

2.0 Cycles des éléments nutritifs

Faits saillants

- ❖ En l'absence d'activité humaine, les apports dans le sol de l'azote nécessaire à la croissance des végétaux provenaient principalement des micro-organismes qui transformaient l'azote gazeux en ammoniac. Le phosphore biodisponible dans le sol provenait en grande partie de l'altération de roches phosphorées.
- ❖ L'activité humaine a fait augmenter la production d'azote et de phosphore biodisponibles.
- ❖ Les effluents municipaux, industriels et agricoles ont fait augmenter énormément les apports de phosphore et d'azote dans les écosystèmes d'eau douce et côtiers.
- ❖ La production d'engrais a accéléré le taux de fixation de l'azote atmosphérique sous forme d'ammoniac et a nécessité l'exploitation minière des roches phosphorées.
- ❖ Sous l'effet du brûlage de combustibles fossiles, l'azote et l'oxygène de l'atmosphère se combinent et forment du monoxyde d'azote (NO) et du dioxyde d'azote (NO₂), qui concourent à la production du smog photochimique et des pluies acides, ainsi que d'oxyde nitreux (N₂O), qui contribue au réchauffement dû aux gaz à effet de serre.

À l'instar d'autres éléments chimiques, l'azote et le phosphore circulent dans la biosphère entre le milieu abiotique et les organismes vivants, qui les retournent ensuite au milieu. Ils empruntent des voies caractéristiques, plus ou moins circulaires, appelées cycles biogéochimiques, qui décrivent les formes chimiques, les voies et les réservoirs d'une substance donnée. Les cycles biogéochimiques se divisent en deux grandes catégories: les cycles de type gazeux dont l'atmosphère constitue un grand réservoir et les cycles de type sédimentaire dont les roches minéralisées constituent le plus grand réservoir. Le cycle de l'azote est un exemple de cycle gazeux complexe, tandis que celui du phosphore représente un cycle sédimentaire simple. Pour comprendre l'impact de l'activité humaine sur le transport, le devenir et les effets de l'azote, du phosphore ou de tout autre élément, il faut tout d'abord évaluer le cycle biogéochimique avant son bouleversement par l'homme puis examiner les changements provoqués par l'activité humaine dans les voies et les réservoirs.

2.1. Cycle de l'azote

Le cycle de l'azote est essentiellement un processus de transformation de l'azote atmosphérique (N₂), un gaz inerte, en formes assimilables par les systèmes biologiques qui les restitueront à l'atmosphère sous forme de N₂ (figure 2.2). Le cycle de l'azote est unique, car, même si l'azote constitue 80% de l'atmosphère terrestre, il s'y retrouve surtout sous une forme gazeuse (N₂) qui ne peut être utilisée telle quelle par la grande majorité des organismes.

Dans l'atmosphère, l'azote existe principalement sous forme d'azote gazeux, d'oxydes d'azote (N₂O, NO et NO₂) et d'ammoniac (NH₃). L'azote gazeux peut être produit par la dissociation d'oxyde nitreux (N₂O) et être détruit par suite de sa conversion en monoxyde d'azote (NO) par les décharges électriques lors des orages (figure 2.2). L'oxyde nitreux (N₂O) peut également interagir avec un atome

hautement réactif d'oxygène pour former NO et le dioxyde d'azote (NO₂). Un excès d'éléments nutritifs dans un écosystème peut entraîner une prolifération de la végétation et des modifications de la biodiversité. De plus, l'ammoniac, les nitrates et les nitrites sont toxiques pour les animaux aquatiques et terrestres, y compris l'être humain, lorsque leurs concentrations dépassent les besoins. Ces derniers peuvent à leur tour réagir avec la vapeur d'eau pour former de l'acide nitrique (HNO₃).

Une réaction entre des radicaux ammoniac et hydroxyle (OH⁻) peut également entraîner la formation d'oxydes d'azote. Les deux oxydes d'azote les plus courants, NO et NO₂, ont aussi leur propre cycle dans lequel intervient une réaction complexe entraînant la conversion en ozone d'une molécule d'oxygène et d'un atome hautement réactif d'oxygène (figure 2.2).

