

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MAT3450

PROJET FINAL

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR L'EFFICACITÉ MÉTABOLIQUE ET SON IMPACT SUR LES  
ÉCOSYSTÈMES

PAR VICTOR BÉGIN ET EVA-LOVE PÉPIN

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Résumé</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Méthodologie</b>	<b>5</b>
3.1	Notions préliminaires . . . . .	5
3.1.1	Notions d'écologie . . . . .	5
3.1.2	Sources et puits . . . . .	5
3.1.3	Relations allométriques . . . . .	5
3.2	Description des modèles . . . . .	6
3.2.1	Modèle de Gravel et al . . . . .	6
3.2.2	Modèle Vasseur & McCann . . . . .	7
3.3	Intégration des modèles . . . . .	7
3.4	Configuration de la simulation . . . . .	8
3.4.1	Observables . . . . .	8
3.4.2	Modèles et graphiques . . . . .	9
3.5	Analyse quantitative . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Résultats</b>	<b>11</b>
4.1	Lien entre la prévalence des nutriments selon le taux de consommation des producteurs .	11
4.2	Évolution du taux de dispersion critique des herbivores en fonction de la température . .	12
4.3	Dynamique associée à la densité des populations de producteurs selon à la fois le taux de dispersion des détritux et la température de l'environnement . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Discussion</b>	<b>15</b>
5.1	Interprétation des résultats . . . . .	15
5.1.1	Concentration des nutriments en fonction du taux de consommation des producteurs	15
5.1.2	Taux de dispersion critique des herbivores selon la température . . . . .	16
5.1.3	Densité des populations de producteurs primaires . . . . .	16

5.2	Comparaison des modèles avec/sans dépendance à la température . . . . .	16
5.3	Limites de l'étude . . . . .	17
5.4	Importance des résultats obtenus concernant la réponse aux changements climatiques . .	18

# 1 Résumé

Considérant les enjeux actuels liés aux changements climatiques, il semble essentiel de connaître l'impact de l'augmentation de la température sur les différentes composantes d'un écosystème. Cet article étudie l'influence du changement d'efficacité métabolique engendré par le réchauffement climatique sur les écosystèmes, plus particulièrement sur les herbivores et les producteurs primaires.

Le modèle décrit par Gravel et coll. considère quatre éléments d'un écosystème : les nutriments, les producteurs (plantes), les herbivores et les détritus, qui interagissent dans un système fermé. Selon Vasseur et coll., il est possible de prendre en compte l'influence de la température sur le métabolisme des herbivores et des producteurs. Nous allons donc intégrer le modèle de Vasseur et coll. dans le calcul du taux de consommation des producteurs et des herbivores proposé par le premier modèle, ce qui va affecter leur efficacité métabolique. Cela aura par la suite un impact sur le calcul des populations des quatre éléments du système fermé.

Nous nous attendons à ce que l'augmentation de la température ait un effet sur l'ensemble de l'écosystème. En effet, nous allons démontrer que cette augmentation fait diminuer la valeur du taux de dispersion critique des herbivores, ainsi que les populations de producteurs primaires et ce, à la fois dans des environnements de sources et de puits. De plus, nous allons observer que la concentration de nutriments disponibles sera influencée par le taux de consommation des producteurs primaires (qui est lui-même influencé par la température), mais que le résultat de cette influence sera principalement dû à l'environnement initial dans lequel se trouvaient les nutriments.

## 2 Introduction

Les changements climatiques sont et seront la source d'une myriade d'effets qui impacteront négativement les écosystèmes présents sur Terre (Malhi et coll., 2020), notamment en troublant leur équilibre dynamique. Parmi ces effets, on note que l'augmentation de la température moyenne a un impact direct sur l'efficacité métabolique des populations présentes dans ces écosystèmes (Vasseur et coll., 2005). La modification du métabolisme d'une espèce en équilibre dans son milieu peut provoquer un déséquilibre

dudit équilibre, et donc nuire à l'écosystème.

Il existe plusieurs modèles qui caractérisent les interactions interspécifiques et leur impact sur leurs écosystèmes ; notamment, le modèle proposé par Gravel et coll. (2010) étudie comment ces interactions peuvent influencer l'environnement à se transformer de source, soit un environnement qui peut soutenir ses populations sans intervention extérieure, en puits, un environnement où le taux de reproduction intraspécifique n'est pas assez élevé pour compenser le taux de mortalité (Pulliam et coll., 1988), ou vice-versa. Les effets de l'augmentation de la température due aux changements climatiques sur des processus biologiques spécifiques ont également été étudiés auparavant. En effet, le modèle présenté par Vasseur et coll. (2005) étudie l'impact que les changements climatiques ont sur les réponses métaboliques de populations de ressources et de consommateurs.

Cependant, il manque de travaux traitant spécifiquement de l'incidence qu'ont les interactions interspécifiques sur leur environnement en fonction de l'impact que le réchauffement climatique a sur les métabolismes de ces espèces. Cette lacune freine notre compréhension des processus ayant une influence sur l'équilibre écosystémique, surtout en cette époque marquée par les changements climatiques.

