Innovations Agronomiques 17 (2011), 15-32

Le phosphore d'origine agricole : diagnostics et solutions pour limiter les transferts vers le milieu aquatique

Fourrie L.[1], Butler F.[1], Castillon P.[2], Hanocq D.[3], Fougère M.[4], Levasseur P.[5], Gascuel C.[6], Dorioz J.M.[7], Morel C.[8], Raison C.[9], Aubert C.[10]

[1] ACTA, 149 rue de Bercy - 75595 Paris Cedex 12

[2] Arvalis-Institut du végétal, 6 Chemin Cote Vieille - 31450 Baziège

[3] Chambres d'agriculture de Bretagne, Rond Point Maurice Le Lannou CS - 74223 Rennes Cedex

[4] Chambre d'agriculture de Loire-Atlantique, rue P.A. Bobierre La Géraudière - 44 939 Nantes Cedex

[5] IFIP-Institut du porc, BP 3 - 35651 Le Rheu

[6] UMR SAS (INRA Rennes65 rue de Saint Brieuc CS 84215 - 35042 Rennes Cedex

[7] UMR CARRTEL (INRA Thonon les Bains), BP 511 - 74203 Thonon-Les-Bains Cedex

[8] UMR TCEM (INRA Bordeaux), INRA-ENITA - BP 81 - 33883 Villenave d'Ornon cedex

[9] Institut de l'Elevage, BP 85225 - 35652 Le Rheu Cedex

[10] ITAVI, Zoopôle Beaucemaine, BP 37 - 22440 Ploufragan

Correspondance : fabienne.butler@acta.asso.fr

Résumé

Un projet multipartenarial de plus de 3 ans a été conduit sur les «diagnostics et solutions pour limiter les transferts de phosphore agricole vers le milieu aquatique ». Des bilans agronomiques de phosphore ont été calculés au niveau départemental, puis cantonal en Bretagne où les sols continuent de s'enrichir en phosphore. A l'échelle des exploitations d'élevage, deux principaux leviers de réduction des excédents sont pertinents : maîtrise de la fertilisation minérale et amélioration de l'alimentation (en diminuant le phosphore dans la complémentation minérale et en utilisant des phytases). A l'échelle de la parcelle, les données de dispositifs expérimentaux ont montré que (i) les transferts de phosphore par ruissellement et drainage sont augmentés dans les sols enrichis en phosphore et/ou les situations de fertilisation organique, (ii) dans les parcelles drainées, la suppression du labour aggrave les pertes de phosphore par le drainage en préservant les voies de circulation préférentielle de l'eau (galeries de lombrics par exemple). Enfin, la comparaison de deux bassins versants a permis notamment de souligner l'importance de la protection des berges dans la réduction des émissions de phosphore. A ces différents niveaux, des solutions ont été proposées pour réduire les « sources » de phosphore et les « transferts » diffus associés.

Mots-clés : systèmes agricoles intensifs, phosphore dissous, phosphore particulaire, ruissellement, drainage, exploitation d'élevage, parcelle agricole, bassin versant

Abstract: Diagnostics and solutions for limiting the transfer of agricultural phosphorous to water bodies

A joint project was conducted for over three years on the diagnostics and solutions for limiting the transfer of agricultural phosphorous to water bodies. Agronomic phosphorous balances were calculated at the departemental level, and in Brittany where soils keep accumulating phosphorous, at the canton level too. At the livestock farm level, two main means of reducing excess phosphorous were

demonstrated as being relevant: reducing mineral fertilization and improving feeding (particularly by decreasing the amount of phosphorous in mineral complements and providing phytases). At the plot level, data from field stations showed that (i) the transfer of phosphorous by runoff and drainage increased in soils enriched in phosphorous and/or when organic fertilization was applied, (ii) in drained plots, more phosphorous was lost when tillage was suppressed because of the preservation of preferential drainage channels such as worm burrows. Finally, the comparison between two watersheds highlighted the importance of protecting riverbanks for reducing the loss of phosphorous. Solutions were proposed at each level for reducing the sources of phosphorous and associated diffuse transfers.

Keywords: intensive farming systems, dissolved phosphorous, particulate phosphorous, runoff, drainage, livestock farm, plot, watershed

1.Contexte : phosphore et environnement en région d'élevage intensif

La bonne gestion du phosphore est une des clés de la maîtrise des phénomènes d'eutrophisation caractérisés par des déséquilibres biologiques de l'écosystème aquatique (blooms phytoplanctoniques,…) (Aurousseau et al., 2007).

Le phosphore d'origine agricole peut provenir de sources ponctuelles et de sources diffuses. Les transferts vers le réseau hydrographique que ces dernières occasionnent sont associés aux écoulements sur les sols et donc liés aux pluies. La réalisation des programmes successifs de mises aux normes des bâtiments d'élevages a permis de réduire progressivement les rejets d'eaux usées riches en phosphore provenant des sièges d'exploitations (bâtiments, fosses…). Le phosphore provenant des parcelles est mobilisé et véhiculé par différentes voies : par ruissellement et érosion ou par drainage qu'il soit artificiel (drains et fossés agricoles) ou naturel (nappe superficielle) ; les chemins, berges, points d'abreuvement sont aussi des points d'émission potentiels. Le transfert du phosphore mobilise du phosphore soit accumulé au fil du temps (altération et fertilisation), soit provenant des apports les plus récents.

Le phosphore est transféré dans l'eau sous différentes formes dont deux sont habituellement considérées:

- Le phosphore dissous représente la fraction qui passe à travers un filtre de 0,45 µm. Il comprend des formes ioniques (= phosphore « réactif ») et des composés minéraux ou organiques de faible taille qui conduisent à le considérer comme totalement biodisponible par les plantes aquatiques.

- Le phosphore particulaire est présent dans les composés minéraux et organiques véhiculés par l'eau, dont la taille est supérieure à 0,45 µm.

Dans les régions d'élevage intensif, les apports importants d'effluents d'élevages dans les parcelles cultivées ont conduit à accroître, parfois de façon très importante, la disponibilité du phosphore. Dans le nord-ouest de la Bretagne, la teneur des sols a augmenté de 75 à 200 mg P_2O_5 Dyer/kg entre les périodes 1980-1985 et 1990-1995 suite aux apports répétés d'engrais de ferme. En 2006, la teneur moyenne des sols était en Bretagne de 400 mg P_2O_5 Dyer/kg. La nécessité de prendre en considération les risques liés aux transferts de phosphore d'origine diffuse dans les régions d'élevage intensif du Grand-Ouest implique la mise au point d'outils pour les diagnostiquer et la proposition de solutions palliatives cohérentes.

Porter un diagnostic sur une situation constitue la première phase de l'action. Ce diagnostic vise à objectiver et à maîtriser les sources du phosphore et ses modes de transfert.

Les voies pour réduire les « sources » de phosphore sont :

- la limitation de la disponibilité (mobilité) du phosphore dans le sol ;
- la réduction au strict nécessaire des quantités de phosphore, utilisées à l'échelle de l'exploitation et apportées dans les parcelles.

Les voies pour réduire les « transferts » de phosphore sont :

- la mise en œuvre de techniques au sein de la parcelle pour limiter le transfert de phosphore hors de ses limites ;
- la réalisation d'aménagements à l'échelle des bassins versants pour limiter le transfert vers les eaux superficielles.