Pour que l'azote circule entre le sol et la végétation, il faut que l'azote atmosphérique inerte soit converti en azote réactif. Avant l'industrialisation, il n'existait que deux processus de transformation de l'azote gazeux inerte en azote réactif: la fixation biologique de l'azote (c.-à-d. la production d'ammoniac par des micro-organismes) et la foudre (qui entraîne la production de monoxyde d'azote, NO). La fixation biologique de l'azote est la transformation du N₂ de l'atmosphère en ammoniac et son intégration directe à des tissus vivants. Un nombre restreint d'espèces de bactéries possèdent le système enzymatique nécessaire pour accomplir cette tâche. Mentionnons notamment les algues bleu-vert (ou cyanobactéries) dans les eaux douces, certaines bactéries du sol et les bactéries symbiotiques associées aux nodosités des racines des légumineuses et des aulnes. Outre la fixation biologique, le NO produit par la foudre peut être transformé en nitrate. À l'instar de l'ammoniac, le nitrate peut être déposé à la surface de la Terre par la neige ou la pluie (dépôt humide) ou sous forme de particules, comme des sels de nitrate et d'ammonium (dépôt sec).

Une fois fixé, l'azote peut être transformé en azote organique dans l'organisme fixateur ou être libéré par l'organisme sous forme d'ammonium ou d'urée. Dans des conditions aérobies, des espèces spécialisées de bactéries transforment l'ammonium en NO₂⁻ et NO₃⁻, un processus appelé nitrification. Toutes les plantes marines, d'eau douce et terrestres assimilent l'azote sous forme de NH₄⁺ ou NO₃⁻, à l'exception de certaines espèces des marais qui ne peuvent utiliser que le NH₄⁺. Ce processus d'assimilation entraîne l'absorption d'azote par les racines ou d'autres cellules, la réduction par assimilation de NO₃⁻ en NH₃ et la conversion par voie métabolique en tissus. En broutant, les animaux ingèrent l'azote organique des plantes et sont, à leur tour, consommés par des carnivores. Les animaux excrètent des déchets azotés sous forme d'urée, d'acide urique ou de fèces qui, sous l'action

Formes d'azote dans l'environnement

| Nom du composé | Symbole | Composante de l'environnement | L'état |
|---|------------------------------|-------------------------------|----------------|
| Ammoniac non ionisé | NH ₃ | eau, sol, air | aqueux |
| Ammoniac ionisé, ion ammonium | NH ₄ ⁺ | eau, sol, air | aqueux, gazeux |
| Nitrate | NO ₃ ⁻ | eau, sol, air | aqueux |
| Acide nitrique | HNO ₃ | air | aqueux |
| Monoxyde d'azote | NO | air | gazeux |
| Nitrite | NO ₂ ⁻ | eau, sol, air | aqueux |
| Dioxyde d'azote | NO ₂ | air | gazeux |
| Azote gazeux | N ₂ | eau, sol, air | gazeux |
| Oxydes d'azote (y compris NO, NO ₂ , N ₂ O) | | air | gazeux |
| NO+NO ₂ | NO _x | | |
| Oxyde nitreux | N ₂ O | eau, sol, air | gazeux |

de microbes, sont retransformés en NH_3 . L'azote organique présent dans la matière organique morte subit une décomposition microbienne (humification) qui dégrade les composés de carbone et d'azote et finit par libérer des formes d'azote assimilables par les plantes.

Avant le développement de l'agriculture et la création d'établissements humains permanents, l'azote présent dans les sols, dans l'eau ainsi que dans le matériel animal et végétal était restitué à l'atmosphère surtout par dénitrification, la conversion bactérienne de NO_3^- en N_2O et en N_2 par les microbes présents dans les sols et l'eau dans un milieu pauvre en oxygène (Galloway et al. 1995). L'ammoniac était également libéré par volatilisation (un processus qui permet aux molécules de passer de la phase liquide à la phase gazeuse) à partir de la végétation, des sols et des déchets d'origine animale, sous la forme d'un sous-produit de la décomposition, et par suite de la combustion de biomasse. Une quantité comparativement moindre d'azote était dégagée sous forme de NO , un produit secondaire de la nitrification (transformation bactérienne de NH_4^+ en NO_3^-).

