
Synthèse du Projet TRANS-P.

Anne Colmar, AELB. Mars 2017

Participants : Chantal Gascuel, Laurence Carteaux, Remi Dupas, Mickael Faucheux, Ophélie Fovet, Nicolas Gilliet, Gérard Gruau, Sen Gu, Laurent Jeanneau, Pierre-Louis Legeay, Blandine Lemerrier, Camille Minaudo, Florentina Moatar, Mariana Moreira, Patrice Petitjean

Le phosphore (P) est, avec l'azote, un élément limitant de la production primaire des écosystèmes terrestres et aquatiques. Une présence excessive de P biodisponible (P_{biodisp}) dans les écosystèmes aquatiques peut contribuer à leur eutrophisation. L'impact du P sur l'écologie des milieux aquatiques dépend des formes de P transférées, certaines étant plus biodisponibles que d'autres ; en première approche, on considère le P dissous (P_{dis}) comme plus biodisponible que le P particulaire (P_{part}). Cette distinction entre formes dissoutes et particulaires est cependant trop simpliste pour estimer des impacts, puisqu'il existe des formes dissoutes récalcitrantes et des formes particulaires en grande partie biodisponibles.

La maîtrise des flux de P constitue un enjeu prioritaire sur différents territoires du bassin Loire-Bretagne. Les bassins d'alimentation de 22 plans d'eau sensibles à l'eutrophisation, utilisés pour l'alimentation en eau potable, sont particulièrement sensibles aux flux de P et sont inscrits dans la disposition 3B-1 du SDAGE Loire-Bretagne 2016-2021. Plus de 70% des plans d'eau du bassin Loire-Bretagne sont classés en état des eaux moins que bon, en raison de leur niveau trophique très élevé, sur la base des indicateurs P et chlorophylle. Sur ces territoires, les deux principaux axes d'amélioration sont d'une part, la réduction des risques de transfert vers les eaux, notamment par la lutte contre l'érosion, et d'autre part, l'équilibre de la fertilisation dans le but de stopper l'enrichissement des sols. La problématique des rejets domestiques et industriels de P est de mieux en mieux traitée et l'attention se porte sur la part agricole diffuse dont provient majoritairement le P présent dans les eaux de surface (plus de 80% et de 60% pour le P_{part} et le P_{dis} , respectivement, en Bretagne). Or les flux et les formes du P émis par les bassins versants agricoles et leur variabilité spatio-temporelle sont aujourd'hui mal connus. De plus, le lien n'est pas explicitement fait entre les systèmes agricoles, les stocks de P des sols et leur disponibilité, les flux sortants particulaires et dissous. Ces défauts d'explicitation rendent l'action publique difficile.

L'UMR SAS Inra Agrocampus Ouest, l'Université F. Rabelais de Tours et l'UMR Géosciences CNRS Université de Rennes 1 ont réalisé le projet Trans-P (2014-2016), financé par l'AELB, pour mieux comprendre les transferts du P des terres agricoles aux cours d'eau et leurs variabilités à l'échelle de la Bretagne. Ce projet a traité de deux échelles spatiales, le petit bassin versant très instrumenté de Kervidy-Naizin (Morbihan) et la région Bretagne dans son ensemble, en profitant de l'acquis de l'un pour aller vers l'autre, et en analysant les sols et les processus de transfert. L'objectif de l'étude a été de mettre en place les connaissances pour établir un modèle qui puisse permettre de prédire l'effet de plans d'actions aux échelles de gestion de la ressource, et plus précisément de prédire la qualité des eaux en fonction de scénarios d'évolution des pratiques agricoles ou des aménagements du bassin versant. Il s'est attaché à analyser le partage entre formes dissoute et particulaire, et a comporté 3 volets :

- Analyse de la variabilité spatio-temporelle des concentrations et des flux à l'échelle de la Bretagne, estimation des incertitudes associées ;
- Amélioration des connaissances sur les sources et les flux émis par les sols, amélioration de la stratégie de surveillance des sols dans les contextes vulnérables ;
- Premiers développements d'un modèle reliant sol, hydrologie, pratiques agricoles et flux, à différentes échelles spatiales.

