Université de Montréal

PHY 2100 – Physique environnementale

# Eutrophisation

par :
Juliette Champagne (20208757)

Date de remise : 5 mai 2024

# 1 L'eutrophisation

« L'eutrophisation est un processus naturel résultant de l'accumulation [abondante] de nutriments dans un lac ou tout autre plan d'eau » [9]. Ce phénomène engendre la croissance démesurée de populations d'algues et de plantes à la surface, ce qui entraîne la dégradation de la qualité de l'eau de ces écosystèmes aquatiques. Les nutriments responsables de l'eutrophisation sont principalement composés d'azote et de phosphore. Bien qu'il s'agisse d'un processus naturel et qu'il s'étendait sur des centaines d'années auparavant, il est désormais accéléré et exacerbé par l'anthroposhère. En effet, l'agriculture et la pollution des sols sont deux causes majeures de l'eutrophisation [1].

FIGURE 1 – Croissance excessive d'algues nocives dans le lac Milford (Kansas, États-Unis) [9]

## 1.1 Nutriments et activité humaine

Les nutriments sont des éléments et molécules chimiques nécessaires à la croissance et au développement des êtres vivants. Dans la biosphère, le transport et les échanges de nutriments se font sous forme de cycles. Deux des plus importants cycles biogéochimiques sont ceux de l'azote et du phosphore. Ces derniers sont élaborés plus en détail dans la section sur les terres humides. La présente section s'attarde uniquement à certains produits de ces cycles. En effet, on retrouve principalement dans les plans d'eau naturels l'azote sous forme d'ammoniac ($NH_3$), d'ammonium ($NH_4^+$), de nitrite ($NO_2^-$) ainsi que de nitrate ($NH_3^-$), et le phosphore sous forme de phosphate ($PO_4^{3-}$). Les composés azotés sont solubles dans l'eau, ils sont donc transportés par les eaux souterraines et les rivières. En ce qui à trait au phosphate, ce dernier est moins soluble que les composés azotés et ils tendent à se lier aux particules du sol. L'érosion des sols est donc un facteur important du transport du phosphore à travers un écosystème [9]. C'est d'ailleurs de cette manière que le phosphate se retrouve dans les plans d'eau.

Bien que les nutriments et leur transport soient essentiels à la santé d'un écosystème, un apport trop important peut aussi être responsable de sa destruction. Effectivement, cela peut favoriser la croissance de certaines populations indésirables entraînant ainsi un déséquilibre complet. Malheureusement, depuis le début du 20$^e$ siècle, la production alimentaire est dépendante de l'utilisation abusive d'engrais. Ces derniers, riches en azote et en phosphore, sont accumulés dans les sols et les eaux souterraines pour ensuite

être acheminés vers les plan d'eau [1]. De plus, « les résidus des cultures en décomposition et les déchets agricoles, comme les eaux usées [qui contiennent une quantité importante de nutriments]» contribuent aussi à cette accumulation démesurée [4]. On sait aussi que le ruissellement des terres agricoles entraîne le transport de la nourriture pour animaux enrichie d'azote et de phosphore ainsi que les excréments animaux vers les plans d'eau [1]. Les conséquences de cette concentration de polluant dans l'eau sont décrites ci-bas.

## 1.2 Processus d'eutrophisation

Le processus d'eutrophisation peut être résumé en six étapes. Premièrement, il y a une accumulation marquée de molécules composées principalement d'azote et de phosphore. Deuxièmement, cette accumulation engendre la croissance de populations d'algues comme le phytoplancton et de plantes aquatiques qui utilisent ces nutriments pour se reproduire. L'augmentation exponentielle de ces populations diminue la limpidité de l'eau. Puis, plus le plan d'eau est trouble, moins de lumière réussi à pénétrer et atteindre les plantes au fonds. À partir de ce moment, la photosynthèse ne se fait qu'à la surface. Quatrièmement, la mort inévitable de cette couverture végétale entraîne un dépôt massif de matière organique au fonds du plan d'eau qui est ensuite décomposé, ce qui relâche une quantité importante de $CO_2$ dans l'eau. D'ailleurs, lors de ce processus, les décomposeurs utilisent l'oxygène dissous présent, ce qui cause un épuisement des concentrations de cet élément. Le système est alors en état d'hypoxie. Finalement, ce manque d'oxygène dissout entraîne une variation de la biodiversité selon les besoins en $O_2$ de chaque espèce. Cependant, de manière générale, on observe une diminution accrue de la biomasse [7].

