en évidence une certaine efficacité de la zone tampon, avec des taux d'abattement variables : 61% pour le *glyphosate*, 29% pour le *fenpropimorph* et 68% pour le *propiconazole* (FIGURE 4 : CONCENTRATIONS EN PESTICIDES EN ENTREE ET SORTIE DE BANDE ENHERBEE).



**Figure 4 : Concentrations en pesticides en entrée et sortie de bande enherbée (SYVERSEN et al., 2003)**

La bande enherbée participe également à la rétention des sédiments exportés par le ruissellement. CARON (2006) a également montré l'efficacité des bandes végétales enherbées et enherbées + arborées sur la diminution des concentrations et des masses d'herbicides exportés par ruissellement. L'étude a porté sur l'*atrazine* et son métabolite, le *déséthylatrazine* (DEA), et sur le *metolachlore*. Si la différence d'efficacité entre les dispositifs enherbés et enherbés + arborés n'a pas été démontrée de manière significative, les taux d'abattement dans les dispositifs tampons ont bien mis en évidence une diminution des exportations d'herbicides par ruissellement.

Un grand nombre d'études ont suivi un protocole équivalent, et présentent des résultats similaires, avec une réduction significative des phytosanitaires, mais qui demeure variable suivant la substance et les conditions du milieu. On peut par ailleurs signaler que les bandes enherbées ne constituent pas une mesure curative optimale, et que d'autres dispositifs telles que les zones humides possèdent une plus grande capacité épuratrice. De plus, ces études, et notamment celle de CARON, ont également mis en évidence une limite de ces dispositifs vis-à-vis des exportations par le drainage.

## 2.2. LE PROBLEME DU DRAINAGE

Le drainage est une limite à l'efficacité des bandes enherbées. L'étude de CARON (2006) a mis en évidence le fait que les bandes végétales, à travers leur rugosité qui freine l'écoulement de la lame d'eau ruisselée et favorise donc l'infiltration, augmentent les masses d'herbicides dans le drainage. Ce dernier court-circuite ainsi la zone tampon, les pesticides étant directement exportés sous les bandes végétales jusqu'aux eaux de surface.

Une étude menée par l'IRDA en 2007 sur la quantification des pertes d'herbicides par ruissellement de surface et par infiltration dans les dispositifs tampons montre bien cette augmentation des masses exportées par le drainage, au regard de celles exportées par ruissellement (TABLEAU 1 : MASSES D'HERBICIDES EXPORTEES DANS LES EAUX PAR RUISSELLEMENT ET



DRAINAGE). Ce constat est également valable pour les exportations de pesticides sous forme particulière.

**Tableau 1 : Masses d'herbicides exportées dans les eaux par ruissellement et drainage (CARON et al., 2007)**

Traitement	Atrazine			Métolachlore			DEA		
	Ruisselé	Drainé	Total	Ruisselé	Drainé	Total	Ruisselé	Drainé	Total
Témoin	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Enherbé	27.3	600.0	35.5	33.4	930.3	47.7	34.1	2145.2	65.9
EN+A	22.9	773.8	33.7	27.5	1164.3	45.7	28.3	2193.3	60.8

Pourcentage (%) de la masse exportée (par rapport au témoin) dans les eaux

Ainsi, si l'efficacité de ces dispositifs ne peut être totalement remise en cause, les masses totales exportées (ruissellement + drainage) restant bien inférieures en comparaison d'une absence de bande enherbée, la limite du drainage permet de s'interroger sur la légitimité de tels dispositifs dans un objectif de reconquête de la qualité de l'eau. Tout au moins les bandes enherbées ne sauraient suffire comme mesure curative à la perturbation par les phytosanitaires. Il est donc plus intéressant de se tourner vers des dispositifs permettant de récupérer et de filtrer également les eaux de drainage, tels que les zones humides. On pourrait également envisager de conjuguer l'ensemble de ces dispositifs.

### 3. LES ZONES HUMIDES : INTERETS ET JUSTIFICATIONS

#### 3.1. DEFINITION D'UNE ZONE HUMIDE

Il existe de nombreuses définitions des zones humides, selon l'aspect abordé : scientifique, juridique, politique, etc. On peut distinguer deux grandes définitions, une au niveau international issue de la Convention de Ramsar, et une seconde au niveau national, issue de la Loi sur l'eau de 1992 et de la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) de 2006.

La Convention de Ramsar présente ainsi les zones humides comme « des étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eau naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres ». Cette définition demeure assez large, la réglementation française définissant les zones humides de manière beaucoup plus précise.

D'après l'article L. 211-1 du Code de l'environnement, une zone humide est définie comme étant : « [...] 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 ».

#### 3.2. ROLES DES ZONES HUMIDES

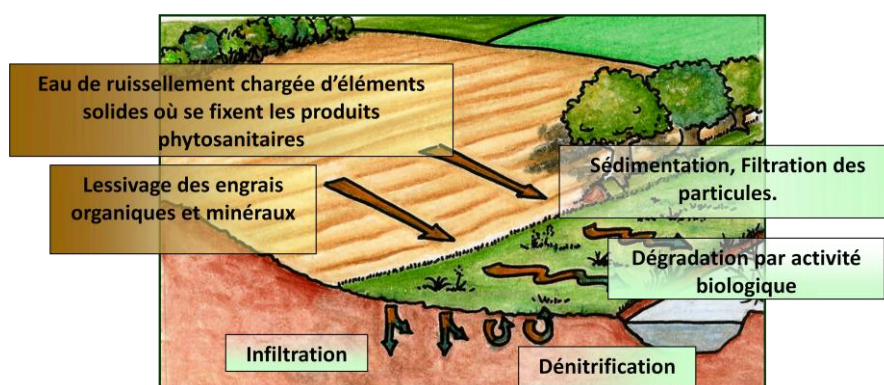
L'intérêt des zones humides se justifie par les diverses fonctions qu'elles assurent. On peut ainsi distinguer quatre rôles majeurs de ces milieux humides, qui s'organisent autour de



quatre grandes fonctions : chimique, biologique, hydraulique et écologique. Elles jouent ainsi un rôle dans :

- ✓ l'épuration des eaux chargées en particules et polluants ;
- ✓ le stockage et le destockage de l'eau : soutien d'été et recharge des nappes ;
- ✓ la régulation des crues ;
- ✓ le maintien de la biodiversité (réservoirs biologiques).

Dans le cadre de ce rapport, on s'intéressera en particulier au rôle important que tiennent les zones humides vis-à-vis de la qualité de l'eau, à travers leur fort pouvoir épurateur (FIGURE 5 : RÔLE EPURATEUR D'UNE ZONE HUMIDE). En effet, elles limitent les transferts de particules et de polluants issus notamment des pratiques agricoles, par l'intermédiaire de leur végétation et leur faune édaphique. Les nutriments sont ainsi assimilés par les plantes, et transformés par les micro-organismes, ces derniers consommant également la matière organique. Les zones humides favorisent ainsi la dénitrification (ARLOT, 1989), et la rétention du phosphore. Les métaux lourds sont retenus et adsorbés sur les sédiments. De plus, ces milieux sont favorables à l'élimination des produits phytosanitaires (TURPIN, 1997), en accueillant une faune et une flore diversifiées en bactéries, champignons et zooplancton susceptibles d'assurer la décomposition de certains pesticides qui se retrouvent dans les eaux de ruissellement (SAC, 2007).



*Figure 5 : Rôle épurateur d'une zone humide  
(Syndicat Mixte du Bassin de la Sélune, 2008)*

Les fonctions ici assurées sont d'ordre chimique et biologique. Le temps de séjour important de l'eau dans ces zones humides est par ailleurs favorable à une meilleure épuration que dans des milieux plus lotiques.

Une récente étude menée par le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer a permis d'évaluer le gain économique apporté par les zones humides (*Evaluation économique des services rendus par les zones humides*, 2010). Elle se base sur une étude de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (*Les services rendus par les zones humides à la gestion des eaux*, 1996), réalisée sur 6500 ha de zones humides, qui chiffre le bénéfice à près de 13 millions d'euros de traitements de potabilisation évités par an. L'intérêt de l'utilisation de la fonction épuratrice des zones humides apparaît ainsi d'autant plus fort que les concentrations en pesticides dépassent bien souvent les normes de potabilité. Une

expertise de l'INRA et du CEMAGREF (*Pesticides, agriculture et environnement*, 2005) a ainsi mis en évidence que les teneurs en pesticides dans les eaux de ruissellement peuvent aller jusqu'au mg/L et plus. Les eaux de drainage présentent pour leur part des concentrations en pesticides plus faibles, mais toujours supérieures aux normes de potabilité (SAC, 2007).

Les zones humides apparaissent ainsi comme une mesure curative de réduction des transferts de pesticides dans les eaux superficielles. En effet, l'efficacité des bandes enherbées reste limitée, ce constat étant d'autant plus fort pour les eaux de sortie de drains (cf. 2.2. Le problème du drainage). La création de zones tampons humides agricoles semble donc être un aménagement compensatoire intéressant pour envisager la reconquête de la qualité de l'eau.

### **3.3. DISSIPATION DES PESTICIDES AGRICOLES PAR LES ZONES HUMIDES**

L'élimination des pesticides dans les zones humides suit différents processus, qui dépendent de conditions particulières telles que la hauteur d'eau, la concentration en oxygène, la présence de végétation, etc. (SAC, 2008). On peut ainsi distinguer :

- ✓ la photodégradation, provoquée par les rayonnements ultraviolets ;
- ✓ la biodégradation, dépendante des micro-organismes (dégradation microbienne) et des végétaux (phyto-rémediation) ;
- ✓ l'hydrolyse, correspondant à la décomposition de la molécule par l'eau ;
- ✓ la transformation chimique, liée aux processus d'oxydo-réduction ;
- ✓ la dégradation par la matière organique et les argiles, par réaction chimique ;
- ✓ l'adsorption par les argiles, sur la matière organique et sur les composés insolubles.

Chaque pesticide dispose de caractéristiques de dégradation particuliers, et d'une demi-vie variable. La demi-vie, ou  $DT_{50}$ , définit le temps nécessaire pour que la moitié de la concentration d'une substance donnée soit réduite. Cette  $DT_{50}$  varie également suivant les caractéristiques du milieu. La dégradation d'un pesticide dans une zone humide devra donc être influencée par un temps de séjour établi à partir de sa demi-vie. Par ailleurs, il est important de signaler que la dégradation d'un produit phytosanitaire doit nécessairement être encadrée, car les composés qui en résultent peuvent présenter une toxicité plus ou moins similaire. On citera comme exemple la déséthylatrazine (DEA), métabolite issu de la dégradation de l'atrazine, dont la toxicité est aussi grande voire supérieure à cette dernière (site internet de l'ORP).

### **3.4. MESURES PREVENTIVES, OU MESURES CURATIVES ?**

Si les zones humides peuvent être considérées comme une technique curative, dans un objectif de réduction d'une pollution, il est nécessaire de s'interroger sur la justification de l'emploi d'un tel procédé. En effet, ce type de mesures ne résout en rien la source de la perturbation, *a contrario* de mesures préventives.

Dans le cas d'une pollution phytosanitaire, la zone humide est susceptible de limiter les transferts au cours d'eau. Toutefois, deux paramètres sont à considérer. Premièrement, tout

procédé a un seuil d'efficacité, à savoir qu'un apport trop important de pesticides aura obligatoirement des répercussions sur le milieu trophique : si une partie des polluants pourra être éliminée par la zone humide, la trop forte concentration entrainera un transfert vers les eaux de surface et sub-surface. D'autre part, un dysfonctionnement éventuel des systèmes (modification des paramètres abiotiques, biotiques, manque d'eau, etc.), ou un pic de pollution, favorisent le risque de fuite dans le milieu récepteur (SAC, 2008). Il est donc primordial d'envisager en priorité l'emploi de techniques préventives, afin de limiter à la source l'utilisation de produits phytosanitaires.

En outre, la création de zones humides artificielles a un coût qui n'est pas à négliger. Si on croise ce paramètre avec une utilisation massive et non raisonnée d'intrants, qui limite fortement leur efficacité, alors l'emploi de techniques curatives n'apparaît pas justifié. Au contraire, la modification des pratiques agricoles peut être bien plus probante, et beaucoup moins coûteuse à mettre en place (ARHEIMER et al., 2004). La comparaison économique de ces deux scénarios a été étudiée en Suède, au niveau de la réduction des apports azotés. Elle illustre bien la logique d'intervention à adopter en priorité (TABLEAU 2 : COMPARAISON DES ESTIMATIONS ECONOMIQUES D'UN SCENARIO DE CHANGEMENT DE PRATIQUES AGRICOLES ET D'UN SCENARIO DE CREATION DE ZONES HUMIDES).

**Tableau 2 : Comparaison des estimations économiques d'un scénario de changement de pratiques agricoles et d'un scénario de création de zones humides (ARHEIMER et al., 2004)**

	Estimations économiques (millions de couronnes suédoises)			Capacité de réduction de l'azote (tonnes N / an)	Réduction par rapport au coût (tonnes N / an / millions de couronnes suédoises)
	Coût	Gain	Balance		
Changement des pratiques agricoles	- 1	+ 1,9	+ 0,9	- 86	<b>86</b>
Création de zones humides	- 1,7	-	- 1,7	- 14	<b>8,24</b>

Ainsi, la création de zones humides ne peut être considérée comme une solution permettant la pérennité de pratiques agricoles non adaptées. Un travail de réduction à la source doit être mené à travers des techniques de prévention : si ces mesures ne permettent pas une réduction totale des transferts de polluants, alors la création de zones humides sera justifiée, et leur efficacité renforcée.

## 4. LES ZONES TAMPONS HUMIDES ARTIFICIELLES

### 4.1. DEFINITIONS

On entend par « zones humides artificielles » les zones humides aménagées par l'homme pour des objectifs divers, qui ne concernent pas essentiellement la réduction des transferts de polluants (lutte contre les inondations, abreuvement du bétail, etc.).

Les zones tampons sont des « aménagements d'origine naturelle ou artificielle, dont la localisation, les caractéristiques édaphiques, l'hydromorphie, les interactions avec l'eau, l'importance du couvert végétal et la richesse floristique et faunistique jouent un rôle dans la filtration des eaux chargées en produits indésirables issus des activités agricoles » (SAC, 2008).

Une Zone Tampon Humide Artificielle (ZTHA) est donc une zone humide aménagée par l'homme, en transition entre les parcelles agricoles et le cours d'eau, jouant un rôle tampon pour la dépollution et donc la protection des eaux (Site internet du CEMAGREF). Ces dispositifs sont aménagés dans un objectif de filtration des eaux de drainage, les bandes enherbées étant des mesures correctives peu efficaces lorsqu'elles sont court-circuitées par les drains. Ainsi, on peut distinguer trois objectifs d'une ZHTA :

- ✓ Réduire les concentrations en pesticides entre les sorties de drains et le cours d'eau ;
- ✓ Déconnecter les drains du cours d'eau, et donc éviter les transferts directs ;
- ✓ Favoriser la sédimentation des matières en suspension.

Il est toutefois important de considérer que de tels aménagements n'ont pas pour ambition l'utilisation de zones humides déjà existantes, mais bien la création de dispositifs artificiels (Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2010). En outre, ils peuvent être implantés directement au niveau de la bande enherbée réglementaire, nécessitant ainsi une emprise foncière moindre au niveau du parcellaire.

