

Critique du modèle du phosphore pour expliquer le développement des Cyanobactéries, un paradigme qui fait eau de toutes parts.

Laboulle Hervé, 17 Lorioux 23160 Saint Germain Beaupré France, 05.55.63.02.26
herve.laboulle@orange.fr

RESUME

Cette publication résulte d'une réflexion amorcée en 2009, qui remet en cause le facteur déterminant des développements de Cyanobactéries : le phosphore.

Lorsque je me suis intéressé au problème des Cyanobactéries, j'ai commencé par un travail de bibliographie afin de connaître l'état des connaissances sur le sujet. En fait, l'essentiel se résume en ce que Guy Barroin (G. Barroin, 2011) a appelé « la machine infernale ». Ce modèle me semblait logique et cohérent. Par contre, ce qui me semblait paradoxal, c'est que les solutions apportées sur la base de ce modèle ne donnaient pas de résultats vraiment probants.

Ayant déjà ces doutes lors de l'étude du lac du Bourg-d'Hem que j'ai menée en 2010, j'ai pourtant conduit cette étude sans *a priori*, voulant simplement connaître le fonctionnement du lac dans les conditions normales. Ce fonctionnement, original, n'a fait que confirmer ces doutes. L'enseignement tiré de cette étude est que le plan d'eau présente une situation oligotrophe alors que le développement des Cyanobactéries grâce au phosphore est expliqué dans un contexte eutrophe. J'ai donc cherché à comprendre pourquoi est-ce que l'eutrophie s'imposait aussi facilement dans les esprits au point qu'elle n'est pas démontrée dans les études, mais établie comme un principe premier et cela dès le titre de l'étude parfois !

Cette recherche m'a conduit à démontrer que chaque partie du modèle « machine infernale » était fautive. Si bien qu'il ne s'agissait plus pour moi d'une légère correction de ce modèle, mais d'un changement radical de paradigme.

MOTS CLES : paradigme, Cyanobactéries, phosphore, eutrophie, oligotrophie, transparence, modélisation.

ABSTRACT

This publication is the result of a reflection which was initiated in 2009, and which challenges the fact that one component should be the key factor for the development of Cyanobacteria, that component being : phosphorus.

When I started studying the problem of Cyanobacteria, I first went through all the publications on the matter to find out the extent of the knowledge on the subject. In fact, it could all be summed up in what Guy Barroin called "the infernal machine". This model appeared to be logical and coherent. On the contrary, what seemed to be paradoxical was that the solutions that were given based on this model did not give convincing results. Bearing that in mind when I carried out the experiments in the Lac du Bourg-d'Hem in 2010, I nevertheless carried them out objectively, with the sole objective of knowing the functioning of the lake in normal conditions : the results only came to confirm my doubts on the subject. The lesson I learned from these experiments was that the lake works as an oligotrophic environment, while the development of Cyanobacteria thanks to phosphorus can be explained in a eutrophic environment. So I tried to figure out and understand why it was so obvious to

anyone that eutrophic environments were a postulate, so much so that it was not considered necessary to be proved, and sometimes even appeared in the title of the study.

This research led me to prove that each part of the model of the “infernal machine” was wrong, to such an extent that it was not a question of correcting slightly this model, but of radically changing the paradigm.

KEY WORDS : paradigm, Cyanobacteria, phosphorus, eutrophic, oligotrophic, transparency, establishment of a pattern.

SOMMAIRE

<u>INTRODUCTION</u>	p 3
<u>I) MODELE DU PHOSPHORE ET SA CRITIQUE</u>	p 3
A) <u>Présentation rapide du modèle</u>	p 3
B) <u>Solubilisation du phosphore des sédiments</u>	p 3
<u>II) EVIDENCES FAUSSES ATTACHEES A CE PARADIGME</u>	p 4
A) <u>Exemple des trois lacs</u>	p 4
B) <u>Nombre de cellules Eucaryotes (oligotrophie) comparé au nombre de Cyanobactéries (eutrophie)</u>	p 5
C) <u>Eucaryotes, forte transparence ; Cyanobactéries, faible transparence</u>	p 6
D) <u>Eutrophie et transparence</u>	p 7
E) <u>Modélisation : de la mare aux canards aux lacs oligotrophes</u>	p 8
<u>III) CONSEQUENCES DE L'APPLICATION DU MODELE PHOSPHORE</u>	p 9
A) <u>L'expertise nuit à la créativité</u>	p 9
B) <u>Exemple d'études menées avec <i>a priori</i> et biais</u>	p 10
C) <u>D'importants travaux sans garantie de succès</u>	p 11
D) <u>La culture du phosphore</u>	p 12
<u>IV COMMENT EN EST-ON ARRIVE LA ?</u>	p 14
A) <u>Une dérive amorcée dans les années 80</u>	p 14
B) <u>Des conséquences aujourd'hui dans d'autres domaines</u>	p 14
<u>CONCLUSION</u>	p 15
<u>Remerciements</u>	p 15
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	p 16
<u>LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX</u>	p 17
<u>FIGURES ET TABLEAUX</u>	p 18

INTRODUCTION

Le développement des Cyanobactéries est de plus en plus important et se généralise pratiquement à l'ensemble des plans d'eau. L'explication acceptée de manière unanime est celle du phosphore : l'utilisation du phosphore à plusieurs niveaux (engrais, lessives) a entraîné un enrichissement des eaux naturelles en cet élément. Le phosphore étant le facteur limitant du phytoplancton, il a surtout profité aux Cyanobactéries qui ont la capacité de métaboliser l'azote atmosphérique. Ces deux facteurs limitants étant levés, cela a conduit à des explosions de populations de Cyanobactéries que l'on appelle efflorescence ou bloom (en anglais).

Petit à petit, par des observations de terrain, par des mesures, des comparaisons, j'ai pu détricoter tout le modèle établi et accepté de manière unanime. Que ce soit le passage de l'oligotrophie à l'eutrophie, accompagné de la baisse importante de la transparence, ou bien la situation réelle des sédiments, ou bien encore une certaine nécessité de renouveler l'eau d'un plan d'eau, tous ces points ont été expliqués autrement.

Ensuite, je me suis intéressé à certaines études qui sont conduites de manière incomplète, comportent des erreurs de calculs, de conversion et font perdre la notion d'ordre de grandeur. Puis, certaines applications aussi ont été étudiées, ainsi que leurs résultats.

Enfin, est envisagée l'origine de cette accumulation d'erreurs.

I) MODELE DU PHOSPHORE ET SA CRITIQUE

A) Présentation rapide du modèle

Le modèle du phosphore pour expliquer les développements importants de Cyanobactéries a été très bien expliqué par Guy Barroin (Barroin 1991) et notamment par un schéma intitulé « La machine infernale ». Ce modèle explique que les fonds de plan d'eau sont privés d'oxygène, ce qui provoque la solubilisation de sels minéraux en provenance des sédiments. Les Cyanobactéries étant capables de vivre en anaérobie, migrent la nuit verticalement vers le fond et se chargent en phosphore. Puis elles remontent vers la surface, pour y pratiquer la photosynthèse dans la journée. Photosynthèse d'autant plus efficace qu'elles sont aussi capables de fixer l'azote atmosphérique dissous dans l'eau sous forme de sels minéraux métabolisables (autotrophie vis-à-vis de l'azote). Les deux facteurs limitants, que sont le phosphore et l'azote, étant levés, elles ont donc un avantage sur les algues eucaryotes unicellulaires au point de les marginaliser dans l'ensemble du phytoplancton. Et c'est ainsi que les Cyanobactéries dominent.

B) Solubilisation du phosphore des sédiments

Les sédiments d'un plan d'eau résultent d'une accumulation de matière minérale (sable, argiles, limons) et de matières organiques en décomposition (végétaux et animaux). La matière organique est essentiellement constituée de carbone, d'oxygène et d'hydrogène, mais contient aussi en plus ou moins grande quantité d'autres atomes comme l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, etc.

