

Quel est le rôle des retenues collinaires pour limiter les flux de pesticides dans le paysage agricole ?

Gwenaël IMFELD¹, Sylvain PAYRAUDEAU¹, Sabine SAUVAGE²³⁴, Francis MACARY⁵, Cédric CHAUMONT⁶, Jérémie D. LEBRUN⁶, Anne PROBST²³⁴, José-Miguel SÁNCHEZ-PÉREZ²³⁴, Jean-Luc PROBST²³⁴, Julien TOURNEBIZE⁶

¹ Institut Terre et environnement de Strasbourg (ITES), Université de Strasbourg/EOST/ENGEES, CNRS UMR 7063, 5 rue Descartes, 67084 Strasbourg, France.

² Laboratoire Écologie fonctionnelle et Environnement, Université de Toulouse, CNRS, UPS, Toulouse INP, Campus ENSAT, Avenue de l'Agrobiopole, Castanet Tolosan, 31326 Toulouse, France.

³ LTSER Zone Atelier Pyrénées-Garonne, Université de Toulouse, CNRS, Castanet Tolosan, 31320 Toulouse, France.

⁴ LTER Bassin versant expérimental d'Auradé, IR OZCAR, Université de Toulouse, CNRS, Castanet Tolosan, 31320 Toulouse, France.

⁵ ETTIS, INRAE, 33612 Cestas-Gazinet, France.

⁶ Université Paris Saclay, INRAE, UR HYCAR, CS 10030, 92761 Antony, France.

Correspondance : Gwenaël IMFELD, imfeld@unistra.fr

Parallèlement aux mesures et aux pratiques déjà engagées pour réduire l'utilisation des pesticides en agriculture, des recherches sont menées pour mieux comprendre et évaluer le rôle des retenues d'eau telles que les mares, les zones humides, les bassins d'orage ou les retenues collinaires, vis-à-vis de la pollution des eaux de surface par les pesticides. Cet article présente l'approche développée dans le cadre du projet PESTIPOND qui a permis aux chercheurs d'améliorer les connaissances sur les processus hydrologiques et biogéochimiques impliqués et de proposer des scénarios de gestion visant à atténuer les transferts de pesticides dans les eaux de surface.

Les retenues d'eau : des zones d'interception privilégiées des flux de pesticides dans le paysage agricole

Les résidus de pesticides peuvent s'accumuler dans les sols agricoles et persister pendant des années, voire des décennies. À l'échelle du bassin versant agricole, les événements de ruissellement intenses et longs, consécutifs à l'application de pesticides, entraînent le transfert des résidus de pesticides vers les eaux de surface (Azzi *et al.*, 2016; Imfeld *et al.*, 2020). Ainsi, des concentrations de pesticides supérieures aux normes d'eau potable sont régulièrement mesurées dans les eaux de surface et souterraines en France.

En complémentarité des efforts de réduction et d'élimination de l'usage des pesticides de synthèse, il est crucial d'évaluer et de prédire le transfert des pesticides des parcelles agricoles vers les eaux de surface (Macary *et al.*, 2013 ; Macary *et al.*, 2014). Cela nécessite des études intégratives tenant compte des zones et des périodes principales de dissipation et de stockage des pesticides dans les agrosystèmes. Les retenues d'eau sont identifiées comme des zones potentielles de dissipation des pesti-

cides dans les bassins versants agricoles, bien qu'elles soient principalement construites à des fins de stockage de l'eau et d'irrigation. Telle que définie ici, une retenue est une petite masse d'eau calme, généralement plus petite (< 2 ha) et moins profonde qu'un lac, formée naturellement ou artificiellement (Biggs *et al.*, 2005). Les retenues sont temporairement ou définitivement inondées d'eau et peuvent être colonisées par des macrophytes. Les retenues comprennent ainsi les bassins d'orage, les retenues collinaires, les étangs ou mares d'eaux pluviales naturels ou construits et les zones tampons humides artificielles. Les retenues peuvent intercepter les eaux de ruissellement contenant des pesticides et servir de zones tampons dans le paysage agricole, y compris après la mise en œuvre de pratiques agroenvironnementales de réduction des pesticides sur les versants. Plusieurs études ont abordé le transfert de pesticides à différentes échelles dans les bassins agricoles (e.g., Boithias *et al.*, 2014 ; Grégoire *et al.*, 2008 ; Maillard *et Imfeld*, 2014 ; Passeport *et al.*, 2011) et soulignent l'importance des retenues dans la réduction du transfert de pesticides vers les écosystèmes aquatiques. Les retenues peuvent ainsi être considérées comme une stratégie d'atténuation « hors

ferme » et « hors champ » pour limiter à l'échelle du bassin versant le transfert de pesticides vers les eaux de surface en aval (Passeport *et al.*, 2011 ; Passeport *et al.*, 2013 ; Stehle *et al.*, 2011 ; Tournebize *et al.*, 2017). Les précédentes études indiquent également que les retenues interceptent principalement les flux de pesticides associés au ruissellement de surface provenant des parcelles agricoles. Les retenues n'interceptent donc pas les pesticides qui s'infiltrèrent profondément dans les sols et associés au ruissellement de subsurface, sauf dans le cas du drainage agricole.