2. Objectifs du projet

Suite à une première action de recherche pilotée par l'ACTA de 2003 à 2006 et qui a porté sur *« la gestion des déjections animales et la qualité des eaux : transfert du phosphore par ruissellement et drainage hors des parcelles d'épandage – stocks de phosphore et gestion des apports sur l'exploitation* », l'ACTA a conduit un projet financé par le Casdar de 2007 à 2010 avec les partenaires de l'INRA (UMR SAS, CARRTEL et TCEM), des instituts techniques (Arvalis - Institut du végétal, Institut de l'élevage, IFIP-Institut du porc, ITAVI), et des Chambres d'agriculture de Bretagne et de Loire Atlantique. Ce projet s'est intitulé « *Diagnostic du risque de transfert de phosphore des parcelles agricoles vers les cours d'eau en vue de prendre en compte cet élément dans les pratiques agricoles : proposition pour une méthode d'évaluation applicable aux systèmes agricoles intensifs du Grand-Ouest ».*

L'objectif était ici d'acquérir des connaissances sur les bilans de phosphore dans les systèmes agricoles intensifs et sur les transferts de phosphore hors des parcelles agricole afin de proposer non seulement une méthode de diagnostic du risque de transfert excessif de phosphore d'origine agricole vers le réseau hydrographique, mais également des solutions techniques là où elles s'imposent. Pour cela, le projet visait plus précisément à :

1) identifier et évaluer sur le plan environnemental et économique, les solutions envisageables pour réduire les quantités de phosphore apporté dans les parcelles par les effluents d'élevage et stopper l'enrichissement des sols en phosphore, voire en diminuer le niveau de disponibilité ;

2) caractériser quantitativement et qualitativement les flux sortant des parcelles agricoles (grandes cultures et prairies) dans des contextes agro-pédo-climatiques caractéristiques du Grand-Ouest en vue d'évaluer pour des types de sols représentatifs, l'effet de certaines techniques culturales ceci à l'échelle de la parcelle agricole. Le risque vis-à-vis de l'eutrophisation se juge cependant au niveau du bassin versant (exutoire et cours d'eau), échelle intégratrice d'un ensemble de parcelles à laquelle il convenait aussi de quantifier les flux de phosphore (quantitativement et qualitativement) et d'évaluer la part d'origine diffuse (agricole ou autre) ou ponctuelle (agricole ou autre) afin de bien identifier les moyens les mieux appropriés pour réduire les apports aux milieux aquatiques sensibles.

   Il s'agissait enfin de fournir des éléments de synthèse relatifs à la disponibilité d'une source importante de phosphore particulaire, le phosphore particulaire d'origine agricole.

3) intégrer les acquis des travaux dans une démarche de conseil visant à réduire les apports de phosphore dans les parcelles cultivées et les transferts diffus qui leur sont associés, en proposant des solutions palliatives intégrées, cohérentes au niveau environnemental et acceptables au plan économique.

3. Une approche à différentes échelles

Après une première étape d'état des lieux des bilans agronomiques de phosphore, le diagnostic et la recherche de solutions ont été déclinés selon trois échelles :

- l'exploitation d'élevage dans les trois principales filières animales,
- la parcelle agricole (grandes cultures et prairies),
- le bassin versant.

3.1 Méthodologie de caractérisation des bilans de phosphore

Afin de mettre en évidence les dynamiques d'enrichissement ou d'appauvrissement des sols en phosphore en fonction des zones, des bilans (apports –exportations) du phosphore ont été réalisés à l'échelle de la SAU française (à partir de données départementales) ainsi qu'à l'échelle cantonale pour les départements du Grand-Ouest (Gillot, 2007 ; Molé, 2008). La méthodologie s'est basée sur la réalisation de bilan annuel CORPEN (entrées/apports – sorties/exportations) permettant, de manière simplifiée, de déterminer les risques d'excédents en minéraux du sol provenant des activités agricoles. Cela a nécessité un important travail de collecte d'information se caractérisant par l'intégration de données habituellement non prises en compte dans les bilans antérieurs (proportion d'animaux en alimentation biphase, exportation de co-produits…) et de références actualisées (effectifs animaux, nombre de stations de traitement…).

Dans un deuxième temps, cette base de données a été réactualisée et affinée sur l'élément phosphore uniquement et sur les départements français pour les années 2000, 2005 et 2006 afin d'étudier en particulier la part relative de l'aviculture dans les excédents de phosphore.

3.2 Méthodologie d'identification des leviers d'action de réduction des excédents de phosphore à l'échelle des exploitations d'élevage et d'évaluation des solutions

Afin de mettre en évidence les différents leviers d'actions à l'échelle des exploitations d'élevage pour optimiser la gestion du phosphore au sein des exploitations et en particulier limiter l'enrichissement des sols en phosphore, différentes méthodes de travail ont été utilisées selon les filières :

1) En élevage bovin, l'analyse des bases de données réseaux d'élevage de 2000 à 2005, composée d'environ 500 exploitations laitières, a permis de préciser les excédents de phosphore dans les exploitations laitières françaises. En plus des données nécessaires au calcul des bilans de phosphore, cette base de données fournit différents indicateurs technico-économiques utiles pour comprendre le fonctionnement des exploitations et analyser les excédents de phosphore. Une analyse statistique de ces données a permis d'étudier la variabilité des excédents de phosphore et d'identifier les leviers de réduction (Besnard, 2008) ;
2) Pour la filière porcine, les solutions de résorption ont été analysées sur tous les éléments car les leviers d'action tels que le traitement des effluents d'élevage se raisonnent globalement (Lopez, 2008) ;
3) Pour la filière avicole, les leviers d'actions à mettre en œuvre ont été établis à partir d'une étude bibliographique et à partir d'enquêtes auprès des fabricants d'aliments et des professionnels impliqués dans le transfert des déjections avicoles (Molé, 2008).

3.3 Méthodologie de caractérisation quantitative et qualitative des flux transférés hors des parcelles agricoles

A l'échelle de la parcelle agricole, les travaux visaient à étudier les transferts diffus de phosphore d'origine agricole par ruissellement et drainage, dans différents contextes culturaux, différents types de sols (avec des propriétés variables vis-à-vis du phosphore) et des conditions climatiques contrastées. Pour cela, ils ont reposé sur cinq dispositifs expérimentaux, tous situés dans l'Ouest de la France, parfaitement équipés, suivis en continu, avec de l'ancienneté pour la plupart afin de bénéficier d'une gamme large d'accumulation et donc de disponibilité de phosphore dans la couche superficielle du sol :

- Deux sites de Kerguehennec (Morbihan) : un dispositif de grandes parcelles pour l'étude des transferts par ruissellement et drainage dans un contexte de polyculture élevage. Le deuxième dispositif présente un champ d'expérimentation dans lequel sont appliqués tous les ans depuis 1985 les régimes de fertilisation 0, 50 et 100 kg P_2O_5/ha qui ont fortement différencié les niveaux de disponibilité du phosphore du sol. Des études avec simulateur de pluie et récupération des eaux de ruissellement y ont été réalisées afin de mettre en relation les caractéristiques du phosphore dans les sols et les concentrations de phosphore dans les eaux de ruissellement ;
- Le site de la Jaillière (Loire Atlantique) mis en place en 1998 pour l'étude des transferts par ruissellement et drainage dans un contexte de polyculture élevage ;
- Le site de Derval (Loire Atlantique) pour l'étude des transferts par ruissellement sur prairies ;
- Le domaine expérimental de Pierroton (Gironde) : il est équipé de 5 cases lysimétriques suivies depuis 1995 et recevant tous les ans des régimes de fertilisation bien différenciés (de 0 apport à deux fois les exportations par la monoculture de maïs irriguée). Ce dispositif permet de caractériser les pertes de phosphore par drainage en fonction des niveaux d'apport, pour un sol sableux landais à faible pouvoir de fixation du phosphore, soumis à un climat océanique, ce qui constitue un cas extrême par rapport à ce type de pertes.

Pour quantifier les flux de phosphore d'origine agricole à l'échelle du bassin versant et comprendre les mécanismes de transfert, deux bassins versants d'une superficie de 5 km² ont été comparés (Kneveler, 2008 ; Smail, 2009).

Figure 1 : Berges dégradées par une zone d'abreuvement du bétail sur le bassin versant du Moulinet (INRA, UMR SAS)

- le bassin versant du Moulinet, affluent de l'Oir, est situé sur la commune de Ducey (50) en Basse-Normandie où la pluviométrie moyenne annuelle est de 1028 mm. Il est dominé par un bocage important (47 m/ha), des prairies et un élevage semi-intensif mais présente des berges dégradées en relation avec une érosion naturelle et une érosion liée à des abreuvements d'animaux ;
- le bassin versant du Coët-Dan (au lieu-dit Kervidy-Naizin), affluent de l'Evel, est situé sur la commune de Naizin (56) en Bretagne centrale où la pluviométrie moyenne annuelle est de 890 mm. Il est caractérisé par la présence d'élevages hors sol de porcs et de volailles, comporte des cultures et des prairies (linéaire bocage de 27 m/ha), mais le cours d'eau est protégé par une ripisylve (haie en bordure de cours d'eau).

