

Les zones tampons humides artificielles pour la bioremédiation de l'azote dans les eaux de drainage agricole

Extension, efficacité et perspectives



Fabrice JOUANNE

M2 IHBV-IMACOF

Mars 2011

Encadrement :
Francesca DI PIETRO

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont tout particulièrement à Francesca Di Pietro pour son encadrement et son aide ainsi qu'à Marie Lemoine (Agence de l'eau Rhin-Meuse) pour son aide qui m'a été précieuse.

Je tiens aussi à remercier tous les intervenants dans la formation avec qui j'ai pu échanger sur le sujet.

SOMMAIRE

RESUME	3
INTRODUCTION	4
I. L'AZOTE, DU CHAMP AU COURS D'EAU.....	5
1. Le cycle de l'azote	5
2. La fertilisation et le surplus azoté.....	6
3. Transferts de l'azote vers les hydrosystèmes	6
4. L'azote dans les hydrosystèmes	8
5. Législation	10
II. LES ZONES TAMPONS.....	11
1. Définition des zones tampons	11
2. La limitation du transfert d'azote	12
III. LES ZONES HUMIDES TAMPONS ARTIFICIELLES	14
1. Le pouvoir tampon des zones humides	14
2. Le drainage et les transferts d'azote.....	16
3. Intérêts	17
IV. DESCRIPTION DES ZTHA, EFFICACITES ET COUTS.....	18
1. Généralités.....	18
2. Les facteurs d'efficacité.....	19
3. Les fossés d'épuration.....	19
4. Les mares	21
5. Autres types de ZTHA.....	24
6. Coûts.....	24
V. EXTENSION ET EXEMPLES.....	26

1.	L'actualité de la recherche scientifique	26
2.	Installation à grande échelle, en dehors de programmes scientifiques	30
VI.	PERCPECTIVES.....	32
1.	Comparaison entre les deux maitres d'ouvrage possibles	32
2.	Réglementation	35
	CONCLUSION	39
	BIBLIOGRAPHIE	40
	LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX.....	43
	TABLE DES MATIERES.....	44

RESUME

Les zones tampons permettent de limiter les transferts d'azote et autres polluants agricoles de la parcelle vers les eaux de surface. Mais les réseaux de drainage artificiel « court-circuitent » ces aménagements de surface. Il est alors possible de mettre en place une Zone Tampon Humide Artificielle (ZTHA), dans laquelle sont rejetées les eaux issues du drainage qui sont ainsi traitées avant d'être rendues au cours d'eau. L'efficacité de ces installations est bonne (environ 50%) pour les nitrates, mais les ZTHA sont peu connues. Le développement est lent et il n'existe pour le moment aucun outil réglementaire ou contractuel permettant de favoriser une implantation massive. La recherche scientifique progresse néanmoins et il existe quelques expériences convaincantes.

Mots clefs : zone tampon – nitrate– drainage agricole – zone tampon humide artificielle

ABSTRACT

Buffer zones are used to limit transfers of nitrogen and other agricultural pollutants from plot to surface waters. But artificial drainage networks "bypass" these surface landscaping. It is then possible to establish a constructed buffer wetland, where drainage water can be discharged and treated before go to the river. The effectiveness of these landscaping is good (50%) for nitrate, but constructed buffer wetlands aren't well-known. Development is slow and there is currently no regulatory or contractual tool for fostering massive establishment. But scientific research is progressing and there are some compelling experiences.

Keywords : buffer zone – nitrogen – agricultural drainage- constructed buffer wetland

INTRODUCTION

A l'heure où une grande partie des masses d'eau de surface et souterraines est polluée par les nitrates et où certaines côtes sont, tous les ans, recouvertes d'algues vertes, il devient urgent de diminuer les transferts d'azote vers les milieux aquatiques. Pour cela, des outils réglementaires et contractuels ont été mis en place. Mais les concentrations restent souvent trop importantes pour régler le problème et atteindre les objectifs de « bon état » de la Directive Cadre sur l'Eau. Ainsi il est actuellement important de rechercher et de mettre en œuvre des moyens techniques innovantes pour réduire la pression, notamment agricole, sur le milieu en matière de nitrates.

Cette étude a pour but de démontrer l'intérêt apporté par les zones tampons humides artificielles à l'exutoire des réseaux de drainage agricole et de faire un bilan de la mise en place de cette technique en France. Des exemples concrets et une réflexion autour des perspectives de massification de l'implantation de ces ouvrages seront ainsi mis en avant.

I. L'AZOTE, DU CHAMP AU COURS D'EAU

Pour résoudre le problème de la pollution des eaux superficielles et souterraines par l'azote, il est essentiel de comprendre les mécanismes de transfert des différents composés azotés.

1. Le cycle de l'azote

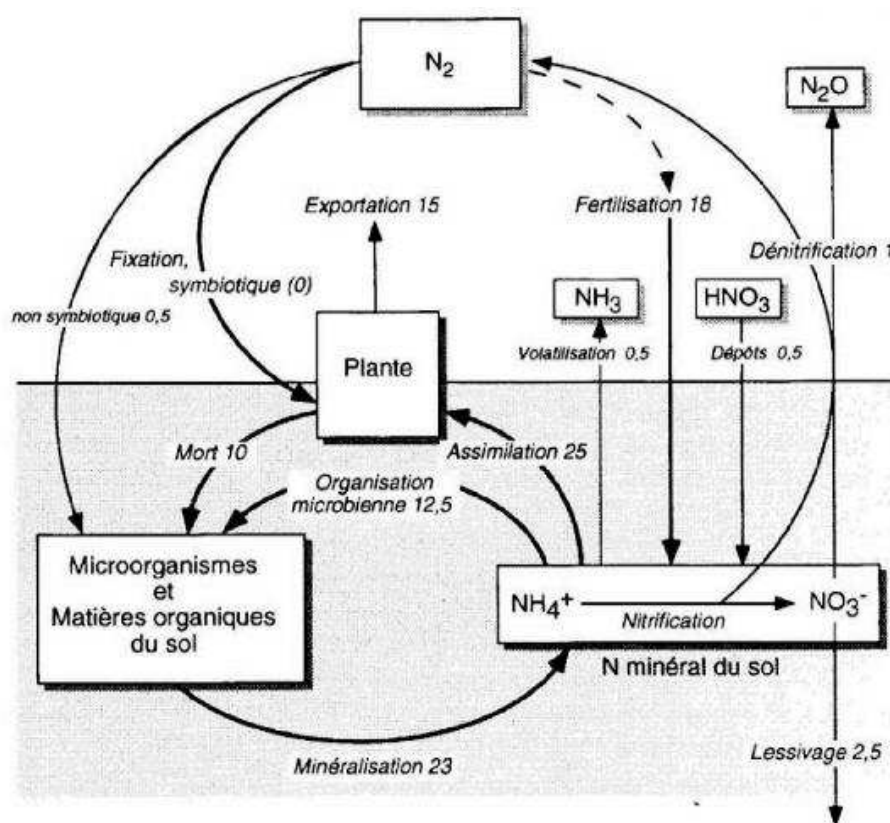


Figure 1: Cycle de l'azote dans les sols, les valeurs correspondent à des flux annuels probables en g.N.m⁻², pour une culture céréalière du Nord de la France (Stengel et Gelin, 1998)

L'azote est un élément constitutif majeur des êtres vivants et compose l'air à hauteur de 80% sous forme de N₂. Son cycle biochimique est composé d'une partie terrestre et d'une partie aérienne comme le montre la Figure 1.

Les apports atmosphériques d'azote au sol se font selon trois modes (Haynes, 1986) :

- par les pluies, qui contiennent des nitrates NO₃⁻ et des ions ammonium NH₄⁺ issus d'une réaction avec l'azote gazeux. Elles apportent 5 à 20 kg N/ha/an ;
- par fixation du N₂ par des micro-organismes vivants librement ou en association avec les plantes. Les légumineuses sont les plantes dont la capacité de fixation est la plus importante (140 kg N/ha/an contre 35 pour les autres cultures et 15 pour une prairie) ;
- par dépôt sous forme gazeuse ou particulaire, difficile à quantifier.

Dans les sols, l'azote se trouve majoritairement sous forme de molécules organiques (dans les organismes vivants et morts ou l'humus) et, en moindre mesure, sous forme d'ions minéraux ammonium, nitrite et nitrate (NO_3^- , NO_2^- et NH_4^+). L'azote organique issu des organismes morts est minéralisé dans le sol en azote minéral qui est ensuite absorbé par les végétaux. Lors de la décomposition des litières, des résidus de récoltes et des organismes morts l'azote organique est restitué au sol.

Le retour de l'azote vers l'atmosphère se fait par les processus de dénitrification ou volatilisation, majoritairement sous forme de diazote N_2 , mais aussi d'ammoniac NH_3 et d'oxyde nitreux N_2O .

2. La fertilisation et le surplus azoté

2.1. Fertilisation

L'azote joue un rôle primordial dans le métabolisme des plantes. Il est un constituant important des protéines, composantes essentielles de la matière vivante. L'azote est donc un facteur de croissance, mais aussi de qualité (teneur en protéines des céréales par exemple) des plantes cultivées.

A l'exception des légumineuses, il est indispensable d'apporter de l'azote aux plantes sous forme de fertilisants minéraux ou organiques afin de compenser l'azote exporté par la récolte. Les flux apportés varient selon les pratiques : nuls pour certaines cultures, ils peuvent atteindre 300 kg N/ha/an pour d'autres (Augeard, 2002).

2.2. Surplus azoté

Dû généralement à une mauvaise gestion de la fertilisation ou à une production végétale inférieure aux prévisions, l'azote est souvent apporté en excès par la fertilisation. Il est possible de calculer le surplus d'azote apporté à une culture en faisant la différence entre les entrées d'azote sur la parcelle (effluents d'élevage, engrais minéraux, engrais organiques et matières organiques issues de déchets, fixation symbiotique, déposition atmosphérique) et les sorties (exportation par les cultures, par les prairies, émissions d'ammoniac et de gaz azotés vers l'atmosphère).

Au niveau national, le surplus d'azote était estimé à 1 106 471 tonnes en 2006, soit 40 kg/ha de SAU (Surface Agricole Utile) agricole (IFEN, 2006). Cet excédent est plus important dans certaines régions françaises et des variations importantes existent aussi à l'échelle de la parcelle. Ainsi Molénat (1999) a estimé des surplus à l'échelle de la parcelle compris entre 60 et 220 kg.ha/an (Augeard, 2002).

3. Transferts de l'azote vers les hydrosystèmes

Le surplus d'azote apporté à une parcelle est susceptible d'être drainé par les eaux ou se retrouver dans les eaux de ruissellement. Néanmoins, toutes les formes d'azote présentes dans le sol ne sont pas transférables par les mêmes voies.

3.1. Transfert des nitrates par lixiviation

Les nitrates sont très solubles dans l'eau, ils sont très peu fixés par le sol et sont donc essentiellement lixiviés, c'est à dire qu'ils sont entraînés en profondeur (hors de portée des racines) par les eaux de percolation. À l'inverse, l'azote organique (organismes vivants et morts, humus) est stockée dans la matière organique et l'ammonium est à 90% lié aux complexes argilo-humique selon Augeard (2002). Ils sont donc peu solubles dans l'eau.

Le phénomène de lixiviation est généralement lent et peu dispersif : 0,5 à 1 mètre par an en craie champenoise selon l'occupation du sol et le bilan hydrique à 1,2 mètres par an en Bretagne selon les données recueillies par Augeard (2002).

Les quantités d'azote entraînées par lixiviation dépendent de la quantité de nitrates dans le sol, sa répartition le long du profil de sol, la quantité d'eau drainée et la fréquence et la répartition des pluies dans l'année.

Une partie des nitrates entraînés par lixiviation rejoint les eaux de surface par ruissellement subsuperficiel (dans les premiers centimètres du sol) comme le montre la Figure 2. Cet écoulement latéral intervient à la suite de pluies, quand un obstacle limite la vitesse d'infiltration en profondeur (semelle de labour, horizon compacté, ...).

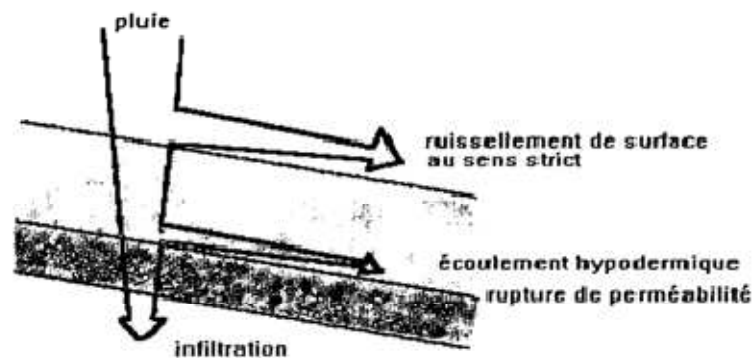


Figure 2: Transferts des eaux sur et dans le sol (CORPEN, 2007)

La majorité des ions lixiviés rejoignent les nappes par infiltration selon Turpin et al. (1997). Les cours d'eau étant alimentés en partie par les aquifères, une partie importante des nitrates présents dans les eaux de surfaces proviennent en fait des eaux souterraines.

3.2. Transfert de l'ammonium et de l'azote organique par ruissellement érosif

Le ruissellement de l'eau à la surface du sol apparaît lorsque l'intensité de la pluie est supérieure à la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol. Les nitrates sont peu présents dans les écoulements ruisselants, sauf si ce ruissellement se produit après l'épandage d'engrais, de lisier, de fumier ou de boues selon Schvartz et al. (2005).