Les retenues sont des systèmes dynamiques où les processus biologiques, chimiques et physiques interagissent pour dissiper une variété de contaminants dans l'eau, dont les pesticides (Imfeld *et al.*, 2021) (figure 1). La dissipation des pesticides dans les retenues se traduit par une diminution de leurs concentrations au cours du temps entre l'entrée et la sortie de la retenue. Elle résulte à la fois de processus destructifs, comme la photolyse, l'hydrolyse, et la biodégradation, impliquant une décomposition des molécules de pesticides, et de processus non destructifs, comme la dilution ou la sorption, déterminant la quantité d'un pesticide à un moment donné, dans un compartiment donné. Les retenues peuvent également agir comme une source secondaire de pollution différée en favorisant la production de produits de transformation de pesticides issus de la décomposition des molécules parents, et par la remobilisation lors d'événement d'orage de pesticides accumulés au cours du temps et associés aux particules de sédiments (Imfeld *et al.*, 2013). Si la dissipation de pesticides dans les retenues est souvent observée, la contribution des processus de dissipation impliqués dans le stockage, la transformation et le transport des pesticides dans les retenues et l'interaction entre ces processus sont peu connues. Cela limite fortement la transposition des observations à d'autres retenues et la prédiction des processus

de dissipation. De plus, le rôle des retenues pour contrôler le transfert de pesticides à des échelles imbriquées du bassin versant amont vers le bassin fluvial reste largement inexploré. Ces lacunes de connaissance ont motivé le projet PESTIPOND.

Le projet PESTIPOND (encadré 1) a étudié dans trois contextes agro-climatiques contrastés le rôle des retenues dans le transfert des pesticides à l'échelle du bassin versant en lien avec les processus de dissipation des pesticides dans les retenues (figure 1). L'hypothèse générale du projet PESTIPOND est que la prise en compte du rôle des retenues à l'échelle du bassin versant améliore significativement la prédiction et le contrôle opérationnel du transfert de pesticides en aval dans le paysage agricole. La dissipation des pesticides dans les retenues et le transfert des pesticides à l'échelle du bassin versant vers les retenues sont classiquement traités séparément. De plus, lorsque les retenues sont prises en compte, leur efficacité à dissiper les pesticides est généralement considérée dans des modèles sans validation reposant sur des mesures de terrain. Cependant, l'efficacité de dissipation est variable et largement dépendante de certains compartiments des retenues, comme le sédiment et la végétation. Cela augmente significativement l'incertitude associée aux prévisions et aux risques de transfert des pesticides dans le paysage agricole ainsi qu'au niveau d'exposition aux pesticides à l'échelle du bassin fluvial. L'intégration du rôle des retenues dans les modèles agro-hydrologiques tenant compte les échelles imbriquées du bassin versant amont des retenues aux grands bassins fluviaux reste ainsi un défi majeur (Imfeld *et al.*, 2021).

Des efficacités de dissipation variables dans les retenues

L'efficacité des retenues pour dissiper des mélanges de molécules de pesticides est variable dans le temps et en fonction du type et du positionnement des retenues, des caractéristiques hydro-climatiques, des propriétés physico-chimiques des pesticides et des pratiques agricoles en amont sur le bassin versant. Par conséquent, une forte incertitude est souvent associée à l'efficacité d'une retenue à dissiper les pesticides. Outre les pratiques agricoles (période d'applications et occupation du sol) et la nature des pesticides (caractéristiques physico-chimiques), cette efficacité dépend fortement des conditions climatiques. Ainsi la température influence l'adsorption des molécules de pesticide sur le sédiment et l'activité microbienne, et donc leur dégradation dans les retenues. La variabilité des événements hydrologiques et la circulation de l'eau au sein de ces retenues affecte également le temps de transfert des pesticides des parcelles agricoles amont vers les retenues et le temps de séjour des pesticides dans les retenues, et donc leur dissipation. En effet, l'efficacité de dissipation des pesticides dans la retenue est souvent proportionnelle à leur temps de séjour.

Pour connaître l'efficacité réelle d'une retenue, le projet PESTIPOND a cherché à différencier la contribution des processus non destructifs, comme l'adsorption, qui séquestre temporairement les pesticides dans la retenue, des processus destructifs, comme la biodégradation (figure 1B). En effet, si les processus non destructifs contribuent à diminuer la concentration en pesticides dans la phase dissoute, la masse totale de pesticides dans

Encadré 1 – L'approche PESTIPOND : comprendre et prédire le rôle des retenues dans le paysage agricole.