Lorsque la matière organique se décompose par action de la flore microbienne, les atomes sont libérés sous formes minérales : dioxyde de carbone, eau, nitrate, ammonium, ortho-phosphates, etc. Ces formes minérales peuvent être absorbées par les végétaux

chlorophylliens qui vont synthétiser de la matière organique grâce à la photosynthèse. Tout cet ensemble de décomposition et recombinaison de la matière organique constitue le cycle de la matière propre à tous les écosystèmes (Angelier 2008).

Au fond d'un étang ou d'un lac, lorsqu'il y a de l'oxygène, les sels minéraux oxydés sont à l'état précipité, donc non mobilisables dans la colonne d'eau et donc non disponibles pour les plantes chlorophylliennes.

Dans le modèle largement accepté aujourd'hui par la communauté scientifique, il est admis que les fonds de plan d'eau sont désoxygénés (Barroin, 1991). Dans ces conditions anoxiques, les sels minéraux sont à l'état réduit et dans cet état, ils deviennent solubles. Si on résume, en hiver avec le mélange des eaux de la surface au fond, il y a de l'oxygène sur le fond, les sels minéraux sont oxydés, donc insolubles donc indisponibles. En été, l'installation d'une thermocline entraîne la désoxygénation du fond, les sels minéraux passent à l'état réduit et donc à l'état soluble, ils deviennent donc disponibles pour la photosynthèse et en particulier profitent davantage aux Cyanobactéries.

Or ce modèle de fonctionnement en été a été établi il y a longtemps sur un petit nombre de plans d'eau particuliers (profond, à faible renouvellement d'eau) comme le lac Pavin.

Par contre, si on étudie un plan d'eau classique (étang, lac peu profond), on s'aperçoit que l'eau qui arrive par les tributaires est plus froide que l'eau de surface du plan d'eau (zone euphotique). En raison de la différence de densité des eaux froides par rapport aux eaux chaudes, l'eau des tributaires ne se mélange pas dans la zone euphotique, mais suit le fond du plan d'eau. Cette eau de ruisseau ou de rivière est riche en oxygène grâce à l'agitation de l'eau, ce qui fait que les fonds sont très oxygénés. C'est ainsi qu'en 2010, sur le lac du Bourg-d'Hem, en été à 16 m de profondeur (à 1 m du fond), la quantité d'oxygène était de près de 80% ! (Laboulle, 2011).

Cette présence d'oxygène change complètement les choses. En effet, s'il y a de l'oxygène, les sels minéraux sont oxydés donc sous forme insoluble, précipités dans les sédiments. Ce qui fait qu'ils ne sont pas disponibles pour la photosynthèse et vont donc en constituer le facteur limitant. Ce qui fait que le modèle du phosphore soluble à partir des sédiments (Barroin, 1991) ne correspond pas à la réalité.

On peut même remettre en cause l'état eutrophe souvent vite déclaré dès le titre des rapports (Unilim, 2013, 2014), alors que la réalité est celle de plans d'eau oligotrophes.

II) EVIDENCES FAUSSES ATTACHEES A CE PARADIGME

A) Exemple des trois lacs

L'étude du lac du Bourg-d'Hem en 2010 a montré une séparation des eaux de surface par rapport aux eaux de profondeur, à cause d'une différence de densité due à une différence de température (Laboulle, 2014).

Or en amont de ce lac, il existe deux autres lacs : le lac des Chézelles et le lac de Champsanglard. Si l'on étend le modèle établi pour le lac du Bourg-d'Hem à ces deux autres lacs, on peut considérer que la Creuse traverse ces trois lacs non seulement sans être affectée par la présence des lacs, mais aussi que la partie supérieure des lacs n'est pas affectée par la Creuse.

Ainsi en été, la partie supérieure de chaque lac se comporte comme un système clos, qui n'aurait même pas d'échanges avec son substrat (sédiments). Le seul lien entre les deux compartiments est la perte de matière organique morte du compartiment supérieur, vers celui du fond par sédimentation. Ce qui fait que le compartiment supérieur n'étant pas alimenté en

sels minéraux d'une part et perdant de la matière organique d'autre part, devient de plus en plus oligotrophe au fur et à mesure de l'été. Or actuellement on explique les blooms de Cyanobactéries dans un contexte eutrophe avec un apport supplémentaire de phosphore, soit en provenance des tributaires soit par un relargage des sédiments.

En conséquence, il ne devrait jamais y avoir de bloom de Cyanobactéries dans ces trois lacs. C'est loin d'en être le cas, car presque chaque année depuis quinze ans, il y a au moins une interdiction de baignade pour cause de Cyanobactéries.

En juillet 2011, une situation intéressante observée sur ces trois lacs montre d'une part que chaque lac est un compartiment isolé de la Creuse qui passe en profondeur et d'autre part qu'un bloom peut apparaître dans un contexte oligotrophe (Figure 1). En effet en juillet 2011, des trois lacs, seul celui du milieu (lac des Chézelles) a été affecté par un bloom de Cyanobactéries. Les mesures effectuées lors de cette période sur l'ensemble des trois lacs et de la Creuse sont réunis dans un tableau (Tableau 1). D'après ces mesures, on voit bien que la Creuse « traverse » ces trois lacs sans être modifiée, à part la température qui augmente, mais cela se serait fait de la même manière sans les lacs (Tableau 2). Les trois lacs ont des caractéristiques différentes de la Creuse. Le lac des Chézelles a des caractéristiques différentes des deux autres, qui eux par contre sont très proches l'un de l'autre. Tout cela démontre bien, une indépendance du compartiment lac, de la Creuse qui s'écoule en profondeur. A tel point qu'un bloom aux Chézelles n'entraîne pas de bloom au lac du Bourg-d'Hem en aval, alors que les deux sont traversés par la même rivière. Donc si c'était la Creuse qui était responsable du bloom aux Chézelles, elle ne le serait pas moins au Bourg-d'Hem. Ce sont donc des causes intrinsèques au compartiment supérieur du lac qui déclenchent le bloom. De plus, comme ce compartiment est indépendant de la Creuse et de ses sédiments, cela ne peut pas être déclenché par le phosphore.

B) Nombre de cellules Eucaryotes (oligotrophie) comparé au nombre de Cyanobactéries (eutrophie)

Lorsqu'il y a un bloom de Cyanobactéries, le dénombrement donne des valeurs très élevées, de l'ordre de la centaine de mille jusqu'à plusieurs millions par mL. Souvent ce grand nombre est interprété comme étant une preuve d'eutrophie. Effectivement dans un milieu eutrophe, les sels minéraux sont en quantité et peuvent soutenir une photosynthèse importante, ce qui fait une grande productivité de matière organique et donc un grand nombre de cellules phytoplanctoniques. Si précédemment au bloom, on a dénombré les algues eucaryotes, on trouve des valeurs beaucoup plus faibles qui conduisent à penser que le milieu est oligotrophe. Or l'état trophique d'un plan d'eau est une situation qui est relativement stable et qui ne peut évoluer que sur une échelle de temps de plusieurs années.

A l'occasion d'un bloom de Cyanobactéries, on en déduit souvent que le milieu est devenu eutrophe, alors qu'une à deux semaines auparavant avec le nombre d'algues eucaryotes, on en aurait déduit que le milieu était oligotrophe.

La réalité est que même avec un grand nombre de Cyanobactéries (plusieurs centaines de milliers) on est toujours dans un milieu oligotrophe.

