



Le modèle exponentiel, un outil puissant permettant de tracer l'empreinte CO₂ et O₂ durant la photosynthèse à l'échelle temporelle à contrôler

RAKOTOMENA Solofonandrasana Andry Tiana¹, JAOZARA Mario Andi²,
Dr RAKOTOARIVELO Miora Malalaniaina³, Pr. RAFANOMEZANTSOA Roger Marie⁴.

1 Enseignant Chercheur à Université de Toamasina

2 Doctorant à l'Université d'Antananarivo

3 Directeur de l'Institut Supérieur de Technologie d'Ambositra

4 Professeur Titulaire à l'Université de Fianarantsoa.

Résumé: Cet ouvrage fait l'objet de l'amélioration continue de l'article intitulé « modélisation du phénomène aérobiose et de la photosynthèse », dont la première partie décrit l'aspect biologiquement parlant en vue de maîtriser le métabolisme de l'assimilation chlorophyllienne des plantes vertes en interaction avec différents facteurs limitants (*pH*, *Température* et *Turbidité*). La deuxième partie évoque l'aspect algébrique appliqué sur les composantes biologiques imitant le comportement naturel de l'empreinte CO₂ et O₂ en interaction avec les milieux récepteurs. La troisième partie se bascule sur l'analyse économétrique appliquée au métabolisme de l'écologie à l'échelle temporelle contrôlée dont la perspective d'avenir est de fournir une approche permettant de simuler les conditions réelles.

Mots clés: Modèle, numérique, exponentiel, empreinte, métabolisme, CO₂, O₂, photosynthèse, écosystème, aquatique, interaction, offre, demande.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.22207647>

1 Introduction

L'étude de la traçabilité des empreintes carbone et oxygène en interaction dans l'écosystème aquatique, présente une certaine complexité, notamment en ce qui concerne sa variation due aux facteurs limitants dans l'espace temporelle donnée (Burggren, 1979). Sur ce, nous avons proposé un modèle exponentiel après avoir publié le premier article concernant la modélisation du phénomène aérobie et de la photosynthèse (Rakotomena, 2025), afin d'améliorer le calcul avec une grandeur positive et évolutive qui est multipliée par le facteur (Concentration de l'Empreinte CO₂ et O₂, *pH* et *Turbidité*) qui ne dépend que du temps quelconque « *t* » (Burggren, 1979).

Ceci soulève la question: Comment ce modèle pourrait-il influencer le métabolisme de la photosynthèse? Pour mieux comprendre cet ouvrage, nous aborderons l'aspect biologique dans la première partie (Den Hertog Je et al, 1998). En rappelant le cadre théorique qui sous-tend les modèles mathématiques envisagés. Ensuite, dans la deuxième partie, nous détaillons les aspects algébriques appliqués (Sauzet, Hausberger, 2019). Enfin, discutons des points forts et la limite de ce modèle exponentiel par rapport à l'écosystème naturel (Hussner et al, 2019). Ce qui permet d'améliorer le modèle mathématique actuel afin d'évoquer un autre modèle plus proche de la réalité.

2 Méthodologie

Comment le modèle exponentiel influence-t-il la photosynthèse, et que pouvons-nous en déduire quant à l'évolution de la théorie ?

Afin de mieux répondre à cette question, les étapes suivantes ont été prises en compte :

Création de modèle correspondant à l'écosystème réel, permettant de gérer l'information en grande quantité en utilisant le calcul d'intégral courant durant la simulation. Ceci utilise une relation mathématique, des représentations graphiques des diagrammes correspondants aux différentes variables en interaction (Sauzet et Hausberger, 2019).

Paramétrage des fonctions en notant les paramètres physicochimiques (quantité « Q » des gaz émis ou absorbés, température « θ » de l'eau, la Turbidité « TU » et le « pH » du milieu récepteur, afin de déterminer la traçabilité du dynamisme de l'échange entre deux empreintes (O_2 et CO_2) en interaction (Portielje et Van Donk, 1997).

Analyse des résultats en compilant en premier lieu ; les données requises sous forme de tableaux extraits des littératures et ouvrages (extrapolation de plusieurs publications). Puis, Interprétations des phénomènes naturels à travers des courbes issues des tableaux de variations décrivant leurs évolutions respectives selon chaque situation donnée.

3 Cadrage théorique de l'étude

Il s'agit d'imiter les comportements des paramètres physicochimiques entrants en interaction avec la photosynthèse de biomasse au niveau du milieu aquatique, afin d'évoquer le meilleur modèle compatible, décrivant des conditions favorables au métabolisme respiratoire des poissons, tandis que la condition nocturne peut entraîner une carence en oxygène disponible.

