

# phosphore, azote et prolifération des végétaux aquatiques

par Guy Barroin

INRA - Hydrobiologie et faune sauvage, BP 511, 74203 Thonon-les-Bains  
barroin@thonon.inra.fr

*C'est à partir des substances minérales dissoutes dans l'eau que les algues synthétisent leurs tissus. Du point de vue de la structure, le carbone est le composant principal, après l'hydrogène et l'oxygène. Mais c'est le phosphore qui, en conditions naturelles, est le tout premier nutriment à faire défaut pour assurer la synthèse de nouveaux tissus, avant l'azote et le carbone. Le phosphore est dit « facteur limitant », notion empruntée à l'agronomie. C'est également le facteur de maîtrise puisque c'est en agissant sur lui qu'il est possible d'augmenter ou de réduire les proliférations algales.*

*En déversant dans le réseau hydrographique des quantités considérables de phosphore, les activités humaines, qu'elles soient domestiques, industrielles ou agricoles, induisent une carence en azote. Cette situation stimule la prolifération de cyanobactéries capables de fixer l'azote moléculaire dissous dans l'eau dont l'atmosphère constitue une réserve quasi inépuisable. Une fois métabolisé, cet azote se retrouve dans le milieu aquatique et participe à son fonctionnement au même titre que les apports anthropiques. D'autres espèces cyanobactériennes peuvent se développer en raison de leur aptitude à proliférer dans les conditions d'éclairement réduit qu'entraîne les proliférations algales, toutes espèces confondues. Mise en évidence à l'échelle réduite de temps et d'espace propre à l'expérimentation scientifique, la carence en azote fait apparaître ce dernier comme facteur limitant, ce qui occulte le fait qu'à l'échelle globale de l'hydrosystème c'est le phosphore qui est le facteur limitant puisque c'est lui qui déclenche la fixation biologique de l'azote.*

*Outre leurs remarquables facultés d'adaptation, les cyanobactéries ont une taille, une consistance et une toxicité qui empêchent les prédateurs potentiels (zooplancton herbivore) de les consommer si bien qu'elles finissent par dominer le peuplement algal. Il en résulte une profonde dégradation de la structure et du fonctionnement du réseau trophique qui vient s'ajouter aux problèmes spécifiques posés par les toxines qu'elles sécrètent pour porter atteinte aux divers usages attendus de l'eau. Lesquels usages doivent par ailleurs subir les méfaits de la désoxygénation engendrée par les excès de biomasse algale. Alors que la désoxygénation de l'eau entraîne l'élimination de toutes les formes supérieures de la vie, à commencer par les poissons de qualité (salmonidés), celle de l'interface eau/sédiment provoque la réduction des composés du fer et le relargage du phosphore qu'ils piégeaient, créant ainsi une charge interne qui vient s'ajouter à la charge externe du bassin versant pour intensifier le processus de dégradation. Cette implacable évolution en réponse à la pollution par les phosphates se manifeste d'autant plus intensément que le caractère stagnant des eaux est prononcé.*

---

Texte établi pour les Assises internationales Envirobio « gestion des risques  
santé et environnement : le cas des nitrates », réunies à Paris les 13 et 14 novembre 2000.

On lira ici, au-delà du texte introductif en italiques, la seconde partie de la contribution. Le texte originel, complet, est en ligne à  
[www.inra.fr/dpenv/barroc48.htm](http://www.inra.fr/dpenv/barroc48.htm)

Au lecteur intéressé mais dépourvu de moyens internautes, le *Courrier* enverra, sur simple demande écrite, une « sortie papier » de cette longue page.

## Sensibilité locale et pollution globale

L'utilisation de l'eau pour véhiculer la pollution offre le double avantage aux populations amont d'une évacuation et d'un traitement gratuits. Gratuité du traitement à mettre sur le compte de cette fameuse « autoépuration » à laquelle il est fait appel quand il n'est pas question d'éviter une pollution ni d'investir dans son traitement. Encore faut-il savoir de quel type de pollution il est question et quels sont les mécanismes d'autoépuration mis en jeu. L'attention ayant été focalisée dès l'origine sur des problèmes d'hygiène et de santé publique, la pollution bactériologique et son support organique ont été les premiers concernés par une autoépuration à deux composantes : la minéralisation de cette matière organique, grâce à l'oxygène dissous dans l'eau, et la dilution par les apports non pollués.

À l'extrême amont du réseau hydrographique, où le courant est rapide, voire torrentiel, l'oxygénation de l'eau et, par conséquent, la minéralisation de la matière organique sont maximales. De plus, la pollution y est minime et rapidement diluée par des eaux encore pures. À mesure que l'on progresse vers l'aval, le courant ralentit, la minéralisation se fait de moins en moins bien, la pollution s'intensifie, le facteur de dilution diminue et l'autoépuration est de moins en moins performante. En revanche, le ralentissement de l'eau favorise le dépôt de sédiments, supports potentiels de plantes aquatiques, ainsi que la prolifération du phytoplancton. En effet, non seulement la diminution du taux de renouvellement favorise la multiplication cellulaire mais la sédimentation des particules entraîne une meilleure pénétration de la lumière, donc une meilleure photosynthèse. Qui plus est, les concentrations de phosphore vont en augmentant vers l'aval, augmentation qui concerne l'eau du fait de la multiplication des apports mais aussi les sédiments qui accumulent ce qui ne reste pas dans l'eau pour le restituer quand les conditions s'y prêtent : brassage par les vagues, bioturbation, variations de pH, désoxygénation avec disparition totale du nitrate, transfert par les plantes aquatiques...

Cette différence amont/aval qui apparaît au sein des eaux courantes en raison du ralentissement est encore plus marquée entre eaux courantes et eaux stagnantes. En mettant en œuvre l'équivalent de ce qu'offrent les stations d'épuration comme traitements physiques, chimiques et biologiques du fait du temps de séjour qui les caractérise, les eaux stagnantes jouent naturellement un rôle épuratoire. Une partie du phosphore est ainsi éliminée par sédimentation, le reste se trouvant à la base d'une pyramide trophique dont le sommet est occupé par le poisson. Tant que l'homme a été discret, elles ont été d'incalculables sources d'eau potable et de nourriture. Maintenant que l'eau a été élevée au statut de véhicule privilégié de la pollution, ces points bas du réseau hydrographique en sont devenus les « dépotoirs ». Après que les différents usages auxquels ils étaient destinés se soient détériorés, ils deviennent de véritables sources de nuisances quand ils rendent l'ultime « service gratuit », celui du lagunage sans entretien. Point bas définitif du réseau hydrographique continental, la mer n'échappe pas à ce destin.