Processus de transfert du phosphore agricole en zone de socle et modélisation

En France, on estime que 45% des flux de P total dans les cours d'eau (moyenne entre 2005 et 2009 ; cours d'eau d'ordre de Strahler < 4-5) sont issus de transferts diffus issus des terres agricoles, contre 97 % pour l'azote (Dupas et al., 2015). Les sources de ce P peuvent être d'origine pédogénétique (altération des roches) ou anthropique (activités agricoles, domestiques et industrielles). Parmi les sources agricoles, on doit considérer les apports actuels mais aussi ceux liés à la constitution progressive d'un stock de P dans les sols, le « phosphore hérité ». Dans les paysages agricoles, les transferts de P ont lieu lorsque coïncident dans le temps et dans l'espace, la présence d'une « source » et l'activation de processus hydrologiques à l'origine du « transfert ». Les zones, où les facteurs de source et de transfert coïncident, représentent généralement moins de 20% de la surface des bassins versants mais transfèrent jusqu'à 80 % du flux de P. Si la présence de sources de P dans le bassin versant est une condition nécessaire au transfert, il n'existe **pas de relation simple entre sources et flux dans les rivières** quelles que soient les temporalités.

Le premier volet du projet Trans-P a visé à identifier les sources, les mécanismes de mobilisation, les voies de transfert du P et leurs facteurs de contrôle, ainsi qu'à caractériser le statut phosphoré des sols et des flux sortants. La démarche adoptée a consisté à analyser les données acquises à plusieurs échelles de temps (année, saison, crue) et d'espace (zones humides ripariennes, bassin versant dans son ensemble), puis à modéliser (c'est-à-dire formaliser mathématiquement) les processus identifiés sur le bassin versant élémentaire de Kervidy-Naizin. Elle a consisté également à caractériser les teneurs en P des sols et leurs déterminants, et à reconstituer des données haute fréquence des concentrations (20 mn) dans le cours d'eau pour en estimer les flux et incertitudes.

Même dans le contexte d'un bassin versant où les sols présentent une forte teneur en P total et P extractible, **les concentrations en P_{part} et P_{dis} mesurées dans les eaux sont modérées, indiquant une forte capacité d'adsorption des sols**. Elles présentent néanmoins une très grande variabilité temporelle en fonction des saisons mais surtout des événements de crues. **L'enrichissement en P des sols par l'activité agricole et l'érosion hydrique**, soit à la surface du sol, soit dans le sol au niveau des parois des pores dans lesquels l'eau circule, sont à l'origine des transferts de P_{part} et P_{dis} des sols vers les cours d'eau. Les fortes concentrations en P_{part} et P_{dis} n'apparaissent cependant pas au même moment, sauf au printemps où la synchronisation peut s'expliquer par des mécanismes de ruissellement et d'érosion en provenance des versants. Dans la plupart des situations, **la mobilisation du P_{dis} est indépendante de celle du P_{part}** . La capacité d'infiltration des sols, le niveau de la nappe, la présence de drains, la structure du paysage sont autant de facteurs qui déterminent si le P mobilisé (particulaire ou dissous) atteindra ou non le cours d'eau. Dans le contexte du bassin-versant de Kervidy-Naizin, la mobilisation du P_{part} **provient d'une source située dans le cours d'eau ou en marge de celui-ci via des mécanismes d'érosion et de remise en suspension** (érosion des berges et remise en suspension des sédiments du cours d'eau) **ou proches de celui-ci via un mécanisme de ruissellement** (ruissellement du bas de versant). A l'inverse, **le P_{dis} est exporté par des transferts de subsurface**, la majeure partie de ce transfert s'opérant en crue. Si ces dynamiques d'exportation différentes ont déjà été mises en évidence dans des bassins versants herbagers, l'étude montre que cette **non-synchronisation** a aussi lieu dans des **bassins versants à dominance de terres arables**.

Les **zones humides ripariennes (ZHR)** jouent un rôle de **relais entre les versants et les cours d'eau**. Ce sont des zones tampons où le P_{part} s'accumule dans les sols, limitant son transfert vers le cours d'eau. Ces zones sont cependant le lieu de processus susceptibles de transformer le P_{part} accumulé en P_{dis} , **lequel peut être transféré au cours d'eau du fait des connexions hydrologiques existant entre ces zones et le réseau hydrographique**. Ces transformations sont un mécanisme important puisque d'un processus positif du point de vue de la qualité de l'eau (limitation des émissions de P_{part}), peut découler un processus négatif (accroissement des émissions de P_{dis}). Les fluctuations de nappe sont le moteur de ces exportations. Deux zones humides ont été étudiées et les résultats montrent que