L'azote organique et l'ammonium peuvent être adsorbés sur le complexe argilo-humique ou participent à sa constitution. Ils sont donc fortement liés aux particules de sol qui sont entraînées par le ruissellement de l'eau sur la parcelle.

Le transfert d'ammonium et d'azote organique vers les eaux de surface dépend essentiellement de la pente, de la cohésion des particules du sol et de la couverture du sol, mais surtout de l'intensité des précipitations à l'origine du ruissellement.

3.3. La pollution des eaux de surface

En général, le transfert d'azote depuis les parcelles agricoles est essentiellement subsuperficiel et souterrain, et donc sous majoritairement sous forme de nitrates. Le flux d'azote dans le ruissellement restant faible par rapport à celui des deux voies précédentes selon le CORPEN (2007).

La quantité d'azote exporté vers les eaux est fonction de l'occupation du sol comme le montre le tableau 1. Les zones intensives de cultures et d'élevage présentant un transfert d'azote vers les eaux plus important que les zones extensives (forêts, prairies).

Il est à noter que les valeurs de pertes en azote de ce tableau sont des ordres de grandeurs puisque celles-ci proviennent de résultats de plusieurs études ou d'articles. Les méthodologies ainsi que le contexte pédoclimatique sont donc différents.

Tableau 1: Ordre de grandeur des quantités d'azote exporté vers les eaux en fonction de l'occupation du sol (Turpin et al., 1997)

Occupation du sol	N en kg/ha/an
Forêt	1 à 3
Pelouse drainée	1,9 à 14
Prairies et forêt	0,3 à 3,5
Prairies extensives	1 à 5
Prairies intensives	5 à 35
Polyculture élevage	6 à 18
Polyculture élevage intensif	27 à 76
Céréaliculture	6 à 35
Elevage intensif	33 à 50

Sous climat atlantique ou semi-continental en France, les fuites d'azote se produisent le plus fréquemment en automne et surtout en hiver, quand l'évapotranspiration est faible. Ces fuites sont d'autant plus élevées que le stock de nitrates présent dans le sol au début de la période de drainage est important, la pluviosité hivernale forte et la capacité de rétention du sol faible selon le CORPEN (2007).

4. L'azote dans les hydrosystèmes

4.1. Des concentrations importantes

La présence de chaque forme de l'azote dans les eaux de surface dépend de plusieurs facteurs, dont le pH, la concentration d'oxygène dissous et les communautés biologiques présentes. Néanmoins toutes les formes d'azote libérées dans les eaux de surface peuvent se transformer en nitrates sous l'action des bactéries ou par oxydation. La forme nitrate est donc en général très majoritaire et sa concentration donne une bonne approximation de la quantité d'azote totale dans le cours d'eau.

La concentration naturelle en nitrates dans les eaux souterraines varie entre 0,1 et 1 mg/l. Cependant, les concentrations actuelles en nitrates dans les eaux souterraines dépassent souvent les 50 mg/l (Figure 3), valeur correspondante à la norme de potabilisation des eaux brutes superficielles.

Les concentrations en nitrates dans les eaux superficielles sont généralement inférieures à celles mesurées dans les nappes mais n'en restent pas moins importantes comme le montre la Figure 4. Les eaux de surface ne contenant naturellement pas plus de 10mg/l de nitrates selon la D.R.A.S.S. d'Ile de France (2000).

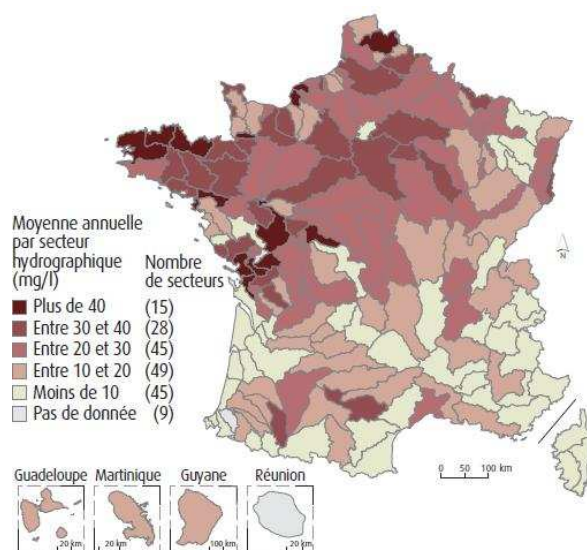


Figure 3 : Moyennes annuelles 2007 des concentrations en nitrates dans les nappes phréatiques, par secteur hydrographique selon le Commissariat général au développement durable (2010)

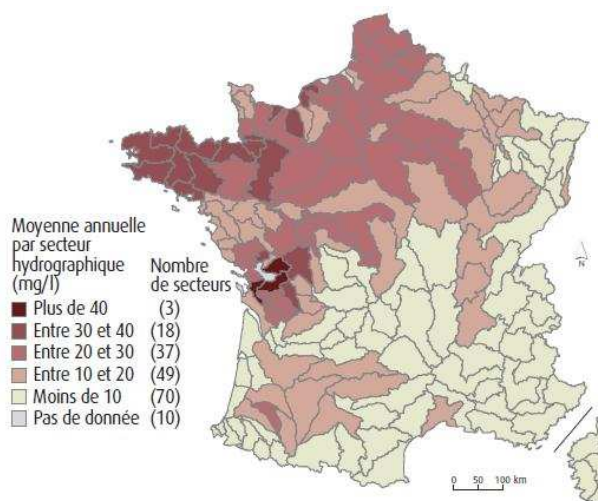


Figure 4 : Moyennes annuelles 2007 des concentrations en nitrates dans les cours d'eau, par secteur hydrographique selon le Commissariat général au développement durable (2010)

Selon le CNRS, 66% des nitrates dans les eaux proviennent de l'agriculture. Le reste est issu des rejets des collectivités locales (22 %) et de l'industrie (12 %) selon le CNRS (site internet).

4.2. Les perturbations liées à la présence de fortes concentrations de nitrates dans les eaux

4.2.1. Les « marées vertes »

Les nitrates sont généralement l'élément limitant de la croissance des végétaux en système marin. Un apport trop important en nitrates dans les estuaires peut donc causer un développement très important de micro-algues non-siliceuses au détriment du développement des diatomées qui sont essentielles à la croissance des poissons. La décomposition de ces micro-algues sur les plages peut amener à la libération de H₂S qui est un gaz toxique.

4.2.2. Effets sur la santé

Sous l'action d'une bactérie présente dans le corps humain, les nitrates se réduisent en nitrites. Ceux-ci oxydent l'hémoglobine du sang qui ne peut plus fixer l'oxygène ce qui, à une forte concentration en nitrites, perturbe la respiration cellulaire. Les nitrates peuvent de la même manière causer, chez les enfants, une méthémoglobinémie (syndrome du bébé bleu). De plus, les nitrates peuvent s'associer à certaines molécules pesticides et engendrer, à long terme, des cancers.

5. Législation

5.1. La directive nitrate

La « directive nitrate », directive européenne 91/676/CEE du 12 décembre 1991, est le principal outil réglementaire concernant la pollution azotée de source agricole. Cette directive a été transposée par plusieurs décrets dont celui du 27 août 1993, relatif à la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole. Celui-ci impose de délimiter des « zones vulnérables ». Les zones vulnérables sont les zones où la concentration en nitrates dans les eaux superficielles destinées à l'alimentation en eau potable est supérieure à 50mg/l. Dans chaque zone, un programme d'action doit être défini et adapter, au niveau local, le code de bonne pratique agricole national.

5.2. La DCE

La directive cadre sur l'eau (DCE) a pour objectif la protection des eaux de surface, des eaux de transitions, des eaux côtières et des eaux souterraines. Elle vise à un bon état des masses d'eau d'ici à 2015. Les nitrates font partie des paramètres définissant ce « bon état ».

II. LES ZONES TAMPONS

Il existe plusieurs méthodes complémentaires pour réduire l'apport d'azote aux hydrosystèmes :

- Éviter le surplus azoté (fertilisation raisonnée etc)
- Fixer le surplus d'azote (cultures pièges à nitrates)
- Éviter l'érosion, freiner le ruissellement et favoriser la volatilisation (pratiques agricoles et zones tampons)

1. Définition des zones tampons

Dans le domaine de l'agriculture, une zone tampon est une zone enherbée ou boisée qui a la capacité d'intercepter ou de ralentir les flux d'eau entre une parcelle agricole et un cours d'eau.

Celles-ci remplissent plusieurs fonctions selon le CORPEN (2007) :

- Fonction hydrique : de part leur rugosité hydraulique et leur perméabilité, les zones tampons sont susceptibles à la fois de ralentir le ruissellement, d'en diminuer le volume et de réduire les pics de débit.
- Fonction de rétention de matières en suspension (MES) par le ralentissement du ruissellement et l'augmentation de l'infiltration et de limitation de transfert du phosphore, des produits phytosanitaires et de l'azote.

Les MES peuvent en effet provoquer l'envasement des plans d'eau, la dégradation des habitats des organismes aquatiques, la turbidité des eaux destinées à la consommation. De plus, elles sont le support de substances polluantes fixées sur les particules (phosphore, azote et produits phytosanitaires). Le phosphore est un nutriment dont la présence excessive dans les eaux de surface continentales engendre l'eutrophisation, ce qui est dommageable pour la vie aquatique et les usages de l'eau. Les produits phytosanitaires peuvent, à une certaine concentration, être néfastes à la vie aquatique et, lorsqu'ils sont présents dans l'eau potable, à la santé humaine.

De plus, certaines zones tampons, qui longent les cours d'eau, permettent aussi de protéger les eaux de surface des dérives de pulvérisation des produits phytosanitaires.

Selon la définition du CORPEN (2007), divers éléments du paysage entrent dans la définition d'une zone tampon :

- les bordures de champs étroites,
- les bandes enherbées,
- les chenaux enherbés de talwegs,
- les prairies permanentes,
- les friches,
- les chemins enherbés,
- les talus,
- les haies (associées ou non aux talus),

- les bois et bosquets, les taillis à courte ou très courte rotation,
- les ripisylves.

2. La limitation du transfert d'azote

La limitation du transfert d'azote par une zone tampon suit plusieurs processus, physiques et biochimiques.

2.1. Diminution du transfert de l'azote organique et de l'ammonium

Les zones tampons présentent, durant toute l'année, une couverture dense du sol. La rugosité y est donc plus importante que sur la parcelle cultivée ou « nue ». Ainsi, Les zones tampons freinent les écoulements ruisselants et retiennent une partie des particules de sol. L'azote organique et l'ammonium étant liés à ces particules, ils sont donc, pour partie, retenus dans la zone tampon.

Sous l'action de la microflore du sol, l'azote organique se minéralise en ammonium. L'ammonium est, en grande partie, nitrifié en nitrates, dans les zones en aérobie (présence d'oxygène libre) du sol. Une petite quantité d'ammonium est volatilisé sous forme d'ammoniac.

2.2. Dénitrification des nitrates

Les nitrates présents dans les écoulements de subsurface et ceux produits par la nitrification de l'ammonium sont pour partie dénitrifiés.

La dénitrification est la transformation, par les micro-organismes du sol, des nitrates en diazote gazeux. Ce processus se fait dans les zones en condition anaérobie (absence d'oxygène libre) du sol et en présence de carbone assimilable par les micro-organismes. Il y a aussi production d'oxyde nitreux N_2O , puissant gaz à effet de serre.

L'hydromorphie empêche la circulation de l'oxygène. Associée à une richesse en carbone du sol, elle favorise la dénitrification. Les mouillères sur les versants et, surtout, les bas-fonds alluviaux sont donc des lieux privilégiés de la dénitrification selon le CORPEN (2007).

La nitrification et la dénitrification sont maximales lorsque le sol n'est pas totalement engorgé (nappe à environ 20 cm de profondeur). Dans ces conditions, le sol présente à la fois des sites aérobies et anaérobies qui permettent la réalisation de ces processus biochimiques dans des sites proches.

2.3. Absorption des nitrates par la végétation

Une partie moins importante des nitrates est absorbée par la végétation de la zone tampon. Les zones tampons herbacées doivent donc être régulièrement fauchées pour que l'azote assimilée dans les plantes soit exporté et ne se retrouve pas dans le sol après dégradation de la matière organique. En prenant en compte uniquement l'élimination de l'azote, une zone

tampon herbacée est plus avantageuse qu'une zone tampon ligneuse avec laquelle l'exportation est plus compliquée.

2.4. Efficacité des zones tampons sur les transferts d'azote

Les processus d'élimination et de rétention des transferts d'azote au niveau des zones tampons ont été largement démontrés. Néanmoins, selon le CORPEN (2007), les zones tampons doivent s'étendre sur environ 10 mètres de largeur pour être réellement efficaces (élimination et rétention de 80% du transfert d'azote).

La loi Grenelle II votée le 29 juin 2010 impose des bandes enherbées entre les parcelles agricoles et les cours d'eau et élargit ainsi les dispositions d'écoconditionnalité des aides de la Politique Agricole Commune prises depuis 2005. Cependant, la largeur minimale imposée est de 5m, l'efficacité du dispositif est donc réduite.

Il est à noter que l'efficacité des zones tampons est nulle pour les eaux transférées vers les eaux superficielles par drainage artificiel enterré puisque les drains court-circuitent ces dispositifs pour se jeter directement dans les fossés ou les cours d'eau.

III. LES ZONES HUMIDES TAMPONS ARTIFICIELLES

La solution proposée pour traiter les eaux issues du drainage artificielle et court-circuitant les zones tampons ordinaires est d'installer des fossés humides ou des mares à l'exutoire des réseaux de drainage. Ce sont les Zones Tampons Humides Artificielles (ZTHA).

