

2.3.2 Le Cycle du phosphore

2.3.2 Le Cycle global du phosphore

La lithosphère est la source ultime de tout le phosphore de la biosphère. Bien que l'apatite soit l'un des minéraux primaires les plus facilement altérés, le phosphore est parmi les minéraux les moins bio-disponibles. Ceci est dû au fait que les formes du phosphore dans la biosphère (formes ioniques différentes suivant le pH : H_2PO_4 , HPO_4^- , PO_4^{2-} ; complexes minéraux, dits occlus : Al-P, Fe-P, Ca-P, Si-P ; et P organique) sont faiblement solubles, immobiles ou rendues inaccessibles pour d'autres raisons. En conséquence, le phosphore est en quantité suffisante dans les sols jeunes, arides et neutres, mais est souvent colimitant (avec l'azote) pour la production des plantes et des animaux sur les surfaces anciennes et fortement altérées, comme celles qui dominent en Afrique et en Amérique tropicales et en Australie. Comme le NH_4^+ et le NO_3^- sont plus facilement lessives que le phosphate, les écosystèmes d'eaux douces et côtiers sont typiquement plus sensibles aux augmentations de phosphore que d'azote, faisant du phosphore le principal responsable de l'eutrophisation dans les lacs et les estuaires. Il est transporté principalement sous forme de particules de sol, plutôt qu'en solution.

La disponibilité du phosphore dans les paysages où il est rare est largement stimulée par les processus biologiques. Des champignons symbiotiques spécialisés tels les mycorrhizes, transfèrent le P de formes inaccessibles vers la plante et aident à maintenir son cycle fermé (avec des pertes minimales). Il y a une évidence empirique qu'une faible disponibilité du phosphore limite la fixation d'azote contribuant à la colimitation notée ci-dessus. Le mécanisme de cette contrainte reste encore mal élucidé.

Le cycle contemporain du phosphore n'est pas en équilibre, à l'inverse du cycle historique (figure 7).

Ce diagramme schématise les principaux éléments du cycle du phosphore. Les compartiments sont en TgP, les flux en TgP par an et les temps de renouvellement (entre crochets) en années. Les flèches pointillées sont des flux entièrement ou partiellement d'origine humaine. En milieu terrestre, le phosphore qui s'accumule dans les sols, en raison de l'utilisation des engrais, est en partie lessivé vers les rivières, les lacs et les eaux côtières, où il constitue le principal facteur de l'eutrophisation. Données de Reeburgh (1997) et Carpenter *et al.* (1999).

En raison des forts apports de phosphore depuis la lithosphère, principalement par l'extraction minière mais aussi par l'accélération de l'altération, le phosphore s'accumule dans les écosystèmes terrestres dans les mondes développés et sous-développés (avec quelques exceptions notables dans l'Afrique subsaharienne).

Le principal mécanisme par lequel il passe des milieux terrestres aux milieux d'eaux douces est l'érosion du sol. Le phosphore des milieux agricoles est le principal facteur de l'eutrophisation. Celui provenant de sources ponctuelles comme les effluents des stations d'épuration et les déchets

industriels, comprenant les détergents phosphates, apporte une contribution limitée globalement, même si elle peut être importante localement (Bennett *et al.*, 2001). En raison d'une forte accumulation de phosphore dans les terres, et de la lenteur de processus de libération impossibles à arrêter, ce problème est promis à croître et s'étendre de façon substantielle dans les prochaines décennies.