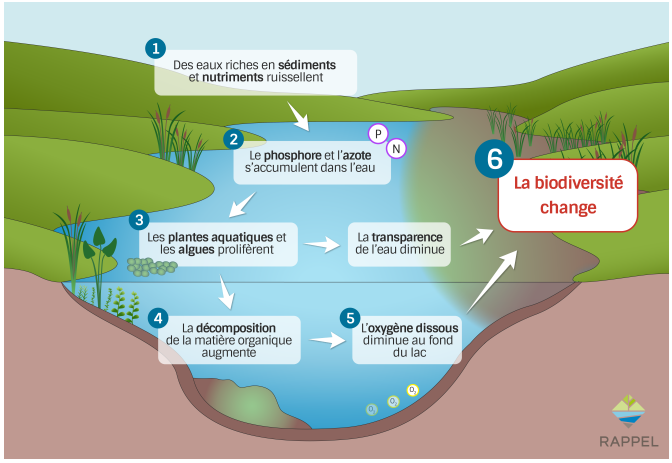


FIGURE 2 – Schéma du processus d'eutrophisation [8]

On catégorise l'évolution de ce processus par des niveaux trophiques associés à des valeurs de référence de concentration de phosphore et d'azote (nitrite et nitrate) dans chaque milieu. Ces différentes catégories sont élaborées dans le tableau ci-dessous.

| Niveau trophique | [P] (mg/L) | [$NO_3$ + $NO_2$] (mg/L) |
|---|---|---|
| Ultra-oligotrophe | $< 0.004$ | $\leq 0.1$ |
| Oligotrophe | 0.004-0.010 | 0.1-0.2 |
| Mésotrophe | 0.010-0.020 | 0.2-0.4 |
| Méso-eutrophe | 0.020-0.035 | 0.4-0.8 |
| Eutrophe | 0.035-0.100 | 0.8-1.6 |
| Hyper-eutrophe | $> 0.100$ | $\geq 1.6$ |

TABLE 1 – Niveaux trophiques basés sur la concentration totale de phosphore [3]

On remarque au tableau 1 que le niveau trophique considéré comme *eutrophe*, soit le sujet de cette section, catégorise une vaste plage de concentrations de phosphore et de composés azotés. De plus, on y voit qu'un

écosystème est pauvre en nutriments s'il possède une concentration de phosphore inférieure à 0.004 mg/L, et d'azote inférieure ou égale à 0.01 mg/L.

### 1.3 Modèle RSPF simplifié

On cherche à modéliser l'évolution d'un milieu oligotrophe vers un milieu eutrophe. Pour ce faire, on peut représenter ce processus à l'aide d'un modèle RSPF (Réservoir - source - puits - flux) tel que le montre la figure ci-dessous. On pose ici que le système étudié est un lac peu profond dont la température interne est constante.

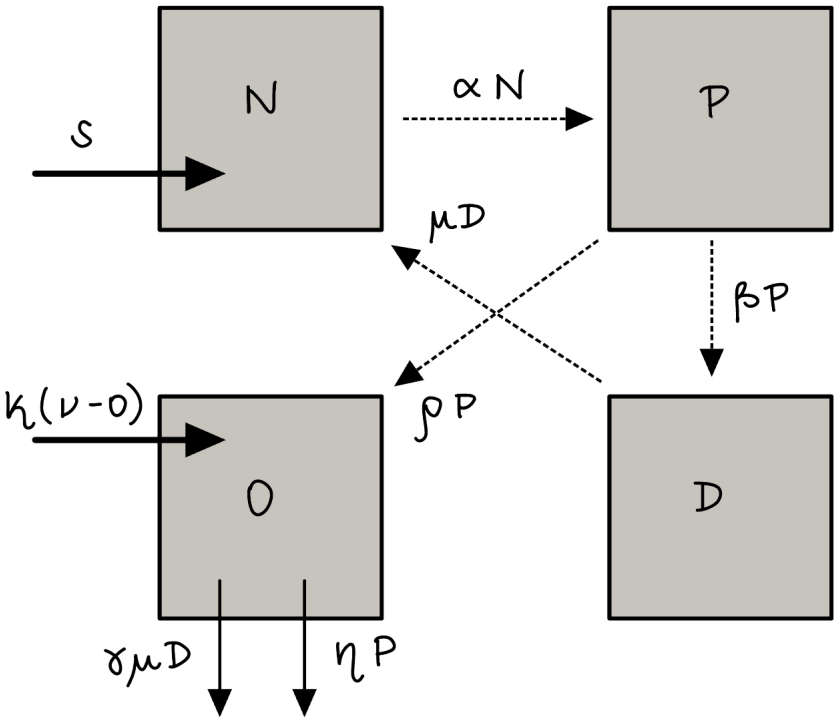


FIGURE 3 – Schéma simplifié du processus d'eutrophisation en représentation RSPF (basé sur [10])