## **4.2. LES DIFFERENTS TYPES DE ZTHA**

A partir des différentes expérimentations mises en œuvre (cf. partie 5 : Projets et études expérimentales), il est possible de distinguer deux grands types de Zones Humides Tampons Artificielles : les fossés d'épuration, et les aménagements de type « mares ». L'analyse de la littérature et des différentes expérimentations a en effet montré que ces aménagements sont les plus utilisés. Par ailleurs, il est tout à fait possible de faire se succéder différentes ZTHA, qu'elles soient du même type ou de nature différente. Si ces types de zones humides sont majoritaires, il peut en exister d'autres qui ne seront pas explicités dans ce rapport, en raison de leur intérêt limité et de l'absence d'expérimentation ayant permis de montrer leur efficacité.

### **4.2.1. Les fossés d'épuration**

#### *4.2.1.1. Caractéristiques*

Creusés dans le sol entre la parcelle et le cours d'eau, les fossés d'épuration recueillent les eaux de sortie de drains, court-circuitant le transfert direct vers la rivière. Ils peuvent être linéaires ou adopter une certaine sinuosité, leur taille dépendant du nombre et de la fréquence des drains. On distinguera ainsi des aménagements « ponctuels » de sortie de drain (FIGURE 6 : AMENAGEMENT PONCTUEL DE SORTIE DE DRAIN) d'aménagements de longueur plus importante,

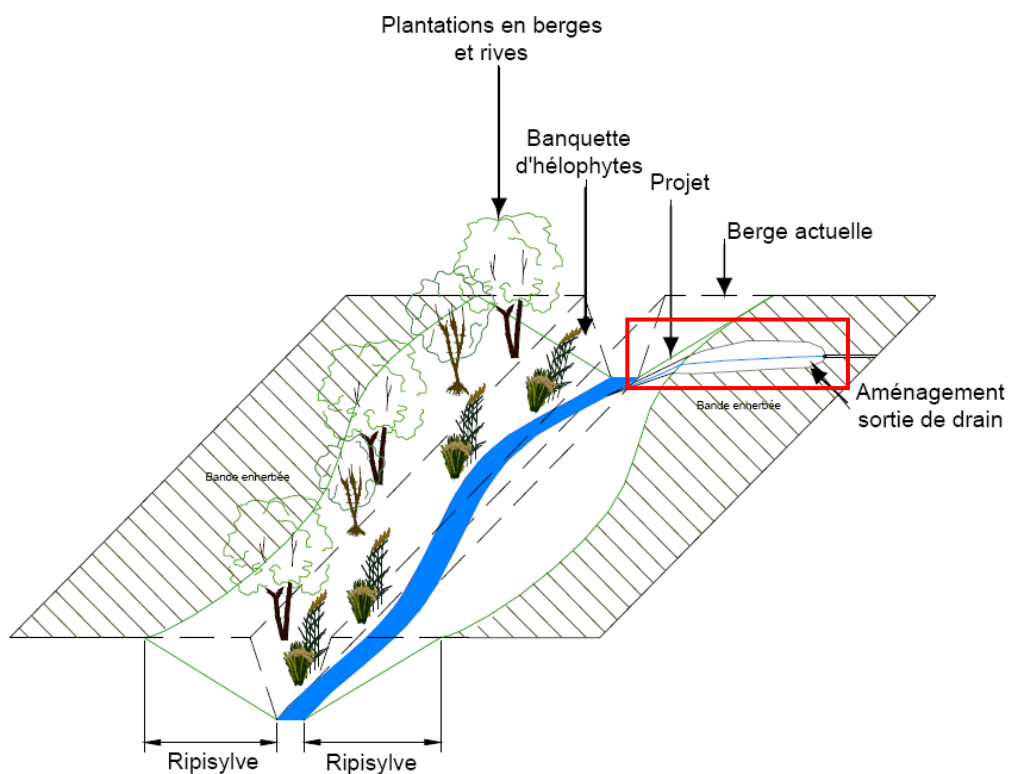
recueillant les eaux de sortie d'un ensemble de drains (FIGURE 7 : AMENAGEMENT DE GRANDE LONGUEUR SUR PLUSIEURS SORTIES DE DRAINS).

Les fossés doivent être plantés d'une végétation herbacée (ou naturellement colonisés). En effet, LE FILLEUL (2000 et 2001) a montré que le développement d'une strate herbacée dans un fossé freine les écoulements et favorise ainsi la sédimentation et les processus de dégradation des produits phytosanitaires. LE FILLEUL a également mis en évidence que si les fossés doivent être en eau, cette inondation ne doit pas être trop importante, afin d'établir une épuration des flux de pollution optimale. Par ailleurs, il est important d'avoir un stockage de l'eau suffisamment long, et ce afin de maximiser le temps de contact entre la végétation et la micro-faune et les polluants à éliminer. Ce paramètre est directement dépendant de la dynamique des écoulements de la zone tampon. L'eau ainsi détournée doit circuler lentement avant sa restitution au cours d'eau.

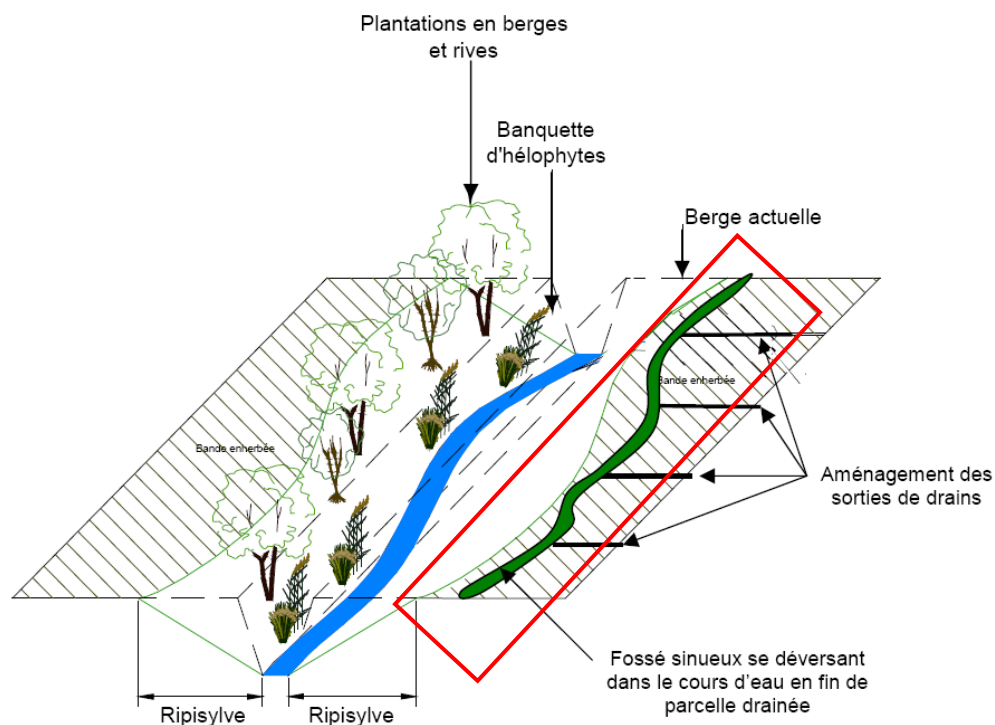
Un autre paramètre important est la taille de l'aménagement. En effet, un fossé de petite taille permet une rétention plus importante de l'eau, ainsi qu'une colonisation plus forte des végétaux du lit. De ce fait, l'atténuation des intrants agricoles est favorisée par un temps de contact avec les macrophytes relativement long (BOULDIN et al., 2004). L'efficacité de ses aménagements est donc conditionnée par différents paramètres, définis par LE FILLEUL :

- ✓ La pente : elle joue sur la capacité de stockage de l'eau ;
- ✓ La géométrie du fossé : elle conditionne la capacité de stockage, à travers son dimensionnement ;
- ✓ La rugosité des berges : elle influe sur la dynamique d'écoulement (ralentissement) ;
- ✓ La présence d'aménagements extérieurs : certains aménagements, comme les buses, peuvent augmenter ou diminuer la capacité de stockage ;

L'analyse de ces différents paramètres met en évidence les contraintes de ces aménagements (LE FILLEUL, 2000). Tout d'abord, lorsque les débits en sortie de drains sont très importants, ou que la capacité de stockage devient insuffisante, l'efficacité épuratrice est remise en question. De plus, il y a toujours un risque de montée des eaux au niveau de la parcelle, qui n'existerait pas si les drains étaient directement raccordés au réseau hydrographique. Par ailleurs, si l'on s'intéresse au dimensionnement des fossés, il apparaît que ces derniers sont souvent surcalibrés, ce qui limite la rétention des écoulements. En effet, la vitesse d'écoulement ne permet plus un temps de stockage suffisant à une bonne épuration des flux de polluants.



**Figure 6 : Aménagement ponctuel d'une sortie de drain**  
(Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2010 ; modifié Pierre VINET)



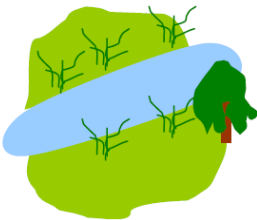

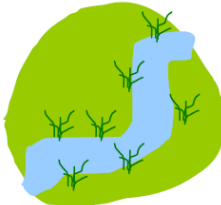

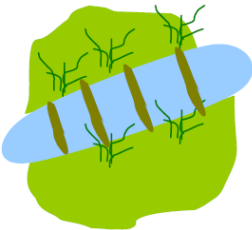

**Figure 7 : Aménagement de grande longueur de plusieurs sorties de drains**  
(Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2010 ; modifié Pierre VINET)



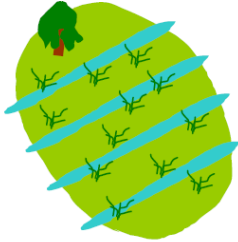



#### 4.2.1.2. Les types de fossés d'épuration

On peut distinguer 5 grands types de fossés, dont la nature, le dimensionnement et l'efficacité varient selon le milieu récepteur, l'occupation du sol et l'intensité des flux à épurer. Le tableau suivant synthétise les différents fossés d'épuration qui peuvent être aménagés, d'après des expérimentations menées en Indre-et-Loire (37) et Côtes-d'Armor (22) en milieu agricole (TABLEAU 3 : LES DIFFERENTS TYPES DE FOSSES D'EPURATION).

*Tableau 3 : Les différents types de fossés d'épuration (d'après SAC, 2008)*

Type d'aménagement	Schéma de principe	Illustration
<b>Fossé linéaire</b>		
→ Aménagement ponctuel de sortie de drain.		
<b>Fossé sinueux</b>		
→ Aménagement de grande longueur de plusieurs sorties de drains, dont la sinuosité favorise un écoulement lent et donc un temps de contact plus important.		
<b>Fossé à étage</b>		
→ Présence de nombreux seuils pour freiner l'écoulement des eaux.		



<b>Fossés transversaux</b>		
→ Capacité de stockage et réduction des transferts plus importantes.		
<b>Fossé de sous-bois</b>		
→ Contexte particulier. Végétation rivulaire actrice de l'épuration des eaux.		

Les résultats des expérimentations intégrant l'aménagement de fossés d'épuration seront exposés dans la partie 6 : Efficacité des zones humides agricoles. On peut néanmoins préciser que l'efficacité sera dépendante des conditions du milieu, des caractéristiques de l'aménagement, ainsi que de la nature et la quantité des intrants d'origine agricole.

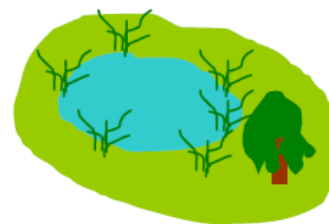
#### 4.2.2. Les zones humides de type « mares »

Les mares sont bien souvent des aménagements d'origine anthropique, et correspondent ainsi à un type de zones humides artificielles. On entend par « mares » des étendues d'eau à renouvellement limité – bien souvent stagnantes – et de faible profondeur. Cette dernière permet à l'ensemble des couches d'eau d'être sous l'action du rayonnement solaire, et à la végétation de s'enraciner sur toute la surface du fond. Elles exercent un rôle tampon au niveau du ruissellement (DUTILLEUL, 2003). On distinguera ici trois types d'aménagements : les mares artificielles, les mares artificielles plantées, et les bassins de rétention.

##### 4.2.2.1. Les mares artificielles

Une mare artificielle est une mare non plantée mais pouvant être colonisée naturellement par la végétation (SAC, 2008) (FIGURE 8 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE MARE ARTIFICIELLE). Aménagées entre les parcelles agricoles et les eaux de surface, elles peuvent intercepter les eaux de drainage avant leur transfert au cours d'eau (LARSON et al., 2000).

L'épuration des eaux agricoles intervient à travers un processus microbien, qui dépend de paramètres abiotiques tels que les conditions hydrologiques (dépendantes de la capacité de stockage de la mare) et la température de l'eau.



*Figure 8 : Schéma de principe d'une mare artificielle (Sac, 2008)*

Ainsi, dans des conditions suffisantes, ces aménagements peuvent permettre la sédimentation et l'épuration des produits chimiques (LUCKEYDOO et al., 2000). Les illustrations ci-dessous présentent deux aménagements de mares artificielles en Indre-et-Loire (37) (FIGURE 9 : MARE ARTIFICIELLE AGRICOLE EN INDRE-ET-LOIRE) et dans les Vosges (88) (FIGURE 10 : MARE ARTIFICIELLE AGRICOLE DANS LES VOSGES).



**Figure 9 : Mare artificielle agricole en Indre-et-Loire**  
(SAC, 2008)



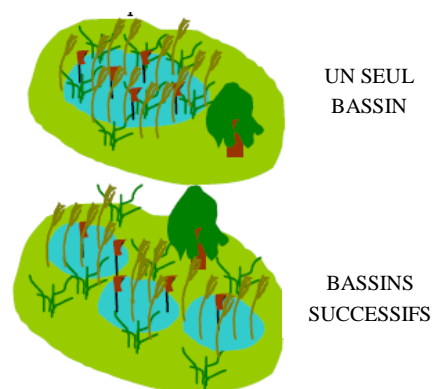
**Figure 10 : Mare artificielle agricole dans les Vosges**  
(Agence de l'eau Rhin-meuse, 2010)

#### 4.2.2.2. Les mares artificielles plantées

Ce sont des mares plantées de végétation caractéristique (FIGURE 11 : SCHEMAS DE PRINCIPE DE MARES ARTIFICIELLES PLANTEES). Ces aménagements sont intéressants car ils se basent sur une dégradation naturelle des phytosanitaires par la végétation palustre. Ces derniers sont effectifs capables de dégrader certains pesticides tels que l'*atrazine* ou le *metolachlore* (CARON et al., 2006).

Par ailleurs, la présence de plantes forme un très bon obstacle à l'écoulement des eaux, et augmente ainsi le temps de rétention et le temps de contact entre les contaminants et la végétation.

On peut assimiler ces aménagements à du lagunage, l'eau circulant dans un ou plusieurs bassins successifs. L'épuration intervient ici à travers un cycle de dégradation par les microphytes et les macrophytes. Les illustrations ci-dessous présentent deux aménagements de mares artificielles plantées en Indre-et-Loire (37) (FIGURE 12 : MARE ARTIFICIELLE PLANTEE EN INDRE-ET-LOIRE) et dans les Vosges (88) (FIGURE 13 : MARE ARTIFICIELLE PLANTEE DANS LES VOSGES).