1. Le pouvoir tampon des zones humides

1.1. Définitions et particularités des zones humides

1.1.1. Définitions légales des zones humides

La législation française comporte deux définitions des zones humides :

- la définition de portée internationale inscrite dans la Convention de Ramsar de 1971, convention qui a pour but la protection de ces espaces ;
- la définition de la loi sur l'eau de 1992.

La loi relative au développement des territoires ruraux et l'arrêté du 24 juin 2008 encadrent la délimitation réglementaire des zones humides par la police de l'eau.

❖ La convention de Ramsar

Les zones humides ont été définies pour la première fois dans la législation juridique et ce, au niveau international, par la Convention de Ramsar :

« Au sens de la présente Convention, les zones humides sont des étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux 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 se base sur des critères morphologiques, est très large et englobe les zones humides artificielles.

❖ La Loi sur l'eau

La législation française n'a pas défini les zones humides avant la loi n°92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau :

« On entend par zone humide les terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire ; la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année ».

Cette définition souligne les caractéristiques écologiques ou fonctionnelles en se basant sur le critère hydrologique et non plus morphologique. Un seul des critères suffit pour être en présence d'une zone humide. Cette définition est aussi très large selon Lucas (2009) et englobe les zones humides artificielles.

❖ La loi relative au développement des territoires ruraux et l'arrêté du 24 juin 2008

La loi n°2005-157 du 23 février 2005 relative au développement des territoires ruraux donne aux préfets le pouvoir de délimiter les zones humides. L'arrêté du 1er octobre 2009 (modifie celui du 24 juin 2008) en définit les critères :

- Les sols doivent correspondre aux types pédologiques de la liste établie par l'arrêté. Ils sont identifiés par une méthode précise.
- La végétation, quand elle existe doit faire partie d'une des listes établies par l'arrêté.

La circulaire du 25 juin 2008 expose les conditions de mise en œuvre des dispositions de l'arrêté du 24 juin 2008. Elle précise que cette délimitation des zones humides « vise à mieux asseoir la mise en œuvre de la réglementation au titre de police de l'eau ». Les critères et les listes de l'arrêté ne sont donc pas imposables aux délimitations de zones humides hors celles de la police de l'eau.

1.1.2. Types de zones humides :

Le guide technique inter-agences « Les zones humides et la ressource en eau » (2002) définit les zones humides comme étant « des interfaces, des espaces de transition entre le milieu terrestre et les eaux superficielles ou marines », ce qui correspond à la définition de la Loi sur l'Eau.

Le terme « zone humide » recouvre donc une grande variété de situations et de caractéristiques. Les agences de l'eau ont ainsi défini 10 grands types de zones humides (Figure 5) selon leur nature, leur eau (douce, saumâtre ou salée), leur régime hydrique (eau courante ou stagnante) et leur contexte géographique (en altitude, liée au cours d'eau, etc.).

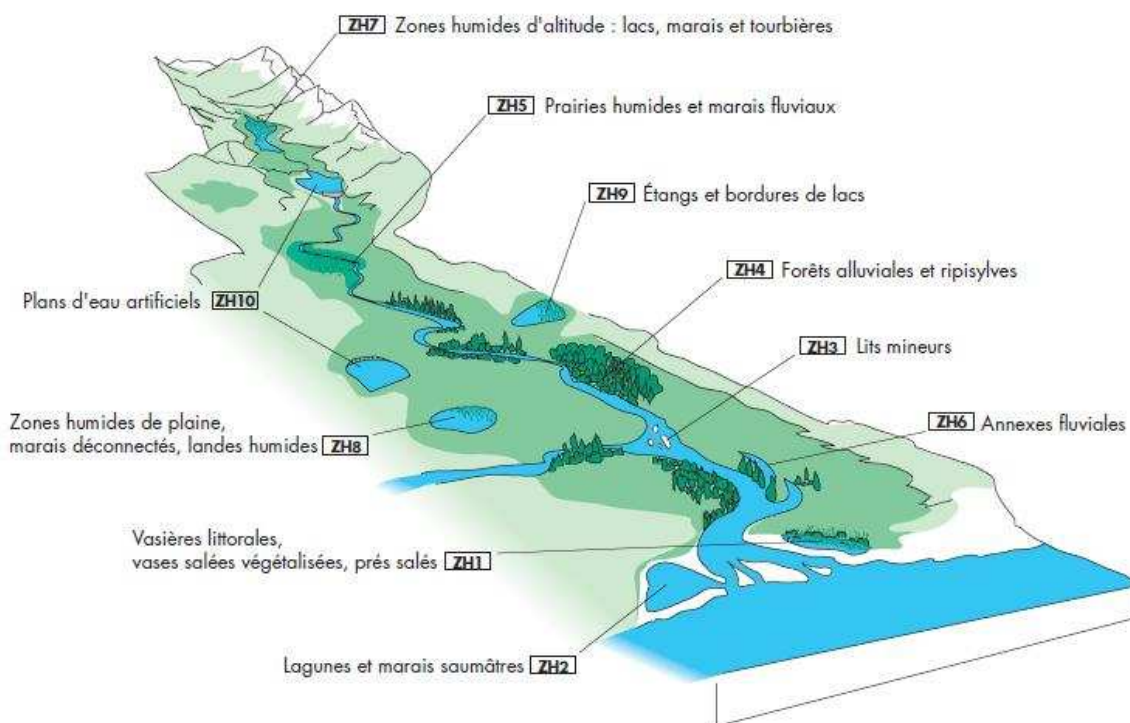


Figure 5 : Les différents types de zones humides selon les Agences de l'eau (2002)

1.1.3. Services rendus par les zones humides

Les zones humides sont des milieux riches en nutriments qui jouent différents rôles dans le maintien de la biodiversité. De plus, elles maintiennent le niveau des nappes phréatiques et jouent un rôle important dans la rétention d'eau ce qui permet la diminution des débits des crues en aval et le soutien des débits à l'étiage. Enfin, les zones humides contribuent à retenir et transformer les polluants (organiques et minéraux) présents dans les eaux de surface et les eaux souterraines.

1.2. La réduction des transferts d'azote par les zones humides

Les zones humides au confluent d'un vallon et d'un cours d'eau peuvent avoir un rôle de rétention et d'élimination de l'azote transféré depuis les parcelles agricoles du versant vers le cours d'eau.

De plus, les milieux humides présentent des transitions marquées d'humidité et donc de zones aérobies et de zones anaérobies. Ainsi, Schipper et al (1993) ont observé des taux de dénitrification dans les sols de zones humides trois fois plus importants que dans les autres sols mieux drainés du même bassin versant.

Les processus de rétention et élimination de l'azote dans les zones humides ne présentant pas d'eau libre (les prairies humides et les ripisylves) sont donc semblable à ceux qui ont lieu dans les zones tampons « sèches ». En revanche, le pouvoir tampon des zones humides conservant, au moins une grande partie de l'année, un niveau d'eau libre (fossés humides, mares et marais) est différent de celui des milieux « secs » et est encore peu connu. Le CORPEN (2007), ne classe donc pas ces milieux dans la catégorie des zones tampons mais ils sont cependant proposés au titre d'aménagements complémentaires.

2. Le drainage et les transferts d'azote

Le drainage consiste à favoriser le ressuyage des sols par un réseau de drains enterrés. En favorisant l'évacuation de l'eau du sol, le drainage artificiel des parcelles agricoles permet d'éviter l'engorgement hivernal de certains sols.

La part de la SAU drainée était de 10% en 2000 (Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2010a). Cette part n'a cessée d'augmenter depuis les années 1970. Selon le Cemagref (2006), le drainage fonctionne généralement de novembre/décembre à mars/avril. La saison de drainage intense a lieu pendant les mois de janvier et février. Les volumes d'eau drainés sont plus faibles pendant les mois de novembre et décembre et de mars et avril.

Le drainage des parcelles permet une circulation et une évacuation rapide des eaux à travers le sol. Les eaux de drainage sont donc souvent chargées en nitrates selon Arlot (1989). Les drains court-circuitent les bandes enherbées tampons qui sont placées entre la parcelle et le cours d'eau et favorise ainsi le transfert de ces polluants vers les milieux aquatiques.

3. Intérêts

3.1. Pourquoi des zones tampons humides artificielles ?

Les zones humides conservant, au moins une grande partie de l'année, un niveau d'eau libre peuvent être intéressantes pour recueillir et traiter les eaux issues du drainage agricole car elles peuvent recevoir de plus grands volumes d'eau qu'une prairie humide ou une ripisylve.

Néanmoins, les zones humides naturelles sont des milieux très souvent dégradés ou menacés. Ainsi, il est préférable de ne pas anthropiser d'avantage ces milieux en y rejetant les eaux issues du drainage agricole. La création de dispositifs artificiels « mimant » les milieux naturels peuvent donc apporter une réponse au problème posé par les eaux de drainage artificiel.

Ces installations sont nommées ici « zones tampons humides artificielles » (ZTHA) mais il existe d'autres appellations comme « ouvrages de rétention et remédiation » (O2R).

3.2. Objectifs

Les milieux humides artificiels sont très employés pour le traitement des eaux usées (domestiques ou industrielles) mais sont, pour le moment, très peu utilisés pour le traitement des eaux de drainage artificiel.

Les ZTHA sont conçues dans le but de recréer un écosystème caractéristique des zones humides naturelles. Les avantages généralement recherchés sont donc :

- la rétention du phosphore,
- la dégradation des produits phytosanitaires,
- La rétention des matières en suspension,
- la favorisation de la dénitrification,
- la réduction de l'intensité des pics de crue,
- la régulation du débit du cours d'eau,
- la diversification des habitats pour la faune et la flore,
- La possibilité de renaturer le cours d'eau une fois que les exutoires de drains ont été retirés du lit mineur

IV. DESCRIPTION DES ZTHA, EFFICACITES ET COUTS

1. Généralités

1.1. Les différents types

On distingue deux grands types de ZTHA : les fossés et les mares. Elles peuvent correspondre à :

- des installations ayant comme objectif le traitement des eaux de drainage,
- des installations préexistantes créées pour un usage passé ou présent auxquelles on a ajouté un usage de traitement des eaux par la mise en place d'un rejet de drains et/ou d'aménagements spécifiques.

Une zone humide artificielle peut abriter un patrimoine biologique remarquable, il est donc conseiller de réaliser une étude d'impact avant d'aménager ces ouvrages pré-existants.

Le choix du type d'installation se fait en général en fonction des caractérisations du site. Il est aussi possible d'en faire succéder plusieurs du même type ou de types différents (Sac, 2007).

1.2. Recueillir toutes les eaux ou une partie

Comme le montre le Figure 6, les concentrations en nitrates peuvent atteindre de très fortes valeurs lors des premiers écoulements de l'année, en lien avec la minéralisation estivale et les fertilisations de l'automne. Selon Arlot (1991), la concentration moyenne annuelle en sortie de drainage en France oscille entre 10 et 90 mg/l N-NO₃. Mais les pics de concentration peuvent atteindre 220 mg/l.

Si la ZTHA a une capacité de rétention des eaux faible, il peut donc être intéressant d'installer des clapets en amont afin de recueillir uniquement les eaux les plus chargées et ainsi accroître le temps de résidence de celles-ci.

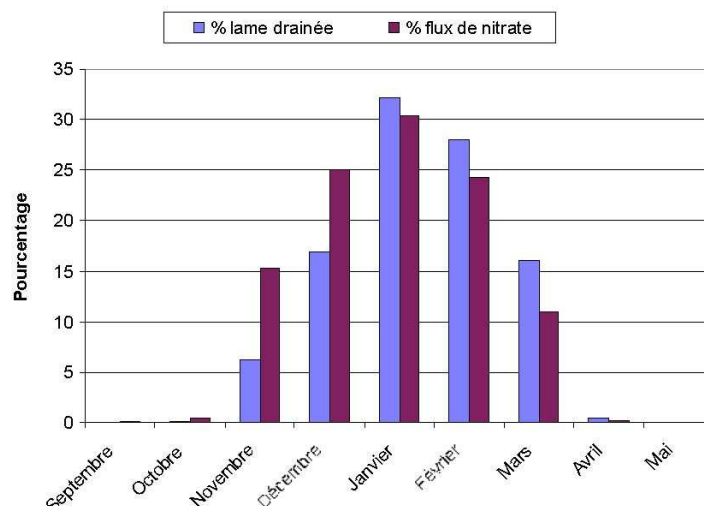


Figure 6 : Moyenne des contributions mensuelles des flux d'une saison complète de drainage, site de La Jaillière, Loire Atlantique (eau: 220 mm/saison et nitrate : 38 kgN/ha/saison, moyenne de 1989 à 1997) (Tournebize et al., 2005)

2. Les facteurs d'efficacité

L'activité de dénitrification dans une zone humide tampon artificielle n'est pas constante dans l'espace et dans le temps. Elle est dépendante de la charge hydraulique, du temps de résidence, de la profondeur de colonne d'eau, de la concentration en nutriments de l'eau entrant, du type de sol, de la végétation, de la physico-chimie de l'eau, du développement sur les rives et de la température (Carter, 1986).

Plus la charge hydraulique est importante, plus le temps de résidence est faible. Ce qui a pour conséquence une diminution de l'efficacité. De plus, à une température inférieure à 5°C, la dénitrification est très faible selon Passeport (2010). Enfin, la végétation plantée ou naturelle freine l'écoulement dans la ZTHA. Le temps de résidence peut donc être allongé, ce qui favorise l'épuration de l'azote. De plus, plus la végétation est dense, plus les besoin de celle-ci en azote est important.