Figure 2 : Ripisylve sur les berges du bassin versant de Kerviny-Naizin. (INRA, UMR SAS)

Ces bassins versants ont fait l'objet de suivis aux exutoires, en crue et hors crue, des matières en suspension (MES), du phosphore total et des orthophosphates (phosphore dissous, sous forme minérale), ceci durant presque trois années. Toutes les sources potentielles de phosphore ont été échantillonnées afin de comprendre les origines du phosphore : lieu d'abreuvement des animaux le long

du cours d'eau, ripisylves, berges (matériau organique et minéral), sédiments, prairies humides ripariennes (longeant un cours d'eau), prairies de versant et cultures.

Ces travaux ont été complétés par une analyse bibliographique sur la biodisponibilité potentielle du phosphore particulaire diffus agricole.

3.4 Démarche de conseil

Le choix a porté sur l'élaboration d'un document de synthèse reprenant les principaux résultats acquis dans le projet et basés sur les trois approches (exploitation d'élevage, parcelle agricole, bassin versant). Ce document est destiné aux acteurs potentiels dans ce domaine (éleveurs ou techniciens). Il a été diffusé lors du séminaire de restitution finale du projet le 8 avril 2010 et est téléchargeable sur le site : www.acta.asso.fr/?d=7466.

4. Résultats obtenus

4.1 Des bilans agronomiques très variables selon les régions

Les régions d'élevage intensif présentaient en 2006 des bilans[1] positifs de phosphore qui ont contribué à enrichir le sol en cet élément (Figure 3). En Bretagne, le bilan de phosphore est deux à trois fois supérieur à la moyenne française. Ce bilan positif a cependant diminué entre 2000 et 2006, du fait de la réduction (i) des apports d'engrais principalement (de 65 kg de P_2O_5/ha à 21 kg entre 1980 et 2005), (ii) des effectifs animaux et (iii) des rejets par animal (alimentation entraînant une diminution de la teneur des déjections). Ce bilan demeure néanmoins toujours positif conduisant inévitablement à l'augmentation de la disponibilité du phosphore dans les sols qui ne sera stoppée que par l'obtention d'un bilan nul (fertilisation organique et minérale = exportation par les cultures). La diminution de la disponibilité du phosphore dans les sols implique des apports inférieurs aux exportations par les cultures.

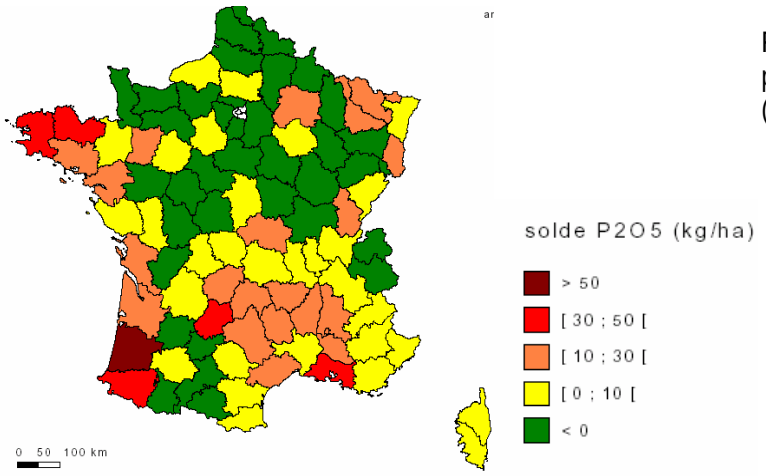

Figure 3 : Solde du bilan de phosphore par département en 2006 (Molé T., 2008)

A noter également que le département des Landes maintient un bilan de phosphore à un niveau élevé du fait des entrées d'engrais minéraux pour la production de maïs.

Cependant, une trentaine de départements en France avait un bilan de phosphore négatif : la fertilisation ne compense pas les exportations par les cultures. Il s'agit majoritairement des zones de

[1] Le bilan agronomique de type CORPEN correspond à la différence entre les entrées totales (minérales et organiques) et les sorties (exportations par les cultures

grandes cultures pour lesquelles les exportations des cultures sont élevées du fait de rendements élevés, et la disponibilité des produits résiduaires organiques est limitée.

Le bilan agronomique de phosphore est un élément déterminant de l'évolution de la disponibilité du phosphore dans les sols, mais il ne présage pas à lui seul des risques de transfert de phosphore des parcelles agricoles vers les eaux. Ceux-ci dépendent aussi des caractéristiques des sols, des pratiques culturales et de l'aménagement de l'espace. Cependant, plus les teneurs en phosphore des sols sont élevées, plus les risques de transfert sont importants.

Les résultats issus de ces travaux à l'échelle départementale et cantonale pour la région du grand Ouest ont permis de fournir des informations sur :

- les efforts de résorption restant à faire, par zone géographique et par élément,
- les zones potentiellement réceptrices d'élément fertilisants, par transfert de produits organiques.

4.2 Alimentation et fertilisation minérale : principaux leviers de réduction des excédents à l'échelle des exploitations d'élevage

Les deux leviers principaux pour la gestion du phosphore à l'échelle de l'exploitation d'élevage sont l'amélioration du poste alimentation et la réduction de la fertilisation minérale. Le phosphore ingéré dans les rations se retrouve dans les déjections produites par les animaux. Cette source de phosphore est ensuite émise sur les parcelles via les restitutions au pâturage et/ou les épandages d'effluents d'élevage pour la fertilisation des cultures et des prairies. Un excès de phosphore sur le poste alimentation implique des restrictions et des risques sur le poste fertilisation mais également un gaspillage de l'élément : raisonner les apports de phosphore au plus près des besoins (des animaux et des cultures) permet de limiter les risques de transfert de phosphore.

4.2.1 Exploitation laitière : un bilan de phosphore de moins de 7 kg P/ha SAU est possible

Le bilan des minéraux[2] est un bon indicateur pour évaluer la gestion du phosphore à l'échelle de l'exploitation laitière. Dans les exploitations qui mettent en place une gestion optimisée du phosphore de façon à limiter le recours aux intrants, les excédents sont modérés avec moins de 7 kg P/ha SAU. Ce niveau constitue un objectif accessible pour les systèmes laitiers du Grand Ouest (Figure 4).

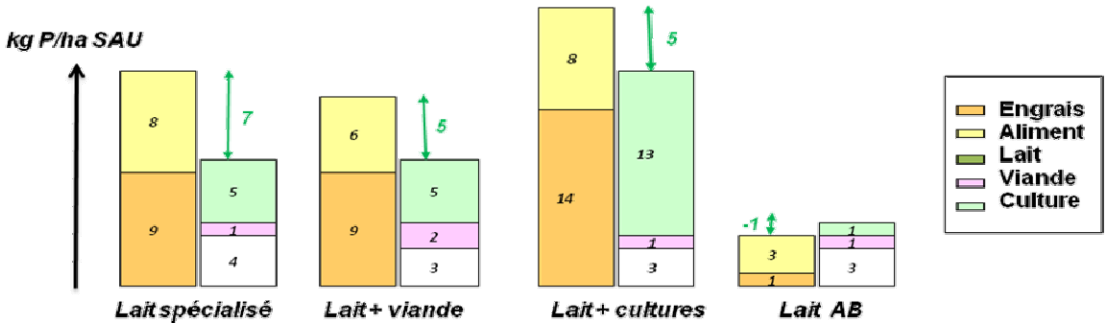

Figure 4 : Bilan de phosphore dans les principaux systèmes laitiers français. Réseaux d'élevage lait 2000 à 2005 - Traitement Institut de l'Elevage

Le bilan est très corrélé aux entrées de phosphore sur l'exploitation et surtout au poste fertilisation : en cela, il est très proche du bilan Corpen [3] réalisé au niveau des sols. En effet, la

[2] Bilan des minéraux : différence entre les entrées (engrais, aliments…) et les sorties par les productions animales et végétales (lait, viande, cultures)

[3] Bilan Corpen : Différence entre les apports d'engrais minéraux et organiques et les exportations par les plantes

fertilisation minérale et les importations de déjections d'élevages de porc et de volaille représentent entre 40 et 80 % du phosphore entrant sur l'exploitation.