**Figure 11 : Schémas de principe de mares artificielles plantées**  
(SAC, 2008 ; modifié Pierre VINET)



*Figure 12 : Mare artificielle  
plantée en Indre-et-Loire  
(SAC, 2008)*

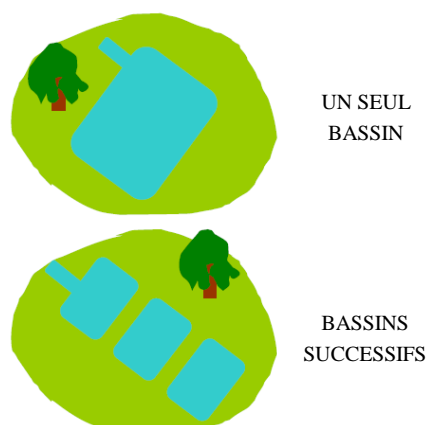


*Figure 13 : Mare artificielle plantée  
dans les Vosges  
(Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2010)*

### 4.2.3. Les autres types de ZTHA

Il existe d'autres types de zones tampons humides artificielles, mais leurs caractéristiques et l'absence de résultats mettant en évidence leur efficacité dans la réduction des pollutions agricoles par les phytosanitaires – et en particulier vis-à-vis d'autres aménagements à efficacité démontrée et plus importante (tels que ceux présentés en partie 4.2.1 et 4.2.2) – expliquent un certain « désintérêt » de leur utilisation.

On peut ainsi citer les bassins de rétention des eaux, aménagements de type « mares » (FIGURE 14 : SCHEMAS DE PRINCIPE DE BASSINS DE RETENTION). L'homogénéité de ces dispositifs en terme de dimensionnement (rectangulaire) et de profondeur serait une limite à une épuration efficace des phytosanitaires, au regard des mares artificielles. La création de bassins de rétention des eaux agricoles ne serait donc pas à privilégier. L'emploi du conditionnel n'est ici pas anodin, car il faut le répéter : il n'existe pas ou peu d'études ou projets rapportant à ce jour l'efficacité de tels aménagements (entendons ici « aménagements en sortie de parcelle agricole »), bien que ce constat soit en train d'évoluer avec la mise en place de quelques bassins de rétention en contexte agricole (site internet de Artwet).



*Figure 14 : Schémas de principe de  
bassins de rétention  
(SAC, 2008 ; modifié Pierre VINET)*

D'autres aménagements tels que les filtres à sable intermittents peuvent être également envisagés, mais sont rarement utilisés pour les eaux agricoles, l'écoulement entrant devant être uniforme, ce qui n'est pas le cas avec les eaux de drainage. D'autre part, le risque de colmatage par les particules solides reste important. Enfin, tout comme pour les bassins de rétention, l'absence d'études démontrant l'efficacité de tels aménagements limite leur utilisation comme dispositif de réduction des phytosanitaires.

## 5. PROJETS ET ETUDES EXPERIMENTALES

Afin de justifier l'intérêt de l'aménagement de zones humides artificielles comme mesure curative, un certain nombre de projets et d'études expérimentales ont été ou sont mis en œuvre en Europe et dans le monde. Ce sont essentiellement des projets de recherche, dans un but scientifique, qui cherchent à mettre en évidence l'efficacité des zones humides dans la rétention et l'élimination des produits phytosanitaires.

### 5.1. PROJETS EN EUROPE

#### 5.1.1. Le Projet Artwet

Le projet ArtWet (Artificial Wetlands) – *Mitigation of agricultural nonpoint-source pesticide pollution and phytoremediation in artificial wetland ecosystems* – est un projet LIFE Environnement<sup>1</sup> qui s'est déroulé sur 4 ans, du 1<sup>er</sup> octobre 2006 au 30 septembre 2010. Il s'articule autour de la problématique de la dégradation de la qualité de l'eau par les phytosanitaires issus des pratiques agricoles. L'objectif d'un tel projet est de concevoir et d'optimiser des procédés de traitement biologique tels que les zones humides artificielles, dans un but de réduction des concentrations en pesticides en sortie d'agrosystèmes (Site internet de ArtWet).

##### 5.1.1.1. Partenaires et financeurs du projet

Le projet ArtWet concerne trois pays européens, la France, l'Allemagne et l'Italie, représentés par un ensemble de neuf partenaires (FIGURE 15 : LES ACTEURS DU PROJET ARTWET EN EUROPE) :

#### France

- CEMAGREF, Antony (92) ;
- Université de Haute-Alsace, Colmar (68) ;
- Chambre d'Agriculture d'Indre-et-Loire (37) ;
- Bureau d'étude BURGEAP, Strasbourg (67) ;
- Agence de l'eau Loire-Bretagne.

#### Allemagne

- Université Albert-Ludwigs, Freiburg (Baden-Württemberg) ;
- Université de Koblenz-Landau (Rheinland-Pfalz) ;
- District Verbandsgemeinde Landau-Land (Rheinland-Pfalz).

#### Italie

- Université catholique du Sacré Cœur, Piacenza (Emilia-Romagna).

---

<sup>1</sup> Un programme « LIFE Environnement » est un programme de financement européen soutenu par la Direction Générale de l'Environnement de la Commission Européenne. Il finance des actions de démonstration à caractère innovant dans les domaines de l'aménagement du territoire, de la gestion de l'eau et des déchets, de la réduction de l'impact des activités économiques et de la politique intégrée des produits (Artwet, 2011).

L'ENGEES (Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg) est chargée de la coordination du projet avec les différents partenaires.



Figure 15 : Les acteurs du projet ArtWet en Europe  
(ArtWet, <http://coursenligne.u-strasbg.fr>)

En tant que projet LIFE Environnement, ArtWet est financé par la Commission Européenne à hauteur de 50%, ce qui représente un montant de 3,9 millions d'euros. Par ailleurs, il mobilise d'autres financements, en France notamment, de BASF Agro SAS, du Conseil Général du Haut-Rhin, du Conseil Régional d'Alsace, du Conseil Général d'Indre-et-Loire et de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne (Site Internet de ArtWet).

#### 5.1.1.2. Sites expérimentaux et de démonstration

Le projet ArtWet s'appuie sur deux types de recherche : des sites de démonstration et des sites d'expérimentation (TABLEAU 4 : SITES EXPERIMENTAUX ET DE DEMONSTRATION DU PROJET ARTWET EN EUROPE). Les premiers consistent en la construction et le suivi d'aménagements grandeur nature ; les seconds en des systèmes contrôlés qui participent à l'optimisation de ces prototypes (Site internet de ArtWet).

Tableau 4 : Sites expérimentaux et de démonstration du projet ArtWet en Europe  
(D'après ArtWet, 2011)

	Sites expérimentaux	Sites de démonstration
<b>Allemagne</b>	Fossés végétalisés – LANDAU (Rheinland-Pfalz)	Bassin de rétention – EICHSTETTEN (Baden-Württemberg)
		Bassin de rétention – LANDAU (Rheinland-Pfalz)
		Fossés végétalisés – LANDAU (Rheinland-Pfalz)
<b>Italie</b>	Bioréacteurs – PIACENZA (Emilia-Romagna)	Bioréacteurs – PIACENZA (Emilia-Romagna)
<b>France</b>	Microcosmes de zones humides forestières – ANTONY (92)	Bassin d'orage – ROUFFACH (68)
	Mésocosmes et microcosmes de zones humides – COLMAR (68)	Zone tampon humide artificielle – LOCHES (37)
		Zone humide forestière – LOCHES (37)



### **5.1.2. Etudes et publications européennes**

Un certain nombre d'études scientifiques portent sur l'efficacité des zones humides dans l'élimination des effluents azotés, phosphorés, et des pesticides. Ces travaux de recherche ont fait l'objet de publications, et ont bien souvent été étudiés comme bases de données pour le projet ArtWet. Le tableau suivant regroupe les publications à l'échelle européenne, portant sur les zones humides naturelles ou artificielles. N'ont été recensées ici que les études concernant les phytosanitaires (TABLEAU 5 : ETUDES ET PUBLICATIONS EUROPEENNES). Une grande part des travaux de recherche porte en effet sur les transferts de nutriments. La liste des publications présentées ici n'est pas exhaustive, car elle s'appuie principalement sur une recherche bibliographique. Par ailleurs, de nombreuses thèses et mémoires relatifs aux zones humides artificielles ne sont pas disponibles, et ne sont donc pas cités ici.

Les résultats de ces études sur l'efficacité des zones humides naturelles ou artificielles sont présentés dans la Partie 6 : Efficacité des zones humides agricoles.

L'analyse de ces travaux de recherche montre une grande hétérogénéité dans la nature des substances étudiées. Elle concerne en effet principalement les phytosanitaires les plus fréquemment utilisés en agriculture, ou les substances prioritaires au titre de la Directive Cadre sur l'Eau.

### **5.2. ETUDES ET PUBLICATIONS MONDIALES**

Au même titre que les publications présentées précédemment, le tableau suivant recense les études réalisées à l'échelle mondiale sur l'efficacité des zones humides dans le traitement des produits phytosanitaires (TABLEAU 6 : ETUDES ET PUBLICATIONS MONDIALES). Elle est également non exhaustive, et a pour objectif de montrer la grande variabilité de ces travaux de recherche.

Si la majeure partie de ces études s'appuie sur des mésocosmes de zones humides artificielles, il ressort une certaine hétérogénéité dans le type de zones humides étudiées. Par ailleurs, la nature des substances analysées est très variable, et fonction de la localisation du territoire et des pratiques qui s'y exercent.

Les résultats de ces études sur l'efficacité des zones humides naturelles ou artificielles sont également présentés dans la Partie 6 : Efficacité des zones humides agricoles.

**Tableau 5 : Etudes et publications européennes (d'après SAC, 2008 ; et recherche personnelle)**

<b>Auteur(s)</b>	<b>Localisation</b>	<b>Pratique agricole</b>	<b>Phytosanitaire(s) étudié(s)</b>			<b>Type de zone humide</b>	<b>Végétation</b>
GARON-BOUCHER et CHARNEY, 1998	France	inconnue	Isoproturon Diflufenicanil			Fossé herbacé	Présente (pas d'info)
DE SNOO et DE WIT, 1996	Pays-Bas	Grande culture	<i>Herbicides</i> MCPA Bentazone Ethofumesate Phenmediphar Metamitron Mecoprop-p Metsulfuron-m Fluroxypyr	<i>Insecticides</i> Dimethoate Parathion Oxydemeton-m Pirimicarb	<i>Fongicides</i> Maneb Fentin acetate Propiconazol Triadimenol Anilazine	Fossé herbacé	pas d'info
MCKINLAY et KASPEREK, 1998	Royaume-Uni	inconnue	Atrazine			Systèmes plantés marécageux	<i>Phragmites australis</i>
GARCINUÑO et al., 2003	Espagne	expérimental	<i>Herbicides</i> Simazine Atrazine Isoproturon Linuron	<i>Insecticides</i> Carbaryl Fenamiphos Permethrin		Mésocosme	<i>Lupinus angustifolius</i>
GRUNEWALD et al., 2001	Allemagne	expérimental	Glyphosate Aminomethylphosphonic acid (AMPA)			Bassin réservoir	aucune
MARGOUM, 2003	France	inconnue	inconnu (thèse non disponible)			Fossé herbacé	pas d'info
MATAMOROS et al., 2006	Espagne	expérimental	<i>Herbicides</i> Simazine Alachlor Diuron Mecaprop Clofibrac acid	<i>Insecticides</i> Chlorpyrifos Pentachlorophenol Lindane Endosulfan	<i>Fongicides</i> Pentachloro-benzène	ZTHA à écoulement horizontal subsurfacique	Présente (pas d'info)



*Tableau 6 : Etudes et publications mondiales (d'après Sac, 2008 ; et recherche personnelle)*

Auteur(s)	Localisation	Pratique agricole	Phytosanitaire(s) étudié(s)		Type de zone humide	Végétation
MIGLIORANZA et al., 2004	Argentine	aucune	$\alpha$ -, $\beta$ -, $\gamma$ - et $\delta$ -HCH Heptachlore Aldrine Dieldrine $\alpha$ - et $\gamma$ -chlordane $\alpha$ -, $\beta$ -endosulfan et endosulfan sulfate DDT, DDE et DDD		Lac peu profond	<i>Schoenoplectus californicus</i>
SCHULZ et al., 2003	Etats-Unis	aucune	Methyl parathion		ZH végétalisée ZH non végétalisée	<i>Juncus effusus</i>
SHERRARD et al., 2004	Etats-Unis	aucune	<i>Insecticide</i> Chlorpyrifos	<i>Fongicide</i> Chlorothalonil	Mésocosme	aucune
MOORE et al., 2000	Etats-Unis	inconnue	Atrazine		Mésocosme	Présente (pas d'info)
MOORE et al., 2001	Etats-Unis	inconnue	Atrazine Lambda-cyhalothrine		Fossé herbacé	<i>Polygonum amphibium</i> <i>Leersia oryzoides</i> <i>Sporobolus sp.</i>
MOORE et al., 2001	Etats-Unis	inconnue	Metolachlore		Mésocosme	<i>Juncus sp.</i>
MOORE et al., 2002	Etats-Unis	inconnue	Chlorpyrifos		Mésocosme	Présente (pas d'info)
ROSE et al., 2006	Australie	Culture coton	Diuron Fluometuron Aldicarb Endosulfan		Bassins successifs (non végétalisé, et végétalisé)	<i>Persicaria sp.</i> <i>Ludwigia peploides</i> <i>Myriophyllum papillosum</i> <i>Luncus usitatus</i> <i>Bolboschoenus medianus</i> <i>Typha domingensis</i>
RUNES et al., 2003	Etats-Unis	Pépinière	Atrazine		5 cellules de ZTHA	<i>Juncus sp.</i> <i>Typha latifolia</i>
WEAVER et al., 2004	Etats-Unis	inconnue	Atrazine Fluometuron		Mésocosme	aucune

## 6. EFFICACITE DES ZONES HUMIDES AGRICOLES

### 6.1. BILAN DU PROJET ARTWET

Le bilan du projet de bioremédiation des pesticides en zones humides artificielles est à ce jour positif, avec des rendements de **40 à 88%** de rétention en moyenne. L'efficacité des systèmes « jeunes », c'est-à-dire avec une croissance limitée de la végétation, reste significative. En outre, cette efficacité augmente pour des systèmes bien végétalisés, avec des rendements de **76 ± 19%** pour la concentration retenue en phytosanitaires. L'efficacité de ces zones humides artificielles est variable selon la nature des substances : le rendement pour certains pesticides comme le *glyphosate* peut atteindre 100% (Site internet de ArtWet). Les résultats spécifiques aux expérimentations grandeur nature sont présentés ci-après. Ils concernent en particulier les zones humides artificielles (Loches – France), les fossés végétalisés (Landau – Allemagne) et les bassins de rétention (Rouffach – France).

#### 6.1.1. Zones humides artificielles de Loches

Les résultats se concentrent sur six pesticides : *isoproturon*, *metazachlore*, *chlorotoluron*, *tebuconazole*, *epoxiconazole*, *diflufenican*. On distingue la zone humide artificielle de la zone humide forestière. Les caractéristiques du site sont présentées en Annexe 1. Les taux d'abattement sont ainsi de **73 ± 16%** pour la ZH artificielle et de **54 ± 31%** pour la ZH forestière (FIGURE 16: EFFICACITÉ DE RÉDUCTION DES CHARGES DE PESTICIDES SUR LES ZTHA DE LOCHES). En parallèle, on observe une rétention de près de 50% des volumes d'eau en sortie des systèmes.