3.1 La Variation du pH de l'eau sous l'influence de la photosynthèse :

Vu que la photosynthèse des végétaux aquatiques consomme le CO_2 dissous comme nutriment; Vu la diminution du CO_2 entraînant le déséquilibre carbonate-bicarbonate, réduisant la concentration en ions H^+ et provoquant une augmentation du pH au niveau de l'écosystème aquatique, la photosynthèse influence le pH du milieu en modifiant la concentration de CO_2 dissous dont l'amplitude dépend fortement de la productivité biologique, de l'alcalinité de l'eau ou de la contamination par des polluants (Reynolds, 2006). Plus précisément, les plantes chlorophylliennes aquatiques contribuent à la variation du pH du milieu aquatique en consommant ou dégageant le CO_2 (Maberly, 1996).

Du côté réaction chimique, la diminution du CO_2 pendant la nuit réduit la concentration en ions H^+ qui est le responsable de la diminution du pH (vers l'acidité) du milieu affecté. À l'inverse, le jour, la respiration domine, du CO_2 est absorbé et le pH augmente (tendance vers alcalinité) (Hussner et al, 2015):

Le CO₂ dissous réagit avec l'eau: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$

L'acide carbonique se dissocie: $\text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$

L'ion bicarbonate aussi: $\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+$

3.1.1 Gammes indicatives

Ecologiquement, on a adopté le tableau suivant afin d'évoquer des gammes indicatives dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1. Variation du pH du milieu en fonction de l'état de la photosynthèse

Situation	pH typique
Eau peu influencée par la photosynthèse	6,5 à 8,0
Photosynthèse modérée	8,0 à 8,5
Photosynthèse intense (journée ensoleillée, forte biomasse végétale)	8,5 à 9,5
Cas extrêmes (eutrophisation, prolifération d'algues)	9,5 à 10,5 voire plus

Source : Saarikoski J, Viluksela M (1981). « Influence of pH on the toxicity of substituted phenols to fish ». Archives of Environmental Contamination and Toxicology 10: 747-753.

3.2 La Variation de la Température de l'eau sous l'influence de la biomasse:

La présence de biomasse dans un milieu aquatique peut influencer la variation de la température en perturbant l'absorption du rayonnement solaire par l'ombrage. Ce qui dérange les transferts thermiques de l'ordre de quelques degrés Celsius à travers des cellules photosynthétiques affectées. D'où le paramètre température joue un rôle de contrôleur de l'assimilation chlorophyllienne des plantes vertes aquatiques (Niyogi et al, 1999).

Tableau 2. Variation de la Température en fonction de l'état du milieu aquatique.

Etat d'activité photosynthétique	Température (°C)
Faible croissance pour la biomasse	< 15°C
Optimale pour l'assimilation chlorophyllienne des nombreuses plantes vertes	15-25°C
Optimale pour l'assimilation chlorophyllienne des plantes vertes tropicaux	25-35°C
Stresse thermique important et inhibition possible de la biomasse	>40°C

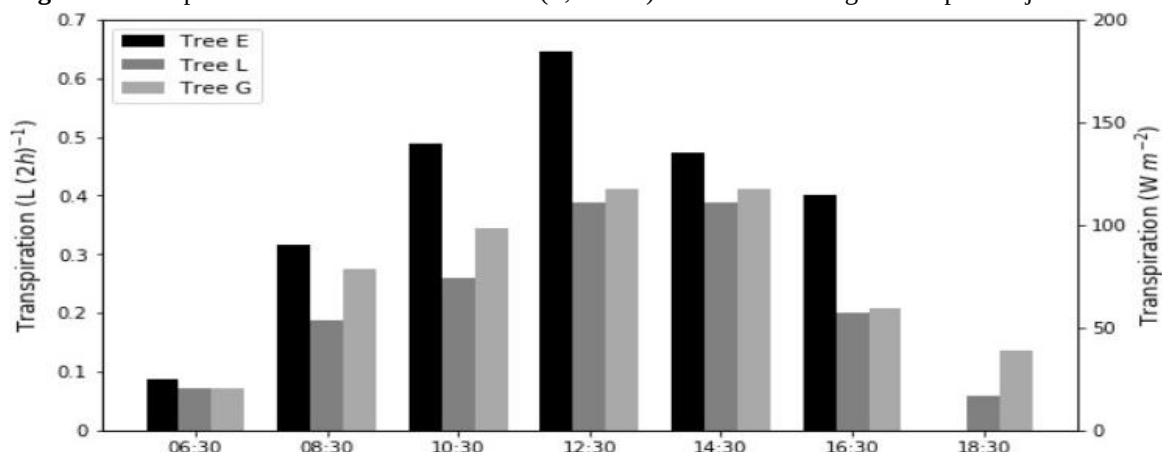
Source: Kalff (2002). « Limnology: Inland Water Ecosystems ». 324-333-335.

La température étant un facteur contrôlant la photosynthèse, contrairement au pH ou à l'oxygène dissous qui sont directement influencés par l'activité photosynthétique.