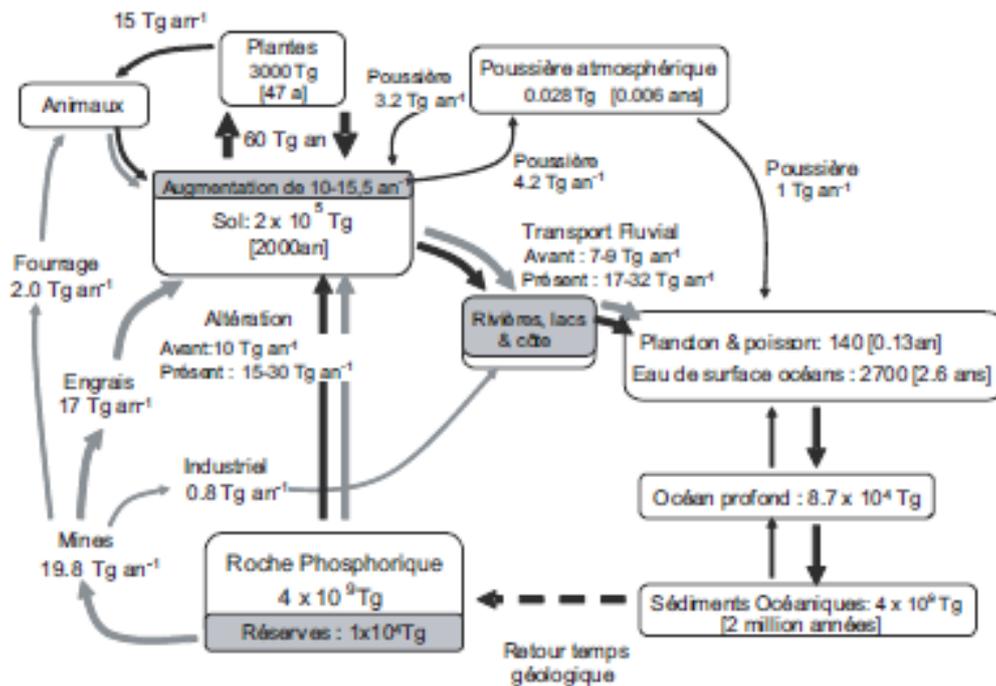


Figure 8: Cycle du phosphore.

2.3.2.1 Le rôle du phosphore

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

a- 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.

b- 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 racelles, 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.

2.3.2.2. Le cycle du phosphore à l'échelle 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 8).

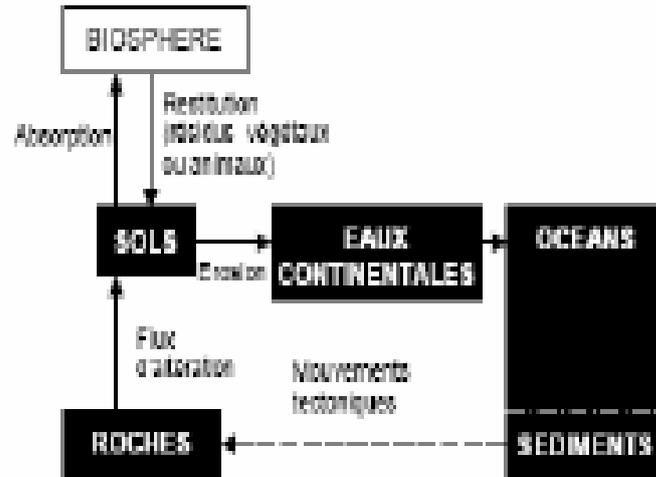


Figure 9 : Cycle planétaire du phosphore avant l'intervention de l'Homme (Lemerrier B., 2003)

Ce cycle naturel est modifié sous l'action de l'Homme (Figure 10). 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.

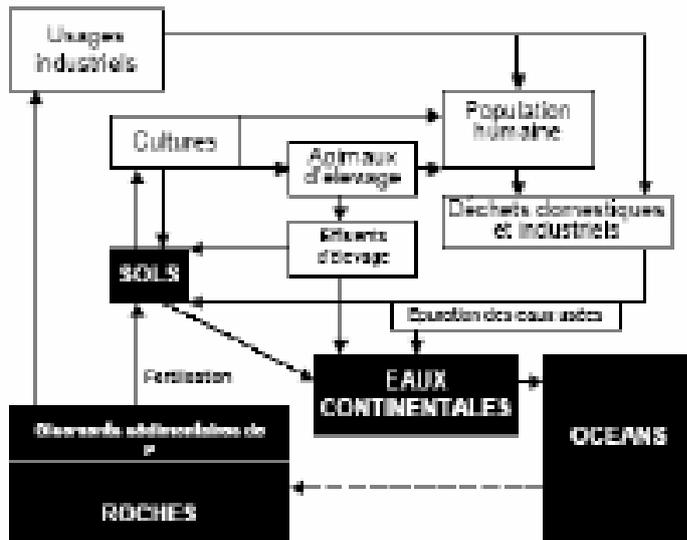


Figure 10 : Le cycle du phosphore après intervention de l’Homme (Lemerrier B., 2003)

_ 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.