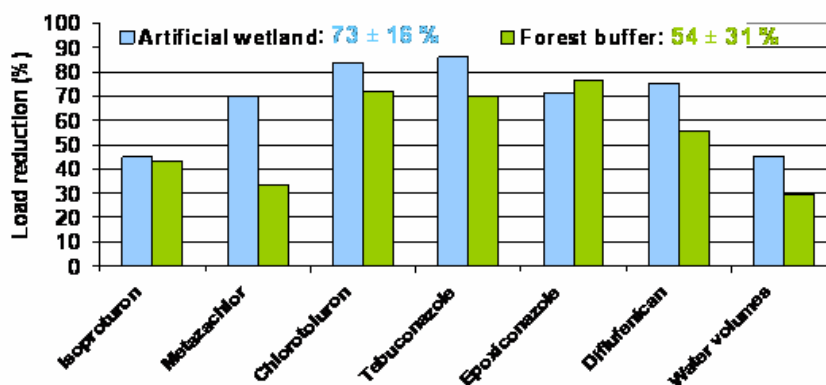


Figure 16: Efficacité de réduction des charges de pesticides sur les ZTHA de Loches (Résultats du prototype Artificial Wetland of Loches, ArtWet, 2011)

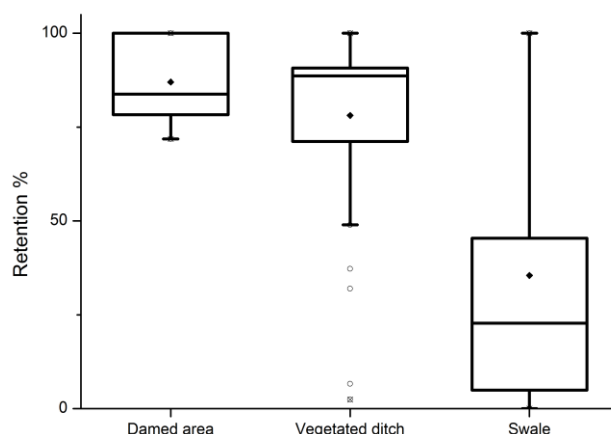
#### 6.1.2. Fossés végétalisés de Landau

##### 6.1.2.1. Site de démonstration sur le Krottenbach

L'aménagement du site de Landau est particulier. Le Krottenbach est un fossé de 1,7 km, qui a été renaturé et végétalisé (*vegetated ditch*) : *Phragmites australis*, *Typha sp.*, *Alnus glutinosa*, *Carex sp.* Un bassin de rétention végétalisé (*damed area*) a été construit en aval du Krottenbach. En parallèle, un autre fossé sinueux (*swale*) a été aménagé en sortie de drains, et

rejoint le Krottenbach. Les caractéristiques du site sont présentées en Annexe 2 pour une meilleure compréhension.

Le bassin versant du Krottenbach est essentiellement viticole et pomicole, les autres pratiques agricoles n'étant pas spécifiées. Les résultats sont présentés en différenciant les trois aménagements (FIGURE 17 : COMPARAISON DE LA RÉTENTION DES TROIS ZONES HUMIDES SUR LE KROTTENBACH).

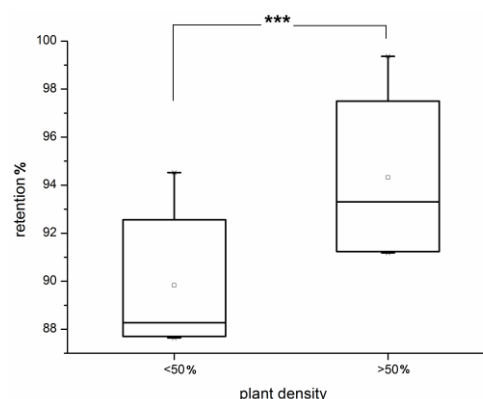


**Figure 17 : Comparaison de la rétention des trois zones humides sur le Krottenbach (Résultats du prototype Detention pond and vegetated ditch Krottenbach, ArtWet, 2011)**

On observe une diminution des concentration en pesticides dans les trois aménagements. La rétention du bassin végétalisé est la plus forte, avec un taux d'abattement de **87%**. Le fossé sinueux a un taux de rétention de **35%**, contre **78%** pour le fossé végétalisé du Krottenbach (ArtWet, 2011). On peut expliquer cet écart du fait que le fossé en sortie de drains soit directement soumis à des concentrations maximales en pesticides, qui limitent ainsi son efficacité. Par ailleurs, la taille de cet aménagement reste beaucoup plus faible. L'efficacité du fossé végétalisé et du bassin de rétention sont en revanche bien significatives.

#### 6.1.2.2. Site expérimental de Landau

Six fossés végétalisés expérimentaux ont été étudiés, avec des densités variables de macrophytes (*Elodea nuttallii*). L'efficacité de rétention des pesticides est présentée en fonction de la densité de végétaux (FIGURE 18 : EFFICACITÉ DE RÉTENTION SELON DIFFÉRENTES DENSITÉS DE *E. NUTTALLII*). Pour une densité inférieure à 50%, le taux de rétention est de **90%**. Pour une densité plus importante, il passe à **94%**. L'efficacité est ainsi très significative (ArtWet, 2011).

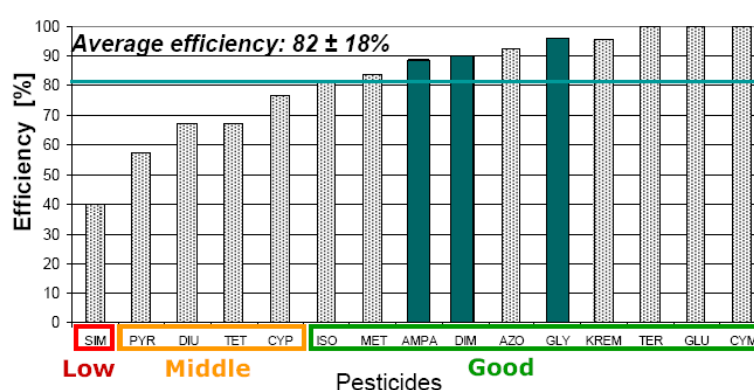


**Figure 18 : Efficacité de rétention selon différentes densités de *E. nuttallii* (Résultats du prototype Experimental vegetated ditches at Landau University, ArtWet, 2011)**

### 6.1.3. Bassin de rétention de Rouffach

Localisé en aval d'un bassin versant essentiellement dominé par la viticulture (près de 70% de l'occupation du sol), le bassin d'orage de Rouffach a fait l'objet d'un grand nombre d'études portant sur la rétention de 21 herbicides et fongicides. Les caractéristiques de l'ouvrage sont présentées en Annexe 3.

Les résultats montrent une réduction de  $76 \pm 19\%$  des concentrations de phytosanitaires, ainsi que  $82 \pm 18\%$  de la charge totale. Par ailleurs, on remarque une variabilité fonction de la nature des pesticides retenus par la zone humide : 38% de réduction pour la *simazine*, contre 100% pour le *cymoxanil* (FIGURE 19 : EFFICACITE DE REDUCTION DES CHARGES EN PHYTOSANITAIRES A ROUFFACH).



SIM: Simazine, PYR: Pyrimethanil, DIU: Diuron, TET: Terbutylazine, CYP: Cyprodinil, ISO: isoxaben, MET: Metalaxyl, AMPA: Aminomethylphosphonic acid, DIM: Dimethomorph, AZO: Azoxystrobin, GLY: Glyphosate, KREM: Kresoxim methyl, TER: Terbutylazin, GLU: Gluphosinate et CYM: Cymoxanil.

Figure 19 : Efficacité de réduction des charges en phytosanitaires à Rouffach (Résultats du prototype Waldweg storm basin Rouffach, ArtWet, 2011)

## 6.2. RESULTATS DES EXPERIMENTATIONS EUROPEENNES

Cette partie présente les résultats des études sur la rétention des phytosanitaires par les zones humides à l'échelle européenne (en dehors de ceux du projet ArtWet). Ceux-ci ont permis de mettre en avant la capacité épuratrice des zones humides vis-à-vis des pesticides.

GARON-BOUCHER et CHARNAY (1998) ont mis en évidence l'efficacité potentielle des fossés végétalisés dans la limitation de la contamination des eaux. L'étude a porté sur deux herbicides, le *DFF* et l'*IPU* (cf. 5.1.2. Etudes et publications européennes). Les résultats montrent un taux de récupération par les végétaux de **52%** pour le *DFF* et **93%** pour l'*IPU*.

MCKINLEY et KASPEREK (1999) ont étudié le devenir de l'*atrazine* au sein de systèmes plantés marécageux, dominés par *Phragmites australis*. L'efficacité de décontamination est avérée : après 53 jours de rétention, il n'y avait plus d'*atrazine* dans le système (MCKINLEY et KASPEREK, 1999 ; cités par BLUM, 2007).

GARCINUÑO *et al.* (2003) se sont intéressés à la capacité de dégradation des pesticides par les graines de végétaux (*L. angustifolius*) dans un système expérimental. Si l'on prend comme

exemple l'*atrazine*, plus de **80%** de ce composé a été bioaccumulé par les graines après seulement 5 jours. En outre, aucun résidu de pesticides n'a été observé après extraction des graines la semaine suivante (GARCINUÑO *et al.*, 2003 ; cités par BLUM, 2007).

Nonobstant des résultats portant sur la capacité des végétaux à dégrader les phytosanitaires, leur efficacité reste variable selon la nature des substances absorbées. En effet, MATAMOROS *et al.* (2006) ont étudié la dégradation du *diuron* dans une zone humide artificielle. Si la végétation a absorbé et accumulé une bonne partie du composé, sa dégradation a été quasi-nulle. Des études sur le glyphosate (HUNAULT, bassin d'orage de Rouffach, ArtWet, 2005) ont montré des résultats similaires, à savoir une faible efficacité des plantes à dégrader cette substance.

D'autres études ont porté de manière plus globale sur la dégradation des pesticides au niveau de la zone humide, telles que celle de GRUNEWALD *et al.* (2001). Après 5 mois de rétention dans un bassin réservoir, la totalité des charges en *glyphosate* et *AMPA* ont été adsorbées sur les sédiments, sans impact direct sur l'eau.

### 6.3. RESULTATS DES EXPERIMENTATIONS MONDIALES

Au même titre que la partie précédente, les résultats des études mondiales sur l'efficacité des zones humides sont présentés ci-dessous.

MIGLIORANZA *et al.* (2004) ont également mis en évidence la capacité d'absorption des pesticides par les végétaux (*S. californicus*). L'étude a porté sur les organochlorés, tels que le *DDT* et l'*endosulfan*.

SCHULZ *et al.* (2003) ont démontré l'importance de la végétation pour la réduction des phytosanitaires dans les zones humides artificielles. Une étude portant sur la toxicité du *méthyl parathion* auprès des communautés invertébrées a en effet croisé la contamination avec la présence ou l'absence de végétaux. Les résultats ont montré une plus grande toxicité du *MeP* auprès du macrobenthos dans les systèmes non-végétalisés.

SHERRARD *et al.* (2004) ont étudié la réduction du *chlorpyrifos* et du *chlorothalonil* dans des mésocosmes de zones humides artificielles. Les résultats ont montré respectivement pour ces deux composés des taux d'abattement de **98%** et **100%**.

MOORE *et al.* se sont intéressés aux capacités épuratoires de diverses zones humides artificielles, pour différents phytosanitaires. Une étude sur l'*atrazine* (MOORE *et al.*, 2000) a simulé le ruissellement agricole vers un mésocosme de zone humide artificielle, pour des concentrations variables. Pour une concentration en entrée de 73µg/L, le taux de réduction de l'*atrazine* était de **70** et **66%** (pour deux ZH). Pour des plus fortes concentrations en entrée, de 147µg/L, le taux de réduction était de **34** et **37%** (pour deux ZH). Une étude similaire sur le *metolachlore* (MOORE *et al.*, 2001) donne respectivement des taux de réduction de **48** et **83%** pour des concentrations en amont de 73 et 147µg/L. Une troisième étude portant sur le chlorpyrifos a donné respectivement des taux de réduction de **98** et **94%** pour des concentrations en amont de 73 et 733µg/L (MOORE *et al.*, 2002).

Une autre étude a porté sur la capacité des fossés végétalisés à épurer l'*atrazine* et la *lambda-cyhalothrine* (MOORE *et al.*, 2001). Il en ressort une réelle efficacité, fonction de la longueur de l'aménagement : le taux d'abattement est d'autant plus fort que la longueur du fossé est importante. Pour une distance de 0 m de la sortie de drain (amont du fossé), les teneurs en *atrazine* et *lambda-cyhalothrine* étaient respectivement de 67 et 0,5mg/L. Ces mêmes teneurs étaient respectivement de 1,2 et 0,04mg/L 45m en aval du fossé, et nulles après 50m. Un fossé végétalisé de 45 m est donc capable de réduire de **98%** et **92%** les concentrations en *atrazine* et *lambda-cyhalothrine*.

ROSE *et al.* (2006) ont démontré la capacité des macrophytes et des algues à réduire la résilience de quatre pesticides. Les taux de réduction observés étaient de **22 à 53%** pour la 1<sup>ère</sup> saison d'étude, contre **32 à 90%** pour la 2<sup>nde</sup> saison, les variations étant fonctions de la nature des phytosanitaires analysés.

Au regard de l'ensemble des résultats, qu'ils soient à l'échelle européenne ou mondiale, la capacité des zones humides à dégrader les phytosanitaires n'est plus à prouver. Par ailleurs, le rôle important de la végétation dans le processus de dégradation a été mis en évidence à plusieurs reprises. Il n'est de surcroît pas anodin de signaler que, la liste de ces études et publications n'étant pas exhaustive, l'efficacité de ces systèmes peut s'étendre à tout un ensemble de pesticides.

Les différents types de zones humides, naturelles ou artificielles, ont pour la plupart été étudiés : fossés végétalisés, ZH de type mares, bassins de rétention, etc. Le projet ArtWet a par ailleurs pour intérêt de combiner ces études au niveau expérimental et grandeur nature. L'efficacité des ZTHA, bien qu'elle reste à un niveau de recherche scientifique, apparaît ainsi beaucoup plus facilement exploitable dans un objectif concret et appliqué (démarches volontaires, programmes d'actions, etc.).

Il ressort également de ces résultats le constat suivant : l'efficacité d'une zone humide dans la rétention et la réduction des phytosanitaires dépend avant tout de la nature des ces derniers. En outre, le type de végétation (macrophytes, phragmites, algues, etc.) tient une place importante dans le processus de dégradation. La concentration en entrée de système joue également sur l'efficacité, bien qu'une fois encore elle reste dépendante du type de pesticide mis en jeu.

Ainsi, il découle de ces enseignements un certain nombre de perspectives quant à la mise en place de zones humides artificielles, dans l'objectif de la reconquête de la qualité de l'eau. La recherche scientifique doit faire place à des applications directes à des niveaux locaux. Toutefois, la mise en œuvre de ces aménagements répond à des aspects juridiques, économiques et sociaux qu'il convient de prendre en compte.

## 7. PERSPECTIVES DES ZONES HUMIDES AGRICOLES

### 7.1. BILAN, ENSEIGNEMENTS ET PERSPECTIVES DU PROJET ARTWET

Le projet ArtWet a eu pour ambition de répondre à un ensemble de questions d'ordre technique, relatives à la création de zones tampons humides artificielles : choix du dispositif, localisation dans le bassin versant, efficacité, conception, etc. Le type d'aménagement envisagé ne répond pas à une technicité particulière : un fossé végétalisé sera tout aussi efficace pour traiter des effluents viticoles que céréalicoles. Les aménagements sont adaptables et peuvent être combinés (ArtWet, 2010). Les critères de choix sont plutôt d'ordre fonciers. De plus, tout projet de création de ZTHA répond également à des questions d'ordre non technique : aspects financiers, juridiques et sociaux.

