

Qualité de l'eau et écotoxicologie des zones tampons humides artificielles de Rampillon (Seine-et-Marne)

Dans les régions de grandes cultures, la préservation de la qualité de l'eau passe par la réduction des pollutions diffuses d'origine agricole. En Seine-et-Marne, des chercheurs d'INRAE et des acteurs du territoire de la Brie Nangisienne ont travaillé à la mise en place de zones tampons humides artificielles qui par l'action combinée du soleil, des bactéries et des plantes ont permis la dégradation naturelle des pesticides et des nitrates interceptés dans les eaux de drainage. Les premiers résultats encourageants montrent l'efficacité de ces solutions fondées sur la nature complémentaires d'actions visant à diminuer l'usage des produits phytosanitaires.

La problématique

L'intensification de l'usage agricole des terres ainsi que l'augmentation de l'utilisation de fertilisants de synthèse et de produits phytosanitaires ont induit des pollutions diffuses (eau, sol, air) sur de grandes surfaces. Le milieu aquatique est fortement perturbé puisqu'il subit le transfert ponctuel et/ou permanent de contaminants à des concentrations parfois supérieures aux normes de qualité environnementale. Pour y faire face, la directive cadre européenne sur l'eau (DCE – directive 2000/60) offre un cadre pour la gestion et la protection des eaux dans une perspective de développement durable. Dans un premier temps, les mesures des différentes masses d'eau ont permis de faire un état des lieux. Puis, en complément d'actions agronomiques visant la réduction de la pression chimique, des actions de gestion sont mises en place afin d'améliorer la qualité de l'eau. C'est dans cet objectif que des solutions d'ingénierie écologique se développent afin de pallier les déséquilibres écologiques générés par l'action anthropique.

L'article présente l'exemple d'une démarche expérimentale localisée en Seine-et-Marne dans la Brie Nangisienne. Ce territoire est caractérisé par de grandes cultures principalement de céréales et de betteraves cultivées sur des sols de type Luvisol hydromorphe, très souvent drainés artificiellement (> 50 % en Seine-

et-Marne, source Agreste). L'intensification agricole est identifiée par les acteurs publics comme origine de la dégradation de la qualité de l'eau en particulier par les nitrates, les pesticides et dans une moindre mesure les métaux. Or dans cette région, le fonctionnement hydrologique spécifique composé de zones d'engouffrements vers l'aquifère montre que deux tiers de la recharge de la nappe de Champigny est constitué par un transfert direct des eaux de surface, incluant les eaux de drainage agricole. Ceci affecte la qualité de la ressource approvisionnant la région de l'Est parisien en eau potable et représente un enjeu fort.

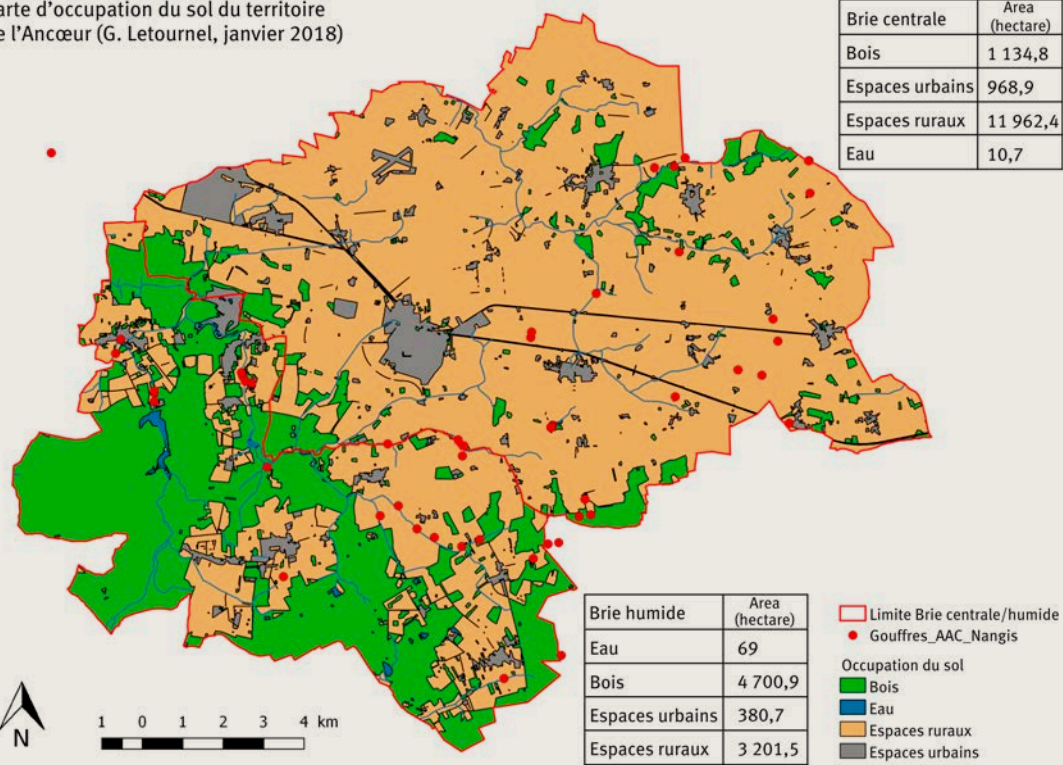
Pour agir en réponse à ces enjeux environnementaux, des solutions fondées sur la nature ont été testées sur ce territoire. Notre choix s'est orienté sur les zones tampons humides artificielles (ZTHA) qui en interceptant les eaux de drainage agricole (Tournebize *et al.*, 2020), améliorent leur qualité.

