


Année de programmation 2013 – **Domaine Ecophyto - Action 3 Zone Tampon**



Guide technique à l'implantation des zones tampons humides artificielles (ZTHA) pour réduire les transferts de nitrates et de pesticides dans les eaux de drainage

Version 3

RAPPORT FINAL

Coordinateur : Julien TOURNEBIZE – IRSTEA

Janvier 2015

En partenariat avec :



Direction Départementale des Territoires de Seine et Marne
288, avenue Georges Clémenceau
77 005 Melun cedex



Zone tampon humide artificielle de Rampillon

- Auteurs

Julien TOURNEBIZE, ingénieur, (Irstea), julien.tournebize@irstea.fr
Cédric CHAUMONT, ingénieur, (Irtsea), cedric.chaumont@irstea.fr
Adrien MARCON, stagiaire, (Irstea), adrien.marcon@irstea.fr
Sophie MOLINA, (DDT), stagiaire (DDT 77)
Daniel BERTHAULT, ingénieur, (DDT77)

- Correspondants

Onema : **Claire Billy**, chargée de mission (DAST) claire.billy@onema.fr

Partenaire : **Julien TOURNEBIZE**, ingénieur (Irstea), julien.tournebize@irstea.fr

- Autres contributeurs

L'association AQUI'Brie (François BIRMANT), le bureau d'étude CIAE (Fabrice DUFOUR), l'entreprise SETHY ont largement contribué au projet pilote de Rampillon, ainsi qu'au recueil des éléments constituant ce guide. Sans la contribution de ces partenaires, ce guide n'aurait pu être rédigé. Les aspects réglementaires ont été révisés par J. ROUX, chargée de mission Actions territoriales de protection de la qualité de l'eau Bureau des sols et de l'eau MAAF/DGPAAT/SDBE 3.



Le document a été aussi relu par les membres du groupe technique « Zone Tampon », des bureaux d'étude comme SUEZ, BIOTOPE, et des animateurs de bassins versants comme Contrat Global Loing en Gâtinais, AQUI'Brie, SIRTAVA, syndicats des rivières du Nord-Ouest Gersois ...

Droits d'usage : Accès libre

Niveau géographique : National

Couverture géographique : National

Niveau de lecture : professionnels et experts

	<p>Guide technique à l'implantation des zones tampons humides artificielles (ZTHA) pour réduire les transferts de nitrates et de pesticides dans les eaux de drainage Version 2. Tournebize J., et al. 2015</p>	
---	---	---

- Résumé

Le guide technique rassemble le retour d'expérience de l'équipe d'Irstea en collaboration avec AQU'Brïe, lors de la mise en œuvre de zones tampons humides artificielles (ZTHA) en sortie de parcelles drainées. La mise en œuvre des ZTHA constitue une action complémentaire aux actions de réduction à la source de l'usage des polluants agricoles (nitrate et pesticides).

Le guide présente dans une première partie, des rappels sur le fonctionnement du drainage agricole, et les principes d'une zone tampon humide artificielle. Une ZTHA est un élément du paysage en position tampon entre les parcelles agricoles (le réseau de drainage, dans notre cas) et le cours d'eau. La ZTHA est un bassin de type de rétention hydraulique d'une profondeur entre 0,5 et 1,3 m. En interceptant les flux d'eau chargée en polluants agricoles (nitrate ou pesticides), la ZTHA, un exemple d'ingénierie écologique, favorise leur épuration impliquant des processus naturels d'adsorption, de dégradation pour un temps de résidence qui est le facteur clé de l'efficacité. Un objectif de 50% de réduction en flux est réaliste, avec une emprise foncière de l'ordre de 1% du bassin versant amont. Une configuration en série par rapport au réseau de drainage est la stratégie recommandée dans le cas des nitrates, tandis qu'une configuration en parallèle du réseau de drainage, est recommandée dans le cas des pesticides.

Des solutions techniques pour gérer l'eau en entrée et en sortie de la ZTHA sont proposées à titre d'exemple. Par la recherche d'un compromis entre l'emprise foncière et une efficacité de 50%, un temps de séjour de 7 jours (stocker statistiquement une crue par semaine) est recommandé. Pour un objectif ciblé de réduction des transferts de pesticide, dans une configuration en parallèle du fossé d'assainissement agricole, cette contrainte nous conduit à proposer un dimensionnement moyen à l'échelle nationale des territoires drainés de 76m³/hectare drainé (min 25 m³/ha drainé à max 224 m³/ha drainé). Sur une base de 0,8 m de profondeur, cela correspond à une emprise foncière de 1% du bassin versant amont. Les calculs sont détaillés en annexe. Enfin des recommandations le type de végétation, maintenance, sont proposées.



Ainsi il est souligné l'importance du diagnostic hydrologique (chemin d'écoulement et quantification des flux), de l'étude topographique (disposer de la dénivelée suffisante pour stocker entre 0,5 et 1,3 m d'eau), et de l'étude géotechnique (s'assurer de l'étanchéité de la couche de fond).

En l'état actuel de la réglementation Loi sur l'eau et les milieux aquatiques, les ZTHA doivent être soit déclarées ou soit autorisées au titre de bassin de rétention hydraulique, selon leur dimension. Il est tout de même nécessaire de se rapprocher des services de police de l'eau du département.

Le guide introduit ensuite la méthodologie de mise en œuvre en 7 étapes : avant pendant et après la construction : Étape 1 : Le diagnostic hydrologique - Étape 2 : La localisation - Étape 3 : La conception - Étape 4 : Réglementation et financement - Étape 5 : La construction - Étape 6 : La plantation - Étape 7 : La maintenance.

- mots clés (thématique et géographique)

territoire national ; drainage agricole ; pollution diffuse ; réduction des transferts ; épuration naturelle ; zone tampon humide artificielle ; aide méthodologique ; ingénierie écologique

	<p>Guide technique à l'implantation des zones tampons humides artificielles (ZTHA) pour réduire les transferts de nitrates et de pesticides dans les eaux de drainage Version 2. Tournebize J., et al. 2015</p>	
---	---	---

Technical guide for implementation of artificial wetlands to reduce nitrate and pesticides transfer from subsurface drained watersheds.

- Abstract

The technical guideline gathers feedbacks of experimental projects lead by Irstea in collaboration with AQUI'Brie. The experimental projects dealt with implementation of artificial buffer zones such as constructed wetlands at the outlets of a subsurface drained watershed. Constructed wetlands as non point sources pollution mitigation constitute a complementary tool to reduce agricultural pollutants' transfer through watershed. They have to be jointed to actions focusing on reducing agricultural pollutants (nitrate and pesticides) application at plot scale.

The guideline introduces in a first part, some hydrological aspects about subsurface drainage's functioning, and some general concepts of constructed wetlands. A constructed wetland is a component of the landscape, located in a buffer place between cropping plots (subsurface drained network) and the receiving waterbodies. The constructed wetland looks like a storm water tank, with a water depth between 0.5 and 1.3 m. By intercepting water flows which transfer agricultural pollutants, the constructed wetland, as ecological engineering element, improves the natural processes of retention: sorption, degradation, denitrification. The natural efficiency of removal is strongly dependent on hydraulic residential time.

An objective of 50% reduction in term of annual pollutants fluxes is realistic based on previous scientific results, considering only 1% of upstream watershed surface, dedicated to the restauration of constructed wetland. A on line strategy (directly linked to subsurface drained network) is recommended for the nitrate's issue, whereas off-line strategy (in parallel to the subsurface drained network) is recommended for pesticides' issue.

Technical solutions to manage inlet and outlet water flows through the constructed wetland are proposed as example. To look for a compromise between removal efficiency (50%) and landuse of constructed wetland, a residential time of 7 days is calculated statistically in order to store a flow event every week linked to hydrological functioning (water and pollutants' dynamic) in drained watershed. This assumption leads to propose a constructed wetland design to a national average of 76m³ per drained connected hectare (min 25 m³ per drained hectare to a max. of 224 m³ per drained hectare depending to regional climatic and soil parameters). Based on an average water depth of 0.8m, this volume corresponds to 1 hectare for the constructed wetland of 100 hectares of crop fields. The calculations are detailed in annex. Thus the guideline highlights three crucial points: the preliminary hydrological diagnosis (water pathway, and seasonal fluxes quantification), the topological survey (to insure to dispose of enough slope to dig until 0.5 to 1.3m deep), and the geotechnical survey (to insure that the bottom of the constructed wetland is enough impervious). At least, some recommendations are given about vegetation and maintenance. Considering the current regulation and National Water Law, constructed wetland has to be declared or authorized according to their design threshold to the Water Police Service.

The guideline introduces the methodology to set up constructed wetland at field scale (before, during and after the construction) into seven steps: Step 1 Hydrological Diagnosis – Step 2 Localization – Step 3 Design – Step 4 Regulation and Founding – Step 5 Construction – Step 6 Vegetation – Step 7 Maintenance.

- Key words (thematic and geographical area)

National Level ; Surbsurface drained land ; non point source pollution ; transfer's mitigation ; natural processes ; buffer zone ; constructed wetland ; methodological support ; ecological engineering.

Sommaire

1	Avertissement au lecteur	10
2	Préambule.....	10
	2.1 Qu'est-ce qu'une zone tampon humide artificielle ?	11
3	Introduction	12
	3.1 Quelles sont les personnes concernées par ce guide ?	12
	3.2 Que propose-il ?.....	12
	3.3 Dans quelles situations est-il possible de créer ces ZTHA ?.....	12
	3.4 Sur quoi est basé ce guide ?.....	13
	3.5 Quels sont les champs d'application et les limites du guide ?.....	13
	3.6 Eléments de contexte : le drainage agricole en France	13
	3.7 Comment fonctionne un réseau de drainage ?.....	14
	3.8 Pourquoi est-il important de traiter les eaux de drainage ?.....	15
	3.9 Les principes retenus pour les ZTHA ?.....	15
	3.10 Comment s'intègrent les ZTHA dans le bassin versant ?	16
	3.11 Comment les ZTHA retiennent-elles les polluants des eaux de drainage ?	17
	3.12 Quels sont les facteurs influençant la performance de ces bassins ?	17
	3.13 Quelle est la réglementation/législation ?.....	18
4	Les étapes de conception	20
	4.1 Le diagnostic hydrologique.....	20
	4.2 La localisation	21
	4.2.1 Choisir l'emplacement	21
	4.2.2 Choisir le dispositif en fonction de l'exutoire et de l'objectif	24
	4.2.3 Relevé topographique.....	26
	4.2.4 Étude géotechnique	26
	4.3 La conception.....	27
	4.3.1 Les berges.....	27
	4.3.2 Morphologie de la ZTHA	28
	4.3.3 Le temps de séjour hydraulique	29
	4.3.4 Le volume du bassin	31
	4.3.5 Règle d'ouverture / fermeture des vannes :	34
	4.3.6 Les ouvrages d'alimentation et d'évacuation.....	35
5	Réglementation	38
6	Coût de construction	39
7	La construction	40
	7.1 Consultation	40
	7.2 Terrassement	41
	7.3 Compactage et ajout éventuel d'argile	41
	7.4 Ouvrages complémentaires	42
8	La plantation.....	42
	8.1 Le rôle des plantes.....	42
	8.2 Les zones de plantations.....	43
	8.3 Les plantes adaptées aux zones immergées	43
	Zones semi-immersées et zones de berges	44
	8.4 Les conseils techniques de plantation.....	44
	La saison de plantation.....	45

Comment réaliser la plantation.....	45
Niveau d'eau minimum pour les plantations	45
9 La maintenance	46
9.1 Les plantes	46
9.2 Les ouvrages hydrauliques.....	46
9.3 La ZTHA.....	46
9.4 La sécurité.....	46
10 Bibliographie	47
10.1 Illustrations et photographies :.....	47
10.2 Textes :	47
Annexe 1 :.....	49
Annexe 2 : Module simplifié « efficacité d'atténuation des nitrates versus temps de séjour » (version 1)	59

Liste des Encadrés

Encadré 1 : Quelques prescriptions de conception :.....	14
Encadré 2	22
Encadré 3	28
Encadré 4	29
Encadré 5	30
Encadré 6	30
Encadré 7	36
Encadré 8	39
Encadré 9	43
Encadré 10	45
Encadré 11	45

Liste des figures

Figure 1 : Stratégie de réduction de la pollution diffuse d'origine agricole. Adapté de Mitsch et Gosselink, 2000.....	10
Figure 2 : Exutoire d'un collecteur de drainage.....	10
Figure 3 : Efficacité des ZTHA étudiées ou référencées pour réduire les flux des ions nitrate et des pesticides.....	11
Figure 4 : Schémas sans (a) et avec (b) un système de drainage artificiel	13
Figure 5 : Moyenne des contributions mensuelles des flux d'une saison complète de drainage, site de La Jaillière dans le Maine et Loire (lame d'eau drainée: 220 mm/saison et flux de nitrate: 38kgN/ha/saison, soit 76mg NO ₃ /L moyenne de 1989 à 1997) (source Arvalis/Irstea)	14
Figure 6 : Zone d'engouffrement d'un fossé agricole sur le bassin versant de Rampillon	15
Figure 7 : Stratégie testée par Irstea, d'interception des eaux de drainage agricole.....	16
Figure 8 : Schéma des principales réactions dans une ZTHA.....	17
Figure 9 : ZTHA en cours de végétalisation avec une diguette centrale	18
Figure 10 : Illustration de la dynamique végétale d'une ZTHA (site de Villedomain, Indre et Loire, projet Life ArtWET, www.artwet.fr).....	19
Figure 11 : Exutoire de la ZTHA végétalisée de Rampillon	20
Figure 12 : Plan de drainage ancien (Seine et Marne, source Earl Chantemerle)	21
Figure 13 : Exemple d'engouffrement sur le bassin versant de Rampillon.....	22
Figure 14 : Plan de drainage du site de Rampillon, identifiant des îlots indépendants de drainage agricole (les carrés noirs indiquent les exutoires enterrés identifiés, les étoiles les rejets directs en surface).....	23
Figure 15 : Plan des ouvrages préconisés (superficie du sous bassin versant et dimension d'une ZTHA projetée, en appliquant un ratio surface ZTHA / surface contributive de 1%), issus du découpage du réseau de drainage, sur le bassin versant de Rampillon.	23
Figure 16 : Exemples de connexion au réseau de drainage.....	24
Figure 17 : Importance de la topographie pour connecter hydrauliquement une ZTHA.....	24
Figure 18 : Schéma du dispositif en série dans le fossé.....	25
Figure 19 : Schéma du dispositif en série en amont du cours d'eau sur le site de Chantemerle (commune d'Aulnoy) dans le bassin versant de l'Orgeval.	25
Figure 20 : Schéma du dispositif en parallèle d'un cours d'eau.....	26
Figure 21 : Relevé topographique sur le site expérimental de Bray (projet Artwet).....	26
Figure 22 : Fosse à la pelle mécanique et résultats d'un carottage, pendant l'étude géotechnique, sur le bassin versant de Rampillon.....	27
Figure 23 : Schéma d'un bassin avec des pentes végétalisées.....	27
Figure 24 : Schéma d'une ZTHA méandrée avec insertion de diguettes (projet ArtWet).....	28
Figure 25 : Plan d'une ZTHA de forme simple avec insertion de diguettes (bassin versant de Rampillon).....	28
Figure 26 : ZTHA des Vaux avec entrée et sortie proches mais séparées par une diguette centrale (bassin versant de Rampillon).....	29

Figure 27 : Courbe des taux de rétention des nitrates (%) en fonction du temps de séjour, à température constante de 20°C dans une ZTHA (basée sur l'approche TIS de Kadlec et Wallace, 2008).....	29
Figure 28 : ZTHA de Montepot avec implantation de chicanes (bassin versant de Rampillon)	30
Figure 29 : Localisation des secteurs de référence drainage pris en compte dans l'étude hydrologique.	31
Figure 30 : Répartition du drainage agricole en France métropolitaine, en proportion de la surface agricole utile des petites régions agricoles (Réalisation Irstea, source RGA 2010)	32
Figure 31 : Cartographie des volumes en m3 de ZTHA calculés à partir des données pédologiques des secteurs de référence drainage, extrapolés aux petites régions agricoles associées	33
Figure 32 : Vanne d'alimentation de la ZTHA (bassin versant de Rampillon)	34
Figure 33 : Période d'ouverture / fermeture de vanne d'une ZTHA pour le cas des pesticides.....	34
Figure 34 : Prises d'eau rustiques connectées à la ZTHA (site expérimental de Bray, Indre et Loire)	35
Figure 35 : Schéma général du seuil et de la vanne	35
Figure 36 : Enrochement à l'arrivée dans la ZTHA (site pilote de Rampillon)	36
Figure 37 : Ouvrage de sortie de la ZTHA de Montepot (bassin versant de Rampillon)	36
Figure 38 : Plan de l'ouvrage de vidange	37
Figure 39 : Ouvrage de vidange de la ZTHA de Rampillon	37
Figure 40 : Schéma représentant la sédimentation en partie amont de la ZTHA	38
Figure 41 : Plan d'une ZTHA projetée (exemple de Rampillon).....	40
Figure 42 : Terrassement d'un bassin de Rampillon.....	41
Figure 43 : Opération de compactage sur la ZTHA de Rampillon	41
Figure 44 : Mise en place des diguettes sur la ZTHA de Rampillon	42
Figure 45 : Structure d'entrée, Seuil et vanne dans un regard, Structure d'évacuation	42
Figure 46 : Travaux de végétalisation de la ZTHA des Vaux (bassin versant de Rampillon)	43
Figure 47 : Exemples de plantes sélectionnées pour les ZTHA de Rampillon	44
Figure 48 : Espèces végétales implantées sur la ZTHA de Rampillon	44
Figure 49 : ZTHA de Rampillon végétalisée.....	45
Figure 50 : Panneau signalétique.....	47
Figure 51 : Schéma d'une ZTHA en parallèle avec débit limite à l'entrée du bassin de stockage	51

1 Avertissement au lecteur

Le présent guide rassemble les connaissances acquises jusqu'à la date de rédaction. Il conviendra de vérifier les versions mises à jour, qui intégreront les nouvelles avancées scientifiques, retours d'expérience.

Pour toute information concernant la version en cours, vous pouvez contacter : Julien TOURNEBIZE, Irstea, groupement d'Antony, par email : julien.tournebize@irstea.fr ou par téléphone (+33140966038).

2 Préambule

Ce guide technique propose des éléments d'aide à l'implantation et à la construction de zones tampons humides artificielles (ZTHA) pour intercepter et traiter les eaux issues du drainage de terres agricoles (Figure 1).

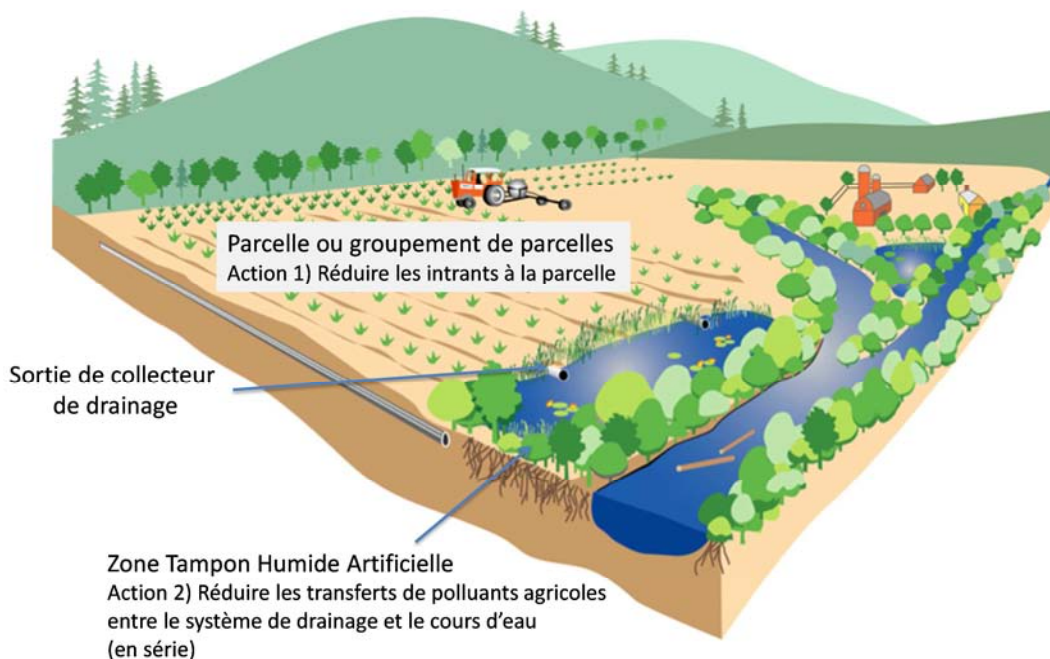


Figure 1 : Stratégie de réduction de la pollution diffuse d'origine agricole. Adapté de Mitsch et Gosselink, 2000

Les eaux de drainage entraînent des polluants d'origine agricole (nitrate et pesticides) par lixiviation, puis rejoignent les eaux superficielles du réseau hydrographique (Figure 2), voire souterraines dans des cas particuliers, contaminant ainsi les eaux de surface et les nappes phréatiques.



Figure 2 : Exutoire d'un collecteur de drainage

2.1 Qu'est-ce qu'une zone tampon humide artificielle ?

Une zone tampon humide artificielle (ZTHA) en milieu agricole est un bassin de rétention, une mare existante, de profondeur et de hauteur d'eau variables, végétalisées ou pas. Nous incluons dans ces systèmes les zones tampons sans végétation s'approchant du lagunage, ou avec végétation se rapprochant de systèmes plus naturels comme les zones humides. A l'image de la zone humide naturelle, la ZTHA est nécessairement en position particulière permettant d'exercer un effet tampon hydrologique. C'est bien sa position dans le bassin versant qui lui confère la propriété « tampon ». Ainsi la connexion hydrologique de la zone tampon est un critère indispensable : l'eau doit être interceptée puis retourner au cours d'eau après un séjour dans la ZTHA.

Des travaux récents ont montré le potentiel de ces dispositifs auto-épurateurs pour réduire les concentrations et les flux de nitrate et de pesticides de ces eaux de drainage à l'échelle d'un bassin versant (par exemple voir Fisher et Acreman, 2004, Tournebize et al., 2013). Les ZTHA ont un réel potentiel à réduire le transfert des contaminants d'origine agricole mais cette réduction peut être partielle (Figure 3). La mise en place des ZTHA doit ainsi toujours être accompagnée d'une démarche plus globale basée sur la réduction des intrants.