Un grand nombre d'études – thèses, mémoires – découlent de ArtWet, sur l'ensemble des sites expérimentaux et de démonstration en Europe. Un suivi de ces aménagements est toujours à l'œuvre, et les résultats ne sont à ce jour pas tous analysés. Ce constat est d'ailleurs une limite dans les perspectives d'un « après-ArtWet », car si l'efficacité de quelques aménagements a pu être mise en évidence, on se trouve aujourd'hui encore dans une phase de résultats. Par ailleurs, les applications de ce projet s'appuient sur des résultats encore très jeunes, et en sont donc à leur début.

A travers le développement de guides présentant les aspects techniques, ainsi que les aspects juridiques, économiques et sociaux, ArtWet permet de faciliter et d'accompagner la mise en œuvre d'aménagements ZTHA. Les caractéristiques de chaque type de ZH artificielle, leur rôle dans le processus de réduction des phytosanitaires et les aspects pratiques de leur mise en œuvre y sont détaillés. Ce projet LIFE Environnement n'a ainsi pas eu pour seule ambition de dresser et d'approfondir l'état des connaissances dans l'expérimentation des zones humides artificielles, et d'en optimiser le fonctionnement et l'efficacité. Les perspectives d'application sont réelles, et contribuent à faire de ArtWet un projet durable.

De nouveaux projets sont issus d'ArtWet, et commencent à se mettre en place (Site internet de ArtWet) :

- ✓ Projet Européen « PhytoRET. INTERREG IV » (2010-2013) : Potentiel régional Rhin supérieur – des ouvrages de rétention et de remédiation des produits phytosanitaires.
- ✓ Evaluation nationale du potentiel de réduction des flux de pesticides dans les eaux de surface par des ouvrages de rétention et de remédiation : projet « ENRHY ».
- ✓ Projet « CNRS-INSU VitiFLUX » (2011-2012) : Processus hydro-biogéochimiques régissant les transferts des résidus de produits phytosanitaires et du cuivre dans des ouvrages de rétention collectant les eaux de ruissellement provenant de bassins versants viticoles.
- ✓ OPERA : partage et développement des meilleures mesures et pratiques agri-environnementales dans le contexte de la législation européenne.



## 7.2. QUELLE ECHELLE D'APPLICATION ?

Si le projet ArtWet apparaît comme une base de travail intéressante pour la mise en œuvre de ZHTA, une limite se pose néanmoins au niveau de l'échelle d'application : ArtWet est-il applicable à une échelle plus globale ? En effet, les zones humides disposent avant tout d'une grande variabilité spatiale au niveau mondial, qui induit une variabilité en termes de climat (régimes hydrologiques, températures), de pédologie (types de sols, textures, pH, etc.), et donc tout simplement en terme de « nature de ZH ». Il apparaît de surcroît que les caractéristiques d'une zone humide influencent le processus de dégradation des pesticides : pour un même type de ZH, l'une située en Europe de l'ouest, l'autre en région tropicale ou boréale, l'efficacité de réduction d'un même polluant sera différente. On peut citer un certain nombre de variables à prendre en compte : quantité de matière organique, régime hydrologique, température, pH, nature des sédiments, nature de la végétation, luminosité, etc. Ainsi, il est difficile d'envisager une application du projet ArtWet à une échelle mondiale, mais bien à une échelle européenne. La mise en œuvre de tels aménagements pourrait ainsi être envisagée dans le cadre de programmes d'actions visant à la reconquête de la qualité de l'eau sur un bassin versant : Contrats Territoriaux de Bassins, SAGE, etc.

## 7.3. ASPECTS ECONOMIQUES DES ZHTA

### 7.3.1. Coût des ZHTA

La création de ZHTA s'articule autour d'un cadre réglementaire propre à chaque pays. En France, elle peut ainsi faire l'objet de procédures de déclaration ou d'autorisation, et donc nécessiter la mise en œuvre d'une étude d'impact ou d'incidence (ArtWet, 2010). Par ailleurs, elle a un certain coût, que l'on peut distinguer en cinq types de dépenses :

- ✓ **Acquisition foncière** : acquisition des terrains nécessaires à la construction et à l'accès à l'ouvrage (zone d'élevage ouest de la France : 3000€/ha ; nord de la France : 6000€/ha ; vignoble : jusqu'à 100 000€/ha).
- Le coût des terres agricoles variable selon les pays. L'acquisition foncière peut être de deux types : achat du terrain par le propriétaire du projet, ou achat par une association foncière. Le propriétaire peut toutefois autoriser l'aménagement du terrain (pas d'acquisition foncière).
- ✓ **Etudes préliminaires** : diagnostics de ruissellement (entre 4000 et 6000€ HT pour un BV de 100ha) ; conception de l'ouvrage (1500 à 2500€ HT selon le type d'ouvrage) ; dossier réglementaire (2000 à 5000€ HT) ; sensibilisation (coût variable selon structure porteuse, public concerné, durée, etc.) ;
- ✓ **Travaux et aménagement du sol** : coût des travaux (FIGURE 20 : COUT DES TRAVAUX PAR TYPES DE DISPOSITIFS) ;
- ✓ **Entretien du dispositif** (curage : 2 à 5€/m<sup>3</sup> pour une ZH naturelle, 12 à 14€/m<sup>3</sup> pour un bassin d'orage ; fauche : 35 à 80€ pour un fossé végétalisé ; entretien des plantations : 2 à 4€/km) ;

- ✓ **Suivi du dispositif** : contrôle d'efficacité de l'aménagement (analyses ponctuelles et régulières).

Coûts de réalisation	Coût (€ hors TVA)	
	mini	maxi
<b>Bassin de rétention</b>		
Travaux de terrassement (curage)	10 €/m <sup>3</sup>	15 €/m <sup>3</sup>
Imperméabilisation (installation d'une couche de PVC ou d'argile)	45 €/m <sup>2</sup>	60 €/m <sup>2</sup>
Construction du système de sortie assurant la vidange de l'ouvrage (cloison, conduite)	650 €/unité	800 €/unité
Engazonnement (approvisionnement en semences et ensemencement)	0,5 €/m <sup>2</sup>	1 €/m <sup>2</sup>
Plantation d'arbres (approvisionnement en plants, plantation et protection)	15 €/plant	20 €/plant
Plantation d'hélophytes (approvisionnement en plantes et plantation)	25 €/m <sup>2</sup>	30 €/m <sup>2</sup>
<b>Bassin d'orage</b>		
Construction d'un bassin d'orage	35 €/m <sup>3</sup>	60 €/m <sup>3</sup>
Curage de l'ouvrage existant	10 €/m <sup>3</sup>	15 €/m <sup>3</sup>
Installation de gabions	300 €/ml	400 €/ml
Installation des drains sous le lit de sable filtrant	20 €/ml	30 €/ml
Approvisionnement en sable/graviers pour le lit de sable/gravier	5 €/m <sup>3</sup>	10 €/m <sup>3</sup>
Plantation d'hélophytes (approvisionnement en plantes et plantation)	25 €/m <sup>2</sup>	30 €/m <sup>2</sup>
<b>Fossé végétalisé</b>		
Travaux de terrassement (défrichage, curage)	10 €/ml	15 €/ml
Engazonnement (approvisionnement en semences et ensemencement)	0,5 €/m <sup>2</sup>	1 €/m <sup>2</sup>
Plantation de haies	1,83 €/ml	2,44 €/ml
Travail de la terre (labour, ensemencement)	30 €/ha	180 €/ha
<b>Bioréacteur</b>		
Construction d'une cuve enterrée en béton (travaux de terrassement, béton ...)	400 €/m <sup>3</sup>	700 €/m <sup>3</sup>
Approvisionnement en terre et paille	15 €/m <sup>3</sup>	20 €/m <sup>3</sup>
Sécurisation de la cuve (barrières et recouvrement de la cuve)	6 €/m <sup>2</sup>	10 €/m <sup>2</sup>

*Figure 20 : Coût des travaux par types de dispositifs (ArtWet, 2010)*

Si chaque zone humide artificielle est unique et nécessite une étude à sa mise en place, on peut évaluer de manière grossière le coût d'un dispositif, pour une même taille de bassin versant (FIGURE 21 : EXEMPLES DE COUTS DE ZONES HUMIDES ARTIFICIELLES).

Type de dispositif	Bassin versant de 50 ha	
	Taille de l'ouvrage	Coût de l'ouvrage
Aménagement d'un bassin d'orage	700 m <sup>3</sup> (superficie : 200 m <sup>2</sup> )	12000 € (terrassement : 5000 €, installation de dessablage et gabions : 4000 €, plantation d'hélophytes : 3000 €)
Bassin de rétention	1200 m <sup>3</sup> (superficie : 800 m <sup>2</sup> et profondeur : 1.5m)	9600 € (terrassement : 5400 €, système d'exutoire : 800 €, plantation d'hélophytes sur la partie immergée et engazonnement partout ailleurs : 3400 €)
Fossé végétalisé	250 m	2250 € (terrassement : 2200 €, engazonnement : 250 €)
Zone de rétention en forêt	3200 m <sup>2</sup> avec rigole d'alimentation de 80 m	920 € (terrassement : 840 €, engazonnement : 80 €)

*Figure 21 : Exemples de coûts de zones humides artificielles (ArtWet, 2010)*

### 7.3.2. Stratégie de localisation

La mise en place d'une zone humide artificielle impose une certaine emprise agricole, et de ce fait nécessite une interrogation quant au choix de son emplacement. Tout d'abord, il est intéressant d'envisager l'intégration de l'aménagement dans les Surfaces Equivalentes Topographiques<sup>2</sup> (SET), en tant qu'« élément naturel ».

<sup>2</sup> SET : Surfaces naturelles (haies, étangs, zones boisées, etc.) que les exploitants agricoles sont tenus de conserver au sein de leur exploitation, dans le cadre des bonnes pratiques agricoles entrant dans les conditions d'obtention des aides accordées par la PAC (ArtWet, 2010).

Les bandes enherbées peuvent ainsi être utilisées pour la conception de fossés végétalisés, afin de recueillir les eaux de drainage.

Si cette condition ne peut être envisagée, il convient de choisir les terres les moins productives (zones humides, friches, zones ombragées, etc.) ou les moins accessibles, en extrémité de parcelle par exemple (ArtWet, 2010). Par ailleurs, il est possible de réaménager des systèmes existants dans un objectif tout autre (bassin d'orage en prévention des inondations par exemple), et de le combiner avec une fonction de traitement des eaux. Toutefois, de tels aménagements ne s'observent pas au niveau du parcellaire agricole, mais à une échelle beaucoup plus vaste (bas de versant, etc.).

### 7.3.3. Evaluation du manque à gagner

Lorsqu'elle génère une emprise agricole, la zone humide artificielle entraîne une perte de rendement et donc de profit pour l'exploitant agricole. Cette dernière peut être évaluée à partir d'une étude de l'INRA portant sur la perte de profit engendrée par la mise en place de bandes enherbées sur des terres initialement exploitées (UMR Biologie et Gestion des Adventices, 2009). Le tableau suivant présente une estimation des pertes engendrées par la mise en œuvre et l'entretien de bandes enherbées (assimilables en terme d'emprise à une ZTHA) selon le type de culture (TABLEAU 7 : ESTIMATION DE LA PERTE DE PROFIT SUIVANT LE TYPE DE CULTURE).

*Tableau 7 : Estimation de la perte de profit suivant le type de culture (d'après Artwet, 2010)*

Culture	Herbe	Blé	Maïs
Mise en oeuvre (€/ha)	229	321	788
Entretien (€/ha)	229	223	370
<b>Coûts calculés sur 4 ans (€/ha)</b>	<b>229</b>	<b>247</b>	<b>474</b>

### 7.3.4. Financements des projets

Les subventions accordées aux exploitants agricoles en Europe sont soumises aux conditions de la PAC (Politique Agricole Commune). Celle-ci est financée par le FEADER (Fond Européen Agricole pour le Développement Rural) et s'applique différemment suivant les pays. En France, le PDRH (Programme de Développement Rural Hexagonal) est le document de référence en termes d'aides et de mesures envisagées pour remplir les objectifs fixés par la PAC (ArtWet, 2010).

Le PDRH décline ses mesures en deux catégories : des mesures nationales et des volets régionaux destinés à répondre aux enjeux locaux (Site internet du Ministère de l'Agriculture). Il s'articule en trois axes, dans un objectif de réduction de l'impact de l'agriculture sur l'environnement. Les MAEt (Mesures Agroenvironnementales Territorialisées) entrent comme mesures de l'Axe 2 du PDRH. Les dispositifs ArtWet peuvent prétendre à quatre types de MAEt : (1) mise en oeuvre et entretien d'un couvert herbacé ; (2) entretien mécanique des chemins ; (3) entretien des fossés et rigoles de drainage et d'irrigation, des fossés et canaux en marais ; (4) restauration et entretien des mares (ArtWet, 2010).

Les montants maximums d'aide sont de : (1) 158€/ha de couverture végétale ; (2) 0,1€/m de haie ; (3) 2,84€/m de fossé ; (4) 135€/marais.

#### **7.4. PERSPECTIVES ET APPLICATIONS LOCALES**

Comme il a été énoncé précédemment, la recherche expérimentale commence aujourd'hui à laisser place à des programmes d'actions visant, à travers la mise en place de zones humides artificielles, à la reconquête de la qualité de l'eau. Si ces applications demeurent limitées, les expérimentations étant encore pour la plupart à la phase de résultats, on peut citer quelques projets mis en œuvre sur le territoire national.

##### **7.4.1. Nouveaux programmes expérimentaux**

L'Agence de l'eau Rhin-Meuse encourage la création de zones tampons humides artificielles en sortie de réseau de drainage, en complément d'une gestion raisonnée en amont des parcelles agricoles. Elle finance ainsi un programme expérimental porté par la Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine, en collaboration avec l'INRA de Mirecourt (88). Dans le cadre de ce programme, des dispositifs de type fossés et mares ont été créés sur quatre exploitations agricoles en 2010, et quatre dispositifs devraient être mis en place en 2011.

- ✓ Système de fossé large avec une zone préférentielle de stagnation ;
- ✓ Système de fossé à étage ;
- ✓ Système de fossé aménagé ;
- ✓ Système surfacique constitué d'une mare prolongée par un bras annexe.

Si des suivis sont en cours depuis la première année, aucun résultat n'est à ce jour formalisé (Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2011). Une description plus détaillée de ces sites est disponible en Annexe 4.

##### **7.4.2. Applications locales**

Des cas concrets hors programme de recherche se mettent également en place, au sein de travaux de restauration de cours d'eau, ou dans une démarche agricole spontanée. Deux applications locales sont ici présentées à titre d'exemple.

###### *7.4.2.1. Restauration de cours d'eau*

Sur le bassin Rhin-Meuse, le CPIE de Bonzée-Côtes de Meuse a travaillé sur la diversification d'un petit cours d'eau dégradé de plaine, le Moutru, avec la ferme expérimentale d'Arvalis à Saint-Hilaire-en-Woëvre (55). Une partie des travaux de restauration a consisté à aménager des zones de décantation pour recueillir les drains agricoles ou les fossés :

- ✓ Fossé de recueil des eaux de chaussée et de drains agricoles ;
- ✓ Petits bassins de décantation plantés d'hélophytes recueillant les eaux de drainage.

La création de ces zones humides artificielles n'a fait pour le moment l'objet d'aucun suivi (Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2011). L'Annexe 5 illustre les aménagements mis en place.