Historique : un projet partenarial et participatif

Dès 2005, INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement, ex-Irstea) et AQUI'Brie (association en charge de la connaissance et de la protection de l'aquifère du Champigny) déve-

1 Occupation du sol sur le territoire Brié'Eau (avec la Brie humide au sud et la Brie centrale au nord).

Carte d'occupation du sol du territoire de l'Ancœur (G. Letournel, janvier 2018)



loppent des actions pour quantifier et diminuer les flux de nutriments et de produits phytosanitaires qui transitent par le réseau hydrographique de surface (alimenté par le drainage agricole). En partenariat avec les agriculteurs et les élus, ils conduisent une expérimentation scientifique qui aboutit cinq ans plus tard à la création de quatre ZTHA (Tournebize *et al.*, 2012). Elles sont situées sur le bassin versant du Ru des Gouffres (355 ha) à Rampillon, commune située à 80 km au sud-est de Paris.

Dans cette première phase, la synthèse de résultats des suivis scientifiques a été communiquée aux acteurs locaux dès 2012.

De l'expérimentation locale de Rampillon s'ensuit le projet de recherche-action Brié'Eau (2016-2020, projet PSDR – Pour et sur le développement régional – financé par la région Île-de-France et INRAE). Ce projet apporte un cadre théorique à l'écologisation de l'agriculture et un cadre pratique au déploiement d'actions écologiques sur le territoire à une échelle compatible avec celle de la gestion de la ressource en eau, en favorisant le dialogue territorial autour de la gestion des pollutions diffuses. Dans le territoire du projet Brié'Eau, constitué de quatorze communes autour de Nangis (figure 1), le projet rassemble de nombreux organismes et acteurs autour d'objectifs communs : qualité de l'eau, biodiversité et aménagement du territoire. Le dialogue territorial porte sur deux leviers d'action : les zones tampons et les changements de pratiques.

La qualité de l'eau

Contexte en grandes cultures

La Brie Nangissienne est soumise à un climat tempéré avec une température moyenne de 10,6°C et 647 mm de précipitation par an. L'intensité parfois élevée des précipitations qui tombent sur ce territoire agricole entraîne des réponses hydrologiques importantes. En effet, les sols hydromorphes (luvisol dégradé) sont drainés par tuyaux enterrés à 90 cm de profondeur et 12 m d'écartement sur l'ensemble du territoire. Les écoulements moyens interannuels des eaux de drainage provenant de l'excédent hydrique hivernal s'élèvent à 180 mm, s'échelonnant de novembre à juin. Une étude sur l'assolement du bassin versant du Ru des Gouffres, d'une superficie de 355 ha, entre 2012 et 2015, indique que le blé d'hiver est la culture majoritaire (entre 43 et 52%). Le maïs a tendance à augmenter, de 8 à 22%, au détriment de la féverole, de 19 à 2%. La betterave varie autour de 12 à 20%. À noter aussi la réapparition du colza en 2014-2015 avec 8%. Les autres cultures concernent le lin, l'orge et l'avoine (moins de 10%).

Herbicides (H), fongicides (F), régulateurs de croissance (RC) et insecticides (I), sont dans l'ordre les produits phytosanitaires les plus appliqués sur les cultures du bassin versant. La quantité de produits phytosanitaires appliquée sur le bassin versant du Ru des Gouffres est en moyenne de 1,7 kg/ha/an. Les suivis à l'exutoire du

1 LE FONCTIONNEMENT DES ZONES TAMPONS HUMIDES ARTIFICIELLES DE RAMPILLON

Une zone tampon humide artificielle (ZTHA) est une interface humide et végétalisée entre les zones de production agricole et les milieux aquatiques. Sa fonction principale est d'intercepter les eaux issues du drainage agricole amont et d'augmenter leur temps de séjour à l'interface eau-sédiment, ce qui favorise les réactions bio-géochimiques.

Ces réactions permettent d'améliorer la qualité de l'eau en piégeant et dégradant les produits phytosanitaires et les ions nitrate. Dans la Brie Nangisienne, les ZTHA sont gérées de manière concertée avec les agriculteurs et les acteurs des territoires. Des organismes tels que la FDC77*, l'ONCFS**, la Chambre d'agriculture... s'y associent. Le foncier où elles ont été implantées appartient soit aux agriculteurs, soit au Syndicat mixte des Quatre Vallées de la Brie.

* Fédération des chasseurs de Seine-et-Marne.