Les restitutions au pâturage représentent entre 30 et 60 % des rejets par les animaux. Les déjections produites dans les bâtiments sont épandues prioritairement sur les cultures de printemps et les prairies dédiées à la fauche, puis sur les pâturages. Les règles d'apports sont définies à la fois par des impératifs agronomiques et un ensemble de contraintes de natures diverses (éloignement des parcelles, réglementations…). En effet, si à l'échelle de la SAU, le bilan Corpen apparaît généralement modéré, il peut cacher des disparités entre les parcelles en fonction de leur utilisation et de leur conduite : de 0 kg P/ha/an pour une prairie de fauche recevant 30 m^3 ha^{-1} an^{-1} de lisier de bovin à +15kg P/ha/an pour une monoculture de maïs recevant 25 t ha^{-1} an^{-1} de fumier de bovin et 23 kg P minéral ha^{-1} an (sous forme d'engrais starter).

Concernant le poste alimentation, le phosphore est apporté principalement par les fourrages conservés et de l'herbe pâturée, puis par les aliments concentrés et éventuellement les compléments minéraux. Les pratiques sont actuellement assez bien maîtrisées dans les élevages ce qui permet de limiter la quantité de phosphore se retrouvant dans les fèces. Toutefois, le recours au tourteau de colza doit conduire à accorder une attention particulière au phosphore qui est apporté de façon conséquente par cet aliment et ne requiert donc que peu ou pas de complémentation de phosphore minéral.

4.2.2 Exploitation avicole : leviers « phytases » et « transfert des déjections » à mettre en place en parallèle

60 à 70 % du phosphore ingéré par les volailles se retrouve dans les déjections. L'ajout de phytases dans l'alimentation améliore l'utilisation de la forme phytique du phosphore (naturellement indisponible pour les oiseaux) et permet en conséquence de réduire les quantités de phosphore inorganique ajouté aux aliments. Combinée à une diminution des apports de phosphore minéral, l'utilisation de phytases microbiennes permet de réduire de 20 à 30% les rejets dans les fèces. Les phytases sont couramment utilisées en élevages de gallus, dinde et plus récemment de canard. Leur utilisation devrait se généraliser avec l'utilisation de nouvelles phytases autorisées pour tous les types de volailles.

L'enquête réalisée en 2008 auprès de fabricants d'aliments et de firmes de service a montré que la plupart des aliments pour volailles de chair contiennent nettement moins de phosphore que les aliments pris pour référence par le CORPEN (Tableau 1). On observe ainsi une réduction des rejets de P pouvant atteindre 40% pour les canards, par rapport aux références CORPEN 2006. Ces progrès sont dus à une plus grande utilisation des phytases, à une diminution du phosphore minéral et à l'utilisation de phosphates alimentaires de haute qualité et de digestibilité élevée.

Correspondance catégories CORPEN	Références CORPEN 2006	Résultats de l'enquête 2008	Evolution 2006/2008
	Rejets de P (g/animal)		%
Poulet standard	11	9	-16%
Poulet label	26	24	-7%
Dinde médium standard	104	86	-17%
Dinde lourde standard	168	129	-23%
Canard de barbarie (mixte) standard	47	29	-37%
Pintades standard	23	21	-7%
Poule pondeuse œuf standard	134	134	0%
Poulette standard cage (œufs)	30	30	2%
Dindes futures reproductrices	367	349	-5%

Tableau 1 : Evolution des rejets avicoles de Phosphore

La réduction des effectifs combinée à un moindre rejet par les animaux contribue à diminuer les restitutions de phosphore. Par rapport à la situation passée, la majeure partie des progrès possibles a déjà été réalisée. Des marges de progrès sont cependant encore envisageables. Pour l'ensemble des filières avicoles, une réduction de 5 % (voire 10 %) des rejets par animal semble encore envisageable, sans affecter les performances zootechniques ou économiques des exploitations. Aller plus loin nécessitera obligatoirement des compromis entre les exigences de chacun.

La mise en œuvre simultanée des deux leviers d'actions alimentation et transferts des déjections permettrait de réduire l'apport de phosphore lié à l'aviculture de 1,53 kg P/ha (3,5 kg P2O5/ha) sur l'ensemble de la Bretagne (ce qui représente 1/6 des apports de phosphore « organique »). 63 % de cette réduction seraient liés aux transferts et 37 % à l'alimentation.

Département	Diminution des apports de P d'origine avicole (kg P/ha SAU)		
	Alimentation	Transferts	Alimentation + Transferts
Côtes d'Armor	- 0,52	- 2,66	- 3,18
Finistère	- 0,66	- 0,61	- 1,27
Ille et Vilaine	- 0,26	+ 0,04	- 0,22
Morbihan	- 0,96	- 0,52	- 1,48
Bretagne	- 0,57	- 0,96	- 1,53

Tableau 2 : Possibilités de réduction des apports de phosphore en Bretagne dues aux deux leviers d'action susceptibles d'être mis en œuvre dans les élevages avicoles (Molé T., 2008)

Les leviers d'actions étudiés pourraient donc s'avérer efficaces et intéressants à mettre en œuvre sur les territoires à forte densité d'élevages avicoles. Les solutions de transferts semblent plus appropriées aux élevages de poules pondeuses, dont les fientes séchées sont très demandées par les exploitations de grandes cultures, tandis que les pistes d'amélioration de l'alimentation s'adressent surtout aux élevages de chair, pour lesquelles les réductions des intrants phosphorés sont encore possibles.

4.2.3. Exploitation porcine : la réduction des intrants minéraux en priorité

L'étude a montré qu'en cas d'excédents de phosphore dans les exploitations d'élevage porcin la réduction des intrants minéraux est à mettre en place en priorité, même si elle ne permet d'en résorber qu'une partie (Lopez, 2008). En effet, il paraît essentiel de valoriser prioritairement les engrais organiques localement disponibles puis de les compléter si nécessaire avec des engrais minéraux. D'autres leviers ont été évalués mais se sont avérés plus ou moins intéressants selon les situations :

- l'amélioration de l'efficacité alimentaire (alimentation biphase, multiphase ; utilisation de phytases…) et une meilleure connaissance des besoins des porcs constituent une solution de résorption pertinente à privilégier tant pour son efficacité que pour son coût global par unité d'élément résorbé. Elle est développée et encouragée depuis déjà plusieurs années mais des marges de progrès sont encore possibles ;
- le passage des porcs sur litière n'est pas à envisager prioritairement. Il s'adresse à des cas très particuliers (bâtiment amorti, autoproduction de paille,…) et ne résout que le problème de l'azote : les autres éléments se retrouvent dans les fumiers qu'il faudrait composter et exporter ;
- le gain de surface, lorsque c'est possible, est une technique de résorption pertinente puisqu'elle gère l'ensemble des éléments étudiés ; elle peut s'avérer financièrement intéressante par rapport à des solutions de traitement. Cependant, elle nécessite généralement un supplément de main d'œuvre et la disponibilité de terres proches de son exploitation reste une question d'opportunité ;
- le traitement des lisiers : compte tenu de son coût, il n'est pas à envisager en priorité. De plus, l'exportation des coproduits est en général nécessaire et suppose une bonne organisation

de la filière. Toutefois, lorsque toutes les solutions alternatives ont été exploitées (alimentation, fertilisation minérale, surface épandage…) et que le traitement s'avère nécessaire, il faut choisir le procédé le mieux approprié à l'exploitation, le niveau d'excédent en azote et en phosphore relativement à la taille de l'élevage, constituant souvent le premier critère de décision. La résorption des petits excédents (des petits élevages) est paradoxalement plus problématique que celle des gros excédents (des gros élevages). Il est aussi préférable de mutualiser les coûts via des unités partagées, qui peuvent être fixes ou mobiles ;

- Enfin, la **réduction des effectifs d'animaux** sur le site par le travail « à façon » peut également s'envisager selon les opportunités et les coûts de traitement. En dernier recours, la diminution du cheptel est à conseiller à des éleveurs en fin d'activité et dont l'exploitation n'est plus rentable.

4.3 Effets des techniques culturales sur les transferts de phosphore

L'eau qui circule à la surface du sol ou dans sa matrice peut entraîner par ruissellement, drainage ou écoulement latéral de sub-surface, du phosphore présent dans la solution et en équilibre avec les constituants solides ainsi que du phosphore associé à des particules. Ces transferts dépendent de certaines des caractéristiques du sol et des pratiques culturales mises en œuvre. Les pratiques agissant sur la source de phosphore susceptible d'être transféré (disponibilité du P dans le sol, modalités de fertilisation phosphatée, couvert végétal) et sur les éléments qui déterminent son transport (ruissellement, érosion, drainage, connectivité au plan d'eau) peuvent influencer le transfert de phosphore vers le réseau hydrographique.

