

B

Rôle, formes et transferts d'éléments intervenant dans la qualité des eaux

PHOSPHORE

- Fiche B-4 Rôle et sources du phosphore
- Fiche B-5 Les formes et comportements du phosphore
- Fiche B-6 Les modes de transfert du phosphore du sol vers le réseau hydrographique
- Fiche B-7 Les facteurs de risque de transfert du phosphore dans les bassins versants

AZOTE

Voir Fiches B-1 à B-3

MATIERE ORGANIQUE

Voir Fiches B-8 à B-10

Voir également les autres fiches disponibles sur les thèmes suivants :

A

Processus hydrologiques dans les bassins versants

C

Temps de réponse des bassins versants

D

Les mécanismes de perturbation littorale liés aux apports terrestres de nutriments

E

Indicateurs pour la représentation des données de suivi et leur méthode de calcul

F

Clés de lecture ou d'interprétation des chroniques de suivi de la qualité des eaux

G

Protocoles de suivi de la qualité de l'eau dans les bassins versants

H

Impacts de la gestion de l'interculture sur la qualité de l'eau

I

Le phosphore dans le sol

J

Rôle des éléments du paysage dans le bassin versant

Glossaire

ROLE ET SOURCES DU PHOSPHORE

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Le phosphore est un des constituants essentiels du milieu vivant. **Le phosphore intervient dans la qualité et la précocité de la production végétale.**
- Le phosphore n'a pas de phase gazeuse : il reste et s'accumule dans l'écosystème terrestre.
- De part ses caractéristiques très particulières, la gestion du phosphore et ses conséquences environnementales doivent être distinguées de celles de l'azote.
- Aujourd'hui en Bretagne, **les rejets de phosphore dans le milieu aquatique sont principalement d'origine agricole, essentiellement due à l'activité d'élevage** : l'augmentation des importations d'aliments du bétail ayant fait augmenter les entrées de phosphore plus vite que la réduction des engrais minéraux ne les a fait diminuer.
- Les transferts de phosphore d'origine agricole sont insuffisamment connus alors qu'ils représentent un problème croissant pour l'environnement (eutrophisation des eaux douces).
- **Ces transferts ont un caractère principalement diffus**, ce qui rend la maîtrise des pollutions phosphatées d'origine agricole difficile.

LE ROLE DU PHOSPHORE

Le phosphore (P) est le 11^{ème} élément le plus abondant sur Terre. Il est indispensable car il entre dans la composition de toutes les cellules des organismes vivants.

- **Chez les organismes vivants**, le matériel génétique est constitué par les acides nucléiques (ADN et ARN) qui contiennent du phosphore. Cet élément est également impliqué dans **les processus énergétiques** (formation et dégradation du glycogène des muscles, synthèse des protéines). Les dents et les os en contiennent beaucoup sous forme de phosphate de calcium. Le phosphore est également impliqué dans la **régulation d'équilibres biologiques internes** : une insuffisance de cet élément dans l'alimentation animale peut conduire à des troubles graves tels que l'infécondité ou une moindre résistance à certaines maladies.
- **Chez les plantes**, le phosphore intervient en tant qu'**élément nutritif indispensable** à un grand nombre de processus biochimiques (respiration, photosynthèse). Le phosphore favorise le développement des racines et l'accroissement de la masse des racinelles, permettant une alimentation suffisante et une **croissance rapide**, donc un développement précoce des plantes. Le phosphore joue aussi un rôle sur la **résistance** des tissus végétaux. A la différence de l'azote qui intervient dans la production de biomasse, **le phosphore agit sur la qualité et la précocité.**

LE CYCLE DU PHOSPHORE A L'ECHELLE DU GLOBE

Le cycle naturel du phosphore est **caractérisé**, parmi les cycles biogéochimiques majeurs, par les points suivants :

- Le phosphore **reste et s'accumule** dans l'écosystème terrestre ;
- il ne possède **pas de phase gazeuse**, du moins en quantité significative ;
- comme ce cycle s'effectue principalement au sein de l'écosystème terrestre, ou entre les continents et les océans, il est qualifié de **sédimentaire** ;
- le passage du phosphore d'un compartiment à un autre n'est pas en première approche contrôlé par des réactions microbiennes comme dans le cas de l'azote par exemple ;
- il met en jeu des quantités modérées au regard des stocks

Ces particularités ont une très grande importance et expliquent que les échanges de phosphore entre les écosystèmes terrestres et océaniques sont des **processus naturels extrêmement lents**. C'est pourquoi **la gestion de cet élément et ses conséquences environnementales doivent être distinguées de l'azote**.

A l'état naturel, le phosphore se trouve sur Terre dans 5 sources primaires :

- les roches,
- le sol,
- la biosphère,
- les eaux continentales (dont les sédiments),
- les eaux océaniques (dont les sédiments).

Le phosphore du sol, en l'absence d'apport anthropique, provient de l'altération des roches et notamment de la dissolution de l'apatite (Figure 1).

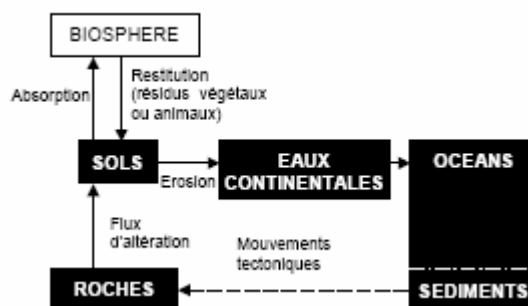


Figure 1 : Cycle planétaire du phosphore avant l'intervention de l'Homme (Lemerrier B., 2003)

Ce cycle naturel est modifié sous l'action de l'Homme (Figure 2). En effet, depuis le milieu du XIX^{ème} siècle, des gisements de phosphore sont exploités pour satisfaire les besoins industriels et agricoles. Les grands gisements se trouvent notamment aux Etats-Unis, en Russie, en Tunisie, au Maroc et en Afrique du Sud. **L'agriculture consomme de 95 à 97 % de la production mondiale de phosphates**. Leur exploitation a pour effet de :

- mettre en jeu des quantités beaucoup plus grande de phosphore dans la biosphère et dans les sols, et donc vers les eaux ;
- créer des déséquilibres entre les différentes régions du monde par des échanges commerciaux internationaux : certaines zones sont en situation d'excédents alors que d'autres sont déficitaires.

De plus, la mise en culture des sols accélère les transferts de phosphore par érosion et ruissellement vers les milieux aquatiques.

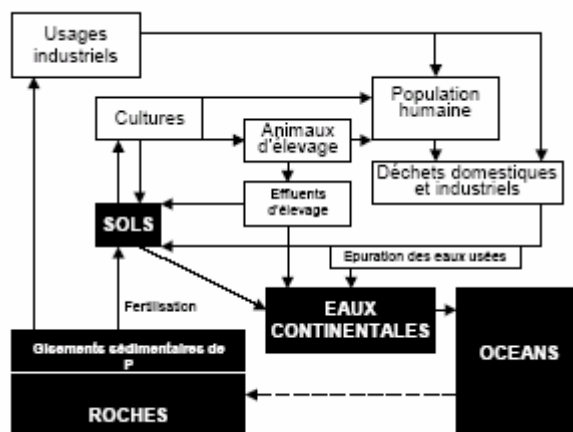


Figure 2 : Le cycle du phosphore après intervention de l'Homme (Lemerrier B., 2003)

➔ Ainsi, le cycle du phosphore anthropisé peut se résumer à **un transfert de masse régi par des processus hydrologiques**, depuis les gisements sédimentaires continentaux vers le sol puis les sédiments marins *in fine*. De ce point de vue, et à l'inverse de l'azote, le phosphore peut être considéré comme une source non renouvelable à l'échelle de temps humaine.

LES SOURCES ANTHROPIQUES DE PHOSPHORE

Les sources anthropiques de phosphore sont partagées entre le secteur urbain, industriel et agricole. Ces sources peuvent être diffuses ou ponctuelles (Tableau 1).