deux mécanismes sont en jeu, tous deux sous le contrôle des fluctuations de nappe en interaction avec le sol. Le premier est le **flush d'un pool de P mobile contenu dans le sol, lors des remontées de nappe à l'automne**. Le P_{dis} mobilisé est soit minéral (orthophosphate) soit organique. Le second intervient en **conditions anoxiques à la fin de l'hiver**, quand la réduction des (hydr)oxydes de fer s'accompagne d'une libération de P_{dis} minéral (orthophosphate). La comparaison des sites montre que les formes du P_{dis} (organiques et minérales) ainsi que les flux de P_{dis} transférés au cours d'eau dépendent de nombreuses variables : les formes et les teneurs en P du sol, la teneur et la dynamique de minéralisation de la manière organique du sol, la durée des périodes de saturation en eau. La comparaison des deux zones ripariennes semble indiquer, à l'échelle du paysage, le rôle de la topographie, une topographie accentuée pouvant conduire à une exportation plus grande de P_{dis} minéral qu'une topographie plus plate.

La modélisation mathématique permet de formaliser les connaissances acquises sur les mécanismes à l'origine des transferts de P_{dis} . La démarche de modélisation développée n'a pas pu aller jusqu'à produire un outil de gestion, mais a permis de proposer un **module P couplé au modèle hydrologique TNT2 : le modèle TNT2-P**. Grâce à ce modèle, les hypothèses formulées sur le lien entre P du sol, variation des nappes et exportation du P_{dis} ont été confirmées. La modélisation des transferts de P nécessite de nombreuses données d'entrées. Elle est donc pertinente à l'échelle de BV opérationnels où les données décrivant les pratiques agricoles et les milieux sont déjà bien connues.

Les teneurs en phosphore des sols, variabilité et distribution spatiale

La principale information connue sur les sols est leur teneur en P biodisponible ($P_{biodisp}$)¹, et non leur teneur en P total (P_{tot}) qui n'est disponible que sur un très petit nombre d'échantillons et sur des sites très instrumentés. Ce $P_{biodisp}$ est mesuré en laboratoire selon différentes méthodes qui ont pour objectif le conseil agronomique. Même si le P extractible ($P_{extract}$) peut sembler a priori être un bon déterminant du P des cours d'eau, il ne rend pas compte du degré de saturation en P des sols (nécessaire pour passer d'une mobilité potentielle à une mobilité effective), ni des flux de P_{part} qui peuvent représenter une part importante des émissions de P. Un enjeu est donc de disposer d'une estimation des teneurs en P_{tot} , en complément du $P_{extract}$ des sols. Ce volet de l'étude a visé à rechercher une relation entre les teneurs en $P_{extract}$ et en P_{tot} ainsi qu'à identifier les déterminants pédologiques et agronomiques de cette relation. L'estimation des stocks en P_{tot} permettra une évaluation plus juste des transferts aux cours d'eau.

Les caractéristiques du sol ont été estimées à deux profondeurs et spatialisées à l'échelle du BV élémentaire du Naizin (15 km²), à partir de plus de 300 prélèvements représentatifs des différents de systèmes de culture. Des relations entre les variables liées à l'agriculture (pratiques agricoles, successions des cultures, fertilisation et amendements organiques et minéraux, etc.) et au sol (carbone organique total, Al et Fer extractibles, etc.) explicatives des teneurs en $P_{extract}$ et P_{tot} des sols ont été mises en évidence et un modèle spatial de prédiction de ces teneurs a été établi. Dans un souci de généralisation à l'ensemble de la Bretagne, une approche similaire de modélisation des teneurs en P_{tot} a été mise en œuvre à l'échelle régionale avec des données moins précises. Toutes les sources de données pédologiques disponibles à l'échelle régionale ont été utilisées, la Base de Données d'Analyses des Terres (BDAT) ayant été complétée par des données complémentaires issues des programmes GP5 Mh, IGCS et RMQS.

Sur Naizin, les variables liées aux **pratiques agricoles** se sont révélées être les plus importantes pour estimer le $P_{extract}$. Par contre à l'échelle de la Bretagne, ces variables ne sont pas particulièrement

¹ Dans les sols, le P biodisponible est le P assimilable par les plantes. Le **P extractible** est une estimation du **P biodisponible** que l'on réussit à extraire du sol par des méthodes chimiques (Olsen, Dyer...). Par simplification, on utilise l'un ou l'autre de ces 2 termes. Toutefois, selon l'agressivité de la méthode d'analyse, le P extractible peut inclure des formes peu biodisponibles (alors P extractible > P biodisponible). Sa teneur est exprimée en P_2O_5 (mg/kg de terre).