#### 7.4.2.2. *Retenue de stockage des eaux de drainage*

Sur un affluent de l'Orgeval (Ru de Bourgogne), un dispositif préventif vis-à-vis de la pollution des eaux superficielles par les rejets de drainage a été mis en place, à l'initiative de l'exploitant agricole. Elle répond à une volonté de réduction des impacts du drainage, et de limitation des prélèvements sur la ressource en eau souterraine (Site internet de l'OMER, 2011). Une retenue de stockage à objectifs divers (réserve d'eau pour l'irrigation ; limitation des rejets quantitatifs d'eau de drainage dans le ru ; limitation des rejets de nitrates et phytosanitaires dans le ru ; amélioration de la qualité des eaux rejetées dans le cours d'eau) a ainsi été aménagée.

Le CEMAGREF est chargé de l'instrumentation, du suivi et de l'évaluation du dispositif. L'efficacité de l'aménagement en terme de réduction de la pollution phytosanitaire est en cours. L'Annexe 6 présente de manière plus détaillée les aménagements.

Des initiatives de ce genre restent à ce jour limitées, et très peu diffusées. C'est pourquoi l'exhaustivité de ces applications ne peut être assurée, bien qu'elle tendent à se développer. L'Agence de l'eau Rhin-Meuse apparaît bien impliquée dans la mise en place de tels dispositifs, et il ne serait pas étonnant que l'aménagement de zones humides agricoles se développe rapidement sur le reste du territoire. Les Zones Ateliers, telles que celle de Plaine & Val de Sèvre par exemple, pourraient en être le moteur, à travers des axes de recherche centrés sur la diminution de l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement.

Quelques projets d'extension de sites expérimentaux, tels que la zone humide artificielle de Loches-Montrésor, sont à l'étude. Des initiatives locales du même type que celle en Bourgogne pourraient être menées en Aquitaine près de Bordeaux, mais aucune information précise n'a pu être acquise. Aujourd'hui, il est encore trop tôt pour envisager l'extension des ZTHA dans un objectif non scientifique. Cependant, ces aménagements ne peuvent être qu'un atout pour l'amélioration de la qualité des eaux, et à ce titre doivent être pris en compte dans une gestion équilibrée de la ressource en eau.

## CONCLUSION

La reconquête de la qualité de l'eau à l'échelle d'un bassin versant peut être envisagée à travers la création de zones tampons humides artificielles. La recherche scientifique a en effet démontré l'efficacité de ces aménagements vis-à-vis de la réduction des pollutions phytosanitaires, qui se base sur le rôle épurateur naturel des zones humides. Les dispositifs existants tels que les bandes enherbées présentent des limites, car sont court-circuités par le drainage. Les zones humides sont donc une mesure curative tout à fait intéressante, à condition de travailler en amont à la mise en œuvre de mesures préventives.

La variabilité des types de ZTHA – mares, fossés, bassins, etc. – permet une bonne adaptation aux situations locales. Le projet LIFE ArtWet a eu pour objectif l'étude de ces dispositifs, dans le but de les optimiser et de faciliter leur application à des niveaux locaux. Des expérimentations grandeur nature ont ainsi été conçues et suivies en Europe, et ont mis en évidence l'efficacité de ces dispositifs dans le traitement des pesticides. ArtWet a également développé en parallèle des guides techniques et non techniques traitant des aspects juridiques, économiques et sociaux de la conception des ZTHA. Cette dernière a en effet un coût, direct vis-à-vis des travaux, de l'entretien et du suivi des aménagements, et indirect vis-à-vis du manque à gagner qu'ils génèrent. Toutefois, ces dispositifs peuvent prétendre à des subventions en tant que mesures agroenvironnementales territorialisées.

Aujourd'hui, les résultats de ces expérimentations ne sont pas encore tous connus, ce qui explique la faiblesse des démarches locales de conception de ZTHA, qu'elles soient volontaires (exploitants) ou intégrées à des programmes d'actions ou des travaux de restauration. Par ailleurs, de nouveaux dispositifs expérimentaux sont mis en place par les Agences de l'eau par exemple, en partenariat avec des organismes de recherche scientifique. Les applications concrètes en dehors de la recherche sont ainsi rares, mais ne peuvent que tendre à se développer, au regard des résultats probants sur l'efficacité des zones humides artificielles à réduire les transferts de pesticides dans les cours d'eau.



## BIBLIOGRAPHIE

### Articles, ouvrages, thèses ou mémoires, compte rendus de congrès

**ARHEIMER B. et al., 2004.** *Landscape planning to reduce eutrophication: agricultural practices and constructed wetlands* – Landscape and Urban Planning, Volume 67, n°1-4, 205-215, 11 pp.

**ARLOT M. P., 1989.** Caractérisation et limitation de l'impact du drainage agricole sur la *qualité des eaux* – CEMAGREF, Mission « Eau-Nitrates », 3 fascicules, 170 pp.

**BIDOIS J., 1999.** *Aménagement de zones humides ripariennes pour la reconquête de la qualité de l'eau. Expérimentation et modélisation* – Mémoire de thèse, Unité Mixte de Recherche INRA-ENSAR Sol Agronomie de Rennes-Quimper, 1999, 263 pp.

**BLANKENBERG A.-G.B. et al., 2007.** *Pesticide retention in an experimental wetland treating non-point source pollution from agriculture runoff* – Water Science & Technology, Volume 55 n°3, 37-44, 8 pp.

**BLUM J., 2007.** *Etablissement d'un bilan hydro-bio-chimique vis-à-vis du traitement du glyphosate et du diuron par une zone humide artificielle : mise en évidence de nouvelles fonctionnalités. Application au bassin d'orage du Waldweg, Rouffach, France, premiers résultats* – Mémoire professionnel (niveau M), Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg.

**BORIN M. et al., 2003.** *Effectiveness of buffer strips in removing pollutants in runoff from a cultivated field in North-East Italy* – in Science Direct, Agriculture, Ecosystems and Environment, Volume 105, 2005, 101-114, 14 pp.

**BORIN M. et al., 2003.** *Performance of a narrow buffer strip in abating agricultural pollutants in the shallow subsurface water flux* – in Science Direct, Environmental Pollution, Volume 131, 2004, 313-321, 9 pp.

**BORIN M. et al., 2008.** *Multiple functions of buffer strips in farming areas* – in Science Direct, European Journal of Agronomy, Volume 32, 2009, 103-111, 9 pp.

**BOULDIN J.L. et al., 2004.** *Vegetative and structural characteristics of agricultural drainage in the Mississippi Delta landscapes* – Environmental Pollution, Volume 132, n°3, 403-411 ; 8 pp.

**BRASKERUD B.C., HAARSTAD K., 2003.** *Screening the retention of thirteen pesticides in a small constructed wetland* – Water Science & Technology, Volume 48 n°5, 267-274, 8 pp.

**CARON E. et al., 2007.** *Quantification des pertes d'herbicides par ruissellement de surface et par infiltration dans des dispositifs tampons ; enherbés et enherbés + arborés* – in Pesticides : Impacts environnementaux, gestion et traitements. Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, Paris, 153-163, 10 pp.

**CARON E., 2006.** Effet des bandes végétales enherbées et enherbées + arborées sur le transport d'herbicides dans le ruissellement et le drainage – Mémoire de thèse, Université du Québec, Centre Eau, Terre et Environnement, 215 pp.

**CHARNAY L., 1998.** *Etude de la capacité de rétention des produits phytosanitaires par les fossés – rôle des sédiments* – Rapport de DEA, Université Claude Bernard, Lyon I, 54 pp.

**COURBIS C., 2006.** *Evaluation des potentialités de transferts des pesticides vers les eaux de surface. Apports et limites d'un modèle parcellaire* – Mémoire professionnel (niveau M), Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg.

**DE SNOO G.R., DE WIT P.J., 1996.** *Buffer zones for reducing pesticide drift to ditches and risks to aquatic organisms* – Centre of Environmental Science, Leiden University, Netherland – Ecotoxicology and environmental safety, Volume 41, Environmental research section B, 1998, 112-118, 7 pp.

**DOMANGE N., 2001.** *Diagnostic et possibilités d'aménagement d'un petit bassin versant viticole pour la lutte contre la contamination par les produits phytosanitaires* – Rapport de stage, Cemagref de Lyon, ENGEES, ULP.

**DUNINGAN E., MCINTOSH T., 1971.** *Atrazine soil organic matter interactions* – Weed Science, Volume 19, 279-282, 4 pp.

**ELSEVIER B.V., 2005.** *Purification processes, ecological functions, planning and design of riparian buffer zones in agricultural watersheds* – in Science Direct, Editorial of Ecological Engineering, Volume 24, 2005, 421-432, 12 pp.

**GARCINUÑO R.M. et al., 2003.** *Evaluation of pesticide uptake by Lupinus seeds* – Water Research, Volume 37, n°14, 3481-3489, 9 pp.

**GARON-BOUCHER C., 1998.** *Rétention des produits phytosanitaires par les végétaux des fossés : mises au point analytiques et expérimentations de terrain* – Rapport de DEA, Université Claude Bernard, Lyon I, 43 pp.

**GREGOIRE C. et al., 2007.** *Treatment of runoff waters and sediments from vineyard origin polycontaminated by herbicides (glyphosate and diuron) and copper: constructed wetland design based on bioaugmentation-phytoremediation coupling* – 2nd International Symposium on Wetland Pollutant Dynamics and Control (WETPOL), 16-20 september 2007, Tartu (Estonia), 2 pp.

**GREGOIRE C. et al., 2008.** *Mitigation of agriculture nonpoint-source pesticide pollution in artificial wetland ecosystems* – Environmental Chemical Letters, Volume 7, Number 3, 205-231 pp.

**GRUNEWALD K. et al., 2001.** *Behavior of Glyphosate and aminomethylphosphonic acid (AMPA) in soils and water of reservoir Radeburg II catchment (Saxony/Germany)* – Journal of Plant Nutrition and Soil Science, Volume 164, n°1, 65-70, 6 pp.

**HAARSTAD K., BRASKERUD B.C., 2005.** *Pesticide retention in the watershed and in a small constructed wetland treating diffuse pollution* – Water Science & Technology, Volume 51 n°3-4, 143-150, 8 pp.

**HUNAUT M., 2005.** *Influence des bassins d'orage sur le transfert de pesticides et possibilités de traitement. Cas du bassin d'orage de Rouffach (68).* Mémoire de fin d'étude, ENGEES, 83 pp.

**KHADIJA E.M et al., 2008.** *Les pesticides* – Laboratoire national de Métrologie et d'Essais, 2008, Paris, 15 pp.

**LARSON A.C. et al., 2000.** *The role of seepage in constructed wetlands receiving agricultural tile drainage* – Ecological Engineering, Volume 15, n°1-2, 91-104, 14 pp.

**LAURANS Y. et al., 1996.** *Les services rendus par les zones humides à la gestion des eaux : Evaluation économique sur le bassin Seine-Normandie* – Agence de l'eau Seine-Normandie, 100 pp.

**LE FILLEUL J.M., 2000.** *Typologie de fossés : analyse des processus de collecte, de transfert, et de rétention-dégradation des produits phytosanitaires. Application au sous bassin versant amont du Cétrais* – DEA Géographie, Sociétés et Aménagement du Territoire, Université d'Angers, 112 pp.

**LE FILLEUL J.M., 2001.** *Transferts hydriques d'éléments minéraux et de phytosanitaires en sols agricoles* – Rapport de stage, CEMAGREF, Chambre de l'Agriculture pays de la Loire, 45 pp.

**LOVELL S.T., SULLIVAN W.C., 2005.** *Environmental benefits of conservation buffers in the United States : evidence, promise, and open questions* – in Science Direct, Agriculture, Ecosystems and Environment, Volume 112, 2006, 249-260, 12 pp.

**LUCAS N., 2009.** *Statut juridique des zones humides artificielles dans leur fonction de remédiation des produits phytosanitaires : de la définition scientifique du concept à la nécessité d'adaptation locale* – Mémoire professionnel (niveau M), Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg.

**LUCKEYDOO et al., 2000.** *Early development of vascular vegetation of constructed wetlands in northwest Ohio receiving agricultural waters* – Agriculture, Ecosystems & Environment, Volume 88, n°1, 89-94, 6 pp.

**MANDER Ü. et al., 1997.** *Efficiency and dimensioning of riparian buffer zones in agricultural catchments* – Institute of Geography, University of Tartu, Estonia – Ecological Engineering, Volume 8, 1997, 299-324, 26 pp.

**MARGOUM C., 2003.** *Contribution à l'étude du devenir des produits phytosanitaires lors d'écoulements dans les fossés : caractérisation physico-chimique et hydrodynamique* – Doctorat Environnement et Santé, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 243 pp.

**MATAMOROS V. et al., 2006.** *Behavior of selected framework EU directive priority pollutants in subsurface flow constructed wetlands* – In 10th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Lisbonne, 559-565, 7 pp.

**MCKINLEY R.G., KASPEREK K., 1998.** *Observations on contamination of herbicide pollutes water by marsh plant systems* – Water Research, Volume 33, n°2, 505-511, 7 pp.

**MIGLIORANZA K.S.B. et al., 2004.** *Organochlorine pesticides sequestered in the aquatic macrophyte *Schoenoplectus californicus* (C.A. Meyer) Soják from a shallow lake in Argentina* – Water Research, Volume 38, n°7, 1765-1772, 8 pp.

**MOORE M.T. et al., 2000.** *Constructed wetland for mitigation of atrazine-associated agricultural runoff* – Environmental Pollution, Volume 110, n°3, 393-399, 7 pp.

**MOORE M.T. et al., 2001.** *Mitigation of metolachlor-associated agricultural runoff using constructed wetlands in Mississippi, USA* – Agriculture, Ecosystems & Environment, Volume 84, n°2, 169-176, 8 pp.

**MOORE M.T. et al., 2001.** *Transport and fate of atrazine and lambda-cyhalothrin in an agricultural drainage ditch in the Mississippi Delta, USA* – Agriculture, Ecosystems & Environment, Volume 87, n°3, 309-314, 6 pp.

**MOORE M.T. et al., 2002.** *Mitigation of chlorpyrifos runoff using constructed wetlands* – Chemosphere, Volume 46, n°6, 827-835, 9 pp.

**OTTO S. et al., 2007.** *Effect of a full-grown vegetative filter strip on herbicide runoff : Maintaining of filter capacity over time* – in Science Direct, Chemosphere, Volume 71, 2008, 74-82, 9 pp.

**PASSEPORT E., 2010.** *Efficiency of an artificial wetland and a forest buffer for pesticide pollution mitigation in a tile-drained agricultural watershed* – Mémoire de thèse, AgroParisTech, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement, 280 pp.

**ROSE M.T. et al., 2006.** *Pesticide removal from cotton farm tailwater by a pilot-scale ponded wetland* – Chemosphere, Volume 63, n°11, 1849-1858, 10 pp.

**SAC E. et al., 2008.** *Aménager des zones humides pour épurer les eaux agricoles : quels enseignements tirer de l'existant ?* – Programme PIREN-Seine, Cemagref Antony, 2008, 26 pp.

**SAC E., 2007.** *La création de zones humides artificielles : un outil pour la réduction des effets polluants des réseaux de drainage agricole ?* – Institut National de Recherche Agronomique Mirecourt, 2007, 138 pp.

**SCHULTZ R., PEALL S.K.C., 2001.** *Effectiveness of a constructed wetland for retention of nonpoint-source pesticide pollution in the Lourens River Catchment, South Africa* – Environmental Science & Technology, Volume 35, 422-426, 5 pp.

**SCHULZ R. et al., 2003.** *Methyl-parathion toxicity in vegetated and non-vegetated wetland mesocosms* – Environmental Toxicology & Chemistry, Volume 22, 1262-1268, 7 pp.