Type d'activité et origine	Phosphore provenant de	
	Sources ponctuelles	Sources diffuses
	Il a une origine bien localisée dans l'espace. Il est transmis indépendamment des périodes de ruissellement, au rythme des activités humaines	Il passe par, dans ou sur le sol et il est transféré lors des périodes pluvieuses
Villes et villages (domestique)	Assainissement collectif Assainissement individuel Dépôts d'ordures	Ruissellement urbain Marécages drainés ou remblayés
Industrie	Rejet direct	Ruissellement urbain
Agriculture	Stockage dans les bâtiments (fumier, lisier, ensilage) Nettoyage des locaux Rejets directs des élevages	Stockage « au champ » Sols cultivés et prairies Routes et chemins
Zones « naturelles »		Bruit de fond géologique

Tableau 1 : Inventaire des principales origines ponctuelles et diffuses du phosphore (d'après Dorioz, dans C.O.R.P.E.N., 1998)

D'après Pellerin et al. (2003), en 2000, environ 71 000 tonnes de phosphore ont été rejetées dans le réseau hydrographique de France, dont :

- 50% d'origine agricole,
- 30% d'origine urbaine et
- 20% d'origine industrielle.

Cependant, l'équipement de stations de plus en plus nombreuses en procédés de déphosphatation, l'amélioration des rendements des méthodes de déphosphatation et l'utilisation de détergents de moins en moins phosphatés contribuent à diminuer dans les eaux la part du phosphore urbain et industriel au profit du phosphore d'origine agricole.

Dans des bassins versants comme ceux de Bretagne, le phosphore des sols constitue la part principale du phosphore allant vers le réseau hydrographique (Figure 3), à la différence d'autres régions où la part du phosphore métabolique humain et issue des détergents est dominante.

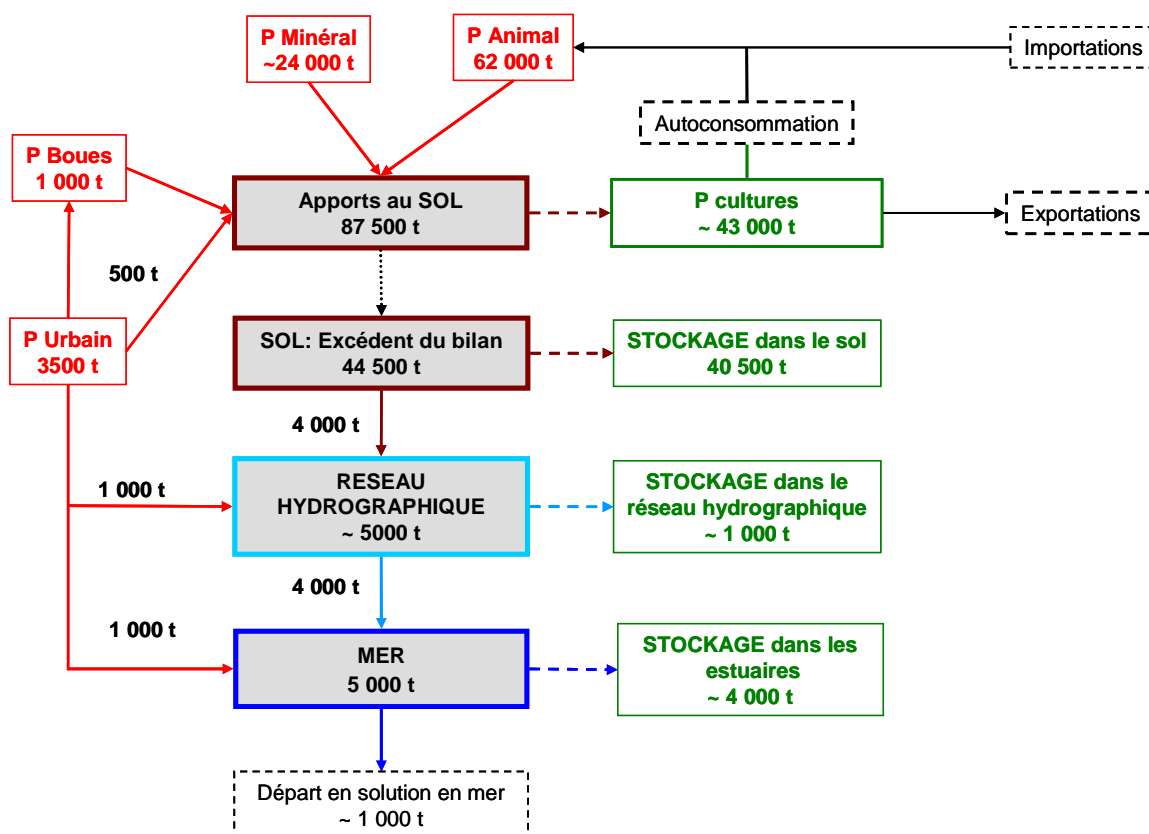


Figure 3 : Cycle du phosphore dans l'écosystème "Bretagne" en 2000 (D'après Aurousseau P., 2001 ; corrigé en 2005 relativement à l'exportation du P par les cultures, à l'excédent du bilan et au stockage dans le sol)

Le phosphore d'origine agricole

Les rejets de phosphore d'origine agricole sont moins bien connus que les rejets urbains et industriels pour plusieurs raisons :

- La croissance extrêmement rapide de la production agricole s'est faite surtout ces 40 dernières années. Le problème est donc relativement récent.
- La dispersion de l'activité agricole sur un vaste territoire donne un caractère diffus à ces rejets. Ils sont donc moins perceptibles directement. Des mécanismes d'épuration en limitent les effets.
- La mesure de ces rejets est difficile car à l'inverse des rejets industriels et urbains collectés et centralisés, il ne suffit pas d'effectuer des mesures ponctuelles pour les quantifier.
- Les caractéristiques des transferts d'azote et de phosphore (flux, concentration, vitesse, formes, etc.) varient en fonction de diverses variables du milieu comme la pluie, la température, l'humidité, ... au contraire des rejets industriels et urbains qui sont relativement constants.

→ Ainsi, les rejets d'origine agricole sont insuffisamment connus alors qu'ils représentent une part croissante des apports.

→ Alors que les rejets domestiques sont souvent mentionnés à l'échelle nationale comme la source principale de phosphore, en Bretagne l'importance de l'activité agricole et son orientation vers les productions animales favorisent des rejets agricoles plus abondants (Cann et al., 1999).

● Répartition des rejets de phosphore selon les productions animales

Au niveau national, les bovins contribuent aux deux tiers des rejets, suivis des porcins et des volailles. En Bretagne c'est le contraire ; la contribution des porcins et des volailles est nettement plus importante (Figure 4).

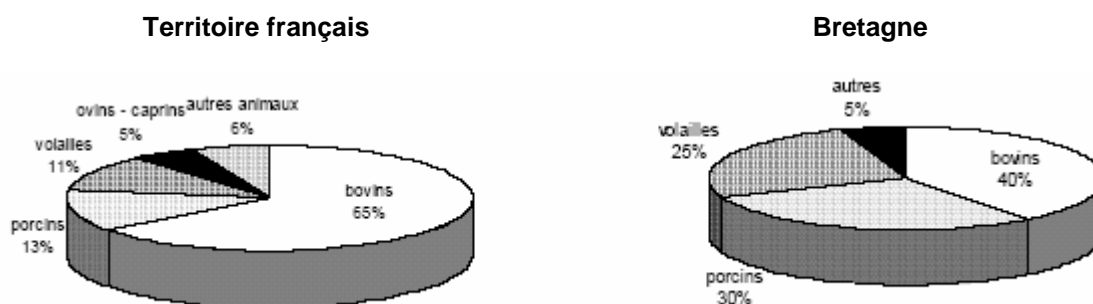


Figure 4 : Estimation de la répartition du phosphore des déjections animales produites annuellement en France dont le total représente près de 310 000 tonnes de P (d'après Guegin, 1996 in CORPEN, 1998)

Estimation de la répartition du phosphore des déjections animales produites annuellement en Bretagne en 2000 dont le total représente près de 62 700 tonnes de P (d'après Giovanni, 2002)

La part du phosphore minéral dans les apports sur les sols diminue régulièrement et assez fortement depuis plusieurs années grâce à un changement des pratiques agricoles et à une modification des engrais composés binaires ou tertiaires proposés par l'industrie (Aurousseau, 2001). La consommation d'engrais minéraux phosphatés a diminué en Bretagne plus que dans l'ensemble de la France : de 35 kg de P/ha en 1980, la consommation bretonne est passée à 14 kg de P/ha en 1997 (Cann et al., 1999).