** Depuis le 1er janvier 2020, l'Office national de la chasse et de la faune sauvage (ONCFS) a été fusionné avec l'Agence française de la biodiversité (AFB) pour créer le nouvel Office français de la biodiversité (OFB).

1 Zone tampon humide artificielle terminale de Rampillon. Positionnée en dérivation du Ru des Gouffres (côté nord), l'eau entre par l'angle nord-est.



© C. Chaumont - INRAE

bassin versant montrent qu'environ 0,1 % de ce qui est appliqué est exporté par drainage vers les milieux aquatiques, soit environ 1,5 g/ha/an toutes molécules confondues. Cependant, ce faible ratio entraîne parfois des dépassements de concentrations maximales autorisées par la directive cadre sur l'eau (DCE) et les normes françaises. Concernant l'azote, 150 kg/ha sont appliqués annuellement par fertilisation sur le bassin versant. La concentration moyenne annuelle lixiviée sur la période 2012-2017 est de 63,3 mg/L de nitrates, dépassant ainsi la norme de 50 mg/L, ce qui représente une masse annuelle moyenne de 9,5 tonnes ou 27 kg/ha d'azote exportées vers le système aquatique sur l'ensemble du bassin versant. Autrement dit, environ 18% de la masse d'azote appliquée est lixiviée. Dans un système où les pollutions diffuses sont présentes, les ZTHA interceptent les flux provenant des parcelles drainées et favorisent les réactions biogéochimiques à l'interface eau-sédiment pour ainsi diminuer les transferts de polluants (nitrates, produits phytosanitaires) à l'aval.

Les métaux sont également introduits de manière significative dans les sols cultivés par l'utilisation de produits phytosanitaires, d'engrais et de divers amendements (ex. : épandage de boues d'épuration) ou même par les retombées atmosphériques (Thévenot *et al.*, 2007). Par exemple, l'utilisation d'engrais phosphorés est une source importante de contamination des sols cultivés en Europe par Arsenic (As), Cadmium (Cd) et Chrome (Cr). Ainsi, les métaux sont susceptibles de contaminer les milieux récepteurs, y compris les ZTHA, notamment en présence de systèmes de drainage souterrain facilitant les transferts hydriques du sol vers les milieux aquatiques (Tournebize *et al.*, 2012). Néanmoins, très peu d'informations sont actuellement disponibles sur les flux entrants de métaux d'origine agricole, les niveaux de contamination et leur devenir au sein des ZHTA.

Après une étude géotechnique, la ZTHA de Rampillon a été construite en 2010 par excavation du sol en place (argilo-limoneux) en réservant au préalable la terre végétale de surface pour regarnir ensuite le fond de l'amé-

nagement. Elle occupe une surface de 5 300 m² pour un volume de 2 600 m³, soit 7 m³ par hectare drainé en amont. Elle est dissociée en trois sous-zones : un bassin de sédimentation d'une profondeur maximale de 130 cm et un volume de 300 m³, une zone intermédiaire végétalisée (environ 40% de taux de couverture) avec une profondeur maximale de 50 cm et un volume de 1 200 m³, et enfin un bassin terminal de profondeur maximale de 80 cm et un volume de 1 100 m³. La végétation présente se répartit en roseau (*Phragmites australis*, 36%), carex (*Carex riparia*, 33%), jonc (*Juncus inflexus*, 23%), et callitriche (*Callitriche palustris*, 8%).

Dès 2012, INRAE met en place un protocole de suivi de la qualité de l'eau basé sur la comparaison des flux entrant et sortant de la ZTHA au moyen d'une stratégie de prélèvements d'eau et d'analyses chimiques en laboratoire. Le suivi de la qualité de l'eau est constitué de deux stations hydrométriques situées à l'entrée et à la sortie de la ZTHA. Les variables suivies sont les débits et les concentrations en nitrate, au pas de temps horaire. Un suivi bimensuel des concentrations en produits phytosanitaires (> 100 molécules analysées) est associé, basé sur un prélèvement composite par échantillonneur automatique, piloté au volume écoulé. Ce suivi composite donne accès à une concentration moyenne de flux sur la période échantillonnée, qui est représentative des flux entrant et sortant. Une campagne de suivi de métaux en entrée et sortie de la ZTHA de Rampillon a été réalisée au printemps 2015 (mars-mai) en déployant à la fois des outils chimiques (échantillonneurs passifs de type DGT¹ et trappes à sédiments) et des outils biologiques (gammare encagés et biofilms) pour évaluer les niveaux de contamination de la zone et les fluctuations temporelles de la spéciation de métaux et leur biodisponibilité, fraction internalisée par les organismes et potentiellement toxique.

1. Diffusive Gradient in Thin films : dispositifs intégratifs qui accumulent sur une résine les éléments trace métalliques en fonction de leur concentration dans le milieu et du temps d'immersion.

