



**NOTICE TECHNIQUE ET CAHIER DES CHARGES TYPE :
DIAGNOSTIC DU FONCTIONNEMENT ECOLOGIQUE
D'UNE RETENUE EN CONTEXTE ELEVAGE**

- 1. Fonctionnement des retenues,
eutrophisation et moyens de lutte**
- 2. Protocoles d'étude et cahier des charges-type**

avril 2010





**NOTICE TECHNIQUE ET CAHIER DES CHARGES TYPE :
DIAGNOSTIC DU FONCTIONNEMENT ECOLOGIQUE
D'UNE RETENUE EN CONTEXTE ELEVAGE**

**1. Fonctionnement des retenues,
eutrophisation et moyens de lutte**

avril 2010



1.	FONCTIONNEMENT TROPHIQUE DES RETENUES	6
1.1.	Origine et conséquences générales de l'eutrophisation	6
1.1.1	Qu'est ce que l'eutrophisation et d'où vient-elle ?	6
1.1.2	Principaux phénomènes concernant le fonctionnement écologique des plans d'eau	7
1.1.3	Evolution naturelle, évolution anthropique	11
1.1.4	Toxicité des algues bleues.....	13
1.2.	Opposition et complémentarité des stocks accumulés et flux .	14
1.2.1	Formes du phosphore.....	14
1.2.2	Variabilité de la concentration.....	14
1.2.3	Le flux de phosphore dans le cours d'eau	15
1.2.4	Le phosphore des sédiments	17
1.3.	Relation entre phosphore et matière organique dans les retenues	19
1.4.	Cas des masses d'eau fortement modifiées (MEFM).....	20
1.5.	Synthèse des travaux du GEPMO concernant les matières organiques.....	20
1.5.1	Une qualité de l'eau dégradée avec une forte variabilité spatiale des concentrations moyennes	20
1.5.2	De très fortes variations au cours du temps avec une tendance globale à l'accroissement.....	21
1.5.3	Les facteurs responsables : climat, milieu physique, pratiques agricoles.....	21
1.5.4	Indicateurs et fréquences des mesures	22
1.5.5	Conclusion	24
2.	IDENTIFICATION DES ACTIONS A REALISER POUR ATTEINDRE LE BON ETAT	25
2.1.	Rappel des méthodes utilisées et retour d'expérience	25
2.1.1	Effacement du barrage	25
2.1.2	Limitation des apports directs de phosphore	25
2.1.3	Précipitation du phosphore (et des m.e.s.) de l'eau	26
2.1.4	Fixation du phosphore du sédiment	27
2.1.5	Epandage de bio-additif.....	28
2.1.6	Dragage.....	29
2.1.7	Destratification	30
2.1.8	Aération lente	32
2.1.9	Oxygénation hypolimnique.....	33
2.1.10	Lutte biologique.....	34
2.1.11	Destruction des algues par ultra-sons	35
2.2.	Pré-retenues tampon	36
2.2.1	Principes et caractéristiques requises.....	36
2.2.2	Retour d'expérience	37
2.3.	Discussion concernant les vidanges décennales	38

2.4. Récapitulatif des caractéristiques des différentes mesures préventives et curatives à mettre en place	39
2.4.1 Preamble.....	39
2.4.2 Délais de réponse d'un plan d'eau aux actions engagées.....	39
2.4.3 Coût des différents moyens de lutte contre l'eutrophisation	40
2.4.4 Comparatif des différents types de mesures de lutte contre l'eutrophisation.....	42
2.5. Conclusion	44
3. ANNEXES.....	45
3.1. Bibliographie concernant l'eutrophisation.....	45
3.2. Liste des chapitres et éléments de l'étude inter-Agences n° 62 à modifier lors d'une mise à jour	50
3.3. Liste des chapitres et éléments de l'étude inter-Agences n° 83 à modifier lors d'une mise à jour	50
3.4. Glossaire.....	51

L'exploitation des données qualité de l'eau disponibles pour les travaux d'élaboration du SDAGE a conduit au classement de la quasi-totalité des retenues du territoire « Vilaine et côtiers bretons » en fonctionnement eutrophe et en report de délais pour l'atteinte du bon état écologique pour le paramètre « trophie ».

Le projet de SDAGE identifie 10 retenues sur ce territoire pour lesquelles les exploitations agricoles situées sur leur bassin d'alimentation doivent atteindre l'équilibre de la fertilisation phosphorée pour 2015 au travers de la révision des autorisations (mesure 3B1 du projet de SDAGE).

Le programme de mesures sur le territoire de la commission territoriale « Vilaine & côtiers bretons » comporte enfin une action de diagnostic de fonctionnement des retenues identifiées eutrophes et classées en report de délais pour l'atteinte du bon état afin de hiérarchiser précisément les actions les plus pertinentes.

La connaissance des mécanismes à l'œuvre est un préalable à la mise en place des programmes d'actions adaptés, d'autant que, face aux coûts des actions à mettre en œuvre, l'argumentaire justificatif doit être solide.

Les principaux mécanismes à l'œuvre dans les retenues et qui conduisent aux phénomènes d'eutrophisation (balance des apports, sédimentation, relargage, mobilisation dans la chaîne trophique, dégradation, en fonction des paramètres physiques) sont donc décrits dans le présent rapport, à partir d'une typologie simple et réduite des retenues rencontrées dans le contexte des régions d'élevage.

Ce rapport a pour objectif de permettre la compréhension minimale des phénomènes.

Il sera suivi d'un cahier des charges techniques-type comportant la définition des protocoles de suivi des mécanismes à mettre en place, les principes de suivi de l'étude et les actions possibles à réaliser pour atteindre l'objectif de bon état.

Ces documents sont guidés par le principe voulu par le comité de bassin de privilégier les mesures préventives aux mesures curatives, et de subordonner les secondes à la mise en œuvre préalable des premières.

1. FONCTIONNEMENT TROPHIQUE DES RETENUES

Les synthèses ci-dessous sont établies à partir de trois sources d'information principales :

- . les études inter-Agences n°62 et 83 ;
- . les travaux du GEPMO, Groupe d'Etude sur la Pollution des Eaux par les Matières Organiques (université de Rennes) ;
- . une vingtaine de publications scientifiques.

Une bibliographie des 5 dernières années sur le sujet est donnée en annexe.

1.1. ORIGINE ET CONSEQUENCES GENERALES DE L'EUTROPHISATION

Ce chapitre n'a pas la prétention de résumer les traités de limnologie existants. Il a pour objectif de présenter des phénomènes complexes de manière simple et pédagogique, afin que les donneurs d'ordre puissent construire des cahiers des charges techniques adaptés.

1.1.1 Qu'est ce que l'eutrophisation et d'où vient-elle ?



Les eaux vertes des cours d'eau et plans d'eau, du printemps à l'automne, sont dues à des algues microscopiques (le phytoplancton) qui se développent en quantité excessive.

Ces eaux vertes et denses en surface des plans d'eau, improprement nommées « fleurs d'eau », sont une des manifestations visibles du **phénomène d'eutrophisation**. Il y en a malheureusement d'autres : par exemple, des poissons meurent et disparaissent, l'eau est trouble et la baignade et les sports nautiques dangereux ; il devient difficile de faire de l'eau potable et les traitements sont coûteux ...

De nombreuses retenues sont touchées, notamment en Bretagne, parce qu'une eau « ralentie » par un barrage est plus propice au développement des algues qu'une eau courante.

Les algues se nourrissent de matières minérales : principalement de carbone, d'azote sous forme de nitrates et d'ammonium, de phosphore sous forme de phosphates, et d'autres éléments minéraux en moindre quantité.

Dans un milieu naturel inhabité et sans activités humaines, les quantités de phosphates dans les eaux sont infimes, ce qui limite la croissance des algues, alors que les sources d'azote et de carbone sont quasiment illimitées (provenant de l'air et se mélangeant à l'eau). Or, les concentrations mesurées dans les cours d'eau sont beaucoup plus élevées. Cette carte ne montre



ainsi que de rares portions de rivière « en bleu », dans un état dénué de pollution. La qualité des rivières n'étant pas optimale, et le ralentissement de l'eau accentuant le développement des algues, de nombreux plans d'eau sont touchés par l'eutrophisation.

La lutte contre ce phénomène d'eutrophisation passe donc d'abord par la réduction des apports de phosphore dans les eaux, parce que cela est le plus efficace.

1.1.2 Principaux phénomènes concernant le fonctionnement écologique des plans d'eau

De l'eau

Un lac ou une retenue est alimenté par les pluies qui tombent directement sur sa surface, mais surtout par celles qui sont tombées sur son « bassin versant », territoire traversé par les ruisseaux et rivières arrivant au plan d'eau (et délimité par les lignes de crête les entourant) et/ou des eaux souterraines.

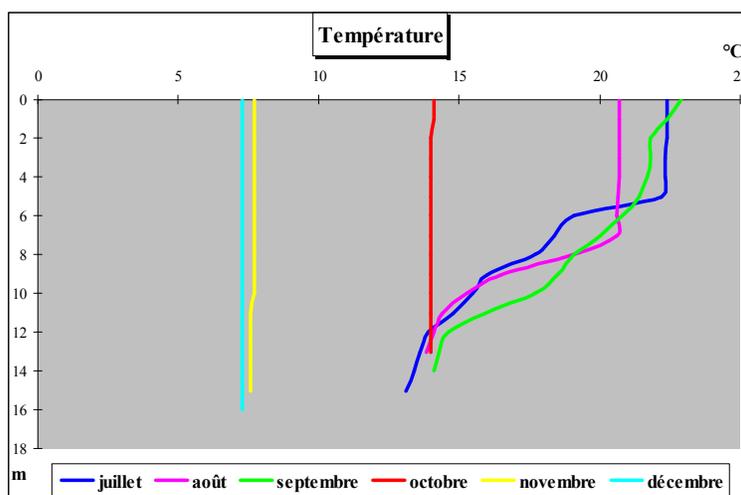
Une fois dans le plan d'eau, l'eau y séjourne d'autant plus longtemps que le débit des apports est faible et que le volume du lac est grand. On définit ainsi le « temps de séjour hydraulique » par le rapport entre le volume du plan d'eau et le débit à l'exutoire (en supposant que les précipitations directes compensent exactement l'évaporation directe et que les débits en entrée du plan d'eau sont égaux aux débits en sortie du plan d'eau, plus faciles à mesurer).

Le temps de séjour a un intérêt pratique car, plus il est long :

- . plus les algues ont le temps de se multiplier ;*
- . plus les particules fines ont le temps de se déposer pour former un sédiment ;*
- . plus des différences de la physique et de la chimie de l'eau peuvent apparaître de la surface au fond du plan d'eau ;*
- . moins le lac réagit rapidement aux modifications de la composition de ses apports.*

De l'énergie

La pénétration du soleil dans un lac au repos y provoque un échauffement qui s'atténue avec la profondeur. On devrait donc s'attendre à observer un gradient de température de la surface au fond, d'autant qu'une eau « plus » chaude est plus « légère », et flotte toujours sur une eau plus froide. En réalité, les refroidissements nocturnes, le vent, les arrivées d'eau ... homogénéisent une certaine épaisseur d'eau de surface « légère et chaude », superposée à l'eau profonde, « dense et froide ». Ce phénomène, qui varie avec la saison, est appelée une **stratification**.



On l'observe ainsi dans ce lac de juillet à septembre.

L'existence d'une stratification dans le plan d'eau est importante à connaître car elle conditionne de nombreux phénomènes, dont :

- . le bilan entre production, accumulation et dégradation de la matière organique,*
- . la présence d'oxygène nécessaire au bon fonctionnement écologique, et par voie de conséquence,*
- . l'apport de minéraux par le sédiment (voir ci-après),*
- . la libération de métaux comme le fer et le manganèse, très gênants pour la production d'eau potable.*

C'est pourquoi notre typologie inclut cette caractéristique dans ses critères déterminants. Les protocoles d'études prévoient aussi des mesures en surface et au fond pour cette raison.

Des minéraux

La disponibilité des minéraux nutritifs (= nutriments) commande la production végétale. Or, tous les éléments ne sont pas présents à la même concentration dans l'eau. De plus, pour assurer sa croissance, le végétal les prélève proportionnellement à la composition de ses tissus. De ce fait, la croissance végétale se trouve limitée par l'élément qui est le plus rare par rapport à ses besoins. En conditions naturelles, c'est le **phosphore** qui manque le plus par rapport à la demande, ensuite l'azote, ensuite le carbone.

Or, le phosphore est naturellement rare dans l'eau. D'une part parce que sa source, strictement géologique, est peu abondante ; d'autre part, parce que, au cours de son cheminement terrestre, il est fortement fixé par des constituants du sol comme les composés du fer, de l'aluminium, du calcium ... et consommé par les plantes.

*Les algues se nourrissent en réalité d'une forme assimilable du phosphore, les phosphates, le phosphore dit « total » étant composé de formes minérales (les phosphates) et de formes organiques.
Le protocole d'étude prévoira donc l'analyse du phosphore total et des phosphates, le premier donnant des informations sur la réserve constituée, les seconds sur les nutriments réellement disponibles pour les végétaux.*

La vie aquatique



La vie aquatique est faite, comme la vie terrestre, d'interactions entre proies et prédateurs, qui assurent un cycle de la matière et un transfert d'énergie. L'essentiel de la matière organique est produit par les végétaux utilisant les minéraux présents dans l'eau grâce à l'énergie solaire.

Une partie de cette matière végétale est consommée par des herbivores, animaux du zooplancton de pleine eau, petits invertébrés (comme les escargots d'eau) ou poissons phytophages.



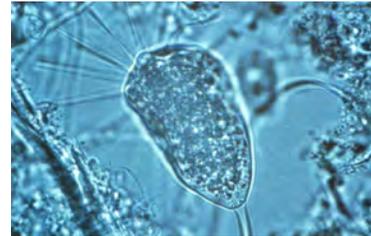
A leur tour, ces herbivores sont consommés par des carnivores, poissons zooplanctophages ou benthophages selon qu'ils se nourrissent de zooplancton ou des animaux colonisant le fond,

lesquels poissons sont à leur tour dévorés par les carnassiers (prédateurs en plan d'eau : sandre, perche, brochet ...).



L'ensemble des différents maillons de cette « chaîne alimentaire » se conçoit comme une pyramide dont chaque niveau contrôle le niveau aval, sachant qu'environ 10 % de la matière et de l'énergie sont transférés d'un niveau à l'autre. D'un point de vue pratique, il en résulte que toute augmentation ou réduction du peuplement d'un niveau donné induit obligatoirement des modifications en cascade vers le bas de la pyramide : l'élimination du zooplancton fait s'emballer la croissance végétale que cette élimination soit due, par exemple, au ruissellement de pesticides d'origine agricole ou, plus indirectement, à la pêche intensive des carnassiers prédateurs. Il en résulte également qu'une faible productivité végétale ne peut être à l'origine que d'une petite pyramide au sommet de laquelle les poissons piscivores sont très peu nombreux.

Tous les organismes qui participent à la pyramide trophique produisent des déchets et finissent par mourir. Déchets et cadavres servent de nourriture aux micro-organismes, bactéries et champignons, présents dans l'eau et dans le sédiment. C'est ainsi que les formes ultimes de la matière organique, dissoute et particulaire, sont transformées en substances minérales, lesquelles peuvent servir, au moins en partie, à alimenter de nouveaux organismes végétaux et réactiver le cycle de la matière organique qui se résume en trois phases : production, consommation, décomposition.

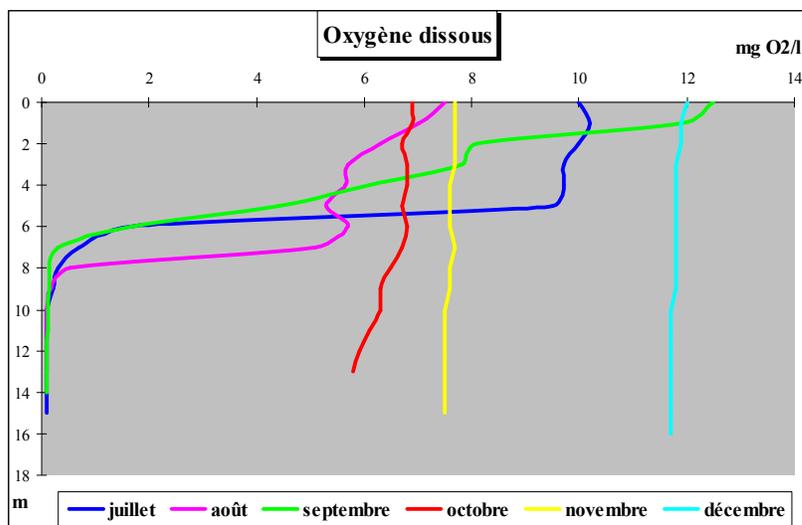


De l'oxygène

Toute la vie aquatique repose sur les végétaux qui utilisent l'énergie solaire, le carbone et l'eau pour produire de la matière organique, et de l'oxygène : c'est la [photosynthèse](#). Ce phénomène est la source principale de l'oxygène présent dans l'atmosphère et dissout dans l'eau. Les êtres vivants, végétaux et animaux, l'utilisent alors pour respirer.

Du fait qu'elle nécessite de la lumière, la photosynthèse ne peut avoir lieu que le jour et dans les eaux de surface suffisamment éclairées. En dessous, s'étend une couche d'eau où la lumière est trop faible pour engendrer une production végétale significative. La respiration, qui est le propre de toute cellule vivante, animale ou végétale, est en revanche continue, quelles que soient les conditions de lumière, le jour comme la nuit, en surface ou au fond du plan d'eau.

Il en résulte que l'on peut observer, à la verticale dans un plan d'eau, de notables variations de la concentration en oxygène dissout dans l'eau :



La raréfaction, voire la disparition de l'oxygène en profondeur a des conséquences :

- . absence des poissons, et des êtres vivants sauf certains types de bactéries ;
- . putréfaction de la matière organique générant des mauvaises odeurs ;
- . libération de composés chimiques présents dans le sédiment ...

Sédimentation et décomposition



Dans les secteurs ralentis des cours d'eau, comme dans les retenues, les particules en suspension dans l'eau, argileuses ou sableuses, minérales ou organiques, vivantes ou mortes, se déposent sur le fond. Un sédiment s'accumule ainsi, et, s'il reste en place d'une année sur l'autre, constitue la mémoire du plan d'eau. En effet, il peut stocker différents éléments chimiques, puis, par minéralisation progressive, les relarguer petit à petit, notamment son phosphore sous forme de phosphates. Il réalimente ainsi les algues, même après la suppression des apports externes de phosphates au plan d'eau.

*C'est pourquoi la suppression du phosphore des rejets ne suffit pas à arrêter l'eutrophisation. Il est souvent nécessaire d'agir sur le sédiment quand il est susceptible de réalimenter les algues pendant de nombreuses années.
Pour cette raison, un diagnostic de la composition des sédiments est souvent nécessaire.*

Cette décomposition complète de la matière organique (minéralisation) résulte de l'activité d'organismes tels que les bactéries et les champignons, en consommant de l'oxygène.

1.1.3 Evolution naturelle, évolution anthropique

A l'échelle des temps géologiques, les lacs disparaissent par comblement de leur cuvette remplie par les matériaux provenant de leur bassin versant. Une lente

évolution de leur morphologie a lieu, avec un envasement progressif des zones littorales colonisées par des végétaux amphibies, ce qui, en diminuant le rapport volume du lac / surface du bassin versant entraîne une augmentation de la concentration de l'eau en substances dissoutes qui favorise la production végétale ... et le phénomène s'auto-entretient.

En augmentant les quantités de phosphore mises en circulation (activités et concentrations animales et humaines) et en court-circuitant les possibilités de fixation par les sols et d'utilisation par les plantes terrestres, les activités humaines ont généré une hyper-fertilisation des eaux.

En conditions naturelles, une fois que le végétal a épuisé l'eau des quelques microgrammes de phosphore par litre qu'elle contient, les autres éléments restent en excès. Tout nouvel apport de phosphore permet au végétal une nouvelle croissance, alors que plus d'azote ou de carbone ne change rien. A l'inverse, toute réduction de phosphore entraîne une diminution de la prolifération végétale : le processus est donc réversible.

Mais si les apports de phosphore augmentent beaucoup, les cellules algales finissent par mettre en réserve la fraction qui se trouve en excès de leurs besoins immédiats. Elles l'utiliseront ultérieurement pour se multiplier, produisant subitement un grand nombre de cellules filles : c'est la « fleur d'eau » qui, paradoxalement, peut apparaître quand il n'y a pas de phosphore dans l'eau. Par ailleurs, des apports croissants de phosphore lui font perdre son rôle de facteur limitant au profit de l'azote, ce qui permet l'apparition de cyanobactéries, seules capables de fixer l'azote de l'air dissous dans l'eau.

Une fois mis en route par des apports excessifs de phosphore, ce processus transforme le réseau trophique. Aux phénomènes de consommation dans la chaîne alimentaire qui aboutit au poisson tout en contribuant à éclaircir l'eau se substituent les activités de décomposition par les bactéries qui, en consommant l'oxygène de l'eau provoquent, entre autres, le relargage du phosphore piégé dans le sédiment. Cette charge « interne » de phosphore vient s'ajouter à la charge « externe » (apportée par le ou les cours d'eau) pour entretenir ou accélérer le processus. Pour limiter la prolifération algale, la diminution des apports de phosphore est toujours nécessaire mais pas toujours suffisante si le plan d'eau en fournit.



Les cyanobactéries sont remarquables par plusieurs particularités physiologiques qui les avantagent par rapport aux autres algues lorsque les conditions de milieu sont difficiles : composition en pigments leur permettant d'utiliser au mieux la lumière, possibilité de coloniser la couche d'eau profonde, optimum de croissance pour des températures et des pH élevés, fixation de l'azote gazeux de l'air, voire capacité d'utilisation du carbone organique pour certaines espèces.

Alors que les apparitions saisonnières de quelques espèces sont parfaitement normales, c'est l'envahissement d'un plan d'eau par une ou quelques espèces résultant de la pollution par les phosphates qui rend ces algues indésirables.