Dans le présent contexte d'industrialisation et d'agriculture intensive, la fixation de l'azote et les taux d'émission de cet élément ont changé en comparaison de l'ère préindustrielle. À l'heure actuelle, trois activités humaines produisent de l'azote réactif (en plus de deux phénomènes naturels): la combustion de charbon, de produits pétroliers et de gaz naturel qui rejette du NO dans l'atmosphère; la production d'engrais qui fixe l'azote gazeux sous forme d'ammoniac; et la culture de légumineuses et d'autres végétaux qui entraîne une fixation biologique de l'azote au-delà des niveaux naturels. Du fait de ces activités, le taux mondial de fixation de l'azote a plus que doublé par rapport à l'ère préindustrielle (Galloway et al. 1995; Vitousek et al. 1997).

L'importance des composantes de la voie sol-végétation du cycle de l'azote a également changé depuis l'ère pré-agricole. Avant l'avènement de l'agriculture, la majeure partie de l'azote nécessaire à la croissance des plantes provenait de la décomposition de la matière organique du sol par des micro-organismes. À l'heure actuelle, les engrais chimiques et le fumier constituent une source importante d'azote pour les cultures et, dans certains cas, pour les forêts aménagées à des fins de production ligneuse. En plus d'accroître la fixation de l'azote, l'homme a libéré des réserves biologiques à long terme en drainant des milieux humides, provoquant ainsi l'oxydation de leurs sols organiques. Les activités humaines ont également redistribué l'azote entre les milieux terrestres et aquatiques et entre les écosystèmes par suite du rejet d'eaux usées municipales et industrielles ainsi que du ruissellement ou du lessivage des terres aménagées à des fins d'urbanisation, d'exploitation forestière ou agricoles. La croissance de la plupart des espèces végétales terrestres a augmenté en réaction à ce surcroît d'azote, de sorte que ces apports additionnels d'azote, combinés à sa redistribution, ont vraisemblablement fait augmenter la croissance à l'échelle mondiale et, par conséquent, la quantité de carbone organique stockée dans les écosystèmes terrestres de la planète (Vitousek et al. 1997). Cependant, certains écosystèmes forestiers suscitent toujours la controverse, car il n'est pas clair que les gains de productivité dus à l'augmentation des dépôts d'azote, combinés à un réchauffement du climat et à une augmentation des concentrations atmosphériques de CO_2 , ont compensé les pertes de carbone imputables à l'exploitation forestière, au feu et à la mortalité causée par les insectes. Les apports additionnels d'azote dans les écosystèmes terrestres ont également gagné les eaux souterraines et superficielles, contribuant ainsi à la prolifération de plantes aquatiques (notamment dans certaines eaux côtières de la zone septentrionale tempérée) et à des dépassements des lignes directrices sur les nitrates et l'ammoniac destinées à protéger la flore et la faune aquatique (notamment près des sites où la gestion des eaux vannes ou des fumiers est déficiente.)

Le rôle de l'azote dans la pollution atmosphérique

Smog urbain

L'ozone de la basse atmosphère ou ozone troposphérique est une composante clé du smog urbain et constitue un problème particulièrement préoccupant dans plusieurs grandes régions urbaines du Canada au printemps et en été. Les réactions chimiques à l'origine du smog sont certes complexes, mais la principale caractéristique de ce phénomène est la dissociation du dioxyde d'azote (NO_2) qui est principalement introduit dans l'air par les émissions des gaz d'échappement et des industrie qui libèrent un atome d'oxygène (O^\bullet) et de monoxyde d'azote (NO) en présence de rayonnement solaire. Cet atome d'oxygène se combine à une molécule d'oxygène (O_2) pour former l'ozone (figure 2.1). La production d'ozone ne peut dépasser la disponibilité du NO , à moins qu'il n'existe un autre moyen de régénération du NO_2 . Les radicaux libres présents dans l'air contaminé par des hydrocarbures fournissent cet autre moyen. Ces radicaux libres se combinent avec le NO pour régénérer le NO_2 , qui se dissocie ensuite pour former une quantité supplémentaire d'ozone. Pendant le jour, les concentrations d'ozone augmentent jusqu'à ce que le taux de destruction de l'ozone égale le taux de production photochimique de l'ozone. Pendant la nuit, le smog urbain se dissipe, car la dissociation de NO_2 ne se produit qu'en présence de lumière solaire.

