

Sciences Eaux & Territoires

La revue d'Irstea

Article hors-série numéro 40

Les zones humides ripariennes, puits ou sources de phosphore dans les paysages agricoles ?

Rémi Dupas, Chantal Gascuel-Odoux, Ophélie Fovet, Gérard Gruau, Sen Gu, Josette Launay et Laurent Grimault



© irena iriszewczyk - Fotolia.com

www.set-revue.fr

Sciences Eaux & Territoires, la revue d'Irstea

Article hors-série numéro 40 – 2017

Directeur de la publication : Pierrick Givone (par interim)

Comité éditorial : Daniel Arnault, Louis-Joseph Brossollet, Denis Cassard, Thomas Curt, Nicolas de Menthère, Alain Dutarte, André Evette, Véronique Gouy, Alain Hénaut, Ghislain Huyghe, Emmanuelle Jannès-Ober, Cédric Laize, Alette Maillard, Isabelle Méhault, Thierry Mougey et Michel Vallance.

Rédactrice en chef : Sabine Arbeille

Secrétariat de rédaction et mise en page : Valérie Pagneux

Infographie : Françoise Peyriguer

Conception de la maquette : CBat

Contact édition et administration : Irstea-DRISE-IE

1 rue Pierre-Gilles de Gennes – CS 10030

92761 Antony Cedex

Tél. : 01 40 96 61 21 – Fax : 01 40 96 61 64

E-mail : set-revue@irstea.fr

Numéro paritaire : 0511 B 07860 – Dépôt légal : à parution – N°ISSN : 2109-3016

Photo de couverture : © irena iriszewczyk - Fotolia.com



Les zones humides ripariennes, puits ou sources de phosphore dans les paysages agricoles ?

Les dispositifs enherbés placés dans les zones humides ripariennes permettent l'interception et la rétention de polluants agricoles, comme le phosphore apporté par l'érosion des parcelles agricoles situées en amont. Cependant, l'accumulation de phosphore dans ces zones présente un risque pour les masses d'eaux superficielles, puisque, comme le montrent les résultats de cette étude, les zones humides sont des bioréacteurs capables de convertir le phosphore particulaire en phosphore dissous. Avec le temps, les zones humides ripariennes peuvent donc passer du statut de puits de phosphore particulaire à celui de sources de phosphore dissous, plus mobile et plus biodisponible.



Le phosphore (P) est, avec l'azote (N), un facteur de contrôle de l'eutrophisation. En France, le P présent dans les masses d'eau provient pour moitié d'émissions ponctuelles, d'origine domestique ou industrielle, et pour moitié d'émissions diffuses, principalement d'origine agricole. En Bretagne, région d'agriculture intensive, les flux de P ont diminué d'un facteur 2,5 sur la période 1992-2012, en raison notamment de l'amélioration du traitement des rejets d'eaux usées qui a permis de diminuer les émissions ponctuelles (Gascuel *et al.*, 2017). La part des émissions diffuses d'origine agricole a en conséquence augmenté en proportion, pour représenter près de 80 % sur la période 2007-2011. Une attention croissante se porte donc actuellement sur les transferts de P diffus, avec par exemple le Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux Loire Bretagne, qui a classé vingt-et-un plans d'eau à risque d'eutrophisation du fait de concentrations excessives en P. C'est dans ce contexte que le projet Trans-P (encadré ①) a été financé sur la période 2013-2016 par l'Agence de l'eau Loire Bretagne.