1.1.4 Toxicité des algues bleues

Deux types de composés forment la matière organique d'un milieu aquatique : les particules formées par les cellules vivantes ou mortes des organismes, et les substances dissoutes libérées par les organismes.

Les algues bleues, d'eau douce, produisent des composés en quantité et qualité très variables selon l'espèce, l'âge de l'algue, les conditions environnementales (jour/nuit, température, pH ...) La nature des substances produites par les algues très variée : acides, sucres, enzymes, vitamines, hormones ... ainsi que des inhibiteurs de la croissance des autres algues.



Les trois quarts des espèces de cyanophytes d'eau douce sont potentiellement toxiques. Notons que ce sont seulement certaines souches d'algues bleues qui sont susceptibles de produire des toxines, et ce avec une intensité très variable dans le temps. Lorsque des individus sont isolés d'un plan d'eau dans lequel des toxicités sont observées, des souches toxiques et non toxiques cohabitent. Seulement trois espèces communes représentent d'ailleurs

l'essentiel des cas rapportés en eau douce : *Microcystis aeruginosa*, la plus fréquemment en cause, *Anabaena flos-aquae*, *Aphanizomenon flos-aquae*.

Du fait de la structure cellulaire des algues bleues (cyanophytes), la tendance actuelle est de les appeler « cyanobactéries », ce qui peut porter à confusion.

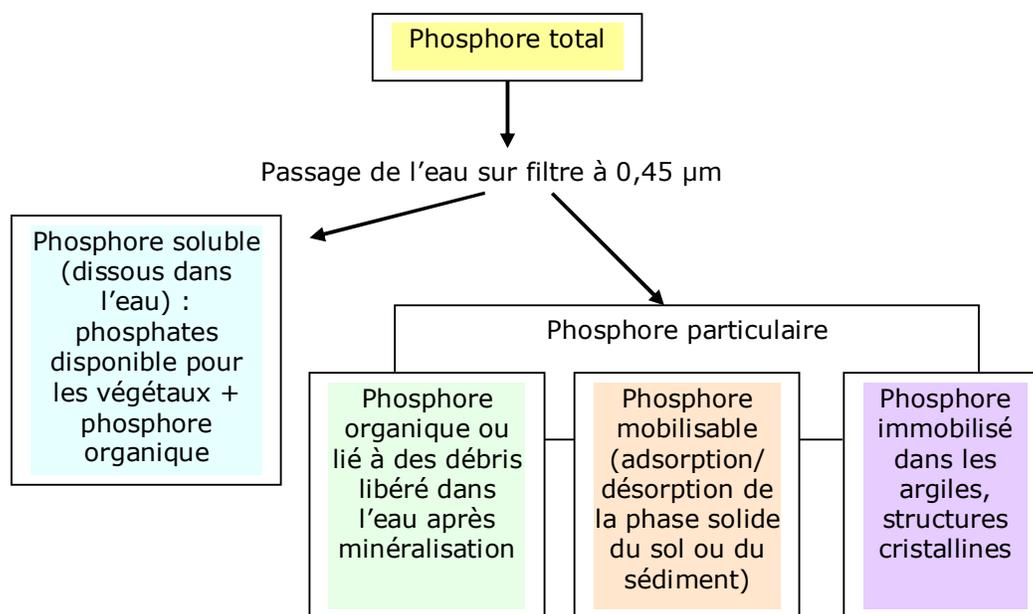
Ces organismes ne sont pas des bactéries pouvant utiliser et dégrader la matière organique. Ce sont des végétaux, dotés notamment de chlorophylle, capables de photosynthétiser, et donc de produire de la matière organique à partir des éléments minéraux. C'est d'ailleurs à ce titre qu'ils sont le plus souvent indésirables.

De plus, si certaines algues bleues se distinguent par leurs potentialités toxiques, certaines bactéries sont potentiellement pathogènes.

1.2. OPPOSITION ET COMPLEMENTARITE DES STOCKS ACCUMULES ET FLUX

1.2.1 Formes du phosphore

Le phosphore est l'élément clé contrôlant le développement des cyanobactéries d'eau douce : il se présente sous différentes formes chimiques dans les sols et les eaux. Parmi celles-ci, certaines sont capables de délivrer du phosphore assimilable très rapidement alors que d'autres ne le font que sur de longues échelles de temps.



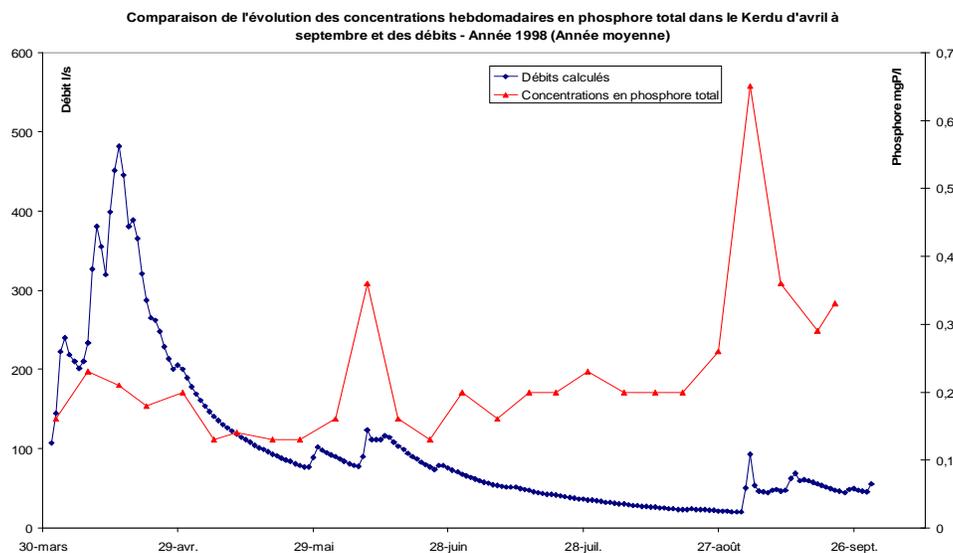
Le passage du phosphore d'une forme à l'autre peut être rapide et dépend de divers facteurs : le pH, le potentiel redox, la température, l'agitation de l'eau, la présence d'algues et de bactéries¹ ...

1.2.2 Variabilité de la concentration

L'observation des concentrations de phosphore dans les cours d'eau montre qu'elles peuvent varier brutalement, notamment lors des crues, en augmentant (données CG 22)² :

¹ La composition d'un échantillon d'eau est donc susceptible de se modifier avant l'analyse selon les conditions de transport et de stockage.

² Aquascop, 2008, Interprétation des données de suivi de la qualité de l'eau du secteur de la Lieue de Grève, rapport au Conseil Général des Côtes d'Armor, 3 tomes + annexes.

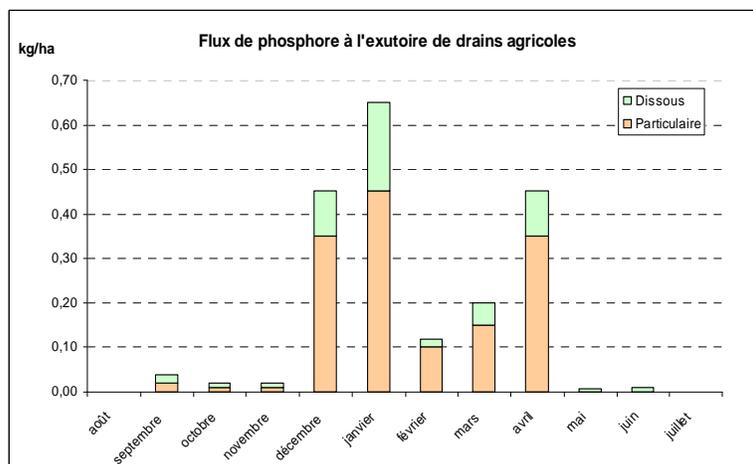


1.2.3 Le flux de phosphore dans le cours d'eau

Il n'existe aucune variable chimique de l'eau dont le flux ne croisse pas avec le débit. Toutefois, le flux peut croître moins vite que le débit (sa variabilité est alors inférieure) : c'est le cas des principaux minéraux dissous. Le flux peut croître plus vite que le débit, et présenter une variabilité supérieure : c'est le cas en général du phosphore total et de l'azote Kjeldhal, assez fréquemment celui des nitrates. Le flux peut enfin croître beaucoup plus vite que le débit : c'est le cas des MES et très souvent de leurs polluants associés³. La distribution des débits dans le temps conditionne donc celle des flux : la majeure partie du flux transite pendant une faible proportion de temps, avec une disproportion d'autant plus grande que le cours d'eau est petit et le débit irrégulier.

En Bretagne, les mois les plus pluvieux sont généralement décembre, janvier, février, qui peuvent fournir la moitié du volume d'eau annuel. Les débits maximums ont lieu également en hiver. Durant cette période caractérisée par des pluies abondantes sur des sols gorgés d'eau, le ruissellement direct est susceptible de provoquer des départs importants de phosphore des sols vers les eaux.

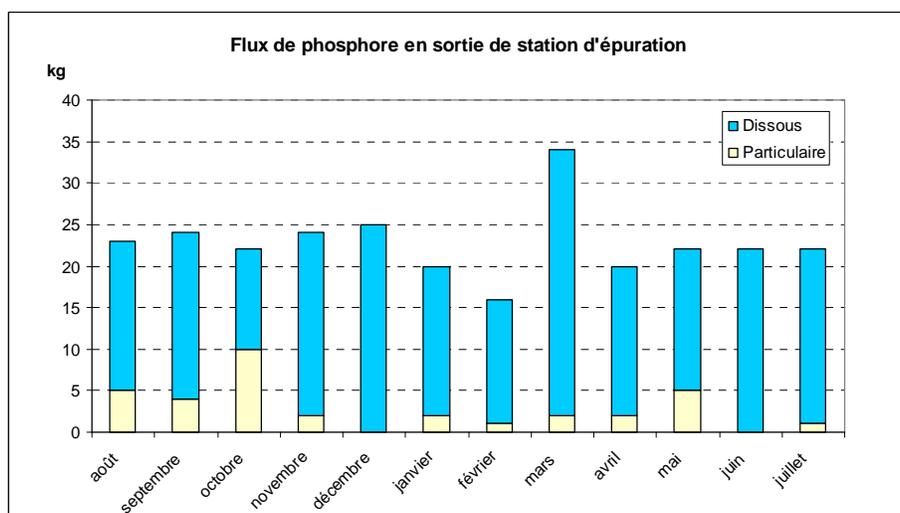
³ Meybeck M., Pasco A., Ragu A., 1994, Evaluation des flux polluants dans les rivières, pourquoi, comment et à quel prix ? rapport université de Jussieu, 23 p.



Le transfert du phosphore agricole se fait en général essentiellement sous forme particulaire, comme le montrent sur cet exemple (d'après Gruau⁴, 2009) l'augmentation de la concentration pendant les crues et la corrélation avec la charge particulaire (c'est ainsi le cas des cours d'eau alimentant

la retenue de Rophemel)⁵. Peu soluble, le phosphore migre peu dans le sol, son transfert dans le cours d'eau nécessitant des écoulements en surface ou dans les horizons superficiels du sol. Cela se produit donc essentiellement pendant les pluies hivernales (d'autant que le couvert végétal est réduit en hiver) ou lors des violents orages d'été (entraînant des processus de ruissellement). Les sources de phosphore agricole sont donc localisées dans les zones saturées de bas de versant, ou dans les versants sensibles à l'érosion.

La répartition entre les formes de phosphore est très différente selon la source : à titre de comparaison, le phosphore provenant d'une station d'épuration est principalement sous forme dissoute, et plus régulier dans le temps (in Gruau, 2009) :



Selon les années, les pluies sont plus ou moins abondantes et le débit des cours d'eau plus ou moins soutenu (on parle alors d'années hydrologiques « sèches » ou « humides »). Les années pluvieuses contribuent à double titre à un transport

⁴ Gruau G., 2009, Formes, sources et mobilité du phosphore à l'origine de l'eutrophisation à la retenue de Rophemel, Projet d'étude, 22 p.

⁵ Gruau, op.cit.

plus important de phosphore d'origine agricole : débits plus importants et donc capacité de transport supérieure d'une part, mais aussi fraction du débit provenant du ruissellement direct plus importante favorisant l'érosion⁶ (et l'apport de particules de sol porteuses de phosphore).

L'existence d'une liaison entre crue et flux de phosphore aboutit à la conclusion que les prélèvements doivent être faits fréquemment lors des crues. Et que les prélèvements réguliers et non proportionnels aux volumes d'eau écoulés (pour les formes dissoutes) ou aux quantités de MES (pour les formes particulaires) ne sont pas pertinents pour déterminer les apports de phosphore : ils mettent seulement en évidence le « bruit de fond » de la pollution. Il faut bien connaître la dynamique des phénomènes pour adapter la stratégie d'échantillonnage (recueillir les informations pertinentes avec le maximum d'efficacité). Enfin, la détermination des flux est très coûteuse car elle nécessite une haute fréquence de mesures. Le choix des points d'échantillonnage est également primordial.

1.2.4 Le phosphore des sédiments

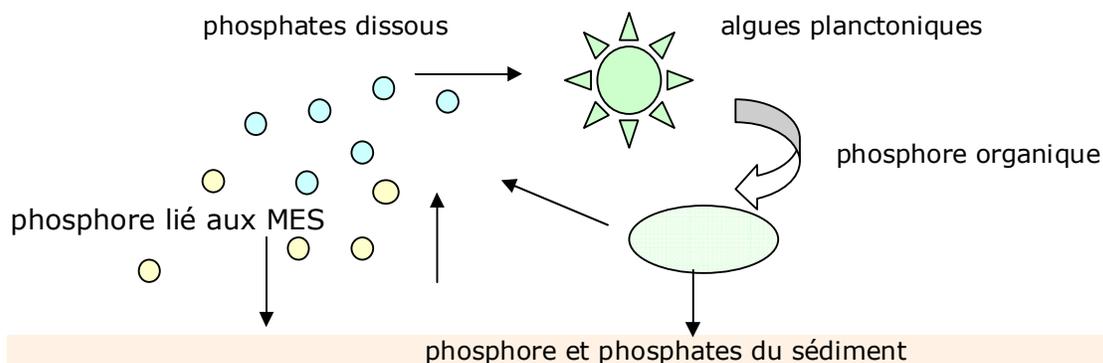
L'évolution des flux polluants transitant dans les cours d'eau donne une information différente de la dégradation ou de l'amélioration de la pollution des eaux du bassin, surtout pour les éléments associés à la matière particulaire, ce qui est le cas du phosphore. En effet, celle-ci peut être stockée dans le lit du cours d'eau, notamment les années sèches. Inversement, une année particulièrement humide pourra remettre en mouvement vers l'aval une partie, voire la totalité des sédiments déposés dans le lit. Même pour les éléments dissous, il en résulte qu'une année humide sera toujours une année de flux polluants élevés, et ce même si la pollution du bassin versant est en diminution⁷.

Les MES sont généralement plus chargées en phosphore que le sédiment ; d'une part car les sédiments déposés dans le lit du cours d'eau sont par nature plus grossiers, et ont une capacité d'adsorption moins grande, d'autre part parce qu'ils sont susceptibles de perdre du phosphore au fil du temps par relargage.

⁶ Cann Ch., 1990, Transfert du phosphore d'une zone d'élevage intensif vers les eaux. Rapport Cemagref, 87 p. + annexes.

⁷ Meybeck et coll. op.cit. (une durée de 10 ans semble être le minimum pour juger de l'évolution d'un bassin).

Dans les plans d'eau où l'eau n'est pas agitée, le phosphore particulaire sédimente avec les MES ; le phosphore dissous se fixe peu à peu et précipite, avec le fer, l'aluminium, le calcium ... et l'assimilation des phosphates par les algues induira une sédimentation de phosphore « biologique » à leur mort ou après celle du zooplancton qui les « broutent ».



Ce dépôt sédimentaire fin, riche en matière organique (vase), constitue une réserve de phosphore qui peut amplifier la dégradation du milieu lorsqu'il est remis en solution par manque d'oxygène notamment en été.

Un bilan du stockage du phosphore a ainsi été effectué dans le réservoir du Gouet par l'évaluation des flux entrants et sortants et le suivi en continu de la sédimentation⁸. La dynamique des apports en phosphore particulaire est semblable à celle du phosphore soluble, mais d'amplitude différente, et liée à l'importance relative des écoulements. La majorité (en proportions paraissant constantes) du phosphore soluble et du phosphore particulaire de la retenue est stockée dans le sédiment. Ce phénomène est bien accordé aux proliférations algales. Il en résulte que les apports à la retenue par les cours d'eau ont lieu en hiver, le stockage s'y effectuant pendant l'été. L'importance relative des apports par le cours d'eau et par les sédiments varient selon la saison.

La quantité de phosphore piégé dépend alors de la gestion hydraulique de la retenue, du temps de séjour de l'eau, de l'activité algale, des conditions chimiques au fond ...

⁸ Jigorel A., Bouedo A., Nicolas R., Morin J.P., 2005, Stockage du phosphore dans les sédiments d'un réservoir eutrophe (Gouet), The fourth interceltic colloquium of hydrology and management of water resources, 15 p.

1.3. RELATION ENTRE PHOSPHORE ET MATIERE ORGANIQUE DANS LES RETENUES

Dans les plans d'eau, la matière organique peut être soit apportée par le bassin versant (elle est alors dite « allochtone »), soit être produite dans le plan d'eau par photosynthèse (plancton, macrophytes) ; elle est dite « autochtone ».

De la part respective de ces deux sources dépendent le type et la localisation des mesures correctives possibles pour limiter cette matière organique souvent à l'origine de nuisances à l'utilisation de l'eau. Dans le cas de la retenue de Rophemel, par exemple, la totalité de la matière organique dissoute provient du bassin versant, celle produite par les algues étant négligeable⁹.

Cette matière organique de l'eau revêt une multitude de formes physiques : organismes ou cellules vivants, cellules sénescents, microgouttes, films, pellicules de particules minérales, macromolécules ... On distingue la matière organique dissoute de la matière organique particulaire en fonction de la taille de l'élément considéré. La matière organique dissoute comporte des protéines, des lipides, des sucres, des lignines/phénols, des pigments, des vitamines, divers métabolites (par exemple les cyanotoxines), des micropolluants. La matière organique particulaire regroupe les organismes planctoniques, vivants ou morts, et des tissus divers (débris végétaux ou animaux). En général, la matière organique dissoute dans l'eau des lacs est en proportion bien supérieure à celle de la matière organique particulaire.

Dans les tissus végétaux, les rapports moyens entre les éléments chimiques présentent une certaine constance ($C/P=40$ $N/P=7$...) qui reflète les positions dans lesquelles ils seront prélevés dans le milieu. Le phénomène de limitation de la croissance végétale par un élément chimique est visible en comparant ces rapports avec ceux que l'on trouve dans l'eau.

La plupart du temps, le phosphore est l'élément dont la demande par les végétaux est la moins satisfaite par la composition de l'eau : il contrôle donc la production, et de sa concentration dépend l'importance du développement végétal, algal en particulier, et de la production de matière organique.

Le phosphore alimentant les végétaux provient également de deux sources : des apports externes du bassin versant ou des apports par le sédiment du plan d'eau. Là encore, l'importance relative des sources indique la localisation des actions à prévoir lorsque le phosphore est en excès. La comparaison des flux annuels de phosphore dissous et particulaire en entrée et sortie de retenue indique s'il y a ou non stockage du phosphore dans le sédiment, le niveau d'oxygénation de l'eau de fond contribuant alors à son immobilisation ou à son relargage vers l'eau sus-jacente.

⁹ GEPMO, 2008, Pollution de la retenue de Rophemel par les matières organiques, quantification du rôle des apports respectifs en provenance du bassin versant et des sources internes à la retenue, quantification des stocks, 79 p.

1.4. CAS DES MASSES D'EAU FORTEMENT MODIFIEES (MEFM)

Certaines masses d'eau de cours d'eau ont été fortement modifiées par la canalisation. Aux perturbations morphologiques, homogénéisation des fonds, modelage et/ou artificialisation des berges, coupures de méandres et diminution de la sinuosité, s'ajoute une modification des conditions d'écoulement, et parfois de l'alimentation en eau. La présence d'ouvrages transversaux successifs (écluse, moulin, prise d'eau ...) peut aussi transformer le cours d'eau en une succession de biefs au cours lent, voire très lent.

Dans ces conditions, le fonctionnement de la « masse d'eau fortement modifiée » s'apparente à celui d'un plan d'eau. Le ralentissement et l'homogénéisation des écoulements permettent le développement du phytoplancton, avec une intensité proportionnelle au phosphore disponible. Une stratification thermique (certes instable) peut apparaître et se maintenir en été accompagnée d'un déficit en oxygène « au fond ». La lenteur des écoulements favorise le dépôt des particules (minérales et planctoniques) qui constitue au fil des ans un sédiment, plus ou moins organique et plus ou moins riche en phosphore, lequel peut passer sous forme dissoute si les conditions environnementales (pH, oxygène ...) s'y prêtent et réalimenter la production planctonique.

L'état d'un canal, lorsqu'il reçoit des eaux riches en phosphore (et azote), diffère alors peu de celui d'un étang eutrophisé. En fonction du débit d'alimentation estival, les caractéristiques morphologiques (grande longueur, faible profondeur) peuvent induire un temps de séjour court à l'échelle de chaque bief, mais long à l'échelle du canal dans son entier. Et les stocks de nutriments reconduits d'une année sur l'autre sont fonction des modalités de gestion du canal en période de hautes eaux¹⁰.

1.5. SYNTHÈSE DES TRAVAUX DU GEPMO CONCERNANT LES MATIÈRES ORGANIQUES

Les études effectuées à ce jour par le GEPMO portent exclusivement sur les captages d'eau brute en rivière pour lesquels l'origine de la pollution par les matières organiques (MO) demeure encore largement inconnue (voir liste des documents consultés en annexe).

1.5.1 Une qualité de l'eau dégradée avec une forte variabilité spatiale des concentrations moyennes

A la différence des retenues, l'essentiel de la matière organique dans les cours d'eau bretons est d'origine allochtone, provenant du lessivage des sols des bassins versants par les eaux de drainage.