4.3.1 Rôle de la disponibilité du phosphore dans le sol

La concentration en phosphore des eaux de ruissellement ou de drainage dépend de la disponibilité du phosphore dans le sol. Lorsque celle-ci est faible ou modérée sa variation influe peu sur la concentration de phosphore dans les eaux, par contre au-dessus d'un seuil critique dont la valeur varie d'un type de sol à l'autre, **l'accroissement de la mobilité du P dans le sol engendre une forte augmentation de la teneur en P des eaux**, beaucoup **plus marquée pour le P dissous que pour le P particulaire** qui dépend avant tout de l'importance de l'érosion.

Dans l'étude sur cases lysimétriques conduite de 1996 à 2008 par l'INRA de Bordeaux sur un sol sableux avec monoculture de maïs, la concentration moyenne de phosphore « réactif », c'est-à-dire celui sous forme ionique dans les eaux de drainage, a été influencée par les régimes de fertilisation alors que la concentration de phosphore particulaire l'a été très peu (Tableau 3).

Fertilisation P kg P ha^{-1} an^{-1} (kg P_2O_5 ha^{-1} an^{-1})	Bilan F-E 1996-2008 (kg P ha^{-1})	Concentration (mg PL^{-1}) de P dissous dans la solution de sol de la couche 0-30 cm en 2008	Concentration moyenne de P dans les eaux de drainage (mg P L^{-1}) en 2008			Quantité de P total drainé en 2008 (kg P ha^{-1})
			P total	%P réactif	%P particulaire	
0	-129	0.11	0.046	49	51	0.35
27 (62)	-0.4	0.18	0.034	52	48	0.27
38 (87)	+ 62	0.35	0.045	50	50	0.27
49 (112)	+ 210	1.23	0.071	75	25	0.42
70 (160)	+ 478	1.52	0.082	62	38	0.50

Tableau 3 : Effet des régimes de fertilisation pratiqués de 1996 à 2008 sur les concentrations et flux de phosphore drainé dans les cases lysimétriques de l'INRA de Bordeaux à Pierroton (33).

L'étude avec simulateur de pluie réalisée à la station de Kerguehennec à Bignan (56) a montré l'absence de relation entre la teneur en P Olsen de différents sols du Morbihan et la teneur en phosphore total des eaux de ruissellement. Par contre, les concentrations de P dissous se sont avérées étroitement liées à la teneur en P Olsen du sol (Figure 5).

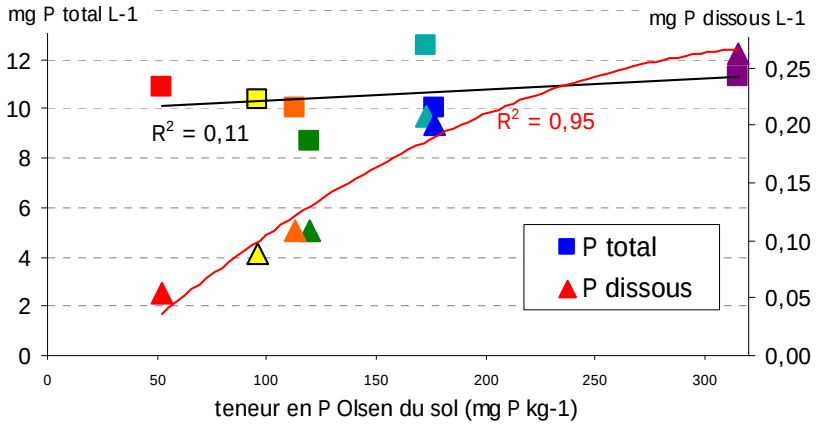

Figure 5 : Relation entre la teneur en phosphore Olsen de 5 sols du Morbihan et les teneurs moyennes en P total et P dissous des 15 premiers mm de ruissellement.

⇨ Pour éviter les concentrations élevées de P dissous dans les eaux de ruissellement il est donc souhaitable de limiter, dans la mesure du possible, l'enrichissement des sols en phosphore disponible. Il est conseillé de n'apporter du phosphore dans les parcelles présentant des risques de transfert vers les milieux aquatiques que si l'apport est nécessaire pour conférer aux plantes un état de nutrition non limitant pour la production.

4.3.2 Rôle de la fertilisation phosphatée et du type de produit sur les transferts de phosphore par le ruissellement et le drainage

Au-delà des effets qu'ils engendrent par le biais des modifications à plus ou moins long terme de la mobilité du phosphore dans le sol, les apports de fertilisants phosphatés peuvent influencer de manière directe les transferts de phosphore hors des parcelles agricoles. Des transferts « occasionnels », peu fréquents mais parfois très importants, peuvent se produire du fait de la conjonction d'un apport et de pluies provoquant ruissellement et/ou drainage qui surviennent peu de temps après. Directement imputables à la réalisation d'un apport d'engrais minéral phosphaté ou d'un produit résiduaire organique, ces transferts peuvent à long terme représenter une part importante du phosphore véhiculé par les eaux de drainage et de ruissellement.

Dans les parcelles du dispositif expérimental de Kerguehennec (56) les apports de lisier de porc en 2007 et de fumier de volaille en 2009 ont engendré une augmentation importante des concentrations de phosphore dissous dans les eaux des ruissellements survenus peu après les apports (Figure 6). Les eaux de drainage ont par contre été peu influencées par ces apports.

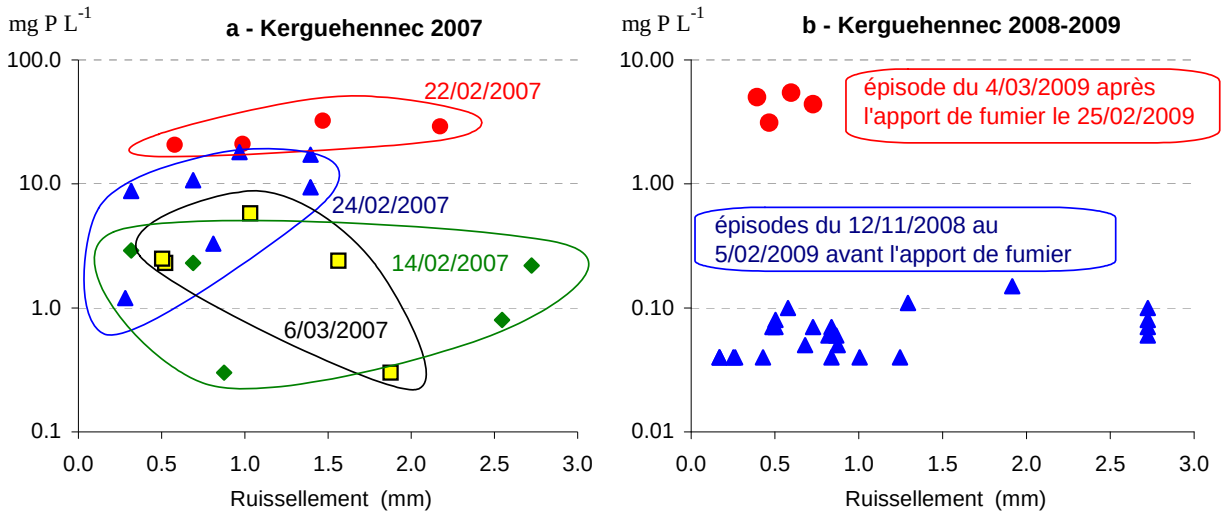

Figure 6 : Evolution des teneurs en P dissous des eaux de ruissellement après apports de lisier de porcs le 19 février 2007 et de fumier de volaille le 25 février 2009 dans les parcelles du dispositif expérimental de Kerguéhennec (56)

Toutefois, les apports n'engendrent pas systématiquement un accroissement des concentrations de phosphore dans les eaux qui circulent et par voie de conséquence des flux qu'elles véhiculent. Ainsi, les mesures réalisées dans une prairie temporaire à Derval (44) n'ont pas mis en évidence d'effet des apports de fumier ou de lisier de bovins sur les concentrations et flux de phosphore transféré par le ruissellement au cours des rares épisodes d'écoulement observés. Les pertes mesurées ont été très faibles, de l'ordre de quelques dizaines de grammes par hectare chaque année. Qu'il s'agisse du témoin ou des parcelles recevant les effluents d'élevage le phosphore véhiculé était en très grande partie sous forme dissoute.