3.3 Influence de l'intensité lumineuse sur la transpiration:

La lumière naturelle (lumière blanche générée par l'Incandescence Naturelle) venant du soleil est considérée comme étant la meilleure source qui influe sur l'intensité de la photosynthèse. Cette affirmation est approuvée par certaines littératures, notamment sur la présence des extremums (PIC aux alentours de midi) lors de la réalisation expérimentale menée par (Zhang et al. 2022), décrivant la corrélation existant entre le Rayon Photosynthétique Actif et la transpiration des chez les plantes chlorophylliennes (Zhang et al. 2022).

A cet effet, la mesure de la photosynthèse doit s'effectuer pendant 12 heures chrono sans interruption afin d'obtenir des données cohérentes sur ce processus. A titre d'annotation, la densité de *flux radiant* ou *irradiance* se mesure en watt (W) m⁻².

Figure 1. Transpiration des trois arbres centraux (E, L et G) de la modalité végétalisée pour la journée ensoleillée.

Source : Souleymane MBALLO, 2022. « Quantification et modélisation des services climatiques rendus par les arbres dans une rue canyon ». Thèse, UP Environnement physique de la plante horticole (EPHOR). N° D-97_2022-4, 327p.

La figure 01 ci-dessus visualise l'influence directe de l'intensité lumineuse sur la transpiration au niveau des trois différents arbres mis en évidence. Sur ce, les PICs maximaux journaliers se coïncident aux alentours de 12h30 (midi).

3.4 La Variation de la Turbidité de l'eau sous l'influence de la photosynthèse:

Vu que certaines plantes chlorophylliennes aquatiques peuvent réduire la Turbidité en limitant la remise en suspension des sédiments et en entrant en compétition avec le phytoplancton en termes de nutriment, des gammes de valeur de turbidité ont établi dans le tableau suivant (Carpenter & Lodge, 1986; Scheffer, 1998).

Tableau 3. Variation de la Turbidité en fonction de l'état du milieu aquatique.

Etat du milieu aquatique	Turbidité (NTU)
Faible croissance pour la biomasse	< 15°C
Optimale pour l'assimilation chlorophyllienne des nombreuses plantes vertes	15-25°C
Optimale pour l'assimilation chlorophyllienne des plantes vertes tropicaux	25-35°C
Stresse thermique important et inhibition possible de la biomasse	>40°C

Source: Yufei Zhao, Photocatalytic water splitting for large-scale solar-to-chemical energy conversion and storage, Frontiers in Science, 03 December 2024, Volume 2, DOI: 10.3389/fsci.2024.1411644, 18 Pages.

La biomasse réduit la turbidité et soutient la photosynthèse. Son absence sur le milieu aquatique peut déclencher une transition vers un état turbide, moins stable et plus sensible aux perturbations. La turbidité est donc effet causal de la dynamique végétation-eau-sédiment (Portielje et Van Donk, 1997).

4 Résultats

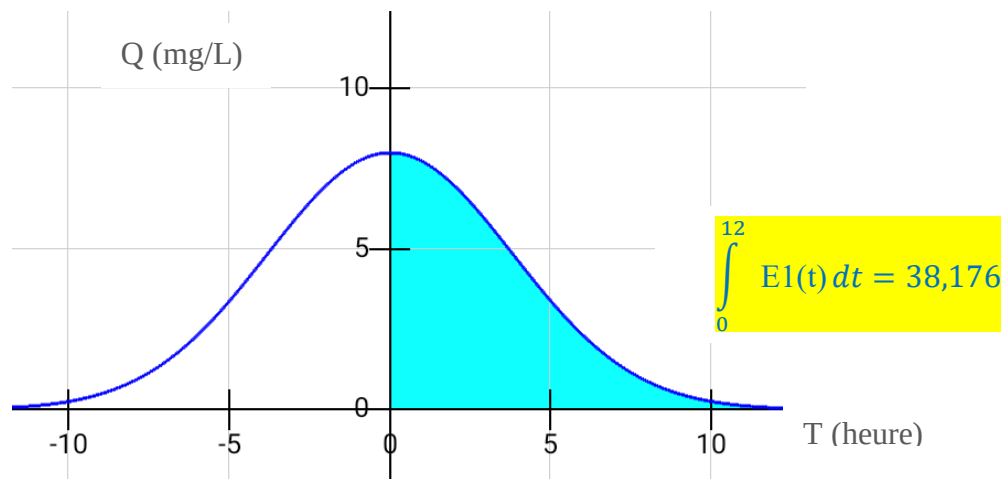
4.1 Numérisation du bilan en « CO₂ » du milieu en interaction avec les paramètres physicochimiques référentiels durant la photosynthèse

Pour y mieux analyser, nous avons simulé un modèle algébrique imitant le phénomène de la photosynthèse, soit $E(t) = Q e^{-\frac{TU}{\theta + pH} t^2}$, de type exponentielle rassemblant à la courbe de Gausse, permettant de déterminer plus précisément la variation de la quantité des gaz (CO₂) en interaction avec le phénomène de photosynthèse chez les plantes aquatiques chlorophylliennes (Jeppesen et al, 1997).