Pour pallier cela, nous avons adapté les modèles de Gravel et coll. et Vasseur et coll. afin d'en obtenir un qui traite de l'influence de la température sur l'efficacité métabolique et son impact sur les écosystèmes. Nous avons choisi ces deux modèles à cause de leur complémentarité : les deux étudient des dynamiques de populations de ressources et consommateurs, mais traitent l'influence d'une variable différente. Notre procédé se base sur l'intégration de l'évolution de l'efficacité métabolique des populations en fonction de la température dans un modèle considérant déjà à la fois les interactions entre certaines populations et leur environnement puis les interactions entre les populations elles-mêmes.

## **3 Méthodologie**

### **3.1 Notions préliminaires**

#### **3.1.1 Notions d'écologie**

Nous commençons par contextualiser les variables composant notre système d'équation. Nous définissons un compartiment comme une catégorie d'une entité vivante/nutriment/matière organique présente et connectés dans un écosystème. Dans un écosystème, différents compartiments interagissent selon un certain ensemble de relations, allant de la prédation au mutualisme. Dans notre cas, les compartiments interagissent selon un modèle consommateur-ressource, modélisant une stratégie de prédation qui forme éventuellement une boucle fermée. Ainsi, la quantité du 1er compartiment limitera la population du deuxième, et celle du quatrième limitera la population du 1er.

#### **3.1.2 Sources et puits**

La définition d'un puits en écologie est basée sur l'incapacité du producteur primaire à maintenir une population dans une parcelle isolée (Gravel et al.), et celle d'une source, l'inverse. Dans notre cas, nous contrôlons directement l'habilité d'un écosystème à devenir un puits ou une source de nutriments à partir de nos conditions initiales. La possibilité de communication et d'échange de ressources entre deux écosystèmes hétérogènes peut modifier ces dynamiques intérieures, permettant à un méta-écosystème, par exemple, de devenir un puits ou une source nette.

#### **3.1.3 Relations allométriques**

En biologie, l'allométrie est l'étude des relations biologiques à l'intérieur d'un organisme, et les relations allométriques font quelque peu tautologiquement référence à ces relations métaboliques. Dans notre contexte, les relations allométriques font surtout référence à des données dérivées empiriquement et nous informent sur le fonctionnement métabolique d'une espèce particulière.

## 3.2 Description des modèles

### 3.2.1 Modèle de Gravel et al

Le modèle considère quatre compartiments d'un écosystème : les nutriments, les producteurs primaires, les herbivores et les détritus, qui interagissent dans un système semi-fermé composé de  $x$  écosystèmes. Plus précisément, ce modèle couple différents systèmes régionaux abritant chacun une configuration d'écosystème différente. Les nutriments entrent dans le système à un taux  $I_x$ , et s'écoulent à un taux  $e_N N_x$ . Les producteurs consomment les nutriments suivant la fonction  $f_{P_x}$  dans laquelle ils se trouvent, et ceux-ci sont à leur tour consommés par des herbivores à débit  $f_{H_x}$ . Les producteurs et les herbivores meurent à un taux  $m$  et deviennent des détritus organiques, qui seront recyclés en nutriments, à un taux de recyclage  $r(1 - e_D)$ . l'interaction entre les écosystèmes se fait selon une fonction de dispersion  $\Delta$  propre à chaque écosystème et chaque compartiment. Plus d'informations sur les différents paramètres se retrouvent au tableau 1. Nos équations sont

$$\frac{dN_x}{dt} = I_x - e_N N_x - f_{P_x}(N_x, P_x) + r(1 - e_D)D_x + \Delta_{N_x} \quad (1)$$

$$\frac{dP_x}{dt} = f_{P_x}(N_x, P_x) - m_P P_x - f_{H_x}(P_x, H_x) + \Delta_{P_x} \quad (2)$$

$$\frac{dH_x}{dt} = f_{H_x}(P_x, H_x) - m_H H_x + \Delta_{H_x} \quad (3)$$

$$\frac{dD_x}{dt} = m_P P_x + m_H H_x - rD_x + \Delta_{D_x} \quad (4)$$

nous considérons dans ce papier une interaction de deux parcelles arborant chacune leur écosystème, paramétrée de telle façon que le premier soit en premier temps une source et le deuxième un puits de producteurs/nutriments. Leur interaction sera définie par l'équation  $\Delta_{C_1} = d_C(C_2 - C_1)$  pour la parcelle 1 et  $\Delta_{C_2} = d_C(C_1 - C_2)$  pour la parcelle 2. Ainsi les dynamiques source-uits seront mesurables par le changement de cette équation de diffusion passive. Les réponses fonctionnelles des producteurs primaires et des herbivores,  $f_{P_x}$  et  $f_{H_x}$  sont décrites par des réponses linéaires,  $f_{P_x} = \alpha_x N_x P_x$  et  $f_{H_x} = \beta_x P_x H_x$ , où  $\alpha$  et  $\beta$  sont les taux de consommation, des producteurs et des herbivores respectivement.