bien corrélées aux différentes formes de P_{extract} , du fait de l'imprécision des données agricoles à cette échelle. Par contre, sur le BV du Naizin comme à l'échelle régionale, le P_{tot} est bien corrélé aux variables liées au **matériau parental** (argile, Al et Fe totaux et extractibles), et donc à la capacité de sorption du sol. Les covariables qui déterminent le plus les teneurs en P_{tot} sont le P Olsen, le Fe extractible, le sable, le Corg et le pH. Parmi les facteurs analysés, le matériau parental a un effet significatif uniquement sur le P_{tot} : les sols issus de granites, gneiss, schistes moyens et durs ont des teneurs plus fortes en P que les sols issus de limons éoliens, alluvions/colluvions et de roches volcaniques. Il n'a pas été possible de quantifier les stocks de P et la saturation en P des sols dans le cadre de l'étude, mais les données disponibles devraient le permettre. Les performances d'extrapolation des teneurs en P dans les sols à l'ensemble de la zone d'étude à partir des informations ponctuelles disponibles ont été meilleures sur le BV de Naizin, en utilisant les données précises disponibles sur ce BV, plutôt qu'en utilisant les données disponibles sur l'ensemble de la région. Les cartes obtenues avec les données régionales présentent des teneurs moins élevées que les cartes obtenues avec le jeu de données détaillées de ce bassin, mais les grandes structures spatiales de répartition sont conservées.

A l'échelle régionale, les covariables disponibles ont permis d'estimer les teneurs en P_{tot} et d'en fournir une carte régionale (cf ci-dessous). **Ces données et cette carte peuvent permettre de cibler les domaines à risque.** Les teneurs en P_{tot} sont plus élevées dans le centre et l'ouest qu'en Ile-et-Vilaine. La comparaison avec la carte de Delmas et al. (2015), établie pour la France, montre que le modèle régional Trans-P prédit des teneurs supérieures, surtout dans l'ouest de la région. Ces cartes demandent cependant à être validées.

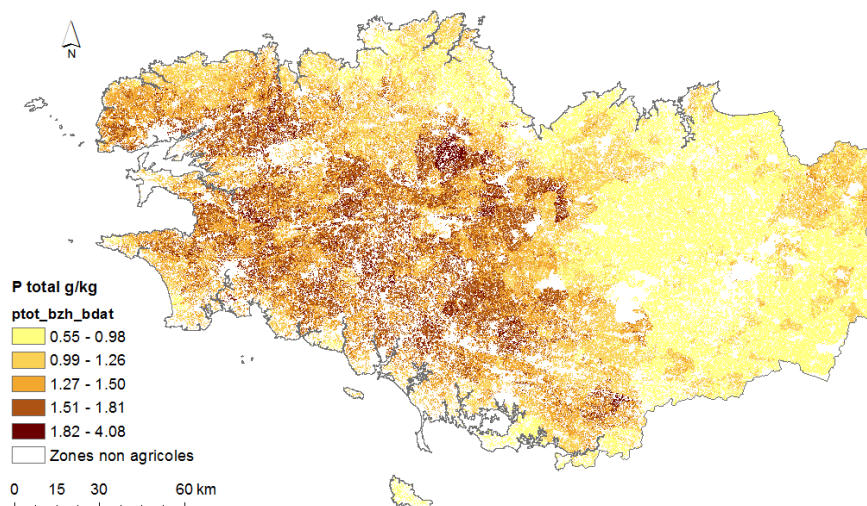


Figure 1. Teneurs en P total prédites à partir du modèle régional

Les flux de phosphore en rivière, amélioration des estimations et incertitudes de calcul

Le lien entre les teneurs en P dans les sols et les transferts au réseau hydrographique n'est pas direct. Ces transferts se font majoritairement en période de crue, avec de très grandes variations de concentrations, mettant en jeu une interaction entre le sol, les particules mises en suspension et/ou transportées par ruissellement de surface, mais surtout par les écoulements de subsurface qui ne sont pas que du « bruit de fond ». Les relations concentrations - débits dépendent du type d'apport de P (diffus ou ponctuel) ainsi que des processus hydrologiques (dilution ou concentration), biologiques et biogéochimiques (processus d'adsorption/ désorption, prélèvements biologiques dans les cours d'eau). Or, l'analyse de la variabilité temporelle et spatiale des concentrations et des flux de P se heurte au manque de données de qualité sur les diverses formes de P dans les réseaux de suivi peu adaptés aux processus de transfert très réactifs impliquant le P. Néanmoins, des données existent à l'échelle de la Bretagne, sans qu'aucune analyse de ces données n'ait été faite à ce jour

pour reconstituer l'évolution des flux dans le temps, leur variabilité spatiale et tenter une estimation des parts diffuses agricoles et domestiques/industrielles dans les émissions totales de P_{part} et P_{dis} .