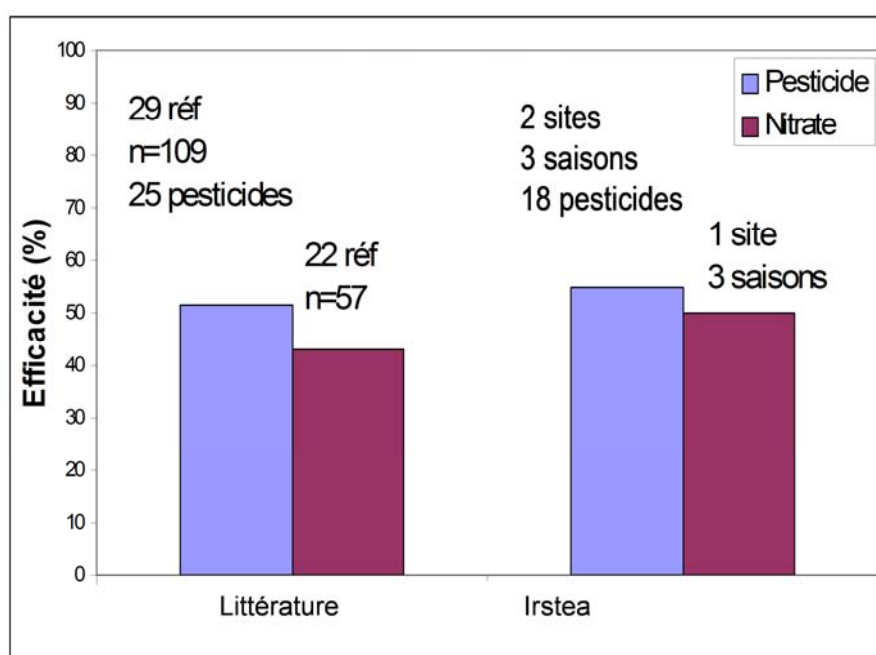


Figure 3 : Efficacité des ZTHA étudiées ou référencées pour réduire les flux des ions nitrate et des pesticides

Les ZTHA sont ainsi un outil complémentaire d'autres actions visant à réduire les intrants à la source, et non un permis de polluer. Les informations contenues dans ce guide se basent sur les résultats de l'étude expérimentale de Rampillon, commune située à proximité de Nangis, en Seine-et-Marne dans le cadre d'une collaboration (2005-2012) avec AQUI'Brie, Irstea, DDT77, les agriculteurs du bassin versant et le soutien financier de l'agence de l'Eau Seine Normandie. Ce guide s'insère dans le cadre des productions du groupe « Zone Tampon » de l'ONEMA. Certains aspects techniques ou schémas sont extraits des rapports des bureaux d'étude engagés dans la démarche. L'expérimentation pilote de Rampillon et tous ses partenaires ont reçu le prix national du Génie Ecologique, dans la catégorie Gestion de la pollution diffuse, décerné par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, le 21 octobre 2014.

Toutefois, les retours d'expériences sont peu nombreux et certains paramètres restent à développer (dimensionnement, optimisation des processus de rétention et de dégradation).

3 Introduction

3.1 Quelles sont les personnes concernées par ce guide ?

Ce guide est destiné à informer les différents acteurs souhaitant mettre en place des dispositifs tampons en sortie de bassin versant drainé par tuyaux enterrés. Les acteurs concernés sont principalement les bureaux d'études, les agriculteurs, les maîtres d'ouvrage, l'ONEMA et les services de l'État.

3.2 Que propose-il ?

Le guide propose une méthodologie pour raisonner la localisation, la morphologie, la gestion hydraulique, la végétalisation et la maintenance d'une ZTHA sur un bassin versant drainé.

Dans l'exemple qui sert de base à ce guide, le drainage agricole a été mis en place sur des sols hydromorphes de type luvisol (aussi appelé limon des plateaux), avec un substratum plus ou moins perméable vers 1 m de profondeur.

3.3 Dans quelles situations est-il possible de créer ces ZTHA ?

Une ZTHA est créée pour recevoir des eaux, provenant d'une surface drainée amont entre 10 et 100 ha. Pourquoi cette valeur seuil de 100 ha ? Les suivis en sortie de bassin versant drainé (Figure 4) ont montré que les concentrations en pesticides étaient beaucoup plus élevées lorsque la surface contributive était réduite. Au-delà de 100 ha, les concentrations de pesticides (liées à des pratiques de traitement à la parcelle) se retrouvent diluées. Dans ce cas plusieurs ZTHA peuvent être envisagées sur la surface de tout le bassin versant.

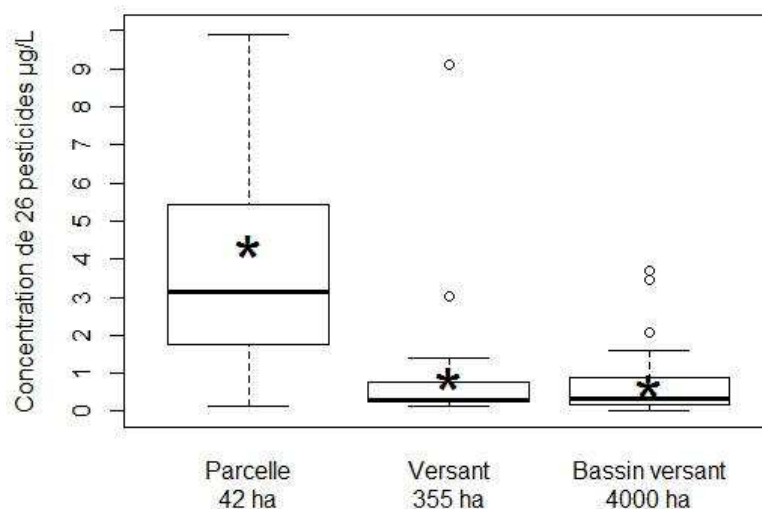


Figure 4 : Gamme des concentrations en pesticides en sortie de versant drainé selon leur surface croissante (de 42 à 4000 ha) (données irstea).

Pour le cas des nitrates, l'échelle d'intervention importe beaucoup moins du fait de la contribution relativement homogène des différentes parcelles du bassin versant (Figure 5).

Dans les références scientifiques, une surface de ZTHA correspondante à 1% du bassin versant est généralement proposée. Une méthode et des résultats préliminaires sont proposés au paragraphe 4.3, pour l'aide au dimensionnement en fonction de l'hydrologie et du temps de séjour escompté dans le contexte du drainage agricole à l'échelle de la France.

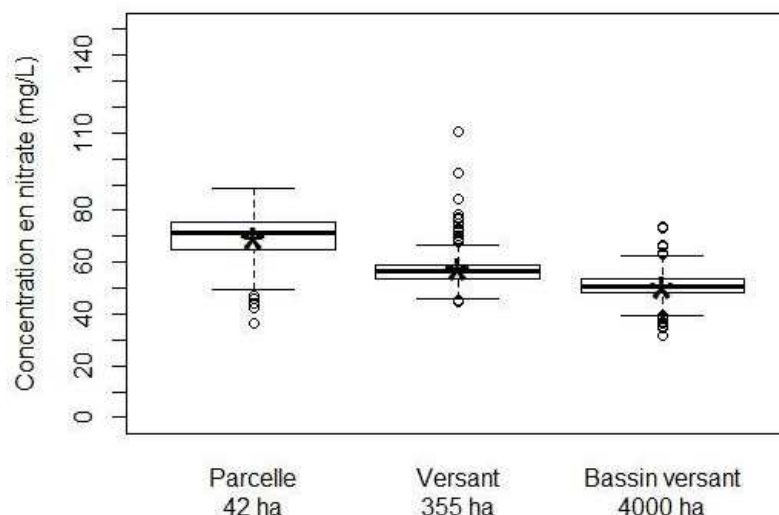


Figure 5 : Gamme des concentrations en nitrate en sortie de versant drainé selon leur surface croissante (de 42 à 4000 ha) (données Irstea).

3.4 Sur quoi est basé ce guide ?

Les recommandations de ce guide sont basées sur la démarche de co-construction adoptée entre les différents acteurs (agriculteurs, AQUI'Brie, Irstea) sur le bassin versant de Rampillon. L'étude de conception et la construction des ZTHA ont été réalisées sur la période 2005-2011. Un article scientifique de Tournebize et al., 2012, synthétise les étapes dans la réflexion de co-construction sur le projet.

3.5 Quels sont les champs d'application et les limites du guide ?

Ce guide peut être généralisé, pour la partie mise en œuvre, à tout aménagement tampon interceptant des eaux de surface (drainage et ruissellement). En revanche, l'aspect dimensionnement sera à raisonner au cas par cas. Les recommandations sur le type de végétation à planter sont applicables au territoire de la Seine-et-Marne en tenant compte des écosystèmes environnants. Pour d'autres situations, il est indispensable de se rapprocher des services de l'ONEMA afin de ne pas introduire d'espèces exotiques voire invasives.

3.6 Éléments de contexte : le drainage agricole en France

Les programmes de drainage à grande échelle (> 50 ha de terres drainées) se sont développés dans les années 1980 afin de répondre à une logique économique d'accroissement de la production agricole. Le département de la Seine-et-Marne a été l'un des départements à développer massivement le drainage agricole.

Cette méthode permet d'assainir artificiellement les sols hydromorphes, c'est à dire des sols gorgés d'eau consécutif à un défaut d'infiltration naturelle pendant les périodes hivernale et printanière (Figure 6). Le drainage permet ainsi d'améliorer la praticabilité des parcelles et de maintenir des rendements agricoles en s'affranchissant des contraintes liées au sol et au climat.

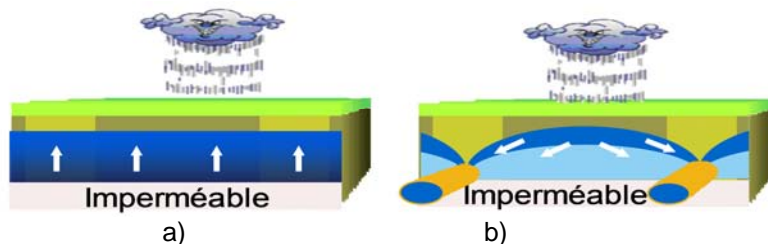


Figure 6 : Schémas sans (a) et avec (b) un système de drainage artificiel

3.7 Comment fonctionne un réseau de drainage ?

Généralement, en France, les drains sont espacés de 10 à 12 m (valeur dépendant de la nature et les propriétés du sol) et se trouvent à une profondeur d'environ 0,9 m. Les drains sont installés avec une pente artificielle qui permet l'écoulement gravitaire des eaux captées dans le sol.

Les drains sont en poterie pour les plus anciens, ou pour les plus récents normalisés, en PVC perforé. L'ensemble des drains est connecté à un tuyau plus gros (collecteur) qui lui-même est relié à un fossé d'assainissement agricole. Ainsi sur un bassin versant drainé, sont présents mais invisibles de nombreux réseaux de tuyaux enterrés reliés directement au réseau hydrographique.

Drain : 0,8m<profondeur<1,1m 0,5% <pente<5%	Collecteur : 0,8m<profondeur<1,3m 0,2%<pente<5%
--	--

Encadré 1

Le fonctionnement hydrologique d'une parcelle drainée est spécifique à la présence des drains sur socle peu perméable. On distingue alors trois phases sur la période d'écoulement (Figure 7).

- Une saison d'amorce du drainage, de septembre à novembre, au cours de laquelle les précipitations deviennent de plus en plus régulières et l'évapotranspiration potentielle (ETP) diminue. La réserve en eau des sols est alors en cours de reconstitution. Cette phase est très variable dans le temps, mais par simplification, peut se résumer à un cumul de précipitations de l'ordre de 100 mm (pour le cas de la Seine et Marne, mais ce seuil est fonction de la réserve utile du sol) compté à partir du 1er octobre (calé sur l'année hydrologique de septembre à septembre). Le coefficient de restitution de l'eau de pluie aux drains est de l'ordre de 6 à 20 %.
- Une saison de drainage intense, de décembre à février/mars, au cours de laquelle les précipitations sont régulières et l'ETP très faible. La réserve en eau des sols y est alors entièrement reconstituée et la capacité de stockage en eau des sols est atteinte. Le coefficient de restitution de l'eau de pluie aux drains se situe entre 60 et 90 %.
- Une saison de fin de drainage, d'avril à août. Les précipitations deviennent de plus en plus sporadiques et l'ETP augmente au fur et à mesure que l'on avance dans la saison. La réserve en eau des sols tend à s'épuiser en raison la reprise des prélèvements d'eau par la végétation. Le drainage diminue pour devenir nul ou quasi nul pendant les deux mois d'été (juillet/août). Le coefficient de restitution de l'eau de pluie aux drains est de l'ordre de 5 à 20 %.

Le cumul annuel des eaux drainées s'échelonne, selon la pluviométrie, de 50 à 500 mm, avec une moyenne interannuelle de 180 mm par an pour le quart Nord Ouest de la France (des Pays de Loire au Bassin Parisien).

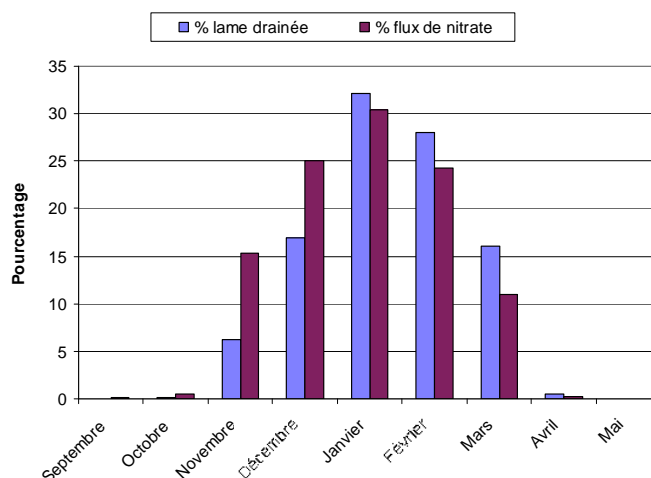


Figure 7 : Moyenne des contributions mensuelles des flux d'une saison complète de drainage, site de La Jaillière dans le Maine et Loire (lame d'eau drainée: 220 mm/saison et flux de nitrate: 38kgN/ha/saison, soit 76mg NO₃/L moyenne de 1989 à 1997) (source Arvalis/Irstea)

3.8 Pourquoi est-il important de traiter les eaux de drainage ?

La circulation de l'eau engendrée par le drainage entraîne la lixiviation de nitrate et de pesticides vers les eaux superficielles. Dans certains contextes karstiques, ces eaux de drainage peuvent contribuer à la recharge d'aquifère. Ainsi la recharge vers les eaux souterraines peut même se faire très rapidement, comme par exemple dans le cas des gouffres de Rampillon (Figure 8) où les eaux de drainage contribuent directement à la qualité des eaux de la nappe.



Figure 8 : Zone d'engouffrement d'un fossé agricole sur le bassin versant de Rampillon

Dans les cours d'eau, l'excès de nitrate favorise les processus d'eutrophisation du milieu, correspondant à une croissance excessive d'algues et de végétations aquatiques. Cette croissance diminue la teneur en oxygène du milieu, certains poissons et invertébrés ne sont donc plus adaptés à ces modifications du biotope.

Les concentrations en nitrate dans les eaux de drainage dépendent des périodes de drainage. La concentration moyenne annuelle en nitrate oscille entre 10 et 90 mg/L NO_3^- , selon l'intensification des pratiques agricoles. Lors des pics de concentrations en nitrate dans les eaux de drainage, l'objectif à la sortie des bassins est d'être inférieur à 50 mg/L NO_3^- (concentration maximale autorisée dans l'eau potable).

Les pesticides, quant à eux, sont nocifs à faibles doses pour de nombreuses espèces aquatiques. Les exportations en pesticides dans les eaux de drainage sont souvent de l'ordre de quelques grammes par matière active appliquée, par hectare et par an. En général, les flux annuels de chaque matière active sont inférieurs à 0,1% de la dose appliquée. L'objectif est d'atteindre des concentrations en pesticides inférieures aux valeurs imposées par la réglementation. Pour les eaux souterraines, les concentrations doivent être inférieures à 0,1 $\mu\text{g/L}$ de pesticide. Pour les eaux de surfaces, les valeurs imposées dépendent du type de pesticide. Néanmoins, les valeurs des concentrations ne doivent pas dépasser 2 $\mu\text{g/L}$.

Il est donc important de coupler des dispositifs tampons à des actions préventives, limitant à la source la quantité d'apport en pesticides et en nitrate sur les parcelles agricoles. Ces bassins tampons ne sont donc pas des permis de polluer, mais des dispositifs complémentaires dont l'objectif est de réduire les transferts dans les bassins versants.

3.9 Les principes retenus pour les ZTHA ?

Quatre grands principes de l'ingénierie écologique ont été retenus pour la conception des ZTHA, en s'inspirant des travaux de Mitsch et Jorgensen (2004) :

- Définition de plusieurs objectifs à l'aménagement (régulation des flux dont la qualité des eaux, biodiversité, connectivité, ...), mais identifier un des objectifs comme prioritaire (la qualité de l'eau dans notre exemple). Les autres objectifs seront considérés comme secondaires. L'aménagement doit être réfléchi pour répondre à une fonction recherchée

(rétention/transformation/dégradation des polluants dans notre cas), produisant ainsi un service écosystémique ;

- Rusticité (simplicité des ouvrages). Il est important de limiter les ouvrages de génie civil, de respecter des schémas naturels pour la morphologie ;
- Emprise foncière minimale (environ 1% du bassin versant). L'objectif étant de restaurer une fonctionnalité biogéochimique et non de diminuer la fonction de production agricole ;
- Elaboration de l'aménagement pour un minimum d'entretien et de maintenance. L'intervention humaine doit être la plus faible possible. L'écosystème (substrats, plantes, microorganismes) doit être développé afin qu'il puisse suivre sa propre trajectoire écologique de manière autonome avec un entretien minimal.

3.10 Comment s'intègrent les ZTHA dans le bassin versant ?

Selon les objectifs définis dans le plan d'action de reconquête de la qualité de l'eau (objectif nitrate ou pesticides), on distingue deux types de gestions hydrauliques des ZTHA basées sur la dynamique d'exportation des pesticides ou sur celle du nitrate (Figure 9).

Dans le cas où l'on s'attache à réduire la concentration en pesticides la connaissance de leur dynamique saisonnière est essentielle. Généralement, les plus gros flux ont lieu consécutivement aux applications qui sont réalisées à la fin de l'automne et au début du printemps. Dans ces conditions, un dispositif placé en parallèle de l'exutoire (soit d'un collecteur, soit d'un fossé) associé à une gestion hydraulique (par vanne, détaillée par la suite) permettra d'intercepter les eaux les plus chargées. L'implication de l'agriculteur pour la gestion de la vanne est essentielle car il connaît précisément ses itinéraires techniques et donc les périodes les plus à risque. Cette configuration aura aussi un impact positif sur le nitrate, mais limité en raison des plus courtes périodes d'interception des eaux de drainage dans le temps.

Dans le cas où l'on cherche à réduire la concentration en nitrate dont les flux ont lieu avec tous les écoulements de drainage, la ZTHA pourra être prioritairement placée en continuité avec l'exutoire des collecteurs de drainage (stratégie dite en série). Dans ce cas, l'ensemble des eaux drainées transite dans la ZTHA. Cette configuration sera moins efficace pour les pesticides en raison d'une dilution trop importante pendant les périodes de forts écoulements (hiver).

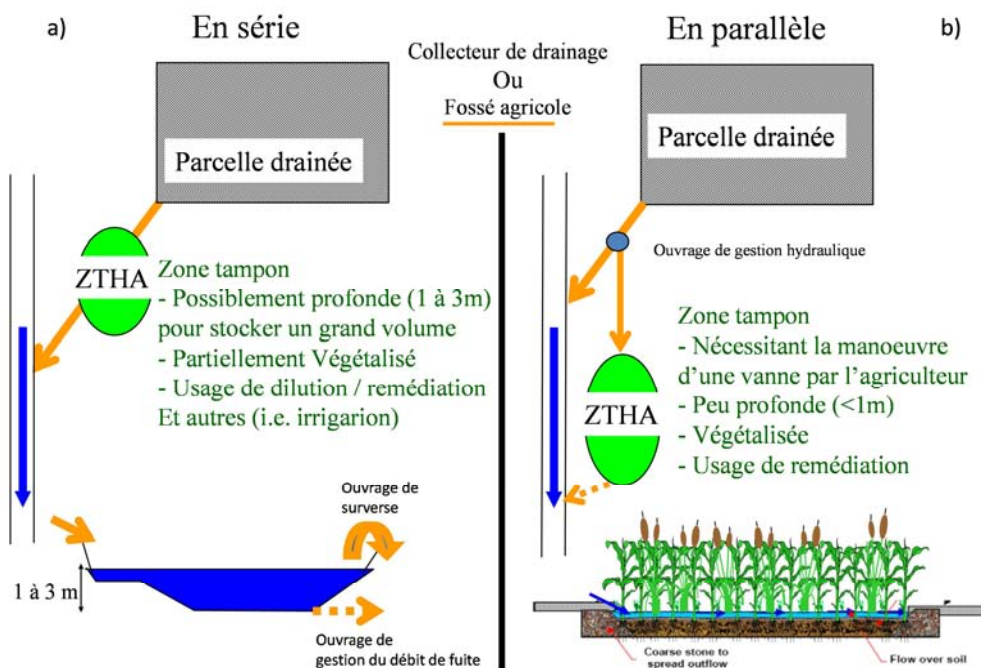


Figure 9 : Stratégie testée par Irstea, d'interception des eaux de drainage agricole

3.11 Comment les ZTHA retiennent-elles les polluants des eaux de drainage ?

Les processus mis en jeu dans la rétention des polluants sont naturels : physique/chimique/biologique. Dans le cas du nitrate, l'absorption par les plantes et les réactions de dénitrification biologique (en conditions anaérobies) sont les principales voies d'élimination, avec une répartition annuelle respective de 15 et 85% (Pulou, 2011).

Dans le cas des pesticides, de nombreuses voies sont possibles dépendant principalement des propriétés des molécules. L'usage des molécules étant très varié sur un bassin agricole, il en est de même de leurs propriétés physico-chimiques. Aucune voie de dégradation n'est donc privilégiée, il est recherché plutôt l'association de processus différents.

Par exemple, la sédimentation des particules fines concernera les molécules qui ont un fort pouvoir d'adsorption. la photodégradation sera stimulée par une profondeur d'eau réduite. Les réactions de biodégradation seront favorisées par une grande diversité de microorganismes.

Ainsi, la végétation qui présente un rôle direct pour le ralentissement hydraulique est aussi une source d'habitat pour les microorganismes. Cet effet hydraulique permet d'accroître le temps de séjour qui est l'allié de la rétention et de la dégradation, que ce soit pour le nitrate ou pour les pesticides.

Des travaux sont en cours afin de déterminer les processus et leurs optimisations au sein des ZTHA, mais aussi d'évaluer les effets négatifs liés d'une part aux accumulations de pesticides et de leurs métabolites dans les sédiments et d'autre part à la production de protoxyde d'azote (puissant gaz à effet de serre) lors d'une réaction de dénitrification incomplète.