### 3.2.2 Modèle Vasseur & McCann

Leur modèle modifie un précédent cadre (Yodzis et Innes (1992)) pour y ajouter une dépendance à la température. Vasseur & McCann argumentent qu'une dépendance à la température dans les processus métaboliques bénéficie d'être dérivée des principes premiers de la thermodynamique, et plus particulièrement, qu'il est plus précis de mettre à échelle les différents taux métaboliques selon le facteur de Boltzmann  $e^{-E/kT}$ , où  $k$  est la constante de Boltzmann. Ainsi, ils décrivent les fonctions métaboliques suivantes

$$r = f_r a_r(T_0) m_R^{-0.25} \exp\left(\frac{E_r(T - T_0)}{kTT_0}\right) \quad (5)$$

$$(1 - \delta)J = f_J a_J(T_0) m_C^{-0.25} \exp\left(\frac{E_J(T - T_0)}{kTT_0}\right) \quad (6)$$

$$M = a_M(T_0) m_C^{-0.25} \exp\left(\frac{E_M(T - T_0)}{kTT_0}\right) \quad (7)$$

où  $M$  décrit l'énergie des relations allométriques provenant du métabolisme d'un animal,  $J$  l'énergie d'ingestion et  $r$  l'énergie métabolique d'un producteur primaire unicellulaire.  $E_i$  sont les énergies d'activation et  $a_i(T_0)$  les intercepts des relations allométriques à une température de référence  $T_0$ . Toutes ces constantes sont dérivées empiriquement, et plus de détails sont donnés dans la prochaine sous-section. Ces équations peuvent être exprimées sous la forme du ratio production/biomasse  $r$ ,  $r' = f_{r'} [(1 - \delta)J - M]$  et  $r' = r$  pour les producteurs puisque leur activité métabolique est négligeable au-delà de ce ratio.

### 3.3 Intégration des modèles

Nous allons nous concentrer sur la dépendance en température du métabolisme des différents êtres vivants composant notre modèle. Pour ce faire, nous allons prendre le ratio production/biomasse et l'intégrer dans la réponse fonctionnelle de nos producteurs et herbivores. Pour ce faire, il est utile de remarquer que les réponses fonctionnelles sont les seuls éléments "produisant" d'autres producteurs et herbivores, agissant comme élément reproductif dans notre modèle basé sur la disponibilité de sources d'énergies. Ainsi, le



ratio  $r$  peut être écrit en fonction de nos réponses fonctionnelles comme

$$r_P N_x = f_{P_x} = \alpha_x P_x N_x \quad (8)$$

$$r_H P_x = f_{H_x} = \beta_x P_x \quad (9)$$

$$\Leftrightarrow \alpha_x = \frac{r_P}{P}, \beta_x = r_H \quad (10)$$

et le modèle final, pour les parcelles  $x$  et  $y$ , et en n'ajoutant pas la valeur des paramètres, nous donne

$$\frac{dN_x}{dt} = I_x - eN_x - f_r a_r(T_0) m_R^{-0.25} \exp\left(\frac{E_r(T - T_0)}{kTT_0}\right) + r(1 - e_D)D_x + d_N(N_y - N_x) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_x}{dt} = & f_r a_r(T_0) m_R^{-0.25} \exp\left(\frac{E_r(T - T_0)}{kTT_0}\right) - m_P P_x \\ & - f_{r'} \left( f_J a_J(T_0) m_C^{-0.25} \exp\left(\frac{E_J(T - T_0)}{kTT_0}\right) - a_M(T_0) m_C^{-0.25} \exp\left(\frac{E_M(T - T_0)}{kTT_0}\right) \right) + d_P(P_y - P_x) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{dH_x}{dt} = & f_{r'} \left( f_J a_J(T_0) m_C^{-0.25} \exp\left(\frac{E_J(T - T_0)}{kTT_0}\right) - a_M(T_0) m_C^{-0.25} \exp\left(\frac{E_M(T - T_0)}{kTT_0}\right) \right) \\ & - m_H H_x + d_H(H_y - H_x) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\frac{dD_x}{dt} = m_P P_x + m_H H_x - rD_x + d_D(D_y - D_x) \quad (14)$$

### 3.4 Configuration de la simulation

#### 3.4.1 Observables

Nous faisons l'hypothèse que notre écosystème est uniquement constitué d'environnement marin, et de producteurs primaires unicellulaires (algues) ainsi que des saumons agissant comme agent herbivore. Pour les algues, la densité est de  $0.73 \pm 0.004g/cm^3 = 730kg/m^3$  et la densité des saumons est de  $230kg/m^3$ , en considérant une masse moyenne de  $4.6kg$  par poisson. Les  $a_R$  sont pris de Vas-seur&McCann tout comme les énergies d'activation. Tous nos observables sont des variables évoluant dans le temps et décrites dans le tableau 1