Cependant, en Bretagne comme dans d'autres zones à forte densité d'élevage (Pays-Bas, Danemark, Nord de l'Italie), l'augmentation de la production animale et donc des déjections chargées en phosphore a fortement fait augmenter les entrées de phosphore dans la région ; alors même que des mesures étaient prises pour réduire l'utilisation d'engrais minéraux.

 **REFERENCES**

Aurousseau P., 2001. Les flux d'azote et de phosphore provenant des bassins versants de la rade de Brest. Comparaison avec la Bretagne. Océanis, vol. 27 n°2. pp. 137-161.

Cann C., Bordenave P., Saint-Cast P., Benoît J-C., 1999. Transfert et flux de nutriments - importance des transports de surface et de faible profondeur. Colloque Pollutions diffuses : du bassin versant au littoral. Ifremer (Ed.). 16 p.

CORPEN, 1998. Programme d'action pour la maîtrise des rejets de phosphore provenant des activités agricoles. 85 p.

Giovanni R., 2002. Evolution des potentiels d'azote et de phosphore d'origine animale de la région Bretagne pour les années 1998-2001. Fourrages, 170 : 123-140.

Lemercier B., 2003. La pollution par les matières phosphorées en Bretagne. Sources, transfert et moyens de lutte. DIREN Bretagne. 85 p.

LES FORMES ET COMPORTEMENTS DU PHOSPHORE

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Les formes du phosphore sont très diverses. Il peut être de nature organique ou inorganique (minéral). **On le trouve à l'état particulaire ou soluble.**
- Dans les sols, le phosphore est principalement associé aux particules de sol (phosphore particulaire). Il est aussi présent sous forme soluble dans la solution du sol en faible quantité.
- La diversité des formes du phosphore et sa géochimie complexe rendent très difficile l'évaluation des quantités et des formes sous lesquelles le phosphore pourra être transféré du bassin versant vers le réseau hydrographique.
- **Aujourd'hui en Bretagne, les déjections animales sont la principale source de phosphore apportée aux sols.**
- Le "superphosphate" est une forme d'apport d'engrais minéraux phosphatés, dont le caractère très soluble engendre des risques de transferts d'autant plus importants qu'il n'est pas enfoui.

LE PHOSPHORE DANS LES SOLS

Formes du phosphore dans les sols

- **Le phosphore est de nature organique et inorganique**

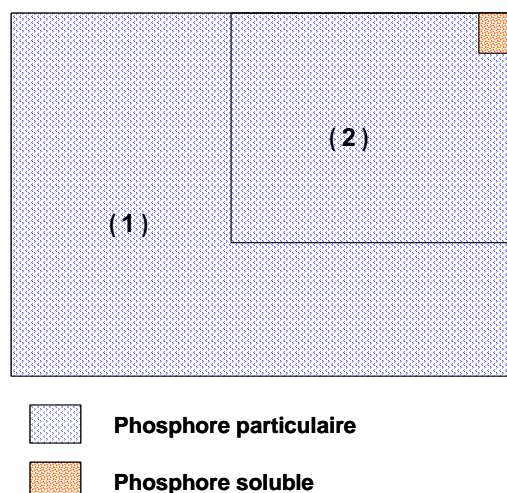
- **Le phosphore inorganique** (minéral), est associé à des composés amorphes ou cristallins d'aluminium et de fer dans les sols acides et à des composés du calcium dans les sols alcalins. La solubilité et la biodisponibilité du phosphore minéral ou sa rétention par la phase solide sont régies par les lois des équilibres chimiques, qui varient notamment avec le pH.
- **Le phosphore organique** est associé à la matière organique du sol. Il doit, le plus souvent, être minéralisé avant d'être utilisé par les plantes et les micro-organismes.

- **Il existe à l'état soluble et à l'état particulaire** (Figure 1).

Qu'il soit à l'état soluble ou particulaire, le phosphore peut être de nature minéral et organique. Le phosphore minéral représente une fraction plus mobile et plus abondante que le phosphore organique (Despreaux, 1990). Il y a donc deux états :

- **Le phosphore soluble** (P-soluble)
- **Le phosphore particulaire**

Le transfert de phosphore par ruissellement se fait majoritairement sous forme particulaire.



(1) Phosphore particulaire fixe, immobile (2) Phosphore particulaire mobilisable

Figure 1 : Répartition du phosphore total. Chaque fraction contient du phosphore minéral et dans une moindre part du phosphore organique.

Remarque : Le phosphore particulaire se présente soit sous forme associée à des particules minérales, organiques ou organo-minérales, soit il se présente lui-même sous forme de composés minéraux cristallisés. Une partie de ce phosphore particulaire se retrouve dans le P assimilable et une autre partie dans le P inassimilable

- **Le phosphore du sol se mesure sous 3 formes différentes :**

- **Le phosphore total** regroupe toutes les formes du phosphore présentes dans le sol.
- **Le phosphore assimilable** ou **biodisponible** correspond au phosphore directement assimilable par les plantes. Il se présente à la fois sous forme soluble et particulaire. Il se mesure en P_2O_5 , soit par la méthode Dyer dans les sols acides, soit par la méthode Joret-Hebert dans les sols calcaires. Depuis quelques années, une autre méthode est utilisée et tend progressivement à se développer : il s'agit de la méthode Olsen. En Bretagne, on parle de P_2O_5 Dyer, en référence à la méthode la plus souvent utilisée.
- **Le phosphore soluble**, présent dans la solution du sol.

- **Comportement du phosphore dans les sols**

Dans les sols, le phosphore est associé aux particules de sols (phosphore particulaire). Il est aussi présent sous forme soluble (phosphore soluble) dans la solution du sol, en faible quantité.

Les mécanismes d'échanges de phosphore entre la phase solide et la solution sont nombreux.

Ces mécanismes d'échanges sont (Vanden Bossche, 2003) :

- L'adsorption
- La désorption
- La précipitation
- La dissolution

La **solubilité** du phosphore dans un sol est sous le contrôle de nombreux mécanismes physico-chimiques et biologiques. Les mécanismes majeurs impliqués dans la régulation de la solubilité sont les réactions de complexation avec des oxyhydroxydes de fer et d'aluminium notamment, la diffusion intraparticulaire, les réactions de précipitation, dissolution et minéralisation et immobilisation par la biomasse microbienne. Les principaux constituants du sol responsables du maintien de la concentration en phosphore dissous sont les argiles minéralogiques, les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium, le carbonate de calcium et la matière organique (Vinatier, 2004).

Les propriétés physico-chimiques du sol, ainsi que les mécanismes liés au fonctionnement des racines et à l'activité de la biomasse microbienne, jouent un rôle important dans les processus d'échanges entre la phase solide et la solution (Morel, 2002).

● LE PHOSPHORE DANS L'EAU

● **Formes du phosphore dans l'eau**

La diversité des formes du phosphore **dans les eaux** est telle qu'elle a donné lieu à une distinction simplifiée entre phosphore soluble et phosphore particulaire (Dorioz, 1997).