## Le milieu marin

Le principe de « l'azote facteur limitant en milieu marin » est dû à Brandt qui l'énonça il y a plus de 100 ans, après l'avoir établi pour les eaux douces. Par la suite, alors que l'azote était toujours considéré comme facteur limitant des eaux marines, le phosphore finissait par le remplacer dans le cas des eaux douces. Il faut déjà bien reconnaître qu'en balayant tous les niveaux de complexité systémique, du plus petit, la culture d'algues, au plus grand, le lac en vraie grandeur, les recherches menées en eau douce offraient des bases particulièrement solides à la reconnaissance du rôle limitant du phosphore. Beaucoup plus solides en tout cas que celles qui permettaient à l'azote d'accéder à son statut de facteur limitant en milieu marin, ce dernier interdisant l'expérimentation en vraie grandeur, l'ultime degré de complexité, le seul véritablement démonstratif, celui qui avait été décisif en eau

douce. Il convient également de prendre en compte la diversité du milieu marin en commençant par distinguer le milieu pélagique (au large) du milieu côtier.

**Milieu pélagique.** Relativement isolé, le milieu pélagique vit de façon autonome. Les nutriments présents dans l'eau présentent un rapport azote/phosphore (N/P) proche de celui de la composition planctonique du fait qu'ils proviennent pour l'essentiel de la régénération par le plancton et qu'en retour ils sont consommés proportionnellement à ce même rapport. À l'occasion d'upwellings qui font remonter des eaux relativement plus riches en phosphore, les cyanobactéries marines fixent l'azote nécessaire au rétablissement du rapport N/P qui correspond à la composition planctonique. Une telle constance du rapport N/P de l'eau de mer et sa coïncidence avec celui du plancton témoignent du contrôle de la composition du milieu par les organismes. Bien que cette situation d'équilibre fasse apparaître l'azote comme autant limitant que le phosphore, donc plus souvent qu'en eau douce, les épisodes d'activité des fixatrices d'azote démontrent qu'en fait, le milieu est limité par le phosphore.

Cet équilibre ne peut être observé que dans les océans, leurs dimensions garantissant au milieu pélagique l'autonomie nécessaire. La situation est différente pour les mers et à plus forte raison pour les golfes qui subissent l'influence des apports du continent, des sédiments, voire des océans. C'est ainsi que les mers qui entourent la Suède présentent un gradient de salinité décroissant du sud au nord, depuis le Skagerrak qui touche la mer du Nord jusqu'à l'extrême nord du golfe de Botnie, en passant par le Kattegat et la Baltique proprement dite. Il est admis qu'à ce gradient de salinité correspond un « gradient de limitation » : alors que le Skagerrak, le Kattegat et la Baltique seraient limités par l'azote, le sud du golfe de Botnie le serait par l'azote et le phosphore à la fois, et le nord par le phosphore seul. En fait, les cyanobactéries interviennent pour rééquilibrer le rapport N/P en fonction des apports d'origine terrestre et éventuellement sédimentaire, ce qui signifie que ces mers sont limitées par le phosphore à l'échelle du système.

Quant à la Méditerranée, elle est connue pour constituer à l'échelle mondiale la plus grande masse d'eau en permanente oligotrophisation (appauvrissement en sels nutritifs). Ce phénomène s'explique par l'existence d'un courant d'eaux superficielles atlantiques relativement pauvres en nutriments qui, au travers du détroit de Gibraltar, vient combler un déficit hydrique provoqué par une évaporation supérieure aux apports d'eau douce, d'où la formation d'un contre-courant de fond qui chasse vers l'océan Atlantique les eaux profondes méditerranéennes, riches en nutriments. Il résulte de ce mécanisme remarquable une oligotrophie croissant dans le sens du courant superficiel atlantique, c'est-à-dire d'ouest en est. Ce gradient d'oligotrophie s'accompagne d'une limitation par le phosphore qualifiée de « paradoxe nutritionnel » tellement est enraciné le principe de la limitation par l'azote en milieu marin. Gradient d'oligotrophie et limitation par le phosphore ont tous deux été confirmés encore récemment. Mais que la Méditerranée soit limitée par le phosphore n'empêche pas certains de considérer les apports d'azote comme susceptibles d'y développer l'eutrophisation.

**Milieu côtier.** Malgré sa très forte diversité apparente, le milieu côtier peut se partager sur la base de critères hydrodynamiques entre zones exposées et zones abritées, ce qui équivaut à la distinction entre « courant » et « stagnant » pratiquée en eau douce. Dans les premières, l'intensité des processus d'advection et de mélange ne laisse pas le temps aux processus biologiques d'intervenir sur le rapport N/P si bien qu'au niveau de l'écosystème la production est limitée par un facteur autre que l'azote ou le phosphore (autre nutriment, lumière, température...), même si la croissance spécifique d'un organisme individuel peut être limitée à un moment donné par la concentration locale d'azote ou de phosphore.

La situation est totalement différente quand la zone est abritée, la faiblesse de l'hydrodynamique laissant la possibilité de s'exprimer à toutes sortes de processus en fonction des divers apports, à commencer par ceux du continent. Bien que, du fait de leur salinité, les eaux marines littorales soient considérées comme appartenant au milieu marin, d'un point de vue fonctionnel et avec le recul de la vision satellitaire, elles apparaissent surtout comme l'ultime point bas du réseau hydrographique

continental. En conditions naturelles, ou de faible anthropisation du continent, ces zones sont limitées par le phosphore. Parmi celles-ci, les plus fragiles sont les écosystèmes estuariens dans lesquels se déversent les apports continentaux car ils sont caractérisés par une exceptionnelle productivité naturelle en relation, d'une part, avec leur situation aval ultime qui leur assure une fertilité potentielle maximale et, d'autre part, avec des conditions spécifiques qui leur permettent d'exprimer au mieux cette fertilité potentielle.