Un objectif de Trans-P a donc été de collecter ces données et de les analyser. Toutes les données de débits et de concentrations en P_{tot} et P_{dis} disponibles en Bretagne depuis 1987 ont été compilées dans une seule base de données, comportant 195 points de mesure permettant de calculer des flux annuels et des incertitudes. Des méthodologies ont été développées pour minorer les incertitudes liées à la basse fréquence des données (groupement des données par période de 5 années consécutives), pour estimer les contributions relatives des sources diffuses (agricoles) et ponctuelles (urbaines/industrielles) et pour évaluer leur évolution au cours des 15-20 dernières années.

Les flux de P_{part} et P_{dis} montrent des diminutions importantes depuis 25 ans. Les premiers ont baissé en moyenne de 60%, les seconds de 50%, avec des diminutions plus fortes pour les bassins qui avaient au départ (en 1987) les flux les plus forts. L'étude réalisée permet de chiffrer les émissions globales actuelles de P_{part} et de P_{dis} aux côtes bretonnes à respectivement 1100 et 360 tonnes/an, contre respectivement 2690 et 750 tonnes/an il y a 15 ans. En matière de P_{tot} , l'estimation faite ici est en retrait de celle faite antérieurement (3000 à 4500 tonnes/an de P_{tot} ; Arousseau, 2001 ; CSEB, 2003). **Une partie de la baisse est imputable à la diminution des rejets domestiques et industriels** (traitement des effluents domestiques et industriels, installation de stations d'épuration ou de déphosphatation, règlementation sur les détergents), qui se traduit par une forte baisse du flux moyen d'étiage (au cours des 25 dernières années, baisse de 50% et 75% respectivement pour le P_{part} et le P_{dis}). **La plus grande partie de la baisse (80% et 60% pour le P_{part} et le P_{dis} , respectivement) est imputable à la diminution des émissions diffuses agricoles**, probablement en réponse à la mise en place de programmes de lutte contre l'érosion (couverts hivernaux, réimplantation de haies, protection des berges, ...), à la modification des teneurs en P des engrais minéraux et de l'alimentation animale (phosphatase améliorant la digestibilité du P). Aujourd'hui, la part des émissions agricoles dans les flux totaux est très majoritaire, estimée à plus de 80% pour le P_{tot} et de 60% pour le P_{dis} . **Si des efforts doivent encore être consentis pour diminuer les émissions domestiques/industrielles de P_{dis} , l'essentiel des marges de progrès, y compris pour le P_{dis} , concerne les émissions diffuses agricoles.**

L'analyse de la variabilité spatiale des flux ne permet pas de conclure à des flux plus importants à l'est qu'à l'ouest, comme cela a pu être suggéré. Le résultat le plus important du point de vue spatial est celui d'une hétérogénéité croissante des flux lorsque l'on remonte vers les têtes de bassin, les petits bassins amont présentant une exportation très variable, avec la coexistence de bassins fortement et faiblement contributeurs de P_{dis} et P_{tot} . Les flux élevés de P_{dis} et P_{tot} ne concernent pas toujours les mêmes stations : les bassins les plus exportateurs de P_{tot} ne sont pas toujours les bassins les plus exportateurs de P_{dis} . Cette variabilité des flux entre petits bassins versants suggère des facteurs de contrôle spécifiques à cette échelle (zones à forte teneur en P proches du cours d'eau, connectivité hydrologique,...). Elle implique d'orienter les suivis vers les sous bassins versants amont de manière à identifier ces facteurs de contrôle et à orienter l'action vers les plus contributeurs.

Ce travail d'analyse des données existantes a rencontré des limites liées à la basse fréquence des réseaux de mesure existants. Un enjeu est alors d'identifier des méthodes mathématiques permettant d'améliorer l'estimation des flux et des incertitudes, et qui se baserait sur un réseau de suivi financièrement et techniquement réaliste pour les gestionnaires. La hauteur d'eau (et par extension le débit après construction de la loi de tarage) et la turbidité sont des paramètres de plus en plus fréquemment mesurés en continu, qui, combinés à un suivi du P, peuvent permettre ces estimations, avec un coût nettement plus faible qu'un suivi à haute fréquence du P. Les variations de concentration de phosphore sont en effet corrélées avec ces variables enregistrées facilement en continu ; des phénomènes d'hystérèses selon les crues sont systématiquement observables. Mieux prendre en compte ces corrélations et hystérèses permettrait d'améliorer les estimations.