2.3.2.3. 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 6).

Tableau 6 : Inventaire des principales origines ponctuelles et diffuses du phosphore (d’après Dorioz, dans C.O.R.P.E.N., 1998)

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 » Bois cultivés et prairies Routes et chemins
Zones « naturelles »		Bruit de fond géologique

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 11), à la différence d'autres régions où la part du phosphore métabolique humain et issu des détergents est dominante.

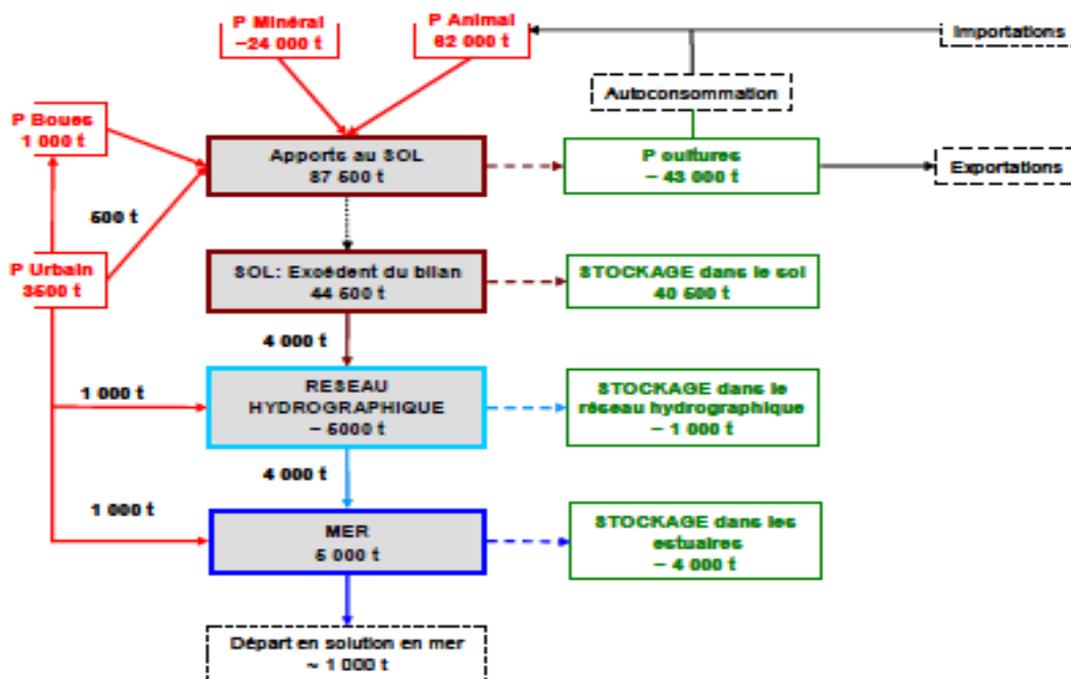


Figure11 : Cycle du phosphore dans l'écosystème "Bretagne" en 2000 (D'après Aurousseau P., 2001 ; corrigé en 2005 relativement à l'exportation du P par les cultures, à l'excédent du bilan et au stockage dans le sol)

a. 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'azotes 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, 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**

Selon une étude française, Au niveau de répartition, les bovins contribuent au 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 12).