L'explication réside dans la différence de taille entre les algues eucaryotes et les Cyanobactéries. Certaines algues eucaryotes comme *Chlamydomonas* ont une taille d'environ 10 μm . Certaines Cyanobactéries comme *Aphanocapsa* ont une taille d'environ 1 μm . Le rapport de taille est donc de 1 à 10 des Cyanobactéries aux algues eucaryotes. Si maintenant on s'intéresse à la quantité de matière organique qui les constitue, cette quantité varie suivant le volume de la cellule. Or le volume va être fonction de la taille portée au cube et donc le rapport de 1 à 10 en taille va devenir en volume un rapport de 1 à 1000. Ce qui veut dire que

la quantité de matière organique d'une cellule eucaryote équivaut à la quantité de matière organique de 1000 Cyanobactéries !

Si on veut être prudent, on peut considérer qu'il y a des algues eucaryotes plus petites et des Cyanobactéries plus grandes. Donc si on calcule un volume moyen des algues eucaryotes et un volume moyen de Cyanobactéries, en faisant le rapport des deux, on doit obtenir une valeur proche de 200. Avec cette valeur, on peut traiter un exemple fictif, mais concret :

Dans un lac, un prélèvement de phytoplancton fait apparaître 1000 algues eucaryotes et 100 Cyanobactéries pour un volume de 1 mL. En considérant le faible nombre des deux catégories, on en déduira que le lac est oligotrophe.

Ensuite, lorsque l'on passe dans une situation de bloom de Cyanobactéries, le flux de sels minéraux entrant dans le plan d'eau reste le même. On est donc toujours dans une situation oligotrophe. Admettons que sur les 1000 algues eucaryotes, 800 vont disparaître car la reproduction se fait moins bien. Par contre, dans le même temps, les Cyanobactéries étant dans un milieu qui leur est devenu favorable, vont se multiplier jusqu'à faire l'équivalent des 800 algues eucaryotes, ce qui donnera : $800 \times 200 = 160000$ Cyanobactéries. Le nombre important de Cyanobactéries fera dire que le plan d'eau est devenu eutrophe. De plus en ayant dépassé le seuil des 100000 Cyanobactéries, la baignade sera interdite. Avec cet exemple, on comprend bien que même si dans la réalité le flux en sels minéraux n'a pas changé, l'apparition des Cyanobactéries conduira à déclarer une nouvelle situation : le plan d'eau est devenu eutrophe. De là, on invoquera tout un tas de mécanismes pour expliquer cet « enrichissement soudain en sels minéraux et en phosphore en particulier : relargage massif de phosphore par les sédiments, consommation de luxe, etc. »

C) Eucaryotes, forte transparence ; Cyanobactéries, faible transparence

On vient de voir que lorsque les conditions écologiques deviennent favorables aux Cyanobactéries, le remplacement des algues eucaryotes au profit des Cyanobactéries ne se fait pas à nombre constant, même si le milieu a conservé ses caractéristiques quantitatives et qualitatives de ses sels minéraux. En effet, même si la quantité de matière organique reste constante lors de ce remplacement, le nombre de Cyanobactéries va devenir bien plus important que celui des algues eucaryotes (200 fois environ, d'après mon estimation).

Ce qui va changer aussi avec ce remplacement de populations, c'est la transparence de l'eau. En effet, avec une population majoritaire d'algues eucaryotes, on peut avoir une transparence relativement forte (1,50 à 3 m) alors qu'avec une nouvelle population majoritaire de Cyanobactéries, la transparence tombe à un niveau faible (0,50 à 0,70 m, voire moins). Or on a vu que dans ces conditions là, la quantité de matière organique reste la même. De plus, à une forte transparence sera associée l'oligotrophie, alors qu'à une faible transparence, ce sera l'eutrophie.

L'explication réside peut-être dans le nombre différent de cellules dans les deux cas, mais aussi et surtout sur la différence de structure cellulaire entre les algues eucaryotes et les Cyanobactéries.

Pour ce qui est du nombre, comme les Cyanobactéries sont plus nombreuses, lorsqu'un rayon de lumière traverse une algue eucaryote, il en traversera plusieurs lorsqu'il s'agira de Cyanobactéries, sans pour autant atteindre 200, car elles vont se répartir dans le volume élémentaire correspondant à celui d'une algue eucaryote. Et cela d'autant plus qu'une cellule de Cyanobactéries est plus petite qu'une cellule d'algue eucaryote. Il faudrait donc calculer la « longueur cellulaire » traversée statistiquement dans les deux cas. Il est très probable que cette distance soit plus importante dans le cas des Cyanobactéries, ce qui expliquerait une part de l'extinction de la lumière.

Par contre, la différence de structure cellulaire est certainement prépondérante pour expliquer la différence de transparence. En effet, au niveau strictement cellulaire, les éléments sont les mêmes : cytoplasme, membrane cytoplasmique. Il ne semble pas à l'observation microscopique que le noyau des cellules eucaryotes ait une diffusion ou une dispersion de la lumière plus forte que le cytoplasme. Par contre, les Cyanobactéries ont une paroi épaisse en périphérie qui n'existe pas chez la plupart des algues eucaryotes, qui ont tout au plus une mince cuticule. Ce serait donc la présence de cette paroi qui par son opacité serait responsable de la diffusion, voire de l'absorption de la lumière et donc d'une très faible pénétration de la lumière dans la profondeur de l'eau.

D) Eutrophie et transparence

Habituellement, on établit un lien évident entre le niveau nutritif d'un plan d'eau et la transparence de l'eau. Ainsi, lorsqu'un milieu est oligotrophe, il est peu minéralisé et cette faible minéralisation constitue un facteur limitant pour le phytoplancton. Si le phytoplancton est peu abondant, alors la lumière étant faiblement atténuée va pouvoir pénétrer assez profondément.

La transparence peut-être évaluée avec un disque de Secchi. Une transparence Secchi de 10 m conduira à dire que le lac est oligotrophe.

A l'inverse, lorsqu'il y a une forte minéralisation, le phytoplancton se développe très vite par la levée de ce facteur limitant. Dans ce cas, on dit que le milieu est eutrophe. Le phytoplancton étant abondant, il va intercepter davantage de lumière et donc la transparence va baisser considérablement. On peut de cette manière établir un lien entre une faible transparence et un état eutrophe.

Or, il se trouve que depuis 20 ou 30 ans, notre agriculture est devenue plus agressive et plus érosive vis-à-vis des sols, ce qui fait que par voie de conséquence, les eaux ruisselantes sont plus chargées en sédiments et en colloïdes (organiques et minéraux).

Ces eaux ruisselantes transitent par les plans d'eau, on observe des eaux « sombres », dont la transparence Secchi est parfois très faible (50 à 60 cm) alors que le milieu est toujours oligotrophe. Mais souvent, il est déduit de cette faible transparence, un milieu eutrophe, suivant la relation logique qui a été rappelée plus haut.

Or le développement d'efflorescence de Cyanobactéries est expliqué dans un contexte eutrophe. Donc lorsqu'un étang ou un lac est étudié à cause des Cyanobactéries, une des premières mesures faciles et rapides à réaliser est la transparence Secchi, il est établi rapidement la relation :

Faible transparence → eutrophie → Cyanobactéries

Alors que souvent la faible transparence est due à des MES et/ou colloïdes et que le plan d'eau est oligotrophe.

Cet *a priori* d'eutrophie est parfois même affirmé dans le titre du rapport d'étude : Etude des phénomènes d'eutrophisation de l'étang du Cheix (Unilim, 2014), Etude de l'eutrophisation de la retenue de Courtille (AQUA GESTION, 1997).

Ensuite tout est expliqué pour confirmer l'eutrophie : si les tributaires n'apportent pas assez de phosphore, on va en conclure que les sédiments peuvent en fournir, même s'il y a de l'oxygène sur le fond et même si l'on n'a pas pris la précaution de faire cette mesure !