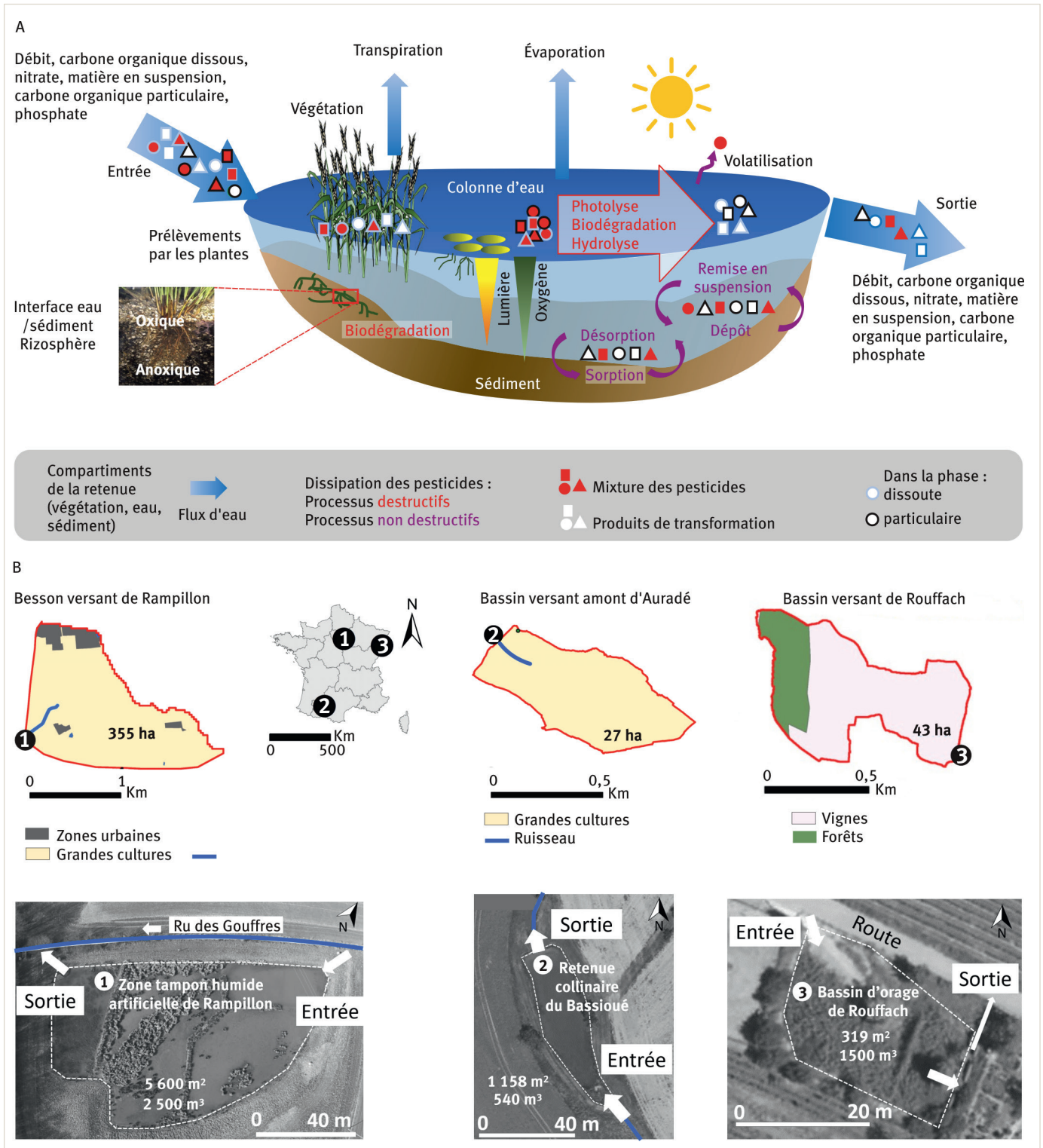
Le projet PESTIPOND (<https://pestipond.cnrs.fr/>), financé par l'Agence nationale de la recherche, rassemble des chercheurs du CNRS (Toulouse et Strasbourg), d'INRAE (Ile-de-France-Jouy-en-Josas-Antony et Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux), de l'Université de Strasbourg et de l'ENGEES. L'objectif de PESTIPOND est de développer une approche originale pour caractériser et prédire le rôle des retenues d'eau vis-à-vis de la contamination des eaux de surface par les pesticides. L'approche générale de PESTIPOND est de relier le transport de pesticides depuis les parcelles agricoles aux retenues qui interceptent les flux de pesticides dans les agrosystèmes et aux processus impliqués dans la dissipation des pesticides dans les retenues.

Les chercheurs ont effectué des prélèvements d'eau, de sédiment et de végétation pour comprendre et comparer le fonctionnement de retenues d'eau en contexte agricole dans le bassin versant de la Save (affluent de la Garonne) situé dans les départements des Hautes-Pyrénées, du Gers et de la Haute-Garonne, sur le territoire de la Brie à Rampillon en Seine-et-Marne et en contexte viticole en Alsace à Rouffach dans le Haut-Rhin (figure 1). Des expériences complémentaires en laboratoire et sur sites ont permis de mieux comprendre comment les différents compartiments des retenues retiennent et dégradent les pesticides, à quelle vitesse et par quels mécanismes. Ces données ont alimenté des modèles mathématiques permettant d'évaluer l'efficacité des retenues dans les agrosystèmes à intercepter et dissiper les flux de pesticides des parcelles agricoles amont. Les résultats obtenus sont utiles, tant pour la recherche que pour les gestionnaires, les acteurs du territoire et les agriculteurs, pour mieux valoriser les retenues existantes et pour optimiser l'implantation de nouvelles retenues dans le cadre des aménagements paysagers dans les agrosystèmes.

une retenue, c'est-à-dire la somme des masses de pesticides dans chaque compartiment (sédiment, plante, eau, etc.), ne diminue pas nécessairement car seule la dégradation entraîne une diminution de la masse totale des pesticides dans les retenues. La dégradation abiotique (e.g., photolyse) ou biotique (biodegradation) transforme

la molécule concernée en décomposant la molécule, ce qui peut générer des produits de transformation inconnus. Basé sur un suivi de la retenue de type bassin d'orage à Rouffach, les résultats soulignent, comme sur les deux autres systèmes étudiés, la capacité de dissipation et de dégradation des pesticides selon leurs propriétés physico-

Figure 1 – Aperçu des processus destructifs et non destructifs contrôlant le devenir des pesticides dans les retenues des bassins versants agricoles (A). Bassins versants et retenues étudiées dans le cadre du projet ANR PESTIPOND (B).



1. Chacun des deux composés chimiques formant une paire, la configuration moléculaire de l'un étant l'image de l'autre dans un miroir.

chimiques, les temps de séjour hydraulique de l'eau et les conditions hydro-climatiques durant la saison d'application (figure 2).

Sur la retenue de Rouffach, la dégradation de neuf fongicides et herbicides appliqués sur le bassin viticole amont, a été estimée par un bilan de masse obtenu à partir des masses de pesticides entrantes, et des masses de pesticides mesurées dans l'eau, le sédiment et la végétation. Cette estimation a été réalisée durant deux périodes, du 30 juin au 1^{er} août et du 11 août au 22 septembre 2020.

Figure 2 – Dégradation de fongicides et d'herbicides dans la retenue de Rouffach (type bassin d'orage : 319 m², 1 500 m³) durant deux périodes estivales de 2020 sans flux sortants. Les barres d'erreur ont été calculées par propagation des erreurs liées à la modélisation des volumes d'eau. La dégradation du diméthomorphe a été calculée pour ses deux énantiomères¹ (E et Z).