Résultats

Pour l'azote, la ZTHA contribue à réduire de 11 mg/L en moyenne les concentrations en nitrate, et les fréquences de dépassement du seuil de potabilité (fixé à 50 mg/L) de 58 à 23,7%. La rétention calculée à partir des suivis horaires des flux de nitrates interceptés par la ZTHA est en moyenne de 15%. Elle s'effectue majoritairement par dénitrification à l'interface eau-sédiment alors que l'assimilation directe par les plantes est considérée comme négligeable. Pour les produits phytosanitaires, le suivi permet aussi de hiérarchiser l'efficacité de rétention des matières actives dont les concentrations atteignent parfois en entrée une dizaine de µg/L. Sur une centaine de molécules appliquées sur le bassin versant et suivies à l'exutoire, quarante et une molécules ont été détectées ainsi que deux métabolites.

L'évaluation pluri-annuelle montre une réduction moyenne de 37% des pesticides entre les flux entrants et sortants. Cette valeur moyenne masque néanmoins une grande variabilité d'efficacité selon la cible du produit (herbicides = -30% / fongicides = -57% / insecticides = -10% / régulateurs de croissance = -100%). À l'échelle de la matière active, cette variabilité d'abattement est encore plus importante puisqu'elle varie de 100% pour une dizaine de molécules, à moins de 10% pour une demi-douzaine de molécules (tableau 1). La dissipation des pesticides est multifactorielle et liée à l'adsorption des matières actives sur la matière organique et les sédiments de texture argileuse, à leurs dégradations par les micro-organismes et par les voies abiotiques (hydrolyse, photolyse).

Concernant les métaux, le suivi effectué au printemps 2015 a montré que les niveaux de contamination en Arsenic (As), Cadmium (Cd), Chrome (Cr), Cobalt (Co), Cuivre (Cu), Manganèse (Mn), Nickel (Ni), Plomb (Pb), Antimoine (Sb), Sélénium (Se) et Zinc (Zn) dans la phase dissoute sont faibles au regard des normes de qualité environnementale et soumis à des fluctuations temporelles au sein de la zone. La signature métallique obser-

vée sur la zone de Rampillon est en effet typique des bassins agricoles. Malgré ces faibles niveaux, l'utilisation d'outils chimiques intégrés dans le temps ont permis de montrer une diminution des métaux à l'exutoire de la zone à la fois dans la phase particulaire (trappes à sédiments ; de 11 à 23% selon le métal considéré, sauf le Mn) et dissoute (capteurs passif de type DGT ; de 13 à 51%). Les niveaux de bioaccumulation dans les biofilms ont également révélé une diminution de la bio-disponibilité des métaux en sortie de zone (Lebrun *et al.*, 2019). Le piégeage des métaux par les sédiments de fond semble jouer un rôle clé dans ces abattements des flux métalliques.

Ces résultats sur les nitrates, produits phytosanitaires et métaux confirment le potentiel réel de la ZTHA à réduire les flux de polluants d'origine agricole et ainsi agir sur l'amélioration de la qualité de l'eau. Néanmoins, la saisonnalité d'interception, le temps de séjour et la température de l'eau sont des facteurs non maîtrisables qui modifient l'efficacité d'abattement (Tournebize *et al.*, 2017). Dans le cadre d'actions relevant de l'ingénierie écologique, il faut accepter cette variabilité d'efficacité liée à ces facteurs. Autant la température comme facteur abiotique climatique ne peut pas être contrôlée, autant le temps de séjour peut être optimisé par un dimensionnement adapté. Selon les recommandations issues de simulations obtenues à partir des suivis du site ZTHA de Rampillon, pour un objectif de réduction moyen de 40%, la ZTHA devrait être dix fois plus grande avec un ratio passant de 7 à 70 m³ par hectare drainé.

Écodynamique des contaminants et écotoxicité sur la vie aquatique

Les contaminants dans l'eau : métaux et produits phytosanitaires

Bien que les ZTHA soient conçues pour diminuer les concentrations en contaminants circulant dans le milieu aquatique, l'accumulation des contaminants dans les dif-

1 Efficacité classée pour les molécules étudiées dans la zone tampon humide artificielle de Rampillon. Herbicides (H), fongicides (F), régulateurs de croissance (RC), insecticides (I), métabolites (Met). AMPA = métabolite du glyphosate.

Inefficace	10 → 20%	20 → 40%	40 → 60%	60 → 100%
Mesotrione (H)	Cyproconazole (F)	Clopyralid (H)	Clomazone (H)	2,4-D (H)
Imazamox (H)	Imidaclopride (I)	Bentazone (H)	Aclonifen (H)	Benoxacor (H)
Chlorotoluron (H)	Atrazine déséthyl (H)	Metamitron (H)	Dimethenamide (H)	Chlorméquat (RC)
Ethofumesate (H)	Mesosulfuron (H)	Chloridazone (H)	Atrazine (H)	Triflusaluron mtl (H)
Fluroxypyr (H)	Isoproturon (H)	Florasulam (H)	S-metolachlor (H)	Ethepon (RC)
2,4-MCPA (H)	AMPA (Met)	Boscalid (F)	Azoxystrobine (F)	Napropamide (H)
		Dimetachlore (H)	Diflufenican (H)	Tebuconazole (F)
		Nicosulfuron (H)	Lenacil (H)	Epoxiconazole (F)
		Propyzamide (H)	Glyphosate (H)	Pendimethaline (H)
			Propiconazole (F)	Fluoxastrobine (F)
			Quinmerac (H)	Métazachlor (H)