	2007 - 2008	2008 – 2009	2009 - 2010
Témoin	31,0	15,4	30,0
Fumier de bovin	48,0	14,3	22,8
Lisier de bovin	27,8	13,3	49,3

Tableau 4 : Pertes de phosphore total (en g P/ha) dues au ruissellement sur prairie en automne et hiver, au cours des trois campagnes de mesures à la station expérimentale de Derval (44)

Dans le dispositif expérimental de La Jaillière (44) la concentration moyenne annuelle de phosphore dissous dans les eaux de drainage s'est avérée 9 années sur 10 plus élevée dans la parcelle recevant du fumier de bovin que dans son homologue n'ayant reçu que des apports d'engrais minéraux (Figure 7). Des apports de P plus importants dans les parcelles recevant du fumier, mais peut-être aussi la nature de l'apport dont une part du P est présente sous forme organique, expliquent ces différences.

Les apports de fertilisants phosphatés contribuent de manière spécifique aux transferts de P dans les eaux de ruissellement et de drainage, d'autant plus que les épisodes pluvieux responsables des écoulements surviennent tôt après les apports. Outre les quantités de phosphore mises en jeu par les apports de produits résiduaires organiques, il semblerait que la nature du phosphore qu'ils contiennent tende à accroître les concentrations dans les eaux par rapport à la fertilisation uniquement à base d'engrais minéraux.

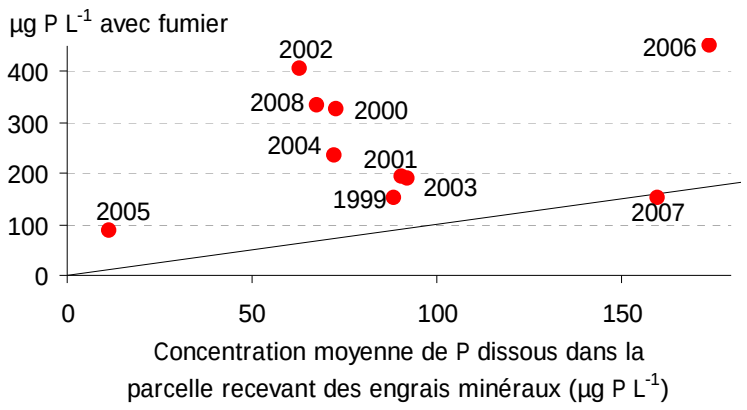

Figure 7 : Comparaison des concentrations moyennes annuelles de P dissous mesurées pendant 10 ans dans deux parcelles du dispositif expérimental de La Jaillière, l'une recevant uniquement des engrais minéraux (abscisse) l'autre recevant du fumier (ordonnée), mais homologues par ailleurs.

⇨ Il est alors fortement conseillé d'incorporer dans le sol le phosphore apporté par les engrais organiques et minéraux avant que ne surviennent les premières pluies susceptibles d'engendrer du ruissellement ou du drainage.

4.3.3 Rôle du travail du sol

Dans les parcelles dont la pente et la nature du sol les prédisposent à l'érosion, les techniques culturales sans labour contribuent à réduire, le plus souvent et très fortement, les transferts de phosphore total par le ruissellement, et assez souvent les transferts de P dissous. Toutefois, pour celui-ci l'effet peut être inversé en raison de l'absence d'incorporation des engrais dans le sol et de la forte augmentation de la disponibilité du phosphore dans la couche superficielle qui interagit avec le ruissellement.

Dans les **sols hydromorphes drainés**, le drainage se substitue au ruissellement pour évacuer l'eau en excès mais aussi le phosphore qu'elle véhicule. Les travaux dédiés au transfert du phosphore par les eaux de drainage ont montré de façon quasi unanime que **le labour permettait** dans ce cas **de réduire assez fortement la concentration et la quantité de P dissous transféré dans les eaux de drainage par rapport aux techniques sans labour**. Dix années de comparaison à La Jaillière (44) entre parcelles labourées ou non mais homologues par ailleurs, ont confirmé ces observations (Figure 8). En effet, la création d'un réseau continu de macropores, par l'intermédiaire duquel s'opère l'essentiel du transfert de phosphore vers les drains, et dont la continuité dans le temps et dans l'espace est préservée par la suppression du labour en serait la cause principale (Breil, 2009).

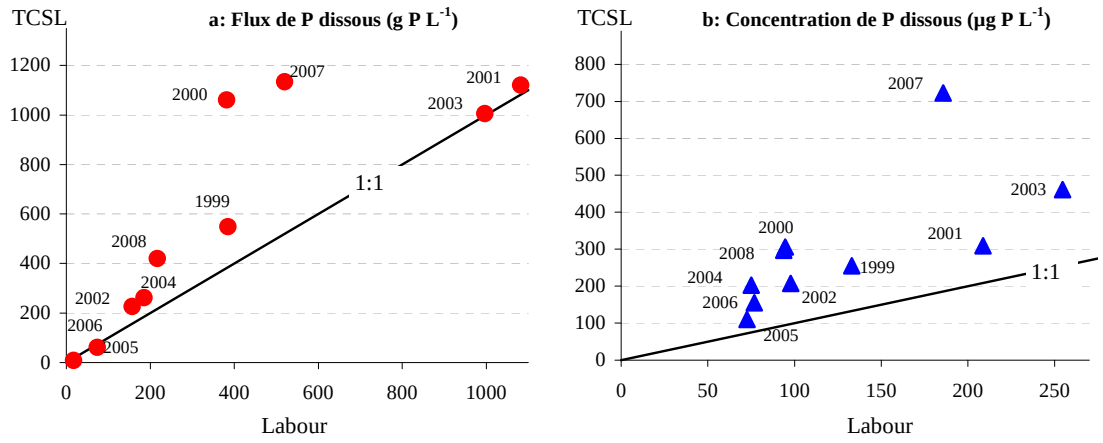

Figure 8 : Comparaison pendant 10 ans des flux annuels de P dissous (g P L-1) (a) et des concentrations moyennes annuelles de P dissous (µg P L-1) (b), entre deux parcelles homologues du dispositif de La Jaillière (44) différant uniquement par le régime de travail du sol : Labour vs Techniques culturales sans Labour (TCSL)

- ⇨ Dans les parcelles drainées, le labour permet de rompre la continuité des macropores, voies de circulation préférentielle de l'eau vers les drains et de réduire les transferts de phosphore dissous par les eaux de drainage : il s'avère par conséquent une des techniques les plus efficaces pour limiter les transferts de phosphore dans les bassins versants où la contribution de l'agriculture est jugée excessive.

4.4 Le diagnostic et la maîtrise des émissions de phosphore et de ses impacts à l'échelle du bassin versant et de l'écosystème aquatique

Le phosphore ne peut se rendre de la parcelle au récepteur sensible (lac, étang, cours d'eau) sans un vecteur, l'eau. Les chemins empruntés et les mécanismes de transfert sont spécifiques du phosphore.

Du fait de sa forte affinité pour certains constituants de la phase solide, le phosphore apporté par l'agriculture est préférentiellement retenu à la surface et dans l'horizon travaillé du sol. Dès lors, les principales zones à risque pour le transfert de phosphore sont les zones où le ruissellement, écoulement en forte interaction avec la surface du sol, pourra rejoindre, sans barrière ce récepteur sensible. Le ruissellement peut aussi provoquer de l'érosion et mobiliser des particules riches en phosphore issues de la surface du sol.

L'arrivée de phosphore dans la rivière se fait aussi hors période de crue, c'est-à-dire en dehors des épisodes de ruissellement et d'érosion. Le phosphore peut alors provenir : 1) du bassin versant, par les nappes ; 2) de la rivière elle-même, par la re-mobilisation du phosphore fixé sur les sédiments du cours d'eau. Ces deux phénomènes, considérés comme méconnus et mal quantifiés, ont fait l'objet de travaux spécifiques.