D'où pour tout Q, θ, Tu, pH positifs, on peut en déduire que la fonction $E(t)$ est une demande en CO₂ de l'assimilation chlorophyllienne avec pH égale au potentiel d'hydrogène et TU désignes la turbidité du milieu aquatique (Portielje et Van Donk, 1997).

Pour tout $Q \geq 0$ et $t \geq 0$, soit $E_1(t) = Q e^{-\frac{TU}{\theta + pH} t^2}$, avec les valeurs référentielles minimales favorables à la photosynthèse telles que $\theta = 25^\circ\text{C}$, $Q = 8\text{mg/L}$, $pH = 7$ et $TU > 1\text{ NTU}$.

Figure 2. Fin du cycle du dégagement de CO₂ par l'assimilation chlorophyllienne pour $E_1(t)$.



En utilisant $E_1(t)$ comme fonction de la demande au niveau du milieu récepteur, on peut calculer la proportion de la quantité « Q » du CO₂ au niveau d'une plante verte en fonction de temps « T ». D'où avec ce modèle, on peut simuler dans l'espace-temps, l'évolution de la photosynthèse d'une biomasse pendant 24 heures sous une température variable entre 10°C à 34°C (Hussner et al, 2016).

Tableau 4. Variation de la concentration massique en fonction du temps.

t (heure)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$E_1(t)$ (mg/L)	8	7,730	6,972	5,871	4,615	3,387	2,321	1,484	0,886	0,494	0,257	0,125	0,057

Source: Extrait de l'analyse de la fonction $E_1(t)$.

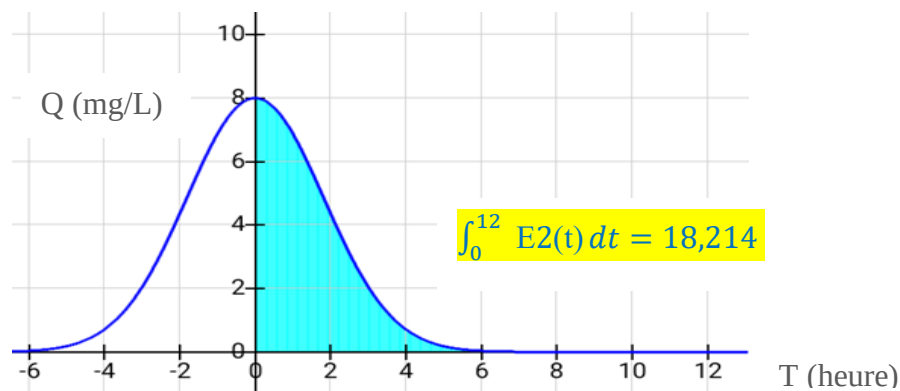
4.2 Démontrons que le modèle $E_2(t)$ répond à la simulation de la demande en CO_2 d'une plante chlorophyllienne en appliquant la photosynthèse modérée:

Pour tout Q , T , pH et TU positifs, on peut s'inspirer sur le modèle exponentiel dont la base s'étale de -12 à 12 sur l'axe des abscisses ; avec un pic maximal (variable) de 8 (sur l'axe des ordonnées).

Le paramètre Q indique la quantité optimale de 8mg/L pour l'empreinte CO_2 émit par la plante chlorophyllienne et ou demandée par les poissons. Le paramètre « Θ » indique la température ambiante de l'eau qui varie entre 10 à 34°C ($10^\circ C \leq \Theta \leq 34^\circ C$). Le potentiel d'hydrogène dit « pH » a une gamme de valeur compris entre 8 à 8.5 ($8 \leq pH \leq 8.5$) et la turbidité TU optimale de l'eau est inférieure à 5 NTU ($TU \leq 5$ NTU) (Driscoll et al, 2001).

Pour tout $Q \geq 0$ et $t \geq 0$, soit $E_2(t) = Q e^{-\left(\frac{TU}{\Theta + pH}\right)t^2}$; avec les valeurs référentielles optimales favorables à la photosynthèse, posons $Q = 8$ mg/L ; $\Theta = 25^\circ C$; $pH = 8$ et $TU = 5$ NTU. On a le graphe suivant comme résultat de calcul de l'intégrale simple d' $E_2(t)$ du 0 à 12h00:

Figure 3. Fin du cycle du dégagement de CO_2 par l'assimilation chlorophyllienne pour $E_2(t)$.



D'où l'offre en O_2 par les biomasses au niveau du milieu aquatique se reprend entre la fin de l'obscurité (vers 5h30) et le début de la lumière du jour (à partir de 6h30).