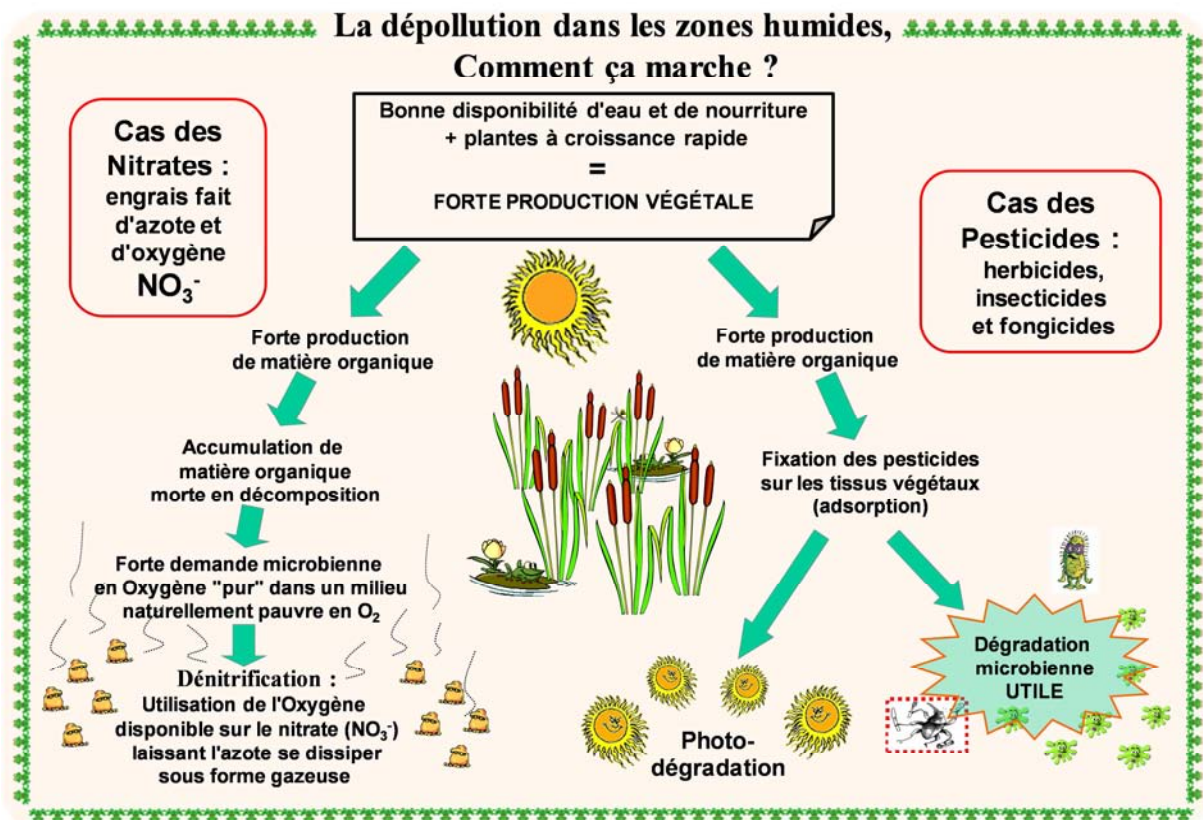


Figure 10 : Schéma des principales réactions dans une ZTHA

3.12 Quels sont les facteurs influençant la performance de ces bassins ?

Les pratiques culturales et la charge polluante induite, les propriétés du sol, les précipitations et le système de drainage influent sur le régime des écoulements et les quantités de polluants présents dans les eaux.

Les performances des ZTHA varient donc en fonction des saisons, des années et des régions : la température et le temps de rétention sont les principaux paramètres influençant la dégradation. Plus la

température et le temps de séjour sont élevés, plus l'efficacité augmente. La végétalisation et le méandrage des bassins (Figure 11) sont des aménagements qui permettent respectivement le ralentissement et l'augmentation du parcours de l'eau. De plus, les végétaux présents dans la ZTHA offrent également des sites d'adsorption grâce à la matière organique produite.



Figure 11 : ZTHA en cours de végétalisation avec une diguette centrale

3.13 Quelle est la réglementation/législation ?

L'implantation d'une ZTHA est en général soumise à une procédure Loi sur l'eau (dossier d'autorisation ou de déclaration à déposer au service de la Police de l'eau de la DDT). Chaque création de ZTHA est constituée d'éléments qui chacun individuellement est concerné par la loi sur l'eau (par exemple les exutoires, les aménagements, la création d'un bassin hydraulique auto-épurateur). En effet, la ZTHA vient modifier le réseau de drainage, lui-même soumis à procédure Loi sur l'eau, et peut entraîner l'application d'autres rubriques de la nomenclature Loi sur l'eau (voir section 6). La police de l'eau de la DDT doit être contactée à ce sujet.

Par ailleurs, l'exigence d'implantation d'un dispositif de filtration des eaux de drainage tend à se généraliser sur le territoire national. Ainsi, un certain nombre des Schémas Directeurs d'Aménagements et de Gestion des Eaux (SDAGE) adoptés en 2009 imposent que les nouveaux projets de drainage soumis à la Loi sur l'eau soient dotés de dispositifs tampons. La majorité des projets de nouveaux SDAGE actuellement en cours de rédaction, et qui seront adoptés en 2015, rendent cette exigence obligatoire et certains imposent également que cela soit envisagé en cas de rénovation des réseaux de drainage. Dans certains bassins hydrographiques, comme Rhin-Meuse, l'objectif affiché dans le projet de SDAGE est de systématiser cette approche sur l'ensemble des réseaux de drainage existants.

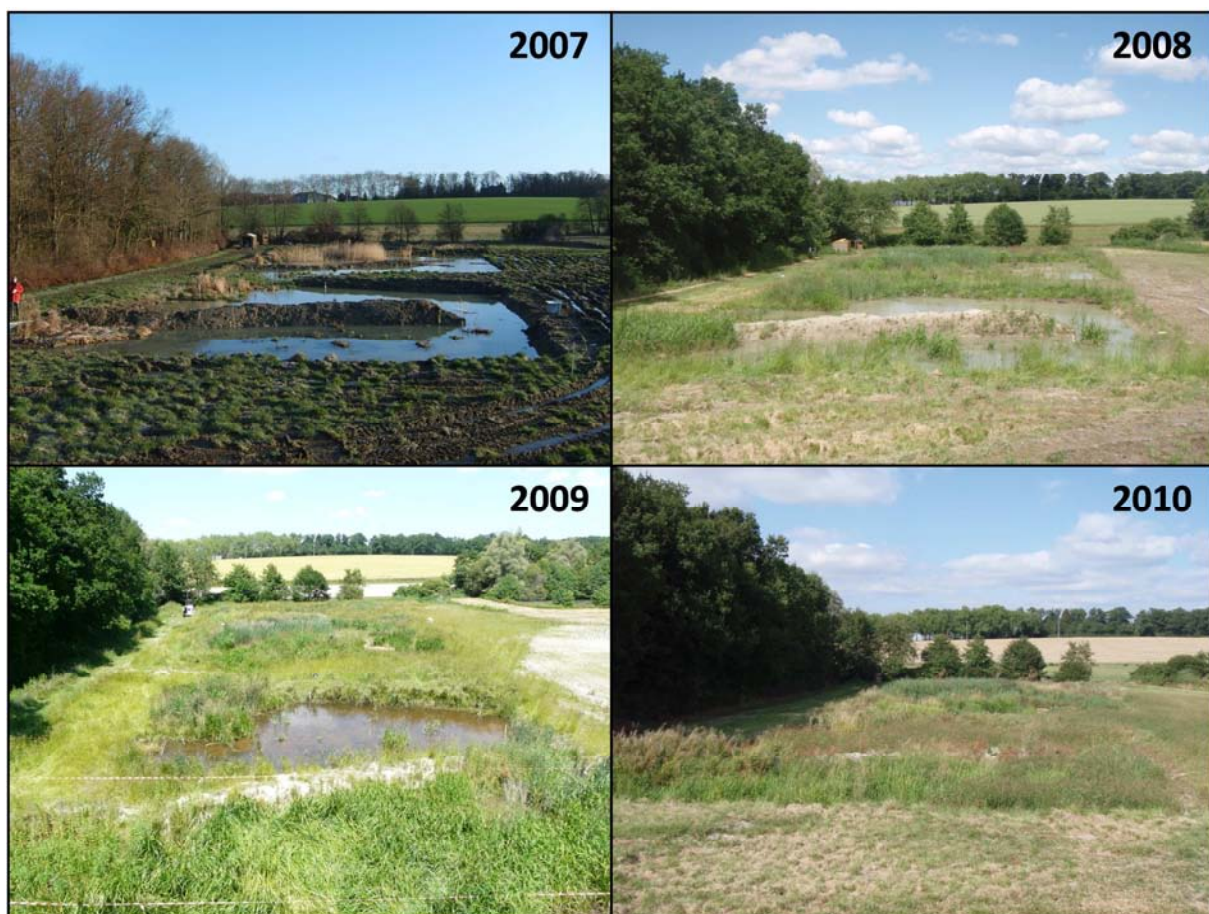


Figure 12 : Illustration de la dynamique végétale d'une ZTHA (site de Villedomain, Indre et Loire, projet Life ArtWET, www.artwet.fr)

4 Les étapes de conception

L'implantation des zones tampons humides artificielles inclut plusieurs étapes avant, pendant et après la construction.



Figure 13 : Exutoire de la ZTHA végétalisée de Rampillon

Ce document propose une démarche déclinée en sept étapes :

Étape 1 : Le diagnostic hydrologique

Étape 2 : La localisation

Étape 3 : La conception

Étape 4 : Réglementation et financement

Étape 5 : La construction

Étape 6 : La plantation

Étape 7 : La maintenance

4.1 Le diagnostic hydrologique

Nous insistons sur ce point crucial à mener en préalable à toute étude. La connaissance des voies de transferts hydriques au sein du bassin versant est indispensable pour déterminer les moyens d'action à mettre en œuvre et pour localiser les futurs aménagements de type ZTHA. Un diagnostic

hydrologique partagé par tous les acteurs est la première étape du processus de co-construction. L'objectif de la ZTHA est dans un premier temps d'intercepter les flux agricoles les plus contaminés.

Il faut à ce stade définir la part du drainage agricole, du ruissellement de surface, de l'infiltration profonde directe vers les nappes permettant de justifier ou non de l'implantation de ZTHA. Les acteurs locaux, les animateurs de bassins versants, les conseillers agricoles, les bureaux d'étude sont à même de réaliser un diagnostic hydrologique. Des documents du CORPEN rassemblent des méthodes pour répondre à ce besoin.

Des mesures complémentaires peuvent être envisagées dès cette étape pour quantifier les contributions des différents compartiments. Par exemple, dès la phase de réflexion, un suivi hydrologique peut être installé pour un coût réduit (mesure d'une ligne d'eau au droit d'un ouvrage). Des suivis ponctuels sur le linéaire des cours d'eau (prise simultanée d'un prélèvement et du débit en différents points du bassin versant, à la même date) permettent de mieux comprendre les déterminants de la qualité de l'eau.

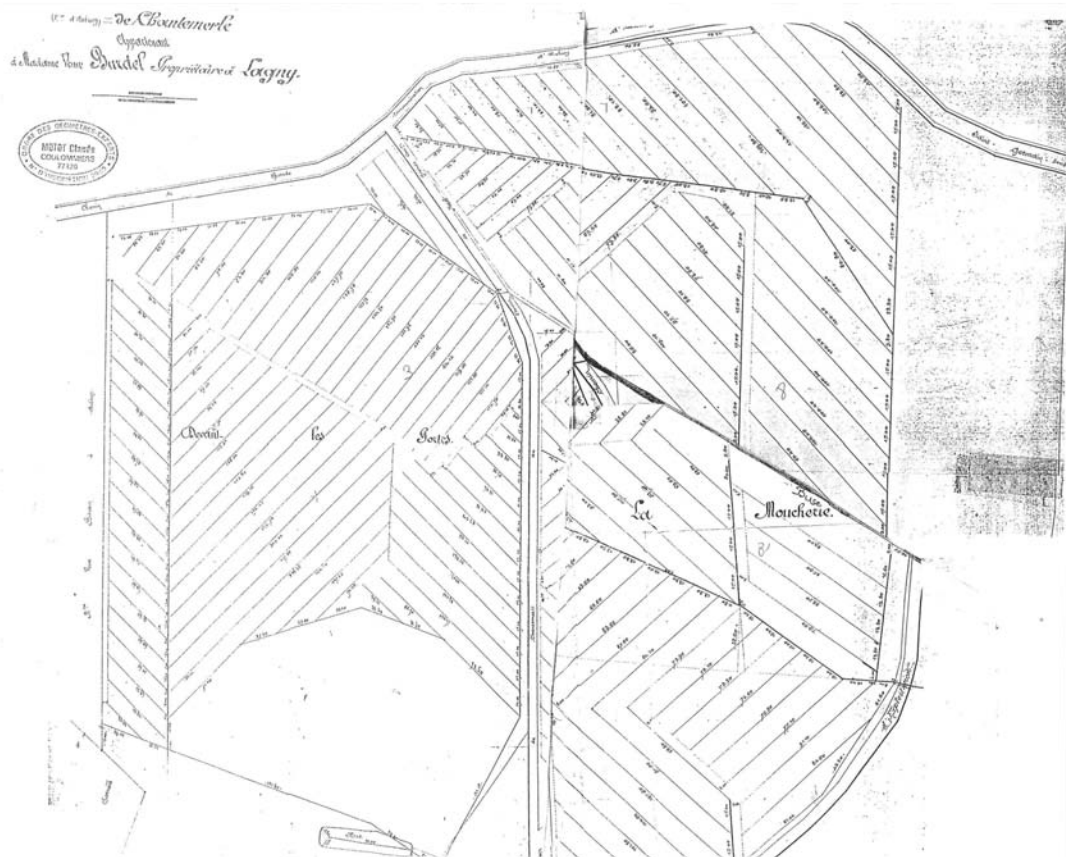


Figure 14 : Plan de drainage ancien (Seine et Marne, source Earl Chantemerle)

4.2 La localisation

4.2.1 Choisir l'emplacement

Il faut repérer les zones à fort taux de drainage, où les écoulements sont les plus concentrés et donc chargés en pesticides et en nitrate. Il est ensuite judicieux de coupler cette information avec les zones où les enjeux sur la qualité de l'eau sont importants. En Seine-et-Marne, les zones d'implantation de ces aménagements ayant un intérêt environnemental notoire, se situent à proximité de zones karstiques (i.e. gouffres, Figure 15), où l'eau s'infiltrerait directement dans les aquifères. Il est donc important de resituer la problématique des ZTHA dans le contexte de la vulnérabilité du milieu récepteur.

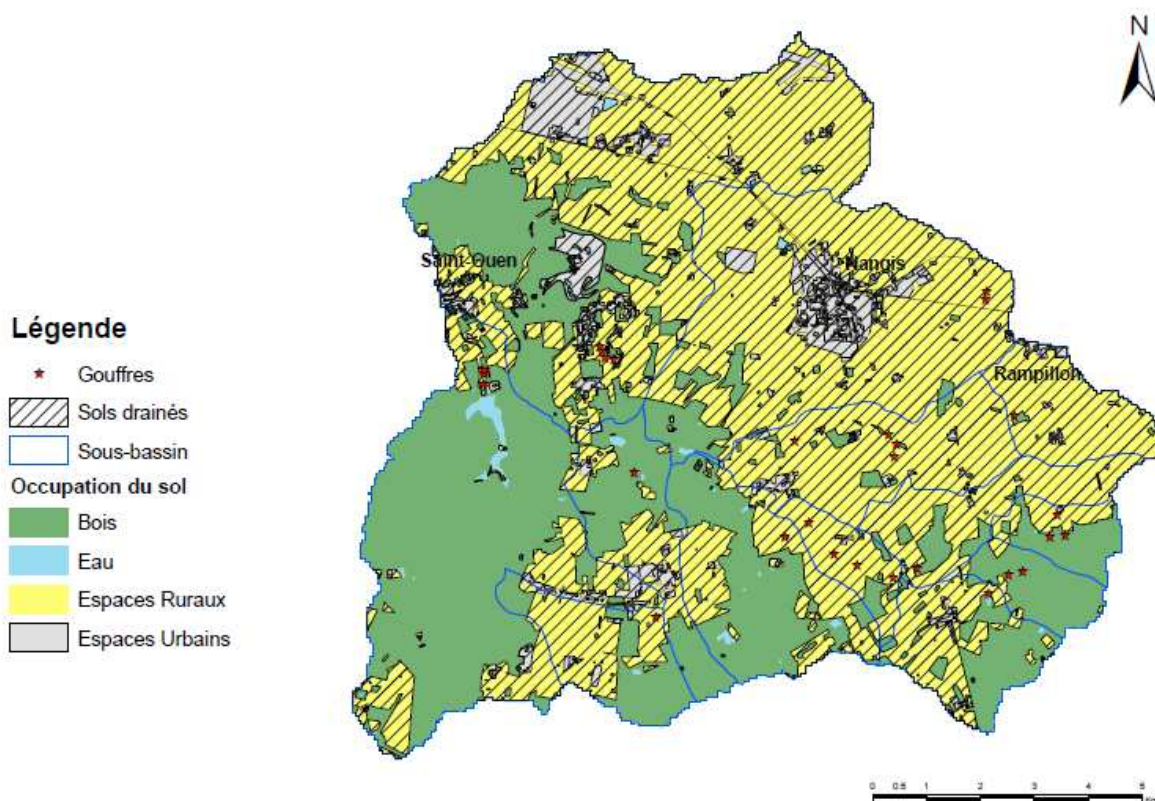


Figure 15 : Exemple de localisation de zones d'engouffrement identifiées sur le bassin versant de l'Ancoeur (source AQU'Brïe et Irstea).

Pour agir là où les pollutions sont les plus concentrées, les ZTHA doivent être implantées en amont du bassin versant, afin de capter la pollution agricole au plus près de sa source. En effet, hydrologiquement, la dilution des polluants augmente avec la superficie du bassin versant considéré, alors qu'il est stratégique de traiter le maximum de flux de pollution dans un minimum de volume d'eau drainée. Lorsqu'une zone d'implantation est identifiée, à l'échelle d'une commune par exemple, il convient alors de déterminer et de comprendre les chemins d'écoulements de l'eau au sein des bassins et sous bassins versants de la zone retenue. Dans le contexte du drainage, le bassin versant topographique n'est pas toujours le bassin versant réel drainé.

Cela nécessite de repérer les réseaux de drains, leurs surfaces, les collecteurs et leurs exutoires afin d'identifier les réseaux de collecteurs regroupant en un même point (nœud) différentes surfaces drainées. L'emplacement privilégié sera donc proche d'un nœud où se rejoignent les eaux de drainage d'une surface significative d'une vingtaine à une centaine d'hectares (Figure 16). Une fois un ou plusieurs emplacements précis repérés, il faut engager le dialogue avec les agriculteurs et/ou propriétaires des terrains pour les sensibiliser et les inciter à consacrer une de leurs parcelles à l'implantation de ZTHA (Figure 17).

A savoir :

Si les agriculteurs ne disposent plus des plans de drainage, il est possible de les obtenir soit aux archives de la DDT, soit auprès des ASAD ou AF du bassin versant, soit auprès de cabinets de géomètres experts du secteur.

Encadré 2

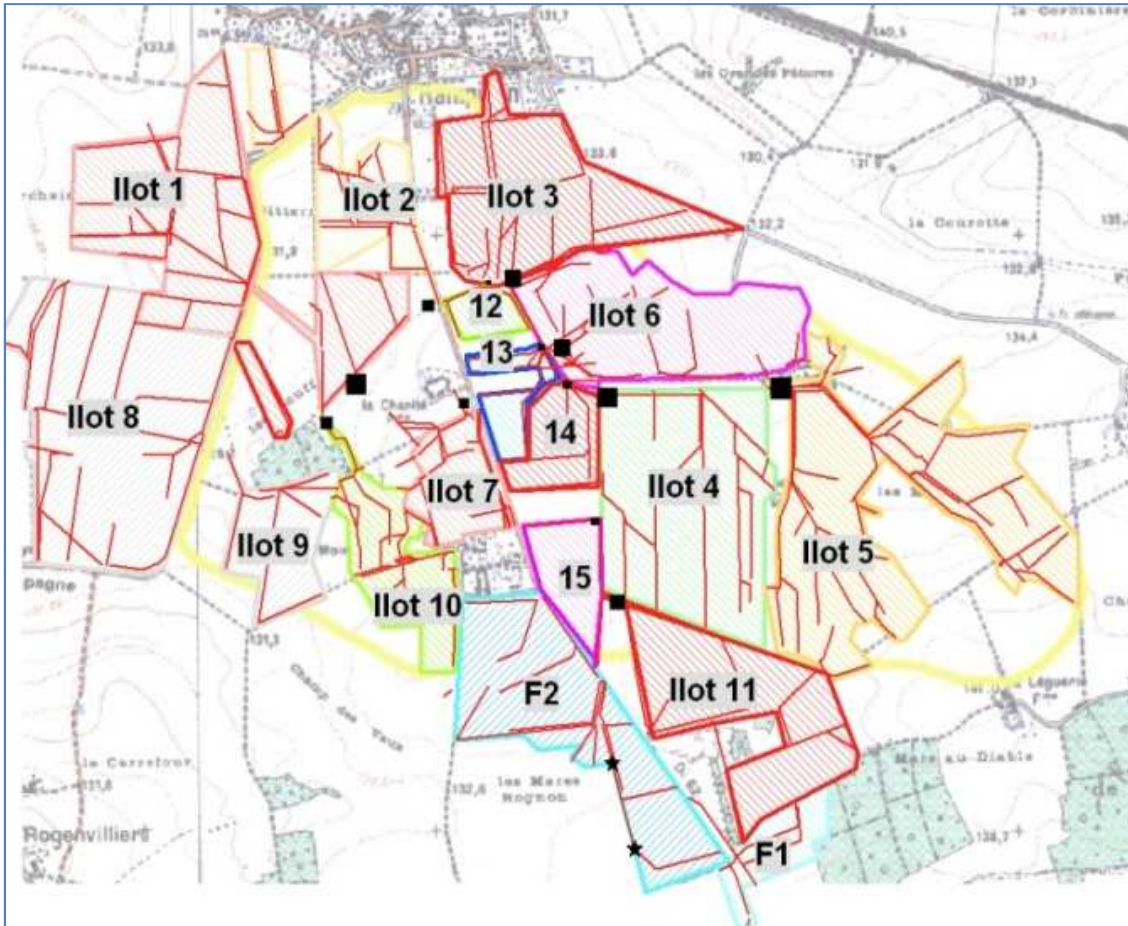


Figure 16 : Plan de drainage du site de Rampillon, identifiant des ilots indépendants de drainage agricole (les carrés noirs indiquent les exutoires enterrés identifiés, les étoiles les rejets directs en surface).

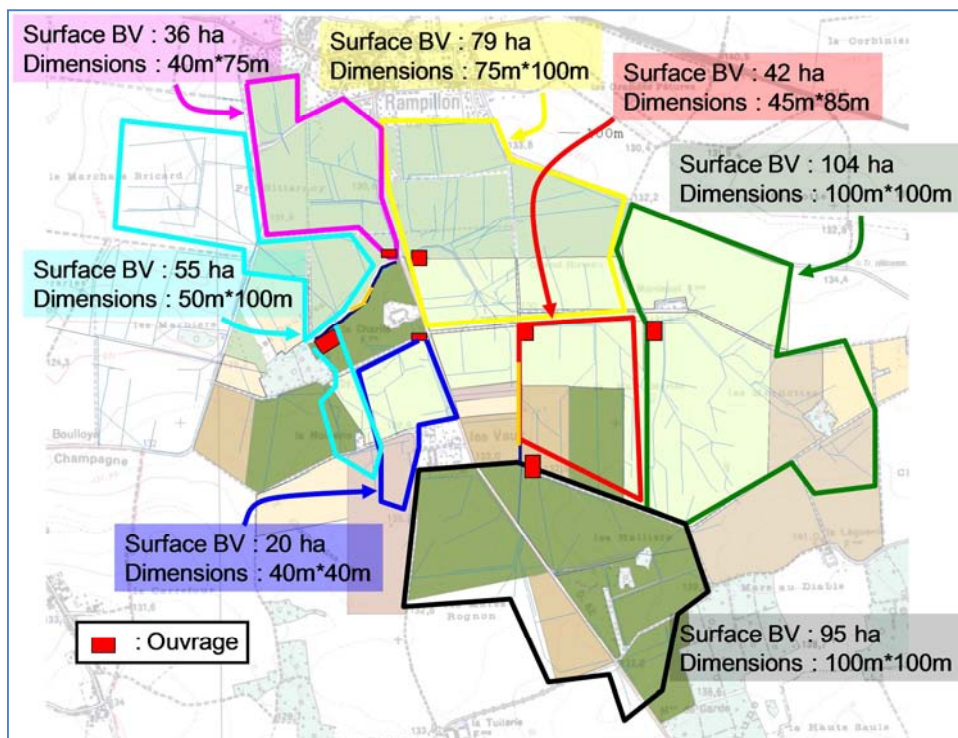


Figure 17 : Plan des ouvrages préconisés (superficie du sous bassin versant et dimension d'une ZTHA projetée, en appliquant un ratio surface ZTHA / surface contributive de 1%), issu du découpage du réseau de drainage, sur le bassin versant de Rampillon.