E) Modélisation : de la mare aux canards aux lacs oligotrophes

Dans le cadre du développement des Cyanobactéries, il est évoqué souvent qu'une pièce d'eau n'a pas un renouvellement suffisant de son eau par les apports des tributaires. Cela entraînerait une certaine concentration des sels minéraux d'où un état eutrophe de l'étang ou du lac.

Si on évoque le cas extrême d'un écosystème lentique sans aucun apport d'eau des tributaires soit parce qu'ils sont inexistantes soit parce qu'on les a détournés, l'évolution envisagée est celle d'une mare aux canards avec son eau croupissante. La raison invoquée est justement le manque de renouvellement d'eau.

Si l'on fait une modélisation de ce cas particulier, on voit que ce qui est vrai à une certaine échelle, ne l'est plus en modifiant l'échelle. Autrement dit, pour une pièce d'eau de quelques mètres carrés, on peut avoir une évolution vers une eau chargée en sels minéraux et donc un milieu eutrophe, alors qu'aux dimensions d'un lac, on aura un milieu oligotrophe.

Nous allons donc définir un modèle de pièce d'eau et l'on verra ensuite en faisant varier ses dimensions, quelles en sont les conséquences.

Modèle : On considère une pièce d'eau circulaire de rayon R et de forme conique dont la hauteur d'eau maximale au centre est établie comme suit : $H = R/10$ (Figure 2)

D'après ce volume défini ci-dessus, on peut calculer trois caractéristiques : le périmètre, la surface et le volume.

Ces trois caractéristiques s'établissent comme suit :

Périmètre :

$$P = 2 \times \Pi \times R$$

Surface :

$$S = \Pi \times R^2$$

Volume :

$$V = 1/3 \times \Pi \times R^2 \times H$$

$$V = 1/3 \times \Pi \times R^2 \times R/10$$

$$V = \Pi / 30 \times R^3$$

Cette pièce d'eau n'est pas alimentée par un cours d'eau, on considère le ruissellement comme négligeable. Les seuls apports étant ceux de matière solide venant de la périphérie par le vent (feuilles mortes, branches, etc.) Dans ce cas les apports sont proportionnels au périmètre de la pièce d'eau.

D'autre part, cette matière organique morte en provenance du bassin versant, va se décomposer dans l'eau. Cette décomposition va libérer des sels minéraux qui vont se diluer dans la masse d'eau. Donc la dilution sera proportionnelle au volume de la pièce d'eau.

Ce qui fait que la matière dissoute de la pièce d'eau sera :

- proportionnelle aux apports donc du périmètre
- inversement proportionnelle au volume de la pièce d'eau.

Donc la matière dissoute sera proportionnelle au rapport : P/V , ce qui donne en remplaçant les formules :

$$P/V = \frac{2 \times \Pi \times R}{\Pi / 30 \times R^3}$$

Soit :

$$P/V = \frac{2 \times 30}{R^2}$$

D'où :

$$P/V = \frac{60}{R^2}$$

Il peut être intéressant de faire un tableau contenant P, S, V et le rapport P/V, pour voir comment varient ces différentes valeurs (Tableau 3).

On voit que le rapport P/V décroît très rapidement avec l'augmentation de R. Autrement dit, pour un rayon petit, les apports du bassin versant peuvent être importants par rapport au volume, auquel cas on aura une concentration de sels minéraux assez élevée et donc un milieu eutrophe. A l'inverse, lorsque R augmente, les apports augmentent en fonction de R, mais la concentration en sels minéraux diminue considérablement en rapport à $1/R^3$ et donc on arrive à un milieu oligotrophe. Donc ce qui s'observe au niveau d'une petite pièce d'eau (eutrophie) n'est plus vrai au niveau d'un grand plan d'eau (oligotrophie).

Pour en revenir à notre problème des Cyanobactéries, ce n'est pas parce qu'une pièce d'eau n'est pas alimentée par un cours d'eau que cela en fait obligatoirement un milieu eutrophe, même au contraire !

III) CONSEQUENCES DE L'APPLICATION DU MODELE PHOSPHORE

A) L'expertise nuit à la créativité

Une équipe de neurobiologistes anglais a récemment (trois ou quatre ans) mis en évidence un processus de blocage du cerveau (absence de créativité) suite à un apprentissage redondant qui confère à l'individu une certaine habileté à exécuter certaines tâches (expertise).

L'expérience consiste à soumettre des opérations à un groupe d'hommes et de femmes volontaires. Les opérations sont en chiffres romains qui sont « écrits » à l'aide d'allumettes. L'opération proposée est fautive, il s'agit pour le cobaye de déplacer des allumettes pour qu'elle devienne exacte. On ne peut ni ajouter ni soustraire des allumettes. Ce que l'on ne dit pas, c'est que ces opérations ne font intervenir des changements d'allumettes que sur les chiffres et jamais sur le signe de l'opération. Au fur et à mesure des opérations proposées, on voit que les cobayes deviennent de plus en plus rapides et arrivent à réaliser des changements de positions d'allumettes assez complexes. On peut dire qu'ils deviennent experts pour cette tâche.

Une fois ce stade d'expertise atteint, on leur propose une nouvelle opération dans laquelle le changement d'allumettes fait intervenir le signe de l'opération. Dans ce cas, les experts sont incapables de réaliser la manipulation attendue. Chose étonnante, si cette opération est proposée à d'autres cobayes, comme première ou deuxième opération, ils y arrivent en un temps raisonnable.

L'explication semble être que le cerveau comprend assez vite que les modifications ne concernent que les chiffres. De cette constatation, le cerveau en fait une loi mais sans que cela parvienne à la conscience du cobaye. Si bien qu'ensuite placé devant une opération avec modification du signe, le cerveau n'envisage même pas cette éventualité, il se concentre sur les chiffres et donc il échoue. La conclusion de cette expérience est résumée par l'équipe en une phrase choc : « L'expertise nuit à la créativité ».

Le paradigme du phosphore comme modèle d'explication des développements de Cyanobactéries semble correspondre à ce qui a été mis en évidence par les neurobiologistes anglais dans l'évocation ci-dessus.

En effet, l'idée du phosphore responsable des blooms de Cyanobactéries est tellement ancrée dans les esprits scientifiques actuels que cela ressort au niveau des études de cas et des publications et se manifeste de différentes manières (oubli, erreur, choix délibéré de valeurs qui arrangent, voire d'une certaine malhonnêteté intellectuelle). Ce phénomène est classique et vieux comme le monde : on élabore un système de pensées avec au départ certaines vérités, puis petit à petit, pour expliquer des observations nouvelles, on s'appuie sur le modèle de base au besoin on fait intervenir des phénomènes qui ne relèvent pas forcément de faits scientifiques et on monte ainsi un modèle qui s'apparente à une usine à gaz. Pour celui qui a suivi tout au long de sa carrière ce modèle, tout lui semble logique et scientifiquement indubitable. Toute remise en cause du modèle lui est intellectuellement impossible et ce d'autant plus s'il a lui-même contribué à l'élaboration de ce modèle.

Autrement dit, quand on connaît bien un modèle, il est difficile voire impossible d'en sortir. Pour en avoir parlé de vive voix ou par mail avec des spécialistes des Cyanobactéries, quand on remet en cause le dogme du phosphore, on se trouve face à un refus total, même s'il s'agit simplement de l'envisager pour en discuter. Ce refus catégorique témoigne bien d'un processus mental qui exclu toute créativité. Toute nouvelle information qui pourrait remettre en cause le modèle, va être interpréter dans ce modèle en faisant intervenir un phénomène qui n'est pas forcément démontré mais qui sera néanmoins accepté. Dans un tel processus seul un béotien peut avoir des doutes et remettre en cause le modèle établi.