Ainsi, l'efficacité d'une ZTHA est très variable selon le climat et la saison : 64.6% au printemps et 49.3% en automne selon Xia et al. (2006).

3. Les fossés d'épuration

3.1. Description

Sac (2007) définit un fossé d'épuration comme étant une « longue cavité creusée dans le sol pouvant former des méandres et plantée ou naturellement colonisée de végétation herbacée. »

Des fossés ont toujours été très présents en sortie de nombreux drains mais ceux-ci sont généralement rectilignes et la végétation y est faible. Pour être efficaces, les fossés doivent

être en pente douce et comporter une végétation dense afin que les écoulements soient ralentis (Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2010a). Des zones de stagnation peuvent être aménagées.

La géométrie du fossé, la longueur, la pente et la rugosité des parois conditionnent la capacité de stockage et le ralentissement des écoulements et donc l'efficacité d'épuration (Sac, 2007).

Les sols nécessitant un drainage artificiel comportent souvent une couche imperméable qui crée des conditions locales d'anaérobie. Les fossés creusés sur ces parcelles peuvent donc présenter un milieu favorable au processus de nitrification/dénitrification.

3.2. Exemple d'installation

Les fossés peuvent être installés, à chaque exutoire de drain ou être parallèle au cours d'eau afin de recueillir les eaux de plusieurs drains. L'Agence de l'Eau Rhin-Meuse (2010b) propose les deux options. Ces aménagements rustiques ont été pensés pour pouvoir être installés dans la bande végétalisée obligatoire de 5m en bord de cours d'eau.

3.2.1. Fossé pour exutoire unique de drain :

L'Agence de l'Eau Rhin-Meuse (2010b) conseille de couper le drain quelques mètres en amont de l'émissaire, d'implanter le fossé entre l'exutoire et l'émissaire et, éventuellement, de végétaliser les berges avec des herbacées ou des arbustes.

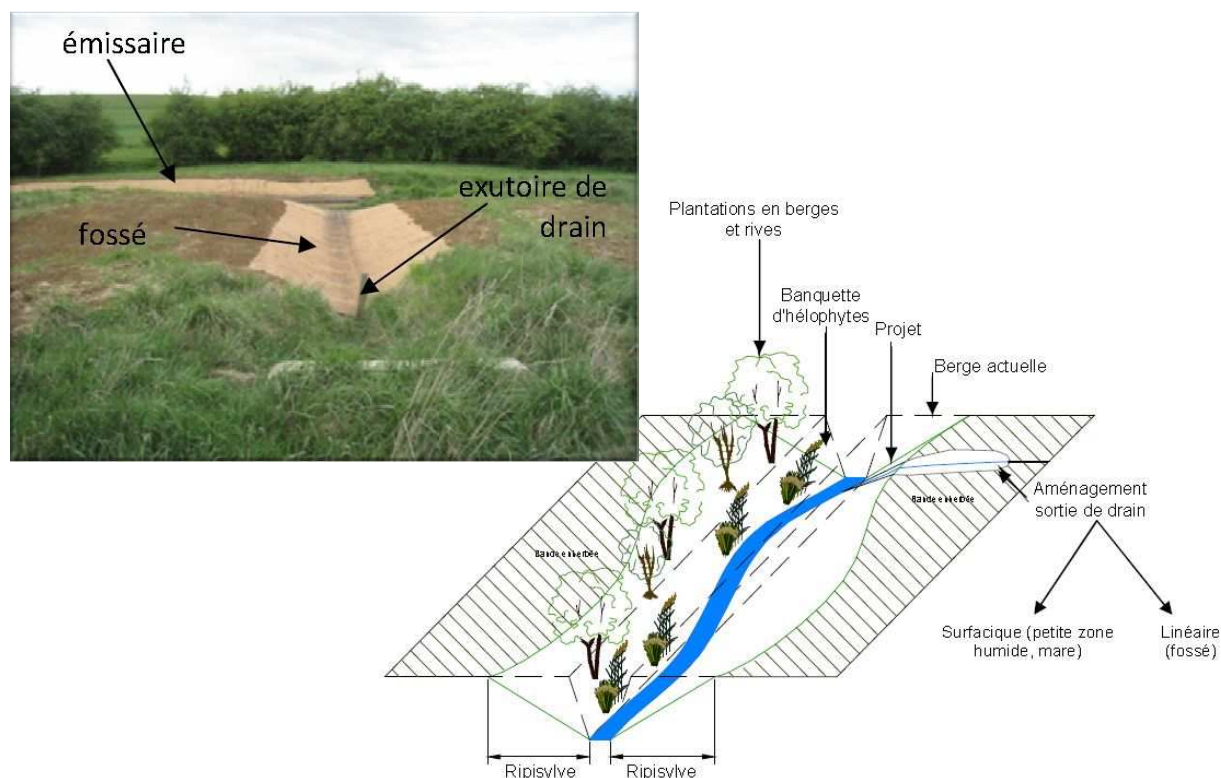


Figure 7 : Aménagement ponctuel de sortie de drain. Photo de l'INRA de Mirecourt et schéma de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse

3.2.2. Fossé pour plusieurs exutoires de drains :

Lorsque les exutoires de drains sont nombreux, l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse (2010b) propose la mise en œuvre de fossés enherbés parallèles au cours d'eau, se déversant en fin de parcelle.

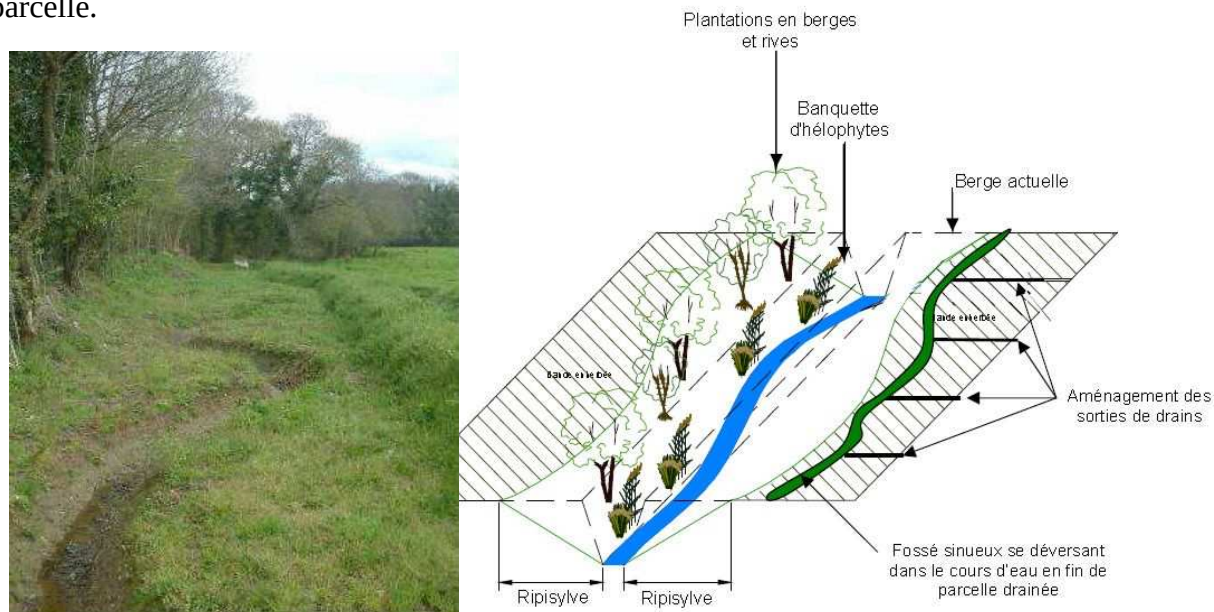


Figure 8 : Aménagement de sorties de drains par un fossé sinueux. Photo de l'INRA de Mirecourt et schéma de l'AERM

3.3. Avantages et inconvénients

Les fossés ont l'avantage d'être des installations légères, qui utilisent une faible surface. Par contre la capacité de stockage des fossés est généralement faible. Lorsque les débits en sortie de drains sont très importants, il y a une montée des eaux dans le fossé et les écoulements sont rapides. L'épuration n'a donc pas lieu. De plus, l'efficacité des fossés épurateurs sur la rétention et l'élimination de l'azote n'a pas encore été démontrée.

4. Les mares

4.1. Description

Sac (2007) définit une mare comme une « étendue d'eau stagnante de surface et de profondeur relativement faible ».

De la même manière que pour les fossés, il existe de nombreuses mares artificielles créées pour de multiples usages mais celles-ci ne sont pas forcément efficaces pour la rétention et l'élimination de l'azote. Il faut pour cela qu'elles remplissent certaines caractéristiques morphologiques.

Les ZTHA type mares peuvent être installées à l'exutoire d'un réseau de drainage ou à la suite d'un fossé qui recueille l'eau de plusieurs drains selon Tanner et al. (2010). Elles peuvent être plantées ou être colonisées naturellement par la végétation.

La mare doit être conçue de telle sorte qu'elle forme une étendue d'eau principalement permanente avec des bords en pente douce. Cette configuration crée alors des conditions hydrologiques variées, certaines zones étant alimentées et inondées en permanence et d'autres par intermittence. Ces conditions hydrologiques sont propices à la croissance et au développement de différentes plantes et bactéries propres aux zones humides et favorisent la dégradation des nitrates dans des conditions aérobies et anaérobies (ArtWET).

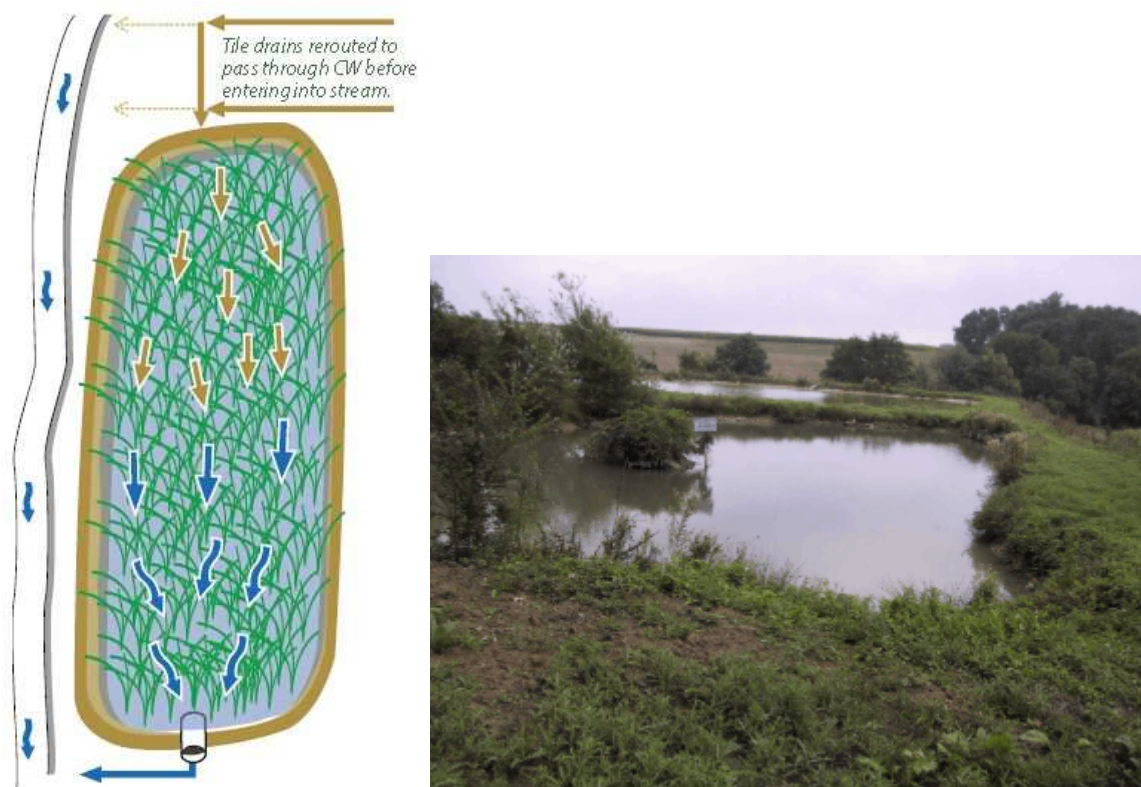


Figure 9: ZTHA de type mare. Photo du Cemagref et Schéma de Tanner et al., 2010

4.2. Efficacité

Le Tableau 2 synthétise l'efficacité de rétention d'azote mesurée dans divers ZTHA de type mares.

Tableau 2 Synthèse des publications étudiées

Publication	Efficacité %	Commentaires
Kovacic et al. 2006	16 → 43	% sur masse N03
Larson et al. 1999	15 → 100	% sur masse Ntot
Kovacic et al. 2000	37	+ 9% avec bande enherbée entre ZTHA et cours d'eau % sur masse Ntot
Borin et Tocchetto 2007	90	% sur masse Ntot
Tanner et al. 2005	21 → 79	% sur masse Ntot

4.1. Facteurs d'efficacité

4.1.1. Superficie

Il faut que la mare soit assez étendue pour que les conditions hydrologiques soient adaptées aux processus d'élimination de l'azote. Ainsi, plus la surface occupée par la mare est grande, plus le temps de résidence est grand et plus l'efficacité est importante, comme le montre la Figure 10.