- **Le phosphore est dit soluble** (P-soluble) quand il n'est pas retenu par un filtre dont les pores ont une taille de 0,45 µm. Pour l'essentiel, le phosphore soluble est constitué d'ions phosphates ou orthophosphates qui sont assimilables par les végétaux et qui, dans le réseau hydrographique, interviennent directement dans l'eutrophisation des eaux. Le phosphore soluble est aussi présent dans la solution du sol mais en faible quantité.
- **Le phosphore particulaire** (> 0.45 µm) regroupe toutes les formes de phosphore, minérales ou organiques, liées aux minéraux, à des débris divers ou incorporées dans les organismes. **Le transfert de phosphore par ruissellement se fait majoritairement sous forme particulaire.**

● **Comportement du phosphore dans l'eau**

Dans les eaux, différents processus de transformation du phosphore soluble et particulaire s'opèrent :

● **Dans les eaux douces**

- Le **phosphore soluble** peut être considéré comme totalement assimilable ou bio-utilisable, directement ou après action enzymatique, ce qui ne signifie pas qu'il soit consommé par les végétaux. L'assimilation est en effet plus ou moins forte selon l'intensité de l'activité biologique (optimum : printemps, été).
- Le phosphore soluble peut aussi être adsorbé par les particules en suspension, ou précipité, puis sédimenté, ce qui finalement contribue à enrichir les sédiments profonds.
- Une **désorption** notable de phosphore soluble à partir de ces sédiments apparaît lorsque des conditions anaérobies s'établissent à l'interface eau/sédiments et provoquent une réduction du fer et donc une libération du phosphore qui lui était associé.
- Le **phosphore particulaire** peut soit interagir avec du phytoplancton pour être assimilé, soit sédimenter (Dorioz, 1997).
- Dans le réseau hydrographique, la désorption du phosphore s'opère à l'occasion des crues sous l'effet, en particulier, de la remise en suspension de particules solides.

- **Dans les eaux de ruissellement**

La désorption du phosphore s'opère à l'occasion des épisodes pluvieux sous l'effet, en particulier, de la remise en suspension de particules de sol.

- **Dans les eaux marines**

En milieu estuarien et marin, l'ion orthophosphate constitue l'essentiel de la **forme minérale dissoute** qui sera directement assimilée par le phytoplancton et les macro-algues. Les formes organiques dissoutes (acides nucléiques, phospholipides...) sont quant à elles minoritaires dans cette phase soluble.

Le phosphore parvient aussi au milieu marin sous différentes **formes particulières** qui sont essentiellement (Andrieux, 1997) :

- le phosphore organique présent dans les débris végétaux ou animaux,
- les formes de phosphore adsorbées à la surface de particules minérales,
- les formes minéralogiques et occluses dans des matrices de minéraux.

Le phosphore qui circule dans les eaux douces sous forme particulaire flocule et sédimente pour l'essentiel à son arrivée en milieu marin. Une part du phosphore en solution peut lui aussi sédimenter suite à une précipitation consécutive à l'augmentation de la force ionique.

On peut considérer que le phosphore organique particulaire est utilisable, après minéralisation, par les végétaux marins ; le phosphore adsorbé sur des oxydes métalliques de fer ou d'aluminium pourra être libéré, sous certaines conditions physico-chimiques régnant par exemple dans des sédiments anoxiques. Par contre, le phosphore contenu dans des minéraux comme l'apatite n'est pas biodisponible pour les végétaux marins (Guillaud J.F. Ifremer, comm. pers.).

LES FORMES D'APPORTS DE PHOSPHORE SUR LES SOLS

Le phosphore apporté sur les sols, qu'il soit d'origine animale ou minérale, contient une part soluble relativement importante (surtout le superphosphate, engrais minéral). Compte tenu de sa solubilité, le risque de transfert est particulièrement important s'il n'est pas enfoui et que se produit un événement pluvieux important. Comme pour tous les apports de surface, le risque de transfert, pour des formes aussi solubles, est d'autant plus grand qu'il reste longtemps à la surface du sol.

Le phosphore des déjections animales

Aujourd'hui, en Bretagne, les déjections animales sont la principale source de phosphore apportée aux sols. La contribution des productions animales hors sol (porcs et volailles) est la plus importante (Tableau 1).

	Bretagne	
	Tonne P	%
Bovins	24 600	39,4
Porcins	18 800	30
Volailles	15 800	25,4
Autres	3 400	5,4
Total	62 600	100
Pression organique (kg/ha de SAU épannable)	129 (P₂O₅) 56 (P)	

Tableau 1 : Estimation de la production annuelle de phosphore d'origine animale en Bretagne en 2000 (d'après Giovanni, 2002)

● Le phosphore des engrais minéraux

Le "superphosphate" est une forme d'apport d'engrais minéraux phosphatés très soluble.

En Bretagne, la part du phosphore minéral dans les apports sur les sols diminue régulièrement et assez fortement depuis plusieurs années grâce à un changement des pratiques agricoles et à une modification de la composition des engrais composés binaires ou tertiaires proposés par l'industrie des engrais (Aurousseau, 2001).

D'après Cann et al. (1999), la consommation d'engrais minéraux phosphatés a diminué en Bretagne plus que dans l'ensemble de la France : de 35 kg de P/ha en 1980, la consommation bretonne est passée à 14 kg de P/ha en 1997.

➔ Cette diversité des formes du phosphore et la complexité du cycle géochimique rendent très difficile l'approche des quantités et des formes sous lesquelles le phosphore pourra être transféré du bassin versant vers le réseau hydrographique.

 **REFERENCES**

Andrieux F., 1997. Les formes de phosphore particulaire et sédimentaire en environnement côtier. Méthodes d'analyses, biodisponibilité, échange. Thèse Université Bretagne Occidentale, 327p.

Aurousseau P., 2001. Les flux d'azote et de phosphore provenant des bassins versants de la rade de Brest. Comparaison avec la Bretagne. Océanis, vol. 27 n°2. pp. 137-161.

Cann C., Bordenave P., Saint-Cast P., Benoît J-C., 1999. Transfert et flux de nutriments - importance des transports de surface et de faible profondeur. Colloque Pollutions diffuses : du bassin versant au littoral. Ed. Ifremer. 16 p.

Conseil scientifique de l'environnement de Bretagne, 2003. Gestion des sols et apport de déchets organiques en Bretagne. 52 p.

Despreaux, 1990. Phosphore et azote dans les sédiments du fleuve Charente. Variation saisonnières et mobilité potentielle. Thèse de l'Université C. Bertrand, Lyon 1. 225p.

Dorioz J-M., Trévisan D. et Vansteelant J-Y., 1997. Transfert diffus de phosphore des bassins versants agricoles vers les lacs : impacts, ordre de grandeur, mécanismes. « L'eau dans l'espace rural ». INRA (Ed). p. 249-264.

Giovanni R., 2002. Evolution des potentiels d'azote et de phosphore d'origine animale de la région Bretagne pour les années 1998-2001. Fourrages, 170 : 123-140.

Lemercier B., 2003. La pollution par les matières phosphorées en Bretagne. Sources, transfert et moyens de lutte. DIREN Bretagne. 85 p.

Morel C., 2002. Caractérisation de la phytodisponibilité du phosphore du sol par la modélisation du transfert des ions phosphates entre le sol et la solution. Mémoire d'HDR. INRA-Bordeaux, Institut national polytechnique de Lorraine. 80 p.

Vanden Bossch H., 2003. Devenir du phosphore apporté sur les sols et risques de contamination des eaux de surface. Cas des boues de stations d'épuration. Thèse de l'Université de Rennes 1. Mémoires du CAREN. 298 p. + Annexes.

Vinatier T. Bases conceptuelles d'un indice de risque de transfert du phosphore de la parcelle agricole vers les eaux de surface. Publication en cours.

Vinatier T., 2004. Les facteurs de risque de transfert du phosphore, de la parcelle vers les eaux de surface. Mémoire de fin d'étude ENSA Rennes. 87 p

LES MODES DE TRANSFERT DU PHOSPHORE DU SOL VERS LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Le phosphore suit deux voies de transfert pour atteindre le réseau hydrographique : d'une part, le ruissellement de surface et l'érosion, et d'autre part, la lixiviation¹ (lessivage) à travers les horizons du sol et la nappe.
- Le transfert du phosphore se fait principalement par les processus de ruissellement et d'érosion qui ont donc lieu surtout au cours des épisodes de crues. Ce transfert se fait par ailleurs majoritairement sous forme particulaire et de façon minoritaire sous forme soluble.
- Le transfert de phosphore par lessivage implique essentiellement le phosphore soluble. Ce mode de transfert est minoritaire par rapport au transfert par ruissellement et érosion dans les sols limoneux acide de l'ouest de la France.
- Les temps de transfert du phosphore pour rejoindre le réseau hydrographique sont variables selon la forme du phosphore et le chemin suivi (de l'ordre de quelques heures à quelques années).