**TABLEAU 1 – Abréviations utilisés**

Variables	
$N$	Nutriment
$P$	Producteurs primaires
$H$	Herbivores
$D$	Détritus
$\lambda$	Taux de croissance de la population
$\Phi$	Effet net des flots $\lambda$
$\alpha(T), \beta(T)$	Taux de consommation des producteurs/herbivores (= $\frac{r_P}{P}, r_H$ les ratios production/biomasse)
Paramètres	
$I_x$	Taux d'entrée des nutriments
$e_N, e_D$	Taux d'écoulement
$m_P, m_H$	Taux de mortalité
$r$	Taux de recyclage des détritux
$d_N, d_P, d_H, d_D$	Taux de diffusions
Fonctions	
$f$	Réponse fonctionnelle des producteurs et herbivores
$\Delta$	Fonctions de diffusions
Quantité à l'équilibre	
$\hat{N}_2$	Concentration de nutriments à l'équilibre dans 2 quand couplé avec 1 en absence de producteurs dans 2
$N_2^*$	Concentration de nutriments à l'équilibre dans 2 isolé des autres parcelles
Constantes	
$a_r$	Taux maximum de durabilité des relations allométriques $kg(kg\ year)^{-1}kg^{0.25}$
$f_r$	Fraction du taux $a_r$ réalisé (= 0.8)
$m_R$	Biomasse moyenne ( $kg$ )
$E_R$	Énergies d'activations

### 3.4.2 Modèles et graphiques

Nous allons résoudre notre système d'équation différentielle par la méthode de Runge-Kunta d'ordre 4. Cette méthode offre une précision suffisante pour nos besoins tout en étant efficace et rapide. Celle-ci sera simulée sur un nombre  $sim_{time} \cdot 365$  pas, équivalent à une journée. De plus, nous simulerons un nombre  $sim_{nb}^2$ , afin de broser l'ensemble des valeurs de  $T$  et  $d_D$  utilisés comme observables. Les valeurs mises à jours à chaque pas sont les  $N, P, H, D$  ainsi que les  $\Delta N_x, \Delta P_x, \Delta H_x, \Delta D_x$ , et ce seront ces mêmes

quantités qui seront enregistrés pour du traitement supplémentaire, en plus de nos  $\alpha_x$  et  $\beta_x$  dépendant de la température et de  $P_x$ .

Lorsque la simulation se finit, nous prendrons les moyennes de la quantité de nutriment et des producteurs à chaque incrément de température et de  $d_D$  comme expliqué dans la section précédente. De même, la quantité  $\alpha_x$  mise en graphe est la moyenne de cette même quantité variant au cours d'un incrément de la simulation.

### 3.5 Analyse quantitative

Dans cette section, nous analysons l'effet du flux de nutriments à différents états du système. Pour ce faire, il est utile de se pencher sur le taux de croissance des producteurs dans une parcelle isolée et du taux de croissance avec nos deux parcelles couplées. Ces taux sont respectivement formulés par

$$\lambda_{2-} = \frac{I_2}{e_N} - N_2^* \quad (15)$$

$$\lambda_{21} = \hat{N}_2 - N_2^* \quad (16)$$

et le taux de croissance du flot de nutriments isolé est donc  $\lambda_{21} - \lambda_{2-} = \Phi_{21} = \hat{N}_2 - \frac{I_2}{e_N}$ . Un  $\Phi$  négatif signifie que la parcelle 2 est un puits et le contraire une source. En posant  $\Phi_{21} = 0$ , une condition d'équilibre entre les deux parcelles, il est possible de trouver des taux de diffusion critique entre une dynamique source-puits et son inverse. Dans le système à 8 équations composé de 4 compartiments et 2 parcelles, et des taux de diffusion  $d_N$  et  $d_H$  non-nuls, nous obtenons

$$d_H^{crit} = d_N \frac{(m_P + \beta)e_D m_H}{e_N \beta (1 - e_D) - 2e_D d_N (m_P + \beta)} \quad (17)$$

$$d_N^{crit} = \frac{e_N \beta (1 - e_D) d_H}{(m_P + \beta)e_D m_H + 2e_D (m_P + \beta) d_H} \quad (18)$$

Un  $d_C^{crit}$  (pour  $C$  un compartiment) positif signifie que les producteurs dans la parcelle puit bénéficie de la présence du même compartiment dans la parcelle source.

## 4 Résultats

Cette section présente les résultats obtenus dans le cadre de notre étude de l'influence de la température sur l'efficacité métabolique des populations et ses retombées écosystémiques. Nous nous sommes penchés sur les relations entre les populations, leur environnement ainsi que les changements climatiques à l'aide de simulations informatiques. Les résultats obtenus seront présentés en trois sections, soit le lien entre la prévalence des nutriments selon le taux de consommation des producteurs, l'évolution du taux de dispersion critique des herbivores en fonction de la température, et finalement, la dynamique associée à la densité des populations de producteurs selon à la fois le taux de dispersion des détritiques et la température de l'environnement.

### 4.1 Lien entre la prévalence des nutriments selon le taux de consommation des producteurs

Est-ce que la concentration des nutriments dans une parcelle donnée peut être influencée par à quel point les producteurs ont tendance à les consommer ? Et si oui, est-ce que l'environnement de ces nutriments peut affecter leur renouvellement ? C'est ce que nous avons tendance à croire. Afin de vérifier ces affirmations, nous avons analysé l'évolution de la concentration des nutriments selon le taux de consommation des producteurs.