La première de ces conditions résulte de ce qu'en se rencontrant, des eaux de force ionique différente engendrent un phénomène de floculation à l'origine du fameux « bouchon vaseux ». L'accumulation de matières organiques entraîne l'établissement de conditions réductrices qui provoquent une perte d'azote par dénitrification et un relargage de phosphore par réduction des composés ferriques. Cette charge interne de phosphore est d'autant plus forte que la réduction des sulfates amenés par l'eau de mer immobilise le fer sous forme de sulfure et réduit d'autant la capacité de fixation du sédiment vis-à-vis du phosphore. Par ailleurs, à marée basse, au niveau de la mince couche d'eau qui recouvre un sédiment assombri par le sulfure de fer et chauffé par le soleil, la minéralisation de la matière organique est particulièrement active et libère un phosphore immédiatement biodisponible. Enfin, vagues et marées ont pour effet de mettre tout ce phosphore à disposition du végétal comme dans les grands plans d'eau peu profonds, plutôt que de le perdre dans les sédiments, comme dans les lacs profonds stratifiés.

Tant que le phosphore est injecté de façon parcimonieuse, il reste facteur limitant tout au cours de l'année comme dans l'estuaire de la Göta älv, rivière alimentée par les eaux pauvres en phosphore du lac Vänern (Suède), le plus grand lac de Scandinavie, ou dans celui de la baie d'Apalachicola, en Floride, ou encore dans certains estuaires de la côte hollandaise qui reçoivent des eaux où le phosphore est sévèrement contrôlé. Compte tenu de l'augmentation colossale des apports anthropiques depuis

les temps préhistoriques, plus marquée pour le phosphore que pour l'azote, de tels écosystèmes sont devenus particulièrement rares. La plupart ont subi de profondes modifications. En un premier temps, on constate que l'azote limite la croissance végétale en été, alors que le phosphore continue à limiter la poussée printanière. Ce changement saisonnier de facteur limitant n'a rien d'exceptionnel ; il est dû à l'augmentation estivale du flux de phosphore relargué par le sédiment auquel s'ajoute un éventuel supplément de charge externe dû à l'accroissement saisonnier de l'activité humaine, en relation notamment avec le tourisme. En progressant, la pollution par les phosphates fait que la limitation





printanière par le phosphore s'estompe et que celle par l'azote finit par sévir toute l'année, jusqu'à ce qu'un nouveau facteur limitant intervienne, généralement la lumière.

Si cette évolution au cours des saisons et au fil de la pollution est tout à fait semblable à celle qui sévit en eau douce, la progression spatiale du phénomène de dégradation présente également les plus grandes similitudes. De même que, dans un lac, les premières manifestations se produisent sur les berges sous forme d'algues filamenteuses et périphytiques, en mer, ce sont les plages qui sont envahies par les macroalgues. Par la suite, c'est la masse d'eau qui est touchée par d'intenses proliférations phytoplanctoniques, aux « fleurs d'eau » des limnologues correspondant les « efflorescences » des océanographes, lesquelles finissent, les unes comme les autres, par éliminer quasiment toute autre forme de vie animale et végétale. Les pertes d'usage liées à cette dégradation du milieu sont également semblables, il n'y a guère que la potabilité de l'eau qui ne soit pas concernée en milieu marin, et pour cause ! En fait, la véritable différence porte sur les dimensions, aussi bien celles des dégâts, superficies touchées et masses végétales produites, que celles des moyens à mettre en œuvre pour lutter contre le fléau, ce qui implique également une différence au niveau des chances de succès.

## Moyens de lutte

Comme il vient d'être décrit dans les lignes précédentes, en conditions fortement anthropisées, le phosphore cède sa place de facteur limitant à l'azote. Le déficit relatif d'azote étant automatiquement comblé par les cyanobactéries fixatrices d'azote, ce dernier ne peut pas limiter la prolifération du végétal aquatique au niveau de l'écosystème, si bien que la poursuite du processus d'anthropisation fait qu'à son tour il cède sa place au carbone, l'élément nutritif limitant qui lui succède sur la liste du tableau I (ci-contre). En fait, à cause de l'auto-ombrage, c'est un facteur limitant énergétique qui intervient, la lumière, ce qui a pour effet de stimuler à nouveau des cyanobactéries, mais pas les mêmes.

**Intervention sur les apports.** Si, dans des conditions d'azote limitant, le gestionnaire veut augmenter la prolifération algale, par exemple pour accroître la production piscicole, il peut rajouter de l'azote, comme le ferait un agriculteur pour augmenter sa production céréalière. Mais il peut également rajouter du phosphore puisque les cyanobactéries fixatrices interviennent automatiquement pour rajouter l'azote manquant. D'ailleurs, dans son fameux traité de pisciculture, Arrignon, en 1976, n'écrivait-il pas que « le phosphore comme élément nutritif augmente le rendement en

Tableau I. **Concentration des éléments dans le végétal (demande), dans une eau naturelle (offre) et rapport demande/offre**

Avec 80,0, le phosphore a le rapport le plus élevé, c'est-à-dire la demande la moins bien satisfaite, viennent ensuite l'azote (D/O = 30,0), puis le carbone (D/O = 5,0).

Éléments	Symbole	Demande (végétal) %	Offre (eau) %	Demande/offre
Oxygène	O	80,5	89	1,0
Hydrogène	H	9,7	11	1,0
Carbone	C	6,5	0,001 2	5,0
Silicium	Si	1,3	0,000 65	2,0
Azote	N	0,7	0,000 023	30,0
Calcium	Ca	0,4	0,001 5	<1,0
Potassium	K	0,3	0,000 23	1,3
Phosphore	P	0,08	0,000 001	80,0
Magnésium	Mg	0,07	0,000 4	<1,0
Soufre	S	0,06	0,000 4	<1,0
Chlore	Cl	0,06	0,000 8	<1,0
Sodium	Na	0,04	0,000 6	<1,0
Fer	Fe	0,02	0,000 07	<1,0
Bore	B	0,001	0,000 01	<1,0
Manganèse	Mn	0,0007	0,000 001 5	<1,0
Zinc	Zn	0,0003	0,000 001	<1,0
Cuivre	Cu	0,0001	0,000 001	<1,0
Molybdène	Mo	0,00005	0,000 000 3	<1,0
Cobalt	Co	0,000002	0,000 000 005	<1,0

phytoplancton et en zooplancton et qu'il favorise en outre la fixation de l'azote par les bactéries. Un apport de nitrate de soude ou d'engrais ammoniacaux n'a pas d'intérêt évident. »