Une étude a été effectuée sur la base de cette hypothèse, à partir des données de P_{tot} et P_{dis} de quatre bassins versants en contexte agricole : deux en Bretagne (Kervidy-Naizin et Moulinet) et deux en Irlande (Timoleague et Ballycanew). Les sites français bénéficient d'un suivi mixte, combinant un suivi régulier à fréquence d'échantillonnage modérée, hebdomadaire, et un suivi intense sub-horaire pour un certain nombre de crues grâce à des préleveurs automatiques asservis aux mesures de hauteur d'eau (ISCO 612), tous les échantillons étant ensuite analysés en laboratoire. Ce type de suivi est appelé « **weekly+** ». Les sites irlandais bénéficient d'un suivi en continu (sub-horaire agrégé au pas de temps horaire) des concentrations en phosphore total et en phosphore réactif total² (TRP) via l'utilisation de préleveurs automatiques situés sur les berges et des mesures automatisées (phosphax) et réalisées sur site. Les dynamiques du P à l'exutoire des bassins versants étudiés sont sensiblement différentes. On relève par exemple que 90 % du flux annuel à Timoleague a lieu en 50 % du temps, contre seulement 25 % du temps à Ballycanew en raison de leur différence de régime hydrologique. Par ailleurs, la part de P_{dis} dans le P_{tot} (ratio des concentrations) est relativement importante sur les bassins irlandais (en moyenne 40 %), très variable entre années sèches/humides, et en moyenne de 60 % à Kervidy-Naizin, mais est très faible au Moulinet (en dessous de 10 % dont 50 % du flux en hors crue).

Un algorithme a été élaboré pour identifier de manière automatique les périodes de crue dans les séries de débit, afin de pouvoir prédire des concentrations ou des flux de P pour des événements hydrologiques où P n'a pas été mesuré lors de ces périodes de crue. Trois modèles empiriques ont été construits : il s'agit de **formules mathématiques** qui **modélisent** les **concentrations de phosphore** à partir du **débit**, de la **turbidité** et de la concentration de P avant et après une crue donnée. Deux des modèles semblent plus performants pour la prédiction de P_{tot} , alors que le dernier semble plus performant pour le P_{dis} . L'incertitude reste grande pour le P_{dis} : les faibles teneurs induisent probablement une incertitude au niveau même de la mesure. Améliorer la mesure du P_{dis} est un préalable et le domaine d'application de cette approche reste donc à établir pour ce paramètre.

En conclusion, il n'y a pas de méthode idéale d'estimation des flux. Celle-ci dépend du paramètre recherché, P_{tot} ou P_{dis} , et de la dynamique hydrologique et hydrochimique du bassin versant. Un suivi hebdomadaire avec une densification des mesures lors des crues (type weekly+) permet d'améliorer significativement la qualité des bilans de flux de P_{tot} . Ces modèles constituent des outils intéressants, autant pour estimer des flux que pour combler des vides dans les données, ou vérifier des données douteuses, ceci d'autant plus que le jeu de données servant à la calibration du modèle est conséquent.

Préconisations pour limiter les transferts de phosphore

1. La surveillance et la gestion des sols dans les têtes de bassin versant

1.1. Une gestion précautionneuse des bandes enherbées, des sols hydromorphes

Eviter que les zones humides ripariennes, les zones drainées, les zones où la nappe interagit avec les horizons organiques du sol, ne deviennent des sources de P_{dis} pour les eaux de surface. Il est possible d'agir à deux niveaux :

- **Eviter l'enrichissement en P, en limitant l'érosion et le ruissellement depuis les parcelles amont.** Les moyens sont connus : aménagement paysager (haies, talus, dispositif enherbés) placés en amont de la zone humide pour intercepter les transferts, mais qui peuvent présenter les mêmes risques, notamment lors des années très humides (remontée de la nappe dans le versant) ; raisonnement du travail du sol pour réduire le tassement et l'érosion (travail dans le sens perpendiculaire à la pente, présence de résidus de culture, intervention sur sol ressuyé...);

² Mesure du phosphore par réaction au molybdate, sans filtration, ce qui le diffère du RP ou phosphore dissous mesuré après filtration.

raisonnement du type de culture et interculture, du système de culture, en privilégiant une bonne couverture des sols pendant toute l'année ; éviter de fertiliser les sols où la teneur en P excède déjà l'optimum pour les cultures ; limiter les transferts « accidentels » en évitant les épandages avant la pluie ou lorsque les sols sont mouillés, enfouissement des épandages ; limiter les apports directs par le pâturage et l'abreuvement des bovins dans les zones humides.