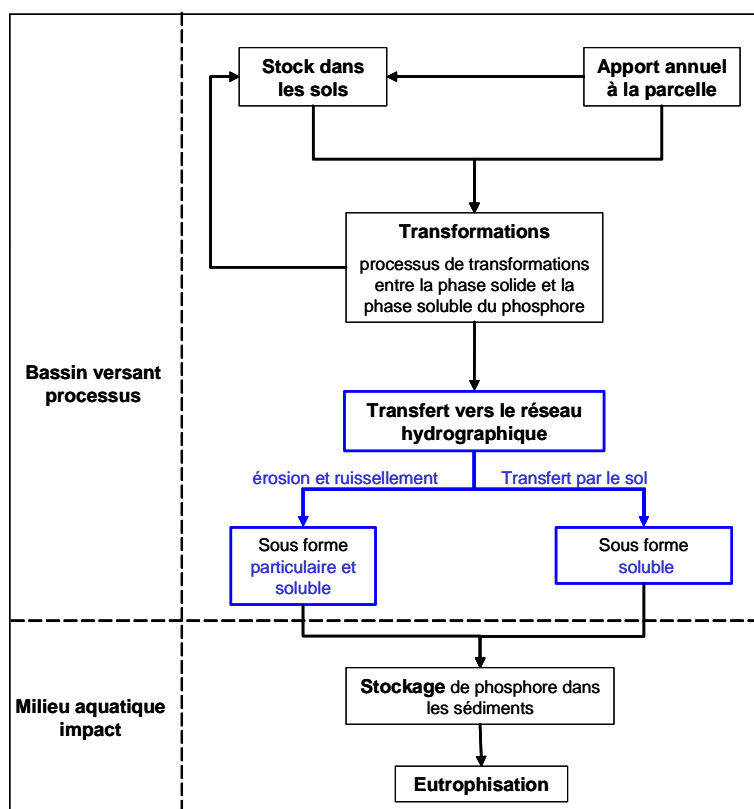


Figure 1 : Les processus de transfert du phosphore dans le bassin versant

¹ Le mot "lixiviation" est le terme scientifique exact. Toutefois, par souci de vulgarisation nous utiliserons fréquemment le terme de "lessivage".

● TRANSFERT DU PHOSPHORE PRINCIPALEMENT PENDANT LES CRUES

Le taux de phosphore transféré au cours d'eau sous forme particulaire est largement majoritaire par rapport au taux de phosphore transféré sous forme soluble et a lieu principalement au cours des crues (Figure 2).

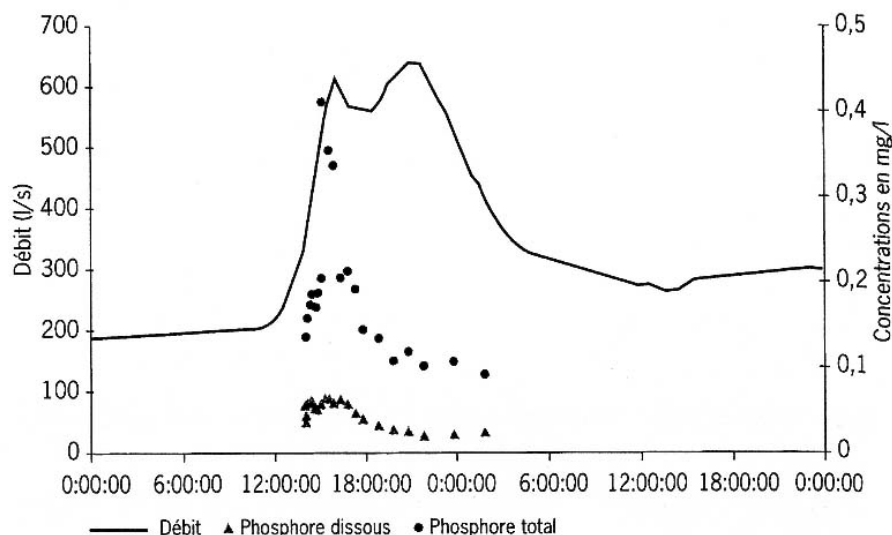


Figure 2 : Exemple de variation des concentrations en phosphore dans l'eau pendant une crue (la crue des 25-26 mai 1998 sur le Coët-Dan), Cann et al., 1999.

Au début des crues, lorsque le débit augmente, les concentrations en phosphore total croissent très rapidement. Le phosphore soluble réactif (phosphore disponible pour les plantes, ion phosphate) augmente très nettement mais dans de moindres proportions et de manière moins rapide que le phosphore total. C'est donc sous une autre forme (majoritairement particulaire) qu'arrive l'essentiel du phosphore en crue, spécialement au début de crue. L'augmentation de concentration en phosphore total accompagne l'augmentation brutale et brève de la teneur des eaux en matières en suspension (MES).

Le maximum des concentrations s'observe souvent avant que le débit maximum soit atteint. La concentration en phosphore change ainsi d'ordre de grandeur : la concentration est couramment multipliée par 20 en moins d'une demi-heure. Ce type d'observations s'observe systématiquement lors des crues (Cann, 1999).

● MODE DE TRANSFERT DU PHOSPHORE PARTICULAIRE

Le phosphore a une **forte capacité de fixation** sur les particules du sol. Ainsi, parmi toutes les voies de transferts possibles vers le réseau hydrographique, le **ruissellement de surface et l'érosion** sont les voies prépondérantes qu'emprunte le phosphore (CSEB, 2003) (voir fiche A-2).

Les quantités de phosphore total transférées augmentent avec le taux d'érosion. La teneur en phosphore des particules érodées est alors directement proportionnelle au stock de phosphore dans les premiers centimètres du sol. Enfin, d'une manière générale, les particules de sol érodées, riches en particules fines, sont plus chargées en phosphore que les particules de la couche de sol dont elles proviennent.

En effet, les eaux de ruissellement s'enrichissent en phosphore au contact avec le sol. Elles se chargent en partie de phosphore soluble mais surtout en particules de sol érodées enrichies en phosphore. En effet, ces matières en suspension (MES) transférées par les eaux de ruissellement sont plus riches en phosphore (P) que les compartiments du sol. Ces particules sont plus réactives vis-à-vis du phosphore (Vanden Bossches, 2003, Dorioz et al, 1997), du fait notamment de leur plus grande surface spécifique susceptible de réagir avec le phosphore de la solution du sol. Pour le phosphore total, on admet en première approximation un facteur d'enrichissement moyen de 2 dans le contexte breton (Arousseau, comm. pers.).

Teneur en phosphore	SOL	MES transférées par ruissellement
P total	2 g de P/kg	4 g de P/kg
P assimilable (Dyer)	0,9 g de P/kg soit 2000 mg/kg	2,7 g de P/kg
P soluble	0,1 g de P/kg	0,4 g de P/kg

Tableau 1 : Estimation de l'enrichissement entre le sol et les MES transférées par ruissellement (Arousseau, comm. pers.)

Les temps de transfert du phosphore particulaire pour rejoindre le réseau hydrographique sont assez courts. Ils dépendent des obstacles au ruissellement présents sur la parcelle. En effet, le phosphore peut subir une série de dépôts et de reprises sur son parcours.

MODE DE TRANSFERT DU PHOSPHORE SOLUBLE

Le phosphore soluble suit les mêmes processus de transfert que les écoulements d'eau (voir fiche A-2). Il est transféré au réseau hydrographique par deux voies : le ruissellement en surface et le lessivage par percolation à travers le sol.