Nous avons simulé cette évolution dans deux environnements, soit une parcelle de type source et une de type puits (Figure 1). Les deux populations de nutriments ont été obtenues grâce à l'équation de modélisation de la population de nutriments avec facteur de température intégré (11) et celle de la réponse fonctionnelle des producteurs (8). Nous avons pu conclure que le type de parcelle a un impact sur l'évolution de la concentration des nutriments. En effet, sur plusieurs générations de producteurs, le fait d'augmenter leur taux de consommation aura un effet périodique sur la taille de leur population. Un plus grand taux de consommation pour une ressource limitée va initialement mener à une baisse de la population ; cependant, la mort d'individus contribue à augmenter la quantité de détritiques et de nutriments disponibles dans la parcelle, ce qui mène à une plus grande quantité de ressources disponibles et donc à une possibilité d'augmenter la taille de la population, du moins jusqu'à ce que la limite des ressources

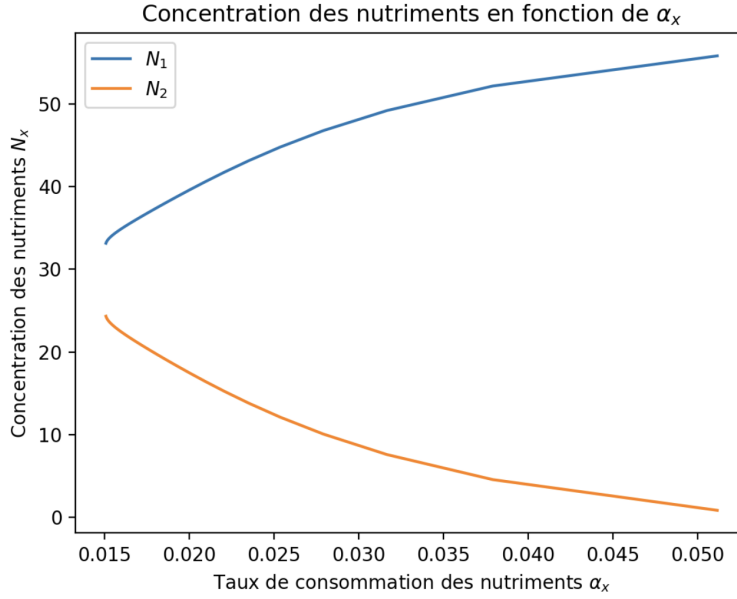


FIGURE 1 – Effet du taux de consommation des producteurs ( $\alpha_x$ ) sur la concentration par  $m^3$  des nutriments ( $N_x$ ) dans une parcelle de type source (bleue) et une parcelle de type puits (orange) à  $T_0$ . Comme le modèle peut s’appliquer de manière générale, il n’y a pas d’unité spécifiée. Paramètres :  $I_1 = 1$ ,  $I_2 = 0.01$ ,  $e_N = 0.1$ ,  $e_D = 0.1$ ,  $r = 0.2$  et  $m_P = 0.15$ .

soit à nouveau atteinte. Ce cycle va permettre à la source d’augmenter à la longue la concentration de nutriments sur son territoire, et ce, malgré l’augmentation du taux de consommation causé par la température. À l’opposé, lorsque la même situation se produit dans un puits, la concentration de nutriments va baisser et l’environnement n’en permettra pas un réapprovisionnement assez rapide pour soutenir l’augmentation de  $\alpha_2$  sans conséquence, car le flux des nutriments a tendance à être orienté du puits vers la source. De plus, la parcelle puits possède un taux de fertilité nettement plus bas dans notre simulation.

## 4.2 Évolution du taux de dispersion critique des herbivores en fonction de la température

Comme expliqué précédemment,  $d_H^{crit}$  représente le taux de dispersion critique des herbivores, soit la valeur à laquelle la circulation des nutriments est en équilibre entre une parcelle source et une parcelle puits. Donc, si  $d_H > d_H^{crit}$ , le flux net des nutriments se dirige d’une source vers un puits, et vice-versa. La valeur de  $d_H^{crit}$  est donc d’une grande importance pour l’analyse d’un écosystème de nature source-puits ; il est valide de se demander si l’augmentation de la température aura un impact sur cette quantité.

Nous avons observé (Fig. 2) que la température est liée à  $d_H^{crit}$  ; sa valeur descend alors que  $T^\circ$  augmente.