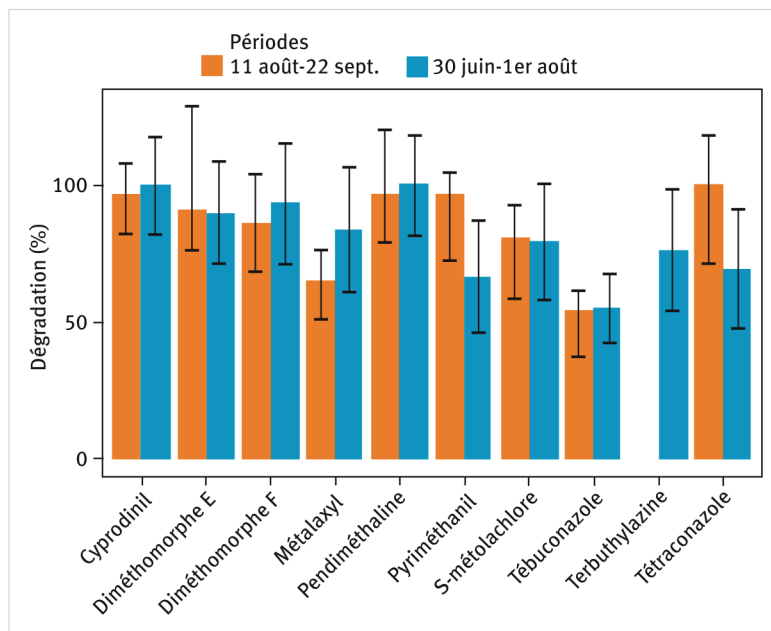
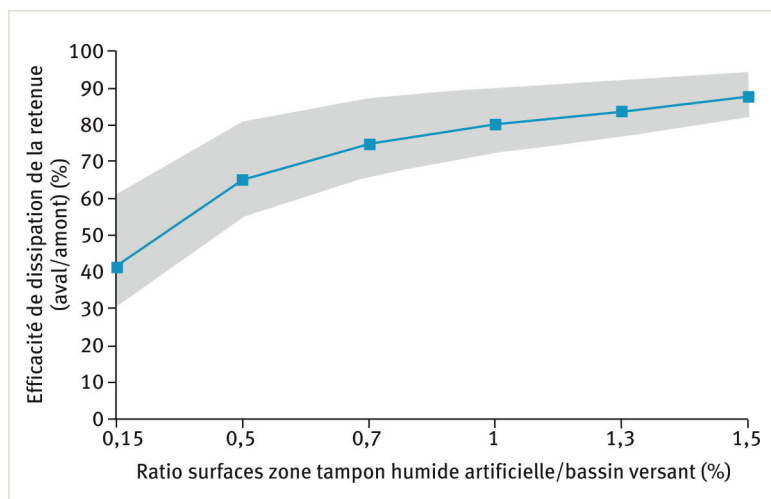


Figure 3 – Relation entre la dissipation d'une retenue de type zones tampons humides artificielles (ZTHA) et la surface d'emprise foncière en sortie de drainage. La relation est basée sur la simulation de dix pesticides typiquement appliqués en grande culture.



Les ruissellements interceptés par la retenue sont faibles en raison de l'enherbement du vignoble de Rouffach. Ces deux périodes sont ainsi caractérisées par des flux entrants n'ayant pas entraîné de flux sortants ; il s'agit donc d'un cas spécifique, particulièrement favorable à la dissipation des pesticides en retenue. La dégradation est au minimum de 50 % (tébuconazole) et peut atteindre les 100 % pour plusieurs molécules comme le cyprodinil et le pendiméthaline (figure 3).

Pour mieux évaluer et prédire la dissipation des pesticides dans les retenues existantes, le temps de séjour lié aux réponses hydrologiques du bassin versant peut-être relié au dimensionnement de la retenue et à son potentiel de dissipation. Les résultats des suivis expérimentaux et des travaux de modélisation de PESTIPOND ont permis de définir des relations entre la dissipation d'une retenue de type zones tampons humides artificielles (ZTHA) et la surface d'emprise foncière sur le bassin versant (figure 3). Ces relations tiennent compte du temps de séjour lié au fonctionnement hydrologique de la retenue afin d'établir une relation entre l'efficacité des retenues, en termes de dissipation des pesticides, et les volumes de stockage ou les surfaces d'emprise foncière. Dans le cas de transfert de pesticides par drainage agricole, 1 % du bassin versant amont consacré en retenue artificielle pourrait ainsi diminuer en sortie de retenue plus de 70% des flux totaux de pesticides utilisés classiquement en contexte de grande culture (figure 3).

Une combinaison de processus pour dissiper les pesticides dans les retenues

Les résultats de PESTIPOND confirment donc que l'efficacité de dissipation des retenues est réelle mais varie en fonction des molécules et des événements hydro-climatiques. Les suivis expérimentaux associés aux expérimentations en laboratoire et en mésocosme in situ ont ainsi permis de hiérarchiser les processus et les compartiments mis en jeu lors de la dissipation des pesticides dans les retenues (figure 1A).

Dans la colonne d'eau des retenues, la photolyse est un processus par lequel les molécules de pesticides sont dégradées par l'énergie solaire. Les résultats montrent que la photolyse contribue à dissiper les pesticides dans les premiers centimètres de la colonne d'eau (Drouin *et al.*, 2021). L'énergie solaire peut activer d'autres molécules que les pesticides dans l'eau, comme les nitrates et la matière organique, qui peuvent ensuite transférer cette énergie pour dégrader les pesticides de manière indirecte, lors du processus de photolyse indirecte. Dans les retenues, les rayons solaires pénètrent peu dans l'eau et la photolyse contribue donc marginalement à la dissipation globale des pesticides, en particulier si la retenue est assez profonde (> 50 cm) et si l'eau est trouble en raison de la présence de particules en suspension due à la forte érosion des parcelles amont et de la croissance algale en présence de nutriments.