L'exemple connu que l'on peut prendre est celui du modèle géologique de la Terre établi dès le XIX^{ème} siècle. Ce modèle prédisait que les continents étaient fixes. Pour expliquer des faunes paléontologiques identiques d'un continent à l'autre (Amérique du Sud et Afrique par exemple), il était envisagé l'existence de ponts continentaux transatlantiques ! Lorsque Wegener a présenté son modèle de dérive des continents en 1910, il a été unanimement rejeté par la communauté scientifique géologique. Désabusé, Wegener est retourné à ses travaux de météorologie. Il meurt d'une crise cardiaque le 1^{er} novembre 1930, le jour de ses cinquante ans, au Groenland lors de la récolte de mesures de paramètres météorologiques.

Il a fallu attendre le début des années 60 pour avoir les premières observations remettant en cause la théorie fixiste des continents. Et dix ans de plus, pour faire admettre ce que l'on a appelé la Tectonique des Plaques.

Ainsi Wegener n'a pas pu faire admettre ses idées et cela d'autant plus qu'il ne faisait pas partie du sérail géologique.

B) Exemple d'études menées avec *a priori* et biais

Pour en revenir au modèle d'explication des blooms de Cyanobactéries par le phosphore, je vais prendre l'exemple de l'étude d'un plan d'eau réalisée par une université française. Cette étude a fait l'objet d'un rapport de mémoire de Licence d'un étudiant et d'un rapport d'étude de l'université en question. L'eutrophie du plan d'eau est annoncée d'emblée sans démonstration dès le titre des deux rapports ! (Etude du phénomène d'eutrophisation de l'étang du Cheix, pour le premier et Etude des phénomènes d'eutrophisation de l'étang du Cheix, pour le second). Les analyses qui sont faites aussi bien de l'eau des tributaires que celles du plan d'eau, que des sédiments concernent le coupable : le phosphore (sous différentes formes) auquel on a quand même ajouté l'azote.

Un bilan des apports est fait, ainsi que du stock des sédiments du plan d'eau, mais bizarrement rien concernant l'émissaire ! Tout se passe comme si le plan d'eau était un piège total du phosphore et ce qui en sort est de l'eau distillée ! Quand j'ai posé la question, la réponse qui m'en a été faite montrait bien que l'émissaire n'avait même pas été envisagé. On trouve d'ailleurs dans la littérature scientifique à propos de ce problème des expressions

comme : « les plans d'eau sont des pièges à phosphore ». L'idée semble tellement ancrée qu'on ne pense même plus à ce qui pourrait en sortir !

De la même manière, le modèle prévoit que les sédiments relarguent du phosphore lorsque le fond est désoxygéné. Dans cette étude, ce fait est envisagé, mais sans aucune vérification de la quantité d'oxygène sur toute la hauteur de la colonne d'eau donc y compris sur le fond. Or si la désoxygénisation du fond est largement acceptée et argumentée dans la littérature scientifique, la réalité est peut-être tout autre, mais pour cela il faudrait faire des mesures de temps en temps. Pour ma part, en 2010 sur le lac du Bourg-d'Hem, en été, à 16 m de profondeur (à 1 m au dessus du fond), il y avait encore une certaine quantité d'oxygène (65%). Donc là encore, le modèle est tellement évident que l'on ne vérifie rien.

Un autre aspect qui ressort est celui des ordres de grandeur qui ne sont plus appréhendés, tellement on a en tête des expressions comme « des quantités massives de phosphore sont stockées dans les sédiments ». Ainsi dans le rapport de l'étudiant, un tableau est commenté (Tableau 4). Le tableau met en évidence une quantité de 5000 kg de phosphore dans les sédiments et dans le commentaire au dessous (la faute d'orthographe dans ce commentaire n'est pas de moi), cette masse devient 5000 tonnes ! Or pour un plan d'eau de 5 ha, cela ferait 100 kg de phosphore par m². Avec une épaisseur moyenne de 20 cm de sédiments, on aurait là un gisement de phosphore très intéressant à exploiter !

La dernière partie que je veux aborder ici est la plus délicate car on peut parler de malhonnêteté intellectuelle voire scientifique. Lors d'une étude, un étudiant relève dans son rapport une valeur très forte de phosphore : 300 µg/L (Pt : Phosphore total) au niveau de la plage (Tableau 5). Il précise dans son commentaire, que juste avant de faire le prélèvement, il a été déversé au niveau de la plage un produit censé faire disparaître les Cyanobactéries. Or il se trouve que ce produit est riche en phosphore (120 mg/kg) et qu'il en a été dispersé 90 kg en deux fois au niveau de la plage. L'étudiant explique ainsi la forte teneur en phosphore du prélèvement fait au niveau de la plage.

Remarque : Le tableau est daté du 15 mai 2013, or les mesures de ce tableau datent du 23 juillet 2013, l'erreur vient du fait que l'étudiant a fait un copié-collé du tableau précédent (15 mai), y a modifié les valeurs pour y mettre celles du 23 juillet, mais a oublié de changer la date, si bien qu'il existe deux tableaux datés du 15 mai dans son rapport !

Dans le rapport de l'université (Tableau 6), cette valeur de 300 µg/L (Pt donné en mg/L) de phosphore est citée, mais cette fois-ci le prélèvement est situé au milieu de l'étang, ligne M du tableau, M comme milieu (et non plus sur la plage). De plus l'épandage du produit sur la plage est évoqué comme une possibilité d'augmentation (légère) de cette concentration. On laisse ainsi supposer que cette forte valeur est normale, elle justifie bien l'état eutrophe de l'étang et permet de comprendre les blooms de Cyanobactéries. Si ces résultats sont publiés dans une publication scientifique, ils ne manqueront pas d'être repris pour corroborer le modèle phosphore et c'est ainsi que l'on construit un modèle fait de demi vérité ou de demi mensonge.

C) D'importants travaux sans garantie de succès

Dans cette partie aussi, il est délicat pour moi de donner les références qui permettraient de localiser ce plan d'eau car d'une part les travaux ont été proposés par un bureau d'études et d'autre part, ils ont coûté certainement très chers à la commune qui a accepté de les faire, cela se traduisant par une augmentation des impôts locaux.

Dans les deux cas, je ne souhaite pas nuire à la réputation ni de l'un ni de l'autre.

Pour ce plan d'eau, le bureau d'études qui a été chargé de remédier au problème des Cyanobactéries, a trouvé qu'un étang en amont était pourvoyeur en phosphore responsable

des blooms de Cyanobactéries. Plus précisément, ce sont des sédiments qui étaient chargés en phosphore. Sur les conseils de ce bureau d'études, l'étang en question a été acheté par la commune qui l'a vidé et qui l'a curé. L'enlèvement des sédiments coûtant certainement trop cher, ils sont stockés tout autour de l'étang. L'étang reste vide en permanence et le ruisseau qui l'alimentait est dérivé de façon à ne plus passer par cet étang.

Ensuite, il a été creusé un bassin dit « de décantation » juste en amont de l'étang à soigner. Ce bassin de décantation a un trop plein qui se déverse dans l'étang. Il est aussi muni d'un moine dont la sortie passe par une canalisation qui traverse tout l'étang pour se jeter à la digue de l'étang. Ainsi en hiver le niveau du bassin de décantation est abaissé, si bien que toute l'eau passe par le moine et n'alimente pas l'étang. Le principe est que le phosphore qui vient de l'amont ne s'accumule pas dans l'étang. Par contre, en été pour renouveler l'eau de l'étang, on laisse monter l'eau du bassin de décantation de façon à ce qu'une partie ou tout du débit passe par l'étang. Il a fallu donc faire en plus des travaux sur la digue pour accueillir la sortie de la canalisation. Il y a deux ans, j'ai demandé à cette commune le montant de tout cela (achat et travaux), il ne m'a jamais été répondu. De plus, les Cyanobactéries continuent de s'y développer en été comme si rien n'avait été fait !