4.2.2 Choisir le dispositif en fonction de l'exutoire et de l'objectif

Comme décrit précédemment, la dynamique d'exportation du nitrate correspond à une pollution de fond qui concerne toute la masse d'eau. Dans ce cas, la stratégie en série est préconisée. Pour le cas des pesticides, il s'agit d'une pollution plus saisonnière qui requiert plutôt une interception temporaire des eaux en parallèle.

Dans le cas en série (des exemples sont présentés en Figure 18, Figure 19, Figure 20, Figure 21), la ZTHA s'intègre dans le linéaire de l'écoulement. Le cas le plus simple consiste à se placer dans le fossé d'assainissement agricole (sous réserve qu'il ne soit pas considéré comme un cours d'eau au titre de la loi sur l'eau). Alternativement, il est aussi possible de proposer une modification du réseau afin de se placer au niveau du collecteur enterré, avant son rejet dans le fossé.

Lorsque l'exutoire est un fossé d'assainissement agricole considéré comme un cours d'eau non modifiable au titre de la loi sur l'eau, le collecteur principal de drainage ou plus rarement plusieurs tuyaux de drainage peuvent être déviés pour être dirigés vers la ZTHA, que ce soit en configuration série ou parallèle.

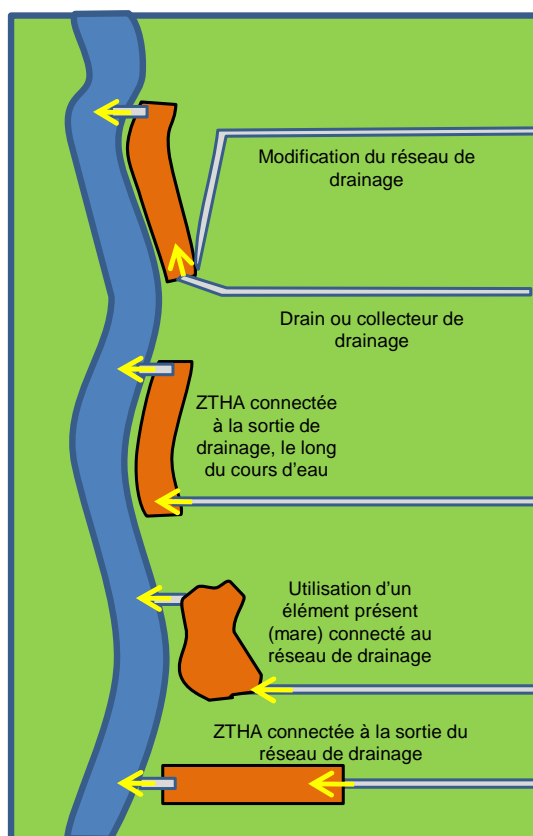


Figure 18 : Exemples de connexion au réseau de drainage

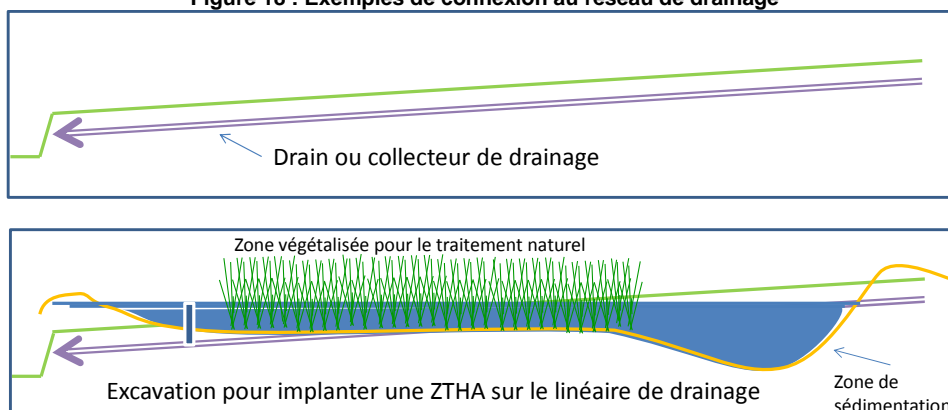


Figure 19 : Importance de la topographie pour connecter hydrauliquement une ZTHA

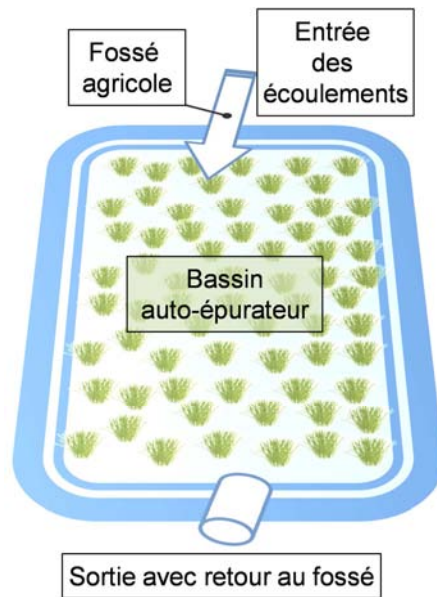


Figure 20 : Schéma du dispositif en série dans le fossé

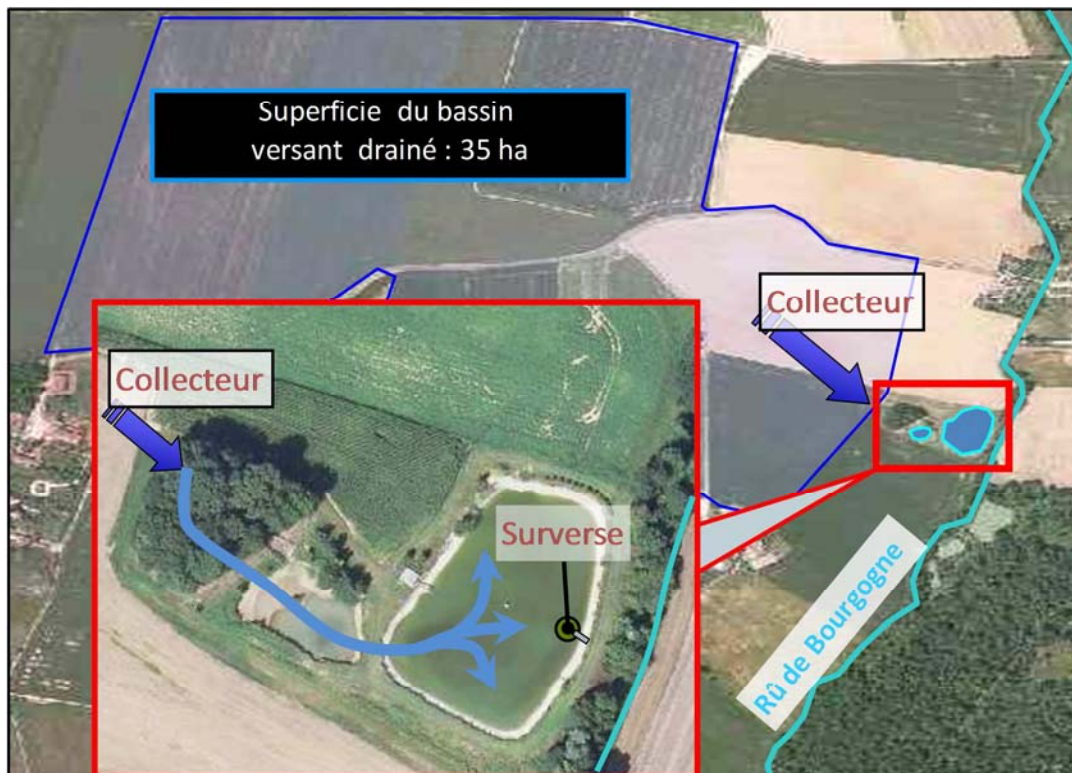


Figure 21 : Schéma du dispositif en série en amont du cours d'eau sur le site de Chantemerle (commune d'Aulnoy) dans le bassin versant de l'Orgeval.

Dans le cas d'une gestion en parallèle, recommandée pour les pesticides, il est nécessaire de prévoir la mise en place d'un ou plusieurs tuyaux pour dévier les eaux. En association à cette dérivation, un ouvrage de type « by-pass » doit être conçu pour permettre l'ouverture / fermeture de la ZTHA (Figure 22).

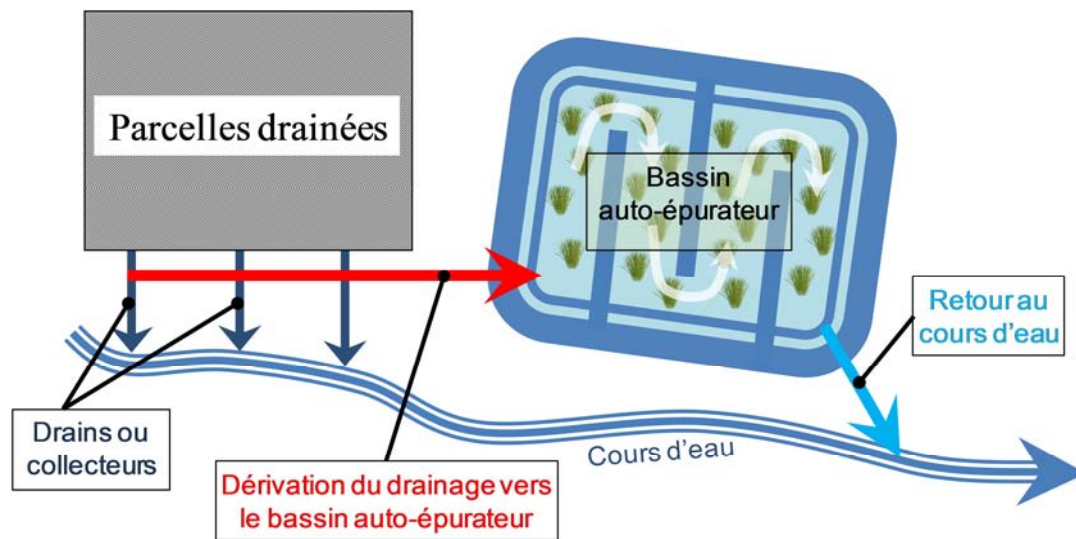


Figure 22 : Schéma du dispositif en parallèle d'un cours d'eau

4.2.3 Relevé topographique

Une fois que les emplacements judicieux sont identifiés sur le bassin versant, une analyse de la topographie s'impose (Figure 23).

Le site projeté doit présenter une dénivellée suffisante entre l'exutoire de drainage et la sortie de la ZTHA. En effet, pour permettre le stockage des eaux, une dénivellée minimum de 0,5 m est requise afin de stocker un volume d'eau suffisant. En condition de plateau, il arrive fréquemment que cette configuration topographique ne soit pas disponible, ce qui conditionne fortement l'emplacement optimal.



Figure 23 : Relevé topographique sur le site expérimental de Bray (projet Artwet)

4.2.4 Étude géotechnique

L'étude géotechnique est une phase nécessaire pour identifier les différents horizons pédologiques et apprécier leur étanchéité naturelle. Le bureau d'étude pourra recommander des fosses à la pelle mécanique, et des carottages non destructifs pour caractériser les couches du sol et du sous-sol (Figure 24).

La qualité du sol définira si une importation d'argile est nécessaire. On privilégiera les sols limoneux à limono argileux, sols qui se rencontrent classiquement parmi les sols hydromorphes dans le contexte du drainage. Le compactage peut se faire par simple passage d'engins. Si une étanchéité artificielle par géomatériau est requise, la géomembrane (PEHD ou EPDM) doit résister aux rayonnements ultraviolets et devra être recouverte d'au moins 20 cm de sol afin d'éviter la perforation par les racines et de fournir un substrat pour la végétation. Compte tenu des coûts d'une telle étanchéité, cette solution est plutôt réservée aux aménagements industriels.



Figure 24 : Fosse à la pelle mécanique et résultats d'un carottage, pendant l'étude géotechnique, sur le bassin versant de Rampillon.

4.3 La conception

Il n'existe pas de modèle prédictif ad hoc, à ce jour. Cependant, nous proposons une première approche de dimensionnement, détaillée dans une annexe. Les données de la bibliographie et les premières études spécifiques au cas du drainage préconisent une surface de ZTHA correspondant à 1% du bassin versant contributif. Cette valeur est affinée selon les contextes de drainage, dans la suite.

4.3.1 Les berges

La pente des berges des ZTHA et leur stabilisation doit être prise en compte pour limiter les phénomènes d'érosion et d'effondrement. La végétation qui y est implantée favorise cette stabilisation. La création d'une pente douce (fruit de 2/1 voire 3/1) assure une sécurité pour les usagers mais peut réduire considérablement le volume disponible (Figure 25).

Il est nécessaire de considérer ce critère dans le dimensionnement afin de garantir un volume de stockage suffisant dans la ZTHA.

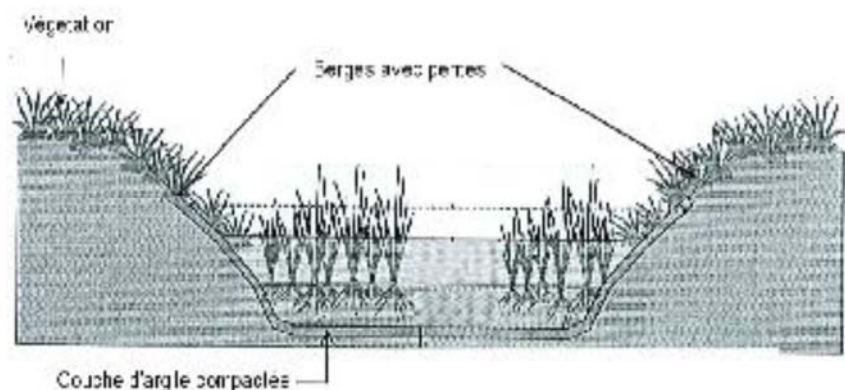


Figure 25 : Schéma d'un bassin avec des pentes végétalisées

4.3.2 Morphologie de la ZTHA

La forme dépend naturellement de l'emplacement disponible. Par commodité, la forme rectangulaire est en général plus fréquemment réalisée puisqu'elle est plus simple à construire et respecte mieux des limites parcellaires rectilignes. Cependant, des formes plus libres et méandrées peuvent être réalisées (cf. : exemples en Figure 26, Figure 27, Figure 28).

L'entrée et la sortie des écoulements ne doivent pas se situer en vis-à-vis direct, mais aux extrêmes du chemin hydraulique imposé. Si la configuration le permet, la création de diguettes est recommandée car elle accroît le chemin hydraulique. Cette optimisation limite les zones mortes ce qui permet une circulation dans un volume plus grand. Cette circulation plus lente est propice à des temps de contacts (eau/végétation/sédiment) plus élevés pour une meilleure efficacité.

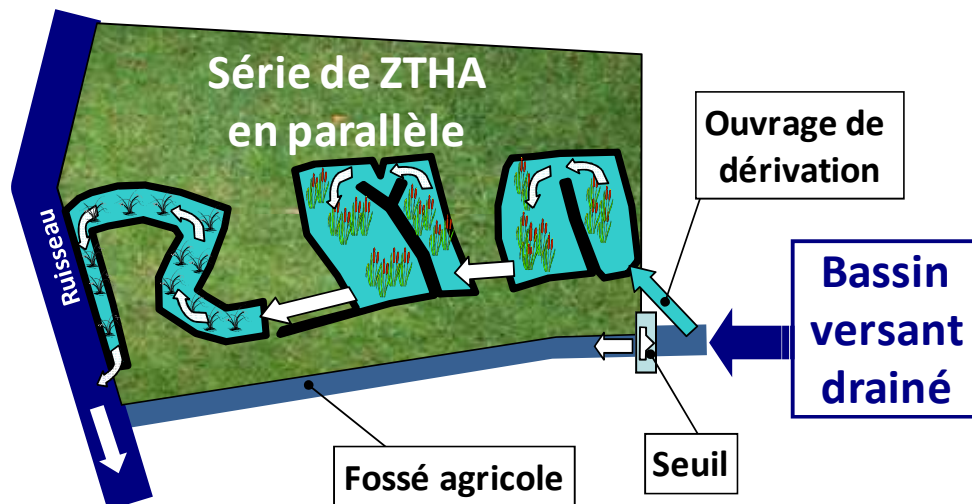


Figure 26 : Schéma d'une ZTHA méandrée avec insertion de diguettes (projet ArtWet)

A éviter :

Un bassin étroit, tout en longueur, de faible largeur, est à éviter car la vitesse devient excessive, entraînant une diminution des temps de contact.

Ne pas mettre la sortie en vis à vis de l'entrée pour ne pas favoriser les courts circuits hydrauliques.

Encadré 3

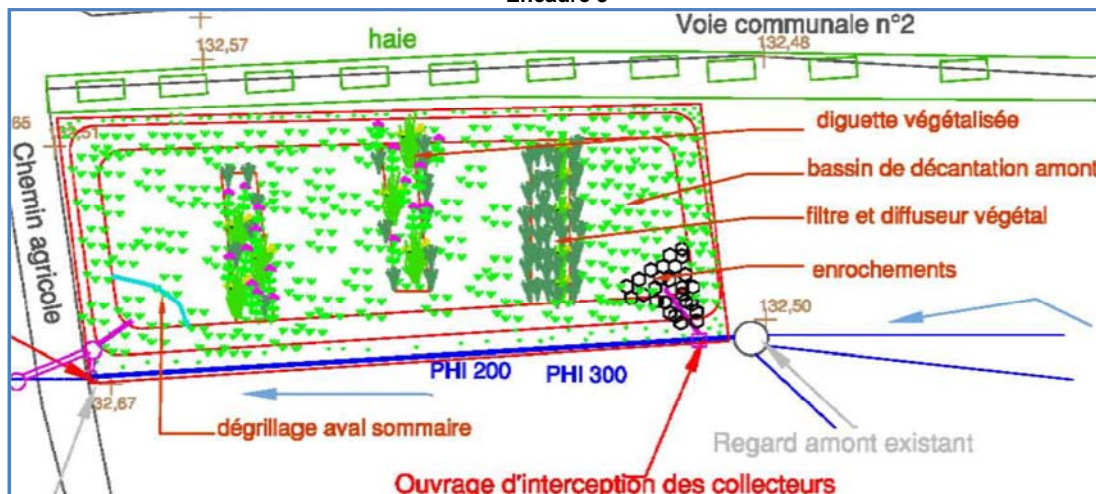


Figure 27 : Plan d'une ZTHA de forme simple avec insertion de diguettes (bassin versant de Rampillon)



Figure 28 : ZTHA des Vaux avec entrée et sortie proches mais séparées par une diguette centrale (bassin versant de Rampillon)

A éviter :
 Une série de diguettes trop dense avec de nombreux virages serrés provoquent des zones d'eaux mortes limitant l'efficacité du traitement.

Encadré 4

Il est également important de conserver un ratio suffisant entre la longueur et la largeur selon la surface du bassin. Pour une même surface, plusieurs ratios sont possibles selon la surface finale du bassin. Il faut donc trouver un compromis entre la géométrie de l'emplacement disponible et le ratio à conserver.

La largeur du bassin doit être uniforme pour éviter l'apparition de zones mortes. Hormis le cas où des aménagements destinés à la dispersion des eaux sont réalisés, on recommande une variation relative de la largeur inférieure à 20%.

Surface du bassin	Ratio Long./ larg.
Inférieure à 1000 m ²	3 / 1 à 10 / 1
Supérieure à 1000 m ²	3 / 1 à 5 / 1

Tableau 1 : Recommandation de ratio longueur/largeur

4.3.3 Le temps de séjour hydraulique

Le temps de séjour peut être différent si on veut dissiper le nitrate ou les pesticides. Des approches simplifiées existent pour le cas du nitrate, mais sont en cours de développement pour le cas des pesticides. La courbe de la rétention en nitrate en fonction du temps de séjour hydraulique est basée sur l'approche développée par Kadlec et Wallace (2008), appelée Tank In Series (voir en annexe). Pour le nitrate, un temps de séjour d'une semaine semble suffisant pour réduire de 50% la concentration initiale (Figure 29).

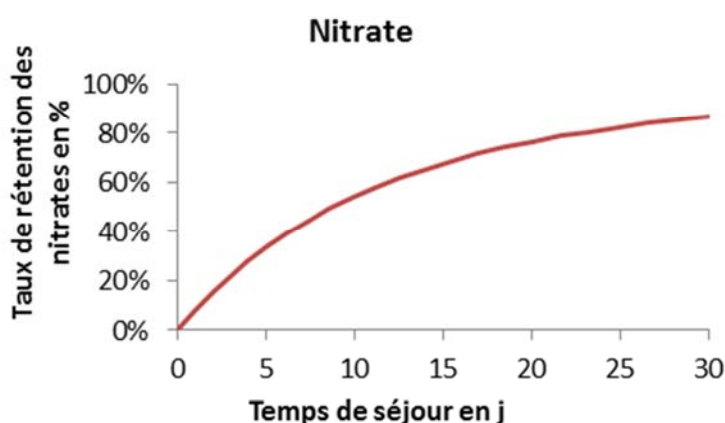


Figure 29 : Courbe des taux de rétention des nitrates (%) en fonction du temps de séjour, à température constante de 20°C dans une ZTHA (basée sur l'approche TIS de Kadlec et Wallace, 2008)

Pourquoi le temps de séjour est-il si important ?

Pour obtenir un traitement de l'eau efficace, il faut optimiser le temps de séjour. Plus le temps de séjour est long, plus le temps de contact entre les microorganismes et les polluants est important et plus la dissipation est importante.

Encadré 5

En revanche, la dégradation des pesticides peut s'avérer très longue. La détermination du temps de séjour optimal peut être basée sur l'analyse des propriétés des molécules et plus particulièrement leur persistance, qui peuvent être obtenues sur le site <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/footprint/fr/index.htm> du projet européen FP7 « FOOTPRINT ». Les molécules sont caractérisées par différents paramètres dont le temps de demi-vie ou DT50 au champ qui est le temps nécessaire pour diminuer par 2 la concentration initiale. Sur la base des molécules appliquées sur le bassin versant, la médiane des DT50 peut être calculée en pondérant les DT50 standard des molécules appliquées par leur dose d'application. L'utilisation de la médiane pondérée plutôt qu'une moyenne ou une moyenne pondérée des DT50, évite de donner trop de poids aux DT50 extrêmes et la pondération permet de tenir compte des molécules majoritairement appliquées sur le bassin versant. Dans le cas des grandes cultures avec des pratiques conventionnelles, le temps de séjour théorique est évalué à 23 jours minimum. Cependant, un temps de séjour aussi long est difficile à respecter à moins d'utiliser des critères de dimensionnement contraignants en termes de foncier pour permettre le stockage d'un volume très important. En effet, les premières crues ont en général une fréquence moyenne hebdomadaire, ce qui nécessite de stocker le volume d'environ 3 crues pour atteindre le temps de séjour de 23 jours. Le temps de séjour de l'eau dans le système est dépendant du volume de la ZTHA et du débit qui en ressort (par débit de fuite ou par surverse).