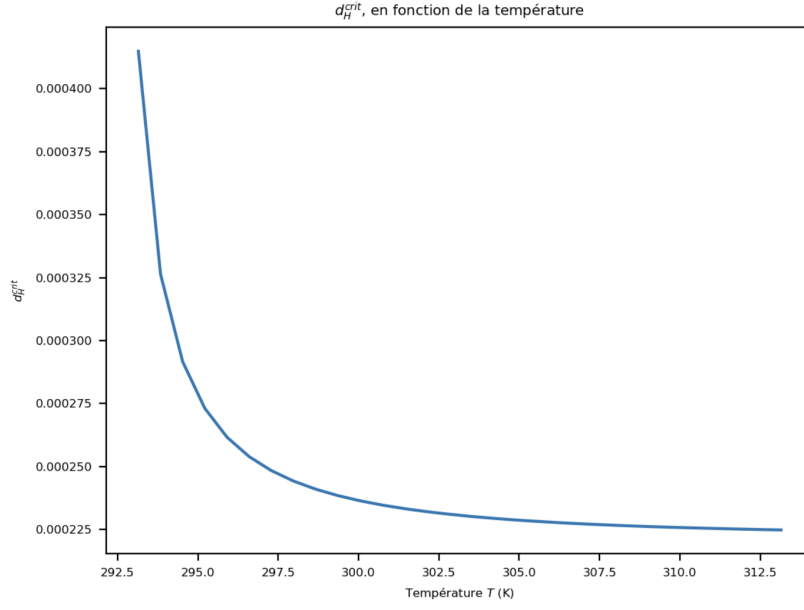


FIGURE 2 – Effet de la température sur l'évolution du taux de dispersion critique des herbivores. La température est en degrés Kelvin et  $d_H^{crit}$  n'a pas d'unité. Paramètres :  $I_1 = 1$ ,  $I_2 = 0.01$ ,  $e_N = 0.1$ ,  $e_D = 0.1$ ,  $r = 0.2$ ,  $m_P = 0.15$ ,  $m_H = 0.2$  et  $d_N = 0.001$ .

En effet, l'équation (17) de  $d_H^{crit}$  contient  $\beta_x$ , qui est dépendant de  $T^\circ$ .

### 4.3 Dynamique associée à la densité des populations de producteurs selon à la fois le taux de dispersion des détritux et la température de l'environnement

Finalement, notre objectif principal était d'étudier l'impact de la température sur les écosystèmes par l'entremise de l'efficacité métabolique. Nous avons donc modélisé (Fig. 3) la densité de deux populations de producteurs primaires habitant chacune dans une parcelle différente, soit une source et un puits.

Densité des producteurs primaires en fonction de la température et de  $d_{D_x}$

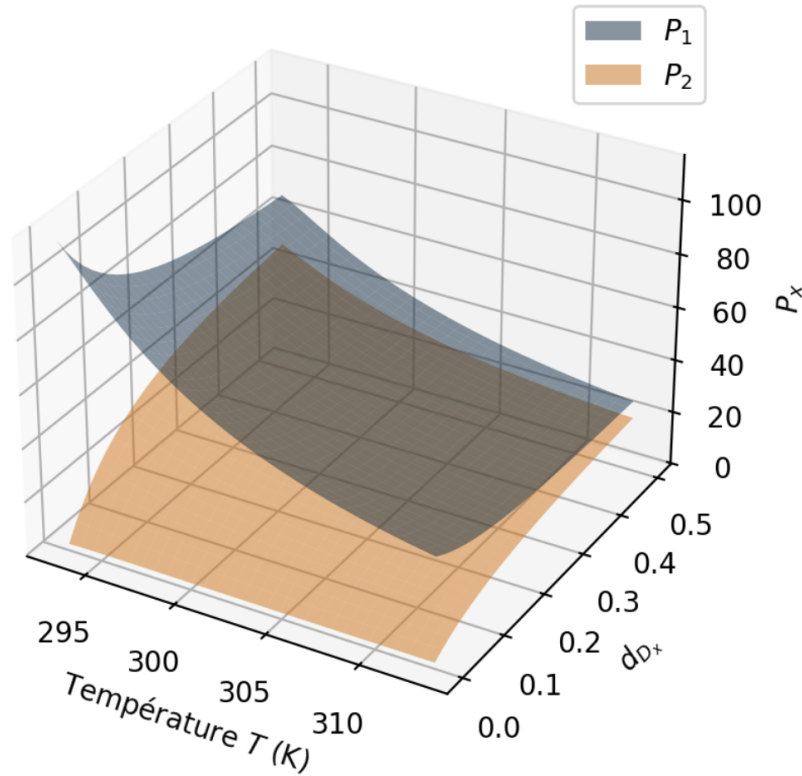


FIGURE 3 – Effets de la température et du taux de diffusion des détritux sur la densité des producteurs primaires d'une parcelle source (bleu) et d'une parcelle puits (orange). La température est en degré Kelvin et  $d_{D_x}$  n'a pas d'unité puisque le modèle peut s'appliquer de manière générale. Paramètres :  $I_1 = 1$ ,  $I_2 = 0.01$ ,  $e_N = 0.1$ ,  $e_D = 0.1$ ,  $r = 0.2$ ,  $m_P = 0.15$ ,  $m_H = 0.2$ ,  $d_{N1} = 0.001$ ,  $d_{N2} = 0.001$ ,  $d_{H1} = 0.02$ ,  $d_{H2} = 0.2$ ,  $d_{P1} = 0.0$  et  $d_{P2} = 0.0$