¹⁰ Il serait alors logique que les objectifs de qualité en terme de phosphore (et nitrates) y soient les mêmes que dans les plans d'eau dès lors que le bon potentiel y est requis.

La cartographie établie en 2004 à partir des données d'oxydabilité de 118 prises d'eau montre une qualité de l'eau relativement dégradée au plan régional¹¹, une forte variabilité spatiale des niveaux moyens de concentration, et une « distribution possiblement non aléatoire de la pollution », les prises d'eau les plus polluées semblant se concentrer dans la frange Nord de la région Bretagne.

1.5.2 De très fortes variations au cours du temps avec une tendance globale à l'accroissement

Les concentrations en matière organique dans les cours d'eau varient très rapidement et très fortement au cours du temps : 1. lors des crues, engendrant un niveau de pollution maximal ; 2. à l'échelle de la saison, la pollution étant plus importante en automne et en hiver du fait du ruissellement sur sols saturés lors des pluies ; 3. à l'échelle pluri-annuelle, avec des maximums tous les 5 à 7 ans environ, se produisant dans tous les bassins versants, donc d'origine climatique (fortes précipitations).

Cela est cohérent avec le fait que les bassins versants sont situés sur des substrats peu perméables et dans lesquels les circulations d'eau sont déviées vers les horizons superficiels du sol (où se trouvent les matières organiques) lorsque l'humidité du bassin augmente.

Dans la majorité des rivières caractérisées par un niveau de pollution élevé, les données sur 25 ans montrent de plus une tendance à l'augmentation continue de la matière organique, qui se poursuit. Le rôle du climat est évoqué, notamment au travers de l'augmentation de la température moyenne et des précipitations (+ 40 %) en Bretagne sur la période.

1.5.3 Les facteurs responsables : climat, milieu physique, pratiques agricoles

La composition et l'origine des matières organiques proviennent à la fois des substances humiques d'origine végétale et des déjections animales épandues sur les sols.

- ❑ On a vu au paragraphe précédent l'importance des apports en eau dans les variations temporelles de concentration des MO en un même point.
- ❑ Les activités agricoles peuvent modifier la géométrie des circulations de l'eau (arasement de haies ou de talus, tassement du sol, accroissement de circulation dans les horizons superficiels ...). Il a été émis l'hypothèse que des apports massifs de déjections animales sur les sols bretons depuis les années 1970 pouvaient avoir modifié les transferts de matière organique des sols vers les eaux en modifiant les équilibres biogéochimiques ou microbiologiques à l'interface eau-sol et/ou augmentant notablement la quantité de matière hydrosoluble des sols. Mais aucune corrélation statistique significative directe n'a été mise en évidence entre les pratiques agricoles (et notamment les épandages de déjections animales) et la qualité de l'eau des cours d'eau (au droit des points

¹¹ Sachant que cette analyse dose essentiellement les MO dissoutes, même si elle porte sur l'eau brute, le niveau de contamination réel est donc plus élevé.

de prélèvement d'eau brute)¹². Le fait que les données agricoles ne soient pas précisément localisées à la parcelle avait été une des explications avancées. Cependant, l'impact des épandages existe puisqu'une molécule caractéristique des déjections porcines (le coprostanol) a été retrouvée dans différents cours d'eau, dont certains ont les bassins les plus riches en élevages porcins (Elorn¹³ par exemple).

Des travaux plus récents (2008) réalisés à l'aide d'outils de la géochimie et concernant notamment la Haute-Rance et le Haut-Couesnon montrent qu'il n'existe pas de lien direct entre les pratiques d'épandage sur les bassins versants et la contamination des eaux par les MO à leur exutoire : la tendance générale à l'augmentation constatée proviendrait d'une solubilisation accrue d'un fond humique ancien des sols.

□ La pente à proximité du réseau hydrographique joue un rôle clé dans la capacité d'un bassin versant à exporter des MO, et explique les variations spatiales observées (toutes choses étant égales par ailleurs). Les zones humides et plates de fonds de vallée sont ainsi fortement contributives à la charge en matière organique des cours d'eau, avec cette particularité que plus la densité de haies y est importante, plus les concentrations de matière organique dans les rivières sont faibles¹⁴. Il convient donc non seulement de limiter les pratiques risquées dans ces territoires, mais encore de restaurer ces derniers. Les zones de plateau et de versant ne sont généralement pas contributives, sauf si elles sont imperméables (horizon argileux très près de la surface du sol)¹⁵. La teneur en MO des sols bretons peut varier considérablement dans le temps, au cours des saisons notamment, et dans l'espace. Des variations spatiales sont observées, mais on note une tendance générale à la baisse depuis 30 ans. Aucune corrélation n'a été mise en évidence entre les stocks dans les sols et les variations de concentration dans les cours d'eau¹⁶.

1.5.4 Indicateurs et fréquences des mesures

Le guide pratique de localisation des sources dans les bassins versants et de suivi des pollutions dans le temps (2005) confirme que la concentration moyenne annuelle en MO est le paramètre significatif de la capacité du bassin versant à les exporter indépendamment du climat.

Le flux spécifique annuel de matières organiques, qui dépend de la lame d'eau écoulée et donc de la variabilité de l'hydroclimat, est susceptible de présenter de fortes variations. La concentration moyenne annuelle est en revanche relativement stable dans le temps, donc très utile. La moyenne pondérée par le débit n'est pas indispensable car son rapport à la moyenne annuelle est apparu

¹² L'analyse statistique laisse toutefois inexplicée près de 50% de la variance observée : cela signifie qu'un lien n'est pas impossible, même s'il n'est pas mis en évidence.

¹³ un des rares cours d'eau bretons montrant par ailleurs une tendance à la diminution des MO (rapport 2004).

¹⁴ Calculs effectués sur 33 sous bassins versants. Aucune corrélation statistique n'a en revanche été trouvée avec l'occupation du sol en forêt, prairie, cultures ... ce qui ne veut pas dire qu'il n'y en a pas (rapport 2006).

¹⁵ L'absence de carte exhaustive de perméabilité des sols bretons empêche de quantifier l'influence de ce facteur dans les variations spatiales des concentrations en MO.

¹⁶ Ce qui ne veut pas dire qu'il n'y en a pas.

assez constant dans le temps et d'une rivière à l'autre¹⁷, quoique toujours supérieure (rapport environ 1,20) ; ce qui allège au demeurant le dispositif de suivi en dispensant des mesures de débits.

La fréquence des mesures de la concentration en MO sera différente selon leur objectif :

- S'il s'agit de hiérarchiser les sous bassins versants du point de vue de leur capacité à exporter des MO, le nombre de mesures, si celles-ci sont concomitantes, pourrait être restreint (4 mesures), incluant deux épisodes de crues (plus de 10 mm de pluie, en automne, en hiver) et les inter-crués.
- S'il s'agit de suivre l'évolution dans le temps de la pollution, par exemple suite à des mesures correctives, la fréquence devra obligatoirement être au minimum de 5 jours pour une description des tendances à court terme (moins de 10 ans) à une mesure tous les 10 jours pour une tendance à long terme (environ 25 ans), et ce sur plusieurs années, de manière à prendre en compte le rôle du climat. L'installation des points de mesures a été évaluée pertinente en aval de surfaces de bassin versant inférieures à 5000 ha sur les bassins testés (Léguer, Haut Couesnon), pertinence restant à vérifier sur d'autres territoires¹⁸.

En terme d'analyse, la méthode la plus fiable et reproductible est celle du « COD¹⁹ sur eau filtrée par oxydation thermique²⁰ ». L'utilisation de biomarqueurs moléculaires²¹ permet de déterminer les types d'origines de certaines MO²². Des dosages de nitrates et sulfates, voire des chlorures peu coûteux, complètent utilement le dispositif, en raison de leurs liens avec les MO : d'une part parce que les zones humides sont connues pour être dénitrifiantes ; d'autre part parce que les sulfates et les chlorures, en traçant les MO des sols, permettent de différencier les apports diffus des rejets ponctuels d'eaux résiduelles.²³

Enfin, la constitution de bases de données concernant l'occupation des sols et les pratiques agricoles à la parcelle, permettrait de comprendre le rôle de ceux-ci dans l'évolution de la pollution organique de l'eau.

¹⁷ 4 rivières, disposant de 30 ans de données, testées.

¹⁸ Une ou deux campagnes effectuées sur des bassins versants de taille croissante permettra de vérifier que la limite des 5000 ha est valable.

¹⁹ Si l'oxydabilité au KMnO₄ est requise, une corrélation avec le COD peut être établie à partir d'analyses de quelques échantillons.

²⁰ Le dosage du COT n'apparaît pas totalement apte à mesurer les MO particulières, et sous évalue donc la concentration totale réelle.

²¹ Les composés les plus pertinents pour un traçage éventuel des déjections animales dans l'environnement sont les composés lipidiques (polaires) et plus spécifiquement les stérols. Des variations du rapport C₂₇/C₂₉ stérols-stanols sont mises en évidence entre lisiers de porcs d'une part, et fumiers de bovins et de volaille d'autre part.

²² Des traceurs spectroscopiques (adsorbance UV et fluorescence) et isotopiques (isotopes 13 et 12 du carbone) ont été utilisés sur des parcelles expérimentales parallèlement aux traceurs moléculaires afin de maximiser les chances de trouver des traceurs capables de distinguer une MO d'origine purement végétale d'une MO d'origine partiellement animale.

²³ Matériel de prélèvement, précautions opératoires et protocoles d'études sont donnés dans ce guide.

1.5.5 Conclusion

Il n'existe pas une cause unique de la pollution des rivières de Bretagne par les MO. Cette pollution résulterait d'un effet combiné du climat et des pratiques agricoles sur un milieu physique à risque. Limiter les zones d'épandage aux zones de plateaux et aux versants bien drainés est conseillé. L'épandage, le chaulage, le drainage, la suppression des talus et des haies dans les zones à risque, notamment les zones plates de fonds de vallées, ... sont à proscrire.

2. IDENTIFICATION DES ACTIONS A REALISER POUR ATTEINDRE LE BON ETAT

2.1. RAPPEL DES METHODES UTILISEES ET RETOUR D'EXPERIENCE

Certaines des actions listées dans l'étude inter-Agences n°83 « Aide à la décision pour le traitement des plans d'eau »²⁴ ont été mises en œuvre. Le retour d'expérience permet de mettre en évidence quelles sont les actions et modalités de mise en œuvre conseillées.

Nous ne reprenons pas dans le présent rapport les techniques qui n'ont été que très peu (ou pas) utilisées ces 10 dernières années (station de déphosphatation, recouvrement des sédiments, opacification de l'eau), ou qui n'apparaissent plus compatibles avec la politique environnementale actuelle (fertilisation en azote, soutirage hypolimnique, apport en eau de forage ...). A cet égard, notons que la destruction des algues par les algicides est une solution non recommandable pour plusieurs raisons :

- approche incompatible avec la DCE ;
- approche non recommandée par l'AFSSA et l'AFSSET ;
- mort rapide des cellules algales, ce qui génère un apport brutal de matière organique (dont font partie les toxines éventuelles) dans l'eau, alors que les bactéries (naturelles) qui la dégradent sont également tuées par le traitement.

2.1.1 Effacement du barrage

Préalablement à la mise en œuvre de méthodes préventives ou curatives de lutte contre l'eutrophisation, qui seront coûteuses dans tous les cas, la suppression du barrage et du plan d'eau doit être envisagée au vu des usages de l'eau et de leurs évolutions, et des objectifs de qualité des masses d'eau concernées.

2.1.2 Limitation des apports directs de phosphore

A terme, seule la diminution significative des apports de phosphore par les cours d'eau aux retenues est de nature à limiter durablement le développement algal dans les plans d'eau.

On rappellera que réduire les apports en nitrates sans diminuer les quantités de phosphates favoriserait la prolifération des algues bleues.

²⁴ La liste des chapitres concernés (et donc à modifier si une nouvelle édition était envisagée) est fournie en annexe.

2.1.3 Précipitation du phosphore (et des m.e.s.) de l'eau

Précipitation du phosphore	Caractéristiques	Remarque
Principe	Réduire la concentration en phosphore de la colonne d'eau par l'apport en surface d'un composé faisant flocculer les particules en suspension dans l'eau	Réservé aux plans d'eau peu profonds et « très concentrés » ²⁵ en phosphore et au pH compris entre 6 et 8
Installation Aménagement	Néant	
A prévoir	Appel d'offre pour l'intervention d'une société spécialisée disposant de l'équipement nécessaire (bateau épandeur)	Profondeur < 5 m ? 2 T de produit commercial (sulfate d'alumine) par ha
Contraintes	Traitement curatif à l'effet limité dans le temps	Traitement à renouveler
Effets secondaires	Variables selon le pH : risque de toxicité Augmentation possible de la demande en oxygène	
Gestion à prévoir	Evaluation régulière de l'épaisseur et de la réactivité du sédiment Curage et enlèvement du sédiment ainsi constitué	A adapter à la vitesse de sédimentation et aux traitements : évaluation régulière nécessaire
Facteurs d'incertitude	Dose nécessaire et suffisante Risque d'accumulation d'aluminium	
Efficacité	Réelle, variable selon le produit utilisé, mais peu durable (une saison)	C'est le phosphore des particules qui est concerné
Exemple	La Courtille (23)	

Brient, en récapitulant les principaux composés utilisés²⁶, sels de fer, de calcium (chaux, craie, gypse ...) et d'aluminium, indique que seuls ces derniers sont considérés comme réellement efficaces sur le phosphore.

Des essais de déphosphatation de la rivière de Pont l'Abbé par floculation au sulfate d'alumine et filtration sur un lit de maërl n'ont pas donné de résultats probants. Ces essais ont été abandonnés partout où ils ont été mis en œuvre en Bretagne (Pitois et Jigorel, 2000)²⁷.

Les sels de calcium ont cependant un effet de floculation des matières en suspension qui entraînent les algues vers le fond et donc augmente (temporairement) la transparence de l'eau.

²⁵ Sans précision

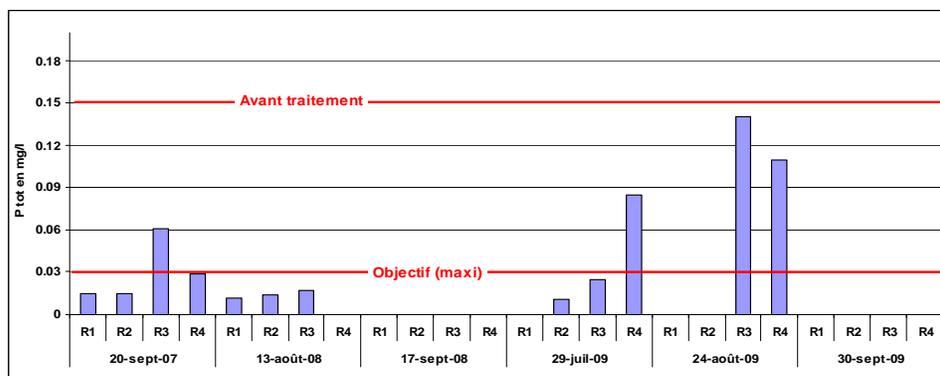
²⁶ Brient L., 2009, La restauration des milieux aquatiques, une démarche, des actions, univ. Rennes, 37 p.

²⁷ Pitois et Jigorel, 2000 : étude de la qualité des eaux de la retenue de Moulin-Neuf à Pont l'Abbé.

2.1.4 Fixation du phosphore du sédiment

Fixation du phosphore	Caractéristiques	Remarque
Principe	Injection dans les premiers centimètres du sédiment d'un réactif (nitrate de calcium, chlorure ferrique, sulfate d'alumine) entraînant la fixation du phosphore et la dénitrification	Intervention utile si le phosphore est libéré par le sédiment, et s'il rejoint la tranche d'eau éclairée où les algues peuvent le consommer
Installation Aménagement	Néant	
A prévoir	Appel d'offres pour intervention d'une société spécialisée	A notre connaissance, un seul procédé est disponible sur le marché (Limnox)
Contraintes	Navigation interdite pendant les travaux pendant 4 semaines (pour 40 ha)	
Effets secondaires	?	Absence de toxicité pour les poissons et les baigneurs
Gestion à prévoir	Surveillance du piégeage du phosphore dans le sédiment	
Facteurs d'incertitude	Épaisseur du sédiment et celle de la couche superficielle réactive	Étude préalable
Efficacité	Meilleure oxygénation, diminution de l'épaisseur de l'hypolimnion, diminution des concentrations en phosphore et en chlorophylle La CNR annonce une durée d'efficacité de 5 à 10 ans ²⁸	En août 2009, relargage de phosphore par le sédiment en 2 points ; zone anoxique résiduelle en profondeur (données CNR)
Exemple	Seul cas en France : le plan d'eau de Revestidu à Caderousse (84) traité en 2007	

Le graphique ci-dessous illustre l'effet obtenu sur le phosphore aux différents points de mesure les années suivant l'intervention (données CNR) :



²⁸ Environnement Magazine, n° 1661, octobre 2007, p.52.

2.1.5 Epandage de bio-additif

Digestion du sédiment	Caractéristiques	Remarque
Principe	Epandage en surface de l'eau d'un composé contenant un support généralement calcaire et des bactéries naturelles du cycle de l'azote, dans l'objectif d'activer le recyclage de la matière organique, et de diminuer ainsi la demande en oxygène des sédiments, ainsi que les risques de relargage du phosphore (et des métaux) associés	Mesure de la teneur organique du sédiment nécessaire au préalable
Installation Aménagement A prévoir	Néant	
Contraintes	Appel d'offres pour intervention d'une société spécialisée	Détermination de la nature des algues planctoniques présentes ; si ce sont des cyanophytes, prévoir une recherche préalable des toxines algales
Effets secondaires	Passage d'un bateau épandeur quelques jours au maximum selon la taille du plan d'eau	Réservé aux plans d'eau peu profonds au sédiment riche en matière organique
Gestion à prévoir	A priori néant	Si des cyanophytes toxiques sont présentes, la floculation (puis la mort des algues) peut libérer des toxines dans l'eau
Facteurs d'incertitude	Néant	
Facteurs d'incertitude	<ul style="list-style-type: none"> • formulation • concentration en bactéries • bactéries revivifiables • état physiologique des bactéries • technique d'injection du composé • quantité épandue • oxygénation des fonds • teneur organique des sédiments 	Intervention utile si la demande en oxygène du sédiment est élevée, ce qui libère le phosphore dans la tranche d'eau éclairée et accroît le développement algal
Efficacité	On dispose de plusieurs exemples de plans d'eau très peu profonds dans lesquels cette technique a donné de bons résultats, la proportion de plans d'eau dans lesquels elle n'a pas eu d'effets étant à peu près équivalente	Le degré réel d'activation des bactéries demeure inconnu Un effet de floculation des algues lors de l'épandage peut avoir un effet immédiat, mais peu durable, de clarification de l'eau
Exemple	Abbaye aux Bois (91) Etang Bleu (73) Champs sur Marne (77) Parc de la Courneuve (93)	

2.1.6 Dragage

Dragage	Caractéristiques	Remarque
Principe	Extraire le sédiment stockant le phosphore	Intervention utile si le phosphore est libéré par le sédiment, et s'il rejoint la tranche d'eau éclairée où les algues peuvent le consommer
Installation Aménagement	Provisoirement, installation d'une drague	Les dragues mécaniques sont inadaptées
A prévoir	Appel d'offres pour intervention d'une société spécialisée Prévoir une concentration contractuelle de matière en suspension maximale à respecter	50 mg/l par exemple
Contraintes	Une zone de dépôt et de traitement des matériaux avant leur enlèvement Une solution de destination	Etude préalable de faisabilité nécessaire (épaisseur, caractéristiques du sédiment, contraintes, effets secondaires, techniques, traitement, élimination ...)
Effets secondaires	Remise en suspension des sédiments préjudiciable selon leur concentration et la présence de micropolluants Augmentation de la profondeur et du volume	A étudier dans l'étude préalable de faisabilité
Gestion à prévoir	Limitation de l'utilisation du plan d'eau pendant le chantier Néant par la suite	
Facteurs d'incertitude	Épaisseur du sédiment et celle de la couche superficielle réactive	Etude préalable
Efficacité	Réelle à condition d'y mettre le prix ; à court et long terme si les apports externes ont été supprimés en parallèle	Faire intervenir une société expérimentée en curage respectueux de l'environnement
Exemple	Lac d'Enghien (95) en 2002 Pré-retenu Hte Vilaine (28 000 m ³) en 2009	



Une alternative au curage, dans les plans d'eau peu profonds au sédiment riche en matière organique et à l'eau un peu acide, est l'apport d'un composé contenant des bactéries naturelles du cycle de l'azote (voir § 214). Certes le sédiment contient déjà des bactéries capables de minéraliser la matière organique, mais ce composé pourrait les « activer », diminuant ainsi l'épaisseur des vases et la demande en oxygène, ce qui est favorable au piégeage du phosphore.