**SHERRARD R.M. et al., 2004.** *Feasibility of constructed wetlands for removing chlorothalonil and chlorpyrifos from aqueous mixtures* – Environmental Pollution, Volume 127, n°3, 385-394, 10 pp.

**SIEBER S. et al., 2008.** *Modelling pesticide risk: A marginal cost-benefit analysis of an environmental buffer-zone programme* – in Science Direct, Land Use Policy, Volume 27, 2010, 653-661, 9 pp.

**SYVERSEN N., BECHMANN M., 2003.** *Vegetative buffer zones as pesticide filters for simulated surface runoff* – in Science Direct, Ecological Engineering, Volume 22, 2004, 175-184, 10 pp.

**TOURNEBIZE J. et al., 2010.** *Lessons gained from french R&D programs for pesticides dissipation by use of constructed wetlands* – American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan, 2010. (Presented at ASABE's 9th International Drainage Symposium).

**TURPIN N. et al., 1997.** *Transfert des nutriments des sols vers les eaux. Influence des pratiques agricoles* – Ingénieries – EAT, n°11, 3-16, 14 pp.

**WEAVER M.A. et al., 2004.** *Laboratory assessment of atrazine and fluometuron degradation in soils from a constructed wetland* – Chemosphere, Volume 57, n°8, 853-862, 10 pp.

## Documents techniques

**Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2002.** *Mission de contrôle de travaux de restauration de cours d'eau. Ruisseau du Moutru à Saint-Hilaire-en-Woëvre (55)* – 10 pp.

**ArtWet, 2010.** *Bassin de rétention de Rouffach (France)* – Résultats du prototype, 6 pp. [téléchargeable sur le site internet de ArtWet]  
Disponible à l'adresse suivante : <[http://coursenligne.u-strasbg.fr/depotcel/DepotCel/592/prototypes/prototypes\\_Rouffach\\_dec\\_2010.pdf](http://coursenligne.u-strasbg.fr/depotcel/DepotCel/592/prototypes/prototypes_Rouffach_dec_2010.pdf)>

**ArtWet, 2010.** *Bassin de rétention et fossé végétalisé sur le Krottenbach (Allemagne)* – Résultats du prototype, 3 pp. [téléchargeable sur le site internet de ArtWet]

Disponible à l'adresse suivante : <[http://coursenligne.u-strasbg.fr/depotcel/DepotCel/592/prototypes/proto\\_Krottenbach.pdf](http://coursenligne.u-strasbg.fr/depotcel/DepotCel/592/prototypes/proto_Krottenbach.pdf)>

**ArtWet, 2010.** *Fossés végétalisés expérimentaux de Laudau (Allemagne) – Résultats du prototype*, 3 pp. [téléchargeable sur le site internet de ArtWet]

Disponible à l'adresse suivante : <[http://coursenligne.u-strasbg.fr/depotcel/DepotCel/592/prototypes/proto\\_Landau.pdf](http://coursenligne.u-strasbg.fr/depotcel/DepotCel/592/prototypes/proto_Landau.pdf)>

**ArtWet, 2010.** *Réduction de la pollution diffuse due aux produits phytosanitaires et bioremédiation dans les zones humides artificielles. Guide d'accompagnement à la mise en œuvre. Aspects techniques* – ARTWET, Programme LIFE Environment 2006-2010, 76 pp.

**ArtWet, 2010.** *Réduction de la pollution diffuse due aux produits phytosanitaires et bioremédiation dans les ouvrages de rétention. Guide d'accompagnement à la mise en œuvre. Aspects juridiques, économiques et sociaux* – ARTWET, Programme LIFE Environment 2006-2010, 76 pp.

**ArtWet, 2010.** *Zone humide artificielle de Loches (France) – Résultats du prototype*, 8 pp. [téléchargeable sur le site internet de ArtWet]

Disponible à l'adresse suivante : <[http://coursenligne.u-strasbg.fr/depotcel/DepotCel/592/prototypes/proto\\_wetland\\_loches.pdf](http://coursenligne.u-strasbg.fr/depotcel/DepotCel/592/prototypes/proto_wetland_loches.pdf)>

**ArtWet, 2010.** *Zone humide artificielle forestière de Loches (France) – Résultats du prototype*, 4 pp. [téléchargeable sur le site internet de ArtWet]

Disponible à l'adresse suivante : <[http://coursenligne.u-strasbg.fr/depotcel/DepotCel/592/prototypes/proto\\_foret\\_loches.pdf](http://coursenligne.u-strasbg.fr/depotcel/DepotCel/592/prototypes/proto_foret_loches.pdf)>

**AUBERTOT J.N. et al., 2005.** *Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux.* Rapport d'Expertise scientifique collective, INRA et Cemagref (France), 722 pp.

**Commissariat Général au Développement Durable, 2010.** *Evaluation économique des services rendus par les zones humides* – Collection Etudes et documents du Service de l'Economie, de l'Evaluation et de l'Intégration du Développement Durable, 52 pp.

**DUTILLEUL C. et al., 2003.** *Avez-vous une mare près de chez vous ?* – Manuel explicatif, Pôle-relais mares et mouillères de France, 18 pp.

**TOURNEBIZE J. et al., 2006.** *Traitement rustique des eaux agricoles*, Rapport d'avancement 2006 – A.O. Maîtrises TRUST-EA, CEMAGREF Antony, 54 pp.

**Zones Humides Infos, 2010.** *Les zones humides urbaines et périurbaines* – Société nationale de protection de la nature, n°68, 2<sup>ème</sup> trimestre 2010, 32 pp.

## Documents électroniques

**Agence de l'eau Rhin-Meuse.** *Aménagements des exutoires de drains* [en ligne] – Fiche technique n°8 – 2010 [consulté de septembre 2010 à février 2011]

<<http://www.eau-rhin-meuse.fr/tlch/emissaires%20agricoles/FT8%20amenagement%20des%20exutoires%20de%20drains.pdf>>

**Agence de l'eau Rhin-Meuse.** *Aménagements de dispositifs rustiques de filtration des eaux de drainage* [en ligne] – Journée Technique « Hydromorphologie » – 2010 [consulté de septembre 2010 à février 2011]

<[www.eau-rhin-meuse.fr/.../3%20Amenagement%20drains%20agricoles.pdf](http://www.eau-rhin-meuse.fr/.../3%20Amenagement%20drains%20agricoles.pdf)>

**PASSEPORT E.** *Eaux de drainage et pesticides : efficacité de deux zones tampons humides artificielles* [en ligne] – Séminaire ArtWet, CEMAGREF Antony – Juin 2010 [consulté d'octobre 2010 à mars 2011]

<<https://omer.cemagref.fr/methodes/etape-1-identification-des-elements-de-contexte/les-solutions-possibles/zones-tampons/8-Seminaire%20Artwet%20resultats%20de%20Bray.pdf> >

## Ressources internet

### **ArtWet**

*Bioremediation des pesticides en zones humides naturelles* [consulté de septembre 2010 à mars 2011]

<http://coursenligne.u-strasbg.fr/pages.jsp?idsite=592>

### **CEMAGREF**

*Etudes et recherches sur le traitement des pesticides par les zones humides artificielles* [consulté de septembre 2010 à mars 2011]

<http://www.cemagref.fr>

### **Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques**

*Familles et groupes de substances phytosanitaires prioritaires au titre de la Directive Cadre sur l'Eau de 2000* [consulté en janvier 2011]

<http://www.ineris.fr>

### **Observatoire de Résidus de Pesticides**

*Législation relative aux produits phytosanitaires* [consulté en janvier 2011]

<http://www.observatoire-pesticides.gouv.fr>

### **Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement**

*Législation relative aux produits phytosanitaires* [consulté en janvier 2011]

<http://www.developpement-durable.gouv.fr>

### **Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du Territoire**

*Législation relative aux produits phytosanitaires* [consulté en janvier 2011]

*Programme de Développement Rural Hexagonal* [consulté de février à mars 2011]

*Mesures Agro-Environnementales Territorialisées* [consulté de février à mars 2011]

<http://agriculture.gouv.fr>

### **PhytoRET INTERREG IV**

*Potentiel des zones humides artificielles du Rhin Supérieur pour la réduction des produits phytosanitaires* [consulté en mars 2011]

<http://www.phytoret.eu>

### **OPERA**

*Sharing and developing of the best practices in agri-environmental measures in the context of European legislation* [consulté en mars 2011]

<http://www.opera-indicators.eu/eng/home.html>

### **Ouvrages de Maîtrise des Ecoulements en milieu Rural**

*Aménagements de zones humides artificielles en milieu agricole* [consulté de février à mars 2011]

<https://omer.cemagref.fr/>

# TABLE DES MATIERES

<b>SOMMAIRE .....</b>	<b>1</b>
<b>RESUME .....</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>2</b>
<b>TABLE DES FIGURES.....</b>	<b>3</b>
<b>TABLE DES TABLEAUX.....</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>4</b>
<b>1. LES PESTICIDES.....</b>	<b>5</b>
1.1. DEFINITIONS .....	5
1.2. LES FAMILLES DE PESTICIDES .....	5
1.1.1. <i>Les organophosphorés</i> .....	5
1.1.2. <i>Les organochlorés</i> .....	6
1.1.3. <i>Les carbamates</i> .....	6
1.1.4. <i>Les triazines</i> .....	6
1.1.5. <i>Les pyréthrynoïdes</i> .....	6
1.1.6. <i>Les urées substituées</i> .....	7
1.3. DE L'UTILISATION MASSIVE A LA PRISE DE CONSCIENCE.....	7
1.4. LEGISLATION RELATIVE AUX PHYTOSANITAIRES.....	8
1.5. LES TRANSFERTS DE PESTICIDES .....	10
<b>2. LES BANDES ENHERBÉES : UNE REPONSE LIMITEE FACE AU DRAINAGE.....</b>	<b>11</b>
2.1. EFFICACITE SUR LES TRANSFERTS DE PESTICIDES .....	11
2.2. LE PROBLEME DU DRAINAGE .....	12
<b>3. LES ZONES HUMIDES : INTERETS ET JUSTIFICATIONS.....</b>	<b>13</b>
3.1. DEFINITION D'UNE ZONE HUMIDE.....	13
3.2. ROLES DES ZONES HUMIDES.....	13
3.3. DISSIPATION DES PESTICIDES AGRICOLES PAR LES ZONES HUMIDES.....	15
3.4. MESURES PREVENTIVES, OU MESURES CURATIVES ? .....	15
<b>4. LES ZONES TAMPONS HUMIDES ARTIFICIELLES .....</b>	<b>16</b>
4.1. DEFINITIONS .....	16
4.2. LES DIFFERENTS TYPES DE ZTHA .....	17
4.2.1. <i>Les fossés d'épuration</i> .....	17
4.2.1.1. Caractéristiques.....	17
4.2.1.2. Les types de fossés d'épuration .....	20
4.2.2. <i>Les zones humides de type « mares »</i> .....	21
4.2.2.1. Les mares artificielles .....	21
4.2.2.2. Les mares artificielles plantées.....	22



4.2.3.	<i>Les autres types de ZTHA.....</i>	23
<b>5.</b>	<b>PROJETS ET ETUDES EXPERIMENTALES.....</b>	<b>24</b>
5.1.	PROJETS EN EUROPE.....	24
5.1.1.	<i>Le Projet Artwet.....</i>	24
5.1.1.1.	Partenaires et financeurs du projet.....	24
5.1.1.2.	Sites expérimentaux et de démonstration .....	25
5.1.2.	<i>Etudes et publications européennes.....</i>	26
5.2.	ETUDES ET PUBLICATIONS MONDIALES.....	26
<b>6.</b>	<b>EFFICACITE DES ZONES HUMIDES AGRICOLES .....</b>	<b>29</b>
6.1.	BILAN DU PROJET ARTWET .....	29
6.1.1.	<i>Zones humides artificielles de Loches.....</i>	29
6.1.2.	<i>Fossés végétalisés de Landau .....</i>	29
6.1.2.1.	Site de démonstration sur le Krottenbach.....	29
6.1.2.2.	Site expérimental de Landau .....	30
6.1.3.	<i>Bassin de rétention de Rouffach.....</i>	31
6.2.	RESULTATS DES EXPERIMENTATIONS EUROPEENNES.....	31
6.3.	RESULTATS DES EXPERIMENTATIONS MONDIALES .....	32
<b>7.</b>	<b>PERSPECTIVES DES ZONES HUMIDES AGRICOLES .....</b>	<b>34</b>
7.1.	BILAN, ENSEIGNEMENTS ET PERSPECTIVES DU PROJET ARTWET .....	34
7.2.	QUELLE ECHELLE D'APPLICATION ?.....	35
7.3.	ASPECTS ECONOMIQUES DES ZHTA.....	35
7.3.1.	<i>Coût des ZHTA .....</i>	35
7.3.2.	<i>Stratégie de localisation.....</i>	36
7.3.3.	<i>Evaluation du manque à gagner .....</i>	37
7.3.4.	<i>Financements des projets.....</i>	37
7.4.	PERSPECTIVES ET APPLICATIONS LOCALES .....	38
7.4.1.	<i>Nouveaux programmes expérimentaux.....</i>	38
7.4.2.	<i>Applications locales.....</i>	38
7.4.2.1.	Restauration de cours d'eau.....	38
7.4.2.2.	Retenue de stockage des eaux de drainage .....	39
	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>40</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>41</b>
	<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>47</b>
	<b>ANNEXES.....</b>	<b>49</b>

## ANNEXES

**Annexe 1 :** Zones humides artificielles de Loches – Indre-et-Loire (37)

**Annexe 2 :** Fossés végétalisés sur le Krottenbach – Rheinland-Pfalz, Allemagne

**Annexe 3 :** Bassin de rétention de Rouffach – Haut-Rhin (68)

**Annexe 4 :** Programme expérimental de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse

**Annexe 5 :** Zones de décantation des eaux de drainage et fossés agricoles – Meuse (55)

**Annexe 6 :** Retenue de stockage des eaux de drainage – Seine-et-Marne (77)

## ANNEXE 1 : ZONES HUMIDES ARTIFICIELLES DE LOCHES – INDRE-ET-LOIRE (37)

*Localisation* : Bray, ville de Villedomain (37), France

*Surface* : 1770m<sup>2</sup>

*Altitude* : 99m

*Couverture du sol* : principalement céréales (rotation typique : colza, blé d'hiver, orge)

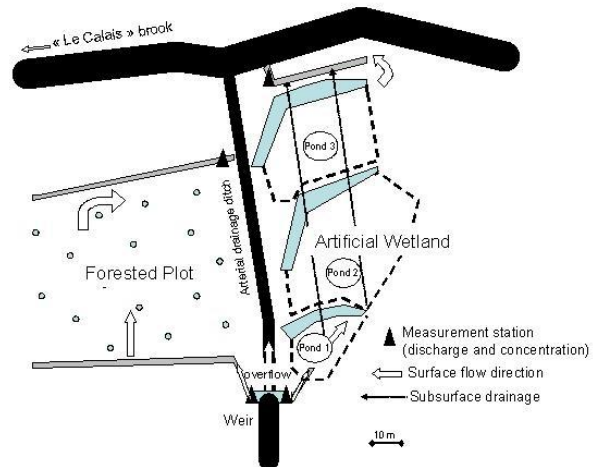
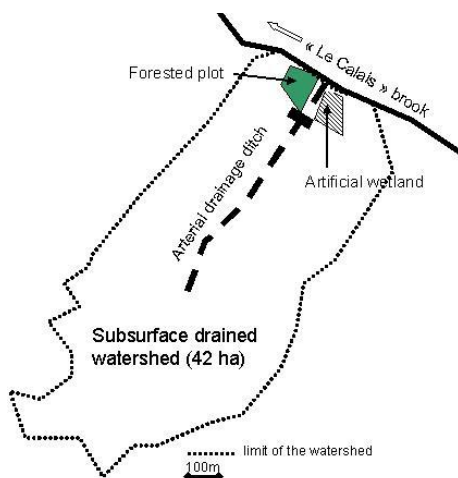
*Pédologie* : Luvisol oximorphe (FAO), sol hydromorphe dû à la présence de couches naturelles d'accumulation d'argile à faible profondeur ("gâtine de Loches-Montrésor"), d'où la nécessité du drainage de subsurface