Exemple

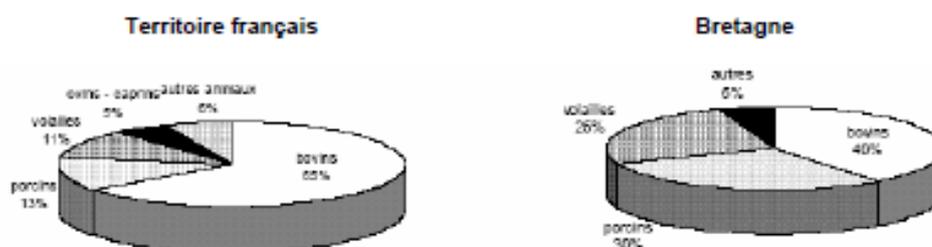


Figure 12 : Estimation de la répartition du phosphore des déjections animales produites annuellement en France dont le total représente près de 310 000 tonnes de P (d'après Guegin, 1996 in CORPEN, 1998) Estimation de la répartition du phosphore des déjections animales produites annuellement en 2000 dont 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 tertiaire proposés par l'industrie (Aurousseau, 2001). La consommation d'engrais minéraux phosphatés a diminué 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, dans les zones à forte densité d'élevage (Pays-Bas, Danemark, Nord de l'Italie) et le nord-ouest de la France, 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.

2.3.2.4. Le phosphore dans les sols

· Le phosphore est de nature organique et inorganique

- a- **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.
- b- **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 12).

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.

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 formes 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 :

1. **Le phosphore total** regroupe toutes les formes du phosphore présentes dans le sol.
2. **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

0 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. on parle de P_2O_5 Dyer, en référence à la méthode la plus souvent utilisée.

3. 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 intra particulaire, 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).

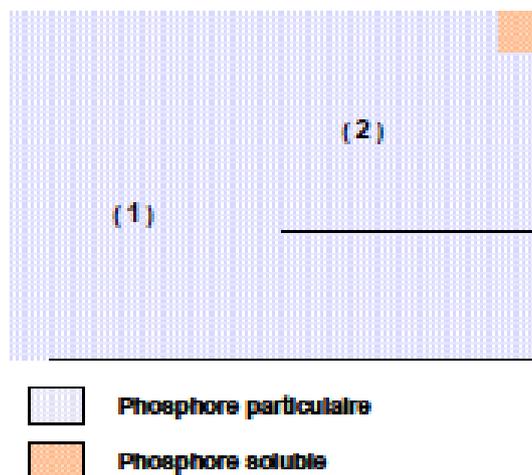
2.3.2.5. Le phosphore dans l'eau

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).

1. Le phosphore est dit soluble (P-soluble) quand il n'est pas retenu par un filtre dont les pores ont une taille de $0,45 \mu m$. Pour l'essentiel, le phosphore soluble est constitué d'ions phosphates ou ortho phosphates 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.

2. Le phosphore particulaire ($> 0.45 \mu\text{m}$) 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.



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

Figure 13 : Répartition du phosphore total. Chaque fraction contient du phosphore minéral et dans une moindre part du phosphore organique.

2.3.2.6 Comportement du phosphore dans l'eau

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

a. 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.

b. 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.

c. 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 floccule 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.).

2.3.2.7 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, les déjections animales sont la principale source de phosphore apportées aux sols. La contribution des productions animales hors sol (porcs et volailles) est la plus importante (Tableau 7).

Tableau 7 : Estimation de la production annuelle de phosphore d'origine animale en 2000 (d'après Giovanni, 2002)

	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 (P ₂ O ₅) 56 (P)	

Le phosphore des engrais minéraux

Le “superphosphate” est une forme d'apport d'engrais minéraux phosphatés très soluble. 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 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. (Figure14)