On peut en déduire que cette plage horaire est due à la variation diurne (influence du rayonnement solaire sous l'effet de la rotation de la terre dans son orbite) et thermique, notamment en été et en hiver (Meeus, 1998).

Tableau 5. Variation de la concentration massique de CO_2 en fonction du temps.

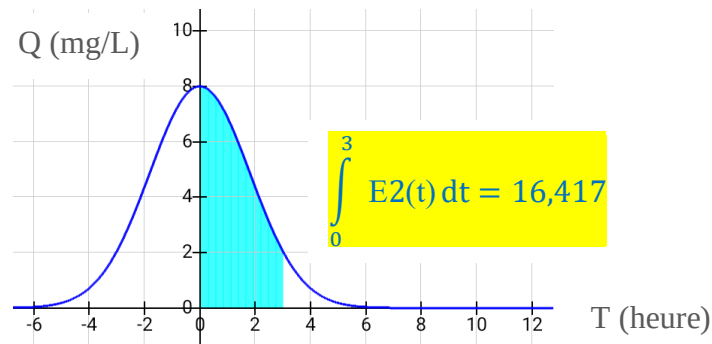
t (heure)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$E_2(t)$ (mg/L)	8	6,875	4,364	2,046	0,708	0,181	0,034	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Source : Extrait de l'analyse de la fonction $E_2(t)$.

En calculant l'intégral du modèle $E_2(t)$ depuis minuit ($t = 0$ heure) à midi ($t = 12$ heure), on a $\int_0^{12} E_2(t) dt = 18,214$. Ce qui signifie que l'assimilation chlorophyllienne depuis cette période occupe la moitié (soit 50%) de l'aire total. D'où le cycle du dégagement de CO_2 atteint le pic maximum de 8mg/L en minuit (0h00) et redescend vers 0.004mg/L à 7heures du matin, voire nulle à midi (12h00).

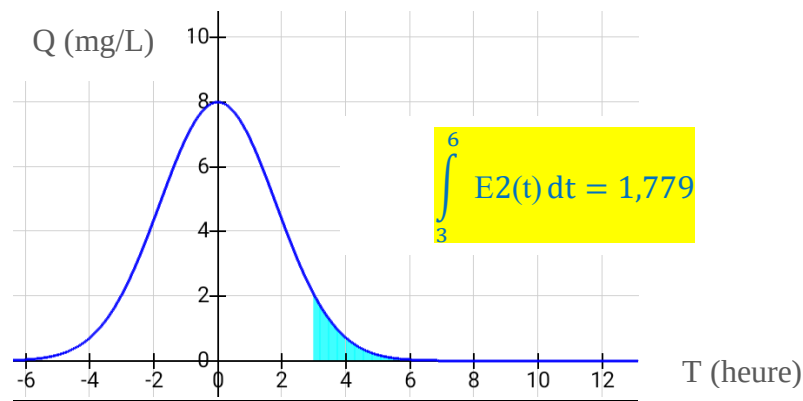
Du coup, ce phénomène est vice-versa à celui de l'oxygène. Du minuit à 03h00, on a : $\int_0^3 E_2(t) dt = 16,417$. Soit un taux de 45,07% par rapport à l'aire total.

Figure 4. Chute de CO_2 du minuit à 3 heures par l'assimilation chlorophyllienne.



On peut observer dans cette figure que l'assimilation chlorophyllienne depuis le minuit jusqu'à 3 heures du matin soit 45,07% de la totalité de la photosynthèse. Du 3h00 à 6h00, on a: $\int_3^6 E_2(t) dt = 1,779$. Soit 4,88% de l'aire totale.

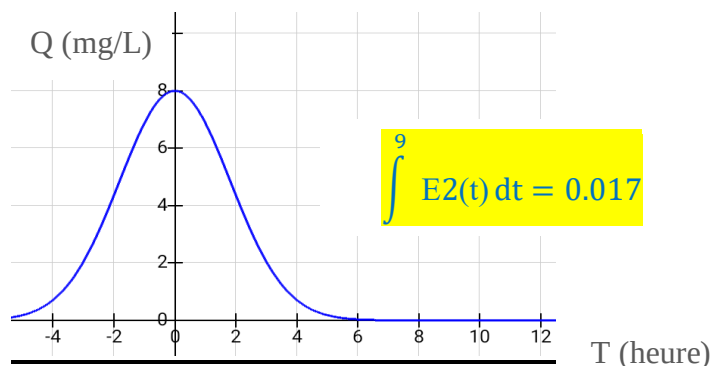
Figure 5. Chute de CO_2 de 3 heures à 6 heures par l'assimilation chlorophyllienne.



On peu constater dans cette figure que l'assimilation chlorophyllienne depuis 3heures à 6heures du matin occupe le 4,88% de la totalité de la photosynthèse.

Du 6h00 à 9h00, on a: $\int_6^9 E_2(t) dt = 0,017$. Soit 0.05% de l'aire totale de la courbe.