Du fait de la forte affinité du P pour la phase solide des sols, on considère souvent que cet élément est peu sujet à la lixiviation et qu'il est majoritairement transféré des sols vers les eaux superficielles sous forme particulaire par transfert de surface (Sharpley *et al.*, 2008). Dans les cours d'eau, le P est aussi majoritairement sous forme

particulaire, aussi les programmes visant à diminuer les transferts de P diffus portent-ils prioritairement sur cette composante. Parmi les mesures les plus courantes, on distingue celles visant à diminuer les sources (P contenu dans les sols et P apporté au sol), celles permettant de limiter l'érosion (e.g. choix de cultures avec une bonne couverture du sol, adaptation du travail du sol) et celles permettant d'intercepter les transferts grâce à des aménagements paysagers (e.g. haies, talus, dispositif enherbés). Les dispositifs enherbés placés entre les parcelles cultivées et les cours d'eau se sont avérés très efficaces dans de nombreux contextes grâce à des mécanismes de rétention tels que la sédimentation, l'adsorption sur les sols et l'absorption par les plantes. Par ailleurs, ces dispositifs enherbés fournissent des services écosystémiques

① LE PROJET TRANS-P

Le projet de recherche Trans-P « Transfert du phosphore des terres agricoles au cours d'eau : stocks et flux – de l'observation à la modélisation » a été financé par l'Agence de l'eau Loire Bretagne sur la période 2013-2016. Trans-P a réuni un consortium scientifique pluridisciplinaire Agrocampus Ouest – INRA – CNRS – Université de Tours (Gascuel-Oudou *et al.*, 2017). Les travaux ont porté sur l'évaluation des teneurs des sols et des flux de phosphore dans les rivières, à l'échelle de petits sites très instrumentés comme l'ORE AgrHys et à l'échelle de la Bretagne.

liés à l'épuration d'autres polluants issus de l'agriculture (nitrate, pesticides) et à la biodiversité. Pourtant, la destinée à long terme du P piégé dans ces dispositifs enherbés pose question, puisque celui-ci s'accumule sans possibilité de dégradation ou de transfert vers l'air, si bien que certains auteurs alertent sur le risque de transformation de ces zones tampons en sources de P après plusieurs décennies de fonctionnement (Dorioz *et al.*, 2006). Le risque de remobilisation du P accumulé est d'autant plus important que l'emplacement de ces dispositifs enherbés, entre parcelles cultivées et cours d'eau, correspond souvent à des zones humides ripariennes considérées comme zones à risque.

L'objectif de cette étude était d'évaluer le risque de remobilisation du P accumulé dans les zones humides d'un bassin versant sur socle en Bretagne. Elle a consisté en un suivi des concentrations en P dissous et P particulaire dans la rivière et dans l'eau du sol de zones humides. Le suivi de la rivière visait à identifier si le P dissous et le P particulaire ont des mécanismes de transfert communs ou distincts, tandis que le suivi des zones humides visait à étudier le rôle de ces zones dans la dynamique des transferts de P. Le rôle des zones humides ripariennes a été ensuite replacé dans le contexte du continuum du transfert de P le long d'un versant, en prenant en compte les arrivées de P en provenance des parcelles amont (par érosion) et le risque de transfert vers le cours d'eau (par solubilisation).

Des mécanismes de transfert différents pour le phosphore particulaire et dissous

Cette étude a porté sur le bassin versant de Kervidy-Naizin (Bretagne, 5 km²), site principal de l'observatoire de recherche en environnement AgrHys (encadré 2). À l'exutoire, le débit est suivi en continu, et les concentrations en P réactif soluble (SRP, appelé couramment P dissous) et P total (TP) ont été mesurées tous les six jours. En complément de ce suivi des concentrations à moyenne fréquence, un échantillonnage haute fréquence infra-horaire a été réalisé lors de crues pour suivre la dynamique des concentrations lors de ces moments hydrologiques connus pour transférer une quantité importante de P. On considère dans cette étude que tout le P dissous est réactif, le P particulaire (PP) étant estimé égal à TP – SRP.