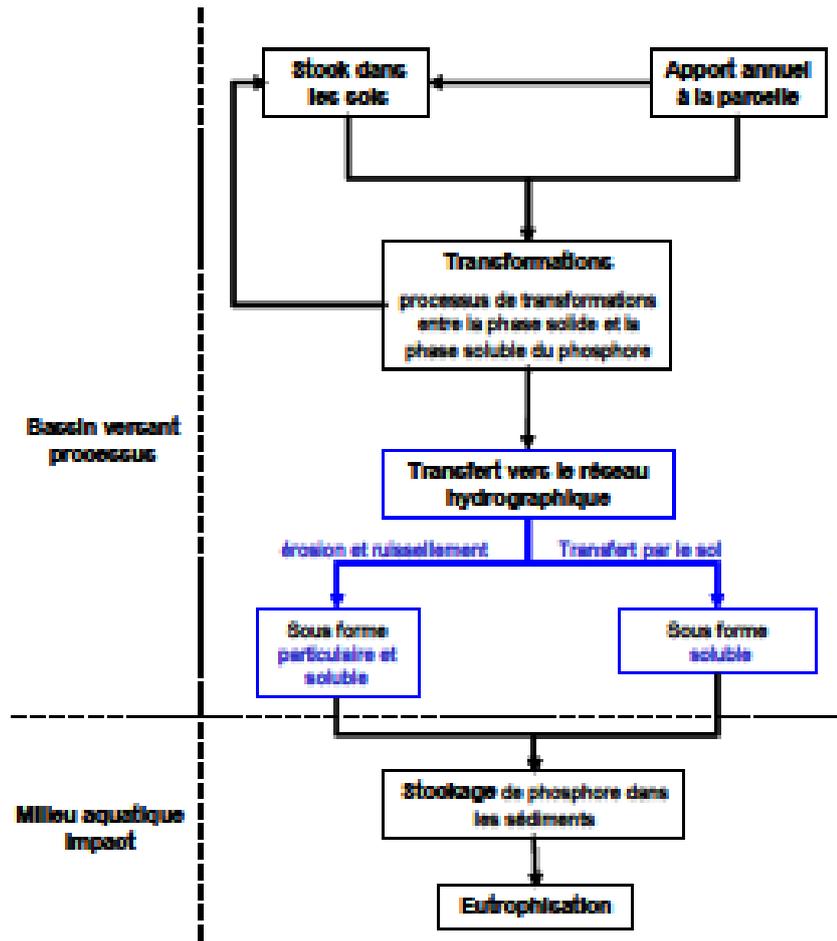


Figure 14: Les processus de transfert du phosphore dans le bassin versant

2.3.2.8 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 14).

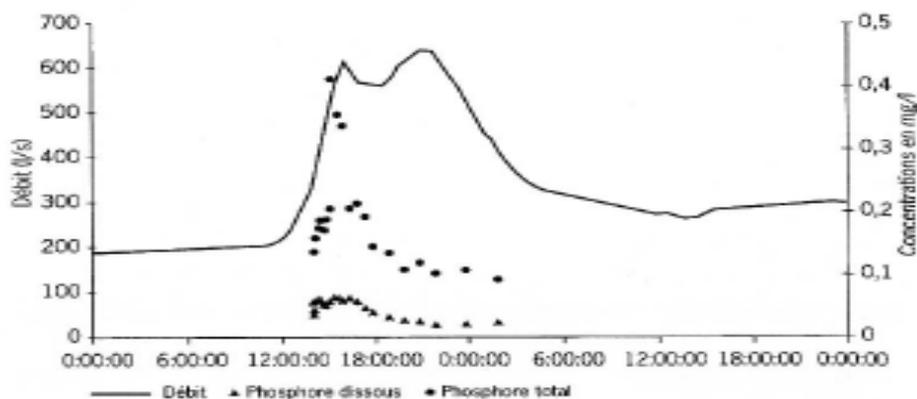


Figure 15 : Exemple de variation des concentrations en phosphore dans l'eau pendant une crue (la crue des 25-26 mai 1998 sur le Coët-Dan), Cann et al., 1999.

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 suspensions (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)

2.3.2.9 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).

Les quantités de phosphore total transférées augmentent avec le taux d'érosion et 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 suspensions (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 .

Tableau 6 : Estimation de l'enrichissement entre le sol et les MES transférés par ruissellement (Arousseau, comm. Pers.)

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

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.

2.3.2.10. Mode de transfert du phosphore soluble

Le phosphore soluble suit les mêmes processus de transfert que les écoulements d'eau. 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 transferts 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.