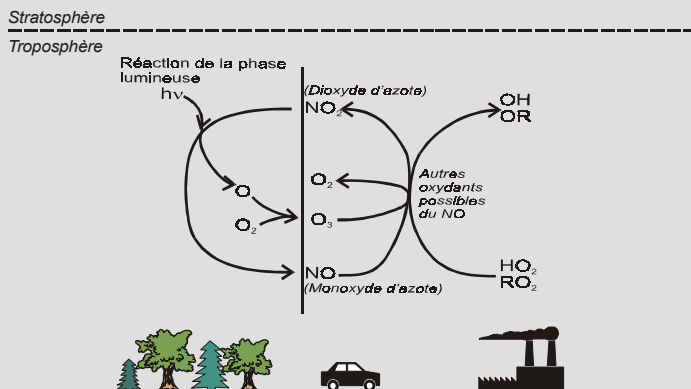


Figure 2.1. Le cycle NO_x -ozone ($h\nu$ est un photon; HO_2 et RO_2 sont des radicaux libres).

L'ozone troposphérique provoque une inflammation des voies respiratoires qui peut persister jusqu'à 18 heures après la fin de l'exposition. Il peut aussi aggraver les problèmes cardiaques et pulmonaires existants et peut les asthmatiques encore plus sensibles aux allergènes.

Réchauffement dû à l'effet de serre

La vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane et l'oxyde nitreux (N_2O) régulent la température de la Terre en réduisant la vitesse à laquelle le rayonnement s'échappe vers l'espace. Sans cet effet de serre, la Terre aurait une température plus basse d'environ 33°C et serait inhospitalière. Depuis la révolution industrielle, les concentrations de gaz à effet de serre se sont élevées régulièrement, presque à coup sûr sous l'effet de l'activité humaine. Au Canada, les scientifiques prévoient que les températures moyennes annuelles s'élèveront de 5 à 10°C dans certaines régions au cours des 100 prochaines années. Ils prévoient également une augmentation de la fréquence des phénomènes météorologiques exceptionnels.

L'oxyde nitreux (N_2O) est un puissant gaz à effet de serre dont le potentiel de réchauffement centennal est environ 310 fois plus élevé que celui du CO_2 . Les engrais, la combustion de la biomasse et de combustibles fossiles et les activités industrielles font augmenter ses concentrations atmosphériques. L'oxyde nitreux peut être détruit dans la stratosphère par photolyse ou par réaction avec des radicaux oxygénés où il catalyse la destruction de l'ozone stratosphérique. L'ozone de la haute atmosphère filtre les rayons ultraviolets solaires, et son amincissement entraîne une augmentation de l'intensité du rayonnement UV qui atteint la surface de la Terre.

Pluies acides

Les pluies acides résultent de la conversion de polluants comme le dioxyde de soufre (SO_2) et les NO_x (c.-à-d. le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO_2)) en acide sulfurique et en acide nitrique dans l'atmosphère. Des formes diluées de ces acides retombent sur Terre sous forme de précipitations ou de dépôts gazeux ou particuliers acides. Une source importante de SO_2 et de NO_x est la combustion de combustibles fossiles par les véhicules automobiles, par les appareils de chauffage domestiques et commerciaux et par les chaudières et moteurs industriels. Une fois libérés dans l'atmosphère, ces polluants peuvent être transportés sur de grandes distances. Ainsi, plus de 50 % des retombées acides sur l'Est du Canada proviennent de sources situées aux États-Unis.

Les précipitations acides provoquent la disparition de maillons importants du réseau trophique dans les lacs, y compris de crustacés, de plancton, d'insectes et, en bout de ligne, de poissons. Cette acidification a aussi pour effet d'accroître la toxicité des métaux lourds (l'aluminium par exemple). Dans les écosystèmes forestiers, les pluies acides peuvent endommager la surface des feuilles et des aiguilles des arbres, réduire la résistance au froid des arbres et inhiber la germination des graines et la reproduction de la végétation. Toutefois, l'azote contenu dans les précipitations acides peut également stimuler la croissance des forêts (voir la section 4.1). En fin de compte, les modifications des propriétés chimiques du sol dues aux pluies acides peuvent entraîner une diminution des teneurs en éléments nutritifs du sol et se traduire par un ralentissement de la croissance et une augmentation du taux de mortalité des arbres.