Cependant, les transferts de phosphore par lessivage sont relativement faibles par rapport aux transferts de surface. Ils sont estimés inférieurs à 0.1 kg de P/ha/an alors que les quantités associées au transfert de surface peuvent être comprises entre 0.05 et 2.5 kg de P total/ha/an (Dorioz, 1997).

Une étude réalisée dans le Morbihan (Comlan, 1996) montre une faible migration du phosphore dans le profil du sol en dessous de l'horizon labouré. Par ailleurs, une étude de l'INRA de Quimper (Simon et Lecorre, 1989) réalisée sur sol cultivé d'origine granitique a permis de mesurer des quantités de phosphore lessivées comprises entre 0.1 et 0.15 kg de P/ha/an.

Les temps de transfert du phosphore soluble sont très variables (de l'ordre de quelques heures à quelques années).

Dans les sols drainés, les temps de transfert sont accélérés du fait des drains qui occasionnent un circuit plus rapide vers le réseau hydrographique.

Bien que minoritaire par rapport aux pertes de phosphore particulaire, les pertes de phosphore soluble ne doivent pas être négligées. En effet, le phosphore soluble est directement disponible non seulement pour les cultures mais aussi pour les végétaux aquatiques responsables de l'eutrophisation.

D'autre part, même si le transfert de phosphore vers le réseau hydrographique pendant la saison humide se réalise principalement sous forme particulaire et concerne des formes assez insolubles, ce phosphore se convertit en partie dans le réseau hydrographique en phosphore soluble, interagissant directement sur l'eutrophisation au cours de la belle saison.

 **REFERENCES**

Branchard JP., 1984. Fonctionnement hydrique et qualité des eaux dans des sols drainés et soumis à épandage. Thèse ENSA Rennes. 122 p.

Cann C., Bordenave P., Saint-Cast P., Benoît J-C., 1999. Transfert et flux de nutriments - importance des transports de surface et de faible profondeur. Colloque Pollutions diffuses : du bassin versant au littoral. Ed. Ifremer. 16 p.

Comlan P., 1996. Enrichissement en phosphore des sols d'un bassin versant. Ingénieries - EAT-N°7. pp. 13 à 20.

Conseil scientifique de l'environnement de Bretagne, 2003. Gestion des sols et apport de déchets organiques en Bretagne. 52 p.

Dorioz J-M., Trévisan D. et Vansteelant J-Y., 1997. Transfert diffus de phosphore des bassins versants agricoles vers les lacs : impacts, ordre de grandeur, mécanismes. « L'eau dans l'espace rural ». INRA (Ed). p. 249-264.

Lemercier B., 2003. La pollution par les matières phosphorées en Bretagne. Sources, transfert et moyens de lutte. DIREN Bretagne. 85 p.

Simon JC., Lecorre L., 1989. Lessivage d'éléments minéraux autres que l'azote en monoculture de maïs en sol granitique du Finistère. Fourrage n°118. pp. 127-148.

Vanden Bossch H., 2003. Devenir du phosphore apporté sur les sols et risques de contamination des eaux de surface. Cas des boues de stations d'épuration. Thèse de l'Université de Rennes 1. Mémoires du CAREN. 298 p.

Vinatier T., 2004. Les facteurs de risque de transfert du phosphore, de la parcelle vers les eaux de surface. Mémoire de fin d'étude ENSA Rennes. 87 p.

Vinatier T. Bases conceptuelles d'un indice de risque de transfert du phosphore de la parcelle agricole vers les eaux de surface. Publication en cours.

LES FACTEURS DE RISQUE DE TRANSFERT DU PHOSPHORE DANS LES BASSINS VERSANTS

DEFINITION



Le risque est la probabilité qu'un événement dangereux (aléa¹) survienne et qu'il affecte une population ou un écosystème exposé (vulnérabilité) à ce danger. La notion de **risque** implique un caractère aléatoire, une notion de probabilité, donc d'incertitude et de difficulté à prévoir un événement. On appelle "**facteur de risque**" des facteurs qui ont été identifiés comme intervenant dans le risque.

Les facteurs de risque de transfert de phosphore du sol vers les eaux sont de 3 ordres :

- **Les facteurs de pressions polluantes** ou **facteurs sources** : il s'agit des sources de phosphore en provenance du sol, c'est-à-dire d'une part, le stock de phosphore présent dans le sol et d'autre part, les apports annuels sur les parcelles.
- **Les facteurs de transfert** : ce sont les facteurs ayant une influence sur le transfert de l'eau et des particules de sol par érosion et ruissellement.
- **Les facteurs de connexion au réseau hydrographique** ou **facteurs de "connectivité"** : ils correspondent aux éléments du paysage (haies, talus, zones enherbées, ...) capables de freiner ou intercepter le phosphore entraîné par érosion ou ruissellement avant qu'il n'arrive à la rivière.

L'aléa associé à une parcelle est le résultat du croisement entre les facteurs sources, les facteurs de transfert et les facteurs de connectivité.

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Le transfert du phosphore est principalement contrôlé par les processus d'érosion et de ruissellement de surface.
- Une forte proportion de parcelles cultivées dans les bassins versants détermine l'importance du phosphore particulière transféré. L'élevage intensif entraîne des apports importants de phosphore et donc la constitution d'un stock important de phosphore dans les sols.
- Depuis les années 70, le phosphore a cessé régionalement d'être un facteur limitant de la production végétale. **La Bretagne est même passée à une situation de stockage de phosphore dans le sol**, car les apports de phosphore sont supérieurs aux prélèvements par les plantes.
- Deux facteurs, les **stocks de phosphore dans les sols** et les **apports annuels**, constituent les sources principales de phosphore transporté vers le réseau hydrographique.
- Les transferts de surface du phosphore dépendent de plusieurs facteurs qui contrôlent l'érosion et le ruissellement : état de surface du sol (battance), profil de sol (hydromorphie), inclinaison, forme et position de la pente, couverture du sol.
- Le phosphore subit une série de dépôts et de reprises sur son parcours au sein même du bassin versant.

¹ L'aléa dépend du niveau et de l'occurrence de certains événements.

● LES FACTEURS SOURCES

Il existe deux sources de phosphore à l'échelle de la parcelle :

- **Le stock** de phosphore dans le sol, notamment dans les premiers centimètres du sol ;
- **Les apports** annuels à la parcelle et la manière dont ils sont apportés.

Les analyses de teneurs en phosphore qui sont généralement réalisées sont des analyses de phosphore dit "assimilable" (représentant une proportion variable du phosphore total) faites à la demande des agriculteurs pour ajuster leur fertilisation des sols. Ces teneurs sont exprimées en mg de P_2O_5 par kg de terre. Il faut diviser la valeur numérique du P_2O_5 par 2,29 pour la convertir en P.

Le stock de phosphore total est lui exprimé le plus souvent en **tonne (t) de phosphore par hectare (P/ha)**.

Les apports annuels se mesurent en **kg de P/ha**. Ils sont souvent exprimés en P_2O_5 .

● **Le stock de phosphore dans le sol**

● **Accumulation de phosphore**

A la fin de la deuxième guerre mondiale, les sols de Bretagne étaient dans une situation de **carence vis-à-vis du phosphore**. La teneur moyenne en phosphore assimilable P_2O_5 (méthode Dyer) était alors inférieure à 150 mg/kg de terre, soit largement en dessous de la teneur recommandée de 220-250 mg/kg de terre. **Le phosphore était alors un facteur limitant de la production végétale**.

Les fertilisations de redressement, suivies ensuite par un développement de l'élevage, ont inversé la situation. Les apports de phosphore sous forme d'engrais minéraux dans les années 1960-1980 puis d'origine organique (fumiers et lisiers) à partir des années 1970, font qu'**en Bretagne, le phosphore a cessé d'être un facteur limitant de la production végétale depuis des années**. En 1988, les sols de Bretagne contenaient en moyenne 300 mg/kg de P_2O_5 "assimilable" (Dyer), avec des valeurs moyennes de plus de 500 mg/kg en zones légumières ou en zones d'élevage intensif (Leleux et al., 1988). Dix ans plus tard, **plus de la moitié des communes de Bretagne sont en moyenne dans une situation d'excès** (500, 1000 mg/kg de terre de P_2O_5 assimilable) On connaît des parcelles avec des teneurs plus élevées encore (2000 mg/kg et plus). **On est ainsi passé à une situation de stockage ou de sur-stockage du phosphore dans les sols**.