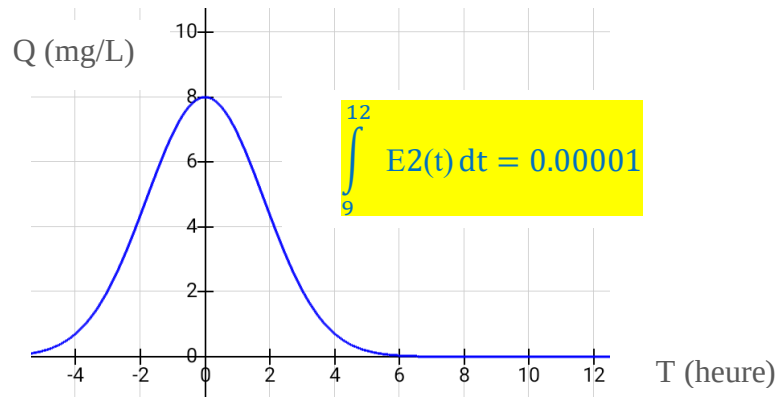
Figure 6. Chute de CO_2 de 6 heures à 9 heures par l'assimilation chlorophyllienne.



On a conclu dans cette figure que l'assimilation chlorophyllienne depuis le lever du soleil (6heures) à 9heures, faisant 0,05% de la totalité de la photosynthèse.

Du 9h00 à 12h00, on a: $\int_9^{12} E_2(t) dt = 0,00001$. Soit 0% de l'aire total de la courbe. D'où la représentation graphique de ce phénomène est presque invisible sur l'échelle temporelle étudiée.

Figure 7. Chute de CO₂ de 9 heures à midi par l'assimilation chlorophyllienne.

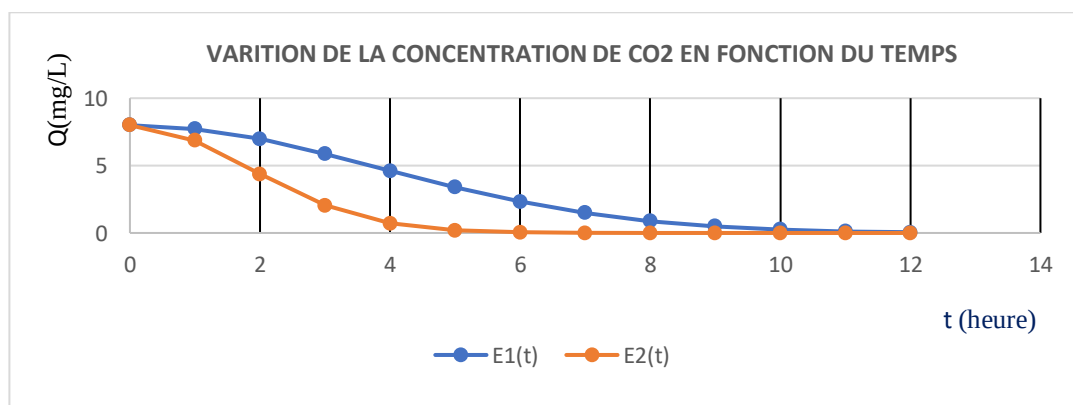


On a pu remarqué dans cette figure, que le dégagement de CO₂ durant l'assimilation chlorophyllienne depuis 9heures à midi soit presque nul, et que l'offre en empreinte oxygène sur ce même milieu se début.

4.3 Analyse significative d'E₁ (t) et E₂ (t) par rapport à la simulation de la demande en CO₂ d'une plante chlorophyllienne :

Les deux séries de courbes affichées dans le graphe de la figure 8 ci-après nous ont permis d'analyser nettement la diminution progressive du CO₂ au fil du temps. D'où, au début (t=0h), les deux milieux ont de la même concentration initiale de CO₂ (Q=8mg/L), mais au fil du temps, on voit nettement la différenciation de ce dernier.

Figure 8. Comparaison de la variation d'E₁ (t) et E₂ (t).



Sur ce, **E2(t)** se caractérise par un dégagement un peu plus rapide par rapport à **E1(t)**. Cette différence indique que le processus responsable de l'absorption du CO₂ est plus efficace dans le scénario **E2(t)**, ce qui signifie probablement d'une activité photosynthétique plus élevée auprès du milieu aquatique.

5 Conclusion

Ce travail a été effectué dans le cadre théorique visant à simuler le comportement de la photosynthèse générale qui évolue dans le temps donné, afin d'anticiper ou de prédire l'impact de la quantité d'empreinte carbone en interaction avec l'assimilation chlorophyllienne chez les plantes vertes.