Le temps de séjour hydraulique peut être calculé pour chaque bassin à partir du volume (V) et du débit de fuite (Q_f) :

$$T(\text{en s}) = V(\text{en m}^3) / Q_f(\text{en m}^3/\text{s})$$

Il est possible d'augmenter le temps de séjour en augmentant la taille ou le volume des bassins. Puis, afin de maximiser la distance et le trajet hydraulique parcouru par les eaux de drainage, il est conseillé d'implanter des diguettes ou des chicanes.



Figure 30 : ZTHA de Montepot avec implantation de chicanes (bassin versant de Rampillon)

Conseil dans le cas d'une ZTHA en parallèle :

Il faut connaître les périodes d'application des pesticides au champ pour gérer au mieux la période d'ouverture de la vanne. L'agriculteur en tant qu'acteur des pratiques agricoles est le mieux placé pour actionner l'ouverture / fermeture de la vanne.

Encadré 6

4.3.4 Le volume du bassin

Le calcul du volume est basé sur l'analyse des débits de drainage, des temps de séjour nécessaires pour atteindre une réduction des concentrations et des objectifs globaux de réduction à l'échelle du bassin versant. Le détail de la méthode est présenté en annexe.

L'analyse des débits de drainage s'appuie sur :

- Les données climatiques sur la période 1950-2010
- Les caractérisations des sols extraites des 93 ouvrages des secteurs de référence drainage (documents élaborés dans les années 1980, Lagacherie et Favrot 1987). Les principaux territoires drainés sont représentés mais pas de façon exhaustive (Figure 31 et Figure 32).

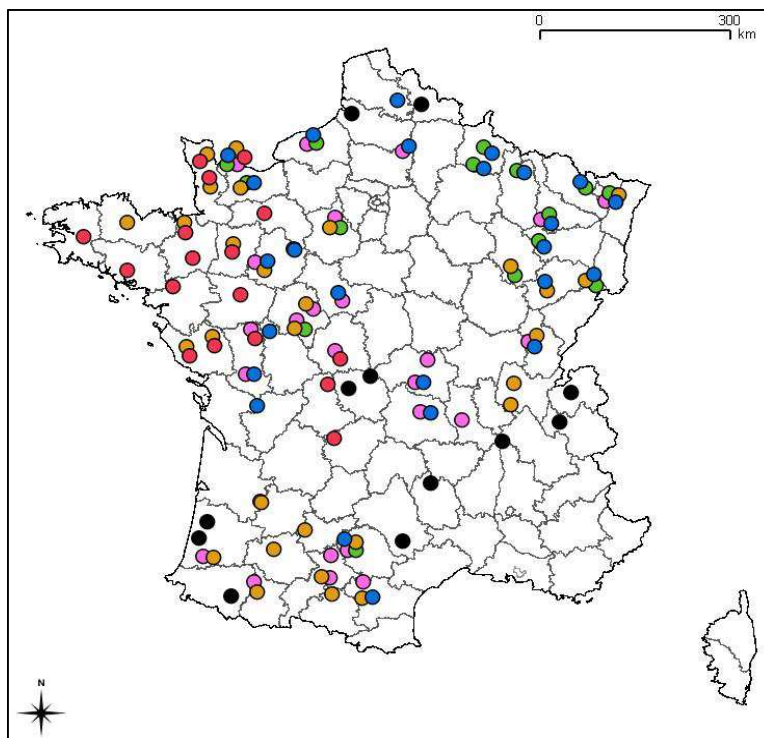


Figure 31 : Localisation des secteurs de référence drainage pris en compte dans l'étude hydrologique.

La simulation des écoulements de drainage au pas de temps journalier, avec le modèle développé par Irstea, SIDRA-RU.

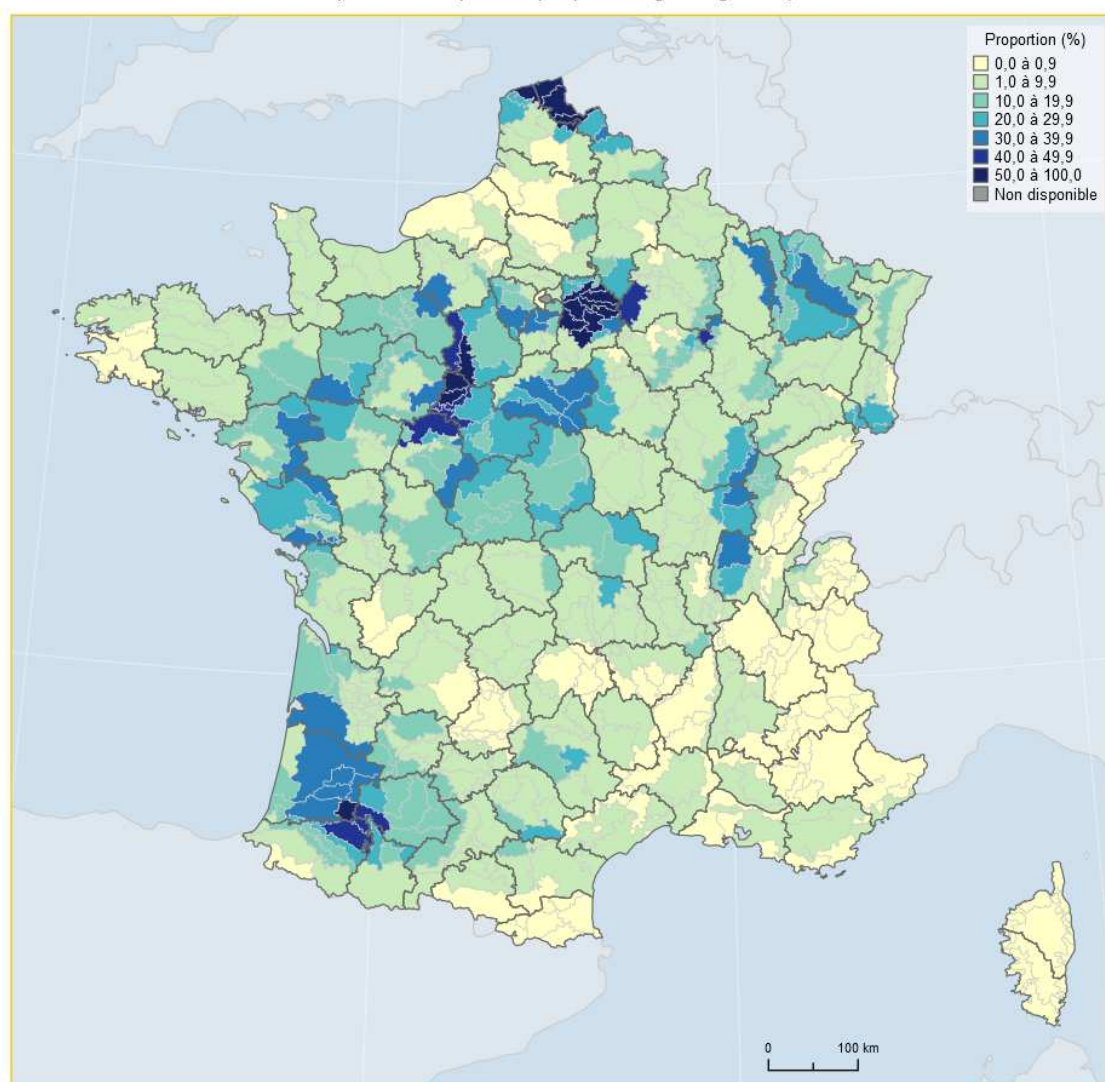
Les hypothèses suivantes ont été fixées :

- Limitation du débit d'entrée à 0,5 L/s au pas de temps journalier (ce qui correspond à un débit de pointe de l'ordre de 0,8-1 L/s)
- Temps de séjour fixé à 7 jours, basé sur l'occurrence hebdomadaire des crues, et une efficacité prédite de 50% pour les nitrates.
- Taux maximal de surverse des écoulements d'entrée, lié à un remplissage de la ZTHA par des crues de période de retour supérieure à 1 an, fixé à 20%
- Sélection des volumes sur les mois de Novembre et Décembre

Le calcul donne un volume moyen de 76 m³ par hectare drainé, soit si on considère une hauteur d'eau de 1 m, un ratio surface de la ZTHA sur surface drainée contributive de 0,76%.

Les critères présentés ci-dessus sont proposés à titre d'exemple. Ils nous semblent être les plus cohérents avec la dynamique des transferts de pesticides en contexte de drainage agricole tout en répondant au critère de minimisation de l'emprise foncière. Ils mériteraient d'être discutés avec les acteurs en fonction des objectifs fixés pour la ZTHA.

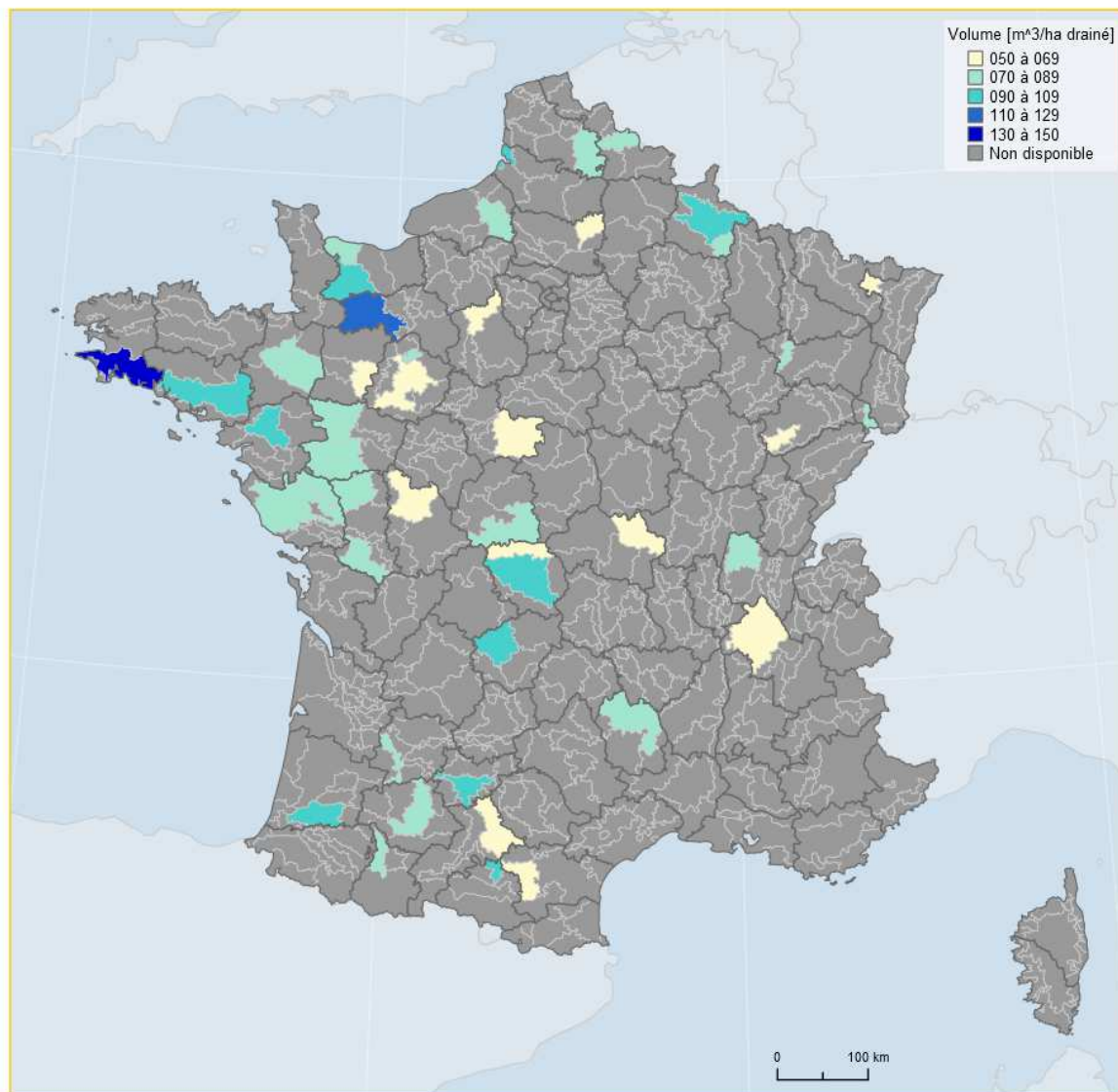
Proportion de la surface agricole utile drainée en 2010
(France métropolitaine par petites régions agricoles)



IRSTEA - HBAN - 2013

Source des données : Agreste - Recensement agricole 2010

Figure 32 : Répartition du drainage agricole en France métropolitaine, en proportion de la surface agricole utile des petites régions agricoles (Réalisation Irstea, source RGA 2010)



IRSTEA - HBAN - 2014

Figure 33 : Cartographie des volumes en m³ de ZTHA calculés à partir des données pédologiques des secteurs de référence drainage, extrapolés aux petites régions agricoles associées

4.3.5 Règle d'ouverture / fermeture des vannes :

Les travaux d'Irstea ont montré que 90% des flux de pesticides exportés par drainage s'effectuent pendant les 3 premières crues après application. Statistiquement, l'occurrence d'une crue pendant la saison de drainage est hebdomadaire. Ainsi, 3 à 4 semaines semblent nécessaires dans ce cas pour exporter le maximum de flux de pesticides.

Toutefois, le caractère aléatoire des crues impose une gestion de l'ouvrage basée sur la réalité de terrain. L'observation du passage de 3 crues serait donc plus adaptée, mais sans suivi automatique il est bien délicat d'identifier les écoulements à risques.

Pendant la période d'amorce du drainage (Octobre – Novembre – Décembre), le volume cumulé de drainage de ces 3 crues est d'environ 10 mm, généré par une pluie cumulée de 50 mm correspondant à la pluie mensuelle. C'est pourquoi nous préconisons une période d'ouverture de la ZTHA correspondant à 50 mm de pluie cumulée après l'observation de la reprise des écoulements de drainage de la fin de l'automne.

L'agriculteur observe régulièrement la pluviométrie qui touche directement son outil de travail et cette méthode rustique garantit plus d'efficacité sur l'interception par la ZTHA des écoulements ciblés, qu'une durée fixe d'ouverture après application.



Figure 34 : Vanne d'alimentation de la ZTHA (bassin versant de Rampillon)

Une seconde période d'ouverture cible les écoulements qui suivent les premiers traitements effectués au printemps. Ces applications ont généralement lieu fin Mars début Avril, et là encore c'est l'agriculteur qui est acteur pour manœuvrer la vanne. Elle reste ensuite ouverte pendant l'été pour éviter le dessèchement de la végétation et ne sera refermée qu'à la fin de l'été en septembre (Figure 35). Ainsi il est préconisé deux périodes de manœuvre de la vanne : Novembre pendant une durée en général de 1 mois, puis à partir de fin Mars jusqu'à la fin Septembre.

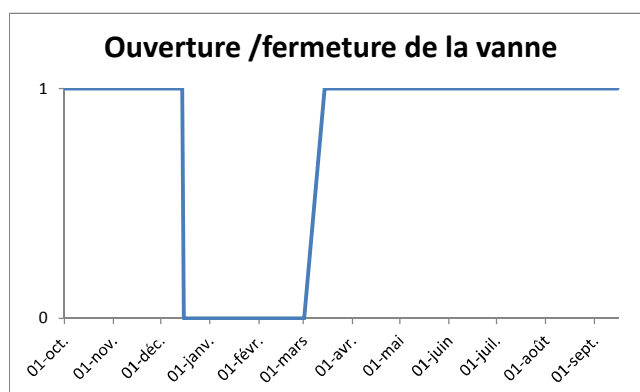


Figure 35 : Exemple de périodes d'ouverture / fermeture de vanne d'une ZTHA pour le cas des pesticides

4.3.6 Les ouvrages d'alimentation et d'évacuation

4.3.6.1 Alimentation gérée par une vanne et un seuil

Pour les dispositifs en parallèle (objectif d'abattement des pesticides), l'entrée des eaux dans la ZTHA est gérée par l'ouverture ou la fermeture d'une vanne en connexion avec le fossé d'assainissement agricole, ou avec le collecteur de drainage dans un regard en amont de la ZTHA.

Pour le fossé, on peut utiliser des canalisations PVC associées à une vanne guillotine ou à un système de coudes orientés vers le bas ou vers le haut comme illustré dans la Figure 36. La cote de la génératrice inférieure du tuyau doit néanmoins être placée suffisamment basse pour intercepter les premiers écoulements.



Figure 36 : Prises d'eau rustiques connectées à la ZTHA (site expérimental de Bray, Indre et Loire)

Dans le cas du regard, la mise en place d'un seuil en « V » en face du collecteur relié à l'exutoire favorise la dérivation des flux en direction du bassin. Ce seuil constitue, pendant la phase de remplissage de la ZTHA, un obstacle partiel à l'écoulement des eaux mais il permet tout de même le passage d'éventuels pics de crue dans la configuration initiale du collecteur. Ces pics ne seront donc pas interceptés par la ZTHA pour éviter un fort effet piston ne permettant plus d'assurer le temps de séjour escompté

Ouvrage d'alimentation : schéma de principe

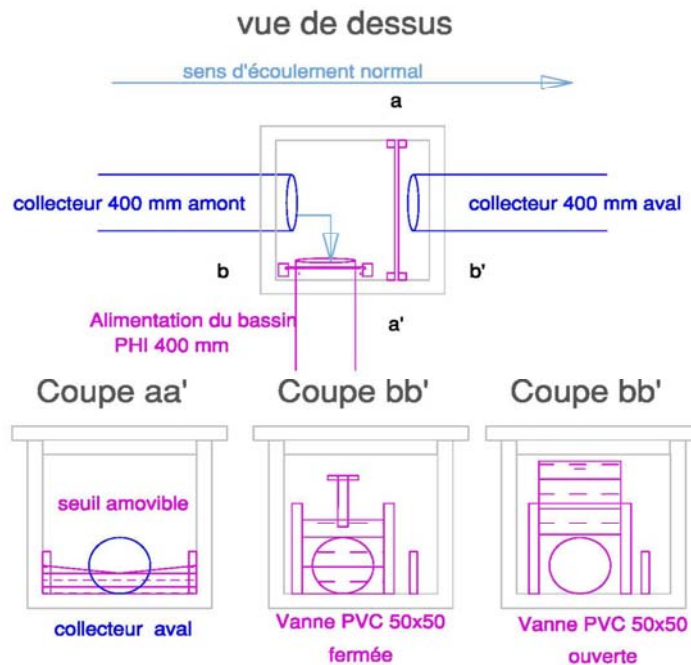


Figure 37 : Schéma général du seuil et de la vanne

Au niveau de l'ouvrage en entrée de la ZTHA, il est nécessaire de prévoir un enrochement pour prévenir l'érosion causée par la chute d'eau au risque de voir l'ouvrage s'affaisser (Figure 38).



Figure 38 : Enrochement à l'arrivée dans la ZTHA (site pilote de Rampillon)

Conseil :

Le diamètre des ouvrages d'évacuation des eaux doit être identique à l'entrée et à la sortie du bassin, le dimensionnement des collecteurs originaux doit être conservé. De plus, la pente de ces derniers doit être identique par rapport à celle d'origine.

Encadré 7

4.3.6.2 Les ouvrages d'évacuation

L'ouvrage de sortie du bassin doit être protégé, par exemple, par un cercle de pieux en bois espacés de quelques centimètres (Figure 39). Cette protection permet de protéger la prise d'eau et de limiter l'intrusion de débris flottants dans le tuyau, réduisant ainsi son potentiel colmatage.

L'ouvrage de vidange doit garantir d'une part un débit de fuite, mais aussi une surverse dans le cas d'une trop forte alimentation de la ZTHA. Nous proposons alors un système basé sur un coude PVC intégré dans un regard de type génie civil. Ce coude est ajouré soit par une ou plusieurs fentes soit par une série de perçages à différents niveaux (à modifier empiriquement afin de garantir un temps de séjour de 7 jours) comme indiqué dans le plan en Figure 40.

Le débit de fuite n'est donc pas constant puisqu'il est d'autant plus élevé que le tirant d'eau du bassin est important.

Il faut noter que le risque de colmatage est réel, car favorisé par la petite dimension des fentes ou des opercules. Seule une visite de contrôle régulière (fréquence recommandée : bimensuelle) permet de limiter ce phénomène.



Figure 39 : Ouvrage de sortie de la ZTHA de Montepot (bassin versant de Rampillon)

Ouvrage de vidange : schéma de principe

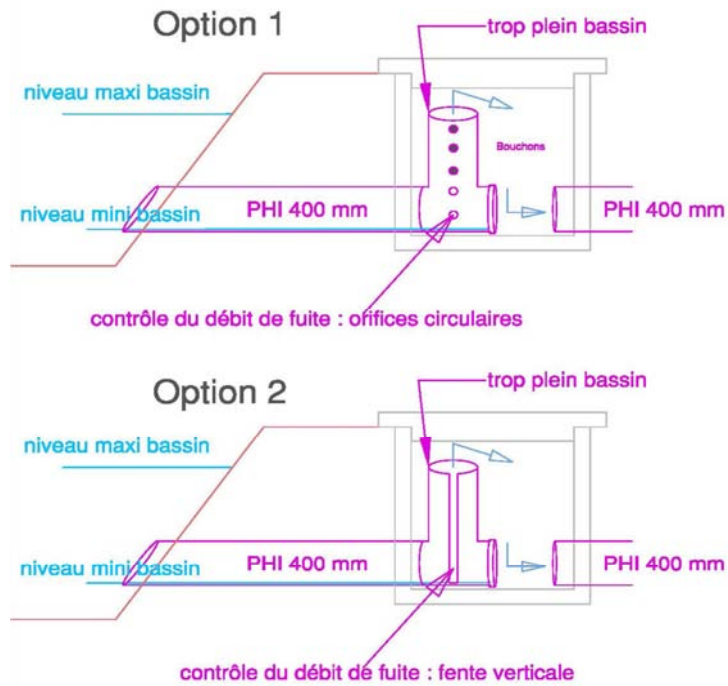


Figure 40 : Plan de l'ouvrage de vidange



Figure 41 : Ouvrage de vidange de la ZTHA de Rampillon

4.3.6.3 Les sédiments

La sédimentation a principalement lieu en entrée du bassin. L'enrochement situé sous l'arrivée dans la ZTHA permet de dissiper l'énergie liée à la vitesse et à la chute d'eau éventuelle. Ceci est propice à la sédimentation et à une bonne répartition de la sédimentation sur la largeur amont de la ZTHA.

Ainsi, la vitesse devient beaucoup plus faible que dans les réseaux de drainage ce qui permet la sédimentation des matières en suspension (MES) des eaux de drainage. Ces particules fines peuvent s'accumuler rapidement au fond du bassin et il est donc important d'augmenter la profondeur en entrée de la ZTHA de l'ordre de 20 à 30 cm, pour éviter d'avoir à effectuer un curage trop fréquent de cette zone. Les sédiments vont permettre le début de l'accumulation des pesticides par adsorption.