Pour en revenir à l'étude d'une université que j'ai détaillée dans un paragraphe ci-dessus, les propositions de remédiation sont différentes mais toutes aussi onéreuses et sont sans garanties de résultats avant plusieurs années, si résultats il y a !

D) La culture du phosphore

Les tenants de la théorie du phosphore sont partis d'un modèle datant des années 80, que l'on peut appeler « la machine infernale » (Barroin, 1991). Par la suite, au cours de différentes études et observations, il est apparu des failles, des incohérences dans ce modèle. Plutôt que de remettre en cause le modèle, il a été proposé à chaque fois des observations, des hypothèses non vérifiées, des événements admis même contre des faits scientifiques avérés. Le tout constitue ce que j'appelle la culture du phosphore qui semble donner une certaine ascendance à celui qui la possède sur les béotiens par l'ampleur des connaissances accumulées qui font de ce modèle une véritable usine à gaz. Il peut en être donné une idée avec une phrase tirée d'une publication (Barroin, 2004), certes une seule phrase, mais de 6 lignes, comprenant 92 mots : « Vouloir lutter contre la pollution par les phosphates en s'attaquant à l'azote, et ce d'autant plus impérativement que le phosphore est en excès, relève d'une logique pour le moins suspecte ou, tout simplement, du fait qu'on s'est obstiné à ne pas voir dans les excès de prolifération végétale aquatique l'effet de la pollution par les phosphates pour préférer y détecter de l'eutrophisation, concept lui aussi particulièrement malmené depuis l'origine et dont le flou permet maintenant de lui faire couvrir un vaste domaine d'interprétation. » (Haut de page 16).

C'est donc toute cette infrastructure que je me propose de démonter pièce par pièce tout à l'heure, c'est-à-dire tout de suite.

Concernant les observations, elles sont avancées pour expliquer un bloom imprévu : « Quelques jours avant, des chiens ont été vus pataugeant dans l'eau », mais on ignore toutes les fois où des chiens ont pataugé et qu'il ne s'en est pas suivi un bloom ! « Dans les jours précédents, on a vu une bande de canards se poser sur le plan d'eau et fouiller la vase », mais on n'envisage pas toutes les fois où des canards ont fouillé sans qu'il y ait eu bloom. L'idée commune avancée ici est qu'en pataugeant et en fouillant, les chiens et les canards font remonter du phosphore des sédiments. Il y a des milliers d'années que les chiens (et les loups avant eux) ainsi que les canards font cela, alors que les développements de Cyanobactéries ne datent que d'une trentaine d'années !

Cette obsession de la remontée du phosphore peut aller très loin : je connais un plan d'eau où en amont, il y a des particuliers qui élevaient une dizaine de canards. Pour le bien-être de ces canards, ils avaient aménagé une mare dont l'exutoire se jetait dans le plan d'eau. Quand un bureau d'études a été chargé de résoudre le problème des Cyanobactéries sur cet étang, la mare aux canards a été montrée du doigt, on cria « haro sur les canards ». Les gens ont accepté d'arrêter leur élevage de canards, la mare a été comblée. C'était il y a dix ans. Entre temps, la baignade a été abandonnée par la municipalité, le bureau d'études remercié et les Cyanobactéries continuent de se développer de plus belle !

Autre observation : l'assec partiel ou total est envisagé sur plusieurs mois (septembre à avril, par exemple), comme moyen de lutte contre les Cyanobactéries. Cela permettrait une décomposition de la matière organique des sédiments avec exportation du phosphore. Cela permettrait aussi aux UV du soleil de détruire les Cyanobactéries présentes dans les sédiments ! L'argument de poids avancé est : « On a constaté qu'après un assec, il y avait une baisse ou une disparition de la population cyanobactérienne ». Mais là aussi, on oublie d'autres asssecs qui eux ont été suivis d'une prolifération de Cyanobactéries l'été suivant. C'est le cas de l'étang du Cheix à La Souterraine : assec total de décembre 2012 à avril 2013 avec interdiction totale de la baignade lors de l'été 2013 (cause Cyanobactéries) et assec partiel (décembre 2014 à avril 2015) avec interdiction totale de baignade durant l'été 2015 !

Autre exemple d'observation : les pêcheurs notamment ceux qui utilisent des appâts et amorces sont dans le collimateur des « phosphoreux ». La raison : les appâts et amorces contiennent beaucoup de phosphore, de plus les poissons pêchés ainsi sont des fouisseurs (carpes) donc fouillent la vase, donc remettent en circulation du phosphore piégé dans les sédiments. C'est ainsi que lors de certains blooms, quand il n'y a pas eu de chiens ou de canards, on peut dire : « La semaine précédente (sous entendu du bloom) il y a eu un concours de pêche ». Mais là aussi, on ne tient pas compte de tous les concours de pêche qui ne se sont pas suivis d'une explosion de Cyanobactéries !

Maintenant concernant les hypothèses non vérifiées, il y en a une qui est imparable : il arrive qu'il y ait peu de Cyanobactéries dans un plan d'eau où la quantité de phosphore mesuré est faible, donc situation oligotrophe, donc il est normal d'avoir un faible développement de Cyanobactéries. Problème : dans les jours qui suivent (8 à 10), les Cyanobactéries se multiplient suivant un facteur de 100 à 1000 ! C'est là que l'on fait intervenir la consommation de luxe ! Quand il y avait peu de phosphore dans l'eau, c'est que tout simplement les Cyanobactéries en avaient stocké énormément. Ce qui explique aussi pourquoi elles ont pu se multiplier autant sans avoir à prélever le phosphore dans l'eau, il était déjà dans les cellules. Mais de cela on n'en a aucune preuve ! D'autant plus que si une cellule de Cyanobactérie doit stocker le phosphore nécessaire à la constitution de 1000 autres, la concentration en phosphore doit faire que la matière doit être à l'état de plasma (ce qui s'obtient généralement pour des températures de plusieurs millions de °C dans les étoiles !).

Enfin pour ce qui est des événements admis même contre des faits scientifiques établis, on peut citer rapidement (car déjà évoqué : I B), le phosphore des sédiments qui passe à l'état dissous même en présence d'oxygène. J'ai eu l'occasion de faire cette remarque lors de la présentation d'une étude (réalisée par des universitaires), il m'a été répondu : « Oui c'est vrai, mais on est obligé d'admettre que même quand il y a de l'oxygène, il peut y avoir relargage de phosphore par les sédiments ».

IV COMMENT EN EST-ON ARRIVE LA ?

A) Une dérive amorcée dans les années 80

Au terme de cette publication, la question qui se pose est celle-ci : comment en est-on arrivé là ? Et cela d'autant plus qu'il existait en France, il y a plus de vingt ans plusieurs laboratoires universitaires d'hydrobiologie dont la compétence était reconnue internationalement. Pour avoir travaillé dans un laboratoire d'hydrobiologie (Université Paul Sabatier de Toulouse) dans les années 80, je pense avoir des éléments de réponse. Des appareils de mesure de terrain devenaient de plus en plus disponibles et d'une utilisation facile. On a cru en haut lieu que l'on pouvait remplacer les analyses biologiques par des mesures physico-chimiques. De plus, les analyses biologiques nécessitant davantage de temps sur le terrain et au laboratoire que les analyses physico-chimiques, on pouvait dans un même laps de temps faire plus de points de mesure. Il faut ajouter à cela que c'était aussi l'époque des « systèmes experts ». On pouvait rentrer les mesures dans des tableaux qui étaient traités par un logiciel « expert » et qui sortait des « interprétations », voire des actions préconisées. Sur cette base, on a donc supprimé petit à petit tous les postes naturalistes qui portaient en informatique ou en biochimie (mode de l'époque). Les laboratoires d'hydrobiologie ont disparu peu à peu, ils ont été remplacés par des laboratoires de l'« environnement », avec des chimistes de l'environnement. Les études de terrain sont faites d'un point de vue physico-chimique et non plus d'un point de vue écologique. Des lacunes importantes apparaissent dans les études (dans un bilan, on oublie les sorties de phosphore !). La mémoire des connaissances d'il y a seulement vingt ou trente ans a même disparu.