Suceuse à tête dilacératrice

2.1.7 Destratification

Destratification	Caractéristiques	Remarque
Principe	Détruire ou empêcher la stratification thermique pour modifier ou diminuer la prolifération des algues en : <ul style="list-style-type: none"> . entraînant les algues à l'obscurité . apportant de l'oxygène au fond . augmentant la turbidité . nuisant aux cyanobactéries . diminuant le pH en surface . favorisant le zooplancton . détruisant la stabilité de la colonne d'eau 	Faire la part des différents phénomènes est un exercice difficile
Installation Aménagement	<ul style="list-style-type: none"> • système d'injection d'air par tuyaux percés • installation de brassage mécanique depuis la surface 	Le 1 ^{er} système est le plus utilisé parce que son champ d'action est modulable à la demande L'aération par turbine semble progressivement délaissée (il n'y en a plus dans le Jaunay, les installations devraient être remplacées dans Apremont (85))
A prévoir	Installation au point le ou les plus profonds mais à 1 ou 2 m du sédiment	
Contraintes	<ul style="list-style-type: none"> • un dimensionnement suffisant pour un mélange complet de la surface au fond, mais non superflu pour éviter la remise en suspension du sédiment • une source d'énergie à proximité 	Fonctionnement de mai à octobre environ (avant le début de la stratification et pendant les périodes d'abondance potentielle des algues bleues)
Effets secondaires	Accroissement du développement des cyanophytes	
Gestion à prévoir	Entretien des installations (tuyaux, compresseur, alimentation électrique)	Dans la retenue du Cébron, les tuyaux ont été remplacés après 15 ans
Facteurs d'incertitude	Réaction des algues face au mélange des eaux de surface et de fond	
Efficacité	Homogénéisation de la colonne d'eau par mélange des eaux de surface et de fond aux caractéristiques différentes L'élimination des algues bleues est rarement effective Effets positifs avérés sur la fabrication d'eau potable, facilitée par la stabilité de la composition chimique de l'eau, la diminution des goûts et odeurs désagréables, la diminution de l'accumulation de fer, manganèse, hydrogène sulfureux ...	Voir commentaire ci-dessous : on en retiendra que le mélange des eaux de surface et de fond a des effets antagonistes, et que selon les caractéristiques chimiques et biologiques du lac, les effets obtenus diffèrent d'un lac à l'autre, mais aussi dans un même lac au cours du temps

Exemples	Mas Chaban (16) Pont l'Abbé (29) Le Gouet (22) Moulin-Ribou (49) Grangent (42) Visance (61) La Sorme (71) Cébron (79) Pierre-Brune (85)	Ce type de dispositif est, malgré son coût élevé, le plus fréquemment installé dans les retenues destinées à l'eau potable
-----------------	--	--

Beaucoup de « si »

La dispersion des algues s'accompagne de leur diminution si l'eau de surface n'est pas carencée en phosphore ; sinon, l'introduction du phosphore du fond en surface par le brassage a l'effet inverse. Et si l'azote est rare, ce sont alors les cyanobactéries qui se développent. L'oxygénation à l'interface eaux/sédiment peut bloquer le phosphore (et donc limiter la quantité d'algues) si le sédiment n'est pas trop riche en phosphore par rapport au fer (combinaison chimique phosphore-fer).

Si la charge interne en phosphore résulte de la décomposition de la matière organique par les bactéries, alors le réchauffement de l'eau de fond par la circulation accroît l'apport de phosphore en surface.

Le mélange des eaux de surface et de fond aux caractéristiques chimiques différentes a donc à la fois des effets favorables et défavorables sur le phosphore et la croissance algale. Selon la balance entre les phénomènes, les résultats obtenus sont plus ou moins satisfaisants. Il est cependant rare que ce type d'installation fournisse les effets inverses de ceux attendus.

2.1.8 Aération lente

Aération lente	Caractéristiques	Remarque
Principe	Faire circuler l'eau dans le double objectif d'apporter de l'oxygène vers le fond et d'entraîner les algues à l'obscurité pour limiter leur développement	La puissance de l'installation étant faible, la circulation de l'eau est assez lente à se mettre en place (quelques semaines)
Installation Aménagement	<ul style="list-style-type: none"> aérateur éolien (« hydrolienne ») aérateur solaire 	
A prévoir	<p>1 à 2 ha traités par éolienne</p> <p>4 à 6 ha traités par appareil solaire</p>	En France, les vents sont suffisants pour faire tourner le système neuf mois sur douze environ. Les appareils solaires sont proposés sans alternateur ni batterie ; l'aération est donc stoppée la nuit
Contraintes	Systèmes utilisables dans les étangs de faible profondeur mais supérieure à 2 m	
Effets secondaires	?	
Gestion à prévoir	Durée de vie des appareils de 20 ans annoncés par les fournisseurs. Frais d'exploitation limités, une source d'énergie non renouvelable n'étant pas nécessaire	Certains fournisseurs proposent une location (6 mois minimum, conseillée sur 1 an pour plus d'efficacité), avec option d'achat
Facteurs d'incertitude	Le vent ou l'ensoleillement, sans parler des effets réels de la lente circulation de l'eau	Un suivi expérimental sera conduit en 2010 par l'université de Rennes
Efficacité	Pour ce qui concerne les hydroliennes, performances du même type que celles des autres systèmes de destratification dans les plans d'eau faiblement profonds : effets sur la température et l'oxygène au fond, incapacité à éliminer les algues bleues ²⁹ . Concernant les aérateurs solaires, retour d'expérience trop limité (2 ans) pour formuler des conclusions. On voit mal toutefois pourquoi leur efficacité serait différente de celle des éoliennes, même si l'énergie solaire garantit a priori un fonctionnement pendant tout le printemps et l'été	Un effet de réduction des proliférations de macrophytes (myriophylle) semble avoir été observé (visuellement) dans le plan d'eau de La Bergeronnerie près de Tours
Exemples	<p>éolienne : Pont-Rouge (59), pré-retenu de la Cantache (35)</p> <p>solaire : La Bergeronnerie (37)</p>	

²⁹ AEAP, 2007, Suivi de l'impact d'un procédé technique de lutte contre les conséquences du processus d'eutrophisation des plans d'eau : suivi de l'efficacité des hydroliennes installées dans l'étang du Pont-Rouge (Le Quesnoy), 59 p.
Pas de données disponibles dans la pré-retenu de la Cantache.

2.1.9 Oxygénation hypolimnique

Aération hypolimnique	Caractéristiques	Remarque
Principe	Accroître l'oxygène dans le fond du plan d'eau sans briser la stratification pour : . réduire la charge interne en P . oxyder les composés sources d'odeurs . permettre la vie des salmonidés	
Installation Aménagement	Système à terre ou immergés mettant l'eau en mouvement par une pompe ou par effet d'air lift	Consulter les sociétés spécialisées
A prévoir	Dimensionnement et positionnement par la société spécialisée fournissant et garantissant le matériel	
Contraintes	La stratification doit être stable pour éviter le mélange entre les eaux de surface et de fond (riche en P)	
Effets secondaires	Destratification intempestive Prolifération algale	
Gestion à prévoir	Maintenance des installations	
Facteurs d'incertitude	Stabilité de la stratification et sa durée	
Efficacité	Averée sur l'oxygénation de l'eau de fond si le dimensionnement est correct	
Exemples	Retenue du Gouet (29)	Un nouveau système a été récemment installé en remplacement du 1 ^{er} , après 20 ans de fonctionnement

2.1.10 Lutte biologique

Lutte biologique	Caractéristiques	Remarque
Principe	Diminuer la quantité d'algues en modifiant la composition du peuplement de poissons	
Installation Aménagement	Éliminer les poissons qui mangent du zooplancton brouteur de phytoplancton Empoisonner en poissons phytoplanctonophages	Connaître précisément la structure du peuplement de poisson est un préalable
A prévoir	Empoisonner préférentiellement en brocheton (prédateur) et en rotengle (mangeur d'algues) Favoriser les zones de reproduction des poissons	Action envisageable en complément d'une diminution des apports du bassin
Contraintes	Éliminer les gardons (zooplanctonophages) pour éviter l'hybridation avec les rotengles	Gardon et rotengle sont morphologiquement très proches
Effets secondaires	A priori néant	
Gestion à prévoir	Réempoisonnement(s) pour que la structure du peuplement reste adéquate au fil du temps	A faire au vu de résultats de pêches électriques ou aux filets
Facteurs d'incertitude	Intensité du broutage	
Efficacité	Peu de retour d'expérience ³⁰ : il est difficile de déterminer l'effet de cette intervention dès lors qu'elle vient compléter le dispositif de lutte	
Exemples	Jaunay (85)	

La plantation de roselières, notamment dans les pré-retenues (voir ci-après) fait également partie de cette famille d'interventions, en activant la concurrence pour le phosphore entre les végétaux amphibies et les algues microscopiques. Selon le temps de séjour de l'eau dans la retenue, un faucardage peut être nécessaire tous les ans pour « exporter » le phosphore contenu dans les tiges avant qu'elles ne dégèrent en hiver en restituant le phosphore au plan d'eau.

D'autres dispositifs sont encore au stade expérimental, comme les « biofilms épiphytiques »³¹ (mise en concurrence des algues et des bactéries fixées avec les algues planctoniques).

³⁰ Aquascop, 2001, Effets de l'empoisonnement sur l'eutrophisation de la retenue du Jaunay : rapport au SDAEP Vendée.

³¹ De Nardi, 2009, Excès de phosphore et de matière organique dans les eaux de retenues ; diagnostic et remèdes, cas du lac de Ribou à Cholet, thèse univ. Angers.

2.1.11 Destruction des algues par ultra-sons

Ultra-sons	Caractéristiques	Remarque
Principe	Détruire les algues par éclatement des cellules	Un effet de limitation du développement algal est annoncé par les fournisseurs
Installation Aménagement	Appareils de production des ultra-sons : selon la puissance choisie, le champ d'action varie de 25m ² à 2,5ha	Certains appareils fonctionnent par panneaux solaires
A prévoir	Source d'alimentation électrique ou panneau solaire	
Contraintes	Quelques semaines semblent nécessaires à l'éclatement, ce qui impose de mettre le système en route bien avant l'utilisation de l'eau et sans connaître la nature et la densité des algues présentes Tous les types d'algues sont susceptibles détruits	La résistance des cellules à l'éclatement est vraisemblablement différente selon les taxons, et les cyanophytes ne sont pas obligatoirement les moins tolérantes
Effets secondaires	Libération éventuelle de toxines si les cyanophytes en sont productives	Utilisé en bassin de pisciculture, un dispositif à ultrasons ne semble pas avoir perturbé les poissons
Gestion à prévoir	Une durée de vie d'environ 10 ans est annoncée par les fournisseurs du matériel	
Facteurs d'incertitude	Densité algale initiale ?	
Efficacité	Effets obtenus en laboratoire contradictoires : vibration des cellules et éclatement à terme, diminution de la photosynthèse par baisse de la concentration en chlorophylle et en phycocyanine / possibilité d'augmentation de la microcystine extra-cellulaire ... La croissance algale reprend à l'arrêt des émissions ³² Retours d'expérience en plans d'eau très limités du fait de l'installation récente de ce type de dispositif, souvent en association avec un traitement à la craie (La Cavalière)	Dispositif faisant l'objet d'une commercialisation sans réelle validation scientifique en milieu naturel
Exemples	Plans d'eau de La Cavalière à Carcassonne (09), Douarnenez (22), Marne la Coquette (92)	

³² SHIMIZU Y., 2003, The effect of the ultrasonic unit LG Sonic on a single culture stock of *Microcystis ichtyoblable* in a strictly controlled environment, 19 p.

2.2. PRE-RETENUES TAMPON

2.2.1 Principes et caractéristiques requises

Pré-retendue	Caractéristiques	Remarque
Principe	Les particules qui sédimentent épurent le phosphore fixé sur les argiles Consommation des phosphates dissous par les algues et les plantes amphibies	
Installation Aménagement	Petit réservoir construit en entrée de plan d'eau pour le protéger de l'envasement	ou palplanches immergées juste sous la surface de l'eau
A prévoir	Profondeur de 1 à quelques mètres Temps de séjour supérieur à 3 jours mais « inférieur au développement des cyanophytes » ³³ , soit environ 10 jours ³⁴ Exutoire vers le plan d'eau en surface	3 à 5 m La vitesse de croissance des algues peut être très rapide (1 semaine à 10 jours)
Contraintes	Concentration en phosphore au maximum de 0,5 mgP/L ³⁵	Chiffre annoncé sans justification technique
Effets secondaires	Si une végétation amphibie se développe sur les bords, prévoir son faucardage annuel pour « exporter » le phosphore ainsi stocké La plantation d'une roselière peut aussi être prévue dès le départ du projet, en complément, pour son effet de consommation des phosphates	La faisabilité est à étudier en fonction des caractéristiques du site (pente et forme des berges, profondeur, marnage ...)
Gestion à prévoir	Curage et enlèvement du sédiment à prévoir Faucardage éventuel de la roselière	A adapter à la vitesse de sédimentation ; tous les 3 à 5 ans ?
Facteurs d'incertitude	Oxygénation correcte nécessaire au niveau du sédiment Développement des diatomées et des algues vertes souhaitable mais non garanti	« Ensemencement » du grand plan d'eau par un développement de cyanophytes dans le pré-bassin ?
Efficacité	Réelle si la vitesse d'écoulement et le temps de séjour de l'eau permettent le dépôt des particules et si celles-ci ne sont pas reprises par l'augmentation du débit en automne	C'est le phosphore des particules qui est concerné, plus que les phosphates dissous : si les algues ne sédimentent pas, le phosphate consommé est transmis au plan d'eau en ayant changé de forme
Exemples	Visance Landisacq (61) La Bultière (85) Jaunay (85) La Sorme (71) Villaumur-Cantache (35)	Jaunay, Visance, La Sorme sont également destratifiés

³³ étude n°62

³⁴ étude n°83

³⁵ étude n°62

2.2.2 Retour d'expérience

La difficulté d'évaluer les effets précis de ce type de dispositif tient au fait qu'il est le plus souvent réalisé en parallèle à d'autres installations (destratification, apport de craie, mise en assec du plan d'eau³⁶ ...) sans suivi ni comparaison amont-aval.

site	dimensions	année de création	efficacité	entretien suivi	budgets
Lavaud (16)	surface 40 ha profondeur maximale 4 m	1989	jugée bonne sur les m.e.s. (10 cm de sédiment en 20 ans) modérée sur les algues	néant	création prévue dès la construction du barrage coût d'entretien très faible
Moulin Neuf (29)			étude en cours (2010)		
Villaumur Cantache (35)	11 ha	1995	40 000 m ³ accumulés en 15 ans pas de suivi de la qualité de l'eau	pas de suivi curage à sec partiel 28 000 m ³ en 2009	investissement ? 167 k€HT ³⁷
Rophemel (35)			étude de l'efficacité en cours		
La Sorme (71)	4,6 ha 50 000 m ³	1995	jugée correcte sur les m.e.s.	curage 7500 m ³	450 kF
La Bultière (85)	3 ha profondeur maximale 6m 180 000 m ³	1993	8000 m ³ de sédiment en 10 ans	néant	non connus
Jaunay (85)	20 ha 300 000 m ³	1997	non connue	néant	2 MF
Val d'Auron (18)	profondeur 1,50 m surface 0,4 ha (piège à sédiments 50 cm sous la surface)	1977	efficacité jugée satisfaisante : 6000 m ³ de sédiment recueillis		

Des informations fiables sur ces dispositifs manquent dans la mesure où ils ne font pas l'objet de suivis de l'évolution de la qualité de l'eau, des sédiments et des peuplements végétaux, suivis réservés, pour des raisons de coût, au plan d'eau principal. Dans tous les cas, ils n'ont d'intérêt que s'il a été démontré que les apports de phosphore du bassin versant sont prépondérants par rapport aux

³⁶ Cas de la Visance en 2009.

³⁷ Ce budget se répartit en 3 postes principaux de montants équivalents : le curage proprement dit, l'évacuation des sédiments curés, et l'ensemble des travaux de préparation du chantier et de remise en état du site.

apports internes dans la prolifération algale. Un temps de séjour suffisant (à calculer en fonction des débits entrants), une oxygénation correcte de l'eau et un entretien annuel sont a priori les conditions minimums de leur intérêt.

2.3. DISCUSSION CONCERNANT LES VIDANGES DECENNALES

On sait qu'une vidange a potentiellement des effets désastreux sur le cours d'eau en aval :



- transmission de matières en suspension concentrées,
- colmatage des faciès,
- désoxygénation voire risque d'anoxie,
- production d'ammoniaque (et parfois risque de production d'ammoniac),
- relargage et transmission de métaux (ou autres micropolluants),
- perturbation voire mort des organismes aquatiques ...

Vue sous un autre angle, cette opération restitue au cours d'eau aval le transit sédimentaire interrompu par le barrage en libérant la cuvette de son envasement. Par la même occasion, le phosphore stocké dans le sédiment, puis libéré par la mise en suspension des vases, est envoyé vers l'aval.

L'utilisation de la vidange comme technique alternative au curage est envisageable si :

- . la couche superficielle du sédiment contribue à recharger la colonne d'eau en phosphore l'été,
- . il n'y a pas de retenue sensible en aval,
- . il n'y a pas de milieu naturel sensible en aval,
- . le sédiment ne contient pas de micropolluants (au delà du bruit de fond géochimique et des NQE),
- . la vidange est conduite dans les règles de l'art pour éviter toute atteinte en aval (seuils d'arrêt de vidange suffisamment sévères),
- . l'eau résiduelle (une retenue est rarement vidée complètement) ne contient pas de phosphore en forte concentration du fait de la remise en suspension des vases et de la consommation en oxygène.

Dans ces conditions, le coût écologique en aval est a priori modéré, pour un coût écologique dans la retenue faible (l'étude d'impact les évaluera préalablement à l'opération). En terme économique de lutte contre le phosphore, la possibilité d'utiliser la vidange ne coûte qu'une étude préalable des modalités de relargage du phosphore en laboratoire. On notera toutefois qu'il n'y pas de certitude de transposition exacte des expériences laboratoire à l'opération en vraie grandeur.

Le cas de la retenue de Lavaud sur la Charente peut cependant être cité pour avoir été l'objet de vidanges quasi complètes tous les 2 ans, puis tous les ans en fin d'été depuis 1992. Les vidanges ont permis d'entraîner les cyanophytes vers l'aval mais n'ont pas empêché leur prolifération l'année suivante, peut être parce qu'un volume d'eau résiduel était conservé en eau pour les poissons (sur 1 ha)

permettant le dépôt des cyanophytes (et de leur forme de résistance) sur le fond.

2.4. RECAPITULATIF DES CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES MESURES PREVENTIVES ET CURATIVES A METTRE EN PLACE

2.4.1 Préambule

Le choix des actions à mettre en place doit s'appuyer sur les caractéristiques du plan d'eau, et notamment l'importance relative des charges externes (flux entrant) et internes (stock dans le sédiment et relargage).

On sait déjà que les retenues (eutrophisées) qui font l'objet du présent dossier sont situées sur des bassins dont les exploitations agricoles doivent atteindre l'équilibre de la fertilisation phosphorée. En mesure préventive efficace à long terme, seule la lutte contre les apports de phosphore (et d'azote) est envisageable. En ce qui concerne les mesures curatives, certaines existent déjà dans les plans d'eau concernés.

2.4.2 Délais de réponse d'un plan d'eau aux actions engagées

Cette question est un élément influençant les décisions d'un gestionnaire de retenues, notamment dans le cadre d'un report d'objectif pour l'application de la DCE, mais elle n'a pas de réponse dans l'absolu.

Il est en effet très délicat de fournir a priori les délais de réponse des milieux aux **actions préventives** engagées, car ils sont fonction de plusieurs facteurs :

- . typologie du plan d'eau,
- . stock en place dans le sédiment,
- . présence éventuelle de macrophytes,
- . dynamique du zooplancton, relations biotiques entre les communautés (avec les poissons notamment),
- . conditions climatiques (pluie, température, vent, lumière) non maîtrisables,
- . temps de séjour de l'eau : celui-ci a 2 effets opposés sur la production algale ; elle l'accroît en offrant plus de temps aux cellules pour se multiplier, mais elle la réduit en diminuant la concentration de P mis à la disposition des algues par sédimentation. Notons à cet égard que les échelles de variation dans le temps sont différentes : la journée pour les algues, l'année pour le phosphore ...

*En lac peu profond, Barroin indique qu'une concentration moyenne de P total dans les 15 premiers cm de sédiment supérieure à 1‰ provoque un relargage annuel net pouvant durer 5 ans après la réduction des apports par le bassin³⁸.
Même si c'est plus la forme du phosphore qui est en cause que sa concentration (ou même l'état d'oxydation du sédiment), cela montre que le délai de l'effet d'une action est au minimum de plusieurs années.*

³⁸ étude n°62

En lac profond³⁹, les phénomènes sont différents : la charge interne ne se traduirait pas par un relargage net à l'échelle annuelle.

*A partir des comparaisons flux/stock dans la retenue du Gouet⁴⁰, il a été estimé que la mise en œuvre des « **mesures préventives** » sur le bassin versant n'a permis d'abaisser la concentration du **phosphore dans le sédiment que de 16% en 15 ans.***

Les **actions curatives** ont un délai de l'effet, sur certaines caractéristiques de l'eau (oxygénation, homogénéité, stabilité, turbidité ...), et non sur l'eutrophisation, qui va de quelques jours (mise en route d'une installation de destratification, clarification de l'eau par floculation), à quelques semaines (aération par éolienne, traitement des sédiments).

2.4.3 Coût des différents moyens de lutte contre l'eutrophisation

Les différentes techniques de lutte sont classées par ordre d'efficacité potentielle décroissante : actions sur le phosphore, sur le milieu, sur les algues.

technique	coût d'investissement (HT)	coût d'exploitation / entretien	remarque
pré-retendue	très variable selon qu'elle a été ou non prévue à l'origine, et ses dimensions	curage, fonction de la sédimentation voir § dragage ci dessous	très peu de retour d'expérience concret
précipitation du phosphore de l'eau par épandage de sulfate d'alumine	1 à 3 k€/ha de plan d'eau traité	sans objet	coûts variant en fonction de la superficie traitée
épandage calcaire (action sur les m.e.s.)	0,8 à 1,5 k€/ha de plan d'eau traité	sans objet	coûts variant en fonction de la superficie traitée et du produit utilisé
épandage de bio-additifs (action sur m.e.s. et digestion du sédiment)	1 à 5 k€/ha de plan d'eau traité	sans objet	coûts très variables en fonction de la superficie traitée et du produit utilisé
fixation du phosphore du sédiment	12 k€/ha ?	sans objet	estimation calculée à partir du seul cas du Revestidou : 420 k€ pour 35 ha

³⁹ En toute rigueur, la profondeur significative n'est pas le maximum ou la moyenne du plan d'eau, mais le rapport entre la base de l'épilimnion et la surface du lac. Un lac est peu profond lorsque le rapport est supérieur à 0,5.