Sur la figure 3, on remarque que ce processus peut être simplifié par un choix de quatre réservoirs, c'est-à-dire un réservoir pour les nutriments (N), un autre pour le phytoplancton (P), un pour les déchets (D) et un dernier pour l'oxygène (O). Ainsi, ce modèle ne prend en compte qu'un seul réservoir pour les nutriments, et ce même si plusieurs composés contribuent à l'eutrophisation d'un plan d'eau. On prend donc la moyenne des valeurs pour le phosphate et les composés azotés présentées au tableau 1 pour chaque niveau trophique. Comme le nitrate et le nitrite sont présents en plus grandes quantités, c'est l'azote qui influence le plus la concentration de nutriments. Comme mentionné plus haut, la prolifération des plantes aquatiques en surface contribue à l'eutrophisation. Afin de simplifier les calculs, on pose que seule la croissance d'une population de phytoplancton résulte de l'accumulation de nutriments dans le lac. Bien qu'il s'agisse d'un groupe extrêmement varié - car le mot *phytoplancton* fait référence à des milliers d'espèces distinctes - on assume que cette population est uniforme. De plus, le terme *déchets* fait référence au phytoplancton mort et décomposé. Ce réservoir permet de quantifier la pollution du système. Finalement le réservoir d'oxygène comprend l'oxygène dissout (DO) dans l'eau du lac. Ceci est nécessaire à l'étude de l'eutrophisation puisque le niveau de DO est directement proportionnel à la biodiversité de l'écosystème. En effet, les espèces aquatiques comme les poissons et les crustacés ont besoin d'oxygène afin d'effectuer

la respiration cellulaire (qui est essentielle à leur survie).

De la figure 3, on peut déduire les quatres équations différentielles suivantes.

$$\frac{dN}{dt} = S - \alpha N + \mu D \tag{1}$$

$$\frac{dP}{dt} = \alpha N - \beta P \tag{2}$$

$$\frac{dD}{dt} = \beta P - \mu D \tag{3}$$

$$\frac{dO}{dt} = \kappa(\nu - O) + \rho P - \eta P - \gamma \mu D \tag{4}$$

Dans l'équation 1, $S$ représente un apport constant en nutriments par jour, $\alpha$ représente le taux de croissance de la population d'algues. On pose ici que la concentration d'algue produite par jour est proportionnelle à la quantité de nutriments disponible. De plus, $\mu$ est le taux de décomposition de détritus. Dans l'équation 2, $\beta$ correspond au taux de mortalité du phytoplancton. Ainsi, $\beta P$ est la concentration de phytoplancton qui meurt chaque jour. Enfin, dans l'équation 4, $\kappa$ est le coefficient de réoxygénation, $\nu$ est la saturation d'oxygène dissout dans le lac, $rho$ est le taux d'oxygène produit lors de la photosynthèse et $\eta$ est le taux d'oxygène consommé par la respiration cellulaire. Ici, on pose que le terme $\eta P$ représente l'oxygène consommé par tous les organismes vivants. Il s'agit donc d'un puits, d'où la flèche sortante dans la figure 3. Également, le terme $\kappa(\nu - O)$ correspond à la quantité d'oxygène dissout dans l'eau provenant du cycle de l'eau. La constante $\gamma$ dans l'équation 4 représente le coefficient de demande d'oxygène lors de la décomposition. Le terme $\gamma \mu D$ correspond donc à la quantité d'oxygène utilisé lors de la décomposition. Il s'agit aussi d'un puits.