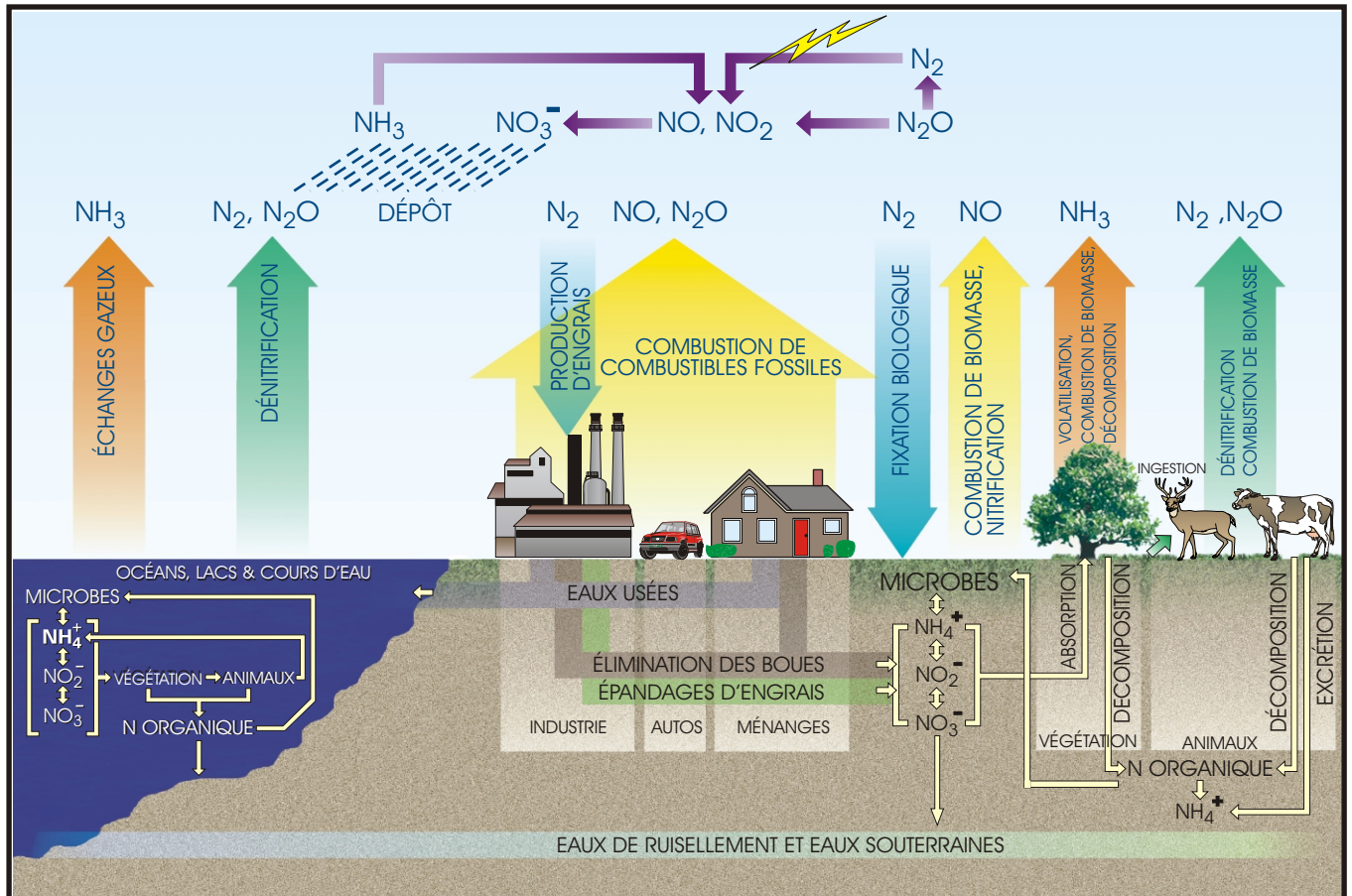


Figure 2.2. Le cycle de l'azote.