► férents compartiments abiotiques et biotiques peut avoir des effets néfastes sur l'importante biodiversité qu'elles abritent. Par conséquent, la caractérisation des processus impliqués dans le devenir des contaminants et de leurs impacts sur la santé des organismes est indispensable pour une gestion durable de ces milieux artificiels et promouvoir les enjeux associés. À ces fins, des suivis de niveaux de contamination sont initiés depuis 2015 à travers la collecte *in situ* d'échantillons de matrices intégratives (sédiments et organismes indigènes) dans divers points stratégiques de l'entrée à la sortie de la ZTHA terminale de Rampillon. À l'interface entre la chimie et la biologie, ces suivis effectués sur les sédiments lors de différentes périodes hydrologiques renseignent ainsi sur la dynamique spatiotemporelle des contaminants (interactions abiotiques, stockage, dispersion...). Les niveaux de contamination des organismes fournissent quant à eux des informations pertinentes sur la biodisponibilité des contaminants, à savoir la fraction qui va interagir avec les organismes aquatiques et être potentiellement toxique. Ces travaux sur l'écodynamique des contaminants ont été initiés avec les métaux qui, contrairement aux produits phytosanitaires, sont non dégradables, ce qui facilite la compréhension des processus de dispersion et distribution entre les matrices environnementales.

Résultats dans la zone tampon humide artificielle

Les premiers résultats confirment que la séquestration des contaminants par les sédiments dépend de facteurs physicochimiques et hydrologiques. Ainsi, les métaux sont préférentiellement séquestrés dans les sédiments de fond en sortie de la zone humide, résultant probablement d'une sédimentation spatiale graduelle le long du cheminement de l'eau en lien avec la granulométrie des particules en suspension chargées en métaux (Lebrun *et al.*, 2019).

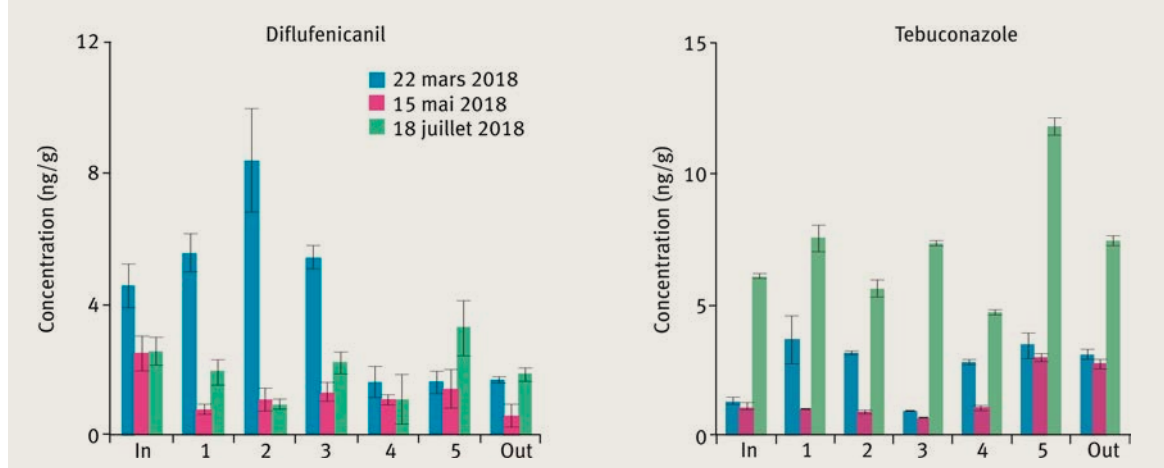
En 2018, des fluctuations temporelles de produits phytosanitaires dans les sédiments ont été observées à des niveaux faibles de l'ordre du ng/g, en adéquation avec les conditions hydrologiques et les pratiques agricoles locales. Ainsi, des fongicides (tebuconazole, époxiconazole, boscalid), un herbicide (diflufenicanil) et un

insecticide néonicotinoïde (imidaclopride, utilisé en tant qu'enrobage des semences) entrent dans la ZTHA de Rampillon lors d'événements pluvieux succédant à leur période d'épandage (exemples: le diflufenicanil épandu en hiver et tebuconazole en mai/juin, comme le montre la figure 2). Ces éléments sont préférentiellement séquestrés en entrée de la zone, suggérant des interactions eau-sédiment rapides et une forte capacité des sédiments à adsorber ces pesticides. Aussi, ces résultats illustrent le rôle prépondérant des sédiments dans le devenir des produits phytosanitaires et leur abatement. Néanmoins, ils soulignent que cette matrice environnementale constitue potentiellement un réservoir temporaire de contaminants. Ces niveaux de contamination fournissent également des informations précieuses sur la faisabilité de réallouer les sédiments aux sols du bassin versant amont suite à leur dragage dans un cadre de maintenance future de la zone humide.