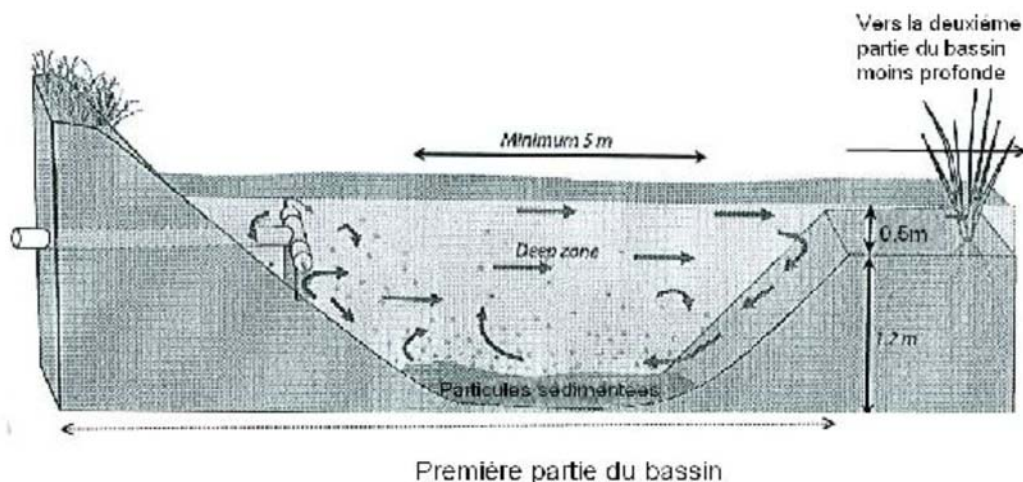


Figure 42 : Schéma représentant la sédimentation en partie amont de la ZTHA

5 Réglementation

L'implantation d'une ZTHA est en général soumise à une procédure Loi sur l'eau. Les "Installations, Ouvrages, Travaux et Activités" (IOTA) ayant un impact potentiel sur l'eau et les milieux aquatiques sont depuis 1992 soumis à une procédure d'autorisation ou de déclaration (dite 'Loi sur l'eau'), selon la nomenclature de l'article R. 214-1 du code de l'environnement.

L'aménagement d'une ZTHA peut être concerné notamment par les rubriques suivantes de la nomenclature :

- Modification d'un ouvrage relevant de la rubrique 3. 3. 2. 0. - Réseaux de drainage permettant le drainage d'une superficie supérieure à 20 ha.

Le code de l'environnement dispose que toute modification d'un IOTA autorisé (cf article R 214-18) ou déclaré (cf article R 214-40) doit être portée à la connaissance du préfet avant sa réalisation. A cette occasion, il conviendra par ailleurs de vérifier avec la police de l'eau si le réseau de drainage est bien déclaré au titre de la Loi sur l'eau. L'article R 214-53 du code de l'environnement prévoit une procédure de régularisation pour les IOTA existants préalablement à la Loi sur l'eau.

- Rubrique 3. 2. 3. 0. - Plans d'eau, permanents ou non, dont la superficie est supérieure à 0,1 ha.

- Rubrique 3. 3. 1. 0. Assèchement, mise en eau, imperméabilisation, remblais de zones humides ou de marais, la zone asséchée ou mise en eau étant supérieure à 0,1 ha.

- Au cas où l'aménagement occasionne des remblais : Rubrique 3. 2. 2. 0. Installations, ouvrages, remblais dans le lit majeur d'un cours d'eau, la surface soustraite étant supérieure ou égale à 400 m².

- Au cas où l'aménagement soit réalisé dans le lit mineur d'un cours d'eau : rubriques 3. 1. 2. 0. (modification du profil en long ou du profil en travers du lit mineur) et 3. 1. 4. 0. (consolidation ou protection des berges sur une longueur supérieure ou égale à 20 m) principalement.

Le dossier d'autorisation et de déclaration doit prévoir l'ensemble des dispositions relatives à la réalisation des travaux et l'entretien de l'ouvrage (par exemple : curage).

Il convient que le maître d'ouvrage du projet se rapproche de la police de l'eau de la DDT afin de préciser les procédures à mettre en œuvre dans le cas considéré.

Dans les cas où le maître d'ouvrage pour la réalisation de la ZTHA est une collectivité, on notera que, en plus de la déclaration ou autorisation au titre de la Loi sur l'eau, une Déclaration d'Intérêt Général (L. 211-7 du code de l'environnement) peut être nécessaire pour l'intervention sur des terrains privés. En outre le seuil étant cumulatif par maître d'ouvrage, au-delà de 1 ha de ZTHA projetées (pour les IOTA correspondant à la rubrique 3.3.1.0) ou 3 ha de ZTHA projetées (pour les IOTA correspondant à la rubrique 3.2.3.0), quel que soit le bassin versant, la procédure concernée sera le régime d'autorisation.

6 Coût de construction

Dans la région Ile-de-France en 2010, le coût moyen de terrassement d'une ZTHA est estimé à 4,50 € du m³ pelleté. Il comprend seulement la main-d'œuvre et le creusement. L'étude et le transport de la terre évacuée ne sont pas compris dans cette estimation. En province, il est d'environ de 2 € du m³ pelleté. Par exemple, pour un volume de 1 000 m³ (sans nécessité d'imperméabilisation), le coût en terrassement de l'installation est de :

en Ile-de-France = $1\ 000 \times 4,50 = 4\ 500$ €
en province = $1\ 000 \times 2 = 2\ 000$ €

A cela s'ajoutent les coûts concernant les ouvrages d'entrée et de sortie évalués à 1000 € chacun, et les études (géotechnique, topographique et d'ingénierie) pour environ 2000 €. Soit un prix pour une ZTHA de 1 000 m³ de 6 000 à 8 500 €. L'opération pilote de Rampillon a couté au final, ramené à l'hectare cultivé, 144€/ha.

Conseil :

Pour les agriculteurs, d'éventuelles aides sont possibles, notamment les MAEC et les aides aux investissements prévues dans les Programmes de Développement Rural Régionaux. Il convient de se rapprocher de la DDT pour plus d'informations.

Pour les collectivités, il est possible de solliciter l'aide financière des agences de l'eau et des conseils régionaux et départementaux.

Encadré 8

7 La construction

7.1 Consultation

Le maître d'ouvrage consulte le maître d'œuvre pour engager les études de conception. Le maître d'ouvrage (agriculteur ou structure collective) doit donc effectuer un cahier des charges précis reprenant les éléments du diagnostic hydrologique, et comprenant une étude géotechnique et le plan du site réalisé par un géomètre. Ce plan comprend les pentes du bassin, les ouvrages d'alimentation et de sortie, les sites d'implantation des diguettes et les différentes profondeurs à partir desquelles il faut creuser. Le volume de terre à enlever en est déduit. Ce cahier des charges permet également d'identifier le type et la quantité de végétation à planter dans la ZTHA par un paysagiste.

Le maître d'œuvre organise ensuite la mise en concurrence des entreprises pour la réalisation des travaux. A partir du cahier des charges, les entreprises définissent le montant de l'ensemble des travaux. Ensuite, le maître d'œuvre choisit l'entreprise qui lui correspond le mieux pour effectuer les travaux et dans le respect des règles du code des marchés publics s'il est applicable.

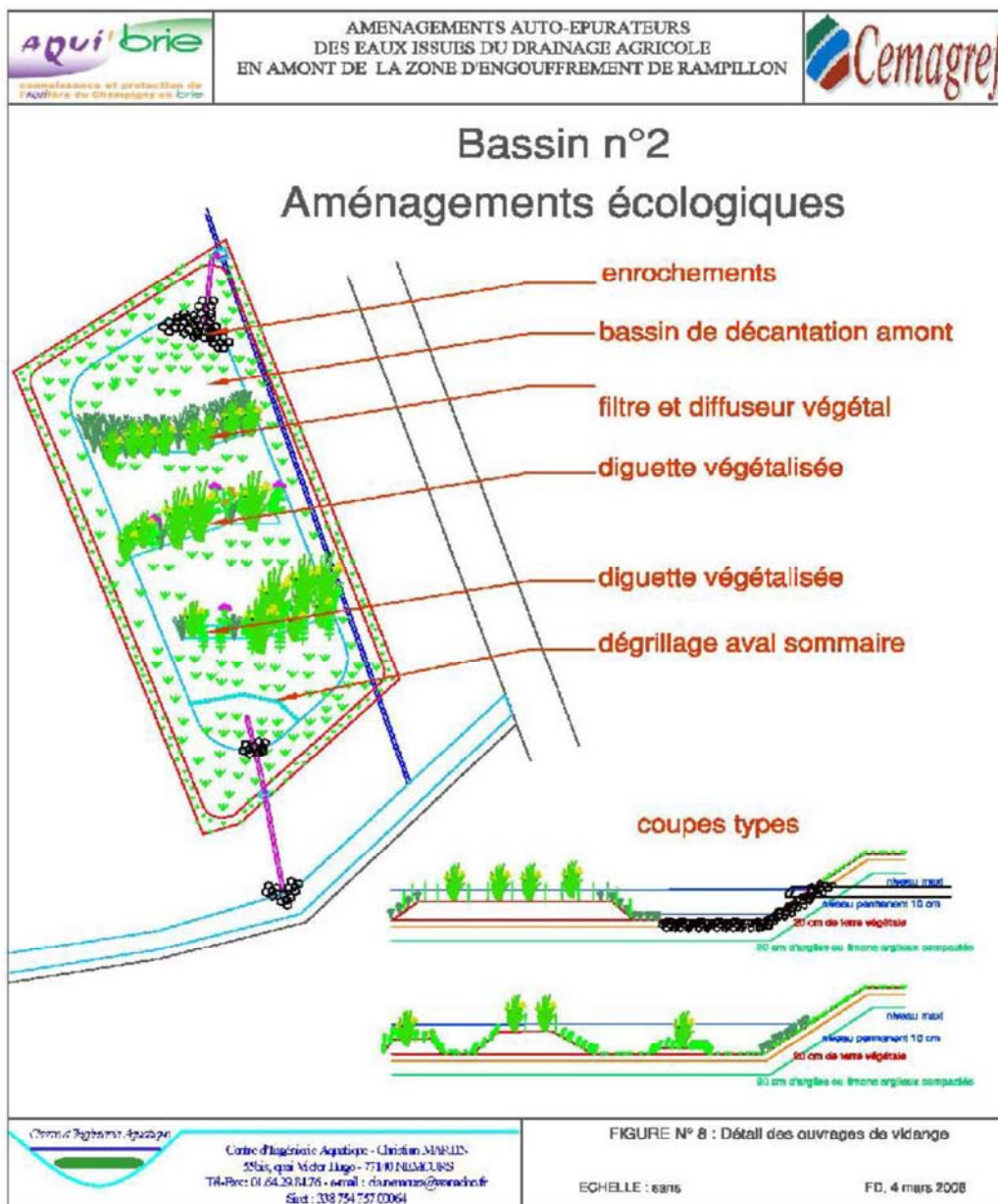


Figure 43 : Plan d'une ZTHA projetée (exemple de Rampillon)

7.2 Terrassement

Après l'étude géotechnique qui évalue la faisabilité technique de compactage des sols garantissant une étanchéité des ZTHA, le gros œuvre peut débuter.

Le terrassement consiste à creuser la parcelle pour obtenir la profondeur et la géométrie souhaitées de la ZTHA selon les pentes indiquées par le plan du géomètre. Les travaux de terrassement sont à réaliser lors de périodes sèches ou bien ressuyées (Avril à Septembre).

Dans des conditions hydriques défavorables, les travaux seront en revanche proscrits.

Lors de l'excavation il est recommandé de réserver la couche superficielle (20 à 30 premiers centimètre) qui est plus riche en matière organique. Cette terre sera ensuite remise en place en fond de bassin afin de fournir un substrat suffisamment riche et structuré pour permettre une reprise rapide des végétaux à implanter. La cote du fond de fouille réalisé doit donc bien prendre en compte cette dernière étape de remblai pour satisfaire la cote spécifiée sur le plan.



Figure 44 : Terrassement d'un bassin de Rampillon

7.3 Compactage et ajout éventuel d'argile

Après avoir obtenu la profondeur de bassin souhaitée, dans le cas où la proportion d'argile dans le sol est insuffisante, l'ajout d'argile pour créer une couche imperméable et étanchéfier le fond de la ZTHA est préconisé. Il faut ensuite compacter le sol par passage d'engin pour optimiser la propriété d'imperméabilité de cette couche.



Figure 45 : Opération de compactage sur la ZTHA de Rampillon

7.4 Ouvrages complémentaires

Les diguettes sont formées à partir de la terre excavée. Leur pente de talus doit être suffisante pour assurer leur stabilité (Figure 46).



Figure 46 : Mise en place des diguettes sur la ZTHA de Rampillon

Les ouvrages hydrauliques d'entrée et de sortie des eaux comme la vanne et le seuil sont installés après la formation des diguettes.



Figure 47 : Structure d'entrée, Seuil et vanne dans un regard, Structure d'évacuation

8 La plantation

En dernière étape, les plantes sont introduites dans la ZTHA selon la hauteur d'eau prévue dans le bassin. Cette opération se réalise idéalement dans un bassin bien humide mais non rempli.

8.1 Le rôle des plantes

Les plantes sont essentielles au bon fonctionnement de l'écosystème de la ZTHA pour plusieurs raisons :

- En constituant un support à la croissance du biofilm, contenant une bonne partie des microorganismes.
- En produisant de la biomasse, source de matière organique favorable aux différents processus de dégradation et notamment celui de dénitrification.

- En ralentissant les écoulements, augmentant ainsi le temps de rétention de l'eau et des pesticides, et favorisant la sédimentation des particules.
- En assurant un ombrage à la surface de l'eau, permettant la diminution de la croissance des algues.
- En réduisant l'érosion des berges et des diguettes par dissipation du vent et stabilisation par les racines.

Enfin les plantes constituent un maillon de l'écosystème essentiel à l'implantation de la microfaune et contribuent à la biodiversité commune.

Conseil :

Les plantes doivent être des essences locales, adaptées aux écosystèmes déjà présents. Les espèces invasives sont à exclure. Les plantes doivent s'adapter aux zones immergées.

Encadré 9

8.2 Les zones de plantations

Les bassins épurateurs présentent trois zones avec différents tirants d'eau favorables à l'implantation de végétaux plus ou moins adaptés à l'immersion :

- La zone immergée d'eau.
- La zone semi-immersée sur la berge.
- La zone émergée au niveau de la berge.

Les plantes, situées dans la partie immergée du bassin, participent au traitement de l'eau. La végétation en zone semi-immersée stabilise les berges et les diguettes, exclue les mauvaises herbes et aide à promouvoir la biodiversité.



Figure 48 : Travaux de végétalisation de la ZTHA des Vaux (bassin versant de Rampillon)

8.3 Les plantes adaptées aux zones immergées

Les macrophytes comme les roseaux, les scirpes, les massettes, les nénuphars sont choisis pour leur résistance aux grandes variations de hauteur d'eau. Ces plantes en période de senescence, apportent une source carbonée, favorable à la dénitrification. Elles résistent également à l'invasion de mauvaises herbes et ont tendance à dominer les autres espèces vis-à-vis des nutriments.

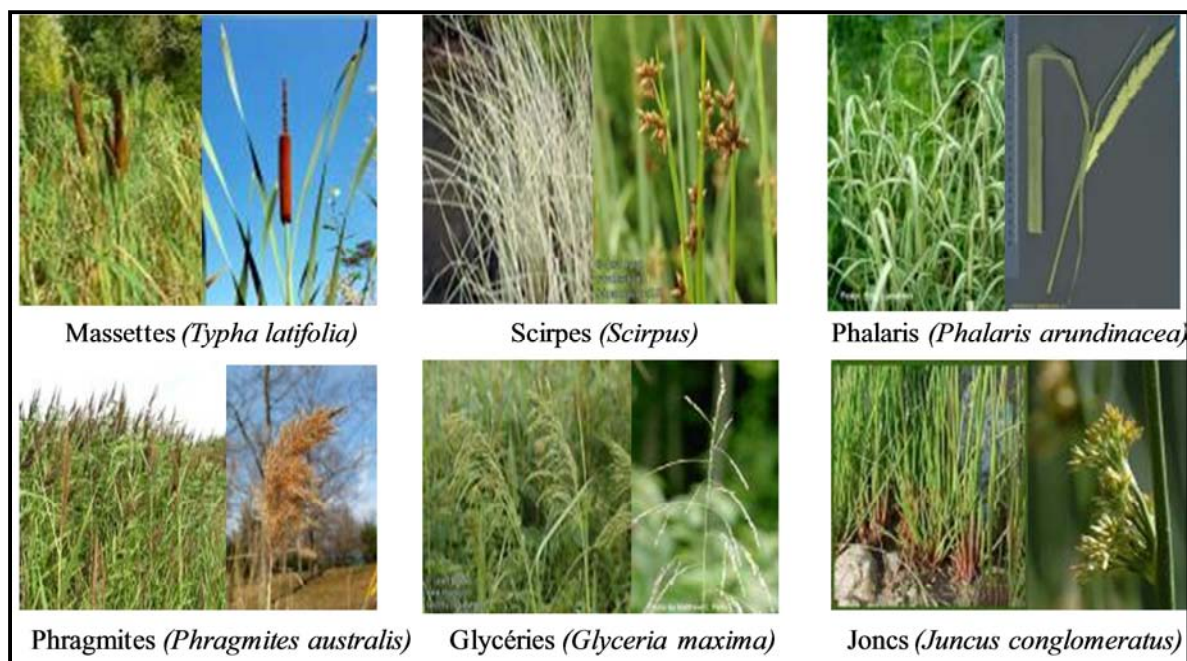


Figure 49 : Exemples de plantes sélectionnées pour les ZTHA de Rampillon

Zones semi-immergées et zones de berges

Ces espèces de plantes, dont les tiges sont plus petites, permettent la réduction de l'érosion des pentes, la réduction des mauvaises herbes et la création d'une biodiversité.

Sur les ZTHA de Rampillon, les espèces utilisées sont présentées en exemple en Figure 50.



Figure 50 : Espèces végétales implantées sur les berges de la ZTHA de Rampillon

8.4 Les conseils techniques de plantation

L'implantation artificielle de la végétation permet de stimuler la dynamique végétale de la ZTHA. La plantation ne garantit pas néanmoins le résultat final à l'équilibre écologique. Certaines essences plantées peuvent disparaître au profit de nouvelles implantations naturelles, la trajectoire écologique

étant propre à chaque contexte. Elle doit s'effectuer assez rapidement avant que le bassin soit envahi par les adventices. Les étapes de la plantation sont les suivantes :

La saison de plantation

Il est préférable de planter la végétation lorsque la ZTHA est déjà humide mais non remplie. Eviter également des plantations trop tardives à l'entrée de l'hiver au risque de voir geler les jeunes plants trop sensibles.

Les plantations se font idéalement au printemps lors de la reprise végétative, ce qui assure une croissance rapide des plantes. Il faut compter de deux à trois ans pour obtenir une bonne couverture végétale.



Figure 51 : ZTHA de Rampillon végétalisée

Comment réaliser la plantation

Par mètre carré, il est recommandé de planter manuellement 3 à 4 plants. Les transplantations doivent être bien ancrées dans le sol pour ne pas flotter ou être emportées lorsque le niveau de l'eau augmentera. Les plants doivent avoir déjà développé leurs racines et leurs rhizomes.

Conseil :

Si l'endroit choisi est recouvert d'adventices, il est conseillé, avant la plantation, de les arracher manuellement. Tout désherbage chimique (utilisation de produits phytosanitaires) est à proscrire.

Encadré 10

Niveau d'eau minimum pour les plantations

Pendant la plantation, le niveau de l'eau dans le bassin doit être maintenu à environ 15 cm au-dessus du niveau du sol. Si les plantes sont implantées en sol sec, l'eau doit ensuite être disponible rapidement pour recouvrir partiellement la nouvelle plantation.

Pour maintenir la végétation pendant la période estivale (période de très faible débit voire nul), il peut être envisagé de réduire le débit de fuite à partir du mois de mai. Si le contexte topographique le permet, la cote du fond de la ZTHA peut se situer à une dizaine de centimètres en dessous de l'ouvrage d'évacuation. Ce volume contribuera ainsi aux besoins des macrophytes dans la plupart des conditions climatiques.

Conseil :

L'été, les plantes doivent pouvoir résister aux conditions de sécheresse.

Il faut néanmoins faire attention à l'invasion des mauvaises herbes pendant ces périodes.

Encadré 11

9 La maintenance

9.1 Les plantes

Les premiers mois après l'implantation de la végétation, il est important de contrôler la progression des adventives et de contrôler le niveau de l'eau. Ensuite, il faut observer si les plantes n'ont pas de problèmes d'implantation majeure et si elles ne sont pas endommagées par des animaux nuisibles (comme les ragondins).

Concernant l'entretien, il est important de différencier la végétation des abords et les berges de la ZTHA.

Les travaux d'entretien des abords de la ZTHA comportent des opérations de fauche régulière (2 fois par an) de la végétation. En revanche, la végétation à l'intérieur de la ZTHA peut être laissée sans entretien afin qu'un équilibre naturel se développe (notion de trajectoire écologique). Il faudra toutefois après une période de 5 à 10 ans, vérifier que la ZTHA n'est pas comblée par les débris végétaux et que le volume de stockage n'est pas fortement réduit. Dans ce cas, il faudra prévoir un curage. Les modalités du curage doivent être prévues dans le dossier. Une solution pourrait être le recyclage des produits extraits sur les parcelles agricoles situées en amont, d'où proviennent initialement ces sédiments.

9.2 Les ouvrages hydrauliques

L'entretien des ouvrages hydrauliques passe par l'observation des blocages possibles des tuyaux d'entrée et de sortie. Il faut néanmoins prévoir le nettoyage des grilles des ouvrages d'alimentation et de vidange, la maintenance des organes de régulation (vanne, seuil, coude PVC) et le nettoyage des regards.

Le contrôle et la visite des ouvrages doivent être effectués toutes les 2 semaines pendant les périodes de fonctionnement et une fois par mois hors période d'écoulement.

9.3 La ZTHA

Il est important de lutter contre la dégradation des talus par l'érosion et par les animaux (ragondins, lapins...). Plusieurs visites de contrôles peuvent être réalisées sur toute l'année.

Dans la partie amont du bassin correspondant à la zone de sédimentation, il est nécessaire de prévoir un curage. En fonction de la charge en matières en suspension, cette opération doit être effectuée tous les 5 à 10 ans.

9.4 La sécurité

Des panneaux signalétiques sont à disposer autour du bassin pour avertir le public de la présence d'un plan d'eau, dans lequel il est interdit de se baigner. Dans le cas où le passage de public est important, il est possible d'entourer le bassin d'une clôture pour prévenir tout risque d'intrusion.

Dans une démarche préventive, une faible pente de berges permet aussi la remontée plus aisée de personnes éventuellement tombées dans l'eau. A Rampillon par exemple, une pente de 3 pour 1 a été retenue, ce qui signifie que pour une dénivelée du bassin de 1m, la longueur de la berge vaut 3m.



Figure 52 : Panneau signalétique

10 Bibliographie

10.1 Illustrations et photographies :

Irstea - Cemagref Antony, 2010 / 2011 / 2012, *Photos de Rampillon, d'Aulnoy, de Bray*.

Molina Sophie, 2011, *Photos de Rampillon*.