Les sédiments des retenues jouent un rôle fondamental dans la rétention et la dissipation des résidus de pesticides, mais également dans la formation de produits de transformation. Les retenues interceptent aussi bien des pesticides hydrophobes que des pesticides hydrophiles. Les résultats indiquent que les pesticides hydrophobes sont souvent accumulés et dissipés dans les sédiments

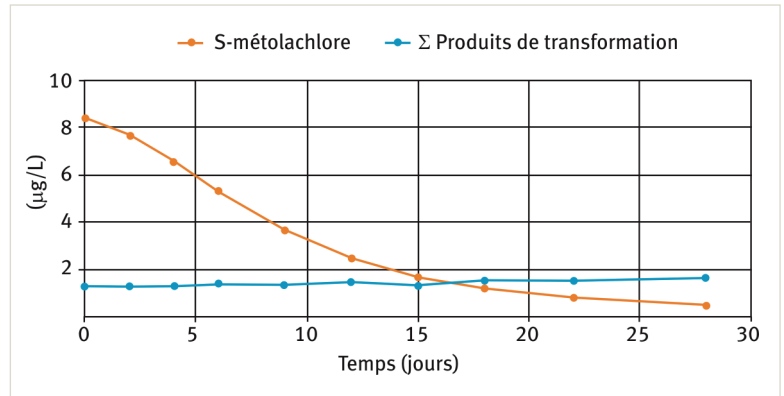
des retenues (Chaumet *et al.*, 2021). Les pesticides hydrophiles, dont certains se dégradent partiellement, sont peu dissipés et donc exportés en aval des retenues. À Auradé (figure 1B), le taux de dissipation des molécules considérées varie entre 29% et 56%, e.g., 38% pour le boscalid (une molécule hydrophile) et 56% pour le tébuconazole ou l'aclonifen (deux molécules hydrophobes). Toutefois, la forme (dissoute ou particulaire) sous laquelle sont transportés les pesticides est aussi importante à considérer pour la dissipation (Chaumet *et al.*, 2022).

La tendance naturelle des pesticides à s'adsorber, c'est-à-dire à se lier de façon plus ou moins réversible, sur les sédiments et la vitesse de dégradation des pesticides dans les différents compartiments des retenues sont des caractéristiques essentielles pour prédire le devenir des pesticides dans les retenues. Dans les retenues, l'épaisseur, la texture et la quantité de matière organique des sédiments contrôlent l'adsorption des pesticides et donc leur dissipation dans l'eau. La dissipation apparente des pesticides lors de leur accumulation dans les sédiments des retenues est souvent importante, mais peut également contribuer à des contaminations secondaires à long terme, lors de la remise en suspension des sédiments durant des événements de crue et par les mécanismes de désorption des pesticides. Cependant, dans le cas de la retenue de Rampillon (figure 1B), en contexte de drainage et de charge de matière en suspension peu élevée, les concentrations en pesticides des sédiments sont inférieures aux seuils de détection (< 0,1 mg/kg de sédiment sec) après dix ans d'interception des écoulements. En utilisant des techniques analytiques avancées, certaines molécules hydrophobes sont détectées de l'ordre du µg/kg de sédiment sec. Les sédiments retiennent particulièrement les molécules hydrophobes et leurs produits de dégradation par adsorption sur les particules, notamment en contexte carbonaté et d'argiles de type smectites. De façon générale, les teneurs en pesticides dans les sédiments restent généralement inférieures à celles mesurées dans les sols cultivés, recevant directement les applications de pesticides.

L'interface eau/sédiment, i.e., la frontière entre les sédiments et la colonne d'eau, joue un rôle prépondérant dans la rétention par adsorption et la dégradation des pesticides car elle stimule l'occurrence et l'activité des microorganismes capables de dégrader la matière organique, dont les pesticides. Des approches analytiques, telles que l'analyse isotopique de composé-spécifique (AICS) (Droz *et al.*, 2021 ; Gilevska *et al.*, 2022), et prédictives ont été mises en œuvre dans PESTIPOND pour évaluer en détail le fonctionnement de l'interface eau/sédiment des retenues et son rôle dans la dissipation et la dégradation des pesticides. Ainsi, des mésocosmes placés directement au milieu de la retenue, ont permis de quantifier la vitesse de dissipation en condition réelle d'exposition tout en appliquant un contrôle hydraulique. Les résultats obtenus à partir de ces mésocosmes indiquent que la vitesse de dissipation est significativement plus élevée à l'interface eau/sédiment de la retenue. Dans le cas du S-métolachlore, la DT50 est réduite à six jours (figure 4) par rapport aux quarante-trois jours référencés dans les bases de données (par exemple, PPDB²).

La dissipation des pesticides dans les différents compartiments des retenues contrôle également l'exposition des organismes vivants aux pesticides et donc les effets écotoxicologiques.

Figure 4 – Dissipation du S-métolachlore dans un mésocosme in situ, implanté dans la retenue de Rampillon, et formation concomitante de produits de transformation (ESA, OXA, NOA).