Les populations 1 et 2 sont modélisées à partir de (12), qui contient leurs réponses fonctionnelles (8), dépendantes de la température ainsi que de  $N_x$ . Comme  $d_{D_x}$  influence la concentration de nutriments disponibles et que cette concentration a un impact sur la réponse fonctionnelle des populations de producteurs, nous pouvons observer un lien indirect entre  $d_{D_x}$  et  $P_x$ . On peut donc voir les densités de  $P_x$  évoluer en fonction du taux de diffusion des détritux et de la température. Pour ce qui est de la population 1 (source), on observe une tendance générale à la baisse lorsque  $T^\circ$  et  $d_{D_x}$  augmentent respectivement,

avec une baisse encore plus marquée lorsque les deux effets sont combinés. Pour la population 2, l'augmentation de la température correspond également à une diminution du nombre d'individus dans la population, mais, contrairement à l'autre population, celle-ci augmente avec le taux de diffusion des détritits. Il est aussi intéressant de noter que, malgré les changements subis lors des simulations, les deux parcelles conservent respectivement leurs natures de source ou de puits ; nous n'observons pas d'alternance entre les deux.

## 5 Discussion

### 5.1 Interprétation des résultats

#### 5.1.1 Concentration des nutriments en fonction du taux de consommation des producteurs

Comme mentionné dans la section Résultats, l'évolution de la concentration des nutriments dépend principalement de l'environnement dans lequel se trouve la population de nutriments ; nous avons observé deux résultats très différents lorsque nous avons augmenté le taux de consommation des producteurs primaires ( $\alpha_x$ ) (Fig. 1). En effet, lorsque les nutriments habitent une parcelle source, leur concentration augmente avec  $\alpha_1$ , ce qui signifie que l'environnement est capable de soutenir les besoins de ses populations. Plusieurs éléments peuvent contribuer à la capacité de l'environnement à réapprovisionner ses nutriments, notamment la diffusion de détritits et de nutriments d'une parcelle à une autre. Lorsque les nutriments habitent une parcelle puit, leur concentration diminue avec ( $\alpha_x$ ), puisque l'environnement n'est pas capable de renouveler ses ressources par lui-même. Cette analyse nous permet de déduire qu'une augmentation du taux de consommation des producteurs primaires due aux changements climatiques pourrait contribuer à causer un grand contraste entre les apports en nutriments des sources et des puits, et rendre certaines régions difficilement habitables pour les producteurs primaires, et donc par la suite pour les herbivores. Cela serait une conséquence difficilement réversible, car une région peu habitée par les herbivores et les producteurs ne pourra alors pas efficacement renouveler sa population de détritits, qui est essentielle pour les producteurs primaires.



### 5.1.2 Taux de dispersion critique des herbivores selon la température

Nous avons vu précédemment (Fig. 2) que le taux de dispersion critique des herbivores diminue avec la température et que  $d_H^{crit}$  symbolise la valeur du taux de dispersion des herbivores à laquelle le flux des nutriments est équilibré d'une parcelle à l'autre. La baisse de  $d_H^{crit}$  facilite donc la relation  $d_H > d_H^{crit}$ , qui correspond à un flux de nutriments d'une source vers le puits. Bien que cela représente une dynamique typique entre les deux types d'environnement, la baisse de  $d_H^{crit}$  rend un changement d'état plus difficile, et peut contribuer à condamner une parcelle à manquer de nutriments.

### 5.1.3 Densité des populations de producteurs primaires

En ce qui concerne l'augmentation de la température, les effets sur les populations de producteurs primaires sont analogues pour la source et le puits (Fig. 3). En effet, la densité des populations va diminuer. Comme prévu par notre modèle et celui de Vasseur et coll., le taux de production par biomasse des producteurs va augmenter avec la température, sans que les ressources deviennent nécessairement davantage disponibles pour les soutenir. Cela permet à un plus petit nombre de producteurs de survivre dans leur environnement. Cependant, les sources et puits réagissent différemment à l'augmentation du taux de diffusion des détrit. Dans une parcelle source, l'augmentation de  $d_D$  fait diminuer  $P_1$ , car la diffusion des détrit vers la parcelle puits limite évidemment la quantité de ressources disponibles pour les producteurs, ce qui nuit au maintien de la taille de la population. À l'opposé, lorsque la parcelle puits reçoit une plus grande diffusion de détrit provenant de la source, elle dispose de davantage de ressources pour soutenir sa population de producteurs, qui peut alors augmenter.

## 5.2 Comparaison des modèles avec/sans dépendance à la température

Selon notre interprétation des résultats de la figure 3, les dynamiques sources-puits restent les mêmes peu importe la température et le taux de diffusion  $d_D$ , ce qui semble concorder avec les résultats obtenus par Gravel & al. dans l'intervalle des valeurs prises pour le taux de diffusion. Par contre, il est important de noter l'allure des courbes, qui semblent converger vers une asymptote horizontale dans notre cas, un comportement qui n'est pas vu dans leur analyse. De plus, alors que les comportements et dynamiques restent les mêmes avec l'augmentation de la température, la possibilité de changer d'état semble augmen-

ter. Il est possible que dans le contexte d'une seule simulation, les dynamiques aient changé plusieurs fois de telles manières qu'elles ne soient pas représentées dans la densité finale. Finalement, il est intéressant de noter que dans l'idéal, notre simulation à  $T_0$  aurait dû concorder avec les résultats de Gravel & al. Ceci reflète peut-être une faute de dérivation entre  $r$  le ratio production/biomasse et  $\alpha, \beta$ .