4.4.1 La « biodisponibilité » du phosphore des sédiments et suspensions et les impacts sur les récepteurs sensibles

La biodisponibilité représente la capacité d'un échantillon à fournir, à partir de son P-total, un flux d'ions phosphates à un organisme pour sa croissance. Il s'agit d'une propriété régie par des échanges entre phase solide et biologique, en général via la phase liquide, et s'établissant dans un contexte dynamique (croissance, flux).

La biodisponibilité est très variable à la fois selon la nature et l'origine de la phase solide à laquelle les ions orthophosphates sont associés (Dorioz et al., 1998). En particulier, les formes labiles du P sont des associations Phosphates/support ayant des liaisons faibles et dont le PO_4 est en conséquence facilement mobilisable.

4.4.2 Diversité spatiale et temporelle au sein du même bassin versant

Plusieurs études montrent que la biodisponibilité du phosphore n'est constante ni dans les sédiments d'un lac, ni dans les particules solides à l'exutoire d'un bassin versant, ni même dans les sédiments et les berges au sein d'un réseau hydrographique, tant au niveau temporel que spatial (CIPEL, 1988; Dorioz et al., 1998).

A l'exutoire des bassins, la variabilité s'inscrit sur des pas de temps courts et reflète la diversité des sources du bassin versant. La Figure 8 schématise l'évolution de la charge et de la biodisponibilité du P-particulaire dans un système bassin versant / lac typique. Les valeurs indiquées résultent d'une synthèse de plusieurs études principalement effectuées sur le bassin versant lémanique (Williams et al., 1980 ; Dorioz et al., 1998 ; CIPEL 1988 ; Feuillade et al., 1992). Les berges et les zones naturelles fournissent des matières solides dont la charge de P est faible et peu biodisponible ('A' dans la Figure). Les sources agricoles présentent des caractéristiques différentes avec des teneurs et des biodisponibilités nettement supérieures aux précédentes ('B' dans la Figure). Lors des crues, ces produits d'érosion, quelle que soit leur origine, se déposent dans le lit des rivières. Ils deviennent alors des pièges à phosphates qui se chargent en P pendant les périodes d'étiage et dans les portions de

réseau pollué par les eaux usées ('C' dans la Figure). La spéciation de ce P-particulaire en est affectée et sa biodisponibilité s'accroît largement ('D' dans la Figure). Les sédiments situés au voisinage des rejets de stations d'épuration (STEP, 'D' dans la Figure) constituent un cas extrême d'enrichissement en P-biodisponible de la phase solide. Globalement, la biodisponibilité augmente donc de la tête de bassin à l'exutoire. Dans le lac, le phosphore particulaire est partiellement consommé par les algues et microorganismes ce qui se traduit par une baisse de teneur ('E' dans la Figure). Au fond du lac, les activités bactériologiques et la désoxygénation peuvent permettre une libération d'une autre partie du phosphore des sédiments (P-Fe).

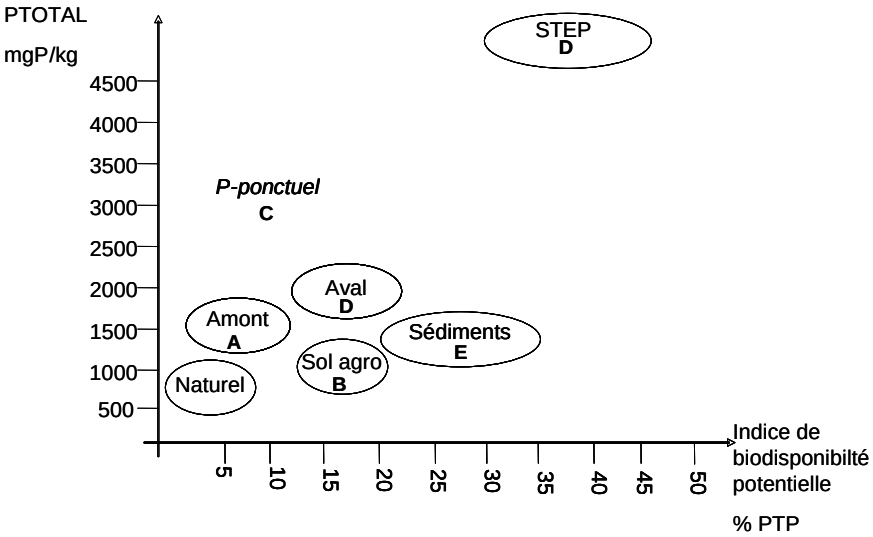

Figure 9 : Evolution de la concentration et de la biodisponibilité potentielle de P dans un système BV/lac. Les teneurs en P total et la biodisponibilité du P ont été mesurées sur des échantillons de sédiments et de sols (fraction < 50 µm) d'un cours d'eau avec un amont naturel et agricole (polyculture élevage) et un aval rural et urbanisé avec des rejets d'eaux usés.

4.4.3 Biodisponibilité dans le milieu aquatique

Il ne suffit pas de connaître la biodisponibilité du P-particulaire pour en déterminer l'impact des apports sur l'état trophique d'un lac. Plusieurs autres paramètres sont à considérer comme par exemple la période de l'apport. Un apport hivernal, même très chargé de P-particulaire biodisponible, affecte peu, ou pas, immédiatement l'état trophique du fait d'une activité biologique faible. Inversement en été, quand le phosphore en solution tend à s'épuiser, les apports de phosphore particulaire sont en général utilisés au maximum (Pourriot et Meybeck, 1995 ; Lazzarotto, 2007). La concentration de phosphore dans le milieu récepteur joue aussi un rôle important : d'une manière générale une particule libère d'autant plus d'ions orthophosphates dans un milieu aquatique que celui-ci en est pauvre et inversement en piège d'autant plus qu'il en est riche (pouvoir fixateur).

D'autres effets se manifestent à long terme. Le P-particulaire sédimenté est à l'origine de la charge interne, flux qui résulte de la diffusion d'ions orthophosphates provenant de la minéralisation de la matière organique ou relargués par la phase solide minérale. La relarguage de la charge interne s'accroît lors de phase de re-suspension en zone peu profonde, et en profondeur quand s'établissent des conditions anaérobies à l'interface eau-sédiments.

4.4.4 Bilans comparatifs des émissions de phosphore de deux bassins versants

Les résultats de bilans comparatifs des émissions de phosphore des bassins versants du Moulinet (Normandie) et de Coët-Dan (Morbihan) sont présentés dans le Tableau 5.

Flux par hectare de particules solides et de phosphore, année hydrologique 2007-2008	*Bassin Versant du Moulinet (Basse Normandie)*		*Bassin Versant de Kerviny-Naizin (Bretagne)*	
	Hors crue	Crue	Hors crue	Crue
Flux d'eau (m^3 / ha) Crues exceptionnelles Mai	2900	1673 327	1624	1456 383
Particules solides (kg /ha) Crues exceptionnelles Mai	182	893 680	23	82 51
Phosphore Particulaire (g /ha) Crues exceptionnelles Mai	245	404 173	41	144 89
Phosphore dissous (g/ha) Crues exceptionnelles Mai	48	37 12	36	51 21
Ratio P dissous / P Particulaire (%)	16	8	46	28

Tableau 5 : Flux par ha des matières en suspension (particules solides) et des deux formes de P pour deux ruisseaux lors de crues et hors crues, au cours de l'année hydrologique 2007-2008 (INRA, UMR SAS, Rennes)

Il faut au préalable souligner (i) qu'il n'existe pas de relation simple entre pluviométrie, flux hydrique et flux de MES (matières en suspension), (ii) le caractère exceptionnel des crues du mois de mai ayant provoqué une forte érosion des versants. Les flux de MES sont très différents sur les deux bassins versants :

- L'érosion est plus forte pour le bassin du Moulinet ce qui entraine des flux importants de phosphore particulaire. Ce flux est lié à la charge importante en particules solides, elle-même due à la dégradation des berges par le bétail. Cette dégradation produit un stock important de particules mobilisées même à faible débit (hors crue). Les particules solides des berges sont cependant relativement peu chargées en phosphore particulaire et le phosphore dissous est en faible teneur dans le cours d'eau, du fait d'une agriculture semi intensive, à bas niveau d'intrant.
- Pour le bassin versant de Kervidy-Naizin, l'érosion exprimée par le flux de particules solides est plus faible car les bords du ruisseau sont protégés par une ripisylve, c'est-à-dire une berge et des bords de cours d'eau bien végétalisé. Les particules solides proviennent alors essentiellement de l'érosion des sols des versants. Malgré des flux hydriques plus faibles, le flux de phosphore dissous est voisin de celui du bassin versant du Moulinet à cause de la forte teneur en phosphore des sols et des berges. Les teneurs plus élevées en P particulaire des particules solides et les apports importants de P dissous surtout en crue témoignent du niveau d'intrants plus élevé sur ce bassin.