En revanche, si, plutôt que de les augmenter, le gestionnaire veut stabiliser les proliférations algales, il peut envisager d'intervenir sur l'azote, sachant que cette intervention ne peut que stimuler l'activité compensatrice des fixatrices d'azote, ce qui est écologiquement risqué. S'il compte améliorer substantiellement la qualité de l'eau en respectant la norme des 50 mg/l de nitrate (11 mg/l d'azote), édictée pour des raisons de santé publique et non d'environnement, il lui faudra se contenter d'un milieu où les algues prolifèrent à un équivalent de  $11/7,2 = 1,5$  mg/l de phosphore, c'est-à-dire à peu près aussi attractant qu'un bassin de lagunage. Et si son intention est de ramener les proliférations algales au voisinage de ce qu'elles pourraient être dans un plan d'eau à vocation touristique (environ 0,020 mg/l de phosphore), ou même à forte productivité piscicole (environ 0,200 mg/l de phosphore), intervenir sur l'azote nécessiterait de ramener sa concentration à une valeur voisine de 0,144 mg/l d'azote (0,660 mg/l de nitrate) dans le premier cas, c'est-à-dire inférieure au bruit de fond naturel, ce qui est techniquement impossible, et à 1,44 mg/l d'azote (6,60 mg/l de nitrate) dans le second cas, ce qui reste encore du domaine de l'exploit, les deux situations étant bien évidemment de nature à stimuler les fixatrices d'azote à l'extrême. Enfin, proposer de lutter contre la pollution par les phosphates en traquant le nitrate ne relève-t-il pas d'une logique pour le moins confuse ? Par contre, il est vrai que de réduire les concentrations de phosphore pour le rendre limitant a pour effet de réduire l'activité des fixatrices d'azote et, par conséquent, de réduire les concentrations de nitrate.

Que la pollution par les phosphates rende l'azote limitant dans un espace/temps restreint ne fait aucun doute. En inférer que l'azote est limitant à l'échelle de l'écosystème, c'est ignorer le rôle des fixatrices d'azote. Et vouloir, dans ces conditions, utiliser l'azote comme facteur de maîtrise est à la fois techniquement impossible et écologiquement risqué. C'est toujours le phosphore qu'il convient de réduire globalement, c'est toujours lui le facteur de maîtrise. Mettre quelque condescendance à reconnaître que « la prévention de la croissance des algues s'appuie souvent sur une limitation des niveaux de phosphates, simplement parce qu'il s'agit du paramètre le plus facilement influençable » comme le fait le Comité scientifique pour les phosphates en Europe, c'est ignorer que si le phosphore est plus facile à raréfier que l'azote, ce n'est pas pour de « simples » raisons de facilité technique mais bien parce que, fondamentalement, la nature l'a fait plus rare que l'azote.

Cette stratégie d'intervention peut sembler novatrice pour certains, déplacée pour d'autres, tant l'idée de la responsabilité du nitrate est ancrée dans les esprits. Ancrage facilité déjà par une certaine (mauvaise) volonté à voir de l'« eutrophisation » là où sévit la « pollution par les phosphates ». Mais ancrage facilité surtout par l'application d'une version « adaptée » du concept originel de facteur limitant : puisque, pour augmenter une production céréalière, il suffit d'augmenter le facteur limitant, pour réduire les proliférations algales, il suffit de réduire ce même facteur limitant et, s'il est « scientifiquement prouvé » que l'azote est le facteur limitant, c'est l'azote qu'il convient de réduire. Raisonnement qui témoigne d'une totale méconnaissance de l'abîme qui sépare l'augmentation d'une production céréalière de la diminution de proliférations algales, ne serait-ce que du point de vue de l'activité des fixatrices d'azote. Procédant sans doute d'un fort louable souci d'économie de pensée ce raisonnement présente cependant l'avantage considérable d'être simple, d'où son succès. Cela fait pourtant une quarantaine d'années que le limnologue suisse E.A. Thomas a établi les bases de la maîtrise des proliférations algales sur le phosphore et non sur l'azote, les deux principaux arguments étant que, en conditions naturelles, la pluie et les tributaires contiennent beaucoup moins de phosphore que d'azote et que des bactéries et des cyanobactéries sont capables de fixer l'azote gazeux en cas de déficit relatif.

Si le mal est pris à temps, une simple diète phosphorée permet de revenir rapidement à un état proche de l'originel. Encore faut-il que la diète soit suffisante pour ramener la charge externe au voisinage de ce qu'elle était à l'origine : il ne faut pas espérer éliminer 100% de l'effet en ne réduisant la cause que

de 50%, *a fortiori* quand la relation de cause à effet est plus sigmoïdale que linéaire et qu'on se trouve « en bout de plateau », ce qui est bien souvent le cas. Compte tenu de l'aptitude des sols à fixer le phosphore et des végétaux terrestres à le consommer, cette mise à la diète n'aurait dû rencontrer que les problèmes techniques, et financiers, de l'élimination au « fil de l'eau ». En fait, elle a surtout rencontré, et rencontre encore, les oppositions économiques à la « suppression à la source », mesure pourtant primordiale et la seule à être globalement efficace.

**Intervention sur le milieu récepteur.** Il est certain que discuter pendant plus d'un demi-siècle de la responsabilité de l'azote ou du phosphore, voire même du carbone, du phosphore des villes ou de celui des champs, de celui du métabolisme ou de celui des détergents etc., tout en laissant s'intensifier et se multiplier les apports de phosphore dans le milieu récepteur, ne pouvait qu'y intensifier et multiplier les problèmes au point que l'« eutrophisation », longtemps minimisée comme exception, se révèle être la règle et que les moyens à mettre en œuvre pour en venir à bout ne relèvent plus de la simple diète.

En effet, si l'on attend que les cyanobactéries envahissent toute la masse d'eau toute l'année et qu'une bonne partie du phosphore déversé s'accumule dans les sédiments pour constituer une véritable bombe à retardement prête à exploser sous forme de charge interne, une simple diète, même drastique, a de fortes chances d'être inefficace. Il est nécessaire d'intervenir directement sur le milieu en commençant par neutraliser cette charge interne. La façon la plus radicale d'y parvenir est de draguer les sédiments susceptibles de relarguer du phosphore. Si l'on renonce à extraire ces sédiments, des techniques sont disponibles qui permettent d'empêcher leur phosphore d'atteindre la zone trophogène<sup>1</sup>. Et même si l'on renonce à la fois à réduire la charge externe et à neutraliser la charge interne de façon efficace, il existe encore des techniques qui permettent de gérer au moins mal les conséquences de ce double renoncement. En fait, la limnologie opérationnelle offre toute une panoplie de moyens tant préventifs que curatifs pour lutter contre la pollution par les phosphates. Si leur mise en œuvre rencontre quelques difficultés, c'est moins par manque de connaissances que par manque de motivation.