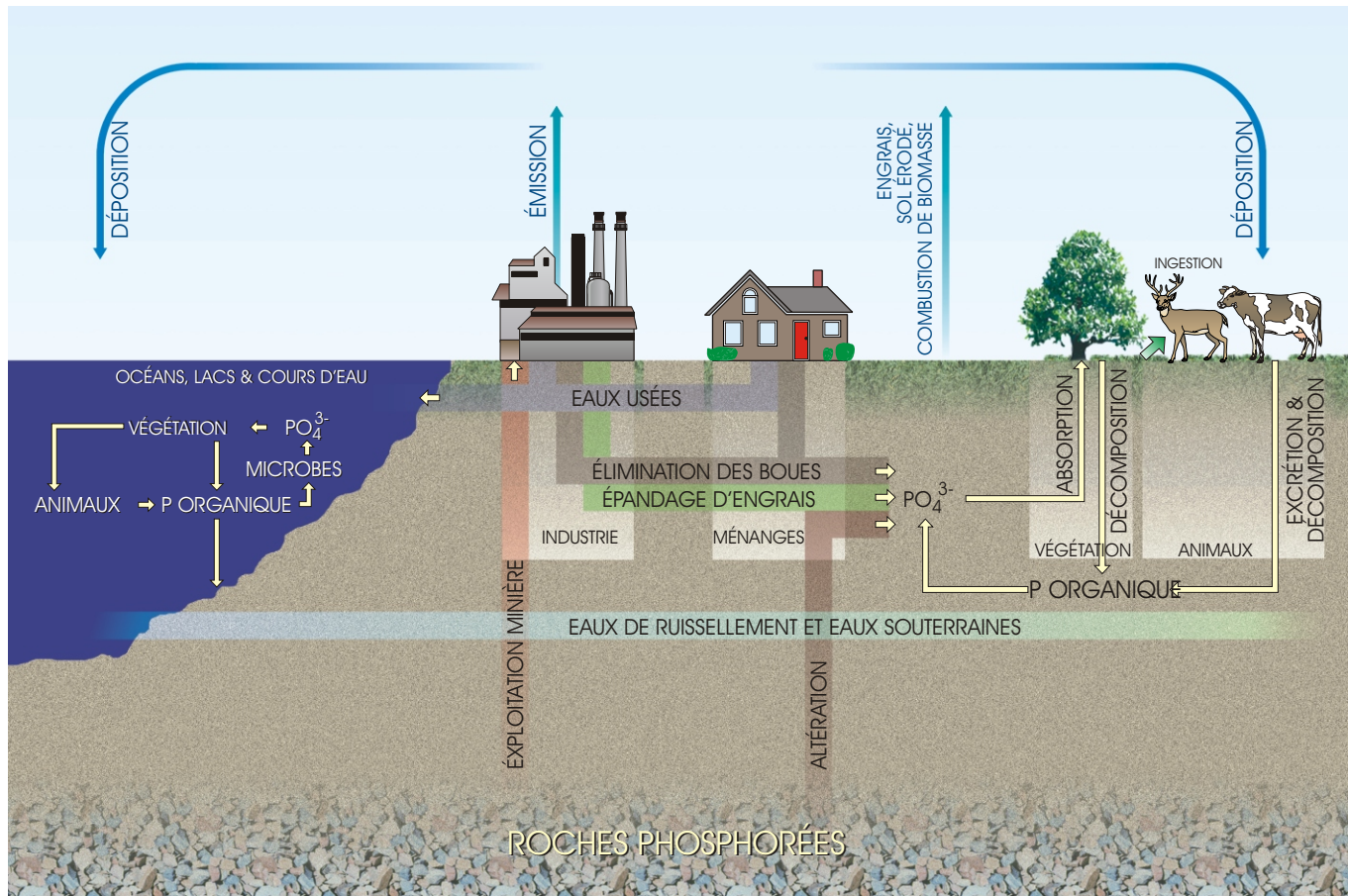


Figure 2.3. Le cycle du phosphore.