⁴⁰ Jigorel et coll., op.cit.

technique	coût d'investissement	coût d'exploitation / entretien	remarque
dragage	à sec : 0,005 à 0,01 k€/m ³ en eau ⁴¹ : 0,01 à 0,05 k€/m ³	sans objet	<ul style="list-style-type: none"> coûts très variables selon les machines utilisées (d'efficacité variable), le volume des matériaux enlevés et le devenir des vases dans ce budget, le coût de l'évacuation des vases peut être supérieur à celui de l'extraction
destratification (injection d'air par tuyaux immergés)	75 à 150 k€/km tuyau installé en fond de plan d'eau	25 à 100 k€/an	coûts variant du simple au double en fonction du kilométrage de tuyau installé
aération par turbine de surface	50 à 100 k€ selon le modèle installé pour 0,5 à 1 ha	5 k€/an	installations en plans d'eau en voie d'abandon
aération lente par éolienne	10 à 15 k€ par appareil traitant environ 1 à 2 ha	négligeable	
aération lente à énergie solaire	20 k€/appareil traitant 3 à 6 ha de plan d'eau	négligeable	location possible pendant 6 mois à 1 an avec option d'achat 1 à 2 k€/mois
oxygénation hypolimnique	300 à 450 k€ selon l'appareil installé	25 k€/an	
destruction des algues par ultrasons	1 à 3 k€/appareil traitant 1 à 2 ha de plan d'eau	négligeable pour le modèle à panneau solaire	coûts variant selon le modèle mettant en mouvement un volume d'eau plus ou moins grand
lutte biologique par empoissonnement en rotengle et brocheton	brocheton 1 été 5€/pièce rotengle 8-12 cm 11 €/kg	néant	mesure d'accompagnement aux effets non mesurables

⁴¹ On se limite ici au curage retenue en eau sans dommages environnementaux.

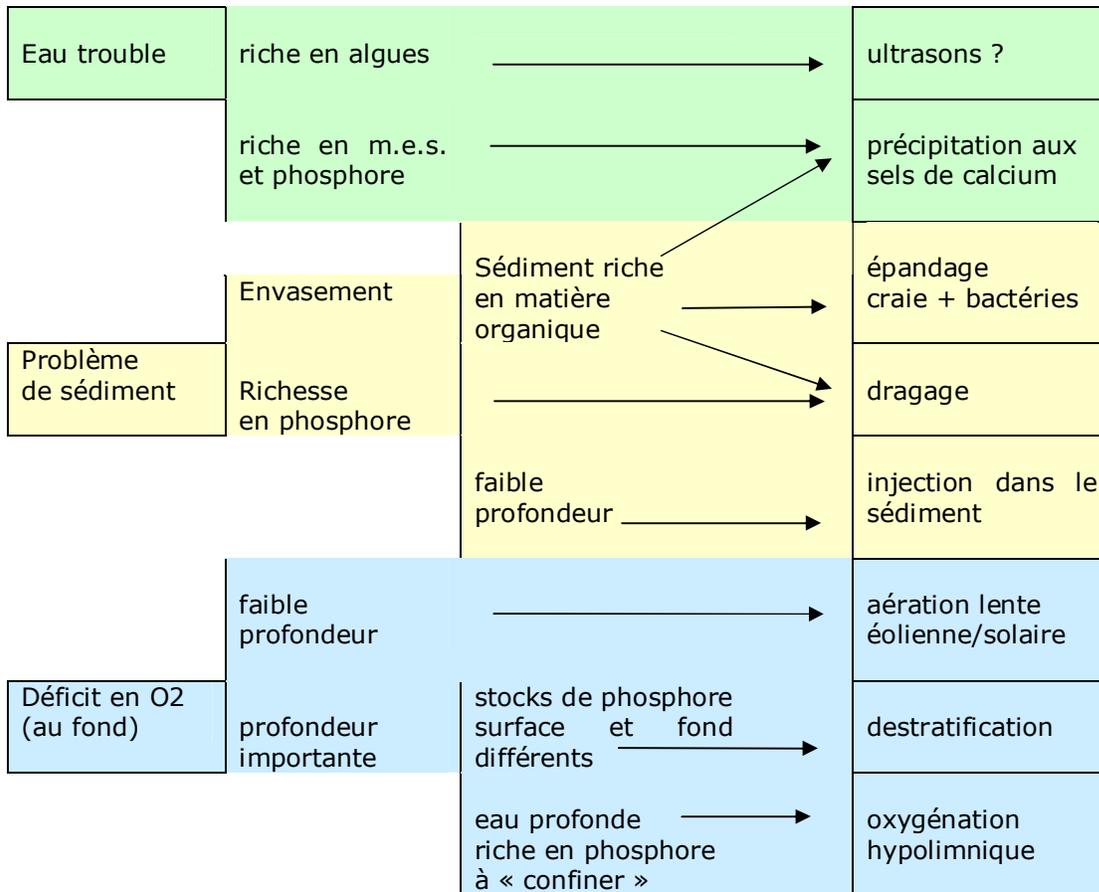
2.4.4 Comparatif des différents types de mesures de lutte contre l'eutrophisation

Les effets recherchés et objectifs sont très différents, les coûts et contraintes également. Le choix de la ou des techniques utile(s) est présenté ci-après. N'y apparaissent que les techniques réellement utilisables et susceptibles de résultats.

Comparaison des différents moyens de lutte contre l'eutrophisation

type d'intervention	effet recherché sur	efficacité/ effets constatés	effets indésirables	coût	durée de vie/ pérennité
pré-retenu	phosphore dissous et particulaire	sédimentation du P particulaire et consommation du P dissous par les végétaux	relargage possible du phosphore du sédiment et les macrophytes (en automne) « ensemencement » en algues du grand plan d'eau	assez élevé + entretien + curage	5 à 10 ans ? selon la production et la sédimentation dans le plan d'eau : curage et fauchage à prévoir
précipitation du phosphore de l'eau	phosphore particulaire	efficace : la floculation des m.e.s. est utilisée dans les stations de potabilisation de l'eau	apport d'éléments non présents dans le milieu (cas du sulfate d'alumine ...) ou présents mais en concentrations modérées (calcium, fer)	assez élevé	1 an ? effets limités dans le temps si les apports par le bassin versant continuent
épandage de bio-additif (floculation des matières en suspension et digestion du sédiment)	particules de l'eau et matière organique du sédiment	éclaircissement possible de l'eau ; durée de l'effet limitée	modification possible du pH par l'apport de craie	modeste mais à renouveler	1 an
fixation du phosphore du sédiment	phosphore du sédiment	amélioration de l'oxygénation et diminution du phosphore de l'eau	apport de différents composés dont du sulfate d'alumine	élevé	5 ans ? 10 ans espérés dans le cas du plan d'eau de Caderousse
dragage	stock de phosphore du sédiment	réelle sur le stock de phosphore en lacs peu profonds	moins liés au procédé qu'à la (mauvaise) qualité des sédiments et à leur demande en oxygène	élevé	5 à 10 ans selon apports du bassin versant
destratification (injection d'air par tuyaux immergés)	toute la hauteur d'eau	limitation/destruction de la stratification, homogénéisation de toute la hauteur d'eau, apport d'oxygène	dans certains cas, une activation du développement des algues bleues a été observée	élevé + consommation d'électricité + entretien	l'effet est effectif lors du fonctionnement du système ; durée de vie estimée : plus de 20 ans ?
aération par turbine de surface	toute la hauteur d'eau	homogénéisation de toute la hauteur d'eau apport d'oxygène	remise en suspension des m.e.s. possible en profondeur/ maintien de l'anoxie en profondeur avec relargage du phosphore	élevé + consommation d'électricité + entretien	effets liés au fonctionnement du système ; durée de vie estimée : plus de 20 ans ?
aération lente par éolienne	toute la hauteur d'eau	homogénéisation de toute la hauteur d'eau apport d'oxygène	néant ?	modeste coûts d'exploitation négligeables	effets liés au fonctionnement du système ; durée de vie estimée : plus de 10 ans ?
aération lente à énergie solaire	toute la hauteur d'eau	homogénéisation de toute la hauteur d'eau apport d'oxygène	néant ?	modeste coûts d'exploitation négligeables	effets liés au fonctionnement du système ; durée de vie estimée : plus de 20 ans ?
oxygénation hypolimnique	tranche profonde d'eau	apport d'oxygène au fond du plan d'eau sans perturbation de la stratification	?	très élevé à l'achat ; élevé en exploitation (dont consommation d'électricité)	la 1 ^{ère} installation a duré 20 ans dans la retenue du Gouet
destruction des algues par ultrasons	algues	?	?	modeste coûts d'exploitation négligeables	10 ans annoncés par le constructeur des appareils

Pour intervenir dans un plan d'eau :



2.5. CONCLUSION

Il ressort des retours d'expérience décrits ci-avant qu'aucune des techniques de lutte contre l'eutrophisation n'est à la fois efficace à court et long terme, facile à mettre en œuvre, sans risque d'effets secondaires pour l'environnement et totalement satisfaisante.

Il est évident aussi que toute retenue est un cas d'espèce, et que les observations faites sur d'autres plans d'eau ne sont quasiment pas transférables, du fait de leurs particularités respectives : dimensions, orientations, climat, alimentation en eau, bassin versant ...

Seules les actions préventives (lutte contre les apports polluants à l'origine des développements algaux) auront à très long terme (20 à 30 ans ?) un effet durable permettant un retour en arrière.

Les mesures curatives peuvent améliorer temporairement la situation : elles nécessitent donc un suivi de leurs effets et une gestion en temps réel.

Force est de constater que c'est rarement le cas, en particulier sur de longues chroniques permettant de s'affranchir des variations annuelles naturelles liées au climat et à l'hydrologie. Le retour d'expérience reste donc malheureusement très limité.

3. ANNEXES

3.1. BIBLIOGRAPHIE CONCERNANT L'EUTROPHISATION

AEAP, 2007, Suivi de l'impact d'un procédé technique de lutte contre les conséquences du processus d'eutrophisation des plans d'eau : suivi de l'efficacité des hydroliennes installées dans l'étang du Pont-Rouge (Le Quesnoy), 59 p.

AFSSA-AFSSET, 2006, Risques sanitaires liés à la présence de cyanobactéries dans l'eau, 232 p.

Agences de l'Eau, 1999, Limnologie appliquée au traitement des plans d'eau. Les Etudes des Agences de l'Eau n°62, 217 p.

Agences de l'Eau, 2001, Aide à la décision pour le traitement des plans d'eau. Les Etudes des Agences de l'Eau n°83, 104 p.

Aquascop, 2001, Effets de l'empoisonnement sur l'eutrophisation de la retenue du Jaunay : rapport au SDAEP Vendée.

Aquascop, 2008, Interprétation des données de suivi de la qualité de l'eau du secteur de la Lieue de Grève, rapport au Conseil Général des Côtes d'Armor, 3 tomes + annexes.

Association internationale de limnologie théorique et appliquée, 2007, Travaux du 30e congrès, volume 30, pp.990-1147 (35 publications).

Birgand F. et coll., 2009, Stratégies d'échantillonnage et incertitudes sur l'évaluation des flux et des indicateurs de concentration dans les cours d'eau : exemple des nitrates en Bretagne⁴².

Brient L., 2009, La restauration des milieux aquatiques, une démarche, des actions, univ. Rennes, 37 p.

Bourdin L., 2004 Caractérisation et suivi de l'eutrophisation des lacs et cours d'eau lenticques en France, une ouverture européenne, Cahier technique ENGREF OIEau.

Cann Ch., 1990, Transfert du phosphore d'une zone d'élevage intensif vers les eaux. Rapport Cemagref, 87 p. + annexes.

Cann Ch., Bordenave P., Saint-Cast P., Benoit J.C., 1999, Transferts et flux de nutriments. Importance des transports de surface et de faibles profondeurs, Actes du colloque Ifremer Pollutions diffuses : du bassin versant au littoral, 24, 125-140

⁴² Cet article porte sur les nitrates et non sur le phosphore, mais il est très intéressant par la mise en évidence des écarts induits dans les résultats par les méthodes d'échantillonnage et de calcul.

CNR, 2007, Restauration du plan d'eau du Revestidou par traitement des sédiments, diaporama, 14 p.

Conseil général des Côtes d'Armor, 2007, Syndicat Mixte Arguenon Penthièvre. - Eutrophisation de la retenue sur l'Arguenon et du plan d'eau de Lorgeril, Rapport annuel : synthèse des résultats, non paginé.

Conseil général des Côtes d'Armor, 2007, Syndicat Mixte de Kerné Uhel. - Eutrophisation de la retenue sur le Blavet, Rapport annuel : synthèse des résultats, non paginé.

CSEB (Conseil Scientifique de l'Environnement en Bretagne), 2005, 2008, Fiches techniques et scientifiques pour la compréhension des bassins versants et le suivi de la qualité de l'eau, tomes 1 et 2, 180 et 145 p. <http://www.cseb-bretagne.fr/index.php/Eau/Recueil-de-fiches-techniques-et-scientifiques.html>

De Nardi, 2009, Excès de phosphore et de matière organique dans les eaux de retenues ; diagnostic et remèdes, cas du lac de Ribou à Cholet, thèse univ ; Angers.

D2L BETALI, 2008, Dossier d'autorisation de curage de la pré-retenue de Gérard, rapport au Conseil Général d'Ille et Vilaine, 77 p.

GEPMO, 2003-2004, Etude relative à la dynamique du transfert des matières organiques dans les bassins versants, www.bretagne-environnement.org.

GEPMO, 2003-2004, Etude relative à l'analyse des données existantes dans le but de déterminer les facteurs explicatifs de la présence de matière organique dans les eaux de surface bretonnes, www.bretagne-environnement.org.

GEPMO, 2003-2004, Etude relative à la mise au point d'outils moléculaires de traçage des matières organiques, www.bretagne-environnement.org.

GEPMO, 2004, Etude de synthèse relative à l'établissement d'un état des lieux des captages d'eau brute en rivière de Bretagne du point de vue de leur pollution par les matières organiques et à la définition de mesures concrètes pour recouvrer une eau de bonne qualité, www.bretagne-environnement.org.

GEPMO, 2004, Pollution des captages superficiels d'eau brute de Bretagne par les matières organiques, rapport de synthèse, tableau de bord de la pollution, causes possibles, recommandations, 107 p.

GEPMO, 2004, Pollution des captages superficiels d'eau brute de Bretagne par les matières organiques, Flux, concentrations moyennes et dynamiques des transferts dans les bassins versants, réflexions sur les indicateurs, caractérisation moléculaire des sources, 110 p.

GEPMO, 2004-2005, Etude sur l'impact d'opération d'aménagements et de gestion de l'espace sur la qualité des eaux de fossés (matières organiques, nitrates, pesticides), www.bretagne-environnement.org.

GEPMO, 2004-2005, Etude statistique inter sous-bassins versants sur le rôle de l'occupation du sol et des pratiques agricoles sur la pollution des captages d'eau brute en rivière de Bretagne par les matières organiques, www.bretagne-environnement.org.

GEPMO, 2005. Pollution des captages superficiels d'eau brute de Bretagne par les matières organiques, Guide pratique pour localiser les zones sources de pollution et suivre l'évolution des pollutions dans le temps, 119 p.

GEPMO, 2006. Pollution des captages superficiels d'eau brute de Bretagne par les matières organiques ; une étude statistique inter sous bassins du rôle de l'occupation des sols et des pratiques agricoles, 113 p.

GEPMO, 2006 -2007, Etude sur la quantification des flux d'effluent d'élevage apportés aux sols par enquête et analyse du rôle de la ripisylve et de la micro et macro-faune⁴³ aquatique sur la pollution des captages d'eau brute de Bretagne par les matières organiques, www.bretagne-environnement.org.

GEPMO, 2006-2007, Etude sur la quantification par analyse moléculaire, spectroscopique et isotopique de l'impact des épandages d'effluents d'élevage sur la pollution des captages d'eau brute de Bretagne par les matières organiques, www.bretagne-environnement.org.

GEPMO, 2007, Etude sur la quantification du rôle respectif des apports autochtones et de matière organique au sein de la retenue de Bois Joli, bassin versant du Frémur, www.bretagne-environnement.org.

GEPMO, 2007, Pollution des captages superficiels d'eau brute de Bretagne par les matières organiques, une étude de l'impact des épandages de déjection animales par analyse moléculaire, spectroscopiques et isotopique de la matière organique, premiers résultats, 60 p.

GEPMO, 2008, Pollution des captages superficiels d'eau brute de Bretagne par les matières organiques, une étude de l'impact des épandages de déjection animales par analyse moléculaire, spectroscopiques et isotopique de la matière organique, rapport final, 91 p.

GEPMO, 2008, Pollution de la retenue de Rophemel par les matières organiques, quantification du rôle des apports respectifs en provenance du bassin versant et des sources internes à la retenue, quantification des stocks, 79 p.

Gruau G., 2009, Formes, sources et mobilité du phosphore à l'origine de l'eutrophisation à la retenue de Rophemel, Projet d'étude, 22 p.

Humbert J.F., 2009, Les cyanobactéries, acteurs indispensables des écosystèmes aquatiques, INRA, 16 p.

IDRA Environnement, ISL, Biotope, 2007, Etude de faisabilité à la vidange et au curage des retenues, étang de Chatillon en Vendelais et barrage de la Cantache, rapport au Conseil Général d'Ille et Vilaine, 180 p.

⁴³ Sic (il s'agit de la flore).

Jigorel A., Bouedo A., Nicolas R., Morin J.P., 2005. - Stockage du phosphore dans les sédiments d'un réservoir eutrophe (Gouet, Bretagne, France), The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources, Guimarães, Portugal, July 11-14 2005, 15 p.

Laguionie P., 2008. - Analyse rétrospective des teneurs en Phosphore total, Cuivre et Zinc des sédiments des retenues sur l'Arguenon, le Blavet et le Gouët (22), INSA Rennes, Conseil général des Côtes d'Armor, 68 p.

Mérot, 2006, Qualité de l'eau en milieu rural, Savoirs et pratiques sur les bassins versants, édition INRA, 344 p.

Meybeck, M., 1985, Variabilité dans le temps de la composition chimique des rivières et de leurs transports en solution ou en suspension ; Revue des sciences de l'eau, 4, 93-121.

Meybeck M., Pasco A., Ragu A., 1994, Evaluation des flux polluants dans les rivières, pourquoi, comment et à quel prix ? rapport université de Jussieu, 23 p.

MOIROUD C., 2010, Données concernant le plan d'eau de Caderousse avant et après traitement, courriel, 3 p.

Moatar F., Birgand F., Meybeck M., Fauchoux C. Raymond S., 2009, Incertitudes sur les métriques de qualité des cours d'eau (médianes et quantiles de concentrations, flux, cas des nutriments évalués à partir de suivis discrets), La Houille Blanche, 3, 68-76.

Parinet et coll., 2000, Etude analytique et statistique d'un système lacustre soumis à divers processus d'eutrophisation, Revue des sciences de l'eau, 13, 237-267.

Pitois et Jigorel, 2000 : étude de la qualité des eaux de la retenue de Moulin-Neuf à Pont l'Abbé.

Pourriot H., Meybeck M., 1995, Limnologie générale, Ed. Masson, 956 p.

Proliphyc, système de surveillance et d'alerte en continu des risques de prolifération planctoniques et cyanobactéries, programme ANR 2007-2009. <http://proliphyc.h2o.net/spip.php?article1>

Richard B., 2009, Etat des lieux du suivi du phosphore et des débits des 9 retenues stratégiques inscrites au projet de SDAGE (2008), tableau récapitulatif DREAL Bretagne, 2 p.

Sacytox, programme national RITEAU, système de surveillance et d'alerte des efflorescences de cyanobactéries toxiques dans le lac du Bourget entre 2002 et 2004. <http://proliphyc.h2o.net/spip.php?article1>

Schiavone et Coquery 2009, Analyse comparative et critique des documents guide ou normes pour le prélèvement des sédiments en milieu continental, rapport Aquaref.

Shimizu Y., 2003, The effect of the ultrasonic unit LG Sonic on a single culture stock of *Microcystis ichthyoblable* in a strickly controlled environment, 19 p.

Val Conseil, 1992, Une stratégie de lutte contre l'eutrophisation, publication AELB, 12 p.

3.2. LISTE DES CHAPITRES ET ELEMENTS DE L'ETUDE INTER-AGENCES N° 62 A MODIFIER LORS D'UNE MISE A JOUR

Etude inter-Agences °62 « Limnologie appliquée au traitement des lacs et des plans d'eau » :

chapitre	contenu	propositions
1	présentation	à reformuler
2	limnologie	/
3	stratégie d'intervention	à reformuler
4	modélisation et réponse trophique	à alléger sur certains points et compléter avec les nouvelles avancées scientifiques
5	interventions sur le bassin versant	contenu actuel à supprimer ou placer en annexe à titre historique ? sauf le § 547 à conserver en le déplaçant réécrire le chapitre si nécessaire
6	dragage	conserver l'inventaire à titre historique chapitre à actualiser selon les techniques réellement utilisables avec des exemples plus récents
7	précipitation inactivation	chapitre à actualiser avec les composés réellement utilisés et des exemples plus récents
8	dilution chasse	contenu à supprimer ? ou à garder à titre historique (intitulé du chapitre à renommer)
9	destratification	à actualiser
10	aération hypolimnique	à actualiser
11	soutirage hypolimnique	à actualiser
12	traitement des sédiments	à supprimer ou garder en annexe à titre historique ?
13	biomanipulation	intitulé à renommer ; contenu à revoir
14	algicides	à supprimer

3^e partie consacrée aux macrophytes non examinée dans le détail, mais chapitres à actualiser.

Chapitres 22 Faire le bon choix et 23 Conclusion à réviser.

3.3. LISTE DES CHAPITRES ET ELEMENTS DE L'ETUDE INTER-AGENCES N° 83 A MODIFIER LORS D'UNE MISE A JOUR

La partie introductive de l'étude inter-Agences n°83 « Aide à la décision pour le traitement des plans d'eau », qui présente des éléments généraux, reste valable. Les fiches techniques sont à actualiser : certains dispositifs de traitement des plans d'eau ont été modifiés ; les retours d'expérience sont à préciser ; les coûts sont à vérifier et exprimer en €.

3.4. GLOSSAIRE

Brassage : période de fin d'hiver ou de début de printemps, en général février-avril en plaine (et en mai-juin en montagne quand les lacs dégèlent tardivement), à laquelle le plan d'eau est totalement mélangé ; la composition de l'eau est homogène de la surface au fond.