B) Des conséquences aujourd'hui dans d'autres domaines

Cela a les mêmes conséquences sur d'autres études environnementales. Par exemple, les zones vulnérables aux nitrates. On accuse l'agriculture d'être responsable d'un taux élevé de nitrates dans les eaux naturelles sans réaliser qu'ailleurs, les mêmes pratiques agricoles sur un même sous-sol géologique n'entraînent pas un classement en zone vulnérable. Là aussi, on ne risque pas d'avoir des résultats malgré des plans de lutte, puisqu'on apporte de mauvaises réponses à un vrai problème.

De façon à faire face à toutes les exigences de la loi sur l'eau (2006), avec des dates butoir s'échelonnant de 2015 à 2027, il faudrait recréer de vrais laboratoires d'hydrobiologie avec des naturalistes systématiciens ayant une solide formation en écologie des eaux douces. « Lourde tâche » comme aurait dit le Général De Gaulle.

CONCLUSION

N'étant pas convaincu par le modèle phosphore, j'ai orienté mes propres recherches dans d'autres directions suivant le hasard d'observations fortuites, une démarche naturaliste et écologique exempte d'*a priori*, sans oublier les enseignements de mes maîtres d'université. Pour avoir voulu en discuter avec des scientifiques, je sais par expérience qu'il n'est pas possible pour eux d'envisager une autre hypothèse. Il faudra donc mettre en œuvre une correction du paramètre réellement responsable du phénomène bloom de Cyanobactéries. Seules la force de l'exemple et la réussite permettront une remise en question du dogme actuel. Il s'agit donc bien d'un changement de paradigme.

Une nouvelle publication devrait paraître l'année prochaine démontrant quel est le paramètre qui déclenche le développement important des Cyanobactéries.

Remerciements :

Je tiens à remercier chaleureusement deux collègues du Collège Raymond Loewy de La Souterraine (France) pour leur aide précieuse à l'élaboration de cette publication :

- Yan Rapin, professeur d'anglais pour sa traduction du résumé et des mots clés.
- Nicolas Péricaud, professeur de SVT pour le traitement informatique et graphique de l'ensemble de cette publication.

BIBLIOGRAPHIE

Angelier E., Les sciences de la complexité et le vivant, Lavoisier, 2008.

AQUA GESTION, Etude de l'eutrophisation de la retenue de Courtille, 1997. Bureau d'études, Veyrieras, 87130 Neuvic Entier

Barroin G., La réhabilitation des plans d'eau. La Recherche n° 238, décembre 1991. Volume 22, p 1412 à 1422.

Barroin G., Phosphore, azote, carbone...du facteur limitant au facteur de maîtrise. Le Courrier de l'environnement de l'INRA n°52, septembre 2004.

Laboulle H., Etude du lac du Bourg-d'Hem, 2011. Disponible sur mon blog : hydrasacclab.blogspot.com

Laboulle H., Le lac du Bourg-d'Hem (France, Limousin, Creuse). Fonctionnement dans les conditions normales (hors bloom de Cyanobactéries), 2014. Disponible sur mon blog : hydrasacclab.blogspot.com

Unilim, Etude du phénomène d'eutrophisation de l'étang du Cheix (La Souterraine), Grandpierre Aurélien, 2013

Unilim, Etude des phénomènes d'eutrophisation de l'étang du Cheix (La Souterraine, 23). 2014

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1 : Coupe longitudinale de la Creuse au niveau des trois lacs

Figure 2 : Schéma du modèle d'un plan d'eau

Tableau 1 : Tableau de mesures sur la Creuse au niveau des trois lacs

Tableau 2 : Tableau de mesures sur la Creuse au niveau du Moulin noyé

Tableau 3 : Tableau de l'évolution des caractéristiques d'un plan d'eau avec sa taille

Tableau 4 : Tableau du Rapport de licence Université de Limoges

Tableau 5 : Tableau de la valeur élevée de phosphore Rapport de licence Université de Limoges

Tableau 6 : Tableau de la valeur élevée de phosphore Rapport de l'Université de Limoges