Par suite de l'augmentation de la fixation, de la libération et de la redistribution d'azote causée par l'activité humaine, la composition des gaz azotés dans l'atmosphère a changé et cette altération a contribué aux pluies acides, au smog urbain et au réchauffement de la planète. Les émissions d'ammoniac provenant des engrais, des champs fertilisés et des déchets d'élevage ainsi que de la combustion de biomasse sont devenues des sources atmosphériques majeures d'azote (Galloway et al. 1995). Les sols fertilisés et la combustion de la biomasse ont aussi entraîné une augmentation des émissions atmosphériques de NO et de N₂O. Ces émissions, combinées à celles du NO provenant de la combustion de combustibles fossiles, ont entraîné une élévation des concentrations atmosphériques d'oxydes d'azote. Le produit final de l'oxydation de NO est l'acide nitrique, une composante principale des dépôts acides (voir l'encadré intitulé « Le rôle de l'azote dans la pollution atmosphérique »). De plus, des concentrations plus élevées de monoxyde d'azote et de dioxyde d'azote réagissent avec l'oxygène et les radicaux libres des hydrocarbures pour produire de l'ozone troposphérique, un phénomène responsable du smog urbain. Enfin, des concentrations plus élevées d'oxyde nitreux contribuent au réchauffement de la planète, car elles absorbent le rayonnement infrarouge.

2.2. Cycle du phosphore

Contrairement à l'azote, le phosphore ne se retrouve pas à l'état libre dans la nature (c.-à-d. sous forme de P₄). Également à l'inverse de l'azote, dont le principal réservoir est l'atmosphère, le phosphore est principalement stocké dans des roches (l'apatite par exemple). La totalité du phosphore présent dans l'atmosphère provient de sources terrestres (p. ex., de l'érosion, de la dérive des engrais, des émissions industrielles, etc.). Enfin, à la différence de l'azote, le phosphore n'existe dans l'environnement que sous une seule forme réactive, l'orthophosphate (PO₄³⁻).

Avant l'industrialisation et l'agriculture intensive, les ions orthophosphatés (PO₄³⁻) produits par l'altération du matériau parental étaient la seule source de phosphore dans le sol (figure 2.3). Le phosphore est surtout absorbé de la solution de sol par les systèmes racinaires des plantes ou d'autres cellules. Les animaux broutent la végétation et excrètent dans leur urine et leur fèces le phosphore excédentaire sous forme de sels de phosphore. Le phosphore est ensuite directement absorbé ou minéralisé grâce à l'activité d'un large éventail de bactéries et de champignons qui le transforment en ions phosphatés (Ricklefs 1990). La décomposition de la matière organique restitue également du phosphore inorganique au sol. Le phosphate est extrêmement réactif et se lie à de nombreux cations (p. ex., le fer, l'aluminium et le calcium) pour former des composés à peu près insolubles. De ce fait, les phosphates sont stockés sous des formes peu labiles dans les écosystèmes terrestres et aquatiques.

En cette ère d'industrialisation et d'agriculture intensive, l'exploitation minière des roches phosphorées à des fins de production d'engrais a fait augmenter l'apport de phosphore dans les sols. Ces engrais sont épandus dans des endroits où les teneurs en phosphore sont naturellement faibles, à des doses largement supérieures à celles nécessaires à l'altération de la roche mère. De plus, des sources municipales et industrielles font augmenter la teneur en phosphore de l'eau (rejet d'eaux usées), de l'air (émissions des cheminées) et du sol (décharges, épandages de boues). Les eaux de ruissellement des terres aménagées à des fins d'exploitation forestière ou agricole constituent aussi une source importante de phosphore pour la végétation aquatique. Par conséquent, le phosphore est réparti sur l'ensemble de la planète sous forme de roches phosphorées, d'engrais, d'aliments pour le bétail et de produits agricoles ainsi que sous forme d'émissions résiduelles rejetées dans l'eau et dans

Formes de phosphore

On trouve le phosphore à l'état naturel comme phosphates inorganiques et intégré à des composés organiques. La détermination des diverses formes de phosphore procède d'analyses, mais les groupes analytiques ont été retenue afin qu'elle puisse servir à des fins d'interprétation.

Le phosphore total (PT) est une mesure de toutes les formes de phosphore dans un échantillon d'eau, de sol ou d'air (figure 2.4). L'analyse du PT exige une digestion à très haute température (afin de libérer le phosphore de la matière organique) suivie d'une analyse colorimétrique pour déterminer la teneur en orthophosphate (« colorimétrie »).

On mesure habituellement le PT des échantillons d'eau ainsi que deux formes de phosphore dissous, soit le phosphore dissous total (PDT) et le phosphore réactif soluble (PRS). Les formes de phosphore dissous restent dans le filtrat obtenu après le passage d'un échantillon d'eau dans une membrane à maille de 0.45 μm (figure 2.4). L'analyse du PDT exige une digestion à très haute température du filtrat, suivie d'une analyse colorimétrique, tandis que le PRS n'est déterminé qu'à l'aide d'une analyse colorimétrique.