Effet des contaminants sur le matériel vivant

En 2015, les teneurs de métaux bioaccumulés ont été déterminées chez divers macro-invertébrés indigènes de la ZTHA de Rampillon présentant des habitats et des régimes alimentaires différents afin de considérer les différentes voies d'exposition (dissoute/trophique) de ces organismes : gammare et aselles (*Gammarus* et *Asellus* spp.) comme amphipodes détritivores, bivalves (*Lymnaea* spp.) comme herbivores et chironomes (*Chironomus* spp.) comme fouisseurs. Les résultats montrent que les populations indigènes sont moins contaminées en aval qu'en amont, confirmant une diminution de la biodisponibilité des métaux en sortie de zone. Ceci plaide également pour un effet bénéfique d'espaces dédiés de la zone humide pour la vie aquatique locale en termes d'exposition. Dans le cas des produits phytosanitaires, une telle diminution de la biodisponibilité en lien avec l'abattement observé précédemment (tableau 1), reste à être évaluée. En effet, les macro-invertébrés sont une importante ressource alimentaire et constituent une voie d'exposition pour les organismes supérieurs tels que les amphibiens, les poissons et les oiseaux. Le transfert des produits phytosanitaires le long des chaînes trophiques et leur bioamplification

2 Concentrations en pesticides dans des sédiments collectés dans les différentes sections de la zone humide de Rampillon et à différentes périodes hydrologiques (moyennes ± ET ; n = 3). In et out correspondent à l'entrée et la sortie de la ZTHA, les chiffres de 1 à 5 indiquent un gradient amont-aval de la ZTHA.



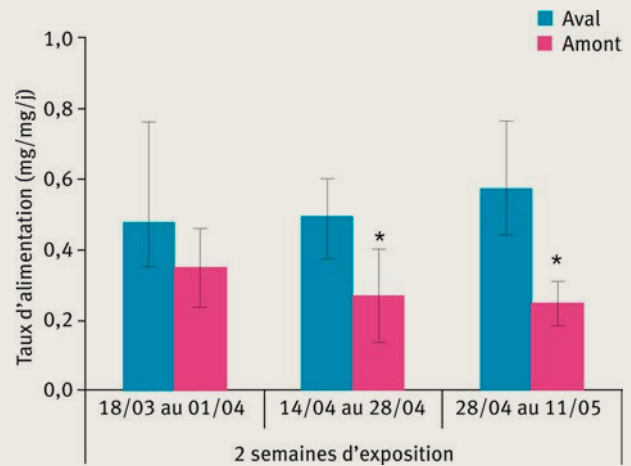
potentielle d'un niveau trophique à un niveau supérieur pourraient être favorisés dans la ZTHA, mais restent à ce jour encore peu étudiés et documentés.

En tant que milieu collecteur des eaux de drainage d'un versant agricole, la ZTHA de Rampillon reçoit une combinaison de produits phytosanitaires fluctuant avec les pratiques agricoles et les conditions hydrologiques. Ces produits peuvent alors exercer une pression chronique diffuse et toxique pour les organismes aquatiques qu'il est nécessaire d'évaluer pour protéger la vie aquatique. Des travaux précédents ont montré que divers traits fonctionnels (respiration, alimentation, locomotion) ainsi que des activités enzymatiques impliquées dans la mue, la croissance, le métabolisme digestif et le stress cellulaire étaient impactés chez des gammares engagés dans la zone tampon humide de Rampillon. Par exemple, à l'échelle de l'individu, le taux d'alimentation était diminué chez les gammares engagés en amont par rapport à ceux engagés en aval durant le printemps 2015 (figure 3). A l'échelle cellulaire, les défenses anti-oxydantes chez les organismes engagés en amont étaient diminuées en comparaison à ceux engagés durant le suivi effectué au printemps 2016 (exemple de l'activité peroxydase en figure 4). Néanmoins, il est difficile de relier directement ces réponses biologiques à une pression chimique en raison de la multitude de contaminants (dont les pesticides présents) et de facteurs environnementaux susceptibles d'influencer à la fois la réactivité des contaminants et la physiologie de l'organisme. Ainsi, la caractérisation de l'écotoxicité d'un ou de plusieurs produits phytosanitaires (effet cocktail) à de faibles concentrations sur les organismes est un défi majeur dans l'évaluation des risques environnementaux.