Figure 1 : Coupe longitudinale de la Creuse au niveau des trois lacs

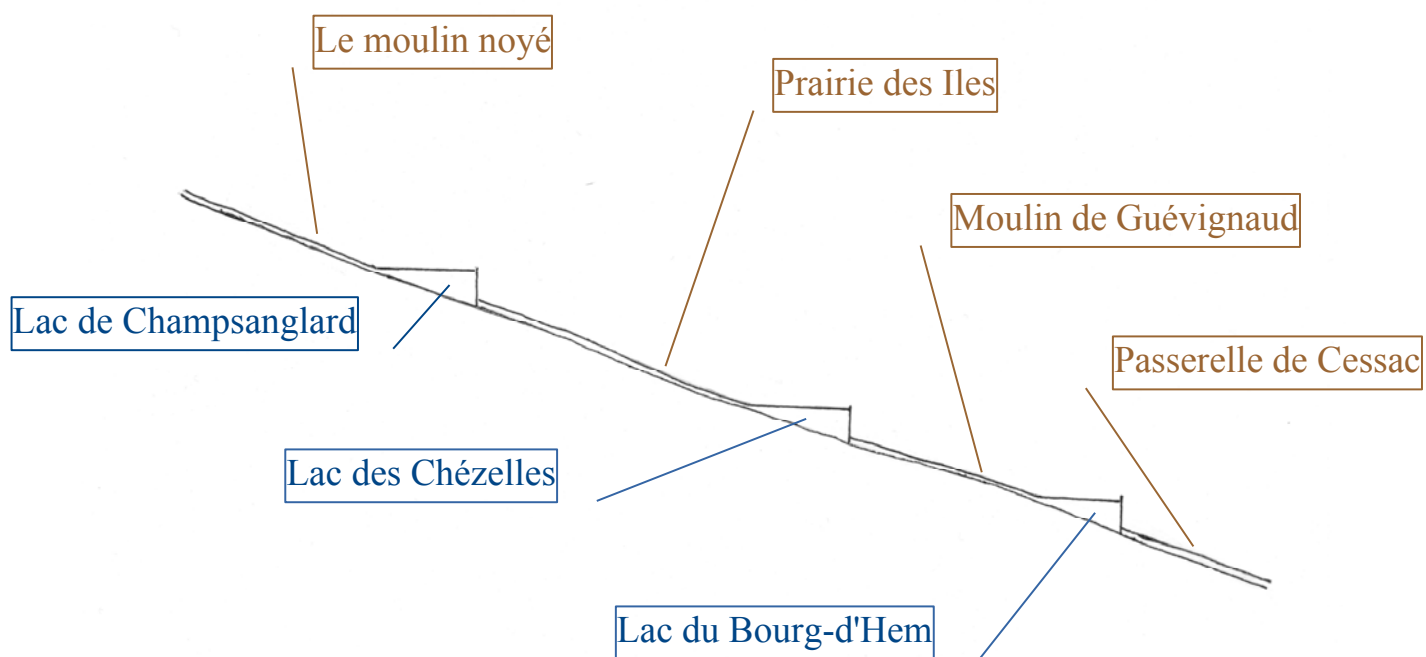


Figure 2 : Schéma du modèle d'un plan d'eau

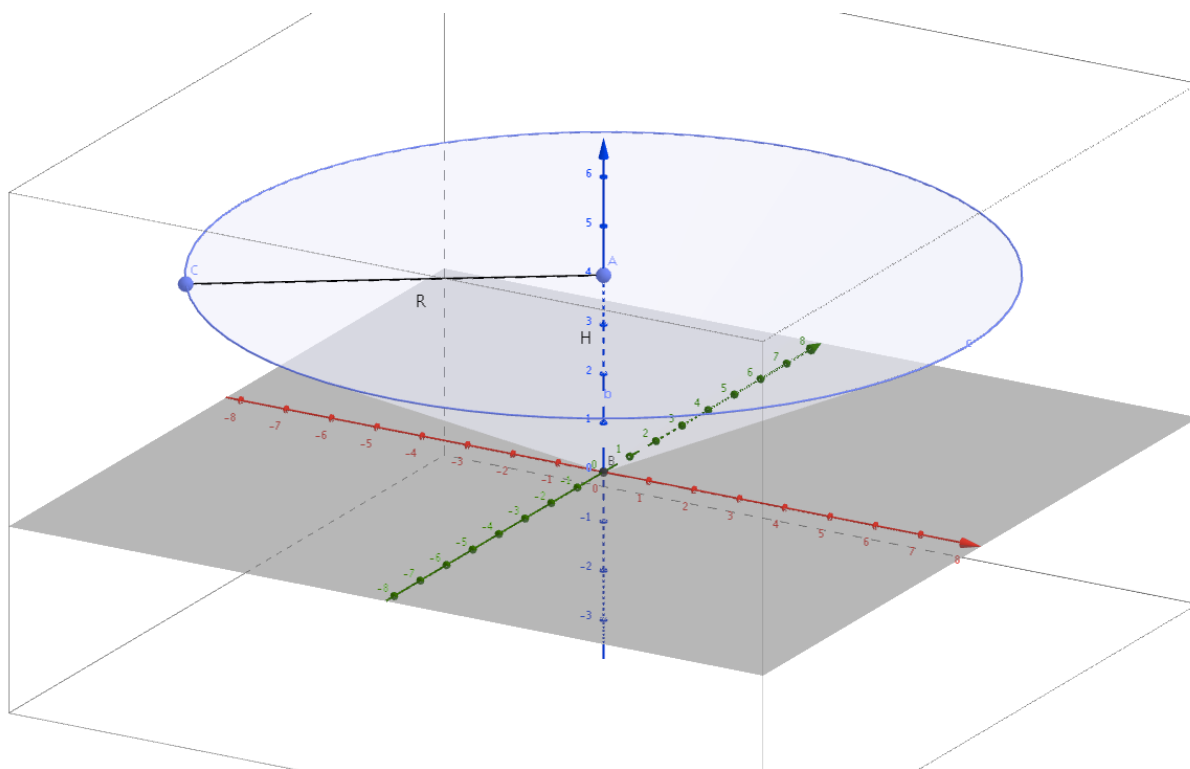


Tableau 1 : Tableau de mesures sur la Creuse au niveau des trois lacs

TABLEAU DE MESURES SUR LA CREUSE AU NIVEAU DES TROIS LACS
(29 JUILLET 2011)

Lieu et heure Paramètre	Moulin noyé 9h25	Champ- sanglard 10h30	Prairie des Iles 11h15	Chézelles 12h35	Moulin Guévignaud 13h45	Bourg- d'Hem 14h05	Passerelle de Cessac 15h20
Transparence (m)	1,00	1,40	0,90	0,60	0,90	1,20	0,90
Température eau (°C)	17,3	20,5	18,2	22,0	20,3	21,1	20,0
Température air (°C)	13,7	16,9	19,2	19,4	22,7	20,9	21,5

Tableau 2 : Tableau de mesures sur la Creuse au niveau du Moulin noyé

TABLEAU DE MESURES DE TEMPERATURE (°C)
AU MOULIN NOYE LE 02 AOUT 2011

Heure Température (°C)	9 H 10	16 H 45
AIR	15,1	26,8
EAU	18,5	22,4

Tableau 3 : Tableau de l'évolution des caractéristiques d'un plan d'eau avec sa taille

TABLEAU DE L'EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES
D'UN PLAN D'EAU AVEC SA TAILLE

Rayon Caractéristiques	0	1	2	5	10	20	50	100	200	500
Périmètre (m)	0	6,28	12,57	31,42	62,83	125,66	314,16	628,32	1256	3140
Surface (m²)	0	3,14	12,57	78,54	314,16	1256,64	7853,98	31415,93	125663,71	785398,16
Volume (m³)	0	0,10	0,84	13,09	104,72	837,76	13089,97	104719,76	837758,04	13089969,4
P/V (m ⁻²)	/	60	15	2,40	0,60	0,150	0,0240	0,0060	0,00150	0,00024

Tableau 4 : Tableau du Rapport de licence Université de Limoges

Tableau 6 - Masses d'éléments nutritifs piégés dans les sédiments

	Valeur basse	Valeur moyenne	Valeur haute
Volume surface		447 m ³	
Volume profondeur	13853 m ³	18553 m ³	21253 m ³
Masse MS surface		143 T	
Masse MS profondeur	8173 T	10946 T	12539 T
Azote surface		787 kg de N	
Azote profondeur	23,7 T de N	31,7 T de N	36,4 T de N
Phosphore surface		134 kg de P	
Phosphore profondeur	3,76 T de P	5,04 T de P	5,8 T de P
Azote (Total)	24,5 T de N	32,5 T de N	37,2 T de N
Phosphore (Total)	3,9 T de P	5,2 T de P	5,9 T de P

D'après ces résultats on relève une quantité très importante d'éléments nutritifs en N et P stockés dans les sédiments. Mais ces totaux moyennés de 32 530 T d'azote et 5170 T de phosphore restent à compléter car ils ont été réalisés avec peu d'échantillons. Mais ils permettent d'identifier un stockage important et évident dans les sédiments. Cette grande quantité de nutriments est l'une des causes du phénomène d'eutrophisation.

Tableau 5 : Tableau de la valeur élevée de phosphore. Rapport de licence, Université de Limoges

Prospection du 15 mai 2013 :

Flacon	Débit L/s	pH	Conductimétrie microS/cm	Temp °C	Turb NTU	O2 mg/L	N- NH4+	N- NO3-	P- PO4	Pt	Nt
D6		6,3	129,0			9,00	0,03	1,10	0,02	0,08	1,24
D7	0,10	6,6	143,0			7,30	0,72	1,90	0,04	0,25	2,04
D11	2,30	7,1	151,0	17,00		7,10	0,02	6,60	0,07	0,09	7,09
M centre		9,3	123,0	25,00		9,44	0,04	1,10	0,01	0,04	2,50
M Queue				24,50			0,12	1,50	0,01	0,11	1,78
plage				25,00			1,18	1,20	0,11	0,30	2,60
Sortie				25,00			0,13	1,10	0,02	0,05	2,36
Totaux	2,400										
Moy			136,50	23,30	#DIV/0!	8,21	0,32	2,07	0,04	0,13	2,80
Max			0,00	25,00	0,00	9,44	1,18	6,60	0,11	0,30	7,09
Min			123,00	17,00	0,00	7,10	0,02	1,10	0,01	0,04	1,24

Tableau 6 : Tableau de la valeur élevée de phosphore. Rapport de l'Université de Limoges

Résultats de la campagne 6 (23 juillet 2013)

Lieu de prélèvement	Débit (L/s)	pH	Conductimétrie (µS/cm)	Température (°C)	Turbidité (NTU)	O2 dissous (mg/L)	N-NH4+ (mgN/L)	N-NO3- (mgN/L)	P-PO4 (mgP/L)	Pt (mgP/L)	Nt (mgN/L)
D11	2,3	7,1	151	17		7,1	0,02	6,6	0,07	0,09	7,09
M							0,1	1,2	0,11	0,3	2,6