**Mesures législatives.** Ces difficultés à réduire le flux global de phosphore parvenant en zone trophogène ne doivent pas servir de prétexte à retirer au phosphore son rôle de facteur de maîtrise pour l'attribuer à l'azote. Pas plus que l'aide apportée par la dénitrification au fonctionnement d'une station d'épuration ne doit servir d'argument à la réalisation de cette dénitrification pour lutter contre l'« eutrophisation ». Elles ne devraient pas non plus conduire à pratiquer une épuration à deux vitesses réservant aux « zones sensibles » un traitement complémentaire pour éliminer soit le phosphore, soit l'azote, soit le phosphore et/ou l'azote, selon la formule consacrée (*Journal officiel des Communautés européennes*, 1991). Il est bien évident que l'existence de zones continentales et littorales particulièrement fragiles incite à y déverser directement le minimum de phosphore mais, compte tenu de l'extrême solidarité du réseau hydrographique, ce n'est pas une raison pour autoriser le laisser-aller à l'amont, au contraire. Ces zones fragiles ne devraient pas être considérées comme des cas à part, des empêcheuses de polluer en rond malencontreusement disposées sur le réseau hydrographique, mais devraient plutôt servir d'« observatoires » témoignant de la dégradation trophique de l'ensemble des eaux de surface, témoignage que ne peut apporter une eau qui circule. Et c'est bien en se référant aux eaux courantes que l'agence de l'eau Loire-Bretagne considérait, en 1994, comme « très bonne » une eau titrant jusqu'à 100 µg/l de phosphore total et « bonne » jusqu'à 300 µg/l. Quand on sait que dans son fameux rapport réalisé en 1968 pour le compte de l'OCDE, Vollenweider concluait : « [...] il est probable qu'une eau est trophiquement en danger quand ses concentrations printanières dépassent 10 mg/m<sup>3</sup> [= 10 µg/l] de phosphore pour les combinaisons exploitables de phosphore [...] », et que même une perception plus laxiste du problème n'autorise guère plus de 50 µg/l de phosphore total moyen annuel, il ne faut pas s'étonner que la pollution par les phosphates se soit développée en toute légalité. Il est vrai que, depuis, dans le cadre du Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau (SEQ Eau) daté de janvier 2000, les agences de l'eau ont revu les limites à la baisse,

<sup>1</sup> Trophogène : couche dans laquelle se déroule le processus métabolique grâce aux matières inorganiques et à l'énergie lumineuse.

respectivement 50 et 200 µg/l. Quoi qu'il en soit, le texte de la CEE prescrit le traitement complémentaire « à moins qu'il ne puisse être démontré que cette élimination sera sans effet sur le niveau d'eutrophisation », ce qui condamne définitivement les zones qui, polluées de longue date, ont accumulé dans leurs sédiments suffisamment de phosphore pour constituer une charge interne efficace.

De nature à pratiquer la déphosphatation à l'économie, ces dispositions législatives ont surtout pour résultat de renforcer le rôle limitant de l'azote au fil de l'eau et au cours du temps, renforçant du même coup l'idée, fautive, qu'il convient de dénitrifier plutôt que de déphosphater. Il est étonnant qu'une telle vision cloisonnée du monde aquatique ait pu imprégner la loi quand on sait à quel point le moindre soupçon de connexion d'une eau avec le réseau domanial interdit d'y faire quoi que ce soit sans autorisation. Seule une vision globale est en mesure de préserver la qualité de l'eau pour plus tard, les futurs plans d'eau, et pour plus loin, la mer à commencer par ces zones où prospèrent ulves, entéromorphes et autres macroalgues.

**Le milieu marin.** C'est l'azote qui continue à constituer la cible des réductions d'apports nutritifs en vertu du principe de l'azote facteur limitant, renforcé par le constat que les zones à problèmes finissent par être limitées par l'azote.

Il est cependant de plus en plus proposé de traquer le phosphore autant que l'azote. Mis à part le principe des responsabilités partagées, dont la logique appartient plus au monde des assurances qu'à celui de la science, la raison véritablement scientifique d'intervenir aussi sur le phosphore est de réduire les poussées printanières qui sont à l'origine des problèmes ultérieurs de désoxygénation benthique et de croissance rapide des macroalgues, le contrôle de l'azote ne servant plus alors qu'à limiter les poussées estivales.

Les pays riverains des mers scandinaves reconnaissent la nécessité de réduire les apports de phosphore pour améliorer la qualité des eaux. La seule question qui reste en suspens est de savoir s'il ne faudrait pas également réduire les apports d'azote, réduction justifiée, d'une part, par son efficacité résultant d'une possible absence des fixatrices d'azote et, d'autre part, par les risques de voir apparaître des dinoflagellés toxiques pour un rapport N/P élevé, ce qui peut être interprété comme une réaction du plancton à un excès d'azote, aussi bien qu'à un déficit de phosphore. Quelle que soit l'interprétation proposée, un événement toxique remarquable ne peut se produire que si le bloom algal est lui-même remarquable, ce qui nécessite des concentrations de phosphore qui ne peuvent que très rarement exister à l'état naturel. C'est donc bien la pollution par les phosphates qui provoque les blooms phytoplanctoniques, et c'est l'intervention d'autres facteurs, notamment l'abondance relative d'autres nutriments tels que l'azote ou la silice, qui détermine le type de nuisance engendré par ces blooms : marées mucilagineuses à diatomées, marées toxiques à dinoflagellés...

Quant à ne traiter que le phosphore, comme en milieu d'eau douce, certains y voient le danger de réduire la rétention de l'azote dans le système estuarien, l'exportation du superflu en milieu pélagique ayant alors pour effet d'y stimuler les algues, en vertu, bien sûr, du principe de l'azote facteur limitant en milieu marin.

## Utilité du nitrate

Non seulement le nitrate n'est pas la bonne cible pour lutter contre la pollution par les phosphates, mais, bien au contraire, il contribue à en traiter les conséquences les plus néfastes : les cyanophycées fixatrices d'azote et la charge interne en phosphore.