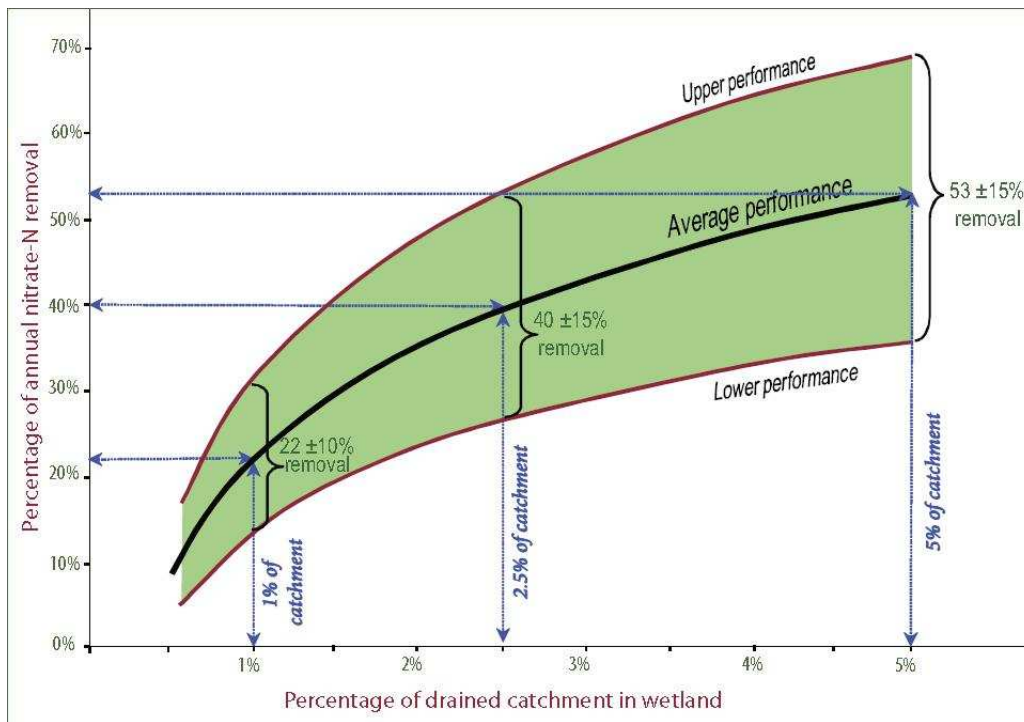


Figure 10: efficacité en fonction de la surface occupée par la mare sur le bassin-versant (Tanner et al., 2010)

4.1.2. Profondeur

De plus, la mare ne doit pas être trop profonde car la diminution de la température de l'eau et des sédiments diminuent l'activité microbienne et la croissance des plantes et donc l'efficacité d'élimination des nitrates. Pfenning et Mac Mahon (1996) ont par exemple montré que le taux de dénitrification dans les sédiments présents dans le lit d'une rivière est 75% inférieur à 4°C qu'à 22°C.

4.1.3. Forme des berges

Enfin, des cycles d'assèchement et d'inondation peuvent augmenter la rétention de l'azote. Des berges à pentes douces sont donc propices à ce processus.

4.1.4. Végétation

Sac (2007) a mis en avant que les mares non-plantées et donc naturellement colonisées par la végétation sont plus efficaces (12 à 55% d'efficacité) que les mares plantées de macrophytes (0 à 97,5% d'efficacité). Néanmoins, il peut être intéressant d'amorcer la recolonisation par la

plantation de quelques plantes (locales de préférence) si le site est favorable à l'installation d'espèces invasives (Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2010a)

5. Autres types de ZTHA

Dans les publications étudiées, d'autres types de ZHTA sont proposées. Ceux-ci sont généralement adaptés à la rétention des produits phytosanitaires, mais peu ou pas adaptés à la diminution du transfert d'azote.

❖ Les zones de rétention en forêt :

Le couvert ligneux n'est pas adapté à l'exportation de l'azote absorbé. Les macrophytes, s'ils sont régulièrement fauchés, participent beaucoup plus efficacement à l'exportation de l'azote.

❖ Les bassins d'orage :

Ceux-ci sont trop profonds pour qu'il-y-ai une bonne dénitrification.

6. Coûts

6.1. Postes de dépenses

ArtWET estime les coûts selon 5 types de postes de dépenses incontournables :

- Les études préliminaires : elles incluent la conception, la faisabilité et les éventuels dépôts de dossiers exigés par la loi (entre 5 000 et 10 000 € pour la globalité)
- Les coûts d'aménagement (dans le cas d'un bassin pré-existant que l'on aménage) : ils englobent généralement les travaux de terrassement, la végétalisation ou les aménagements hydrauliques. Par exemple, pour un bassin versant de 50 ha, le coût de réalisation d'un bassin de rétention est d'environ 10 000 €, celui d'un fossé végétalisé varie de 1 000 à 2 000 €.
- Les coûts d'acquisition des terrains nécessaires à la construction et à l'accès de l'ouvrage qui peuvent varier entre 3000 €/ha dans les zones d'élevage (ouest de la France) à plus de 6000 €/ha (nord de la France, bassin méditerranéen) voire 100 000 € / ha pour le vignoble.
- Les coûts de construction qui s'élèvent environ de 35 à 60 € par m³ d'ouvrage construits (suivant le milieu, l'accessibilité, la nature du sol, ...)
- L'entretien du dispositif : généralement simple (nettoyage) et donc relativement peu onéreux (curage: 2 à 5 € / m³ dans le cas d'un marais au sein d'un environnement naturel, 12 à 14 € / m³ pour le curage d'un bassin d'orage ; de 35 à 80 € / ha pour la fauche d'un bassin végétalisé, de 2 à 4 € / km pour l'entretien des plantations d'un fossé).

6.2. Des coûts très variables en réalité

Selon Agence de l'eau Rhin-Meuse (2010b), le coût des travaux dépendent de la quantité de drains à traiter, de leur profondeur, du devenir des matériaux tassés et du type d'aménagement réalisé (ponctuel, grandes longueurs, fossés, mares,...). La fourchette pourrait être située entre 200 et 1000 € HT pour le traitement d'un drain. Ainsi, les coûts de création d'une ZTHA seraient relativement bas.

Le bassin de rétention du Krottenbach en Allemagne pour le programme ArtWET (voir partie V.1.2.2) a coûté beaucoup plus cher : 23 500 € pour la construction et 51 000 € pour l'achat des terres (ArtWET). La création des deux ZTHA en Indre et Loire, pour le même programme ArtWET a coûté 1200 € d'études et maîtrise d'œuvre, 6522 € de travaux de terrassement et 1177 € de travaux complémentaires réalisés par l'exploitant (Paineau). Soit 8899 € au total.

Cela montre que les coûts de ce type d'aménagement sont très variables, dépendants notamment de la surface et de la nature des travaux envisagés (Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2010a).

6.3. Comparaison entre la mare et le fossé

Tableau 3 : Comparaison des coûts (Vincent)

Installation	Travaux	Entretien (coûts annuels)	Source
mare	9 à 13 € / m ² + coûts moyens pour la création ou l'aménagement d'une mare	9 à 13 € / m ²	Chambre d'agriculture de Seine Maritime (2007)
Fossé végétalisé	Creusement : 3 à 11€ / m linéaire Végétalisation : 100€ / ha	5€ / m linéaire + fauchage : 30€ / ha	Chambre d'agriculture de Seine Maritime (2007)
	210€ / ha + ajouter travaux de terrassement	Fauchage : 70€ / ha	Chambre d'agriculture du Rhône (2008)

Vincent a inventorié plusieurs estimations de coûts et a comparé les coûts de création d'une mare avec le coût de création d'un fossé végétalisé. Sans surprise, pour un bassin-versant de taille égale (20ha), la mare utilise plus d'espace (800m² pour la mare, 120m linéaire pour le fossé) et coûte nettement plus cher (10 500 € pour la mare et 1 920 € pour le fossé).

Néanmoins, il est très probable que l'efficacité d'épuration de l'azote d'une mare soit supérieure à celle d'un fossé.

6.4. Conclusion

Pour réduire les coûts et donc rendre ces aménagements plus accessibles, il est important d'avantager les aménagements rustiques et généralisables et donc éviter les sur-coûts liés aux études préliminaires ou aux entretiens.

V. EXTENSION ET EXEMPLES

1. L'actualité de la recherche scientifique

1.1. A l'international

De nombreuses études scientifiques ont montré le pouvoir épurateur des milieux humides depuis les années 1970 (Sac, 2007). Mais ces recherches se sont majoritairement effectuées sur des milieux humides ne recevant pas de drains agricoles et des milieux humides artificiels pour le traitement des eaux usées (domestiques ou industrielles).

La recherche concernant les ZHTA est beaucoup plus récente. Les premières études scientifiques datent du début des années 1990 (Sac, 2007).

1.2. En France

La recherche sur les processus d'épuration de l'azote dans les milieux humides ainsi que la mise en place d'installations expérimentales sont encore assez faible aujourd'hui en France.

1.2.1. *Les études du PIREN*

❖ Présentation

Le PIREN-Seine est un groupement de recherche (CNRS, ENSMP, INRA, CEMAGREF, CEREVE, Universités et Grandes Ecoles) dont l'objectif est de développer, à partir de mesures de terrain et de modélisations, une vision d'ensemble du fonctionnement du système formé par le réseau hydrographique de la Seine, son bassin versant et la société humaine qui l'investit.

Le PIREN-Seine a lancé plusieurs études sur l'amélioration de l'efficacité épuratoire de l'azote par des milieux humides aménagés :

- Optimisation de la dénitrification dans des anciennes cressonnières dans l'Essonne et création d'un projet de gestion de celles-ci par le Syndicat Intercommunal d'Aménagement, de Réseaux et de Cours d'Eau (SIARCE)
- Amélioration de l'efficacité épuratoire d'une zone humide tourbeuse aménagée en Champagne crayeuse

❖ Observations sur une ZHTA

Dans le domaine des ZHTA, le PIREN a étudié un ouvrage situé en Seine et Marne. Deux anciennes mares (antérieures à 1811) servent d'émissaires aux drains drainants des parcelles agricoles d'une surface totale de 35 ha (CEMAGREF, site internet). Ces mares ont été aménagées, à l'initiative de l'exploitant afin de :

- garantir l'approvisionnement en eau pour l'irrigation et donc limiter les prélèvements sur la ressource en eau souterraine,
- réduire la pollution d'origine agricole,
- diminuer la contribution aux crues à l'aval.

Pour cela, une digue a été installée afin d'augmenter le volume d'eau retenu par la mare en aval. D'après le CEMAGREF (site internet), le volume de la retenue est, après travaux, de 9000m^3 pour une superficie de 3600 m^2 (1% de la surface du bassin-versant) comme le montre la figure 11.

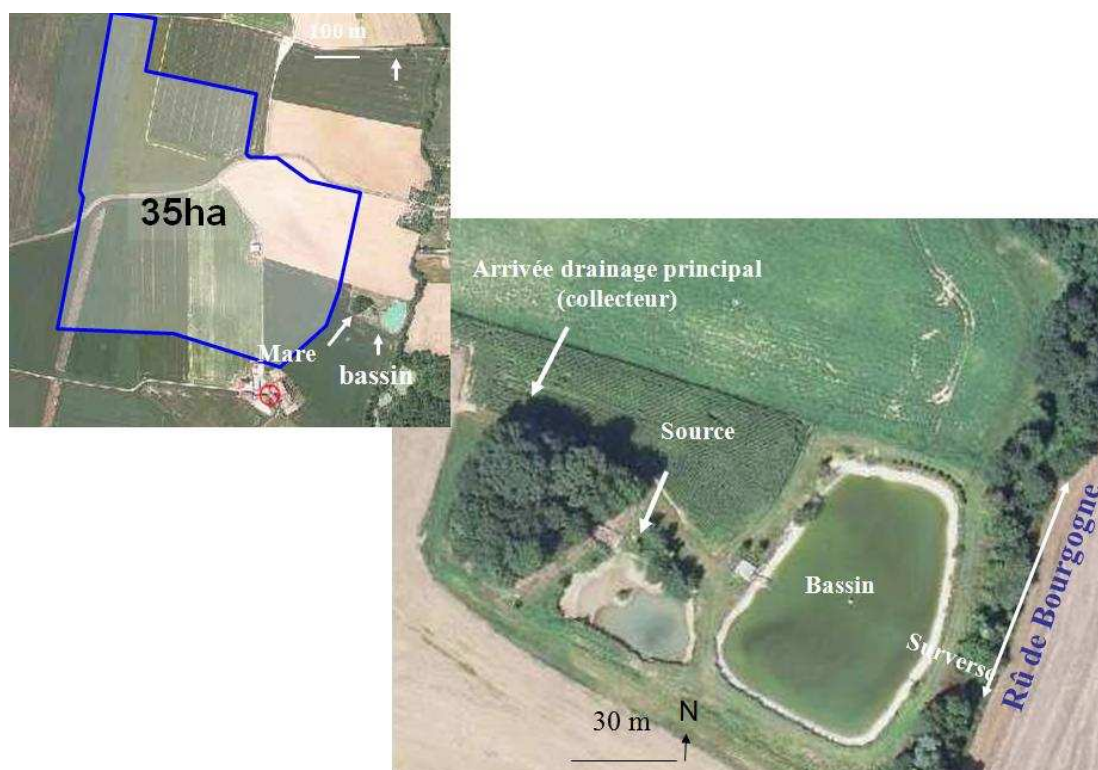


Figure 11: Schéma de l'ouvrage. Tournebize et al.

La figure 12 donne les concentrations moyennes annuelles observées à travers les différents compartiments de l'ouvrage. L'efficacité est de l'ordre de 50%, Tournebize et al.