Le biote exposé aux pesticides dans les retenues

Les organismes vivants sont exposés aux pesticides dans les retenues, mais il reste difficile avec les outils existants de prédire quelle sera la fraction active des micropolluants susceptible d'exercer une action toxique sur les organismes. Parmi les crustacés largement distribués dans les cours d'eau tempérés d'Europe, les gammares sont des bioindicateurs pertinents pour suivre la biodisponibilité des pesticides, à savoir la fraction interagissant avec les organismes et internalisée dans leurs tissus, et donc potentiellement toxique. En effet, les pesticides internalisés sont susceptibles d'affecter différentes fonctions biologiques en raison d'action non spécifiques. Par exemple, une sensibilité forte aux fongicides comme les SDHI³ (e.g., Boscalid) ou les EBI⁴ (e.g. Tebuconazole) a été mise en évidence chez des gammares exposés à des concentrations environnementales en laboratoire.

Une méthodologie de biosurveillance active a été réalisée sur la retenue de Rampillon. Des gammares issus d'une population « contrôle » ont été positionnés dans des cages en entrée et en sortie de la retenue durant des périodes de fort drainage au printemps. Les gammares ont accumulé différents herbicides, fongicides et insecticides, en fonction de leur hydrophobicité, indiquant des transferts des pesticides du milieu vers le biote. Cependant, des fluctuations de niveaux de bioaccumulation sont observées au cours des périodes d'encagement. Cela traduit des variations de flux de pesticides transitant dans la retenue en lien avec les pratiques agricoles et l'hydrologie du bassin.

Des marqueurs biochimiques et de traits comportementaux ont également été mesurés sur les gammares engagés pour évaluer la toxicité de la pression chimique transitant dans la retenue. Ces mesures indiquent des déplacements fonctionnels significatifs chez les gammares engagés dans la zone amont de la retenue, caractérisée par des concentrations de pesticides plus élevées, par rapport à ceux engagés dans la zone aval de la retenue, caractérisée par des concentrations de pesticides plus faibles. Au niveau cellulaire, les activités enzymatiques impliquées dans la digestion diminuent chez les organismes engagés en amont. Cela s'accompagne au niveau individuel d'une diminution du taux d'alimentation suggérant des

2. Pesticide Properties Data Base.
3. Succinate Dehydrogenase Inhibitors.
4. Ergosterol Biosynthesis-inhibiting.

effets en cascade multi-niveaux. Ces premiers résultats de PESTIPOND suggèrent des effets toxiques potentiels chez les gammars soumis aux influx de pesticides. Ces effets s'estompent en sortie de la retenue, ce qui pourrait être relié à la dissipation des pesticides dans la retenue. En conclusion, la retenue semble améliorer les conditions de vie aquatique en sortie de système.

Mieux considérer les retenues en lien avec le bassin versant : de la mesure à la modélisation intégrative multi-échelle

En complément des résultats originaux produits grâce aux observations et aux campagnes de mesures sur les trois sites d'étude, PESTIPOND a significativement amélioré la prédiction du rôle des retenues dans le paysage agricole. Un cadre de modélisation innovant a été proposé impliquant plusieurs outils imbriqués depuis l'interface eau-sédiment des retenues jusqu'aux bassins hydrographiques de plusieurs centaines de km² (figure 5).

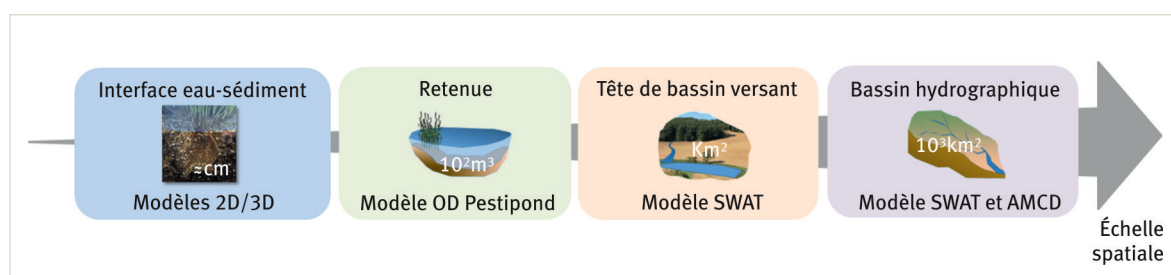
L'approche retenue s'appuie ainsi sur les résultats de modélisations mécanistiques fines en 2D/3D de l'interface eau/sédiment pour hiérarchiser les processus essentiels à retenir dans le modèle OD Pestipond (Bahi *et al.*, 2023a ; Bahi *et al.*, 2023b ; Bahi *et al.*, 2023c). Ce modèle OD a ensuite été utilisé dans un modèle de bassin versant (SWAT) pour prédire le rôle cumulé des retenues vis-à-vis des contaminations des eaux de surface.

En parallèle des approches de modélisation mécanistique, plusieurs approches de modélisations multicritères pour l'aide à la décision (AMCD) ont été mises en place. Une première étape a permis de caractériser le niveau d'interception potentiel des flux de pesticides par une retenue et d'identifier les facteurs principaux contrôlant la capacité d'interception et de stockage des flux massiques de pesticides. Cette approche s'est traduite par la construction d'une typologie des retenues en fonction de ces facteurs. Une deuxième approche couplant une AMCD et un système d'information géographique a permis d'évaluer les risques de transfert des pesticides depuis les parcelles agricoles vers l'aval du bassin versant. Ainsi, pour des molécules plutôt hydrophiles, les catégories de risque élevé de transfert représentent 48 % de la surface agricole sur le bassin versant en grandes cultures des coteaux de Gascogne, et 33 % sur le bassin viticole alsacien (figure 1B, sites 2 et 3). Dans les deux cas, la catégorie de risque intermédiaire, c'est-à-dire pouvant soit basculer en risque élevé, soit régresser, suivant les pratiques agricoles et environnementales représente 30 à 40 % de la surface cultivée.