**Les cyanophycées fixatrices d'azote.** En augmentant le rapport N/P, la présence de nitrate dans la zone trophogène empêche le développement des cyanobactéries fixatrices d'azote. C'est ainsi que des



épandages de nitrate sont utilisés pour maîtriser les proliférations cyanobactériennes provoquées par 50 ans de fertilisation phosphorée dans des eaux consacrées à la pisciculture. Il ne faut cependant pas compter sur des apports de nitrate pour éliminer des espèces cyanobactériennes présentes pour des raisons de manque de lumière, comme expliqué précédemment.

**La charge interne de phosphore.** Tant que le nitrate est présent à l'interface eau/sédiment, l'oxygène qu'il contient ( $O_3$  de  $NO_3^-$ ) entretient l'oxydation des composés du fer et empêche le relargage du phosphore qu'ils fixent. De plus, la forme liquide du nitrate en solution permet de transférer de l'oxygène à des concentrations bien supérieures à celles que permet l'utilisation du gaz  $O_2$  qui s'échappe sous forme de bulles dès qu'il est en sursaturation. L'injection de nitrate de calcium ( $Ca(NO_3)_2$ ) dans les sédiments constitue une méthode de traitement appelée « méthode Riplox », du nom de son inventeur en 1976, Willy Rippl (fig. 1). L'azote moléculaire  $N_2$  produit par la dénitrification se dissout dans l'eau et s'échappe vers l'atmosphère en cas de sursaturation. L'éventuel excès de nitrate contribue à empêcher le développement de fixatrices d'azote. La méthode prévoit d'ajouter du fer ( $FeCl_3$ ) pour assurer la fixation du phosphore, ainsi que de la chaux ( $CaOH_2$ ) pour obtenir un pH propice à la dénitrification.

Il est également possible de traiter un lac en déversant au contact du sédiment des effluents domestiques déphosphatés et nitrifiés, le nitrate produit en station d'épuration jouant le même rôle que celui du commerce utilisé dans la méthode Riplox.

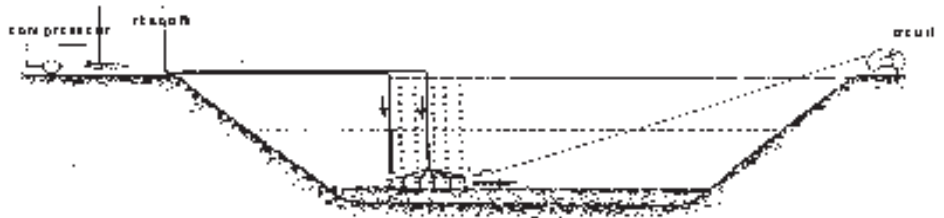


Figure 1. Dispositif utilisé pour traiter les sédiments selon la méthode Riplox

## À qui la faute ?

En fait, proposer d'éliminer le nitrate pour lutter contre la pollution par les phosphates résulte de l'application incorrecte du concept de facteur limitant et de l'utilisation abusive du terme d'« eutrophisation ». Ce qu'illustre parfaitement le chemin parcouru par la CEE pour en arriver à définir l'« eutrophisation » comme elle l'a fait dans sa Directive du 12/12/1991 :

- dans son texte de projet de directive « Nitrates » du 22/12/1988 la Commission reconnaît que : « la croissance normale des algues requiert environ dix fois plus d'azote que de phosphore. Dans la plupart des eaux douces, la quantité d'azote disponible par rapport à celle du phosphore dépasse cette proportion si bien que le phosphore est souvent l'élément nutritif qui limite la croissance des algues », ce qui est parfaitement exact ;
- elle propose alors de définir l'« eutrophisation » comme « l'enrichissement de l'eau en éléments nutritifs lorsque l'azote est le facteur limitant, provoquant... », proposition qui sous-entend que l'excès de phosphore est bien à l'origine du « développement accéléré des algues et des végétaux d'espèces supérieures... » ;
- pour en arriver à la définition de la Directive du 12/12/1991 : « l'enrichissement de l'eau en composés azotés, provoquant... », définition qui a le mérite de ne pas s'encombrer de sous-entendu et de faire de l'azote l'unique objet de l'attention du gestionnaire.

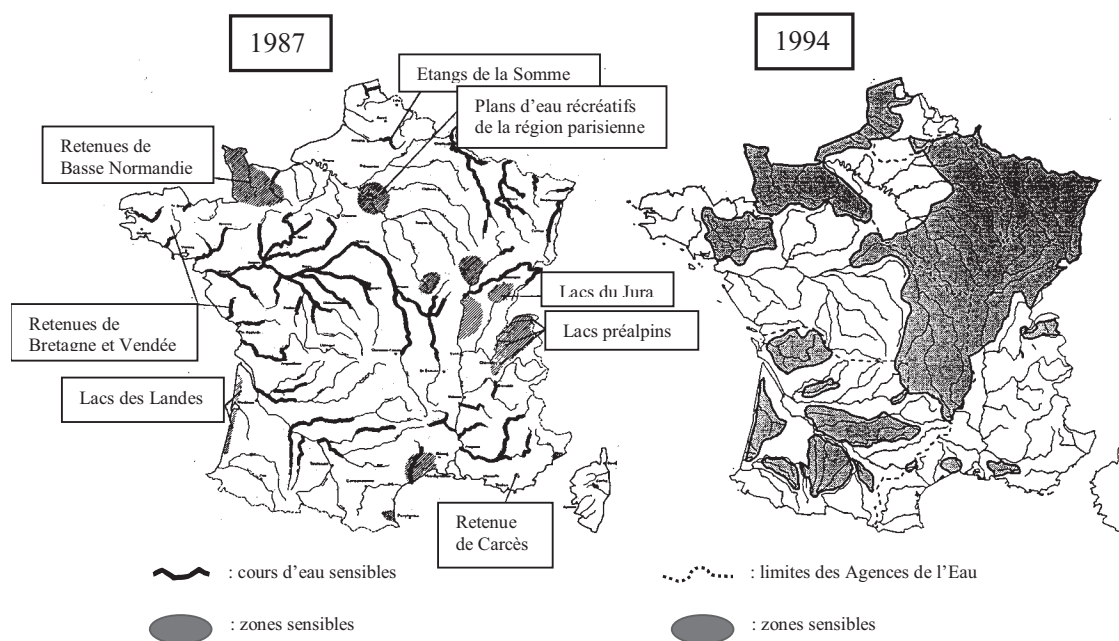
Ce glissement sémantique doit beaucoup au travail de communication réalisé depuis plus de trente ans par les industriels du phosphore lessiviel pour sauver l'image de marque de leur produit. Du coup, le

phosphore, toutes origines confondues, se trouvait innocenté, laissant sur le banc des accusés l'hydrodynamique, la température, la lumière, les oligo-éléments, les écotoxiques, le potassium, le carbone... et, bien sûr, l'azote. Le nitrate faisait un coupable d'autant plus acceptable que la recherche médicale les accusait par ailleurs de tuer les nourrissons et de provoquer le cancer, que les océanographes voyaient dans l'azote le seul et unique facteur limitant du milieu marin, et que l'agronomie faisait de la lutte contre le nitrate son plus fougueux cheval de bataille environnementale.