Sur la période d'étude (2007-2014), les concentrations moyennes pondérées par le débit, estimées avec les données de l'échantillonnage moyenne fréquence, s'établissaient à 25 µg SRP l⁻¹ et 66 µg TP l⁻¹. Ces concentrations classeraient le bassin versant en bon état chimique selon les seuils de la directive cadre sur l'eau, ce qui semble contradictoire avec le niveau élevé des teneurs en P des sols (265 ± 157 mg P Dyer kg⁻¹) ainsi que des apports annuels (≈ 62 kg P ha⁻¹ an⁻¹). De même, les flux annuels varient entre 0,2 et 0,6 kg P ha⁻¹ selon les années, ce qui place Kervidy-Naizin dans la fourchette basse des bassins versants suivis en France. Notons tout de même que ce petit bassin versant ne comporte pas de sources ponctuelles, contrairement à la plupart des bassins suivis par les réseaux opérationnels en France où ces sources ponctuelles représentent en moyenne la moitié des flux. Ces observations montrent qu'il n'y a donc pas de lien



© R. Dupas (Inra)

❶ Les dispositifs enherbés ripariens sont des zones de rétention pour le phosphore particulaire mais peuvent devenir des sources de phosphore dissous.

direct entre sources (teneurs et apports aux sols) et pertes de P vers le cours d'eau. Ainsi, un bassin versant avec des sources élevées peut avoir des pertes faibles si les sols ont une capacité d'adsorption élevée et/ou si les berges et bords de cours d'eau sont protégés, comme c'est le cas à Kervidy-Naizin.

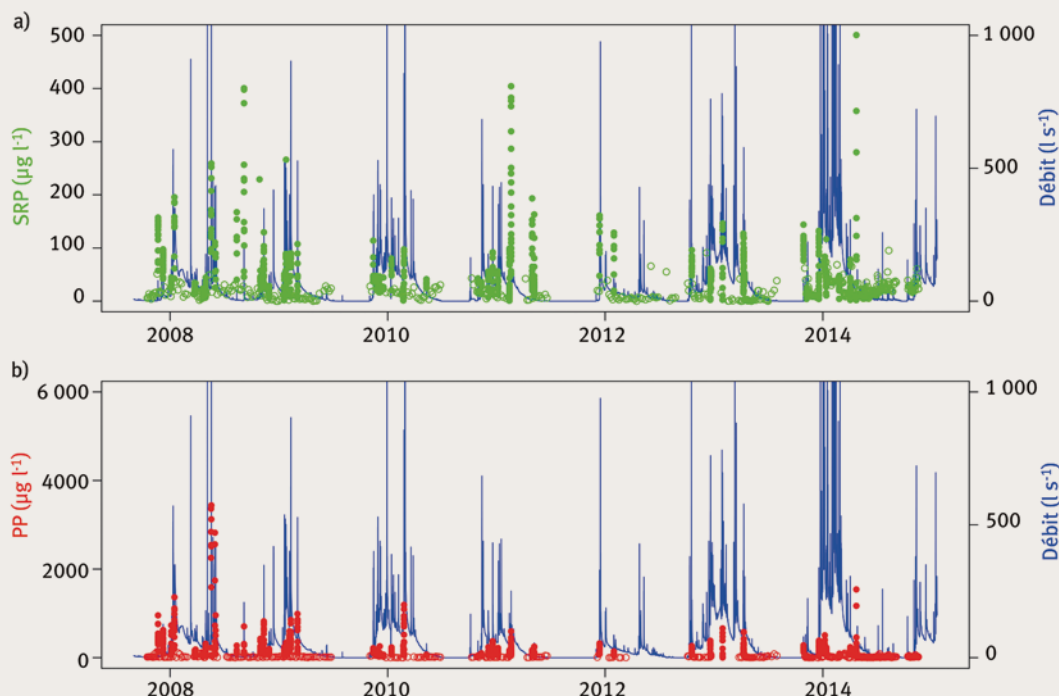
L'analyse des données en crue montre que si les concentrations en débit de base sont relativement basses, les concentrations en crues peuvent augmenter d'un facteur 10 ou plus pendant quelques heures (figure 1). Les flux en crue représentent respectivement 62 % et 73 % des flux annuels de P total et P dissous (SRP).