Une troisième approche propose des scénarios sur la transition des modes de production vers une durabilité accrue, notamment en grandes cultures, afin de limiter ces flux potentiels de contamination. Les systèmes agrobiologiques obtiennent les meilleures performances à l'échelle de l'exploitation agricole, liées notamment au critère de rentabilité économique (fortement pondéré) grâce aux cultures sous contrat rémunératrices (ex. : lentilles, pois chiches). La réduction significative de l'usage des pesticides, y contribue également fortement. En revanche, ces cultures de niches ne peuvent être développées à une échelle territoriale compte tenu d'une absence de contrats en agriculture conventionnelle. La modélisation AMCD montre également que des systèmes conventionnels optimisés, pouvant être appliqués sur tout un territoire représentent un compromis par rapport au scénario précédent plus localisé. Cette optimisation s'appuie sur une rotation plus longue, une réduction de la pression des pesticides, à l'implantation de cultures intermédiaires pour réduire l'érosion, et à l'entretien des dispositifs enherbés et ripisylve. Cette combinaison de mesures constitue le socle indispensable à la réduction en amont des retenues de la pression des pesticides pour que les retenues en aval interceptent des flux réduits de pesticides.

De plus, l'effet cumulé des retenues sur la dissipation est d'autant plus efficace que leur implantation et leur positionnement dans l'espace est optimal vis-à-vis des risques de transferts de pesticides provenant de l'amont. Il est donc possible d'incorporer dans des modèles hydrologiques, les connaissances acquises sur les retenues pour relier leur rôle vis-à-vis des transferts de pesticides à la dynamique de transfert d'eau et de pesticides à l'échelle du bassin versant. Une caractéristique supplémentaire du cadre de modélisation PESTIPOND est son utilisation potentielle pour co-construire des scénarios d'implantation de retenues avec des acteurs socio-économiques en testant différentes combinaisons de structures, fonctionnements, localisations et gestions des retenues. Ces scénarios permettent ainsi de formuler des préconisations pour optimiser la dissipation des pesticides des retenues sous diverses utilisations des terres et pratiques agricoles dans un contexte de changements globaux. Il s'agit notamment de gérer les retenues existantes, qu'elles soient individuelles ou successives, et de les intégrer dans le paysage pour prendre en compte leur impact sur la qualité de l'eau.

Figure 5 – Modélisation intégrative multi-échelle des retenues de PESTIPOND.



Conclusions

En complément des efforts de réduction et d'élimination de l'usage des pesticides sur les parcelles agricoles, notamment dans une démarche de transition agroécologique, les résultats du projet ANR PESTIPOND soulignent le rôle majeur des retenues existantes dans la dissipation des pesticides à l'échelle des retenues et dans le transfert des pesticides à l'échelle du bassin versant. L'intégration du rôle des retenues dans les modèles agro-hydrologiques, ou l'amélioration des modules de retenues existants dans ces modèles, est une étape essentielle pour améliorer la prédiction et le contrôle opérationnel du transfert de pesticides en aval dans le paysage agricole. Les suivis expérimentaux associés aux expérimentations en laboratoire et en mésocosme in situ démontrent le rôle primordial des sédiments pour la dissipation des pesticides dans les retenues.

L'érosion des sols agricoles en amont provoque l'accumulation de particules sédimentaires dans les retenues en aval des bassins versants, ce qui favorise le développement de la végétation. D'un point de vue opérationnel, si un curage sédimentaire des retenues peut être nécessaire pour conserver un volume d'eau et de stockage suffisant, il s'agit d'éviter un sur-curage des sédiments et une élimination complète de la végétation. Si les gestionnaires de

ces retenues pratiquent généralement un curage et fauchage régulier, il est conseillé de conserver une couronne de sédiments et de végétaux pour faciliter la recolonisation de la retenue. En effet, les résultats montrent que les sédiments et la végétation jouent un rôle important dans la rétention par adsorption et la dégradation d'une partie des molécules de pesticides durant la période végétative (avril à août).

Le maintien des sédiments et de la végétation dans les retenues soutient également la biodiversité, incluant la mésofaune et microfaune, et favorise la dégradation des pesticides, limitant ainsi potentiellement l'exposition des organismes aux pesticides. Il s'agit donc de privilégier le multi-objectifs et la combinaison de services écosystémiques (inondation, biodiversité, stockage pour soutien d'étiage, récréatif, etc.) lors de la conception, du déploiement et de l'entretien des retenues existantes.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par l'Agence nationale de la recherche via la subvention ANR-18-CE32-0007, projet PESTIPOND.