Echantillon intégré : échantillon moyen constitué soit en prélevant sur la verticale d'une certaine profondeur avec la bouteille type INRA (" cloche Pelletier ") soit en mélangeant des sous-échantillons, de même volume, prélevés tous les mètres ; l'échantillonnage est réalisé, selon les besoins de la variable, le plus souvent dans la zone euphotique, parfois dans l'épilimnion, parfois sur toute la hauteur d'eau.

Epilimnion : couche d'eau de surface montrant une faible variation du gradient de température et située au-dessus du métalimnion.

Etang : plan d'eau peu profond non stratifié, en général d'origine artificielle.

Eutrophe : qualifie un milieu riche en sels nutritifs (surtout azote et phosphore) et à forte production primaire.

Hypolimnion : couche d'eau profonde du lac, située en dessous du métalimnion.

Mélange complet : état du lac lorsque température et oxygène sont homogènes de la surface au fond

Métalimnion : zone d'un lac comprise entre l'épi et l'hypolimnion au niveau de laquelle la température décroît rapidement avec la profondeur.

M.E.S. matières en suspension : ensemble des particules en suspension dans l'eau, vivantes (plancton) ou inertes, minérales ou organiques.

Mesure " estivale " : mesure, prélèvement, analyse à faire en période de développement algal important, d'avril/mai (parfois plus tardivement en montagne) à septembre (parfois octobre).

Mesure " hivernale " : mesure, prélèvement, analyse à faire en période de brassage complet du lac, généralement en fin d'hiver (mars/avril).

N (azote) Kjeldhal : méthode d'analyse de l'azote qui donne la somme des formes organiques et ammoniacale.

N (azote) minéral : ensemble des formes minérales de l'azote (nitrates, nitrites, ammoniacque – éventuellement ammoniac).

N (azote) total : ensemble des formes de l'azote, minérales et organiques (appelé aussi N global) ; ne pas confondre avec N minéral. Dans le sédiment, le résultat d'analyses de l'azote Kjeldhal (NKj) peut être assimilé à celui de l'azote total.

Nutriments : élément nutritif (azote, phosphore, silice)

Période de fort développement algal : généralement d'avril (parfois mars) à septembre (parfois octobre).

Plancton : ensembles des organismes flottant au gré des courants.

Production primaire : quantité de matière organique synthétisée par les organismes végétaux.

Profil (vertical) : mesure mètre par mètre de la surface au fond, de la température, de l'oxygène, du pH ou de la conductivité.

Stratification : superposition sans mélange de couches d'eau de compositions différentes.

Temps de séjour : il s'agit de la durée nécessaire du renouvellement complet de l'eau du plan d'eau ; sauf indication contraire, il s'agit le plus souvent de la valeur moyenne annuelle du temps de séjour.

Zone euphotique : tranche d'eau "suffisamment éclairée pour que la photosynthèse algale soit active", correspondant approximativement à 2,5 fois la transparence mesurée au disque de Secchi.



**NOTICE TECHNIQUE ET CAHIER DES CHARGES TYPE :
DIAGNOSTIC DU FONCTIONNEMENT ECOLOGIQUE
D'UNE RETENUE EN CONTEXTE ELEVAGE**

2. Protocoles d'étude et cahier des charges-type

avril 2010



1.	PROTOCOLES DE SUIVI DES MECANISMES A METTRE EN PLACE ...	56
1.1.	Objectifs	56
1.2.	Etablissement des flux en cours d'eau	56
1.2.1	Rappel de quelques principes	56
1.2.2	Fréquence des mesures chimiques : plusieurs stratégies sont possibles	58
1.2.3	Collecte des données de débits	60
1.2.4	Points de mesures	60
1.2.5	Remarques.....	60
1.3.	Suivi des effets du pré-barrage.....	61
1.4.	Evaluation du comportement de la retenue	62
1.4.1	Rappel du contenu du programme de surveillance des plans d'eau (extrait concernant la problématique eutrophisation)	62
1.4.2	Evaluation du stockage de phosphore dans la retenue	63
1.4.3	Evaluation de l'accumulation de phosphore dans le sédiment.....	63
1.4.4	Dynamique du relargage de phosphore par le sédiment.....	64
1.5.	Récapitulatif des mesures complémentaires proposées et coûts.	64
1.5.1	Propositions concernant l'établissement des flux.....	64
1.5.2	Propositions concernant la retenue.....	65
1.6.	Logique décisionnelle en fonction des résultats de flux	65
2.	TYPES DE RETENUES RENCONTREES DANS LE CONTEXTE D'ELEVAGE EN BRETAGNE.....	66
2.1.	Caractéristiques des retenues.....	66
2.2.	Suivis mis en place dans les retenues inscrites au projet de SDAGE	68
3.	ANNEXES.....	69
3.1.	Typologie nationale des plans d'eau	69
3.2.	Glossaire.....	70
3.3.	Bibliographie concernant l'eutrophisation (2005-2009)	70
3.4.	Suivi du phosphore et des débits dans les 9 retenues stratégiques inscrites au projet de SDAGE	71
3.5.	Groupe de paramètres analysés dans chaque plan d'eau en 2010	74
3.6.	Cahier des charges type	75

L'exploitation des données qualité de l'eau disponibles pour les travaux d'élaboration du SDAGE a conduit au classement de la quasi-totalité des retenues du territoire « Vilaine et côtiers bretons » en fonctionnement eutrophe et en report de délais pour l'atteinte du bon état écologique pour le paramètre « trophie ».

Le projet de SDAGE identifie 10 retenues sur ce territoire pour lesquelles les exploitations agricoles situées sur leur bassin d'alimentation doivent atteindre l'équilibre de la fertilisation phosphorée pour 2015 au travers de la révision des autorisations (mesure 3B1 du projet de SDAGE).

Le programme de mesures sur le territoire de la commission territoriale « Vilaine & côtiers bretons » comporte enfin une action de diagnostic de fonctionnement des retenues identifiées eutrophes et classées en report de délais pour l'atteinte du bon état afin de hiérarchiser précisément les actions les plus pertinentes.

La connaissance des mécanismes à l'œuvre est un préalable à la mise en place des programmes d'actions adaptés, d'autant que, face aux coûts des actions à mettre en œuvre, l'argumentaire justificatif doit être solide.

Les principaux mécanismes à l'œuvre dans les retenues et qui conduisent aux phénomènes d'eutrophisation (balance des apports, sédimentation, relargage, mobilisation dans la chaîne trophique, dégradation, en fonction des paramètres physiques) sont donc décrits dans le présent rapport.

Le premier rapport de ce dossier expose les phénomènes en jeu afin de permettre leur compréhension, tout en renvoyant le lecteur soucieux d'en savoir plus à la bibliographie citée, et présente les actions possibles à réaliser pour atteindre le bon état.

Ce deuxième rapport présente les protocoles de suivi des mécanismes à mettre en place et les principes de suivi des études et propose des cahiers des charges techniques-type.

Ces documents sont guidés par le principe voulu par le comité de bassin de privilégier les mesures préventives aux mesures curatives, et de subordonner les secondes à la mise en œuvre préalable des premières.

1. PROTOCOLES DE SUIVI DES MECANISMES A METTRE EN PLACE

1.1. OBJECTIFS

Ce chapitre propose des mesures complémentaires à celles du programme de surveillance des plans d'eau dans le cadre de la DCE ou des suivis mis en place par les gestionnaires des retenues en mettant en valeur l'intérêt de ces protocoles en terme d'enjeux pour la définition du programme de reconquête. La connaissance des mécanismes à l'œuvre est un préalable à la mise en place des programmes d'actions adaptés.

Les remarques et propositions ci-dessous sont faites dans l'optique de permettre le choix des moyens de lutte contre l'eutrophisation visant à réduire les apports de phosphore : priorité « géographique » des interventions sur le bassin versant, pré-barrage, curage. Il s'agit donc de déterminer les différents flux de phosphore, identifié comme le principal responsable de l'eutrophisation, par sous bassins et dans les retenues.

Par exemple : les flux aboutissant à la retenue de Rophemel sont bien connus grâce à Gaury et coll., 2008, cité par Gruau⁴⁴ : les concentrations en phosphore particulaire de l'eau entrante sont bien supérieures aux concentrations en phosphore dissous, avec de fortes augmentation lors des crues. Un déficit de phosphore dans le bilan entrée/sortie démontre que la forme dissoute est consommée par les algues alors que la forme particulaire sédimente à 50% dans le plan d'eau. Le haut bassin du Néal apparaît plus contributif que celui de la Haute-Rance. Même si plusieurs interrogations demeurent, concernant notamment l'origine du phosphore dissous estival, la forme et la réactivité du phosphore particulaire sédimenté, une intervention sur le sédiment apparaît utile, en préventif (installer un piège à sédiment) et/ou curatif (curer la cuvette).

1.2. ETABLISSEMENT DES FLUX EN COURS D'EAU

1.2.1 Rappel de quelques principes

Les variations de la chimie de l'eau dans le temps sont complexes : il faut insister sur les différences marquées entre le transport en solution et le transport en suspension.

- Le transport en solution est régulier, continu, non sélectif ; il augmente en général moins vite que le débit.
- Le transport en suspension est très irrégulier et dépend du régime hydrologique ; il est discontinu (les particules de grande taille ne sont transportées que de temps en temps), hétérogène sur la hauteur d'eau (en période de crue, notamment, la concentration peut être nettement

⁴⁴ Gruau G., 2009, Formes, sources et mobilité du phosphore à l'origine de l'eutrophisation à la retenue de Rophemel, Projet d'étude, 22 p.

supérieure au fond du lit) et sélectif (les particules les plus fines sont transportées beaucoup plus vite et loin) ; enfin, il augmente plus vite que le débit en particulier pendant les crues.

Le transport en solution domine la plus grande partie de l'année, mais le transport en suspension est celui qui assure la plus grande partie du bilan annuel (Meybeck, 1985⁴⁵).

Cela signifie qu'il faut mesurer à la fois le phosphore dissous et le phosphore particulaire, et avec des pas de temps permettant de prendre en compte leurs types de variation. **L'échantillonnage à pas de temps régulier, non proportionnel au volume d'eau écoulé, pour les polluants dissous, ou aux matières en suspension, pour les polluants particulaires, est totalement inadapté à l'estimation des flux.** La précision des flux dissous est directement liée à celle des débits se produisant pendant 20% du temps ; celle des flux particulaires à des épisodes se produisant 10% du temps⁴⁶.

Les auteurs s'accordent sur le fait que la méthode d'échantillonnage idéale est celle où le prélèvement est assujéti à un certain volume d'eau écoulé. En pratique, cette méthode d'échantillonnage est inapplicable. Plusieurs types de protocoles ont donc été proposés.

Dans la Loire, pour obtenir les flux avec la même précision, Moatar et coll.⁴⁷ annoncent la nécessité de prélever les PO4 dissous et le P total tous les 10 jours, le P particulaire tous les 5 jours et les nitrates tous les 15 jours.

Mais, même pour un même élément, et pour la même précision sur le flux, la fréquence de mesures peut être très variable d'un cours d'eau à l'autre. Ainsi, il a été mis en évidence qu'un échantillonnage des nitrates dans l'Elorn est suffisant tous les 2 mois.

Dans les cours d'eau de Bretagne, les récents travaux de Birgand et coll.⁴⁸ montrent que des échantillonnages mensuels des nitrates induisent une erreur sur l'estimation du flux annuel généralement comprise entre -11% et +11%⁴⁹.

Le CSEB indique que la fréquence d'échantillonnage recommandée pour connaître les concentrations de phosphates (et de nitrates) est d'au moins un prélèvement (manuel) par semaine pour une précision sur les flux de plus ou moins 5%⁵⁰.

⁴⁵ Meybeck, M., 1985, Variabilité dans le temps de la composition chimique des rivières et de leurs transports en solution ou en suspension, Revue des sciences de l'eau, 4, 93-121.

⁴⁶ Meybeck M. Pasco A., Ragu A., 1993, Evaluation des flux polluants dans les rivières, pourquoi, comment et à quel prix ? rapport université de Jussieu, 23 p.

⁴⁷ Moatar F., Birgand F., Meybeck M., Faucheux C., Raymond S., 2009, Incertitudes sur les métriques de qualité des cours d'eau (médianes et quantiles de concentrations, flux, cas des nutriments) évalués à partir de suivis discrets, La Houille Blanche, 3, 68-76.

⁴⁸ Birgand F. et coll., 2009, Stratégies d'échantillonnage et incertitudes sur l'évaluation des flux et des indicateurs de concentration dans les cours d'eau : exemple des nitrates en Bretagne.

⁴⁹ Résultats non transposables dans d'autres régions et à d'autres éléments.

⁵⁰ CSEB, 2008, Fiches techniques et scientifiques pour la compréhension des bassins versants et le suivi de la qualité de l'eau, tome 2, 145 p.

1.2.2 Fréquence des mesures chimiques : plusieurs stratégies sont possibles

L'échantillonnage nécessaire au le calcul des flux (sur lesquels vont se fonder des décisions, des choix de gestion et des budgets) dépend du constituant considéré, de son type de variation avec le débit, de la saison ... et de la précision recherchée.

1.2.2.1 Répartition des prélèvements selon les volumes d'eau écoulés et m.e.s. transportées

Une étude préliminaire à la station met en évidence la proportion du volume d'eau annuel écoulé et des m.e.s. transportées par semaine (ou par mois). Les nombres d'analyses des formes dissoutes et particulaires prévus, choisis selon la précision recherchée, sont répartis proportionnellement à ces distributions. Meybeck donne l'exemple suivant pour un fleuve de bassin de 10 000 à 100 000 km² en régime pluvial océanique :

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
volume d'eau écoulé %	12%	16%	12%	11%	8%	5%	3%	2%	2%	5%	12%	12%
m.e.s. transportées	14%	16%	9%	6%	3%	2%	1%	1%	2%	7%	22%	17%

De ces résultats, et dans l'hypothèse d'une fréquence d'échantillonnage hebdomadaire pour les formes dissoutes, tous les 5 jours pour le phosphore particulaire, on déduit à titre d'exemple la répartition suivante :

hypothèse nb mesures	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
NO3 PO4 52 mesures	6	8	6	6	4	3	2	1	1	3	6	6
P particulaire 72 mesures	10	12	6	4	2	1	1	1	1	5	17	12

Le nombre total de mesures de la variable détermine évidemment la précision des indicateurs statistiques qui en résultent.

Le programme Variflux du CNRS permet de calculer les incertitudes sur les flux en fonction de la variabilité des débits et de la fréquence de l'échantillonnage. Pour obtenir un flux annuel estimé avec un biais inférieur à 1% et une imprécision inférieure à +/- 20%, l'intervalle des temps requis entre 2 mesures consécutives est au minimum de 3 jours et au maximum de 20 jours selon que le cours d'eau présente une valeur de « M2% » (% du flux annuel qui s'écoule en 2% du temps)⁵¹ supérieure à 40% ou comprise entre 15 et 20%.

⁵¹ Si on n'en dispose pas, on peut l'estimer par le rapport entre la concentration moyenne pondérée par le débit et la médiane.

Cela permet d'affecter une incertitude aux suivis existants (et donc d'interpréter correctement l'évolution interannuelle des flux, à la suite de travaux sur le bassin versant, par exemple) ou de proposer une fréquence de suivi en fonction des incertitudes demandées.

1.2.2.2 Prélèvements fixes, réguliers et lors des montées de débit

Le « Suivi de la qualité des eaux dans les bassins versants : protocole du réseau de mesures du suivi d'actions » élaboré au niveau régional notamment par la DIREN Bretagne comporte, aux stations de mesures dites « Bilan » clôturant le bassin d'une masse d'eau⁵² où des actions sont entreprises, 24 prélèvements par an, dont 12 mensuels à pas de temps fixe (NO₃, PO₄ et P total) et 12 mensuels lors des pluies de plus de 10 mm en 24 heures pour analyse de P total (et de pesticides).

Cette fréquence régulière est adaptée aux bassins versants supérieurs à 10 000 ha. Dans les bassins versants de taille inférieure, une fréquence de 2 prélèvements par mois est requise, car le temps de transfert de l'eau est influencé par la taille et la forme du bassin versant.

Notons que le nombre d'échantillonnages lors des épisodes pluvieux n'est pas par principe limité à 12. La pluviométrie déclenchant le prélèvement est indicative et doit être adaptée au bassin considéré. Et le temps de transfert de l'eau, séparant le pic de précipitation du pic de débit, doit être connu.

1.2.2.3 Echantillonnage à pas de temps fixe avec analyse hebdomadaire

Le CSEB recommande, dans sa fiche n°G2⁵³, à la fois pour un suivi des nitrates (et des phosphates) et du phosphore total, un échantillonnage à pas de temps fixe (4 à 12 fois par jour) avec analyse hebdomadaire (ou bi-hebdomadaire) sur le mélange des sous-échantillons d'eaux prélevées régulièrement par préleveur automatique, par défaut d'un idéal échantillonnage journalier.

L'installation d'un préleveur automatique programmable permet de réaliser l'échantillonnage sur le flux moyen hebdomadaire et non sur la concentration instantanée, ce qui donne des résultats plus précis dans l'évaluation des flux que l'échantillonnage manuel à la même fréquence. Cette technique reste coûteuse.

L'analyse du phosphore au cours de 24 heures suivant un événement pluvieux a permis de caractériser la dynamique et les formes du phosphore transféré à l'exutoire d'un bassin versant lors d'une crue⁵⁴. Apparaît d'abord un pic de concentration en P particulaire, dû au ruissellement et à l'érosion, accompagné d'un pic de phosphore dissous correspondant à la libération du phosphore lié aux particules transportées par les eaux de ruissellement. A l'apogée de la crue, les concentrations de phosphore dissous et particulaire diminuent fortement, puis apparaît un 2^e pic de phosphore dissous, provenant des eaux de drainage.

⁵² au sens DCE du terme ; il ne s'agit donc pas de sous bassins.

⁵³ Op. Cit.

⁵⁴ Cann Ch., Bordenave P., Saint-Cast P., Benoit J.C., 1999, Transferts et flux de nutriments. Importance des transports de surface et de faibles profondeurs, Actes du colloque Ifremer Pollutions diffuses : du bassin versant au littoral, 24, 125-140.

1.2.3 Collecte des données de débits

Les débits journaliers nécessaires au calcul des flux seront mesurés en station de jaugeage (idéalement, le débit est mesuré en continu) ou calculés par modélisation.

Connaître les débits est fondamental, car :

- . le transport du phosphore dans l'eau dépend du débit, des variations de débit et de la vitesse de l'eau,*
- . le transfert du phosphore sous forme particulaire dépend forcément de l'érosion des sols, qui résulte essentiellement de la pluie et de son ruissellement,*
- . il faut caler les observations de l'année par rapport aux autres années de pluviométrie variable⁵⁵.*

1.2.4 Points de mesures

Les aval de bassins versants doivent être échantillonnés de manière concomitante pour mettre en évidence la contribution relative de chacun dans le bilan total, de manière à traiter les problèmes dans l'ordre de gravité. Dans les bassins du Léguer et du Haut Couesnon, le GEPMO a déterminé que l'installation de points de mesures en aval de surfaces de bassin versant inférieures à 5000 ha était pertinente pour la détermination des flux de matière organique. Des campagnes expérimentales effectuées sur des sous bassins versants de taille croissante permettent de déterminer quelle est la taille pertinente sur d'autres territoires et pour le phosphore (et les nitrates).

Les stations devront correspondre à une section mouillée bien mélangée et proches d'une station de jaugeage si possible, facilement accessible quel que soit le débit.

Dans la retenue, si le volume d'eau est important ou si la forme du plan d'eau est complexe, la seule mesure des concentrations à la verticale du point le plus profond peut ne pas être représentative du lac. Deux ou trois points de mesures peuvent être envisagés pour l'établissement du stock de phosphore.

1.2.5 Remarques

- Une analyse directe du phosphore sur support m.e.s. est la meilleure méthode pour déterminer le P particulaire, mais elle requiert un échantillonnage correct des m.e.s., opération assez complexe nécessitant une étude préalable pour adapter une stratégie particulière. En alternative, on peut l'approcher par différence entre le P total et le P dissous (voire avec les phosphates) analysés sur eau brute.
- « (Ce qui entre) – (ce qui sort) = (ce qui réagit) – (ce qui s'accumule) »⁵⁶. Il n'existe pas 1 mais des méthodes de calcul d'un flux⁵⁷. En un même point, une comparaison des résultats obtenus avec différentes méthodes

⁵⁵ Cann Ch., 1990, Transfert du phosphore d'une zone d'élevage intensif vers les eaux. Rapport Cemagref, 87 p. + annexes.

⁵⁶ Limnologie générale, Pourriot, Meybeck, 1995, Ed. Masson, 956 pages.

⁵⁷ Birgand F. et coll., 2009, Moatar et coll., 2009.

de calcul pourra être bienvenue. En revanche, les comparaisons inter-bassins doivent être effectuées sur les résultats issus d'une même méthode. Les résultats de flux sont à établir par année du 1^{er} octobre au 30 septembre dans les retenues utilisées pour l'écrêtement des crues et le soutien des étiages (remplissage en automne et en hiver, soutirage en été), car les cours d'eau s'assèchent généralement en août, les pluies reprenant fin septembre⁵⁸ : c'est donc en hiver que les retenues se remplissent de phosphore apporté par le bassin versant.

- La relation concentration-débit peut être utile à déterminer. Elle permet d'adapter la stratégie d'échantillonnage et d'interpoler les concentrations manquantes.
- L'évaluation des tendances d'évolution à long terme requiert au minimum 10 ans pour s'affranchir des effets climatiques.

1.3. SUIVI DES EFFETS DU PRE-BARRAGE

Il s'avère que certaines retenues comportent un pré-barrage, prévu pour maintenir un petit plan d'eau, souvent à niveau constant, dans l'objectif de permettre les loisirs, la préservation du patrimoine naturel et/ou le piégeage du phosphore.

Les effets de ce dispositif ne sont pas toujours suivis, ce qui est regrettable car on manque de retours d'expérience en la matière.