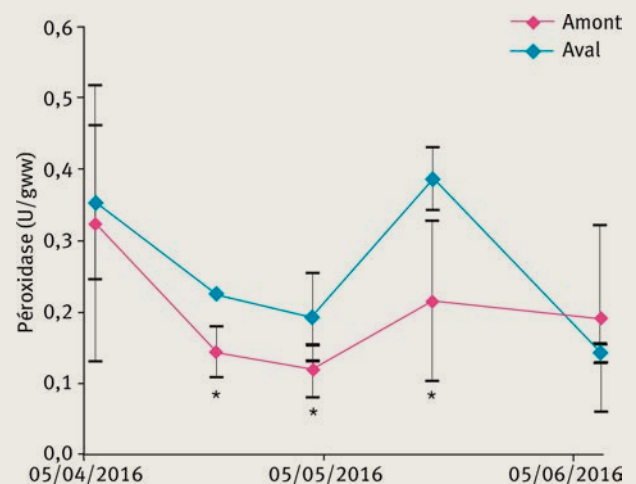
Expérimentation sur les gammares

L'évaluation de la toxicité des produits phytosanitaires est souvent réalisée au laboratoire lors d'expositions mono-spécifiques et à des concentrations en inadéquation avec les expositions environnementales. En se basant sur les suivis effectués à Rampillon, des gammares (photo 2) ont été exposés en microcosmes à des mélanges binaires d'insecticides (chlorpyrifos-E et imidaclopride) ou de fongicides (boscalid et tébuconazole) à des concentrations « environnementalement » réalistes (un témoin à 0, puis à 0,01 ; 0,1 et 1,0 µg/L). L'impact de ces mélanges sur la santé des organismes a été évalué à travers une approche multi-biomarqueurs, utilisant une combinaison de réponses comportementales et biochimiques. Ces résultats mettent en évidence des altérations biologiques chez les gammares (perturbations des performances individuelles et altérations cellulaires) intervenant à de faibles niveaux d'exposition. La santé des gammares apparaît plus impactée par les fongicides que les insecticides, contrairement aux herbicides qui ne semblent pas avoir d'impact significatif. Cette dissociation sur la nature des produits phytosanitaires souligne que leurs modes d'action ne sont pas spécifiques au règne ou au taxon (Lebrun *et al.*, 2020). Les effets sublétaux tels qu'identifiés par cette approche multi-biomarqueurs pourraient conduire à des perturbations dans la dynamique des populations sur le long terme. Il pourrait aussi être envisagé de comprendre comment des pressions chimiques ponctuelles et diffuses peuvent perturber les réseaux trophiques dans diverses zones humides.

3 Taux d'alimentation de gammares engagés sur des périodes de deux semaines (printemps 2015) en amont et en aval de la zone humide de Rampillon (moyennes ± ET ; n = 3 ; P < 0,05).



4 Suivi de l'activité peroxydase comme enzyme anti-oxydante chez des gammares engagés sur des périodes de deux à trois semaines (printemps 2016) en amont et en aval de la zone humide de Rampillon (moyennes ± ET ; n = 3 ; * P < 0,05).



2 Gammarus sp.



© J. D. Lebrun - INRAE

Conclusions et perspectives

Le site pilote d'ingénierie écologique de Rampillon est le premier de cette ampleur à avoir vu le jour en France en 2010, et les premiers résultats montrent bien le potentiel réel mais très variable qu'offre les ZTHA pour répondre à l'enjeu environnemental de l'amélioration de la qualité de l'eau.

Les études préalables préconisaient d'avoir une ZTHA ayant une surface de 1 % de la superficie totale du bassin versant amont drainé. Pour le cas de Rampillon, afin de trouver un compromis avec les acteurs locaux lors des négociations, les quatre ZTHA représentent seulement 0,2 % de la surface du bassin amont drainé (Tournebize *et al.*, 2012). L'adaptation aux contraintes socio-économiques et la recherche d'un compromis avec les acteurs ont abouti à un sous-dimensionnement de la ZTHA. En ce qui concerne l'enjeu sur la qualité de l'eau, les suivis réalisés ont montré que la ZTHA de Rampillon offre un potentiel de régulation des transferts de polluants. Localement, l'analyse indique une réduction moyenne de 15 % et 37 % entre les flux entrant et sortant, respectivement pour les nitrates et les produits phytosanitaires. À une échelle régionale, l'intégration des ZTHA dans d'autres agrosystèmes permettrait de diminuer les pollutions diffuses et d'améliorer ainsi la qualité de l'eau.

Enfin, même si les ZTHA sont efficaces, elles ne donnent pas un permis de polluer et doivent être utilisées en complément d'une réduction des apports à la parcelle pour diminuer les pollutions diffuses dans l'environnement (Plan Ecophyto+).

À l'échelle nationale, l'intégration de ZTHA en contexte d'agriculture drainée pourrait aussi contribuer à stabiliser les écosystèmes en fournissant une diversité biologique propice à une meilleure résilience face aux changements globaux et une capacité de séquestration du carbone. Néanmoins, il faut rester attentif aux évolutions que peut entraîner le dispositif des ZTHA sur l'environnement, notamment sur les contaminations locales des êtres vivants et sur l'intégration des polluants au réseau trophique. Les résultats montrent ici que malgré des concentrations environnementales considérées comme « normales », certains invertébrés (gammare) sont impactés négativement au niveau comportemental et biologique. Les suivis menés sur l'écotoxicité des contaminants offrent des pistes intéressantes tant dans l'identification des voies physiologiques perturbées par ces mélanges que dans l'utilisation de biomarqueurs de toxicité précoce pour la surveillance de ces milieux aquatiques. Il est donc essentiel de poursuivre la recherche pour éviter que les ZTHA ne se transforment en « bombe à retardement ». ■

EN SAVOIR PLUS...