- **Réduire les teneurs en P des sols des zones humides, si elles sont déjà enrichies en P.** Il est possible d'exporter de la biomasse pour exporter du P. Pour réduire le transfert, drainer ces zones semble être une mauvaise solution. Une possibilité, coûteuse, serait d'appliquer des matériaux à forte capacité d'adsorption dans ces zones humides, et des travaux existent aux Pays-Bas pour comparer des matériaux. Cependant d'autres services écosystémiques sont rendus par les zones humides (dénitrification, biodiversité) et la réglementation impose quoiqu'il en soit leur préservation.
- **Acquérir des connaissances sur les relations entre le fonctionnement des zones humides et la mobilisation et le transfert du P_{dis} .** Les résultats de Trans-P montrent une diversité de réponse des zones humides à la production de P_{dis} . Elucider les causes de cette diversité permettrait d'orienter l'action vers les types de zones humides les plus sensibles à cette production.

1.2. Une protection des berges, du corridor du cours d'eau

La gestion du corridor est importante pour limiter les transferts directs. Les berges et les bordures de cours d'eau sont des sources de P_{part} , mais aussi très probablement de P_{dis} dès lors que les particules sont enrichies en P. **Protéger les berges**, comme c'est le cas sur Naizin, est un autre moyen de limiter les transferts de P_{part} et de P_{dis} .

1.3. Amplifier l'acquisition de données de teneur en P des sols et des pratiques agricoles

Deux enjeux de surveillance des sols sont à souligner :

- **Surveiller la teneur en P dans toutes les zones où la nappe interagit avec les horizons organiques du sol (zones hydromorphes, parcelles drainées)**, qui peuvent être enherbées ou cultivées, et donc être source potentielle de P_{dis} pour les raisons déjà évoquées. Ces zones peuvent être des lanières étroites ou au contraire être étendues ; elles ont pu être drainées et cultivées en maïs ou pâturées intensivement, et sont souvent associées à de forts apports de matières organiques, donc de P potentiellement remobilisable.
- **Poursuivre l'acquisition de données sur les sols, notamment de P extractible, en lien avec une connaissance fine des pratiques agricoles**, pour améliorer les modèles de prédiction des teneurs en P extractible des sols. Les modèles développés sont d'assez bonne qualité pour le P_{tot} , mais ils sont de qualité modérée pour le $P_{extract}$ qui dépend plus des pratiques agricoles.

2. La surveillance des eaux

L'objectif est de développer des stratégies d'échantillonnage permettant de « capter » les variations spatiales et temporelles des flux de P, et donc mieux estimer les flux. Des modèles basés sur des relations « concentration en P – débit » ou « concentration en P - concentration en MES » constituent des outils intéressants qui nécessiteraient de :

- **Mettre en place des sites tests qui couplent des échantillonneurs en continu de variables simples à mesurer (débit, turbidité, conductivité électrique,...) et des mesures ponctuelles de la teneur en P** : débit et turbidité sont des paramètres de plus en plus fréquemment mesurés en continu, et qui, combinés à un suivi du P du type weekly+ (hebdomadaire + suivi de quelques crues) représentent un coût plus faible qu'un suivi à haute fréquence du P.
- **Amplifier l'acquisition de données de concentration du P_{dis}** : sur les bassins versants vulnérables à enjeu eau potable ; sur les bassins versants dont les valeurs de concentration en P_{dis} sont élevées, en crues et hors crues ; sur quelques bassins versants comme ceux d'Ecoflux qui ont été très utiles pour séparer apports diffus et ponctuels, estimer l'évolution dans le temps des deux contributions. Une amélioration des modèles empiriques de calcul des flux requiert des sites bien instrumentés.