RÉFÉRENCES

- Azzi, E. D.; Probst, J. L., Teisserenc, R., Merlina, G., Baqué, D., Julien, F., Payre-Suc, V., Guisresse, & A. M. (2016). Trace Element and Pesticide Dynamics During a Flood Event in the Save Agricultural Watershed: Soil-River Transfer Pathways and Controlling Factors. *Water Air Soil Pollut.*, 227, 442. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3144-0>
- Bahi, A., Sauvage, S., Payraudeau, S., Imfeld, G., Sánchez-Pérez, J. M., Chaumet, B., & Tournebize, J. (2023a). Process formulations and controlling factors of pesticide dissipation in artificial ponds: A critical review. *Ecological Engineering*, 186, 106820. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106820>
- Bahi, A., Sauvage, S., Payraudeau, S., & Tournebize, J. (2023b). PESTIPOND: A descriptive model of pesticide fate in artificial ponds: I. Model development. *Ecological Modelling*, 485, 110453. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110453>
- Bahi, A., Sauvage, S., Payraudeau, S., & Tournebize, J. (2023c). PESTIPOND: A descriptive model of pesticide fate in artificial ponds: II. Model application and evaluation. *Ecological Modelling*, 484, 110472. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110472>
- Biggs, J., Williams, P., Whitfield, M., Nicolet, P., & Weatherby, A. (2005). 15 years of pond assessment in Britain: Results and lessons learned from the work of Pond Conservation. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.*, 15, 693-714. <https://doi.org/10.1002/aqc.745>
- Boithias, L., Sauvage, S., Merlina, G., Jean, S., Probst, J. L., & Sánchez-Pérez, J. M. (2014). New insight into pesticide partition coefficient Kd for modelling pesticide fluvial transport: Application to an agricultural catchment in south-western France. *Chemosphere*, 99, 134-142. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.050>
- Chaumet, B., Probst, J. L., Payre-Suc, V., Granouillac, F., Riboul, D., & Probst, A. (2022). Pond mitigation in dissolved and particulate pesticide transfers: influence of storm events and seasonality (Auradé agricultural catchment, SW-France). *J. Environ. Manag.*, 320, 115911. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115911>
- Chaumet, B., Probst, J. L., Eon, P., Camboulive, T., Riboul, D., Payre-Suc, V., Granouillac, F., & Probst, A. (2021). Role of pond sediments for trapping pesticides in an agricultural catchment (Auradé, SW France): distribution and controlling factors. *Water*, 13, 1734. <https://doi.org/10.3390/w13131734>
- Drouin, G., Droz, B., Leresche, F., Payraudeau, S., Masbou, J., & Imfeld, G. (2021). Direct and indirect photodegradation of atrazine and S-metolachlor in agriculturally impacted surface water and associated C and N isotope fractionation. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 23 (11), 1791-1802. <https://doi.org/10.1039/D1EM00246E>
- Droz, B., Drouin, G., Maurer, L., Villette, C., Payraudeau, S., & Imfeld, G. (2021). Phase Transfer and Biodegradation of Pesticides in Water-Sediment Systems Explored by Compound-Specific Isotope Analysis and Conceptual Modeling. *Environmental Science & Technology*, 55 (8), 4720-4728. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06283>
- Gilevska, T., Masbou, J., Baumelin, B., Chaumet, B., Chaumont, C., Payraudeau, S., Tournebize, J., Probst, A., Probst, J. L., & Imfeld, G. (2022). Do pesticides degrade in surface water receiving runoff from agricultural catchments? Combining passive samplers (POCIS) and compound-specific isotope analysis. *Sci. Tot. Environ*, 842, 156735. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156735>
- Grégoire, C., Elsaesser, D., Huguenot, D., Lange, J., Lebeau, T., Merli, A., Mose, R., Passeport, E., Payraudeau, S., Schütz, T., Tapia-Padilla, G., Tournebize, J., Trevisan, M., & Wanko, A. (2008) Mitigation of agricultural nonpoint-source pesticide pollution in artificial wetland ecosystems. *Environ. Chem. Lett.*, 7, 205-231. <https://doi.org/10.1007/s10311-008-0167-9>

RÉFÉRENCES (suite)

- Imfeld, G., Payraudeau, S., Tournebize, J.; Sauvage, S., Macary, F., Chaumont, C., Probst, A., Sánchez-Pérez, J.-M., Bahi, A., Chaumet, B., Gilevska, T., Alexandre, H., Probst, & J. L. (2021). The Role of Ponds in Pesticide Dissipation at the Agricultural Catchment Scale: A Critical Review. *Water*, 13 (9), 1202. <https://doi.org/10.3390/w13091202>
- Imfeld, G., Meite, F., Wiegert, C., Guyot, B., Masbou, J., & Payraudeau, S. (2020). Do rainfall characteristics affect the export of copper, zinc and synthetic pesticides in surface runoff from headwater catchments? *Sci Total Environ.*, 741, 140437. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140437>
- Imfeld, G., Lefrancq, M., Maillard, E., & Payraudeau, S. (2013). Transport and attenuation of dissolved glyphosate and AMPA in a stormwater wetland. *Chemosphere*, 90, 1333-1339. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.04.054>
- Macary, F., Leccia, O., Almeida Dias, J., Morin, S., & Sánchez-Pérez, J. M. (2013). Agro-environmental risk evaluation by a spatialised multi-criteria modelling combined with the PIXAL method. *International Journal of Geomatics & Spatial Analysis*, 23 (1), 39-70. <https://doi.org/10.3166/riq.23.39-70>
- Macary, F., Morin, S., Probst, J. L., & Saudubray, F. (2014). A multi-scale method to assess pesticide contamination risks in agricultural watersheds. *Ecological Indicators*, 36, 624-639. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.09.001>
- Maillard, E., & Imfeld, G. (2014). Pesticide Mass Budget in a Stormwater Wetland. *Environ. Sci. Technol.*, 48, 8603-8611. <https://doi.org/10.1021/es500586x>
- Passeport, E., Benoit, P., Bergheaud, V., Coquet, Y., & Tournebize, J. (2011). Epoxiconazole degradation from artificial wetland and forest buffer substrates under flooded conditions. *Chem. Eng. J.*, 173, 760-765. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.08.044>
- Passeport, E., Tournebize, J., Chaumont, C., Guenne, A., & Coquet, Y. (2013). Pesticide contamination interception strategy and removal efficiency in forest buffer and artificial wetland in a tile-drained agricultural watershed. *Chemosphere*, 91, 1289-1296. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.02.053>
- Stehle, S., Elsaesser, D., Grégoire, C., Imfeld, G., Niehaus, E., Passeport, E., Payraudeau, S., Schäfer, R.B., Tournebize, J., & Schulz, R. (2013). Pesticide Risk Mitigation by Vegetated Treatment Systems: A Meta-Analysis. *J. Environ. Qual.*, 40, 1068-1080. <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0510>
- Tournebize, J., Chaumont, C., & Mander, Ü. (2017). Implications for constructed wetlands to mitigate nitrate and pesticide pollution in agricultural drained watersheds. *Ecol. Eng.*, 103, 415-425. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.02.014>