- 📄 **Site internet du projet Brie'Eau** : <https://artemhys.inrae.fr/projets/projet-brieeau>
- 📄 **Directive Cadre sur l'Eau, 2000, Parlement Européen**, <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT00000330631&categorieLien=id>
- 📄 **KCHOUK, S., VINCENT, B., TOURNEBIZE, J., IMACHE, A., BILLY, C.**, 2015, Les zones tampons humides artificielles pour réduire les pollutions des nappes par les pesticides issus des réseaux de drainage : une innovation en marche ?, *Sciences Eaux and Territoires*, n°17, p.30-33, <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2015.17.06>
- 📄 **LEBRUN, J.-D., AYRAULT, S., DROUET, A., BORDIER, L., FECHNER, L.-C., UHER, E., CHAUMONT, C., TOURNEBIZE, J.**, 2019, Ecodynamics and bioavailability of metal contaminants in a constructed wetland within an agricultural drained catchment, *Ecol. Eng.*, vol. 136, p. 108-117, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.06.012>
- 📄 **LEBRUN, J.-D., DE JESUS, K., ROUILLAC, L., RAVELLI, M., GUENNE, A., TOURNEBIZE, J.**, 2020, Single and combined effects of insecticides on multi-level biomarkers in the non-target amphipod *Gammarus fossarum* exposed to environmentally realistic levels, *Aquatic Toxicology*, vol. 218, <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2019.105357>
- 📄 **THEVENOT, D.-R., MOILLERON, R., LESTEL, L., GROMAIRE, M.-C., ROCHER, V., CAMBIER, P., BONTE, P., COLIN, J.-L., DE PONTEVES, C., MEYBECK, M.**, 2007, Critical budget of metal sources and pathways in the Seine River basin (1994-2003) for Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn, *Science of The Total Environment*, vol. 375, n° 1-3, p. 180-203.
- 📄 **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*, vol. 61, p. 75-86, <https://doi.org/10.1002/ird.1655>
- 📄 **TOURNEBIZE, J., CHAUMONT, C., MARCON, A., MOLINA, S., BERTHAULT, D.**, 2015, *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*, Rapport Irstea-Onema, 60 p., <https://hal.inrae.fr/hal-02599350/document>
- 📄 **TOURNEBIZE, J., SEGUIN, L., BOUARFA, S., CHAUMONT, C., LEBRUN, J., MELION-DELAGE, R., LETOURNEL, G., BARATAUD, F., ARRIGHI, A., GUICHARD, L., BONIFAZI, M., BIRMANT, F., ROGER, L., ROYER, L., HUREAU, D., FARINETTI, A., PAGES, C., ROUGIER, J.-E.**, 2017, *PIREN-Seine phase VII – rapport 2017 – Projet Brie'Eau : des outils de dialogue territorial pour mutualiser les services écosystémiques (qualité de l'eau et biodiversité)*, 20 p., <https://hal.inrae.fr/hal-02791413>
- 📄 **TOURNEBIZE, J., HENINE, H., CHAUMONT, C.**, 2020, Gérer les eaux de drainage agricole : du génie hydraulique au génie écologique, *Sciences Eaux & Territoires*, n° 32, p.32-41, <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2020.2.06>

Dans ce même numéro :

- 📄 **LETOURNEL, G., PAGES, C., CHAUMONT, C., SEGUIN, L., TOURNEBIZE, J.**, 2021, Biodiversité et services écosystémiques des zones tampons humides artificielles de Rampillon – Seine-et-Marne (77), *Sciences Eaux et Territoires*.
- 📄 **LETOURNEL G., PAGES, C., CHAUMONT, C., PERRIER, L., BIRMANT, F., REBOLHO, C., TOURNEBIZE, J.**, 2021, Mutualiser les enjeux territoriaux en contexte de grandes cultures. INSPA : un outil SIG couplant hydrologie et écologie, *Sciences Eaux et Territoires*.

Les auteurs

Guillaume LETOURNEL*

Université Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR,
92160 Antony, France.

* Actuellement chargé de projets Environnement
au Comité ZIP du Haut Saint-Laurent,
Salaberry-de-Valleyfield, QC J6S 2N9,
Québec, Canada

✉ guillaume.letournel@hotmail.fr

Cédric CHAUMONT, Jérémie D. LEBRUN, et Julien TOURNEBIZE

Université Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR,
92160 Antony, France.

✉ cedric.chaumont@inrae.fr

✉ jeremie.lebrun@inrae.fr

✉ julien.tournebize@inrae.fr

François BIRMANT

AQUI'Brie,
145 quai Voltaire, 77190 Dammarie-les-Lys, France.

✉ contact@aquibrie.fr

Remerciements

Le projet Brie'Eau a été financé par le programme
« Pour et sur le développement régional »
(PSDR 2016-2020, région Île-de-France, INRAE,
AgroParisTech) et par le Piren-Seine.

Les auteurs remercient les agriculteurs, le Syndicat
mixte des Quatre Vallées de la Brie, les collectivités
de Nangis et de Rampillon.

*La zone tampon humide artificielle de Rampillon
au premier plan et le bois des gouffres (Seine-et-Marne).*