Zone humide forestière



Zone humide artificielle



Sources : ArtWet, 2011

ArtWet in <http://coursenligne.u-strasbg.fr>

## ANNEXE 2 : FOSSES VEGETALISEES SUR LE KROTTENBACH – RHEINLAND-PFALZ, ALLEMAGNE

*Localisation* : Krottenbach, ville de Göklingen, Allemagne

*Bassin versant*: 2 729 km<sup>2</sup>

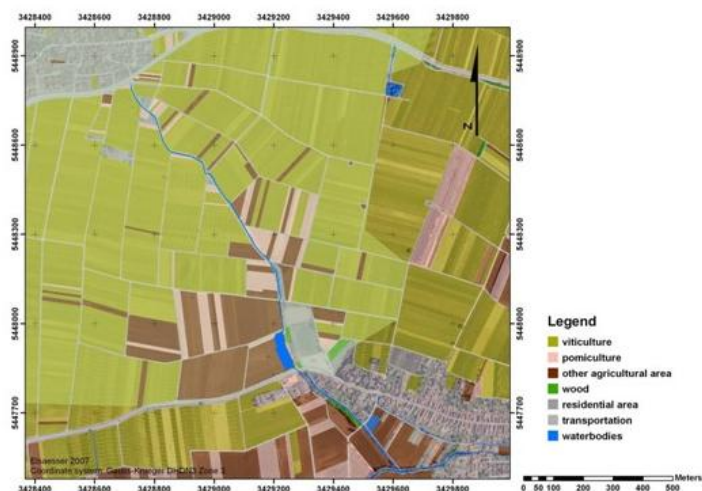
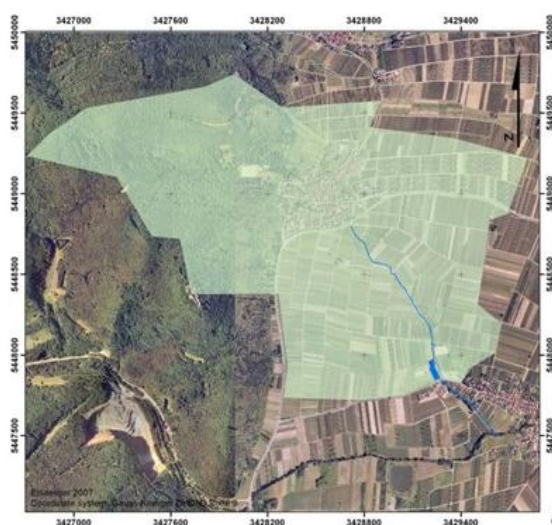
*Longueur du fossé* : 1712 m

*Pente du fossé* : 0,025%

*Surface du bassin de rétention* : 4140 m<sup>2</sup>

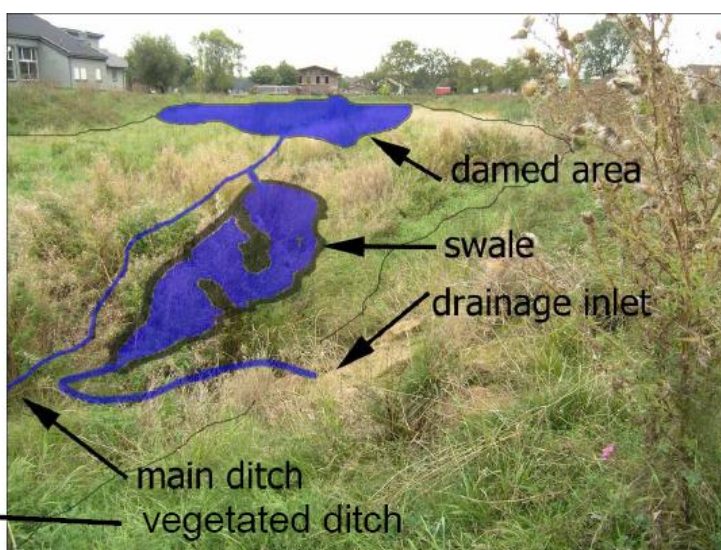
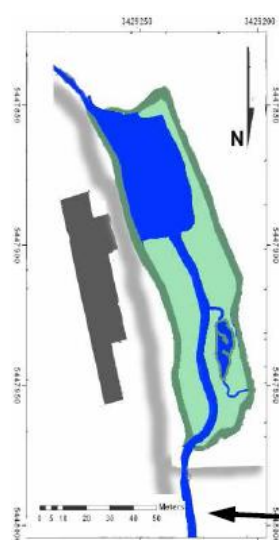
*Volume du bassin de rétention* : 4650 m<sup>3</sup>

**Bassin versant du Krottenbach**



**Occupation du sol**

### Caractéristiques des aménagements



Sources : ArtWet, 2011

ArtWet in <http://coursenligne.u-strasbg.fr>



### ANNEXE 3 : BASSIN DE RETENTION DE ROUFFACH – HAUT-RHIN (68)

*Localisation* : piémont de Rouffach, sud/sud-ouest de Colmar (68), France

*Bassin versant hydraulique* : 40 ha

*Altitude* : entre 230 et 370 m

*Pente moyenne* : 14%

*Occupation des sols* : 67,8% de vigne

*Pédologie* : sol brun calcaire peu évolué et profond sur loess (limon calcaires éoliens, Calcosol)

*Superficie du bassin* : 320 m<sup>2</sup>

*Volume du bassin* : 1500 m<sup>3</sup>

*Végétation du bassin* : Inventaire de 2007

#### Nom scientifique :

*Phragmites australis* (Cavanilles) Steudel

#### Les 2% restant :

##### Dans l'eau :

*Lemna minor* L.

##### Au bord de l'eau :

*Equisetum arvense* L.

*Poa trivialis* L.S. L.

*Hordeum murinum* L.S. L.

*Festuca pratensis* Hudson S. L.

*Bromus sterilis* L.

*Dactylis glomerata* L.

*Arrhenatherum elatius* (L.) P. Beauv.ex J.Presl & Presl.

*Galium mollugo* L. subsp. *album* (Mill.)Tzvelev

*Galium aparine* L.

*Ranunculus repens* L.

*Urtica dioica* L.

*Salix alba* L.

*Salix* sp.

*Medicago sativa* L.

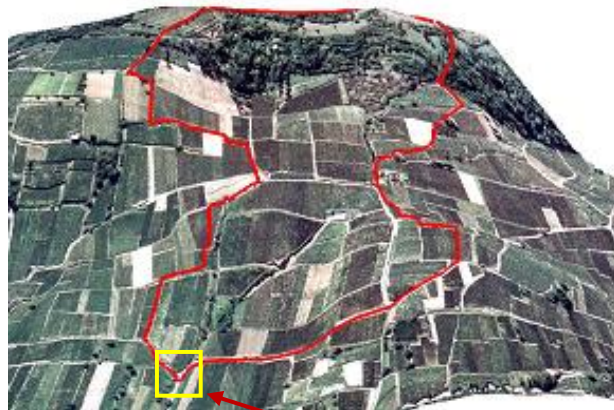
*Vicia sativa* L.

*Eupatorium cannabinum* L.

*Epilobium hirsutum* L.

*Geranium* sp.

#### *Bassin versant de Rouffach*



*Bassin d'orage*

#### *Optimisation de la conception de l'ouvrage*

**2009**



**2010**



Sources : ArtWet, 2011

ArtWet in <http://coursenligne.u-strasbg.fr>

## ANNEXE 4 : PROGRAMME EXPERIMENTAL DE L'AGENCE DE L'EAU RHIN-MEUSE

### *Aménagements linéaires de grande longueur*

#### Système de fossé large avec une zone préférentielle de stagnation à Manoncourt-sur-Seille (54)

- Fossé de 91ml sur 2.5-3m de large
- Zone de stagnation préférentielle
- Entourée de bande enherbée de 5m
- Révégétalisation spontanée
- dispositif de mesures entrée/sortie

Points à améliorer :

Pente plus douce et plus de zones de stagnations.



### *Aménagements linéaires de faible longueur*

#### Système de fossé à étage à Broussey (55)



- Fossé de 20 ml de 3.5m de large
- Dans la bande enherbée
- Seuils de retenus pour freiner l'écoulement des eaux
- Plantation de 100 pieds de roseaux prélevés dans l'environnement proche pour initier la revégétalisation
- dispositif de mesures entrée/sortie

Points à améliorer :

Ne pas utiliser la terre excavée pour remblayer les berges afin qu'elles soient en pente douce et profiter de l'espace disponible pour faire méandrer le cours d'eau.



## Système de fossé aménagé à Saint Hilaire-en-Woëvre (55)

Les eaux de drainage peuvent contenir quelques résidus de produits phytosanitaires et de nitrates. Pour éviter de perturber l'équilibre du ruisseau, l'aménagement d'une zone tampon, constituée de végétaux aquatiques, permet de filtrer et de dégrader ces éléments.



Création d'un bras-mort avec zones de ralentissement de l'eau (seuils) entre lesquelles seront plantés des végétaux.

Géotextile pour maintenir les berges nouvellement créées

Sortie de drainage



## **Aménagements surfaciques**

### Système surfacique constitué d'une mare prolongée par un bras annexe à Ollainville (88)



- mare triangulaire 45.5 m3 prolongé par un bras mort
- dans la bande enherbée
- revégétalisation spontanée
- dispositif de mesures entrée/sortie

Points à améliorer :

Ne pas utiliser la terre excavée pour remblayer les berges afin qu'elles soient en pente douce et faire méandrer le bras mort jusqu'au cours d'eau.

Sources : Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2011



## **ANNEXE 5 : ZONES DE DECANTATION DES EAUX DE DRAINAGE ET FOSSES AGRICOLES – MEUSE (55)**

### **Zones de décantation recueillant les drains agricoles ou les fossés**

Aménagement 1 : Zone de décantation recueillant un fossé de rétention des eaux de chaussée et de drains agricoles



Aménagement 2 : Création de petits bassins de décantation plantés d'hélophytes recueillant les eaux de drainage



*Sources : Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2002*

## ANNEXE 6 : RETENUE DE STOCKAGE DES EAUX DE DRAINAGE – SEINE-ET-MARNE (77)

*Géographie* : Le ru de Bourgogne, qui reçoit les eaux du réseau de drainage, fait partie du réseau hydrographique de l'Orgeval, affluent du Grand Morin. Le Bassin Versant de Recherche et d'Expérimentation (BVRE) de l'Orgeval se situe à proximité de la ville de Coulommiers (Seine et Marne), à 70 km de Paris. Il s'étend sur 104 km<sup>2</sup>.

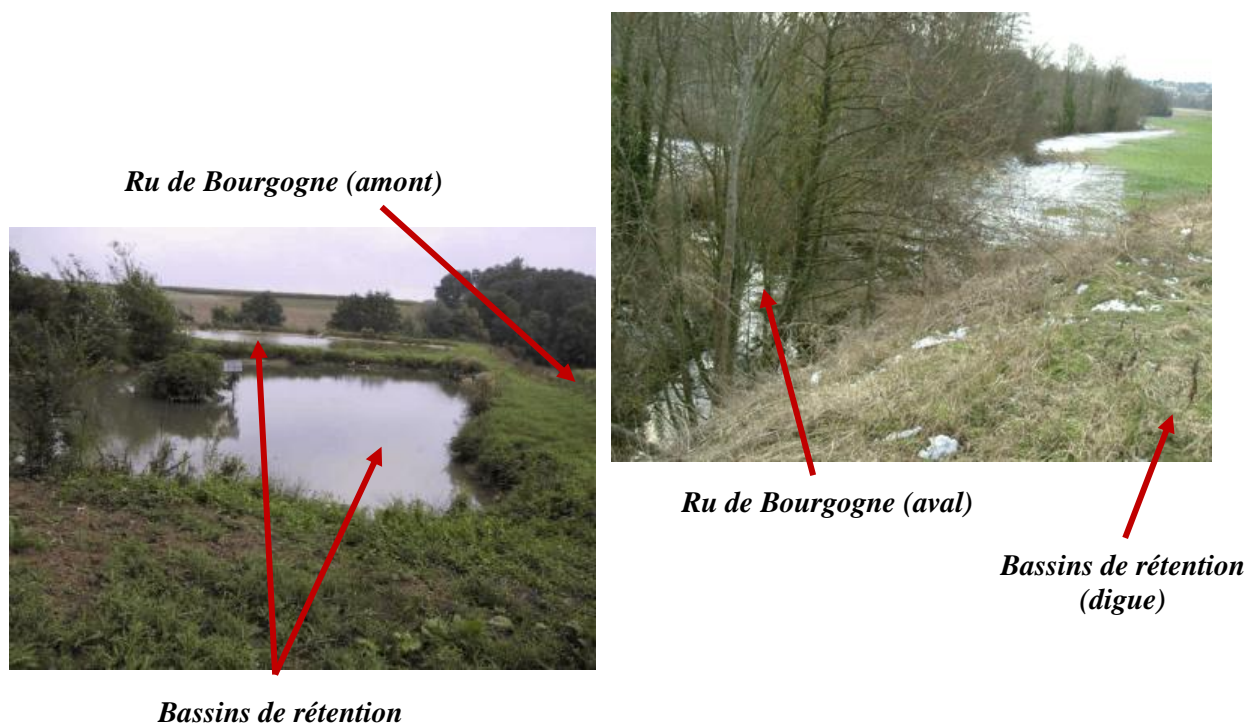
*Morphologie* : Les parcelles drainées qui alimentent les bassins sont situées sur un plateau de pente modérée (2% environ). Les bassins sont situés sur un versant de pente plus accentuée (supérieure à 5%), vers le ruisseau encaissé.

*Occupation des sols* : L'occupation des sols, caractéristique de la région de la Brie, est consacrée à une agriculture intensive et améliorée par du drainage par tuyaux enterrés. Des cultures de légumineuses sous contrat avec une conserverie industrielle occupent une superficie d'environ 20 ha.

*Acteurs concernés* : l'exploitation agricole (EARL) dispose ici de la maîtrise du parcellaire et de l'aménagement hydraulique. L'industriel, ayant contractualisé certaines parcelles pour la production de légumes irrigués (destinés à la mise en conserve), est également un acteur décisif (bien qu'indirect car ne participant pas à la maîtrise d'ouvrage ni à la maîtrise d'œuvre) pour le choix d'aménagement et par la suite pour le choix des superficies irriguées.

*Bénéfice socio-économique attendu* : garantie d'approvisionnement en eau pour l'irrigation des cultures sous contrat (20 ha). Diminution de la pollution d'origine agricole, diminution de la contribution aux crues à l'aval du bassin versant, sans viser un seuil de risque particulier.

*Les coûts et la répartition de la charge* : Le dispositif a été réalisé entièrement à la charge de l'exploitant, avec un avantage apporté par la présence de marnes favorables à l'étanchéification de la retenue sans matériaux extérieurs. Le coût global est inconnu.



Sources : OMER-Cemagref, 2011  
<https://omer.cemagref.fr>