Il nous paraît utile de proposer des mesures au moins en entrée et en sortie de pré-retendue, sinon dans le volume d'eau, pour évaluer son effet sur le phosphore et les développements d'algues. Les propositions faites au § précédent concernant les flux et au § suivant concernant l'évolution de la retenue devront intégrer la pré-retendue dans le dispositif de suivi.

⁵⁸ Le calcul par année civile lissant les variations inter-annuelles des flux. CSEB, 2005, Fiches techniques et scientifiques pour la compréhension des bassins versants et le suivi de la qualité de l'eau, tome 1, 180 p.

1.4. EVALUATION DU COMPORTEMENT DE LA RETENUE

1.4.1 Rappel du contenu du programme de surveillance des plans d'eau (extrait concernant la problématique eutrophisation)

Un programme de mesures est toujours défini en fonction des objectifs poursuivis. Celui du programme de surveillance DCE est la caractérisation de chaque masse d'eau (voir programme analytique en annexe).

Variables du programme CS Loire Bretagne	Remarques	Propositions dans l'optique « lutte contre l'eutrophisation »
4 campagnes par an <ul style="list-style-type: none"> février-mars : mélange hivernal 2e quinzaine juin : début période estivale fin juillet-début août : mise en place de la stratification 1ère quinzaine septembre : stratification estivale et épaisseur épilimnion maximales 	Programme défini par l'arrêté de surveillance des plans d'eau, et établi pour prendre en compte au mieux la période estivale et les stratifications, en tenant compte de la variabilité des plans d'eau de retenue au temps de renouvellement « très court » ⁵⁹	Une augmentation de la fréquence de prélèvement en période estivale permet de préciser l'évaluation du niveau d'eutrophisation des plans d'eau à court temps de séjour
1 point de mesure au site le plus profond (1 échantillon intégré et 1 au fond) PO4 et P total analysés sur eau brute	Le point le plus profond, s'il est à proximité du barrage, ne doit pas être influencé par le soutirage pour être représentatif	Selon la forme de la retenue, un 2e point de mesure peut être utile (ou plus s'il y a plusieurs bras)
P total, azote analysés sur sédiment (avec granulométrie, matière organique par perte au feu, carbone organique)	1 campagne en été <ul style="list-style-type: none"> paramètres pertinents fréquence d'échantillonnage suffisante mais hétérogénéité vraisemblable du fond non prise en compte 	Compte tenu du coût d'un curage, ajouter 1 ou 2 points d'échantillonnage supplémentaires lors d'une seule campagne n'apparaît pas déraisonnable
P total, PO4, NH4 analysés sur eau interstitielle	idem	idem
	La dynamique sédimentaire et l'épaisseur des sédiments ne sont pas évaluées	Indispensables à déterminer, si le stockage du P dans le sédiment est important, préalablement à un curage ou à l'installation d'un pré-bassin
Phytoplancton : 1 échantillon 4 campagnes	Minimum pour évaluer le niveau d'eutrophisation du plan d'eau	/

⁵⁹ L'évaluation de l'état au sens de la DCE s'appuie notamment sur la biomasse algale, calculée par la moyenne de la chlorophylle des 3 prélèvements estivaux.

Bathymétrie		Données intéressantes pour déterminer l'utilité d'autre(s) point(s) de mesures du phosphore
Hydromorphologie : temps de séjour, connexion avec les eaux souterraines, débits moyen entrant et sortant, régime hydrologique, volume, marnage, linéaires de rives artificialisées, taille du bassin versant, forme de la cuvette, géologie...	Protocole d'acquisition Lake Habitat Survey Données souvent incomplètes et insuffisantes, dans la présente problématique, en ce qui concerne les débits	Données utiles à titre indicatif pour situer le plan d'eau. Débits à acquérir en entrée et sortie de retenue. Temps de séjour à calculer par périodes significatives.

1.4.2 Evaluation du stockage de phosphore dans la retenue

La quantité de phosphore stocké dans la retenue est évaluée à partir des flux entrants et sortants, durant une période correspondant à un cycle hydrologique (remplissage/vidange de la retenue). On en revient donc à la nécessité d'une stratégie d'échantillonnage adaptée aux entrée(s) et sortie(s).

1.4.3 Evaluation de l'accumulation de phosphore dans le sédiment



Il est possible de l'évaluer à partir des quantités de m.e.s. accumulées dans des sédimentomètres et de leur teneur en phosphore, même si les pièges recueillent une proportion de matériel déjà sédimentée et remis en suspension surtout lorsque la profondeur est faible (Pourriot et Meybeck, 1995).

sédimentomètre

Dans la retenue du Gouet, la quantité de sédiment déposé dans la retenue a été évaluée à l'aide de 8 sédimentomètres posés sur le fond dans les différentes unités sédimentologiques de la retenue, de juillet 2002 à septembre 2003. Les sédimentomètres ont une surface de collecte de 0,1 m² et une hauteur de 60 cm. Ils sont relevés tous les 2 mois. Les sédiments recueillis sont décantés en laboratoire puis séchés en déshydrateur. Les analyses portent sur la matière sèche, la teneur organique par perte au feu à 550° et le phosphore total. Des données de phosphore particulaire et soluble (phosphates) en entrée et sortie de retenue ont été acquises d'août 1998 à septembre 2004. L'accumulation de phosphore dans le sédiment se fait de manière directe par la décantation de m.e.s et indirecte par le biais du phytoplancton qui assimile les orthophosphates (sédimentation biogène). La quantité de phosphore piégée dépend de la gestion hydraulique, du temps de séjour et du niveau d'eutrophisation. Dans la retenue du Gouet, le phosphore est principalement apporté en janvier-février (crues). Les 2/3 des apports de P particulaire sont piégés au printemps et en début d'été (en retenue pleine), la moitié des apports de PO₄ en été et en automne (consommation par les algues).⁶⁰

⁶⁰ JIGOREL A., BOUEDO A., NICOLAS R., MORIN J.P., 2005, Stockage du phosphore dans les sédiments d'un réservoir eutrophe (Gouet, Bretagne, France), The Fourth Inter-Celtic

1.4.4 Dynamique du relargage de phosphore par le sédiment

Le phosphore entre dans la retenue, il est consommé par les algues et/ou se dépose avec les m.e.s. selon des modalités approchées avec l'utilisation de sédimentomètres. L'étape d'étude suivante peut consister à évaluer le relargage effectif de phosphore par le sédiment, pour valider le calcul des flux d'entrée et sortie du plan d'eau. Pour cela, des mesures de phosphore au dessus du sédiment peuvent être réalisés de manière simple ou complexe en laboratoire, à partir d'échantillons de sédiment prélevés par carottage, ou in situ, à l'aide d'appareils dits « chambres benthiques ».

1.5. RECAPITULATIF DES MESURES COMPLEMENTAIRES PROPOSEES ET COUTS

1.5.1 Propositions concernant l'établissement des flux

mesures complémentaires	instrumentation	coût € HT	remarques
Optimisation de la répartition des échantillons dans le temps en fonction des volumes d'eau et du transport des m.e.s. Eventuellement, vérification de l'homogénéité des m.e.s. (qui détermine celle du P particulaire) ⁶¹ sur une section du cours d'eau en crue	/	5 k€ 3 k€	Budget établi en considérant que les données de concentrations et de débits sont fournies (sans modélisation des débits), et en format numérique utilisable.
Echantillonnage manuel Analyse du phosphore total, des phosphates ⁶² et des nitrates en entrée et sortie de retenue pour le calcul des flux	Echantillonnage automatique envisageable mais fréquence d'intervention sur le terrain identique	sur la base de 50 échantillons environ 10 k€	L'analyse des nitrates étant d'un coût modeste (5 € HT environ), est rajoutée au dispositif Hors interprétation des données, fonction du volume des données collectées et du contenu de la mission demandée.
Mesures du débit en continu	Station de jaugeage	1 station installation, tarage et maintenance : sur devis	Coût de la station fonction de la taille du cours d'eau Validation et calculs à prévoir en sus
Etude préliminaire de détermination de la taille critique des sous bassins versants pour l'échantillonnage		sur devis, car très variable selon taille et nombre des sous bassins	1 campagne en crue en de nombreux points des sous bassins ; analyses de PO4 et Ptotal (et m.e.s.)

Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources, Guimarães, Portugal, July 11-14 2005, 15 p.

⁶¹ La concentration de phosphore sur les particules est relativement stable, alors que les m.e.s. varient fortement lors des crues.

⁶² Les orthophosphates ne sont pas le seul composant du phosphore soluble. Mais il est proposé de conserver leur analyse dans un souci de pragmatisme, de cohérence avec le suivi actuel des plans d'eau et de poursuite des chroniques.

1.5.2 Propositions concernant la retenue

mesures complémentaires	instrumentation	coût € HT	remarques
1 point supplémentaire dans la retenue : 1 échantillon intégré et 1 au fond, PO4 et P total analysés sur eau brute, 4 campagnes	/	1 k€ + 1 k€	Coût comportant le prélèvement et les 2 analyses supplémentaires (en option, tous les paramètres du groupe 2 bis) ⁶³ lors des 4 campagnes habituelles
1 point supplémentaire : P total, azote sur sédiment (+ granulométrie, matière organique par perte au feu, carbone organique)	/	0,5 k€	Coût comportant le prélèvement lors de la 3e campagne et les analyses du groupe 5
1 point supplémentaire : P total, PO4 analysés (+ N) sur eau interstitielle	/		Coût des analyse du groupe 6 (prélèvement inclus dans le groupe 5 ci dessus)
Evaluation de la sédimentation : relevés de la quantité sédimentée tous les 2 mois et analyse de matière sèche, teneur organique par perte au feu à 550° et phosphore total	pose de sédimentomètres en fonction des unités sédimentaires	7 campagnes terrain + 6 séries analyses en 3 sédimentomètres 8 k€	1 cycle annuel au minimum
Détermination de la hauteur des vases fluides et des sédiments indurés au fond de l'ensemble du plan d'eau	/	Sur devis, fonction de la surface de la retenue ; de l'ordre de 7 à 20 k€ /20 ha	Intervention unique dans l'optique d'un curage ou d'une vidange
Evaluation du relargage de phosphore par le sédiment	/	2 à 7 k€ par point environ	A affiner, car fonction du nombre de points de mesures ou d'échantillons, du nombre d'analyses et de la technique utilisée

NB : Ces budgets sont des ordres de grandeur des frais de mesures. Ils n'incluent pas l'interprétation des données, fonction du volume des données collectées et du contenu de la mission demandée.

1.6. LOGIQUE DECISIONNELLE EN FONCTION DES RESULTATS DE FLUX

Si les apports de phosphore par érosion et ruissellement sur le bassin versant vont au delà des apports naturels par le couvert végétal « naturel », l'intervention sur les sous bassins est nécessaire pour diminuer le transfert de phosphore des sols vers les eaux. Ce point est acquis.

Si les apports de phosphore particulaire par le cours d'eau sont significatifs devant les apports de phosphore dissous : le pré-barrage est envisageable.

Si le stock de phosphore réactif du sédiment est important devant les apports de phosphore dissous par le cours d'eau : le curage est envisageable.

⁶³ Voir listes des paramètres en annexe.

2. TYPES DE RETENUES RENCONTREES DANS LE CONTEXTE D'ELEVAGE EN BRETAGNE

La disposition 3B-1 du projet de SDAGE concerne la prévention de la charge de phosphore diffus apporté par la matière organique : 10 retenues sur les 14 ainsi identifiées dans le bassin Loire-Bretagne sont en Bretagne, les exploitations agricoles situées sur leur bassin d'alimentation devant atteindre l'équilibre de la fertilisation phosphorée en 2015 au travers de la révision des autorisations.

2.1. CARACTERISTIQUES DES RETENUES

Les paramètres principaux intervenant dans le fonctionnement écologique des plans d'eau sont présentés dans le tableau page suivante.

Une typologie physique des plans d'eau existe (MEDD, 2008) : les retenues sont ainsi classées par le rapport entre la hauteur du barrage et la largeur du plan d'eau, ainsi que par l'ampleur des modifications du régime hydrologique et/ou du temps de renouvellement, l'HER intervenant ensuite. Dans le cas présent, toutes les retenues sont affectées du type 6 : retenue de basse altitude, peu profonde, et non calcaire. Elles diffèrent par la forme de la cuvette :

- a) cuvette évasée de forme L peu profonde avec zone littorale prépondérante et stratification peu étendue et/ou instable
- b) cuvette évasée de forme LP, ayant à la fois une zone profonde stratifiée stable et une zone littorale étendue.

Ces deux critères de stratification et de présence d'une zone littorale sont en effet déterminants dans le fonctionnement du lac.

En Bretagne, on sait que la combinaison des paramètres géologiques (opposition entre terrains schisteux et granitiques) et climatiques (pluies modérées à l'Est, élevées à l'Ouest) aboutit à une différenciation des cours d'eau d'Est en Ouest, qui se traduit par des débits spécifiques moyens mensuels compris entre 5 et 2 l/s/km² (la Rance à l'Est) et 10 et 60 l/s/km² (l'Elorn à l'Ouest). Or, à apports égaux, une rivière qui a un débit spécifique moindre véhiculera une concentration en polluants qui sera toujours plus élevée qu'un cours d'eau à débit spécifique élevé. Ce paramètre peut être un facteur explicatif des niveaux trophiques rencontrés, même si c'est moins la concentration dans le cours d'eau qui importe en matière d'eutrophisation que la concentration résultante dans le plan d'eau notamment en début de croissance algale et le rapport massique entre les nutriments.

Caractéristiques de quelques retenues bretonnes

	Moulin-Neuf	Kerné-Uhel	Guerlédan	Gouet	Arguenon	Rophemel	Étang au Duc	Villaumur	Chapelle Erbrée	La Valière
cours d'eau principal	r. de Pont l'Abbé	Blavet	Blavet	Gouet	Arguenon	Rance	Yvel	Cantache	Vilaine	Valière
surface bassin versant km ²	54	86	676	105	392	374	367	138	122	65
module spécifique l/s/km ²	16	18	18	12	8	8	7	9	7	6
phosphore sols cultivés mgP2O5 /kg sol ⁶⁴	400	500	700	700	500	200	200	400	300	300
cheptel bovin eqUGB/km ² bv	185	257	166	241	285	200	183	205	223	198
densité de haies ⁶⁵	élevée	élevée	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	élevée
volume Mm ³	2	2	50	8	12	5	5	7	8	6
profondeur moyenne m	2	3	16	10	8	7	2	3	4	6
profondeur maximale m	5	10	45	37	14	22	7	10	13	17
forme	L	LP	LP	LP	LP	LP	L	L	L	LP
code type MEDD	6a	6b	6b	6b	6b	6b	6a	affectée en 6b plutôt a ?	6a	6b
temps de séjour j	22	17	55	47	61	22	23	73	82	165
stratification	non	non			oui		non			oui
aération	aération	destratification		destratification					/	
lutte P et m.e.s.						pré-décanteur expérimental		pré-retenue		
autres							sonde phyco-cyanine			lagune de sécurité en cas de pollution

NB Les codes couleur affectés dans le tableau ont pour seul objet de mettre en évidence les différences significatives entre les plans d'eau dans une perspective eutrophisation

⁶⁴ Médianes cantonales des teneurs en phosphore extractible par la méthode de Dyer (utilisée pour la terre) sur le bassin versant (données GIS Sols).

⁶⁵ Données Agreste, Enquête sur les linéaires paysagers, DRAF Bretagne, 2008.

2.2. SUIVIS MIS EN PLACE DANS LES RETENUES INSCRITES AU PROJET DE SDAGE

Le détail des suivis du phosphore et des débits aux neuf retenues stratégiques inscrites au projet de SDAGE (2008) a été établi par la DREAL Bretagne (voir détails en annexe).

Chaque retenue fait l'objet d'un suivi particulier, adapté à ses besoins propres, situés hors du champ de la présente étude. Dans l'optique de l'atteinte du bon état, et selon le principe voulu par le comité de bassin de privilégier les mesures préventives, il nous semble que les dispositifs mis en place pourraient être complétés.

- Suivi aux entrées et sorties de retenue (et notamment pendant les périodes de fort débit), du phosphore total et des phosphates (leurs dynamiques de transfert, d'accumulation et de stockage étant différentes).
- Suivi des effets des pré-barrages sur les m.e.s., le phosphore, les phosphates, le phytoplancton.
- Suivi de la dynamique de sédimentation dans la retenue à l'aide de sédimentomètres. Eventuellement, expérimentation de relargage.
- Evaluation de l'épaisseur des vases (1 seule campagne).
- Suivi des sous bassins contributeurs (débits, phosphore et phosphates, nitrates ...), si leurs caractéristiques physiques, pédologiques, d'occupation des sols ... différent et si des actions différentes y sont envisagées ou réalisées.

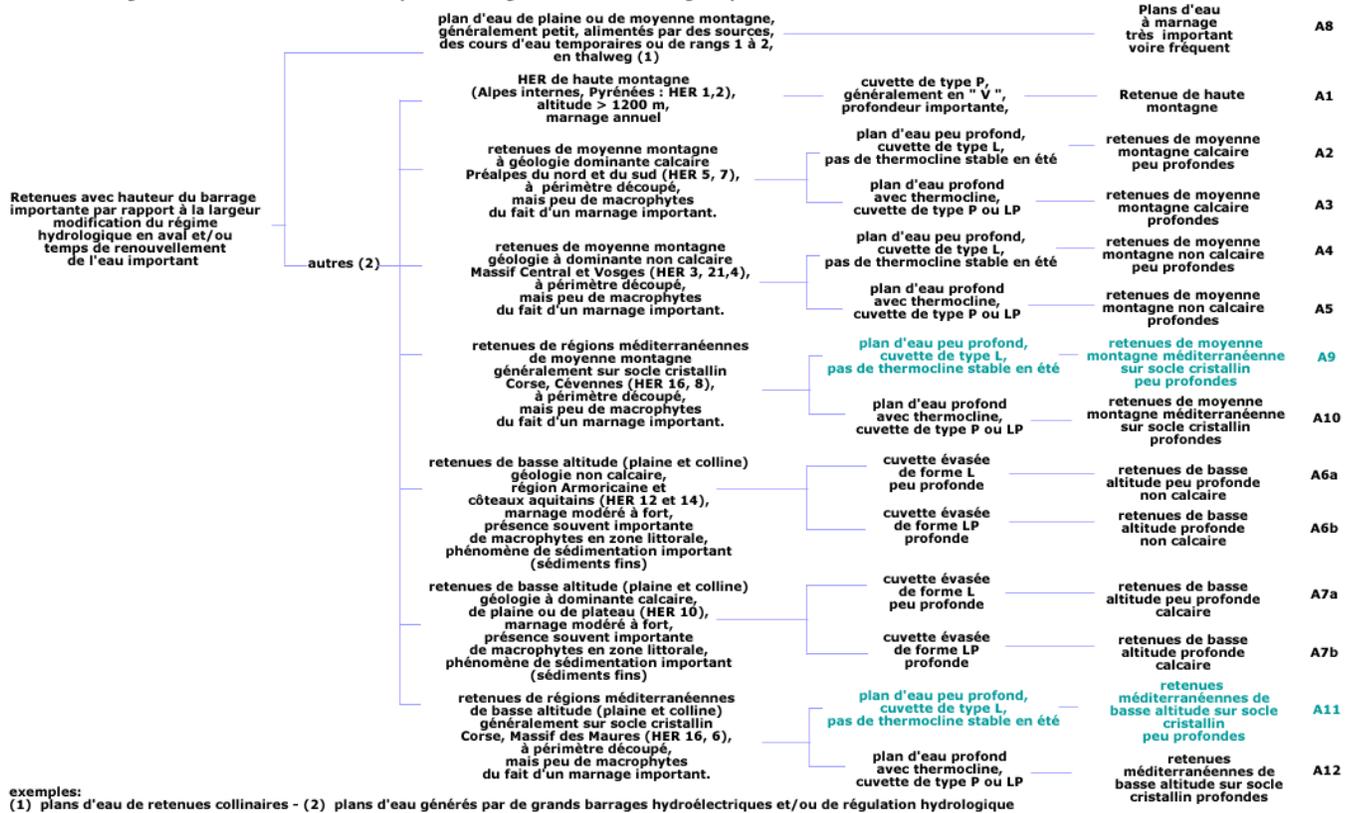
Remarque : La répartition des mesures en entrée et sortie de certaines de ces retenues suit les modalités d'échantillonnage du « Suivi de la qualité des eaux dans les bassins versants : protocole du réseau de mesures du suivi d'actions » établi au niveau régional et comporte en général 24 prélèvements par point et par an, dont 12 réguliers et 12 lors des pluies.

3. ANNEXES

3.1. TYPOLOGIE NATIONALE DES PLANS D'EAU

Typologie des plans d'eau d'origine anthropique (1/2)

Plans d'eau générés ou fortement réhaussés par un ouvrage - Hauteur de barrage importante



3.2. GLOSSAIRE

Voir dans rapport 1.

3.3. BIBLIOGRAPHIE CONCERNANT L'EUTROPHISATION (2005-2009)

Voir rapport 1.