Il ne faut pas non plus négliger la part de responsabilité qui incombe à la méthode scientifique dans la constitution du dossier d'accusation du nitrate. En effet, de nature essentiellement réductionniste et expérimentale, elle attribue le rôle de facteur limitant sur la base de travaux nécessairement conduits à une échelle réduite de temps et d'espace. Qu'il s'agisse d'analyse physicochimique du milieu, de détermination de la composition tissulaire ou de tests de fertilité, l'échelle de l'étude est celle qui convient aux « bonnes pratiques scientifiques » avant d'être celle à laquelle se pose le problème, c'est-à-dire celle de l'écosystème limnique, si ce n'est celle de l'hydrosystème continental, voire planétaire. La réelle difficulté n'est pas de conduire correctement les travaux de recherche à l'échelle locale du laboratoire mais d'inférer correctement la réalité à l'échelle globale de l'écosystème à partir des résultats de ces travaux. La modélisation mathématique est l'instrument privilégié pour réaliser cette inférence en raison de ses capacités opérationnelles ; encore faut-il qu'elle repose sur des bases conceptuelles saines. Si tel n'est pas le cas, elle n'a pas pour vocation de corriger les défaillances, elle a surtout pour effet de les valider.

Peut-être faut-il évoquer à ce propos l'inaptitude conceptuelle fondamentale qu'éprouve *Homo sapiens* à concevoir l'extrême réactivité et l'extrême solidarité du monde aquatique. Depuis des millénaires, il est habitué à la lenteur des réactions propres au milieu terrestre et à leur puissant ancrage dans le sol, support dont la stabilité est passablement fiable. En jouant de ses pratiques agricoles sur des portions d'espace/temps sélectionnées, il domestique ces réactions pour les adapter à ses besoins en quantité, en qualité et en vitesse. Peu de temps après avoir mis en évidence la carence en phosphore dont souffraient les sols européens au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, il a découvert de considérables gisements de phosphates qui lui ont permis de remédier à cette carence. Devant la lenteur des légumineuses et autres fixateurs naturels d'azote à satisfaire spontanément les besoins azotés des cultures soumises à une intense fumure phosphorée, *Homo industrialis* est devenu lui-même un puissant fixateur d'azote. Dans ces conditions, il lui est difficile d'imaginer avec quelle rapidité le milieu aquatique voit les fixatrices d'azote remédier à une carence azotée en n'importe quel endroit dès que les conditions leur sont favorables et à quel point il est illusoire de vouloir intervenir localement sur l'azote sous prétexte qu'il est tout aussi localement limitant. Le fait que l'« eutrophisation » ait constamment été considérée comme un phénomène local traduit bien cette inaptitude conceptuelle. Quant à la différence de délimitation géographique des « zones sensibles » entre novembre 1987 et décembre 1994, notamment en ce qui concerne le bassin de la Loire et la Région parisienne, témoigne-t-elle d'une réelle évolution de la situation ou plutôt de la difficulté qu'a l'administration à dépecer la solidarité aquatique ? Au point qu'en superposant les deux cartes c'est presque l'ensemble du territoire français qui apparaît touché par ce fléau réputé « local » (fig. 2, ci-après).

Au fil des décennies, les divers spécialistes de la gestion environnementale des eaux de surface s'accordant à reconnaître au phosphore sa qualité de facteur de maîtrise des proliférations végétales aquatiques, on pouvait imaginer le nitrate innocenté. C'était sans compter sur l'insistance d'experts totalement étrangers à ce domaine de compétence à voir dans l'azote le responsable de l'eutrophisation. « C'est dans les lacs et les rivières que l'on a observé les premières manifestations de la pollution par les nitrates.[...] Ce phénomène que l'on appelle eutrophisation... ». Cette introduction à un article sur la toxicité du nitrate rédigé, en 1985, par des spécialistes de la santé permettait d'ajouter d'entrée le poids d'un délit contre l'environnement à la lourde charge qui allait être ensuite développée pour ses délits contre la santé. Même s'il est reconnu que le nitrate non seulement n'est pas à l'origine de nitrosamines cancérigènes mais que « *moreover, there is now evidence that the*



**Figure 2. Cartes des « zones sensibles à l'eutrophisation » de 1987**  
(ministère de l'Environnement-agences de l'eau 11/1987) **et 1994** (arrêté du 23/11/1994)

*conversion of nitrate into oxydes of nitrogen prevents the formation of carcinogenic nitrosamines* »<sup>2</sup>, il est de bon ton de conclure que « ...there are still good reasons for limiting nitrate levels in [...]river systems. », car « high nitrate level in river systems will result in considerable environmental problems such as algal blooms. »<sup>3</sup>. Et quand son parent, l'ammoniac, dont les retombées sont supposées avoir un rôle néfaste sur la santé humaine se trouve lavé de tout soupçon, il est rappelé que ces retombées « peuvent avoir un effet déterminant sur le fonctionnement [des] écosystèmes : [...] eutrophisation des eaux et des milieux naturels... »<sup>4</sup>. Pourquoi évoquer, à tort, l'eutrophisation alors que l'azote ammoniacal est parfaitement connu autant pour la forte toxicité potentielle que pour la forte demande d'oxygène qu'il exerce sur le milieu récepteur ?