Dans les sols, le phosphore est lié à la surface des particules. On évalue sa biodisponibilité pour la végétation à l'aide de diverses méthodes d'extraction plus ou moins intenses.

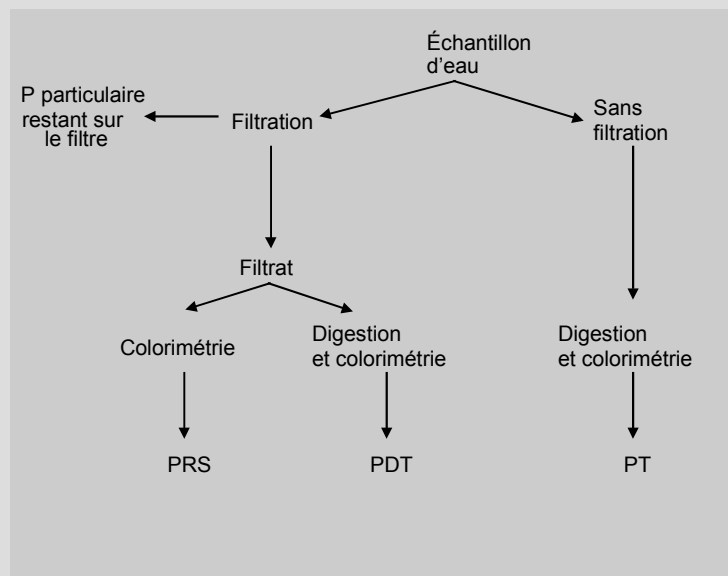


Figure 2.4. Formes de phosphore analytique dans l'environnement aquatique.

l'atmosphère. La croissance de la végétation de la plupart des écosystèmes d'eau douce étant limitée par une carence en phosphore, l'apport de phosphore, quoique sous forme diluée, peut entraîner des augmentations importantes de la productivité des lacs et des cours d'eau.

2.3. Conclusions

L'activité humaine a fait augmenter les apports des formes biodisponibles d'azote et de phosphore. Dans le cas de l'azote, l'azote atmosphérique est transformé en élément fertilisant des produits cultivés dans les champs qui sont ensuite transportés vers les zones urbaines. Les eaux usées des villes, dont la teneur en azote est élevée, sont rejetées dans les eaux de surface, car elles peuvent être trop contaminées ou trop coûteuses (en raison de leur transport sur de grandes distances) à épandre sur des terres agricoles. La combustion de combustibles fossiles (par les industries, les automobiles et à des fins de chauffage des habitations) accroît la production d'oxyde d'azote, car les températures

élevées auxquelles elle est associée provoquent la combinaison de l'azote atmosphérique à l'oxygène de l'air. Par conséquent, la quantité d'azote disponible a plus que doublé depuis les années 1940, les activités humaines contribuant pour 210 millions de tonnes par année à l'approvisionnement mondial en azote comparativement à seulement 140 millions de tonnes produites chaque année avant l'ère industrielle (Vitousek et al. 1997). Les altérations anthropiques du cycle de l'azote ont fait augmenter les concentrations mondiales de N_2O , un puissant gaz à effet de serre, ainsi que celles des oxydes d'azote à l'origine de la formation du smog photochimique dans de vastes régions de la Terre, les sources d'azote pour la végétation, le transfert d'azote dans les écosystèmes d'eau douce et côtiers et l'acidité des eaux de surface en raison de l'apport de nitrates (Vitousek et al. 1997).

Le cycle du phosphore a subi des changements similaires. L'exploitation minière de quelque 17 millions de tonnes de phosphore chaque année éclipse maintenant l'altération des roches phosphorées qui était autrefois la source de phosphore. Les engrais de synthèse sont transportés loin du lieu d'extraction et épandus dans des champs. Les produits agricoles sont à leur tour transportés sous forme d'aliments vers des régions spécialisées dans l'élevage et vers des zones urbaines. Les eaux usées des villes sont rejetées dans les eaux de surface, car elles peuvent être trop contaminées ou trop coûteuses à épandre sur des terres agricoles. Les conséquences environnementales des altérations anthropiques du cycle de l'azote et du phosphore sont graves et de longue durée.