Tela Botanica, 2011, *Les plantes adaptées aux zones semi-immergées et aux zones de berges*
<http://www.tela-botanica.org/eflore>.

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 and Atmospheric Research Ltd.

Centre d'Ingénierie Aquatique et Ecologique (CIAE, Nemours) : schéma technique

10.2 Textes :

Fisher, J., Acreman, M.C. 2004. Wetland nutrient removal: a review of the evidence. *Hydrol. Earth Syst. Sc.* 8 (4): 673-685.

Kadlec, R.H., Wallace, S.D., 2008. *Treatment Wetlands*, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL, p. 1016.

Lagacherie P., Favrot J.C., 1987. - Synthèse générale sur les études de secteurs de référence-drainage (période 1981-1986). SES Montpellier, n° 591, 146 p.

Mitsch W.J. and S.E. Jørgensen (2004) Ecological Engineering: Ecological Engineering and Ecosystem Restoration" John Wiley and Sons, Inc., New York. 411p.

Pulou, J. 2011. Les anciennes cressonnières de l'Essonne : Effets de la recolonisation des zones humides artificielles sur la dynamique de l'azote. Ph.D. Thesis. AgroParisTech, 212 p.

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 and Atmospheric Research Ltd.

Tournebize J., Chaumont C., Fesneau C., Guenne A., Vincent B., 2010, Zones humides-Epuration des eaux de drainage, Synthèse des travaux de la convention n°105195, Période 2008-2010, Cemagref d'Antony.

Tournebize J., Passeport E., Chaumont C., Vincent B., 2010, Rapport d'activité 2010: Les zones tampons humides artificielles, Synthèse bibliographique, Mise en oeuvre dans le cadre de trois études AAC, Cemagref Antony.

Tournebize J., Gramaglia C., Birmant F., Bouarfa S., Chaumont C., Vincent B. (2012) Co-design of constructed wetlands to mitigate pesticide pollution in a drained catch-basin: a solution to improve groundwater quality. Irrigation and Drainage 61:75-86. DOI: 10.1002/ird.1655.

Tournebize J., Vincent B., Chaumont C., Gramaglia C., Margoum C., Molle P., Carluer N., Gril J.J. (2011) Ecological services of artificial wetland for pesticide mitigation Socio-technical adaptation for watershed management through TRUSTEA project feedback. Procedia Environmental Sciences 9:183-190.

Tournebize, J., E. Passeport, C. Chaumont, C. Fesneau, A. Guenne and B. Vincent (2013). "Pesticide de-contamination of surface waters as a wetland ecosystem service in agricultural landscapes." Ecological Engineering 56: 51-59.

Annexe 1 : Dimensionnement du volume des ZTHA

Auteurs :

Adrien MARCON
Hocine HENINE
Julien TOURNEBIZE

Unité de recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés
Irstea, groupement d'Antony
Contact : julien.tournebize@irstea.fr

Modélisation des volumes d'eau de drainage à intercepter

SIDRA-SISWHOC est la combinaison de SIDRA, modèle de simulation des écoulements de drainage agricole par tuyaux enterrés de nappe perchée et de SISWHOC, module de calcul de la recharge de nappe perchée drainée, sur la base de la réserve utile des sols. Les données d'entrée de ce module sont la pluie et l'ETP au pas de temps horaire. Les paramètres nécessaires sont les caractéristiques du drainage (profondeur du drain, écartement), les propriétés hydrodynamiques du sol drainé (conductivité hydraulique à saturation et porosité de drainage) et les propriétés de rétention du sol (réserve utile et réserve facilement utilisable). Il calcule la hauteur de la nappe d'eau superficielle et le débit drainé à chaque pas de temps sur une année hydrologique entière (de octobre à septembre).

SIDRA

SIDRA est la composante calculant, sur une base physique, les débits drainés et les variations de la hauteur de la nappe d'eau superficielle à chaque pas de temps. Pour calculer ces deux variables, ce module repose sur l'équation de Boussinesq, dont la résolution, en régime permanent, est assurée par la fonction de Hooghoudt. L'expression mathématique de ces équations est donnée ci-dessous (Zimmer 1988):

$$\begin{aligned}dH / dt &= 1 / (\mu * C) * [R(t) - J(H)] \\ Q(t) &= A * J(H) + (1-A) * R(t) \\ J(H) &= K * H^2 / L^2\end{aligned}$$

Avec :

- **H**, la hauteur de la nappe d'eau superficielle (m),
- **R(t)**, la recharge de la nappe d'eau superficielle (m³/s),
- **Q(t)**, le débit drainé (m³/s),
- **J(H)**, la fonction de Hooghoudt (m³/s),
- **A** et **C**, les paramètres de formes de nappe superficielle [-],
- **μ**, la porosité de drainage du sol [-],
- **K**, la conductivité hydraulique (m/jour),
- **L**, le demi-espacement entre deux drains (m).

SIDRA repose sur les hypothèses suivantes (Branger, Tournebize et al. 2009) (Bouarfa and Zimmer 2000) (Lesaffre 1988) :

- la forme de la nappe superficielle est ellipsoïde et constante (hypothèse acceptable si la nervosité σ de la nappe est supérieure à 1),
- il y a présence d'une couche imperméable peu profonde,
- les drains reposent sur la couche imperméable,

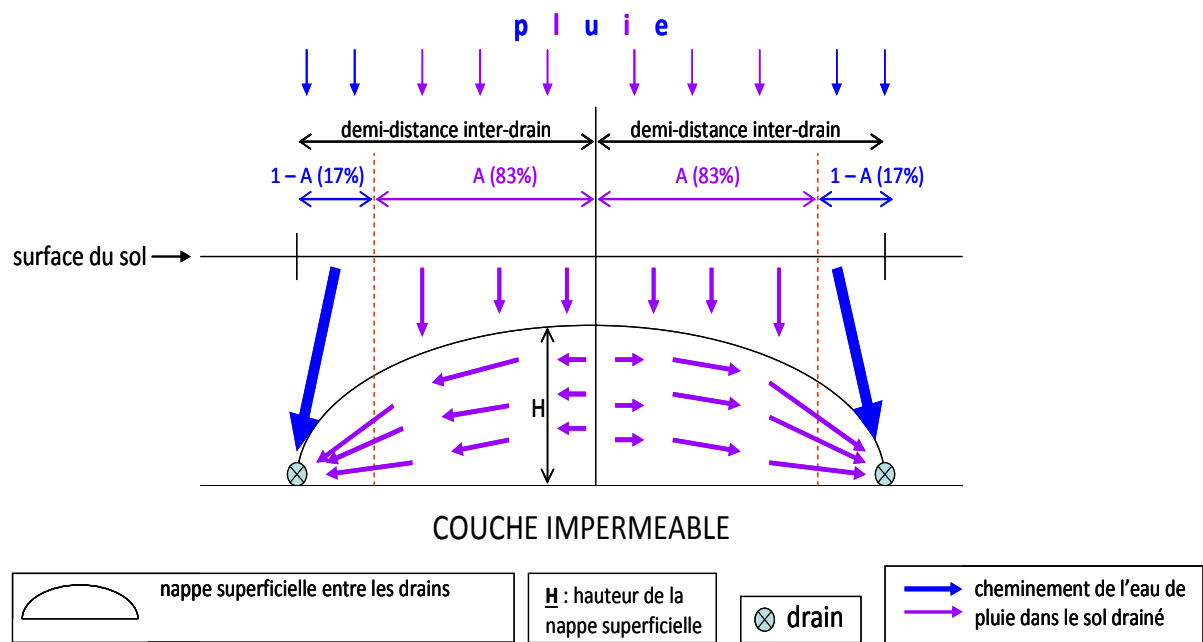


Figure : Représentation schématique de la forme de la nappe superficielle entre deux drains et de l'écoulement de l'eau dans le sol. La nappe a une forme de demi-ellipse. (Emsalem 2011)

La zone affectée du coefficient A (83 %) est la zone de cheminement lent de l'eau à travers la nappe superficielle ; les transferts de pesticides vers le drain se font lentement.

La zone affectée du coefficient $[1 - A]$ (17 %) est la zone de cheminement rapide de l'eau ; le trajet de l'eau y est vertical et direct vers le drain. Dans cette dernière zone, les transferts de pesticides vers le drain se font rapidement.

SIDRA nécessite une valeur de recharge de la nappe d'eau superficielle à chaque pas de temps. Le calcul de cette recharge est assuré par le module SISWHOC.

SISWHOC

Ce module repose, quant à lui, sur une base conceptuelle, qui prend en compte la réserve en eau du sol dans le calcul de la recharge de la nappe superficielle et ce, en fonction de la période de l'année hydrologique qui comprend une phase de réhumectation du profil de sol (automne), une phase de drainage intense, quand la réserve utile est pleine, toute pluie est convertie en écoulement de drainage, et une phase printanière d'écoulement de drainage sporadique (vidange de la réserve utile par tarrissement de nappe et reprise de l'eau stockée par évapotranspiration).

Le sol est considéré par ce module comme étant un réservoir d'eau correspondant à la capacité au champ. La quantité d'eau dans ce réservoir correspond au stock d'eau dans le sol, qui est calculé par SISWHOC à chaque pas de temps. Ce réservoir a une capacité maximum, fixée à la réserve facilement utilisable. Il a également été fixé un seuil, appelé seuil SDI (seuil de drainage intense), qui correspond au seuil à partir duquel toute l'eau s'écoulant dans le sol alimente les drains. Ce seuil est fixé à la valeur de la réserve utile. Ces deux valeurs limites de réservoir à la capacité au champ et de seuil SDI ont été obtenues par calage sur un site expérimental de Bray (Indre et Loire) et validé sur un autre site expérimental de Chantemerle (Seine et Marne). C'est par rapport à ces deux limites que la recharge est calculée, selon l'état hydrique du sol rencontré au cours de l'année hydrologique.

Quatre situations sont considérées par SISWHOC :

- Si la pluie est supérieure à l'ETP, alors la recharge est considérée comme étant la différence entre la pluie et l'ETP ; toute l'eau correspondant à cette différence recharge alors la nappe superficielle. Si, au contraire, l'ETP est supérieure à la pluie, la recharge est alors nulle. Cette

situation est rencontrée lors de la saison d'amorce du drainage. Elle correspond à la période de l'année où la réserve en eau du sol se reconstitue, au début de l'année hydrologique.

- La situation où le stock d'eau dépasse la limite du réservoir à la capacité au champ sous l'effet de la pluie, tout en restant en dessous du seuil SDI. L'eau s'écoulant dans le sol se partage alors entre la recharge de la nappe superficielle pour 2/3, et l'alimentation en eau des drains pour 1/3. La pluie est alors supérieure à l'ETP. Cette situation est rencontrée en milieu et fin de saison d'amorce du drainage, lorsqu'on commence à observer du drainage.
- La situation où le stock d'eau du sol dépasse le seuil SDI. Toute l'eau s'écoulant dans le sol alimente alors les drains. Cette situation se rencontre lors de la saison de drainage intense.
- La situation où l'ETP devient plus importante que la pluie. La notion d'évapotranspiration maximum (ETM) a été introduite pour vider le réservoir à la capacité au champ. L'ETM est calculée à partir de l'ETP ; elle n'est pas calculée de septembre à mars, car l'effet de la végétation sur la réserve en eau du sol est considérée comme négligeable. C'est la situation rencontrée à la fin de l'année hydrologique, pendant l'été.

Les valeurs des paramètres qui ont servi de base pour cette analyse sont les suivantes :

On peut voir que c'est aux paramètres « Réservoir à la capacité au champ » et au coefficient A de forme de nappe d'eau superficielle que SIDRA-SISWHOC est le plus sensible. Ces deux paramètres sont donc à déterminer précisément. La capacité au champ étant dépendante du type de sol, le module SIDRA-SISWHOC sera donc très sensible au type de sol.

Ainsi les modules SIDRA-SISWHOC nous donne des débits drainés au pas de temps horaire, mais aussi journalier. La phase de dimensionnement consiste à déterminer le volume optimal pour une zone tampon humide en fonction de critères fixés au départ (critère pouvant donner lieu à discussion). Ces critères sont le temps de résidence désiré, le pourcentage d'eau stockée dans la ZTHA par rapport aux quantités écoulées, correspondant à des épisodes de surverses liés à une ZTHA remplie, et d'un diamètre de tuyaux limitant le débit à l'entrée.

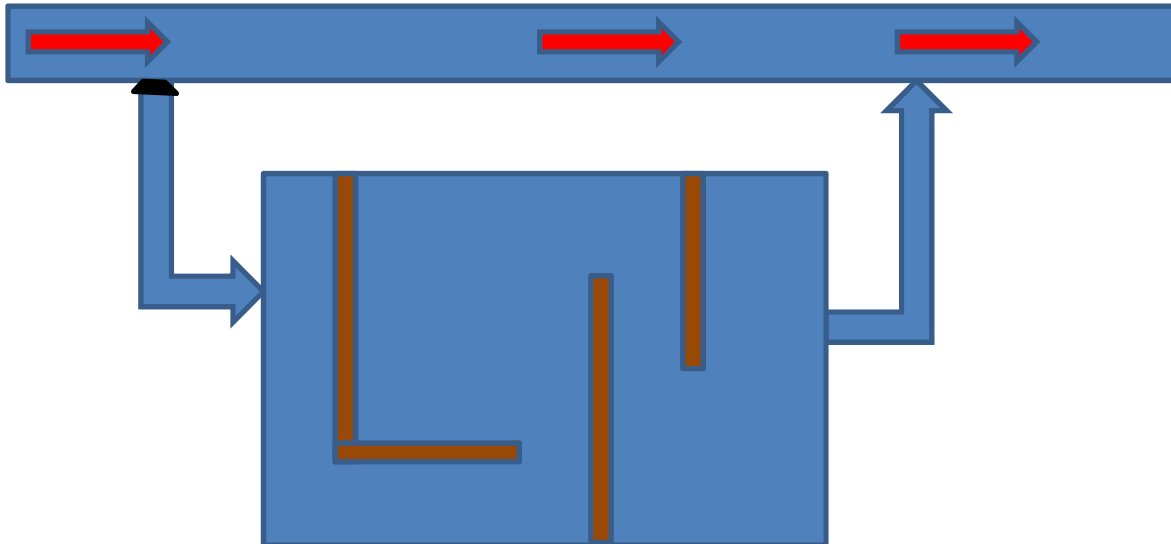


Figure 53 : Schéma d'une ZTHA en parallèle avec débit limité à l'entrée du bassin de stockage

Le temps de résidence, ou temps de séjour, dans une ZTHA traduit la durée durant laquelle une molécule d'eau sera contenue dans le bassin de stockage. Il se calcule en jour et correspond au rapport entre le volume du bassin de stockage et le débit de fuite.

$$HRT = V/Q$$

- HRT: hydraulic residential time (jour)
- V: volume (m³)
- Q : débit de fuite (m³/jour)

Plus le volume est important et plus les vitesses internes sont réduites dans la ZTHA, plus le temps de séjour est important.

Nous proposons une gestion des événements moins fréquents (période de retour > 2 ans) par la mise en place d'une surverse. Nous proposons de limiter la surverse à 20% du cumul total d'eau intercepté.

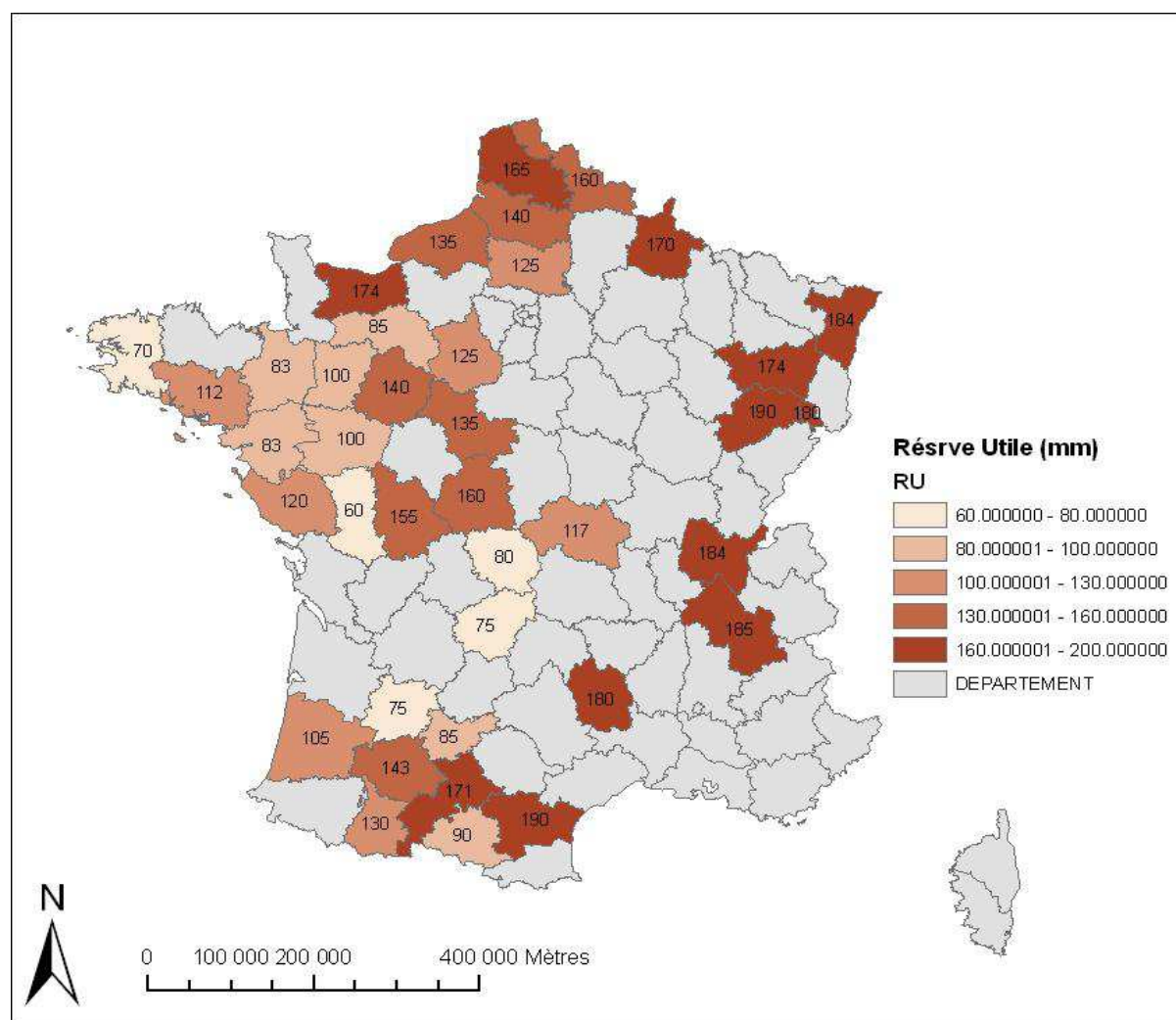
Basé sur des crues en dehors de la saison de drainage intense (hors décembre à mars), le diamètre du tuyau d'entrée de la ZTHA est limité à 0,5 L/s/ha. Pour rappel les débits de dimensionnement du drainage pour la saison de drainage intense varie entre 1 et 1,5 L/s/ha.

Jeux de données pédologiques : les secteurs de référence drainage

Les secteurs de référence des opérations de drainage ont été étudiés pendant les années 1980 afin de déployer les méthodologies techniques de drainage agricole en fonction des types de sols rencontrés sur les territoires agricoles hydromorphes. Cette opération nationale a permis de caractériser les propriétés hydriques des sols sur une centaine de points répartis à l'échelle de la France.

Evaluation des réserves utiles

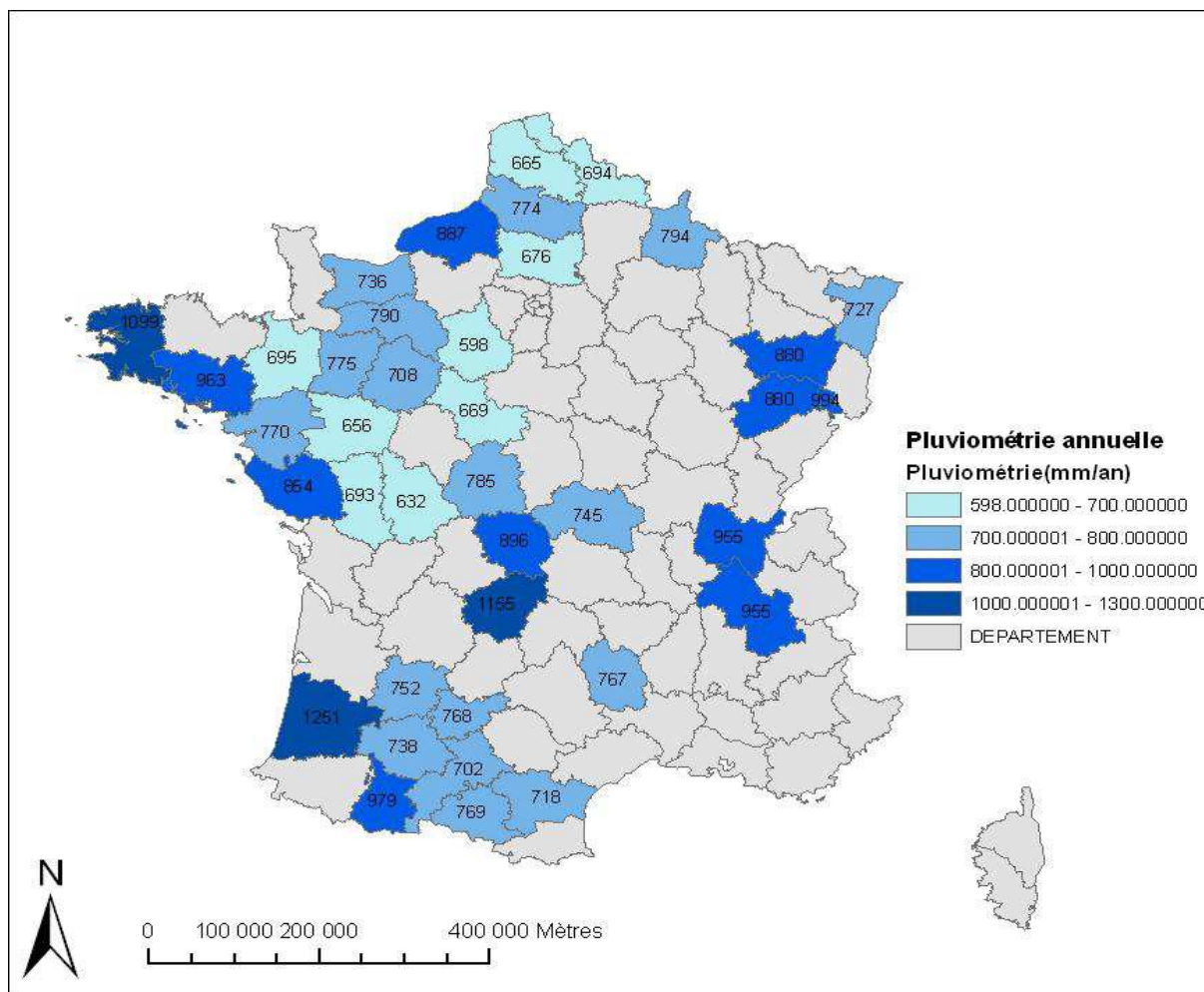
Les valeurs de réserves utiles retenues dans les calculs ont été obtenues soit à partir des données des secteurs de références, soit à partir de fonction de pédotransferts.