L'échantillonnage haute fréquence en crue a permis de comprendre l'origine des formes particulières et dissoutes du P pendant ces événements hydrologiques. Les relations entre concentrations et débit au cours des crues fait apparaître des relations non linéaires, en forme de « boucles » appelées hystérèses, qui peuvent être interprétées en termes de distance entre sources de P et cours d'eau et en termes de voies de transfert, qui peuvent être communes ou distinctes pour les deux formes de P. Deux motifs principaux apparaissent, l'un observé pour environ 80 % des

❷ L'ORE AGRHYS

L'observatoire de recherche en environnement (ORE) Agrhys – site de Kervidy-Naizin est un bassin versant de recherche de 5 km² localisé dans le Morbihan. Ce bassin versant sur socle est le lieu d'une agriculture de polyculture-élevage dominée par les productions laitières et porcines ; l'occupation du sol est mixte cultures-prairies. Depuis 1993, ce bassin versant est étudié et suivi par l'INRA et le CNRS, faisant de ce site un observatoire emblématique de l'effet des évolutions agricoles et de la variabilité du climat sur les cycles biogéochimiques (carbone, azote, phosphore).

❶ Chroniques de débit et de concentrations en P dissous (SRP) (a) et P particulaire (PP) (b) à l'exutoire du bassin versant de Kervidy-Naizin.



crues et tout au long de l'année, et l'autre observé pour 20% des crues et surtout au printemps. Le motif majoritaire montre un décalage temporel entre transferts de P particulaire et dissous. Ce motif indique que la source de P particulaire est proche du cours d'eau (remobilisation de sédiments présents dans le lit ou érosion de berge), tandis que la source de P dissous est plus distante par rapport au cours d'eau : localisée dans les versants et transférée de manière retardée par des voies de transfert de sub-surface ou par ruissellement sur surface saturée. Ce motif dominant remet en question le modèle conceptuel couramment admis selon lequel le P est exporté suite à l'érosion des versants apportant du P particulaire au cours d'eau, qui, par solubilisation, produirait du P dissous. Nos résultats montrent au contraire qu'il existe une composante dissoute du flux de P indépendante du transfert particulaire. Le second motif, minoritaire, correspond bien en revanche à ce modèle couramment admis, puisque les deux formes de P sont exportées de manière plus synchrone. Ce second motif étant surtout observé au printemps, il peut être la conséquence de l'érosion des parcelles cultivées et d'export accidentel de P récemment épandu, puisque cette période correspond à la préparation des lits de semence pour les cultures de printemps (risque d'érosion) et aux épandages d'effluents (risque lié à la présence d'un apport au sol).

Si le P particulaire mobilisé par érosion des parcelles ne semble pas visible dans le cours d'eau pour une majorité d'événements de crue, des figures d'érosion sont pourtant observées dans les parcelles en culture, démontrant que l'érosion existe bien dans le bassin versant. Il est donc probable que dans la plupart des épisodes érosifs, le P

particulaire érodé se redépose dans les zones plates de bas de versant, là où sont installés des dispositifs enherbés en application de la réglementation. Selon cette hypothèse, l'érosion des parcelles ne conduit pas directement à des transferts au cours d'eau, mais à une redistribution des sols pouvant conduire à un enrichissement en P des sols de bas-fond, le P accumulé dans ces zones humides ripariennes pouvant être remobilisé sous forme de P dissous lors d'épisodes de crue ultérieurs. Pour comprendre les mécanismes de remobilisation du P dans ces zones, celles-ci ont été suivies pendant une année hydrologique.

Mécanismes de solubilisation du P dans les zones humides ripariennes

Des analyses de solutions de sol prélevées grâce à un dispositif de pièges à eau ont été conduites en quatre sites de zones humides et à deux profondeurs, afin de déterminer les mécanismes pouvant conduire à une solubilisation du P dans ces zones. Ces pièges à eau permettent de collecter l'eau libre du sol et de préserver les conditions d'oxydo-réduction *in situ*. Les analyses réalisées ont permis de déterminer le P dissous (SRP) ainsi que le fer réduit en solution (Fe^{2+}).