Il est important de mentionner brièvement tout ce qui est négligé, assumé ou omis volontairement dans ce modèle. Premièrement, comme mentionné plus haut, l'équation 1 ne considère qu'une source de nutriments constante dans le temps. Elle ne prend donc pas en compte les variations annuelles dues, entre autres, aux cycles de culture. Pour avoir un portrait plus réaliste, il faudrait modéliser le transport des contaminants. Ceci est plutôt ardu lorsque l'on considère tous les types de nutriments responsables de l'eutrophisation. De plus, on assume que la croissance de la population de phytoplancton ne dépend que de la concentration de nutriments. Or, la concentration de phytoplancton dépend aussi de la température ainsi que de l'intensité lumineuse reçue. Il y a donc une relation avec la profondeur du milieu. L'équation 3, quant à elle, assume que la quantité de détritus ne comprend que le phytoplancton mort et que la matière est décomposée entièrement en nutriments. Cependant, sachant qu'une perte de la biodiversité (autre que le phytoplancton) est inévitable lorsque le processus d'eutrophisation est enclenché, il est impossible d'obtenir réellement l'évolution de la concentration de *déchets* dans le lac. Enfin, dans l'équation 4, on pose que seul le phytoplancton fait la photosynthèse et est alors le seul producteur d'oxygène dissout dans l'eau (d'où le terme $\rho P$). Également, comme mentionné plus haut, on assume que la concentration d'$O_2$ consommé par la respiration cellulaire est représenté par le terme $\eta P$. Le phytoplancton n'est pas le seul organisme à consommer de l'oxygène. Ainsi, cette équation ne représente pas exactement de manière fidèle le début de la situation.

Il est possible de regarder l'évolution temporelle des quatre réservoirs détailliés ci-haut. D'après le tableau 1, une concentration de phosphore de 0.004 mg/L ainsi qu'une concentration de composés azotés de 0.1 mg/L représentent un choix judicieux de conditions initales. Ces dernières correspondant aux

caractéristiques d'un milieu oligotrophe, c'est-à-dire non (ou très peu) perturbé par le processus d'eutrophisation. On tente donc de voir comment l'augmentation marquée de nutriments affecte la concentration de phytoplancton, celle de détritus et celle d'oxygène dissout. De plus, le choix chaque constante est détaillé dans le tableau ci-dessous.

| Constante | Valeur (jour$^{-1}$) |
|---|---|
| S | 0.03 mg/L |
| $\alpha$ | 1 |
| $\beta$ | 0.5 |
| $\mu$ | 0.37 mg/L [2] |
| $\kappa$ | 0.17 [10] |
| $\nu$ | 10 mg/L [10] |
| $\rho$ | 3.1 mg/ L * |
| $\eta$ | 4.32 mg/L * |
| $\gamma$ | 4 mg/L |

Table 2 – Valeurs des différentes constantes du modèle

La source de nutriments (S) est une valeur choisie de manière arbitraire selon l'ordre de grandeur des autres constantes. Les valeurs de $\alpha$ et de $\beta$ ont été choisies d'après une étude datant de 2002 selon laquelle le taux de croissance d'une population de phytoplancton se trouve entre 0.38 et 0.70 jour$^{-1}$, alors que son taux de mortalité se situe entre 0.15 et 0.88 jour$^{-1}$ [6]. En calculant les moyennes de chaque intervalle, on obtient les valeurs telles que représentées au tableau 2. Sachant que la demande biochimique d'oxygène est entre 2 to 8 mg/L pour une rivière moyennement polluée, on pose une telle valeur de $\gamma$ pour un lac plutôt pollué [5].

* Je suis malheureusement incapable de retrouver la source d'où viennent ces valeurs.

À partir des équations 1 à 4 et des constantes du tableau 2, il est possible d'obtenir les figures 4 et 5 ci-dessous.

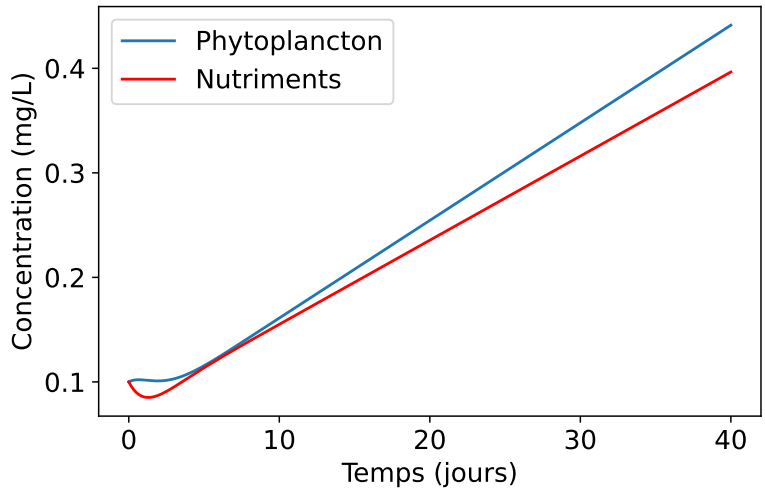


Figure 4 – Évolution des concentrations de phytoplancton et de nutriments dans le temps