3.4. SUIVI DU PHOSPHORE ET DES DEBITS DANS LES 9 RETENUES STRATEGIQUES INSCRITES AU PROJET DE SDAGE

Tableau établi par B.RICHARD, DREAL Bretagne, 2009

BV	Retenue	Suivi phosphore en amont sur les entrées de la retenue	Suivi phosphore dans la retenue	Suivi phosphore en aval	Etudes existantes
Pont l'Abbé (29)	Moulin Neuf	<u>Suivi qualité</u> : 2 pts de suivi sur les 2 entrées de la retenue : 12/an fixe Pt + PO4 (CG+AELB) + 12/an pluie Pt (BV) <u>Suivi débits</u> : les 2 stations sont équipées d'une station de jaugeage	Suivi RCS Suivi bimensuel Pt et PO4 en 4 points d'avril à octobre	<u>Suivi qualité</u> : DDASS (en théorie : 12/an Pt à confirmer) <u>Suivi débits</u> : station de jaugeage à l'aval immédiat	OUI : vidanges décennales ; curage partiel 2005 ➔ Etude de synthèse inscrite dans programme 2009
Gouet (22)	Gouet	<u>Suivi qualité</u> : 2 points de suivi aux entrées : - entrée Est retenue (Gouet) = 12/an fixe Pt + PO4 (CG)+ 12/an pluie Pt (BV) - entrée Ouest retenue (Maudouve) = 12/an fixe (CG) - + 2 points de suivi sur sous-BV contributeurs (Fq = 12/an fixe Pt + PO4 + 12/an pluie Pt pour l'évaluation des actions) <u>Suivi débits</u> : les 2 entrées sont équipées de station de jaugeage	Suivi RCO (eau et sédiments) Suivi eutrophisation CG22 : suivi Pt (eau) bimensuel d'avril à septembre depuis courant 1980 Suivi annuel sédimentation depuis 1989	<u>Suivi qualité</u> : CG22 12/an fixe Pt + PO4 (aval immédiat) <u>Suivi débits</u> : station de jaugeage à l'aval immédiat	Etude « stockage du P dans les sédiments » (2005) ¹ Analyse teneurs en P, Cu, Zn des sédiments (2008) ²
Blavet (22)	Kerne Uhel	<u>Suivi qualité</u> : suivi 12/an fixe Pt + PO4 + 12/an pluie Pt en entrées de retenue et sur un affluent <u>Suivi débits</u> : 2 stations de jaugeage sur Blavet et Ruisseau de Kerien : pas de mesures des débits sur l'entrée ouest du Dour Vern et est du Douru	Suivi RCO (eau et sédiments) Suivi eutrophisation CG22 : suivi Pt (eau) mensuel d'avril à septembre depuis courant 1980 Suivi annuel sédimentation depuis 1989	<u>Suivi qualité</u> : CG22 12/an fixe Pt + PO4 (aval immédiat) <u>Suivi débits</u> : station de jaugeage à l'aval immédiat	Etude « eutrophisation de la retenue sur le Blavet : synthèse des résultats » (rapport annuel 2007) ⁶⁶ Analyse teneurs en P, Cu, Zn des sédiments (2008) ⁶⁷

⁶⁶ JIGOREL A., BOUEDO A., NICOLAS R., MORIN J.P., 2005. - Stockage du phosphore dans les sédiments d'un réservoir eutrophe (Gouet, Bretagne, France), The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources, Guimarães, Portugal, July 11-14 2005, 15p.

⁶⁷ LAGUIONIE P., 2008. - Analyse rétrospective des teneurs en Phosphore total, Cuivre et Zinc des sédiments des retenues sur l'Arguenon, le Blavet et le Gouët (22), INSA Rennes, Conseil général des Côtes d'Armor, 68p.

BV	Retenue	Suivi phosphore en amont sur les entrées de la retenue	Suivi phosphore dans la retenue	Suivi phosphore en aval	Etudes existantes
Blavet (22)	Guerlédan	<u>Suivi qualité</u> : en entrée de retenue (Blavet – Perret) : suivi 12/an fixe Pt + PO4 + 12/an pluie Pt + 2 sous-BV (Sulon + Petit Doré) <u>Suivi débits</u> : 1 station de jaugeage à Perret, sur le canal de Nantes à Brest	Suivi RCS et RCO (eau et sédiments) Pas de suivi spécifique CG22	<u>Suivi qualité</u> : 12/an fixe Pt + PO4 (station située 10 Km en aval, entre la retenue et cette station, deux affluents rejoignent le Blavet) <u>Suivi débits</u> : la station de jaugeage est située à proximité	A priori NON
Arguenon (22)	Ville Hatte	<u>Suivi qualité</u> : - entrée retenue : Fq = 12/an fixe Pt + PO4 + 12/an pluie Pt sur Rosette et Arguenon - + 1 suivi sur 5 sous-BV (Fq = 12/an Pt + PO4), dont le Quilloury qui est un affluent direct <u>Suivi débits</u> : 3 stations Rosette et 2 stations Arguenon sont équipées d'une station de jaugeage	Suivi RCS et RCO (eau et sédiments) Suivi eutrophisation CG22 : suivi Pt (eau) bimensuel d'avril à septembre depuis courant 1980 Suivi annuel sédimentation depuis 1989	<u>Suivi qualité</u> : CG22 12/an fixe Pt + PO4 (aval immédiat) <u>Suivi débits</u> : station de jaugeage à l'aval immédiat (données non bancarisables)	Etude « eutrophisation de la retenue : synthèse des résultats » (rapport annuel 2007) ⁶⁸ Analyse teneurs en P, Cu, Zn des sédiments (2008) ⁶⁹
Haute-Rance (22)	Rophemel	<u>Suivi qualité</u> : - sur les 3 points d'entrées (Rance, Néal, Frémur) : suivi 12/an fixe Pt + PO4 + 12/an pluie Pt - sur 3 sous-BV : Fq = 24/an fixe + pluie <u>Suivi débits</u> : pas de station de jaugeage sur l'entrée Frémur	Suivi RCS et RCO	<u>Suivi qualité</u> : CG22 12/an fixe Pt + PO4 (aval immédiat) <u>Suivi débits</u> : station de jaugeage EDF en aval immédiat (vérifier si mesure des débits journaliers)	A priori NON sauf étude CNRS « caractérisation des apports allochtone et autochtones de MO » (lien avec le P à voir avec Gérard Gruau)
Vilaine Amont (35)	Villaumur (Cantache)	<u>Suivi qualité</u> : - sur les 2 points d'entrée : Fq = 12/an fixe Pt + PO4 + 12/an pluie Pt - + 1 point sur 1 sous-BV : FQ = 24/an fixe+pluie (évaluation des actions) <u>Suivi débits</u> : pas de station de jaugeage en entrée	Suivi RCS et RCO	<u>Suivi qualité</u> : néant <u>Suivi débits</u> : pas de station de jaugeage mais automatisation prévue par le CG35 (à confirmer par CG35)	OUI : étude impact vidange
Vilaine Amont (35)	La Chapelle Erbrée	<u>Suivi qualité</u> : 1 pt AELB 12/an fixe Pt + PO4 (station représentant moins de 50% de la surface du BV amont de la retenue) ; pas de suivi spécifique par le BV <u>Suivi débits</u> : la station de jaugeage située au niveau du point de suivi AELB	Suivi RCO	<u>Suivi qualité</u> : néant sauf IBGN <u>Suivi débits</u> : station de jaugeage en aval immédiat	A priori NON (à confirmer par CG35)

⁶⁸ Conseil général des Côtes d'Armor, Syndicat Mixte Arguenon Penthièvre. - Eutrophisation de la retenue sur l'Arguenon et du plan d'eau de Lorgeril, Rapport annuel 2007 : synthèse des résultats, non paginé.

⁶⁹ Conseil général des Côtes d'Armor, Syndicat Mixte de Kerné Uhel. - Eutrophisation de la retenue sur le Blavet, Rapport annuel 2007 : synthèse des résultats, non paginé.

BV	Retenue	Suivi phosphore en amont sur les entrées de la retenue	Suivi phosphore dans la retenue	Suivi phosphore en aval	Etudes existantes
Vilaine Amont (35)	La Valière	<u>Suivi qualité</u> : 1 point CG 12/an fixe Pt + PO ₄ ; pas de suivi spécifique par le BV <u>Suivi débits</u> : 1 station de jaugeage couvrant environ 60% du BV amont de la retenue	Suivi RCO Suivi DDASS	<u>Suivi qualité</u> : néant <u>Suivi débits</u> : station de jaugeage en aval immédiat	A priori NON (à confirmer par CG35)
Yvel Yvet (56)	Etang au Duc	<u>Suivi qualité</u> : - entrée retenue : Fq = 12/an fixe Pt + PO ₄ + 12/an pluie Pt - apports latéraux : 2 points avec Fq = 12/an pluie - 1 point sur 3 sous-BV : Fq = 12/an pluie	Suivi RCS et RCO	<u>Suivi qualité</u> : 12/an fixe Pt + PO ₄ (BV) <u>Suivi débits</u> : pas de station de jaugeage	OUI : voir BV

3.5. GROUPE DE PARAMETRES ANALYSES DANS CHAQUE PLAN D'EAU EN 2010

Programme de surveillance 2010, données Agence de l'eau Loire-Bretagne

Ensemble de paramètres Dénomination	Descriptif	Prélèvement d'eau intégré	Prélèvement d'eau de fond	Prélèvement de sédiment	Prélèvement de sédiment
		Support eau (3)	Support eau (3)	Support sédiment (6)	Support eau interstitielle (15)
Groupe 2	DBO ₅ , NKj, NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , P total, COD, MEST, turbidité, Chlorophylle a, phéopigments et silice dissoute	Campagnes 1, 2, 3 et 4			
Groupe 2 Bis	NKj, NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , P total, COD, MEST, turbidité et silice dissoute		Campagnes 1, 2, 3 et 4		
Groupe 3	Chlorures, sulfates, bicarbonates, calcium, magnésium, sodium, potassium, dureté TH, TA/TAC	Campagne 1	Campagne 1		
Groupe 4	PO ₄ ³⁻ , P total, NH ₄ ⁺				Campagne 3
Groupe 5	Carbone organique, azote organique, P total, perte au feu, granulométrie			Campagne 3	
Groupe 6	Aluminium, fer, manganèse			Campagne 3	
Tableau 1	Substances prioritaires (33 substances de l'annexe X et les 8 substances de l'annexe IX de la DCE)	Campagnes 1, 2, 3 et 4		Campagne 3 (selon le support pertinent noté dans le tableau 1)	
Tableau 2	Autres substances	Campagnes 1, 2, 3 et 4		Campagne 3	
Tableau 3	Pesticides	Campagnes 1, 2, 3 et 4		Campagne 3	
Tableau 4	Pesticides complémentaires	Campagnes 1, 2, 3 et 4			
Tableau 5	Substances complémentaires	Campagnes 1, 2, 3 et 4		Campagne 3	
Phytoplancton	Densités algale et cellulaire	Campagnes 1, 2, 3 et 4			

3.6. CAHIER DES CHARGES TYPE

Cahier des charges-type Etude de fonctionnement trophique d'une retenue

Un cahier des charges-type ne peut évidemment prendre en compte la diversité des situations existant sur le terrain. Il fournit un cadre, une proposition de protocole d'étude volontairement simple. Il devra être adapté au contexte particulier de chaque retenue, et pourra être étoffé selon les enjeux locaux et moyens disponibles. Les éléments apparaissant en italique devront notamment être modifiés selon les besoins.

Article 1. – Contexte et enjeux

L'exploitation des données de qualité de l'eau disponibles pour les travaux d'élaboration du SDAGE a conduit au classement de la quasi-totalité des retenues du territoire « Vilaine et côtiers bretons » en fonctionnement eutrophe et en report de délais pour l'atteinte du bon état écologique pour le paramètre « trophie ». De ce fait, le programme de mesures du SDAGE comporte notamment une action de diagnostic de fonctionnement des retenues identifiées eutrophes et classées en report de délais pour l'atteinte du bon état afin de hiérarchiser précisément les actions les plus pertinentes. La connaissance des mécanismes à l'œuvre est un préalable à la mise en place des programmes d'actions adaptés, d'autant que, face aux coûts des actions à mettre en œuvre, l'argumentaire justificatif doit être solide, et qu'il convient de suivre le principe voulu par le comité de bassin de privilégier les mesures préventives aux mesures curatives, et de subordonner les secondes à la mise en œuvre préalable des premières.

Article 2 - Objet de la mission

Dans ce contexte, l'objet du présent marché concerne la réalisation de l'ensemble des mesures nécessaires à l'évaluation du fonctionnement trophique **simplifié** de la retenue. Les prestations demandées consistent en la réalisation de prélèvements et d'analyses et en l'interprétation des données. La mission est composée de 3 phases : étude préparatoire et optimisation de l'échantillonnage, collecte des données au cours d'un cycle annuel, interprétation et synthèse des données.

Les résultats escomptés sont :

- la situation et l'évolution saisonnière de l'eutrophisation du plan d'eau,
- l'évaluation des flux entrants et sortants de la retenue au cours d'un cycle annuel,
- le bilan du stockage de nutriments dans la retenue,
- des propositions d'optimisation de l'échantillonnage,
- le cas échéant, une ou des propositions d'intervention sur le plan d'eau ou son bassin dans une optique d'amélioration de la situation.

Article 3 – Contenu de la mission

- **Phase 1 : Etude préparatoire d'optimisation de l'échantillonnage**

Dans les cours d'eau, on sait que l'échantillonnage à pas de temps proportionnel au volume d'eau écoulé, pour les polluants dissous, ou aux matières en suspension, pour les polluants particulaires, est le seul totalement adapté à l'estimation des flux. A partir des données existantes de débits⁷⁰ et de concentrations en m.e.s. du cours d'eau (et des résultats concernant le phosphore), la répartition mensuelle de 52 prélèvements annuels pour analyses de phosphates (et de nitrates)⁷¹ d'une part, et de 52 prélèvements annuels pour analyses de phosphore d'autre part, sera proposée.

Une visite sur le terrain sera réalisée pour visualiser les stations du (des) cours d'eau en entrée(s) et sortie de retenue. Un schéma, accompagné de photographies, localisera précisément les sites de prélèvement de chaque station pour le ou les futur(s) préleveurs.

Dans le plan d'eau, l'opportunité de rajouter 1 ou plusieurs points de prélèvement au(x) suivi(s) actuel(s) sera discutée en fonction des données existantes et de la configuration du plan d'eau. *A cet égard, le dispositif devra prévoir la collecte de données permettant d'analyser les effets de la pré-retenue.*

Le rapport de phase 1 comportera donc :

- . l'analyse des données de débit, m.e.s., PO4 et P total, NO3 en cours d'eau ;
- . le détail de la stratégie actuelle d'échantillonnage en cours d'eau et dans la retenue (eau, sédiment, sédimentation) ;
- . une proposition de modification et/ou de compléments des plans d'échantillonnages en cours d'eau et plan d'eau (avec leur justification).

Ce rapport sera soumis à validation du comité de pilotage de l'étude avant le début de la phase 2, opérationnelle, de l'étude. Nous attirons l'attention du candidat sur la nécessité de respecter strictement l'échéance de remise du rapport, de façon à commencer le suivi sur le terrain en début de période adéquate (octobre).

- **Phase 2 : Collecte des données au cours d'un cycle annuel**

Prélèvements d'eau pour analyses en cours d'eau

Les stations seront échantillonnées selon la stratégie validée à l'issue de la phase 1. Les recommandations du « Guide technique du préleveur en rivière » seront suivies.

NB : Il est important que les personnes réalisant les prélèvements physico-chimiques soient sensibilisées au fait que les échantillons prélevés feront l'objet d'analyses avec une précision élevée dans l'optique d'un calcul de flux, opération déjà soumise à une certaine imprécision. Le prélèvement devra donc être réalisé

⁷⁰ ou des débits reconstitués par calcul en l'absence de données exploitables.

⁷¹ Analyse vivement conseillée compte tenu de son très modeste coût.

avec précaution afin d'assurer une bonne représentativité et d'éviter tout risque de contamination. Dans le cas où plusieurs opérateurs seraient chargés des prélèvements, il faudra s'assurer de la cohérence des différents relevés : même localisation des points de prélèvement et même méthodologie de prélèvements.

Selon la campagne, les analyses concerneront les phosphates et les nitrates sur eau brute (pour assurer la continuité avec les suivis actuels), et/ou le phosphore total. Les échantillons seront livrés en glacière refroidie dans un laboratoire régional proche, de préférence le jour même ou dès le lendemain matin suivant leur prélèvement ; l'envoi d'échantillon par transporteur ne sera pas admis.

Suivi du plan d'eau

Les 4 campagnes par an (février-mars : mélange hivernal, 2^e quinzaine de juin : mise en place de la stratification, fin juillet-début août : début période estivale, 1^{ère} quinzaine de septembre (stratification estivale et épaisseur épilimnion maximales) seront conformes aux dispositions du programme de surveillance des plans d'eau mis en place par l'agence de l'eau Loire-Bretagne. Les paramètres analysés seront ceux des groupes 2 et 2bis (voir en annexe,) ainsi que le phytoplancton. *De mai à octobre, un suivi mensuel (ou bi-mensuel) concernera les phosphates et le phosphore total* au(x) point(s) validés à l'issue de la phase 1.

Les échantillons d'eau seront livrés en glacière refroidie dans un laboratoire régional proche, de préférence le jour même ou dès le lendemain matin suivant leur prélèvement ; l'envoi d'échantillons par transporteur ne sera pas admis. Pour le phytoplancton, il est admis que l'obscurité et le lugol permettent une conservation satisfaisante pendant 3 semaines avant stockage au réfrigérateur.

Prélèvements et analyses de sédiment

Les paramètres analysés sur support sédiment et sur eau interstitielle sont ceux des groupes 5 et 6 du programme de surveillance DCE des plans d'eau en Loire-Bretagne (voir en annexe).

Une campagne d'échantillonnage sera prévue en août-septembre sur le nombre de points validé à l'issue de la phase 1.

Les échantillons seront livrés en glacière refroidie dans un laboratoire régional proche dans un délai maximum de 24 heures après leur prélèvement ; l'envoi d'échantillons par transporteur ne sera pas admis.

Suivi de la sédimentation

Des sédimentomètres seront placés dans la retenue (nombre et positions validés à l'issue de la phase 1) et relevés tous les 2 mois. En laboratoire, les sédiments recueillis seront décantés puis séchés en déshydrateur. Les analyses porteront sur la matière sèche, la teneur organique par perte au feu à 550° et le phosphore total.

Relargage du phosphore (en option)

En option, une expérimentation de relargage de phosphore par le sédiment pourra être proposée, soit en laboratoire, soit in situ.

- **Phase 3 : Interprétation et synthèse des données**

Le rapport de phase 3 comportera :

- . une analyse de la situation et l'évolution saisonnière de l'eutrophisation de la retenue (eau et sédiment),
- . l'évaluation des flux entrants et sortants de la retenue au cours d'un cycle annuel (les méthodes de calcul utilisées seront clairement exposées et justifiées),
- . l'évaluation de la sédimentation dans la retenue,
- . le bilan du stockage de nutriments dans la retenue (eau et sédiment),
- . *les effets de la présence de la pré-retenue,*
- . des propositions éventuelles d'optimisation de l'échantillonnage,
- . le cas échéant, au vu des résultats, une ou des propositions d'intervention sur le plan d'eau ou son bassin dans une optique d'amélioration de la situation.

Article 4.- Délais, déroulement et suivi

La durée de la mission est fixée à environ à 18 mois :

La phase 1 préliminaire peut s'étendre sur 3 mois (délai de 2 mois pour la réception et le traitement des données + délai de 1 mois pour la 1^{ère} réunion et la validation de l'échantillonnage), soit environ de juillet à septembre.

La collecte des données sur le terrain (phase 2) doit être faite d'octobre de l'année n à septembre de l'année n+1 (à ajuster selon les prévisions météorologiques), soit sur 12 mois.

La phase 3 d'interprétation est prévue sur 3 mois (délai de 2 mois pour l'interprétation des données + délai de 1 mois pour la 3^e réunion), soit une fin d'étude en décembre de l'année n+1.

Trois réunions seront programmées (début de l'étude, fin de phase 1, restitution en fin de phase 3).

Le pilotage est assuré par

Les éléments livrables sont :

- . un rapport de phase 1 présentant la stratégie d'échantillonnage (versions provisoires et définitive) ;
- . un rapport de phases 2 et 3 présentant les données et leur traitement (versions provisoires et définitive) ;
- . une base au format Access des données de qualité de l'eau et débits conforme aux spécifications du SANDRE.

Les éléments suivants (détails en annexe) seront fournis au prestataire en début de mission par le maître d'ouvrage sous forme numérique : suivis antérieurs de la qualité de l'eau de la retenue et des cours d'eau l'alimentant, données du programme de surveillance des plans d'eau de l'agence de l'eau Loire-Bretagne, débits, études spécifiques.

Annexes

1. Documents et données disponibles
2. Suivi actuel des cours d'eau et de la retenue
3. Détails des groupes de paramètres analysés dans le programme de surveillances DCE des plans d'eau pour l'agence de l'eau Loire-Bretagne.

Annexe 1 : Documents et données disponibles

Annexe 2 : Suivi actuel des cours d'eau et de la retenue

Annexe 3 : Groupe de paramètres analysés par le contrôle de surveillance des plans d'eau de Loire-Bretagne en 2010

Ensemble de paramètres Dénomination	Descriptif	Prélèvement d'eau intégré	Prélèvement d'eau de fond	Prélèvement de sédiment	Prélèvement de sédiment
		Support eau (3)	Support eau (3)	Support sédiment (6)	Support eau interstitielle (15)
Groupe 2	DBO ₅ , NKj, NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , P total, COD, MEST, turbidité, Chlorophylle a, phéopigments et silice dissoute	Campagnes 1, 2, 3 et 4			
Groupe 2 Bis	NKj, NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , P total, COD, MEST, turbidité et silice dissoute		Campagnes 1, 2, 3 et 4		
Groupe 3	Chlorures, sulfates, bicarbonates, calcium, magnésium, sodium, potassium, dureté TH, TA/TAC	Campagne 1	Campagne 1		
Groupe 4	PO ₄ ³⁻ , P total, NH ₄ ⁺				Campagne 3
Groupe 5	Carbone organique, azote organique, P total, perte au feu, granulométrie			Campagne 3	
Groupe 6	Aluminium, fer, manganèse			Campagne 3	
Tableau 1	Substances prioritaires (33 substances de l'annexe X et les 8 substances de l'annexe IX de la DCE)	Campagnes 1, 2, 3 et 4		Campagne 3 (selon le support pertinent noté dans le tableau 1)	
Tableau 2	Autres substances	Campagnes 1, 2, 3 et 4		Campagne 3	
Tableau 3	Pesticides	Campagnes 1, 2, 3 et 4		Campagne 3	
Tableau 4	Pesticides complémentaires	Campagnes 1, 2, 3 et 4			
Tableau 5	Substances complémentaires	Campagnes 1, 2, 3 et 4		Campagne 3	
Phytoplancton	Densités algale et cellulaire	Campagnes 1, 2, 3 et 4			