La relation entre le P extractible du sol (méthode Dyer) et la concentration moyenne en P dissous dans la solution du sol sur la période de suivi est linéaire croissante (figure 2a). Même si cette relation linéaire repose sur peu de points, il semble que la solubilisation du P soit directement liée à la teneur en P extractible des sols. L'ensemble des sites suivis montre des dynamiques de concentration similaires, aussi, un seul site a été sélectionné en exemple

sur la figure 2 b. Des pics de P dissous apparaissent et sont de deux types. Le premier type de pic, indiqué par un (1) sur la figure 2 b, est lié à la mise en saturation des sols par la nappe à l'automne, après la période sèche estivale. Plusieurs mécanismes peuvent expliquer la solubilisation du P sous le contrôle de cycles secs-humides, incluant la lyse bactérienne ou des mécanismes de disruption physique des agrégats de sol. Le second type de pic, indiqué par un (2) sur la figure 2 b, est synchrone avec les variations de la concentration en Fe^{2+} . Ces pics apparaissent quand la nappe stagne de manière prolongée à la surface du sol, pouvant conduire à des conditions anaérobies. La libération de Fe^{2+} en condition anaérobie laisse penser que des mécanismes d'oxydo-réduction se produisent, conduisant à la dissolution des oxydes de fer du sol accompagnée d'un relargage du P précédemment adsorbé sur ces oxydes. Les fluctuations de nappes, qui contrôlent à la fois la fréquence des cycles humide-sec à l'origine des pics de type (1) et la durée des périodes d'engorgement prolongé à l'origine des pics de type (2), sont un déterminant important des mécanismes de remobilisation du P des zones humides.

Ces travaux sur le stockage et la solubilisation du P particulaire au sein des zones humides ripariennes ont inspiré un nouveau projet de recherche visant à préciser les facteurs de contrôle de cette solubilisation ainsi que l'effet des teneurs en P du sol des zones humides et des variations interannuelles du climat sur la nature des formes chimiques du P dissous relargué. Des résultats préliminaires montrent que les caractéristiques climatiques des années déterminent la fréquence et l'amplitude des pics de type (1) ou (2). La topographie semble aussi jouer un rôle prédominant dans la sélection des mécanismes de

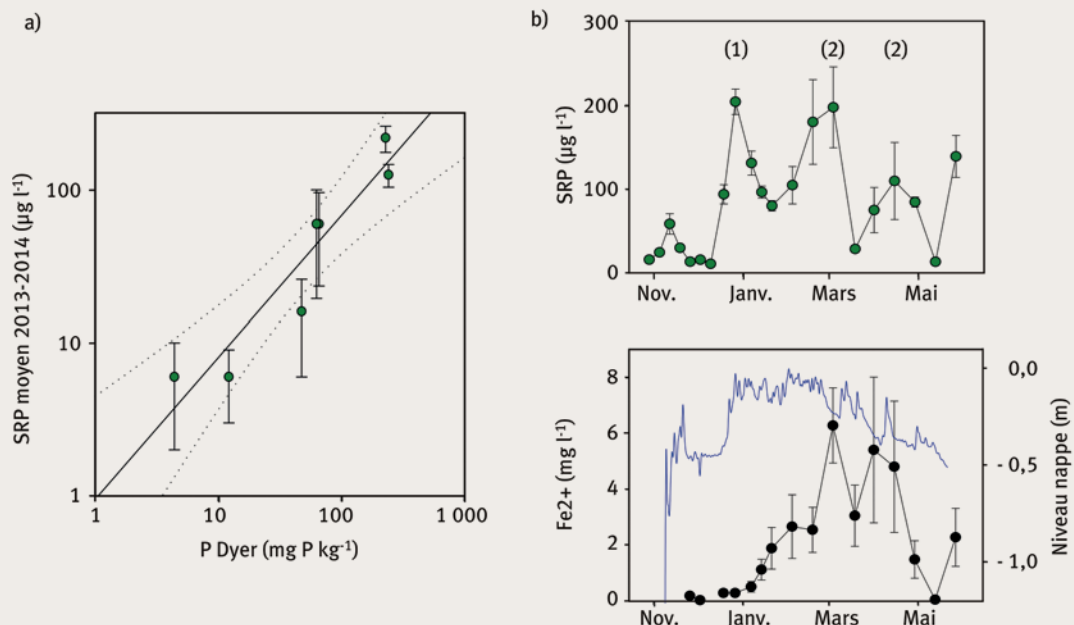
solubilisation puisque des versants pentus vont être sujets à des fluctuations de nappe fréquentes (produisant des pics de type (1)) tandis que des versants plats vont être sujets à des périodes de stagnation de nappe plus longue (produisant des pics de type (2)). La formalisation des différents facteurs de contrôle de la remobilisation du P dans les zones humides permettra de créer une typologie de zones humides en fonction de facteurs tels que leur teneur en P des sols, la topographie et le type de végétation, dans le but d'affiner le diagnostic pour la gestion de ces zones.