Cartographie des Réserves Utiles, retenues dans les calculs

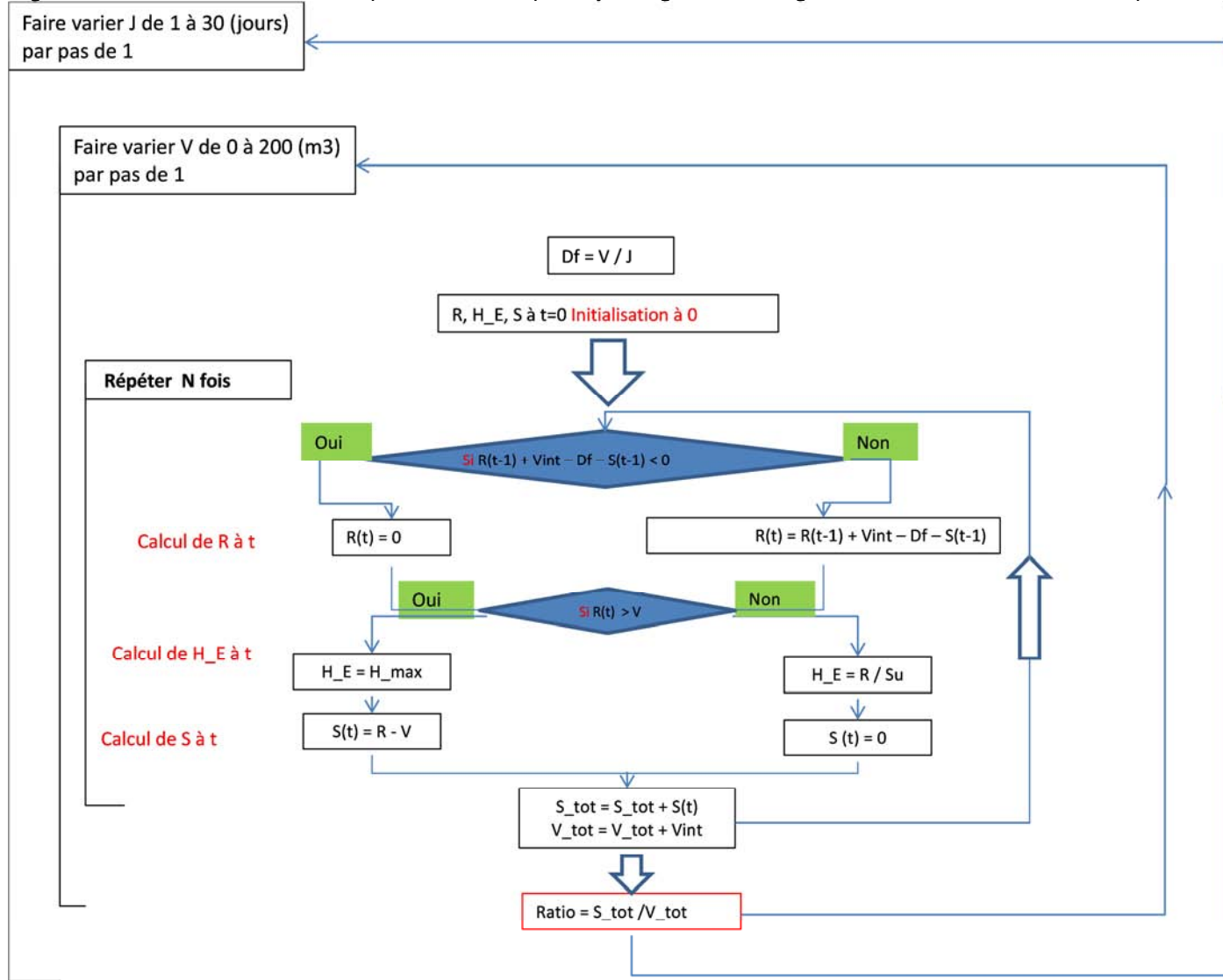
Données climatiques au pas de temps journalier

Les données climatiques (pluviométries et ETP) ont été obtenues à partir des données SAFRAN de MétéoFrance sur une période de 1950 à 2010.

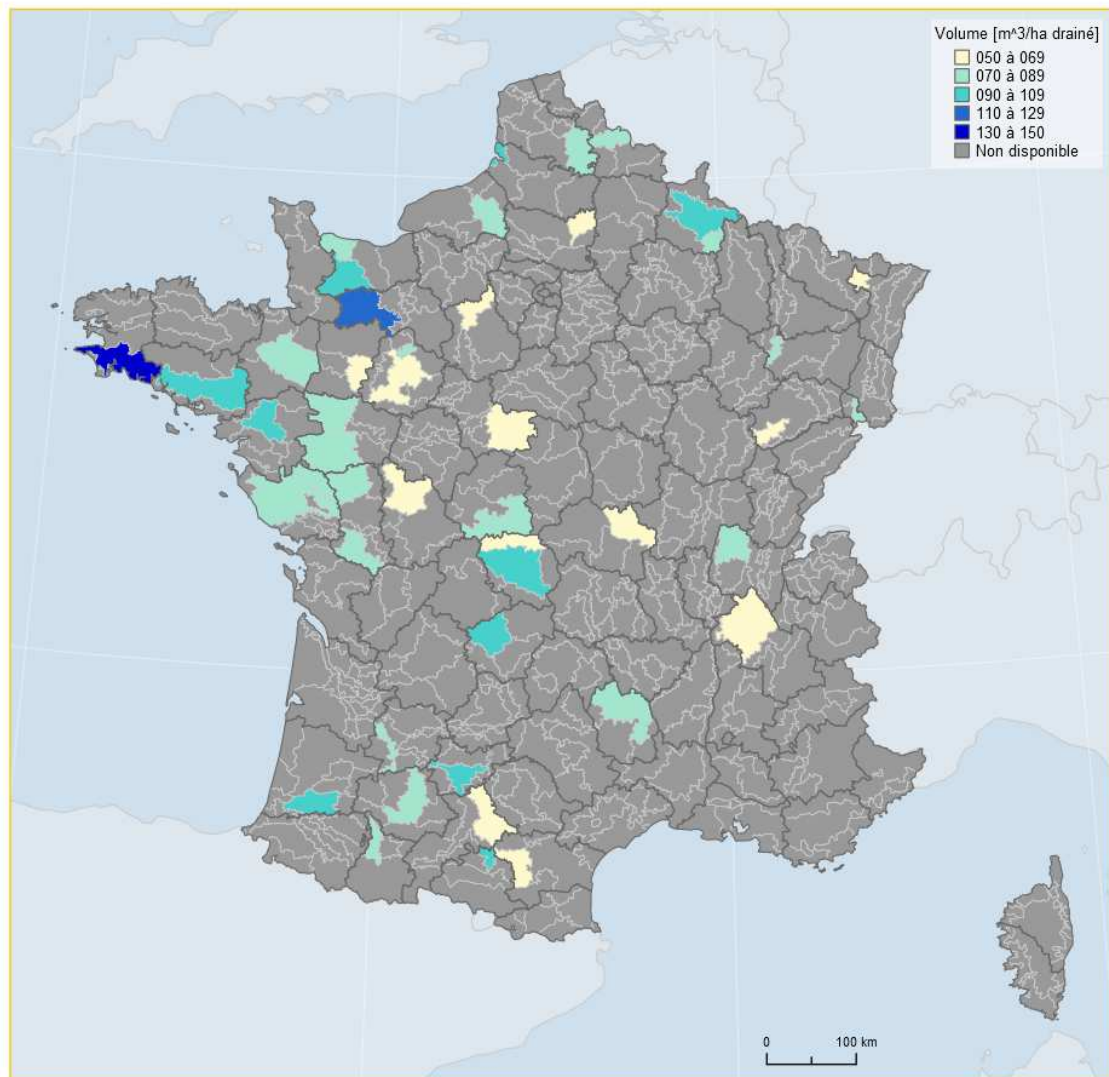


Cartographie de la pluviométrie moyenne 1950-2010 (calculée à partir des données MétéoFrance)

Algorithme de calcul des volumes, prenant en compte l'hydrologie du drainage, le volume de la ZTHA, le temps de séjour associé, un critère seuil de surverse

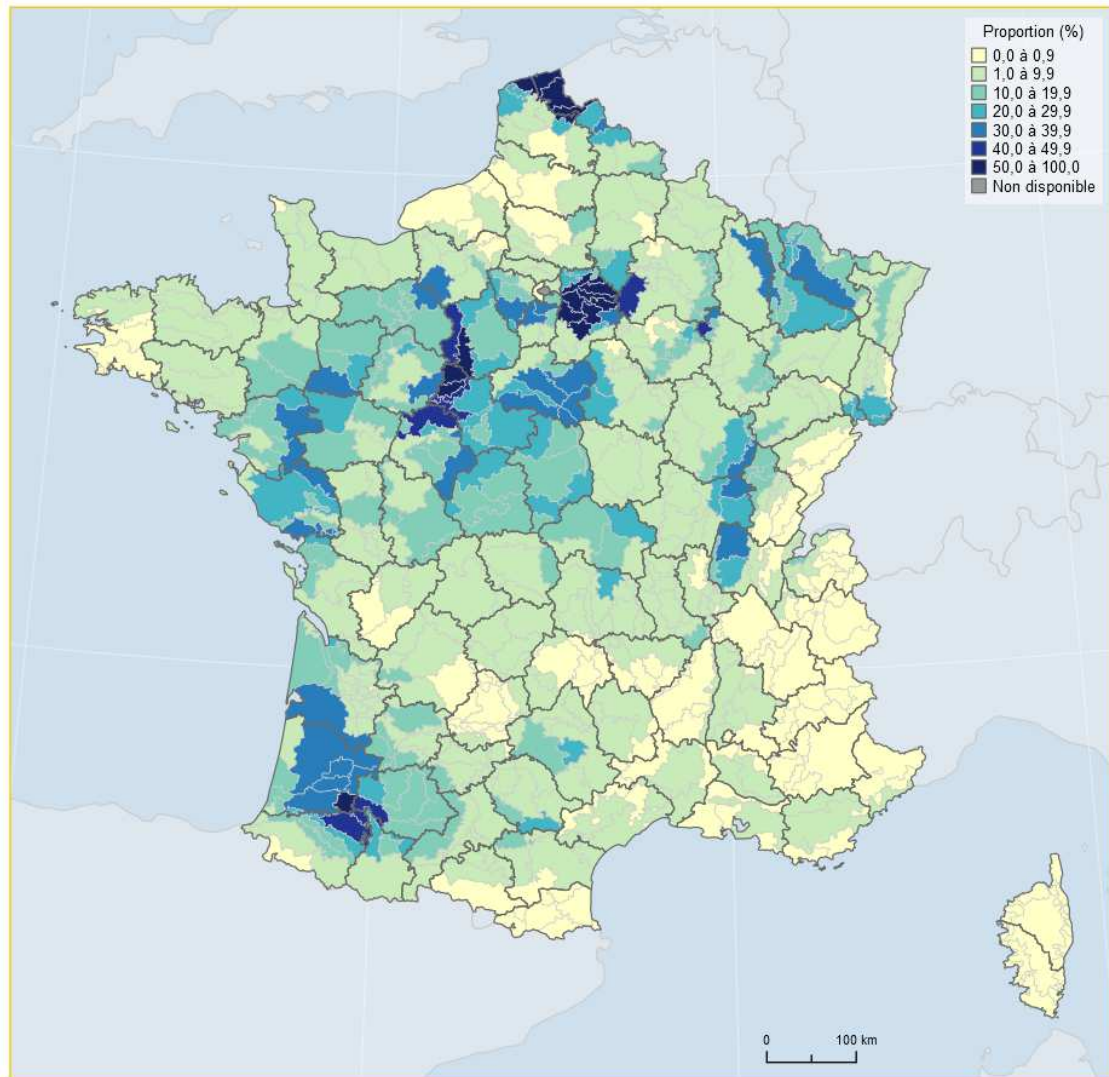


Volume de la ZTHA



IRSTEA - HBAN - 2014

Proportion de la surface agricole utile drainée en 2010
(France métropolitaine par petites régions agricoles)



IRSTEA - HBAN - 2013

Source des données : Agreste - Recensement agricole 2010

Cartographie des proportions de surfaces drainées par rapport à la surface agricole utile, par petite région agricole.

Département	Ksat (m/j)	Porosité de drainage μ (%)	RU	RFU	Tps de résidence (jours)	Seuil de surverse 20%	Volume de la ZTHA (m3/ha drainé)	Ratio de Surface % (pour 0,8m de profondeur)
Moyenne	1.973	0.038	130	90	7	0.2	77	0.97
Ain	0.235	0.019	184	129	7	0.2	89	1.11
Allier	0.249	0.015	117	82	7	0.2	70	0.87
Ardennes	0.14	0.026	169	119	7	0.2	111	1.39
Ardennes	0.52	0.027	179	125	7	0.2	98	1.22
Ardennes	2.692	0.044	162	114	7	0.2	72	0.90
Ardennes	0.8	0.03	189	133	7	0.2	74	0.92
Ardennes	1.438	0.034	178	125	7	0.2	69	0.86
Ariège	0.441	0.058	90	60	7	0.2	92	1.15
Aude	4.7	0.01	190	130	7	0.2	55	0.69
Aude	0.92	0.011	82	55	7	0.2	56	0.70
Bas Rhin	0.35	0.018	184	129	7	0.2	83	1.04
Bas Rhin	2.85	0.024	71	50	7	0.2	61	0.76
Bas Rhin	0.235	0.4	183	129	7	0.2	23	0.28
Belfort	0.82	0.019	179	125	7	0.2	78	0.98
Calvados	1.115	0.02	164	115	7	0.2	71	0.88
Calvados	0.225	0.1	187	129	7	0.2	97	1.21
Correze	1.033	0.036	52	35	7	0.2	101	1.26
Correze	2.19	0.057	105	80	7	0.2	104	1.29
Creuse	7.987	0.036	70	46	7	0.2	67	0.84
Creuse	0.867	0.047	83	58	7	0.2	108	1.35
Creuse	12.1	0.068	112	79	7	0.2	75	0.94
Deux Sèvres	3.068	0.045	100	70	7	0.2	66	0.83
Deux Sèvres	0.458	0.026	45	32	7	0.2	81	1.01
Deux Sèvres	0.458	0.026	45	32	7	0.2	81	1.01
Deux Sèvres	5.232	0.042	45	30	7	0.2	73	0.92
Deux Sèvres	0.16	0.02	150	100	7	0.2	101	1.27
Deux Sèvres	7.1	0.032	50	30	7	0.2	70	0.87
Eure et Loir	1.355	0.039	108	58	7	0.2	58	0.72
Finistère	0.397	0.051	70	50	7	0.2	142	1.78
Gers	0.217	0.034	143	98	7	0.2	85	1.06
Haute Garonne	0.35	0.029	171	120	7	0.2	62	0.78
Haute Pyrénées	0.508	0.022	130	70	7	0.2	74	0.93
Haute Saône	2.5	0.008	189	133	7	0.2	65	0.82
Haute Saône	3.39	0.016	189	133	7	0.2	64	0.80
Ile et Vilaine	1	0.033	83	58	7	0.2	82	1.03
Indre	1.867	0.057	169	118	7	0.2	76	0.95
Indre	0.237	0.017	151	106	7	0.2	78	0.97
Isère	0.423	0.018	182	127	7	0.2	72	0.91
Isère	2.763	0.02	189	133	7	0.2	59	0.74
Landes	1.37	0.036	105	70	7	0.2	92	1.16
Loir et Cher	0.423	0.016	172	120	7	0.2	54	0.68
Loir et Cher	3.92	0.046	100	70	7	0.2	66	0.82
Loire Atlantique	0.282	0.025	83	55	7	0.2	104	1.30

Lot et Garonne	4.15	0.05	53	35	7	0.2	68	0.85
Lot et Garonne	0.483	0.027	90	60	7	0.2	81	1.01
Lozère	1.052	0.033	179	125	7	0.2	72	0.90
Maine et Loire	0.57	0.028	105	70	7	0.2	77	0.96
Maine et Loire	1.04	0.033	93	66	7	0.2	74	0.93
Mayenne	3.1	0.015	149	105	7	0.2	66	0.83
Mayenne	6	0.007	66	46	7	0.2	71	0.89
Morbihan	1.673	0.036	112	79	7	0.2	91	1.14
Nord	0.606	0.037	149	104	7	0.2	82	1.03
Nord	1.233	0.045	95	66	7	0.2	87	1.09
Nord	3.973	0.023	181	127	7	0.2	57	0.71
Oise	0.77	0.01	125	83	7	0.2	59	0.74
Orne	2.586	0.101	85	60	7	0.2	113	1.41
Pas de Calais	1.717	0.033	163	114	7	0.2	69	0.86
Pas de Calais	4.628	0.13	199	139	7	0.2	79	0.99
Pas de Calais	0.878	0.018	154	108	7	0.2	63	0.79
Sarthe	2.833	0.045	100	66	7	0.2	74	0.92
Sarthe	0.07	0.04	200	130	7	0.2	64	0.80
Sarthe	6.9	0.025	150	100	7	0.2	59	0.73
Sarthe	0.687	0.022	75	50	7	0.2	74	0.92
Sarthe	0.687	0.022	75	50	7	0.2	74	0.92
Seine Maritime	0.891	0.021	98	69	7	0.2	88	1.09
Seine Maritime	2.998	0.017	170	120	7	0.2	73	0.91
Somme	6	0.008	115	81	7	0.2	71	0.88
Somme	2.476	0.062	149	104	7	0.2	94	1.17
Somme	0.483	0.04	143	100	7	0.2	106	1.32
Tarn et Garonne	0.169	0.025	76	51	7	0.2	91	1.14
Vendée	0.537	0.022	167	116	7	0.2	93	1.16
Vendée	2.22	0.038	120	83	7	0.2	85	1.07
Vendée	6.02	0.038	114	80	7	0.2	74	0.93
Vienne	3.577	0.013	154	108	7	0.2	54	0.68
Vienne	0.275	0.006	184	129	7	0.2	47	0.59
Vienne	0.958	0.048	139	98	7	0.2	72	0.90
Vosges	0.328	0.014	174	125	7	0.2	88	1.10

Tableau des volumes par département

Annexe 2 : Module simplifié « efficacité d'atténuation des nitrates versus temps de séjour » (version 1)

Le développement de ce module est basé sur la publication de Tanner et Kadlec, 2013¹, et de l'approche dite Tank in Series de Kadlec et Wallace, 2009².

Les hypothèses de travail comprennent un fonctionnement hydrologique en régime permanent, un nombre de réservoirs égal à 4, un coefficient de dénitrification constant sur l'année,

Le modèle PKC* de Kadlec et Wallace 2008 s'écrit

$$\frac{C_0 - C^*}{C_i - C^*} = \left(1 + \frac{k \cdot \tau_n}{N \cdot h}\right)^{-N} \text{ et si } N \rightarrow \infty \text{ alors } \frac{C_0 - C^*}{C_i - C^*} = \exp\left(\frac{-k \cdot \tau_n}{h}\right)$$

Avec C_i et C_0 les concentrations en nitrate à l'entrée et à la sortie (mg.L^{-1})

H la hauteur d'eau de la ZTHA (m)

k le coefficient de charge apparente ($\text{m.j}^{-1} = \text{m.an}^{-1}/365$)

N le nombre de tank in series (TIS)

τ_n est le temps de séjour nominal (j), calculé comme le ratio du volume disponible de la ZTHA par le débit d'entrée.

En régime permanent, N retenu dans le calcul est celui recommandé par Kadlec et Wallace, $N=4,4$ TIS.

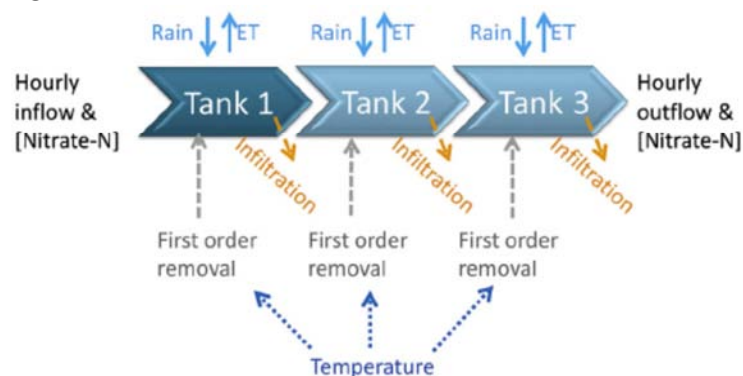


Figure Diagramme conceptuel du modèle simplifié de ZTHA. Les flux hydrologiques en entrée sont transformés selon 3 réservoirs parfaitement mélangés en série. Le paramètre de cinétique de premier ordre k (constante de dénitrification) sont à ajuster selon la température et le réservoir (tiré de Tanner et Kadlec, 2013)

Pour un paramètre, issu des résultats d'Irstea, sur le site de Chantemerle (Seine et Marne), le coefficient de dénitrification des nitrates est évalué à : $k_{\text{dénit}}=0,07\text{mgN/m}^2/\text{h}$. Nous en déduisons la courbe suivante, qui précise le temps de séjour nécessaire en fonction de l'objectif d'élimination des nitrates. Cette approche sera améliorée dans les années à venir, en intégrant aussi les pesticides.

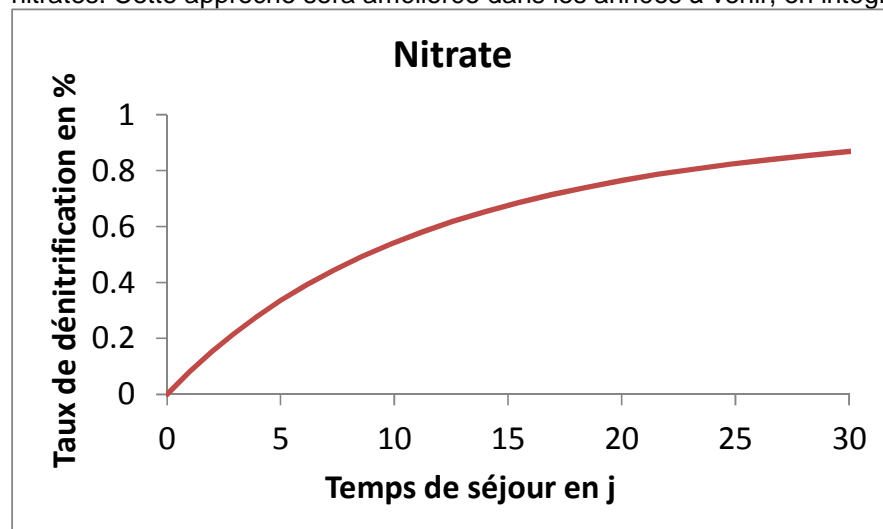


Figure. Exemple d'abaque de rétention de nitrate en fonction du temps de séjour.

¹ Tanner C. et Kadlec R. 2013. Influence of hydrological regime on wetland attenuation of diffuse agricultural nitrate losses. Ecological Engineering, 56 :79-88

² Kadlec et Wallace, 2009. Treatment Wetlands. CRC Press, Boca Raton. FL.

Onema
Hall C – Le Nadar
5, square Félix Nadar
94300 Vincennes
01 45 14 36 00
www.onema.fr

Irstea
1 rue Pierre Gilles de Gennes
CS 10030
F92761 ANTONY cedex
01 40 96 60 00
www.irstea.fr