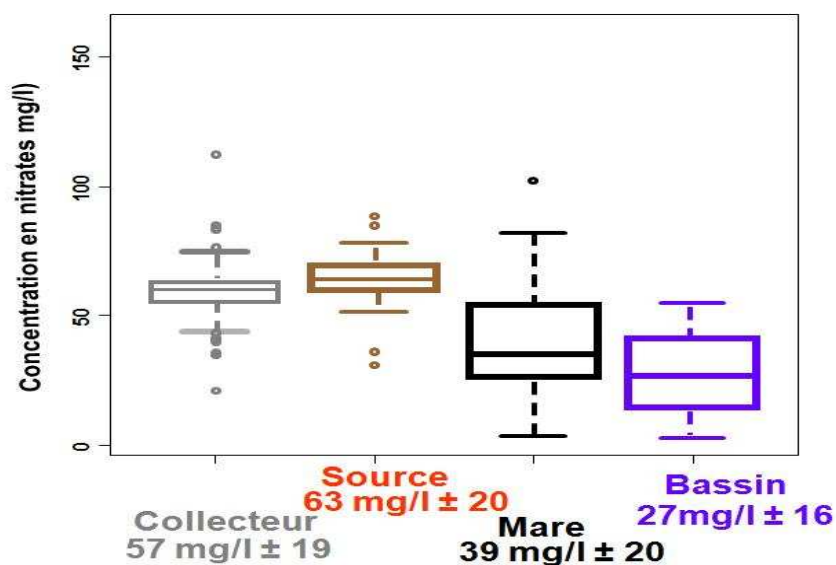


Figure 12 : Concentrations moyennes en nitrates de 2005 à 2009 dans les différents compartiments, Tournebize et al.

La modélisation a permis de montrer l'importance de la profondeur sur la dénitrification. Ainsi, le taux de dénitrification benthique de la mare a été évalué à 10 mgN/m²/h, celui du bassin, plus profond, à 5 mgN/m²/h (Tournebize et al.). L'efficacité vis-à-vis des polluants phyto-sanitaires est en cours d'étude.

❖ Comparaison de scénarios

Tournebize et al. ont utilisé ces observations pour projeter deux scénarios de mise en place de ZTHA à l'échelle du bassin-versant et les comparer (Tableau 4) :

- Une zone humide artificielle unique à l'exutoire du bassin-versant.
- Des ZTHA en sortie des réseaux de drainage (150 aménagements).

Tableau 4 : Comparaison des deux scénarios du PIREN, Tournebize et al.

	zone humide artificielle unique à l'exutoire du BV	ZHTA en sortie de drainage
eau	Agricole et nappe, toute l'année	Agricole, seulement lors de l'écoulement de drainage
emprise foncière/efficacité	3 % de la SAU pour 30% d'efficacité, ouvrage collectif	1% de la SAU pour 50% d'efficacité + prise de conscience des agriculteurs
écologie	Négatif pour les poissons de cours d'eau de rang 1	

1.2.2. Le programme ARTWET

❖ Présentation

Le projet ArtWET (« Mitigation of agricultural nonpoint-source pesticide pollution and phytoremediation in artificial wetland ecosystems ») est un projet européen LIFE ENVIRONMENT, qui a débuté le 1er octobre 2006 et s'est achevé le 30 septembre 2010.

Il vise à mettre en avant et à améliorer des dispositifs de mitigation de la charge en pesticide en sortie d'agro-systèmes.

❖ Expérimentations en Indre et Loire

Trois mares en série et un fossé dans un bois humide ont été creusés à Villedomain (Figure 13), près de Loches, afin d'étudier les processus et l'efficacité des ZTHA dans le traitement des produits phytosanitaires issus du drainage d'un bassin de 46ha (Paineau). Ces aménagements ont été réalisés en partenariat avec le GDA de Loches Montrésor.



*Figure 13 : Site de Villedomain. A gauche : une mare (ArtWET)
et à droite : un fossé dans le bois (GDA)*

L'objectif principal des recherches sur ce dispositif n'est donc pas le traitement de l'azote, mais ces types d'aménagements ont sans aucun doute une certaine efficacité dans l'élimination de l'azote. L'exportation d'azote organique étant plus difficile avec un couvert ligneux qu'avec le système de mares artificielles, il est probable que les mares aient une efficacité supérieure que la zone de rétention en forêt.

Trois autres sites ont été aménagés dans le but de diversifier les expériences et de sensibiliser les agriculteurs (Paineau) :

- une mare tampon et sa zone de dissipation dans une prairie
- un fossé en méandre et une mare tampon dans une zone plus encaissée
- une mare tampon et épandage sur un futur taillis à rotation moyenne

❖ *Autres prototypes du projet Artwet*

- Aménagement du bassin d'orage du Waldweg situé à Rouffach en Alsace.
- Rénovation du bassin de rétention Breitenweg à Eichstetten en Allemagne.
- Renaturation d'un fossé végétalisé et construction d'un bassin de rétention à Landau en Allemagne

Pour l'ouvrage de Landau, les hauteurs d'eau sont faibles, on peut donc s'attendre à une bonne épuration de l'azote.

1.2.3. D'autres programmes en lancement

Deux programmes viennent d'être lancés, ce qui montre que les chercheurs s'intéressent actuellement aux procédés d'épuration naturelle des ZTHA (ou OR2) et au développement de cette technique.

- ENRHY, porté par l'ONEMA, pour une période de 2 ans (2010-2012). Son objectif est de « Développer et tester une démarche d'analyse du potentiel de remédiation des

flux de pesticides dans les eaux de surface par les OR2 : Adaptation à la diversité des situations.»

- PhytoRET porté par Interreg IV (programme de coopération trans-frontalière), pour une période de 3 ans (2010-2013). Son objectif est d' « étudier le potentiel des OR2 pour réduire les flux de pesticide dans les eaux de surface à l'échelle du Rhin supérieur ».

2. Installation à grande échelle, en dehors de programmes scientifiques

2.1. Etat des lieux

Certaines mares et étangs jouent un rôle tampon, malgré le fait qu'ils n'aient pas été aménagés dans ce but. En effet, certains drains agricoles se déversent dans ces mares et étangs qui ont été creusés pour d'autres usages passés ou actuels.

Il existe actuellement très peu de zones tampons humides en France propre au traitement des eaux de drainage. Cette technique est peu connue et peu encouragée par les administrations d'Etat et les collectivités territoriales.

Il est à noter que l'aménagement étudié par le PIREN-Seine et présenté dans la partie V.1.2.1 a été décidé et financé par le propriétaire agriculteur. Ce qui montre que les agriculteurs peuvent être demandeur de ce genre d'ouvrage (notamment pour leur fonction de réserve d'eau).

2.2. L'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, précurseur dans le domaine

L'Agence de l'eau Rhin-Meuse est la seule à promouvoir l'installation massive de ZTHA. Ainsi, l'Orientation T2 - O4.2 « Promouvoir des pratiques agronomiques visant à réduire la pollution des eaux » du SDAGE 2010-2015 met en avant les ZTHA : « La limitation des transferts des pollutions vers les milieux aquatiques passe par les aménagements de l'espace à l'échelle de la parcelle et du bassin versant (zones tampons) et le développement d'approches spécifiques pour gérer le problème posé par le drainage qui court-circuite en grande partie ces dispositifs végétalisés. »

L'Agence de l'eau Rhin-Meuse (2010b) propose aux agriculteurs d'aménager « un fossé diversifié ou une petite zone humide » à l'exutoire des drains lorsque l'agriculteur rencontre « un problème de drains comblés » ou s'il veut « améliorer la qualité de l'eau ».

L'objectif de ses ouvrages recherché par l'Agence de l'Eau est de limiter les transferts de pesticides, de favoriser la sédimentation des MES et de déconnecter les drains du cours d'eau. La réduction du transfert d'azote n'est donc pas pris en compte, d'où l'importance donnée aux fossés par rapport aux mares.

Suite à un travail collaboratif entre l'agence de l'eau Rhin-Meuse, la chambre régionale d'agriculture et l'INRA, des aménagements ont ainsi été mis en place (Chartier et Goetghebeur, 2010) :

- Système de fossé large (91m de long et 2,5-3m de large) avec une zone préférentielle de stagnation à Manoncourt-sur-Seille (54).
- Système de fossé à étage (20m de long et 3,5m de large), planté de roseaux à Broussey (55). Les étages sont des seuils permettant de freiner l'écoulement des eaux.
- Système de fossé Saint Hilaire-en-Woëvre (55) avec seuils réalisé par le CPIE
- Mare triangulaire 45.5 m3 prolongé par un bras mort à Ollainville (88), dans la bande enherbée.

D'autres dispositifs sont en train d'être aménagés et des suivis qualitatifs et quantitatifs ont été mis en place (Chartier et Goetghebeur, 2010).

Les systèmes rustiques, acceptables dans toutes les situations sont ainsi favorisés par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse afin d'éviter des coûts trop onéreux et de simplifier l'installation. Il est néanmoins important de s'assurer de leur efficacité dans toutes les situations envisagées.



Figure 14 : mare de Ollainville (AERM)

2.3. Une initiative locale récente

Une initiative locale, liée à l'adduction en eau potable à vue le jour en Seine et Marne. Quatre aménagements de type ZTHA ont été créés sur le périmètre de l'aire d'alimentation de captage de Nangis, en complément d'actions de réduction des intrants. La maîtrise d'ouvrage est soit publique (syndicat de rivière) pour l'un des aménagements, soit privée (agriculteurs) pour les 3 autres. La surface cumulée des aménagements correspond à 0,5% de la surface du bassin versant (Tournebize, 2011).

VI. PERSPECTIVES

Actuellement, la création de ZTHA est très faible en France. Néanmoins, en considérant la prise de conscience actuelle de l'effet des activités agricoles sur la qualité écologique et physico-chimique des cours d'eau et l'échéance donnée par la DCE pour le bon état des eaux, il est probable que l'intérêt porté à ces ouvrages soit grandissant dans les années à venir. Les questions qui se posent alors sont :

- quel acteur est le plus à même d'initier et de réaliser ces ouvrages ?
- Est-ce qu'une implantation massive de ces ouvrages est possible ?

Dans cette partie, deux scénarios vont être proposés : le maître d'ouvrage est une collectivité locale ou le maître d'ouvrage est un agriculteur. Puis seront présentés les aides financières possibles pour ce genre de projet, la réglementation en vigueur, les atouts apportés par les ZTHA à l'agriculture et enfin les limites à ce genre d'installation.

1. Comparaison entre les deux maîtres d'ouvrage possibles

1.1. Le maître d'ouvrage est une collectivité territoriale

La collectivité territoriale est motrice dans la démarche et est propriétaire de l'ouvrage, il n'est donc pas nécessaire d'attendre une initiative des agriculteurs.

Il existe alors plusieurs solutions pour avoir accès au terrain nécessaire :

- Le terrain appartient à la collectivité
- La collectivité territoriale achète le terrain
- Le terrain appartient à l'agriculteur, la collectivité territoriale intervient par une procédure de Déclaration d'Intérêt Général.

Si la collectivité doit acquérir les terrains nécessaires, l'installation de ZTHA peut coûter très cher, ce n'est donc pas une bonne solution.

La Déclaration d'Intérêt Général permet à la collectivité territoriale d'utiliser l'agent public pour réaliser des travaux sur des propriétés privées en toute légalité :

« Art. L.211-7 c. env. : I. - Les collectivités territoriales et leurs groupements ainsi que les syndicats mixtes [...] sont habilités à utiliser les articles L. 151-36 à L. 151-40 du code rural pour entreprendre l'étude, l'exécution et l'exploitation de tous travaux, actions, ouvrages ou installations présentant un caractère d'intérêt général ou d'urgence, dans le cadre du schéma d'aménagement et de gestion des eaux s'il existe, et visant :

1. *La maîtrise des eaux pluviales et de ruissellement ou la lutte contre l'érosion des sols ;*
2. *La lutte contre la pollution ;*
3. *La protection et la conservation des eaux superficielles et souterraines ;*
4. *Les aménagements hydrauliques concourant à la sécurité civile. »*

Ces interventions peuvent coûter cher aux petites communes. La DIG permet ainsi au maître d'ouvrage de faire contribuer aux dépenses ceux qui les ont rendues nécessaires ou qui y trouvent un intérêt, c'est à dire les agriculteurs. Néanmoins, cette procédure est lourde et fait l'objet d'une enquête publique et il est donc préférable que la population soit convaincue de l'intérêt du projet.

1.2. Le maître d'ouvrage est l'agriculteur

L'agriculteur est propriétaire du terrain et de l'ouvrage. Il faut que les investissements financiers et en temps ainsi que la surface prise sur le foncier soient minimisés.

1.2.1. 1^{er} défi : Minimiser le temps de travail supplémentaire

L'évolution des ZTHA conduit naturellement à un comblement progressif. L'entretien de la zone est primordial afin de maintenir les capacités épuratoires. L'entretien des ZTHA consiste à curer le fond des bassins (probablement effectué par une entreprise spécialisée) lorsque le besoin se fait sentir et à faucher une partie de la végétation tous les ans.

Les ZTHA n'amènent donc pas une charge quotidienne de travail, mais créent tout de même une charge de travail ponctuelle à l'agriculteur.

1.2.2. 2nd défi : Minimiser la consommation de surface agricole

Il faut que l'emprise sur le foncier soit très limitée, c'est pour cela, que l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse propose d'utiliser les 5 mètres de bande enherbée obligatoire.

Dans tous les cas, une ZTHA s'étend sur 1 à 5% de la surface des parcelles drainées et peut être installée sur un terrain peu productif. La ZTHA n'apporte donc pas une forte consommation de l'espace.

1.2.3. 3^{ème} défi : Minimiser les coûts

L'installation d'une ZTHA peut s'avérer plus ou moins rentable pour les agriculteurs s'ils se trouvent dans des zones présentant une vulnérabilité de la ressource en eau et s'ils sont dépendants d'une importante ressource en eau pour irriguer leurs parcelles. Car ils peuvent stocker l'eau pour l'irrigation.