Les zones humides, relai biogéochimique dans les paysages agricoles sur socle

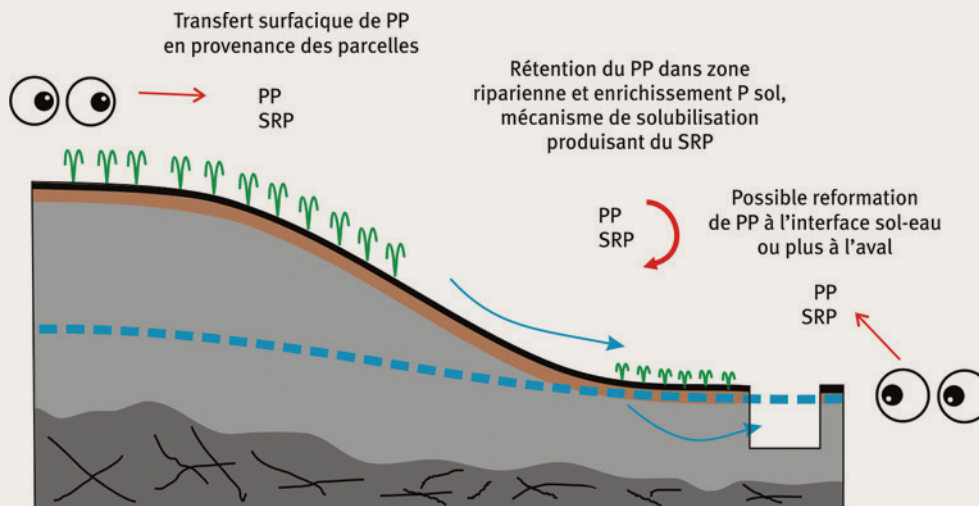
Les zones humides ripariennes, quand elles sont aménagées en dispositif tampon enherbé, permettent la rétention du P particulaire exporté par érosion depuis les parcelles cultivées en amont. Cette rétention, mise en évidence ici par le décalage temporel entre transfert de P particulaire et dissous en crue, permet de réduire les flux à moyen terme. Cependant, elle s'accompagne d'un enrichissement en P des sols des zones humides, qui peut poser un risque à plus long terme du fait de leur forte connectivité au cours d'eau et à des propriétés hydrologiques favorisant la solubilisation du P stocké.

Ces observations à différentes échelles permettent de suggérer un modèle conceptuel du continuum de transfert du P dans un bassin agricole, plus complexe que le modèle courant liant directement le P particulaire érodé dans les parcelles cultivées et le P majoritairement sous forme particulaire dans les cours d'eau. Nos observations montrent que les zones humides ripariennes ont un rôle de relai

2 Relation entre teneur en P Dyer des sols et concentration moyenne en P dissous (SRP) dans l'eau du sol (a) et dynamique des concentrations en SRP et Fe^{2+} pour un piège à eau sélectionné à 15 cm de profondeur (b).