La comparaison de ces bassins versants met en évidence deux cas de figures : d'une part un bassin versant qui exporte de fortes quantités de phosphore total, liées à une érosion intense des berges et zones d'abreuvement pourtant peu concentrées en phosphore, d'autre part un bassin à faible émission de phosphore, mais dont la part du phosphore dissous est bien supérieure.

Pour gérer les émissions à l'échelle du territoire, la démarche Territ'Eau, permet de replacer les aménagements favorables à la réduction de transfert de phosphore (haies, talus, dispositifs enherbés, entretien des berges, enherbement des fossés…) dans une approche globale de diagnostic pour aller vers des solutions plus globales.

Conclusion et perspectives

Tous les leviers disponibles aux différentes échelles de gestion (parcelle, exploitation et bassin versant) sont donc à prendre en compte dans l'objectif de réduire les sources de phosphore et les risques de transfert dans le réseau hydrographique : une vision à large spectre à l'échelle du territoire permet de

mettre en place une approche intégrative des différents leviers d'amélioration, et donc d'optimiser la démarche.

Les travaux de recherche se poursuivent ou sont envisagés notamment sur la modélisation des flux de phosphore à l'échelle des bassins versants mais également sur des questions d'approfondissement : (i) quels sont les indicateurs de sensibilité du phosphore les plus pertinents, comme ceux qui permettraient de connaître le risque pris lors d'un épandage de fertilisant sur telle ou telle parcelle ? (i) quel est l'impact sur les transferts de phosphore par ruissellement du non labour associé à des apports fréquents d'effluents d'élevage? En effet, comment la concentration de la matière organique et du phosphore dans les premiers cm de sol évolue-t-elle et qu'en est-il du risque accru de relargage de phosphore soluble ?

Enfin, la part de responsabilité de l'agriculture notamment bretonne dans les rejets de phosphore n'a pu être établie à l'échelle du bassin versant. Pour cela, une analyse globale du cycle du phosphore serait nécessaire à l'échelle de la Bretagne ou d'une échelle intermédiaire (supérieure au BV agricole) intégrant toutes les sources possibles (agriculture, villes, industries) et qui resitue les parts à la fois du diffus/ponctuel et de l'urbain/agricole ; l'échelle intermédiaire entre le BV agricole et la Bretagne serait peut-être plus pertinente car elle permettrait à tous les acteurs de travailler ensemble à la fois sur un diagnostic et sur des solutions de remédiation à l'échelle du territoire, dans une perspective également socio-économique. Il faudrait pour cela que l'assainissement soit bien connu dans ces bassins. Une autre approche serait de suivre un réseau de sous-bassins versants strictement agricoles (10-15), sans habitation, avec le moins de doute possible sur le ponctuel afin de bien cadrer les flux de phosphore diffus agricole. Une bibliographie internationale pourrait aussi apporter des éléments de réponse à cette question.

Pour en savoir plus :

Actes du séminaire de restitution des résultats du projet sur le thème « Le Phosphore d'origine agricole : diagnostics et solutions pour limiter les transferts vers le milieu aquatique » du 8 avril 2010 téléchargeables sur le site de l'ACTA : www.acta.asso.fr/?d=7466

Territ'eau : http://agro-transfert-bretagne.univ-rennes1.fr/Territ_eau/

« A Pierre Castillon qui restera dans nos mémoires pour ses travaux sur le phosphore et ses grandes qualités professionnelles et humaines »

Références bibliographiques

Aurousseau P., Dorioz J.M., Bourrié G., 2007. Le phosphore dans l'environnement : bilan des connaissances sur les impacts, les transferts et la gestion environnementale, édition Institut océanographique février 2009. OCEANIS vol 33 – 1/2.

Besnard N., 2008. Bilan et flux de phosphore dans les exploitations laitières. Mémoire ENSA Rennes, 113 p.

Breil M., 2009. Effet de certaines techniques culturales sur les transferts de phosphore vers le réseau hydrographique par drainage et ruissellement. Mémoire ENSA Toulouse, 107 p.

CIPEL, 1988. Rapport de l'étude des pollutions d'origine diffus dans le bassin lémanique. Commission internationale pour la protection des eaux du Léman – ISBN 92-9087-001-X, 119 p.

Dorioz J.M., Aurousseau P., Bourrié G., 2007. Le Phosphore dans l'environnement. Bilan des connaissances sur les impacts, les transferts et la gestion environnementale. OCEANIS, 33/1-2.

Dorioz J.M., Trévisan D., 2008. Le transfert diffus du phosphore dans les bassins versants agricoles : ordres de grandeur, mécanismes, maîtrise. Ingénieries. N° spécial, 27- 47.

Dorioz J.M., Pelletier J.P., Benoit P., 1998. Propriétés physico-chimiques et biodisponibilité potentielle du phosphore particulaire selon l'origine des sédiments dans un bassin versant du Lac Léman. Water Research 32, 275-286.

Dorioz J.M., Behal T., 2010. Analyse bibliographique : la disponibilité potentielle du phosphore particulaire, 13 p

Feuillade M., Dorioz J.M., 1992. Enzymatic release of phosphate in sediments of various origins. Wat Res 26, 1195 – 1201.

Gendre S., 2007. Application d'indices de risque de perte de phosphore aux conditions de l'ouest de la France. Mémoire ENITA de Clermont Ferrand, 100 p.

Gillot E., 2007. Bilan de l'azote, du phosphore et du potassium à différentes échelles territoriales. Mémoire ENESAD, 95 p.

Kenveler M., 2008. Dynamique du phosphore sur des bassins versants en région d'élevage : relation avec les matières en suspension et le débit. Mémoire de Master, UMR SAS, Université de Rennes 1 et Agrocampus Ouest, 23 p.

Lazzarotto J., Dominik J., Dorioz J.M., 2007. Spéciation et biodisponibilité du phosphore particulaire dans les sédiments et les matières en suspensions des eaux de surface. OCEANIS 33, 147-163.

Lazzarotto J., 2007. Evolution physico-chimique du Léman de 1957 à nos jours. Arch. Sci. 58, 175-182.

Lemercier B., Walter C., Arrouays D., Aurousseau P., Follain S., Michaud A., P.A.Saby N., Sarr J.B., Schvartz C., Vertès F., 2007. Stockage de phosphore dans les sols : surveillance et diagnostic aux échelles nationale et régionale- OCEANIS 33-1/2, 103-122.

Lopez E., 2008. Evaluation économique des solutions de résorption de l'azote, du phosphore, du potassium, du cuivre et du zinc pour la filière porcine. Mémoire ENSA Rennes, 43 p.

Molé T., 2008. Bilans du phosphore sur les territoires et propositions de leviers d'action pour la filière avicole. Mémoire ENESAD.

Mole T., Aubert C., 2009, Leviers d'action potentiels pour réduire la pression en phosphore organique dans la filière avicole. TeMA 9, 4-12

Morel C., Niollet S., Vives A., 2010, Rapport technique final de l'UMR TCEM Pertes de phosphore par drainage dans un podzol cultivé sous monoculture de maïs irrigué en fonction de la fertilisation phosphatée, 60p.

Pourriot R., Meybeck M., 1995. Limnologie Générale. Collection Ecologie. Vol. 25 Paris: Masson, 956 p.

Repussard C., 2008. Essai d'adaptation pour l'Ouest de la France d'outils d'évaluation du risque de transfert de phosphore des parcelles agricoles vers le réseau hydrographique. Mémoire ENITA de Clermont Ferrand, 46 p.

Smail N., 2009. Bilan des flux de phosphore sur des bassins versants en région d'élevage et perspectives de modélisation. Mémoire de Master, UMR SAS, Université de Rennes 1 et Agrocampus Ouest, 23 p.

Williams J.D.H., Mayer T., Nriagu J.O., 1980. Extractability of phosphorus from phosphate minerals common in soils and sediments. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 44, 462- 465.