Dans tous les autres cas, les agriculteurs n'ont actuellement pas d'intérêt économique à l'installation d'une ZTHA. Pour les inciter à réaliser ces ouvrages, il faut soit les rendre obligatoire, soit proposer un dédommagement financier.

❖ Les Mesures Agro-environnementales

Les MAE ont été mises en place en 1992 et modifiées en 1999 puis 2005. Ce sont des aides financières qui permettent aux agriculteurs volontaires de compenser la perte de revenus et les surcoûts occasionnés par la mise en place de certaines pratiques plus respectueuses de l'environnement. Le versement des aides est conditionné au respect d'un cahier des charges souscrit pour une durée de cinq ans. En France, la programmation 2007-2013 classe les neuf MAE selon trois grands types de dispositifs :

- 2 dispositifs nationaux (ex : la Prime Herbagère Agroenvironnementale- PHAE).
- 6 dispositifs déconcentrés à cahier des charges national (ex : la protection des races menacées PRM).
- 1 dispositif déconcentré zoné (les MAE territorialisées-MAET).

Les MAET doivent permettre aux agriculteurs d'adapter leurs pratiques agricoles à des enjeux environnementaux identifiés sur leur exploitation. Elles sont sélectionnées par chaque département parmi l'ensemble des MAET proposées. Les cahiers des charges sont alors définis en fonction des enjeux environnementaux du territoire, à partir d'une liste d'engagements unitaires définis au niveau national.

Seul l'entretien d'une ZTHA peut permettre l'obtention d'une aide financière. Ces aides correspondent à deux engagements unitaires type MAET :

- linea 6 : entretien des fosses et rigoles de drainage et d'irrigation [...].
- linea 7 : restauration et/ou entretien de mares et plans d'eau.

Il n'existe donc pas d'aide pour la création de ZTHA. Néanmoins, comme l'ont été les bandes enherbées, on peut imaginer que les ZTHA deviennent un engagement MAET ou MAE dans les prochaines années si les ouvrages démontrent leur capacité épuratoire.

1.3. Les aides financières

Quelque soit le maître d'ouvrage, certaines aides peuvent être demandées pour la réalisation de ce type de projet.

1.3.1. Subvention de l'Agence de l'Eau

La législation permet aux agences de l'eau d'aider financièrement des projets.

Art.R213-32 c. env. : I. - Pour l'exercice de ses missions définies aux articles L. 213-8-1 et L. 213-9-2 :

- 1. L'agence peut attribuer des subventions, des primes de résultat et consentir des avances remboursables aux personnes publiques ou privées, dans la mesure où les études, recherches, travaux ou ouvrages exécutés par ces personnes et leur exploitation entrent dans le cadre de ses attributions. Elle s'assure de la bonne utilisation et de l'efficacité des aides versées.*

1.3.2. Subventions des collectivités territoriales

Les aides qu'attribuent les collectivités territoriales sont décidées par chacune d'elles. Elles dépendent de la politique et des objectifs de chaque acteur.

1.4. Conclusion

A l'heure actuelle, il est donc préférable à ce que les collectivités locales se chargent de la mise en place et de l'entretien des ZTHA. L'installation de tels ouvrages par l'agriculteur se confrontant à un obstacle majeur : le financement.

Les collectivités locales ont le choix entre acheter le terrain nécessaire, ce qui engendre des coûts importants ou réaliser une DIG qui est une démarche lourde. Elles pourront demander des aides à l'agence de l'eau et aux collectivités territoriales et, si elles le désirent, demander une participation financière de l'agriculteur propriétaire dans le cadre d'une DIG.

2. Réglementation

Selon la nature des aménagements à réaliser, ces derniers peuvent être soumis à déclaration ou à autorisation (le régime le plus sévère détermine la procédure à mettre en œuvre).

3.2.3.0 : Plans d'eau permanents ou non :

- 1- dont la superficie est supérieure ou égale à 3 ha → autorisation*
- 2- dont la superficie est supérieure à 0,1 ha mais inférieure à 3 ha → déclaration*

2.1.5.0 : Rejet d'eaux pluviales dans les eaux superficielles ou sur le sol ou dans le sous-sol, la surface totale du projet, augmentée de la surface correspondant à la partie du bassin naturel dont les écoulements sont interceptés par le projet étant :

- 1- supérieur ou égale à 20 ha → autorisation*
- 2- supérieure à 1 ha mais inférieur à 20 ha → déclaration*

Il est à noter que les eaux issues du drainage agricole ne sont pas forcément considérées comme pluviales puisqu'elles ont subi une modification lors de leur cheminement et une utilisation. La législation n'est pas claire sur ce point.

Le régime de déclaration implique une procédure simple et rapide mais le régime d'autorisation implique une procédure longue avec étude d'incidence ou d'impact et enquête publique.

Si la surface de la mare est inférieure au seuil de déclaration, cela n'évite pas toute procédure administrative. Ainsi, conformément à l'art. 92 du Règlement Sanitaire Départemental (RSD) type, la création d'un plan d'eau non soumis à la « nomenclature eau » nécessite une autorisation du maire.

Art. 92 du RSD type :

- La création des mares ne peut se faire qu'avec autorisation du maire.*
- Leur implantation doit satisfaire aux prescriptions générales ou particulières relatives aux périmètres de protection des sources, puits, captages ou prises d'eau.*
- Elle est, en outre, interdite à moins de 35 mètres : des sources et forages, des puits [...]. A moins de 50 m des immeubles habités ou habituellement occupés par des tiers,*

des zones de loisirs ou des établissements recevant du public, à l'exception des installations de camping à la ferme.

❖ Code de l'urbanisme :

Les opérations de creusement pour augmenter le volume ou en créer un sont règlementées par le code de l'urbanisme sous le terme « d'affouillement de sol ». De plus, il faut que l'implantation de l'ouvrage soit en compatibilité avec le Plan Local d'Urbanisme (PLU) ou le Règlement National d'Urbanisme.

Tableau 5 : Permis d'aménager et déclaration préalable au titre du code de l'urbanisme

	Déclaration préalable	Permis d'aménager	Pas de formalité
Secteur non sauvegardé	profondeur/ hauteur ≥ 2 m 2 ha $\geq$ Superficie ≥ 100 m ² R* 421-23 c. urb.	profondeur/ hauteur ≥ 2 m Superficie ≥ 2 ha R. 421-19 c. urb.	Aucune demande si profondeur/ hauteur ≤ 2 m Superficie ≤ 100 m
Secteur sauvegardé Sites classés Réserves naturelles	Dès qu'il y a modification des abords d'un bâtiment existant R* 421-24 c. urb.	profondeur/ hauteur ≥ 2 m Superficie ≥ 100 m ² R. 421-20 du c. urb.	-

❖ Devenir des boues de curage et de la végétation

Les boues, peuvent être traitées en station d'épuration ou dans un centre spécialisé selon les contaminants présents. Si elles ne présentent pas de trop forts taux de polluants, elles peuvent aussi être épandues (Sac et al., 2008).

Une partie des végétaux faucardés peuvent éventuellement être maintenue dans les bassins pour constituer un apport en matière organique, le reste doit être exporté. Ils peuvent être incorporé à du compost si ils ne présentent pas de trop fortes taux de polluants (Sac et al., 2008).

❖ Utilisation de l'eau pour l'irrigation

En principe, l'eau contenue dans ces ouvrages a le statut de res propria : *Art. 641 c. civ. : « Tout propriétaire a le droit d'user et de disposer des eaux pluviales qui tombent sur son fonds. »*. Il est donc possible de retenir l'eau issue du drainage et de l'utiliser pour l'irrigation.

2.1. Atouts pour l'agriculture

2.1.1. Eviter le comblement des exutoires drains et de l'émissaire

Le calage des exutoires est généralement profond (plus de 1 m voire parfois plus de 2 m de profondeur), ce qui a souvent conduit à un recalibrage des ruisseaux en complément du drainage (Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2010b). Le cours d'eau recalibré tend à se combler pour retrouver sa forme naturelle, ce qui a pour effet de colmater l'exutoire du drain. La présence d'une zone de décantation entre l'exutoire du drain et le cours d'eau permet ainsi d'éviter l'envasement.

2.1.2. *Diversification de la faune*

La colonisation des ZTHA par une faune spécifique serait, selon Sac et al. (2008), un atout pour les zones agricoles, milieux peu diversifiés. Les ZTHA peuvent par exemple servir d'habitat aux auxiliaires de culture.

2.1.3. *Amélioration de l'image du drainage artificiel :*

Contrairement aux réductions de doses des intrants qui ne sont pas quantifiables par le grand public, les ZTHA sont visibles et améliorent l'image de l'agriculture et du drainage artificiel (Paineau).

2.1.4. *Avoir la possibilité d'installer de nouveaux réseaux de drainage*

La loi sur l'Eau de 1992 demande à ce que les zones compensatoire soient prévues dans les nouveaux projets de drainage qui sont soumis à autorisation. Les agriculteurs qui sont autorisés à mettre en place un réseau de drainage devraient donc créer une zone humide compensatoire. Il est probable qu'une ZTHA puisse être considérée comme une mesure compensatoire.

2.2. Limites et inconvénients

2.2.1. *Evolution*

Sur le long terme, des espèces animales et végétales peuvent s'installer sur les ZTHA. Certaines de ces espèces peuvent être protégées. Il serait alors nécessaire de faire évoluer les pratiques de gestion et d'entretien vers des pratiques respectant ces espèces et leur habitat.

2.2.2. *Inconvénients*

La stagnation des eaux de surface provoque généralement une augmentation de leur température ce qui peut créer une perturbation dans le cours d'eau en aval (Tournebize et al.).

Lors du processus de dénitrification, il peut y avoir création de grande quantité de N_2O , puissant gaz à effet de serre (Stadmark et Leonardson, 2005).

2.2.3. *Ne pas négliger les actions préventives*

Il est important de garder à l'esprit que la ZTHA est une technique curative qui ne peut se substituer aux actions préventives et correctives sur le bassin-versant. Ces zones tampons sont à installer pour lutter contre les pollutions dues à des erreurs ponctuelles mais il est avant tout nécessaire de renforcer les actions visant à réduire les quantités d'intrant et le surplus azoté sur le bassin-versant.

Ainsi, selon Sac (2007), il est important de ne pas considérer les ZTHA comme la solution à tous les problèmes permettant l'application en amont de pratiques agricoles non adaptées.

Il est à noter qu'un changement des pratiques agricoles reste une mesure plus efficace et moins coûteuse que d'installer une ZTHA comme l'ont montré Arheimer et al. (2004).

Tableau 6 : Tableau de comparaison des estimations économiques d'un scénario de changement de pratiques agricoles et d'un scénario de création de zone humide (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	86
Création de zones humides	- 1,7	-	- 1,7	- 14	8,24

2.2.4. Limite de l'étude

Avant de mettre en place une ZTHA, il est nécessaire de prendre en compte l'efficacité de bioépuration de tous les polluants (azote, MES, phosphore, produits phytosanitaires ...). En effet, une morphologie adaptée au traitement d'un de ces polluants peut ne pas l'être pour un autre.

L'aménagement d'un système saturé pour l'épuration des nitrates (anaérobie) pouvant, par exemple, se traduire par un relarguage de phosphore qui était adsorbé sur les oxydes ferriques (Bidois, 1999).

CONCLUSION

Les zones tampons humides sont efficaces pour la rétention et l'élimination des nitrates lors de leur transfert de la parcelle drainée vers le cours d'eau, mais cette efficacité est très variable. Afin d'améliorer ces systèmes, des chercheurs ont créé plusieurs programmes de recherche.

Pour que ce type de zone tampon puisse se développer il faut favoriser les ouvrages rustiques et généralisables en prenant soin de s'assurer de leur efficacité dans chaque situation car chaque site a des caractéristiques uniques. Etant donné que la DIG est un outil souvent assez lourd pour une collectivité, il serait intéressant que la maîtrise d'ouvrage soit portée par les agriculteurs sur leur propre terrain. Mais les agriculteurs volontaires resteront minoritaires tant qu'il n'existera pas d'outil réglementaire ou contractuel autour de ces aménagements. Le problème qui se pose donc actuellement est la quasi-absence d'outils pour généralisation de ces systèmes.

Il est néanmoins important de garder à l'esprit que ces aménagements sont curatifs, il est primordial de favoriser avant tout la diminution du surplus azoté et les outils de prévention.

BIBLIOGRAPHIE

Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2010a. Guide technique visant à définir les principes à appliquer pour la création de dispositifs rustiques de filtration des eaux de drainage, 14 pp

Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2010b. Guide de gestion des travaux de renaturation des émissaires agricoles de plaine sur le bassin Rhin-Meuse – Fiche technique N°8 : Aménagement des exutoires de drains, 4 pp

Agences de l'eau, 2002. Les zones humides et la ressource en eau, Guide technique inter-agences

Arheimer B., Tortensson G., Wittgren H.B., 2004, Landscape planning to reduce eutrophication: agricultural practices and constructed wetlands, Landscape and Urban Planning, 67 (1-4), pp 205-215

Arlot, M.P., 1989. Caractérisation et limitation de l'impact du drainage agricole sur la qualité des eaux ; recensement des études, inventaire des méthodes et état des connaissances. Rapport Ministère de l'Environnement, 170 pp

Arlot, M.P., 1991. Lessivage d'éléments nutritifs par les eaux de drainage, Mise en valeur des sols difficiles. Drainage et après-drainage des argiles vertes, étude "Hydraulique agricole" n° 11, pp. 47-61.