- ⑤ Si la composante particulaire est dominante au départ (érosion des parcelles) et à l'arrivée (flux dans les cours d'eau) du continuum de transfert du phosphore dans les paysages agricoles, la composante dissoute joue un rôle central au niveau des zones humides ripariennes, à l'interface entre versants et cours d'eau. SRP : P réactif soluble ; PP : P particulaire.



dans les paysages, en accumulant du P particulaire et en le transformant en P dissous potentiellement plus biodisponible (figure ⑤). Il est aussi possible que le P dissous exporté vers le cours d'eau reforme du P particulaire en repassant dans un milieu oxygène ou en s'adsorbant sur des matières en suspension non saturées en P.

ne sont pas cultivées et donc pas concernées par les analyses de terre. En termes de gestion, la mise en place d'actions spécifiques à ces zones telles que l'exportation de biomasse doivent être mises en place, en parallèle d'actions de lutte contre l'érosion pour limiter leur enrichissement en phosphore. ■

Conclusions

Les dispositifs enherbés placés dans les zones humides ripariennes permettent l'interception du phosphore particulaire apporté par érosion depuis les parcelles agricoles situées en amont, limitant ainsi les transferts directs au cours d'eau. Cependant, l'accumulation de phosphore dans ces zones pose problème puisque leurs propriétés hydrologiques et biogéochimiques peuvent favoriser la solubilisation du phosphore et son relargage sous forme dissoute vers le cours d'eau. Le relai spatial que constituent les zones humides ripariennes dans les paysages agricoles a aussi un effet temporel avec la rétention à moyen terme et le possible relargage à plus long terme, qui doit être pris en compte dans l'évaluation de la trajectoire des bassins versants. Dans le diagnostic de bassin versant, il devrait être recommandé de mieux suivre la teneur en phosphore des sols de zones humides, cette donnée étant souvent manquante puisque ces zones ne

Les auteurs

Rémi DUPAS, Chantal GASCUEL-ODOUX et Ophélie FOVET

INRA, UMR 1069 Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, F-35042 Rennes, France.

✉ remi.dupas@inra.fr

✉ chantal.gascuel@inra.fr

✉ ophelie.fovet@inra.fr

Gérard GRUAU et Sen GU

OSUR, CNRS, UMR 6118 Géosciences Rennes, F-35042 Rennes, France.

✉ gerard.gruau@univ-rennes1.fr

✉ gu.sen@univ-rennes1.fr

Josette LAUNAY et Laurent GRIMAULT

Centre de ressources et d'expertise scientifique sur l'eau de Bretagne

F-35711 Rennes, France.

✉ josette.launay@agrocampus-ouest.fr

✉ laurent.grimault@bretagne.bzh

EN SAVOIR PLUS...

✉ **DORIOZ, J.-M., WANG, D., POULENARD, J., TREVISAN, D.**, 2006, The effect of grass buffer strips on phosphorus dynamics - A critical review and synthesis as a basis for application in agricultural landscapes in France, *Agriculture Ecosystems & Environment*, n° 117, p. 4-21.

✉ **GASCUEL-ODOUX, C., CARTEAUX, L., DUPAS, R., FAUCHEUX, M., FOVET, O., GILLIET, N., GRUAU, G., GU, S., JEANNEAU, L., LEGEAY, P.-L., LEMERCIER, B., MINAUDO, C., MOATAR, F., MOREIRA, M., PETITJEAN, P.**, 2017, Transfert du phosphore des terres agricoles au cours d'eau : stocks et flux. De l'observation à la modélisation. Synthèse du Projet TRANS-P.

✉ **SHARPLEY, A.N., KLEINMAN, P.J., HEATHWAITE, A.L., GBUREK, W.J., FOLMAR, G.J., SCHMIDT, J.P.**, 2008, Phosphorus loss from an agricultural watershed as a function of storm size, *J Environ Qual*, n° 37, p. 362-8.