Que des écrits concernant la santé en appellent ainsi à l'environnement ou que, réciproquement, la méthémoglobinémie du nourrisson soit évoquée pour expliquer la toxicité du nitrate à l'égard de certains amphibiens californiens n'est pas sans rappeler la position du ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, en 1996, à propos de la toxicité du nitrate vis-à-vis de l'homme. En effet, dans un texte destiné à confirmer la réalité de cette toxicité, la démonstration commence étonnamment par : « Si l'on se place au plan de la santé humaine et animale, il ne faut certes pas exagérer les dangers directement liés aux nitrates » et tout le reste de l'argumentation s'appuie sur des considérations environnementales introduites par « la directive européenne sur les nitrates (1980) qui organise la maîtrise de la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole, [et qui] vise également la protection des milieux naturels et des écosystèmes perturbés par un excès d'azote ». Cette pratique qui consiste à déplacer le champ du débat pour y faire briller des propos hors sujet, faute de pouvoir argumenter dans le strict domaine concerné, relève du discours politique. Elle n'a pas sa place au sein des activités scientifiques dont le but n'est pas d'avoir raison mais de connaître la vérité.

<sup>2</sup> « Bien plus, on peut maintenant affirmer que la transformation des nitrates en oxydes d'azote empêche la formation de nitrosamines cancérogènes. »

<sup>3</sup> « Il y a encore de bonnes raisons de limiter les concentrations en nitrates dans les rivières [car] aux niveaux élevés sont associés des problèmes environnementaux graves comme les proliférations algales. » (Duncan *et al.*, 1997. *Comp. Biochem. Physiol.*, 118A(4), 939-948).

<sup>4</sup> Morvan *et al.*, comm. pers. 1999.



## En conclusion

En conditions naturelles, du fait qu'il est relativement plus abondant que le phosphore pour satisfaire les besoins nutritionnels des végétaux aquatiques, l'azote ne peut pas limiter leur croissance. Le facteur limitant, c'est le phosphore.

La pollution par les phosphates fait perdre au phosphore son statut de facteur limitant au profit de l'azote, ceci à la lumière de travaux de laboratoire forcément conduits à une échelle réduite d'espace et de temps. En fait, à l'échelle de l'hydrosystème, elle a pour effet de stimuler la fixation de l'azote par des organismes spécialisés (cyanobactéries), le déficit relatif d'azote d'origine anthropique étant ainsi comblé par de l'azote d'origine atmosphérique disponible en quantité illimitée. La croissance végétale dépend donc encore des seuls apports de phosphore : le facteur limitant, c'est encore le phosphore.

La croissance incontrôlée des végétaux aquatiques en réponse à la pollution par les phosphates a pour conséquence de modifier profondément la structure et le fonctionnement des hydrosystèmes en relation notamment avec la prolifération des cyanobactéries, algues particulièrement nuisantes. Ces modifications s'accompagnent d'une dégradation de la qualité de l'eau qui équivaut à celle provoquée par la pollution organique et qui se traduit par des pertes d'usage touchant de nombreux intérêts économiques, voire vitaux.

Pour remédier à cette situation il est inutile, voire nuisible, d'intervenir sur l'azote. Le facteur de maîtrise, c'est le phosphore. En effet :

- toute réduction de l'azote est globalement vouée à l'échec du fait de l'activité compensatrice des fixatrices d'azote et seule une réduction des phosphates peut venir à bout des cyanobactéries, qu'elles soient ou non fixatrices d'azote ;
- seule une réduction du phosphore permet de ramener la prolifération végétale à une valeur proche de ce qu'elle est en conditions naturelles ; toute réduction de l'azote ne peut qu'éventuellement arrêter le processus de dégradation au niveau atteint quand la situation est suffisamment catastrophique pour qu'on s'y intéresse, ce qui est parfaitement insuffisant et ce qui suppose l'absence de l'activité

compensatrice des fixatrices d'azote à tout instant et en tout point de l'hydrosystème, supposition intenable.

Non seulement réduire les apports de nitrate n'est pas le bon moyen de lutter contre la pollution par les phosphates mais la présence de nitrate contribue à lutter contre deux conséquences particulièrement fâcheuses de cette pollution : la charge interne de phosphore et les cyanobactéries fixatrices d'azote. Il est cependant hors de question qu'un ajout de nitrate puisse venir à bout des cyanobactéries non fixatrices d'azote. Leur présence résultant d'un manque de lumière provoqué par l'auto-ombrage du phytoplancton stimulé par les apports de phosphore, leur élimination ne peut résulter que d'une intervention sur ces derniers.

Alors que la pollution par les phosphates concerne l'ensemble du réseau hydrographique en suivant un gradient amont-aval, les excès de végétation, témoins de cette pollution, ne touchent que les zones suffisamment calmes pour permettre aux algues et aux herbiers de proliférer et de se multiplier. Quand l'ensemble fonctionnel [écosystème récepteur + bassin versant] est de taille limitée et que la pollution par les phosphates dont il est l'objet est de faible intensité, ou qu'elle n'est pas trop ancienne, il est relativement aisé d'améliorer la qualité de l'écosystème. En revanche, les milieux de grande taille ayant reçu depuis longtemps d'importantes quantités de phosphore mises en mémoire dans les sédiments sont très difficilement récupérables.

Ce constat concerne également le milieu marin, pas fondamentalement différent du milieu d'eau douce, à commencer par les zones estuariennes. Exceptionnelles par leur fertilité naturelle, elles le sont aussi par leur fragilité, en raison notamment de leur positionnement à l'aval ultime du réseau hydrographique continental. Et ce ne sont pas des mesures locales visant « l'azote et/ou le phosphore », quand ce n'est pas l'azote seul, qui risquent d'améliorer leur état •

### Orientation bibliographique

BARROIN G., 1990. La pollution des eaux par les phosphates. *La Recherche*, 221, 620-627.

BARROIN G., 1991, La réhabilitation des plans d'eau. *La Recherche*, 238, 1412-1422.

BARROIN G., 1995. Les phosphates ou comment manipuler la science...*La Recherche*, 281, 56-60.

BARROIN G., 1999. *Limnologie appliquée au traitement des lacs et d'eau*. Agences de l'Eau, Étude n°62, 215 p. + figg.

A cliquer : [www.thonon.inra.fr/bassinversant/bassinversant-frame.htm](http://www.thonon.inra.fr/bassinversant/bassinversant-frame.htm)

On trouvera à [vmw.inra.fr/dpenv/barroc48.htm](http://vmw.inra.fr/dpenv/barroc48.htm) l'exposé complet (voir note au début de cet article).