- **Acquérir des données sur les formes chimiques du P et leur réactivité** : les résultats obtenus sur le bassin versant de Naizin montrent qu'une partie du P dit "dissous" est en fait constitué de P lié à des phases micrométriques à nanométriques de nature minérale ou organique. Ce P dit "colloïdal" n'est pas détecté par les méthodes colorimétriques utilisées pour quantifier le P_{dis} , bien qu'ayant les mêmes propriétés que ce dernier du point de vue de sa mobilité dans les hydrosystèmes. Ce compartiment pourrait être mieux quantifié, notamment dans les bassins versants vulnérables. Une analyse de la biodisponibilité de ces formes vis-à-vis des micro-algues permettrait également de mieux prendre en compte leur rôle dans le processus d'eutrophisation. D'une manière plus générale, les résultats du projet Trans-P montrent la grande diversité chimique des formes du P, diversité qui n'est que très peu ou pas prise en compte dans les suivis actuels, alors qu'elle a probablement des impacts écologiques.
- **Mettre en place des outils et des formations pour le calcul de l'incertitude sur les calculs de flux**, afin d'améliorer les stratégies de surveillance du P.

3. Approches intégrées : pratiques agricoles, sols, interactions sol/nappe

Le développement de modèles agrohydrologiques distribués est encore une activité de recherche. Des modèles et approches statistiques doivent prendre le relai avant de disposer de ces outils de manière opérationnelle. Deux voies sont possibles :

- A l'échelle territoriale, les approches statiques de type « indices phosphore », comme l'approche Territ'eau développé en Bretagne (<https://agro-transfert-bretagne.univ-rennes1.fr/>), sont les plus utiles pour la gestion à l'heure actuelle, même si elles ne permettent pas une évaluation quantitative des flux et des concentrations. Il importe d'améliorer celles implémentées à ce jour, par les connaissances nouvelles acquises : 1) distinguer P_{dis} (zone d'interaction sol nappe) et P_{part} (connectivité des ruissellements potentiels, berges,...); 2) avoir des bilans et une estimation spatialisée des surplus ; 3) acquérir des données relatives aux sols, sur certaines parties du bassin versant.
- A l'échelle régionale, utiliser les approches de modélisation de type Nutting-P et les améliorer par les BDD acquises dans le cadre du projet, liant pratiques agricoles, P des sols et flux. Les liens entre toutes les données acquises n'ont pas encore pu être encore exploités. La collaboration des gestionnaires de l'eau est pour cela importante.

Bibliographie

Rapports et mémoires

- Legeay P.L., 2015. Une analyse de la variabilité spatio-temporelle des flux et des sources du phosphore dans les cours d'eau bretons. Période 1987-2012.104pp.
- Dupas, R., 2015. Identification et modélisation des processus à l'origine des transferts de phosphore dissous dans un bassin versant agricole. Thèse Agrocampus Ouest, 194 pp

Publications scientifiques

- Dupas R., C. Gascuel-Oudou, N. Gilliet, C. Grimaldi, G. Gruau. (2015) Distinct export dynamics for dissolved and particulate phosphorus reveal independent transport mechanisms in an arable headwater catchment. *Hydrological Processes* 29,(14), 3162-3178.
- Dupas R., G. Gruau, S. Gu, G. Humbert, A. Jaffrezic, C. Gascuel-Oudou. (2015) Groundwater control of biogeochemical processes causing phosphorus release from riparian wetlands. *Water Research* 84, 307-314.
- Dupas R., J. Salmon-Monviola, K. Beven, P. Durand, P. Haygarth, M. Hollaway, C. Gascuel-Oudou. (2016) Uncertainty assessment of a dominant-process catchment model of dissolved phosphorus transfer. *Hydrology and Earth System*, in press.
- Matos-Moreira M., B. Lemercier, R. Dupas, D. Michot, V. Viaud, N. Akkal-Corfini, B. Louis, C. Gascuel-Oudou. (2017) High-resolution mapping of soil phosphorus content in agricultural landscapes using readily available or detailed survey data. *European Journal of Soil Science*, In press.
- Minaudo, C., Dupas, R., Gascuel-Oudou, C., Fovet, O., Mellander, P.E., Shore, M., Jordan, P., Moatar, M. Using continuous records of turbidity and discharge to estimate phosphorus exports from small agricultural catchments. Submitted to *Water Resources Research*.
- Gu S., Gruau G., Dupas R., Rumpel C., Bergeret A., Gascuel-Oudou C., Ophélie F., Humbert G. and Petitjean P. Release of dissolved phosphorus from riparian wetlands: evidence for the complex interplay of soil characteristics, groundwater dynamics, and biogeochemical processes. Submitted to *Science of the Total Environment*.