A cet effet, nous avons évoqué, non seulement l'importance de ce modèle notamment sur la reconnaissance de la quantité disponible de stocks et de flux d'empreintes du métabolisme écologique, mais également sur l'amélioration de la convivialité des espèces aquatiques vivantes en symbiose. Cependant, la précision fait partie de la limite de ce modèle, vue la complexité sur l'acquisition des données en temps réel, liée à la méthode et au moyen de mesure des facteurs militants (*pH, température, turbidité...*).

La fonction $E(t)$ est alors idéale à la simulation du modèle théorique de la demande en CO_2 d'une plante verte ainsi que le phénomène de l'aérobiose (cas des poissons qui ont besoin en moyen de 8mg/L d' O_2). Pourtant ce modèle est favorable pour les biomasses aquatique simulée avec l'écosystème artificiel (avec paramètres reconconditionnés), mais présente encore de l'incertitude face à l'absence des autres paramètres *physicochimiques* à considérer au niveau de l'écosystème aquatique réel (à cause de changement imprévisibles des paramètres).

REFERENCES

- [1] Burggren W.W, (1979) – «*Bimodal gas exchange during variation in environmental oxygen and carbon dioxide in the air-breathing fish Trichogaster trichoptencs*». J. Exp. Biol., 82: 197-213.
- [2] Reynolds, C.S. (2006). "The Ecology of Phytoplankton". Cambridge University Press. P.251-280.
- [3] Den Hertog J., Stulen I., Posthumus F. & Poorter H. (1998) « Interactive effects of growth limiting N supply and elevated atmospheric CO_2 concentration on growth and carbon balance of *Plantago major* ». *Physiologia Plantarum*, 103, 451–460.
- [4] Maberly (1996). "Diel, Episodic and Seasonal Changes in pH and Concentrations of Inorganic Carbon in a Productive Lake". *Freshwater Biology*, 35(3), 579–598.
- [5] Hussner A., Hofstra D., Jahns P. & Clayton J. (2015). « Response capacity to CO_2 depletion rather than temperature and light effects explain the growth success of three *alien Hydrocharitaceae* compared with native *Myriophyllum triphyllum* in New Zealand ». *Aquatic Botany*, 120, 205–211.
- [6] Saarikoski J, Viluksela M (1981). « *Influence of pH on the toxicity of substituted phenols to fish* ». *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 10:747-753. [En ligne], [consulté le 08/06/2026].
- [7] Wurts W (2003). « *Daily pH cycle and ammonia toxicity* ». *World Aquaculture* 34(2):20-21. [En ligne], [consulté le 08/06/2026].
- [8] Orendt C (1999). « *Chironomids as bioindicators in acidified streams: a contribution to the acidity tolerance of chironomid species with a classification in sensitivity classes* ». *International Review of Hydrobiology*, 84:439-449. [En ligne], [consulté le 08/06/2026]
- [9] Niyogi DK, McKnight DM, Lewis WM Jr (1999). « *Influences of water and substrate quality for periphyton in a montane stream affected by acid mine drainage* ». *Limnology and Oceanography* 44:804-809. [En ligne], [consulté le 08/06/2026].
- [10] Kalff (2002). « *Limnology: Inland Water Ecosystems* ». 324-333-335. [En ligne], [consulté le 08/06/2026]
- [11] Zhang et al. (2022). « *Influencing simulation of an individual leaf system* ». *Thermal Science and Engineering Progress*, 27, 101-110.
- [12] Mballo, S (2022). « *Quantification et modélisation des services climatiques rendus par les arbres dans une rue canyon* ». Thèse, UP Environnement physique de la plante horticole (EPHOR). N° D-97_2022-4, 327p
- [13] Yufei Z (2024), Photocatalytic water splitting for large-scale solar-to-chemical energy conversion and storage, *Frontiers in Science*, 03 December 2024, Volume 2, DOI: 10.3389/fsci.2024.1411644, 18 Pages.