ArtWET. Réduction de la pollution diffuse due aux produits phytosanitaires et bioremédiation dans les zones humides artificielles, Guide d'accompagnement à la mise en œuvre, ArtWET, 76 pp

Augeard, B., 2002. Fonctionnement hydrologique d'une zone humide : Conséquences sur son potentiel épurateur, Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Sud, École des Mines de Paris et École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 56 pp

Bidois, J., 1999. Aménagement de zones humides ripariennes pour la reconquête de la qualité de l'eau : Expérimentation et modélisation, thèse de l'Université de Rennes 1, 263 pp

Borin, M. et Tocchetto, D., 2007. Five year water and nitrogen balance for a constructed surface flow wetland treating agricultural drainage waters, Science of the Total Environment 380 (2007), pp 38–47

Cemagref, 2006. Rapport d'avancement 2006, TRUST-EA Traitement rustique des eaux agricoles, 55 pp

CEMAGREF, Ouvrages de Maitrise des Ecoulements en milieu Rural [en ligne]. Disponible sur : < <https://omer.cemagref.fr/>>

Chartier, N. et Goetghebeur, P., 2010. Aménagements de dispositifs rustiques de filtration des eaux de drainage, Diaporama, Journée Technique « Hydromorphologie », Agence de l'Eau Rhin-Meuse

CNRS, La pollution par les nitrates [en ligne]. Disponible sur : http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/degradation/07_pollution.htm

Commissariat général au développement durable, Service de l'observation et des statistiques, 2010. L'environnement en France, pp 19-26

CORPEN, 2007. Les fonctions environnementales des zones tampons, Première édition, 176 pp

D.R.A.S.S. d'Ile de France, 2000. Nitrates, 2 pp

Haynes, R. J., 1986. Mineral Nitrogen in the Plant-Soil System. New York : Academic Press, 482 pp

IFEN 2006. L'agriculture et la sylviculture, Les synthèses de l'IFEN, 82 pp

Kovacic, D.A., David, M.B., Gentry, L.E., Starks, K.M., Cooke, R.A., 2000. Effectiveness of Constructed Wetlands in Reducing Nitrogen and Phosphorus Export from Agricultural Tile Drainage, J. Environ. Qual. Vol.29, July-August 2000, pp 1262 - 1274

Kovacic, D.A., Twait, R.M., Wallace, M.P., Bowling, J.M., 2006. Use of created wetlands to improve water quality in the Midwest—Lake Bloomington case study, ecological engineering 28 (2006) pp 258–270

Larson, A.C., Gentry, L.E., David, M.B., Cooke, R.A., Kovacic, D.A., 1999. The role of seepage in constructed wetlands receiving agricultural tile drainage, Ecological Engineering 15 (2000) pp 91–104

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, ENGEES, 60 pp

Molénat, J., 1999. Rôle de la nappe sur les transferts d'eau et de nitrate dans un bassin versant agricole, Université de Rennes I, Rennes, 263 pp.

Paineau, F. Contributions du GDA de Loches Montrésor au projet ARTWET, GDA de Loches Montrésor

Passeport, E., 2010. Efficiency of an artificial wetland and a forest buffer for pesticide pollution mitigation in a tile-drained agricultural watershed, Thèse de l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), 266 pp

Pfenning, K.S. et McMahon, P.B., 1996. Effect of nitrate, organic carbon, and temperature on potential denitrification rates in nitrate-rich riverbed sediments, Journal of Hydrology, v. 187, pp 283-295

Sac, E., 2007. La création de zones humides artificielles : Un outil pour la réduction des effets polluants des réseaux de drainage agricole ?, Université Paul Verlaine, 251 pp

Sac, E., Augeard, B., Birgand, F., Tournebize, J., 2008. Aménager des zones humides pour épurer les eaux agricoles : quels enseignements tirer de l'existant ?, Programme PIREN-Seine : Aménager des zones humides, 26 pp

Schipper, L.A., Cooper, A.B., Harfoot, C.G. et Dyck, W.J., 1993. Regulators of denitrification in an organic riparian soil, *Soil biology & biochemistry*, 25(7), pp 925-933

Schvartz, C., Decroux, J., Muller, J-C., 2005. Guide de la fertilisation raisonnée : Grandes cultures et prairies, Ed. France Agricole, 414 pp

Stadmark, J. et Leonardson, J., 2005. Emissions of greenhouse gases from ponds constructed for nitrogen removal, *Ecological Engineering* 25 (2005) 542–551, pp 542 - 551

Stengel, P., Gelin, S., 1998. Sol : interface fragile. INRA Editions, 222 pp

Tanner, C.C., Nguyen, M.L., Sukias, J.P.S ; 2005. Nutrient removal by a constructed wetland treating subsurface drainage from grazed dairy pasture. *Agric Ecosyst Environ* 105, pp 145–162

Tanner, C.C., Sukias, J.P.S., Yates, C.R., 2010. New Zealand guidelines: Constructed Wetland Treatment of Tile Drainage. NIWA Information Series No. 75 National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd., 54 pp

Tournebize J., Arlot M.P., Birgand F., Kao C., 2005. Synthèse Drainage et Qualité de l'eau, Cas des nitrates, rapport Cemagref pour le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Direction de l'eau, 60 pp

Tournebize, J., Fesneau, C., Chaumont, Thalès, E., Peschard, J., Passy, P., Garnier, J., Billen, G. Bassin de stockage d'eau d'irrigation en sortie de versant drainé, diaporama, PIREN-Seine

Tournebize, J., 2011. Intérêt des zones tampons humides pour protéger les ressources en eau souterraine dans 3 AAC partiellement drainées, Les Rencontres 2011 du GIS GC HP2E « Protection des Aires d'Alimentation de Captage vis à vis des pollutions diffuses »

Turpin, N., Vernier, F., et Joncour, F., 1997. Transferts de nutriments des sols vers les eaux - Influence des pratiques agricoles, *Ingénieries - EAT - N°11*, pp 3 - 16

Vincent, B. Aspects économiques, sociaux et juridiques des zones humides tampon, diaporama, Cemagref

Xia, N., Liu, H-H., Guo, R-M., Zhanc, H-Z., Yang, K., 2006. Research on Nitrogen Removal and Microorganism in a Subsurface Flow Constructed Wetland System in Sihong County, J. China Univ. of Mining & Tech, 16(4), pp 505-508

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1 : Cycle de l'azote dans les sols, les valeurs correspondent à des flux annuels probables en g.N.m⁻², pour une culture céréalière du Nord de la France (Stengel et Gelin, 1998)

Figure 2 : Transferts des eaux sur et dans le sol (CORPEN, 2007)

Tableau 1: Ordre de grandeur des quantités d'azote exporté vers les eaux en fonction de l'occupation du sol (Turpin et al., 1997)

Figure 15 : Moyennes annuelles 2007 des concentrations en nitrates dans les nappes phréatiques, par secteur hydrographique selon le Commissariat général au développement durable (2010)

Figure 16 : Moyennes annuelles 2007 des concentrations en nitrates dans les cours d'eau, par secteur hydrographique selon le Commissariat général au développement durable (2010)

Figure 17 : Les différents types de zones humides selon les Agences de l'eau (2002)

Figure 18 : Moyenne des contributions mensuelles des flux d'une saison complète de drainage, site de La Jaillière, Loire Atlantique (eau: 220 mm/saison et nitrate : 38 kgN/ha/saison, moyenne de 1989 à 1997) (Tournebize et al., 2005)

Figure 19 : Aménagement ponctuel de sortie de drain. Photo de l'INRA de Mirecourt et schéma de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse

Figure 20 : Aménagement de sorties de drains par un fossé sinueux. Photo de l'INRA de Mirecourt et schéma de l'AERM

Figure 21: ZTHA de type mare. Photo du Cemagref et Schéma de Tanner et al., 2010

Tableau 2 : Synthèse des publications étudiées

Figure 22 : efficacité en fonction de la surface occupée par la mare sur le bassin-versant (Tanner et al., 2010)

Tableau 3 : Comparaison des coûts (Vincent)

Figure 23: Schéma de l'ouvrage. Tournebize et al.

Figure 24 : Concentrations moyennes en nitrates de 2005 à 2009 dans les différents compartiments, Tournebize et al.

Tableau 4 : Comparaison des deux scénarios du PIREN, Tournebize et al.

Figure 25 : Site de Villedomain. A gauche : une mare (ArtWET) et à droite : un fossé dans le bois (GDA)

Tableau 5 : Permis d'aménager et déclaration préalable au titre du code de l'urbanisme

Tableau 7 : Tableau de comparaison des estimations économiques d'un scénario de changement de pratiques agricoles et d'un scénario de création de zone humide (Arheimer et al., 2004)

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE.....	1
RESUME	3
ABSTRACT	3
INTRODUCTION.....	4
I. L'AZOTE, DU CHAMP AU COURS D'EAU.....	5
1. Le cycle de l'azote	5
2. La fertilisation et le surplus azoté.....	6
2.1. Fertilisation	6
2.2. Surplus azoté.....	6
3. Transferts de l'azote vers les hydrosystèmes	6
3.1. Transfert des nitrates par lixiviation	7
3.2. Transfert de l'ammonium et de l'azote organique par ruissellement érosif	7
3.3. La pollution des eaux de surface.....	8
4. L'azote dans les hydrosystèmes	8
4.1. Des concentrations importantes.....	8
4.2. Les perturbations liées à la présence de fortes concentrations de nitrates dans les eaux.....	9
4.2.1. Les « marées vertes »	9
4.2.2. Effets sur la santé	10
5. Législation.....	10
5.1. La directive nitrate	10
5.2. La DCE	10
II. LES ZONES TAMPONS.....	11
1. Définition des zones tampons	11
2. La limitation du transfert d'azote.....	12

2.1.	Diminution du transfert de l'azote organique et de l'ammonium	12
2.2.	Dénitrification des nitrates	12
2.3.	Absorption des nitrates par la végétation	12
2.4.	Efficacité des zones tampons sur les transferts d'azote	13
III.	LES ZONES HUMIDES TAMPONS ARTIFICIELLES	14
1.	Le pouvoir tampon des zones humides	14
1.1.	Définitions et particularités des zones humides	14
1.1.1.	Définitions légales des zones humides.....	14
1.1.2.	Types de zones humides :	15
1.1.3.	Services rendus par les zones humides	16
1.2.	La réduction des transferts d'azote par les zones humides.....	16
2.	Le drainage et les transferts d'azote.....	16
3.	Intérêts	17
3.1.	Pourquoi des zones tampons humides artificielles ?	17
3.2.	Objectifs	17
IV.	DESCRIPTION DES ZTHA, EFFICACITES ET COUTS.....	18
1.	Généralités.....	18
1.1.	Les différents types	18
1.2.	Recueillir toutes les eaux ou une partie.....	18
2.	Les facteurs d'efficacité.....	19
3.	Les fossés d'épuration.....	19
3.1.	Description	19
3.2.	Exemple d'installation.....	20
3.2.1.	Fossé pour exutoire unique de drain :	20
3.2.2.	Fossé pour plusieurs exutoires de drains :	21
3.3.	Avantages et inconvénients	21
4.	Les mares	21

4.1.	Description	21
4.2.	Efficacité.....	22
4.1.	Facteurs d'efficacité.....	23
4.1.1.	Superficie.....	23
4.1.2.	Profondeur	23
4.1.3.	Forme des berges	23
4.1.4.	Végétation.....	23
5.	Autres types de ZTHA.....	24
6.	Coûts.....	24
6.1.	Postes de dépenses.....	24
6.2.	Des coûts très variables en réalité	25
6.3.	Comparaison entre la mare et le fossé	25
6.4.	Conclusion.....	25
V.	EXTENSION ET EXEMPLES.....	26
1.	L'actualité de la recherche scientifique	26
1.1.	A l'international.....	26
1.2.	En France.....	26
1.2.1.	Les études du PIREN	26
1.2.2.	Le programme ARTWET	28
1.2.3.	D'autres programmes en lancement.....	29
2.	Installation à grande échelle, en dehors de programmes scientifiques	30
2.1.	Etat des lieux	30
2.2.	L'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, précurseur dans le domaine	30
2.3.	Une initiative locale récente	31
VI.	PERSPECTIVES	32
1.	Comparaison entre les deux maitres d'ouvrage possibles	32
1.1.	Le maitre d'ouvrage est une collectivité territoriale.....	32

1.2.	Le maitre d'ouvrage est l'agriculteur	33
1.2.1.	1 ^{er} défi : Minimiser le temps de travail supplémentaire.....	33
1.2.2.	2 nd défi : Minimiser la consommation de surface agricole.....	33
1.2.3.	3 ^{ème} défi : Minimiser les coûts.....	33
1.3.	Les aides financières	34
1.3.1.	Subvention de l'Agence de l'Eau	34
1.3.2.	Subventions des collectivités territoriales	34
1.4.	Conclusion.....	35
2.	Réglementation	35
2.1.	Atouts pour l'agriculture	36
2.1.1.	Eviter le comblement des exutoires drains et de l'émissaire.....	36
2.1.2.	Diversification de la faune.....	37
2.1.3.	Amélioration de l'image du drainage artificiel :	37
2.1.4.	Avoir la possibilité d'installer de nouveaux réseaux de drainage	37
2.2.	Limites et inconvénients	37
2.2.1.	Evolution	37
2.2.2.	Inconvénients.....	37
2.2.3.	Ne pas négliger les actions préventives	37
2.2.4.	Limite de l'étude	38
	CONCLUSION.....	39
	BIBLIOGRAPHIE	40
	LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX.....	43
	TABLE DES MATIERES.....	44