● **Influence du stock sur les transferts**

La voie principale de transfert du phosphore, de la parcelle vers le réseau hydrographique, est l'érosion et le ruissellement (*voir fiche A-2*).

Dans le contexte breton, le stock de phosphore constitue **la source principale des transferts de phosphore**. **Le transfert met en jeu essentiellement le phosphore particulaire**, adsorbé sur les particules (colloïdes) du sol. Il vient majoritairement des parcelles en cultures. Sur les prairies, par contre, la part de phosphore soluble transférée est relativement plus importante.

D'une manière générale, les particules de sol érodées sont enrichies en phosphore par rapport au sol dont elles proviennent. Les coefficients d'enrichissement cités dans la littérature vont jusqu'à 5.

Un coefficient moyen de 2 pourrait être pris en considération en première hypothèse (*voir fiche B-6*).

● Les apports annuels sur les sols

• Les entrées annuelles de phosphore liées aux activités agricoles

L'activité agricole de culture et d'élevage constitue la source principale de phosphore apportée sur les sols des bassins versants bretons aujourd'hui. Les apports proviennent :

- des épandages sur les parcelles agricoles (lisiers, fumiers, engrais) ;
- des rejets directs des animaux d'élevage ;
- du stockage « au champ » des engrais.

• Cinq facteurs de risque principaux liés aux apports annuels

Les cinq facteurs de risque principaux liés aux apports annuels de phosphore sur les parcelles agricoles sont les suivants :

- la dose de phosphore épandue,
- le délai entre l'épandage et l'incorporation au sol,
- le type d'apport annuel et en particulier sa solubilité,
- la période de l'épandage,
- la méthode d'incorporation au sol.

La dose de phosphore épandue traduit la quantité de phosphore risquant d'être transférée suite à l'épandage.

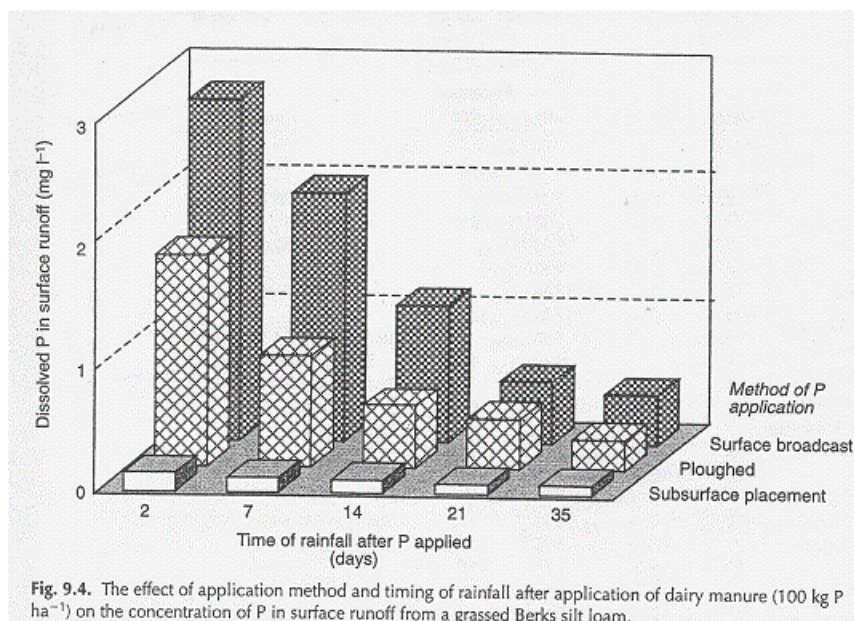
Le délai entre l'application et l'incorporation traduit le niveau de risque qu'une pluie ruisselante puisse se produire avant l'incorporation au sol. Ce type d'événement accidentel peut entraîner des pertes importantes de phosphore par ruissellement.

Tout apport non suivi d'enfouissement se traduit par une augmentation considérable des teneurs en phosphore de surface et donc des risques de transfert (Dorioz, 1997, Sharpley, 1996).

Le type d'engrais phosphaté épandu entraîne un risque différent selon sa solubilité et selon qu'il soit incorporé ou laissé à la surface du sol. Les risques de transfert sont plus importants pour les formes solubles laissées en surface.

Les périodes d'épandage à risque plus important semblent être les périodes de cumuls importants de pluies de fin d'année et les périodes à risque de saturation des sols. En Bretagne, la période de décembre à fin mars présente un fort risque de ruissellement.

La méthode d'incorporation joue un rôle sur la quantité de phosphore susceptible d'être concernée par les phénomènes d'érosion et de ruissellement.



- ◆ *ploughed* : incorporation par labour
- ◆ *surface broadcast* : engrais laissé en surface
- ◆ *subsurface placement* : injection de l'engrais dans le sol

Figure 1 : Conséquence de la méthode d'incorporation et du délai entre l'incorporation et la pluie simulée pour un engrais de bovin (100 kg P/ha) sur la concentration en phosphore des eaux ruisselées en surface sur un « grassed Berks silt loam » (Mc Dowell, 2002).

➔ Actuellement en Bretagne, les apports sont supérieurs aux prélèvements par les plantes et contribuent à l'accumulation de phosphore dans les sols et aux fuites vers le réseau hydrographique.

LES FACTEURS DE TRANSFERTS

Les transferts de phosphore se faisant majoritairement par voies d'érosion et de ruissellement, les facteurs de transfert sont les facteurs qui contrôlent l'érosion et le ruissellement de surface.

La sensibilité du sol à la battance

La sensibilité du sol à la [battance](#) (voir fiche A-2) est un indicateur du risque de déclenchement du ruissellement de surface.

La battance du sol est fonction en première approche du taux de matière organique dans le sol et la texture du sol.

L'hydromorphie

[L'hydromorphie](#) caractérise certains sols modifiés par un excès d'eau qui sature la totalité des pores, de façon permanente ou temporaire sur la totalité ou la plus grande partie de leur profil.

[L'hydromorphie est un indicateur du risque de ruissellement.](#) Ce risque est d'autant plus fort que l'hydromorphie observée dans la partie supérieure du sol est intense et que ces parcelles

hydromorphes sont proches de cours d'eau ou de fossés circulant en continu pendant une période prolongée de décembre à mars.

● L'inclinaison de la pente

L'inclinaison de la pente est un indicateur de l'intensité du ruissellement diffus et du risque de ruissellement concentré.

Cette notion de ruissellement diffus et concentré fait référence à l'organisation (l'architecture) de l'écoulement. Un ruissellement diffus est un ruissellement homogène sur une surface de sol donnée. Un ruissellement concentré est un ruissellement par des chenaux, rigoles ou ravines.

Le ruissellement diffus, forme de ruissellement majoritaire en Bretagne, est favorisé par l'inclinaison de la pente.

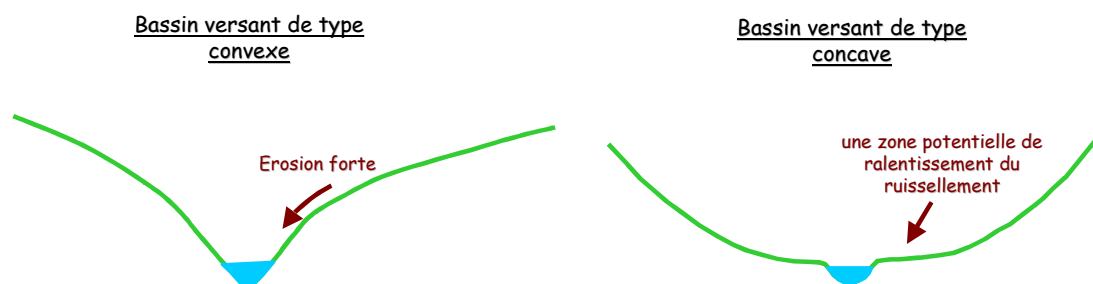
Le ruissellement concentré est déterminé par des versants longs ou des pentes supérieures à 5%.