- [14] Scheffer, M. (1999). The effect of aquatic vegetation on turbidity: How important are the filter feeders? *Hydrobiologia*, 409, 307-316.
- [15] Scheffer, M. (1998). « *Ecology of Shallow Lakes* ». Chapman & Hall. London. 357p. ISBN: 9780412749209. P.25-84-85-146-211-284.
- [16] Titus J.E. (1992) Submersed macrophyte growth at low pH. II. CO₂ x sediment interactions. *Oecologia*, 92, 391–398.
- [17] Carpenter & Lodge (1986). « *Effects of Submersed Macrophytes on Ecosystem Processes* ». *Aquatic Botany*, 26, 341–370.
- [18] Jeppesen et al. (1998). « *The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes* ». *Ecological Studies*, 131, 133–174
- [19] Colin S. Reynolds (2006). « *The Ecology of Phytoplankton* ». Cambridge University Press. Xiv+535 pages. DOI: 10.1017/CB0978051 1542145. ISBN: 978-0521605199
- [20] Dodds, WK. & Whiles, M.R. (2010). « *Freshwater Ecology: Concepts and Environmental Applications of Limnology* ». Academic Press. P.153-188
- [21] Jeppesen, E., et al. (1997). « *Top-down control in shallow lakes: The role of nutrient load, fish and aquatic vegetation* ». *Hydrobiologia*, 342/343, 151–164. Explique comment la végétation aquatique interagit avec les nutriments et les populations de poissons pour influencer la turbidité.
- [22] Van de Bund, W. J., & van Donk, E. (2004). « Effects of submerged macrophytes on nutrient dynamics, sediment stability and water clarity in shallow lakes. » *Freshwater Biology*, 49(5), 771–786. Montre comment les plantes submergées réduisent la turbidité en stabilisant les sédiments.
- [23] Andry T.S. RAKOTOMENA, « *Modeling of the Theory of the Aerobic Phenomenon and Photosynthesis* ». *EJBIO*, 18 novembre 2025. DOI: 10.24018/ejbio.2025.6.4.547, 10 pages. [ISSN: 2684-5199], [Online],
- [24] David Sauzet, Thomas Hausberger. « La fonction exponentielle: un modèle mathématique pour la biologie ». 2019. (hal-02882823). [En ligne]. 27 Jun 2020. [Consulté le 31 mai 2026]. Disponible sur: <https://hal.science/hal-02882823v1>
- [25] Andreas Hussner, Tabea Mettler-Altmann, Andreas P. M. Weber. and Kaj Sand-Jensen. « Acclimation of photosynthesis to supersaturated CO₂ in aquatic plant bicarbonate users ». *Freshwater Biology* (2016) 61, 1720–1732. doi:10.1111/fwb.12812
- [26] FAO, (1980), « *Improving Pond Water Quality* ». [En ligne], [consulté le 08/06/2026]. Disponible sur: https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6709e/x6709e02.htm
- [27] Driscoll CT, Lawrence GB, Bulger AJ, Butler TJ, Cronan SC, Eagar C, Lambert KF, Likens GE, Stoddard JL, Weathers KC (2001). « *Acidic deposition in the northeastern United States: sources and inputs, ecosystem effects, and management strategies* ». *BioScience* 51(3):180-198. [En ligne], [consulté le 08/06/2026]
- [28] Queensland Government (2013). « *Aquatic macrophytes and turbidity* » – A case study, WetlandInfo. [En ligne], [consulté le 14/06/2026]. Disponible sur: <https://wetlandinfo.detsi.qld.gov.au/wetlands/ecology/components/atmosphere-physical/light/aquatic-macrophytes-cb-case-study.html>
- [29] Marten Scheffer et al. (1993). « *Alternative equilibria in shallow lakes* », *Trends in Ecology & Evolution* (Vol. 8, No. 8). P.275- 279. (état clair à macrophytes versus, état trouble à phytoplancton)
- [30] L. L. Yuan (2021). « Continental-scale effects of phytoplankton and non-phytoplankton turbidity on aquatic macrophyte occurrence in shallow lakes ». *Aquatic Sciences*, 83, Article 15. DOI:10.1007/s00027-020-00773-5. [Consulté le 14 juin 2026]
- [31] Åsa N. Austin et al. (2017): « Relationships between aquatic vegetation and water turbidity: A field survey across seasons and spatial scales ». *PLoS One*, doi: 10.1371/journal.pone.0181419. [En ligne], [Consulté le 14 juin 2026]
- [32] Scheffer, M., Hosper, S. H., Meijer, M. L., Moss, B., & Jeppesen, E. (1993). “Alternative equilibria in shallow lakes.” *Trends in Ecology & Evolution*, 275–279. Concept clé des « états alternatifs »: un lac peut être dans un état clair avec macrophytes ou dans un état turbide sans végétation.

- [33] Smart R.M. & Barko J.W. (1985). « *Laboratory culture of submersed freshwater macrophytes on natural sediments* ». Aquatic Botany, 21, 251–263Add your reference here
- [34] Carpenter, S. R., Ludwig, D., & Brock, W. A. (1999). Management of eutrophication for lakes subject to potentially irreversible change. Ecological Applications, 9(3), 751–77
- [35] Portielje, R., & Van Donk, E. (1997). «Macrophyte-mediated regime shifts in a shallow lake. ». Freshwater Biology, 37(3), 253–261
- [36] Wetzel (2001), Limnology: « Lake and River Ecosystems (3rd Edition) ». Academic Press. ISBN: 978-0127447605. Décrit l'influence de la température sur la productivité primaire et les processus photosynthétiques dans les écosystèmes aquatiques
- [37] Wetzel (2001), Limnology: « Lake and River Ecosystems (3rd Edition) ». Academic Press. ISBN: 978-0127447605. Décrit l'influence de la température sur la productivité primaire et les processus photosynthétiques dans les écosystèmes aquatiques.

Revue-IRS

Revue Internationale de la Recherche Scientifique : [Revue-irs.com](http://www.revue-irs.com)