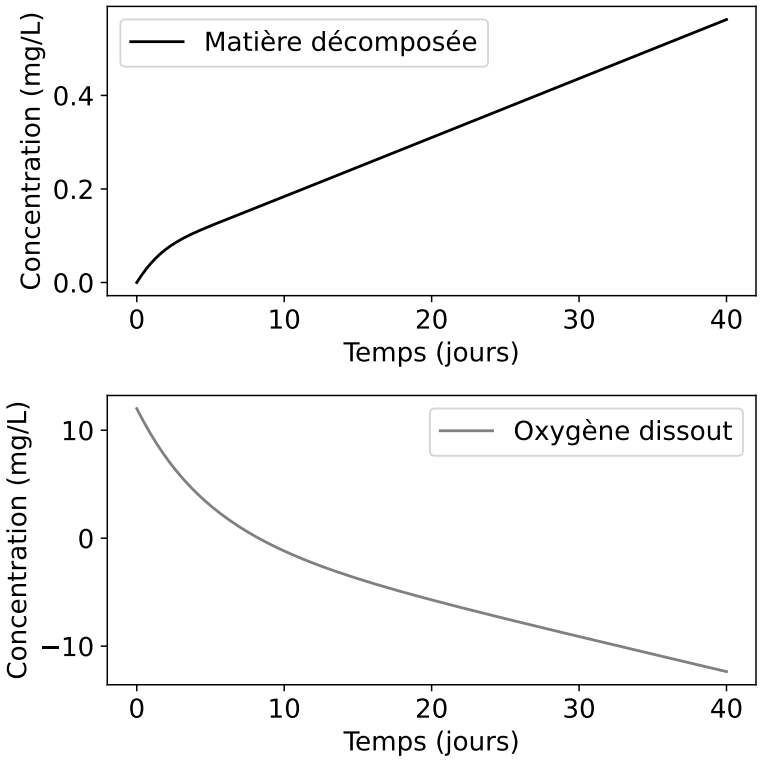


FIGURE 5 – Évolutions des concentrations

Je ne suis pas certaine des figures présentées. Je crois que mon modèle n'est pas optimal et nécessairement trop simplifié pour représenté entièrement le processus d'eutrophisation.

### 1.4 Idées pour peaufiner cette section

- Refaire les figures ;
- Trouver le temps caractéristique du processus d'eutrophisation ;
- Calculer la perte de biomasse engendrée par la diminution d'oxygène et trouver le point où le système passe à l'état d'hypoxie.

## Références


[1] Akinnawo, S.O. Eutrophication : Causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies. *Environmental Challenges*. **2023**, *12*, 100733. DOI : https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100733

[2] Chen, W. et Wangersky, P. J. Rates of microbial degradation of dissolved organic carbon from phytoplankton cultures. *Journal of Plankton Research*. **1996**, *18 (9)*, 1521–1533. https://doi.org/10.1093/plankt/18.9.1521

[3] Environnement Canada. Water Quality Status and Trends of Nutrients in Major Drainage Areas of Canada : Technical Summary. Consulté le 25 mars 2024 : https://publications.gc.ca/collections/collection_2011/ec/En154-63-2011-eng.pdf

[4] Gouvernement du Canada. Agriculture et la qualité de l'eau. Consulté le 1 mai 2024 : https://agriculture.canada.ca/fr/environnement/gestion-ressources/gestion-durable-leau/agriculture-qualite-leau#a3

[5] Li, D. et Liu, S. (**2019**). *Water Quality Monitoring and Management : Chapter 7 - Detection of River Water Quality*. Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811330-1.00007-7

[6] Obayachi, Y. et Tanoue, E. Growth and mortality of phytoplankton in the northwestern North Pacific estimated by the dilution method and HPLC pigment analysis. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. **2002**, *280 (1-2)*, 33-52. https://doi.org/10.1016/S0022-0981(02)00365-9

[7] OBVAJ. *L'eutrophisation*. Consulté le mai 2024 : https://obvaj.org/citoyens/les-bonnes-pratiques/eutrophisation/

[8] RAPPEL. *Qu'est-ce que l'Eutrophisation ?*. Consulté le mai 2024 : https://rappel.qc.ca/fiches-informatives/eutrophisation/

[9] U.S. Geological Survey (USGS). *Nutrients and Eutrophication*. Consulté le 25 mars 2024 : https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/nutrients-and-eutrophication

[10] Voinov, A. A. et Svirezhev, Y. M. A minimal model of eutrophication in freshwater ecosystems *Ecological Modelling*. **1984**, *23*, 277-292. https://doi.org/10.1016/0304-3800(84)90125-X