● La forme de la pente

La forme de la pente conditionne l'érosion et le transfert d'eau par ruissellement.

Une zone concave en bas de parcelle est une zone potentielle de ralentissement de l'eau de ruissellement et donc de réinfiltration et de sédimentation des particules de sol lors d'épisode de ruissellement de surface. Cependant, cette zone a potentiellement un stock de phosphore plus important qu'en moyenne sur la parcelle.

Une zone convexe favorise l'érosion et le transfert d'eau et de particules de sol hors de la parcelle.



● La couverture du sol

Le taux de couverture du sol limite les transferts de phosphore sur la parcelle.

- Dans les milieux prairiaux, le transfert de phosphore se fait surtout sous forme dissoute, avec des valeurs comprises entre 70 et 90% du phosphore total exporté (Dorioz et al., 2002).
- Sur les parcelles cultivées, le transfert de phosphore se fait majoritairement sous forme particulaire, où il représente 50 à 90% du phosphore total exporté (Dorioz et al., 1997).

En période hivernale, les quantités de phosphore transférées seront moins importantes dans le cas de culture à végétation rapide que dans le cas de cultures à végétation lente. Le cas le plus risqué est celui des sols laissés nus.

Les cultures dérobées et les cultures intermédiaires pièges à nitrate CIPAN constituent une protection efficace contre le transfert de phosphore.

Les résidus de culture permettent une diminution du transfert de phosphore particulaire intéressante. Cet intérêt semble limité pour le phosphore soluble.

● L'orientation des façons culturales

Le sens des façons culturales par rapport aux courbes de niveau contrôle le transfert de phosphore sur la parcelle. Des façons culturales orientées **parallèlement aux courbes de niveau (perpendiculairement à la pente)** limitent le transfert de phosphore (sur des pentes modérées, pour des ruissellements de faible intensité).

● LES FACTEURS DE CONNEXION AU RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Le phosphore subit une série de dépôts et de reprises sur son parcours entre la parcelle et les eaux de surface. (Fardeau, 2000, CORPEN, 1998, Dorioz, 1997).

Le facteur "de connexion" (connectivité) est un facteur très important du transfert du phosphore puisqu'il exprime les obstacles au transfert du phosphore entre la parcelle et le réseau hydrographique et donc les quantités de phosphore conservées sur la parcelle et non transférées au réseau hydrographique.

- **Connectivité** : lien direct entre la parcelle et le réseau hydrographique.
- **Non connectivité** : lorsque qu'un obstacle fait barrage entre la parcelle et le réseau hydrographique et vient interrompre les transferts de phosphore.

Les obstacles permettant un abattement des quantités de phosphore entraînées par ruissellement ou érosion sont :

- Les talus et par extension les cuvettes bien délimitées et les fossés sans exutoire,
- Les bandes enherbées,
- Les zones enherbées comme les prairies,
- Les zones humides.

Les facteurs de connexion de la parcelle au réseau hydrographique pris en compte sont de différentes natures.

- **Les obstacles en surface sur le parcours de l'eau dans le bassin versant** : talus, zone de dépression, fossé fermé peuvent permettre la réinfiltration de l'eau de ruissellement en bas de parcelle et éviter le transfert d'eau et de phosphore vers le cours d'eau.
- **Les dispositifs enherbés** : les prairies intercalées entre les cultures et les bandes enherbées peuvent jouer un rôle tampon (Dorioz, 1997). Ces dispositifs ont un potentiel d'abattement satisfaisant pour le phosphore particulaire, mais beaucoup plus variable pour le phosphore soluble (Dorioz, 2002). Cette variabilité est liée au fait que le phosphore soluble contenu dans l'eau de ruissellement peut saturer en phosphore les particules de sol de la surface du dispositif enherbé, limitant ainsi ses capacités de fixation et de rétention à long terme (Dorioz, 2002). Cet effet peut être particulièrement net sur les bandes enherbées souvent implantées en bord de cours d'eau, dans des zones de bas de versant où la nappe affleure en hiver. Ces dispositifs peuvent ainsi constituer un obstacle permettant de retarder le transfert du phosphore pendant la période hivernale à moindre d'eutrophisation (*voir fiche J-1*).

➔ Les capacités d'abattement du transfert de phosphore de ces différents obstacles ne sont pas connues précisément. Leur présence et leur distance au cours d'eau peuvent être un indicateur de possibilités de rétention entre la parcelle et le réseau hydrographique.

Conclusion

Parmi tous ces facteurs de risque, certains sont décrits par des **variables quantitatives** (inclinaison de la pente, dose de phosphore épandue...) auxquelles peuvent être associées des valeurs seuils de manière à distinguer des classes de risque.

D'autres facteurs de risque sont décrits par des **variables qualitatives** (description de l'hydromorphie, présence/absence...) observables sur le terrain et qui permettent de définir également des classes de risque.

A chaque classe de risque est associée une modalité. Celle-ci peut être favorable, moyennement défavorable ou défavorable suivant le niveau de risque qu'elle présente.

La prise en compte de l'ensemble de ces facteurs devrait permettre de définir les parcelles à risque de transfert de phosphore vers le réseau hydrographique.

REFERENCES

CORPEN, 1998. Programme d'action pour la maîtrise des rejets de phosphore provenant des activités agricoles. 85 p.

Dorioz J-M., Trévisan D. et Vansteelant J-Y, 1997. Transfert diffus de phosphore des bassins versants agricoles vers les lacs : impacts, ordre de grandeur, mécanismes. « L'eau dans l'espace rural ». INRA (Ed). pp. 249-264.

Dorioz JM., Vansteelant A., 2002. Les dispositifs enherbés : outils de gestion de la pollution diffuse phosphorée d'origine agricole. Rapport bibliographique pour le groupe « phosphore » du CORPEN.

Fardeau JC., Dorioz JM., 2000. La dynamique du phosphore dans les zones humides. Fonctions et valeurs des zones humides. DUNOD (Ed). pp. 143-159.

Heathwaite L., Sharpley A., Gburek W.J., 2000. A conceptual approach for integrating phosphorus and nitrogen management at watershed scales. J. environ. Qual. 29. p. 158-166.

Leleux A., Arousseau P., Roudaut A., 1998. Synthèse cartographique régionale à partir de données d'analyses de terre. Science du sol – 1988/1 – vol. 26, 1, 29-40.

MacDowell R.W., Sharpley A.N., Kleinman P.J.A., Gburek W.J., 2002. Hydrological source management of pollutants at the soil profile scale. Agriculture, hydrology and Water Quality. pp. 197-223.

Sharpley A.N., Daniel T.C., Sims J.T., Pote D.H., 1996. Determining environmentally sound soil phosphorus levels. Journal of soil and water conservation, 51. pp. 160-166.

Vinatier T., 2004. Les facteurs de risque de transfert du phosphore, de la parcelle vers les eaux de surface. Mémoire de fin d'étude ENSA Rennes. 87 p



GLOSSAIRE (FICHES B : PHOSPHORE)

A

ADSORPTION

Processus physique d'adhésion de substances dissoutes ou dispersées à la surface d'un corps solide.

B

BATTANCE

Phénomène par lequel un sol, où dominent les sables fins et les limons, se tassent sous l'effet de pluies favorisant ainsi le ruissellement.

D

DESORPTION

Transformation inverse de l'[adsorption](#), par laquelle les molécules adsorbées se détachent du substrat.

H

HYDROMORPHIE

Désigne les sols dont un excès d'eau sature la totalité des pores, de façon permanente ou temporaire sur la totalité ou la plus grande partie de leur profil.

L

LESSIVAGE

Entraînement mécanique d'argile en suspension et en moindre quantité d'argile grossière et de limon fin le long des fentes et autres vides du sol (voir aussi [lixiviation](#))

LIXIVIATION

La lixiviation correspond à la percolation lente de l'eau à travers le sol et à l'entraînement des éléments solubles qui y sont contenus.