### 5.3 Limites de l'étude

Notre modèle se concentre principalement sur la dépendance métabolique à la température. Cependant, la température peut affecter d'autres aspects des écosystèmes, tels que les taux de reproduction, les interactions interspécifiques, et les cycles de vie des organismes. Il est de l'avis des auteurs que la température affecte directement le quasi-ensemble de nos paramètres. Par conséquent, notre modèle pourrait sous-estimer ou surestimer certains effets en ne prenant pas en compte ces facteurs supplémentaires. Pour rendre notre modèle mathématiquement tractable, nous avons dû simplifier plusieurs dynamiques écologiques complexes. Par exemple, nous avons considéré des réponses fonctionnelles linéaires pour les producteurs et les herbivores, ce qui peut ne pas refléter fidèlement les interactions non linéaires observées dans la nature. De plus, ces réponses fonctionnelles assument une dépendance à la température à partir de la dérivation des variables  $\alpha, \beta$  à partir du ratio production/biomasse. Hors, ce ratio fait seulement du sens dans le contexte du système ressource-consommateur pris par Vasseur & McCann, un modèle différent du notre à plusieurs niveaux, ne serait-ce que par la quantité d'interdépendances entre équations.

Les paramètres utilisés dans notre modèle sont dérivés de données empiriques disponibles dans la littérature. Cependant, ces paramètres peuvent varier considérablement selon les espèces et les environnements spécifiques, ainsi que la température. Par conséquent, les résultats de notre modèle peuvent ne pas être directement applicables à tous les écosystèmes marins ou à d'autres types d'écosystèmes.

Il serait possible d'améliorer ce modèle en effectuant des recherches supplémentaires sur ces paramètres et l'effet de la température. Ceci peut être difficile car la traduction du modèle à la réalité n'est pas directe et il y aura forcément des simplifications faites en cours de route.

## **5.4 Importance des résultats obtenus concernant la réponse aux changements climatiques**

Développer nos connaissances concernant les conséquences liées aux changements climatiques est une stratégie essentielle pour en faire une bonne gestion ainsi que pour faciliter la conservation de tous les écosystèmes (Gattuso et coll., 2018). Évidemment, cette étude se concentre plus particulièrement sur les écosystèmes marins, et reste une grande généralisation, considérant que nous ne prenons en compte que des poissons et des algues et que nous ignorons plusieurs dynamiques complexes dans le but de simplifier le modèle. Cependant, le principe reste le même, et chaque contribution au savoir scientifique permet une préparation plus complète aux changements climatiques. Dans notre cas, notre modèle permet de faire des prédictions concernant des parcelles de sources et de puits déjà connues. Cela pourra mener à de meilleurs efforts de conservation pour ces environnements, puisqu'il est maintenant possible de modéliser les effets de l'augmentation de la température sur certaines interactions entre les populations de nutriments, de détritus, de producteurs et d'herbivores entre des systèmes de sources et de puits. De plus, cela pourrait aussi mener à l'identification de certaines parcelles comme étant des sources ou des puits alors qu'elles subissent les effets des changements climatiques, comme nous avons modélisé certaines de leurs interactions typiques. Encore une fois, savoir reconnaître ces environnements ne peut qu'être bénéfique à leur conservation, car cela permet la mise en place de mesures de support visées, comme l'identification de zones à risque, la planification stratégique des zones de pêches et d'activités humaines, et la protection de zones occupées par des producteurs primaires et secondaires (Queirós et coll., 2016). Cela pourrait être particulièrement bénéfique pour les puits, qui nécessitent déjà des flots provenant d'autres parcelles pour faire survivre les populations les habitant.

## Références

- [1] Ecological Archives E091-151.
- [2] Karen Bisschop, Frederik Mortier, Rampal S. Etienne, and Dries Bonte. Transient local adaptation and source–sink dynamics in experimental populations experiencing spatially heterogeneous environments. *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences*, 286(1905) :20190738, June 2019. Publisher : Royal Society.
- [3] Jean-Pierre Gattuso, Alexandre K. Magnan, Laurent Bopp, William W. L. Cheung, Carlos M. Duarte, Jochen Hinkel, Elizabeth Mcleod, Fiorenza Micheli, Andreas Oschlies, Phillip Williamson, Raphaël Billé, Vasiliki I. Chalastani, Ruth D. Gates, Jean-Olivier Irisson, Jack J. Middelburg, Hans-Otto Pörtner, and Greg H. Rau. Ocean Solutions to Address Climate Change and Its Effects on Marine Ecosystems. *Frontiers in Marine Science*, 5, October 2018. Publisher : Frontiers.
- [4] Dominique Gravel, Frédéric Guichard, Michel Loreau, and Nicolas Mouquet. Source and sink dynamics in meta-ecosystems. *Ecology*, 91(7) :2172–2184, July 2010.
- [5] Wenna Hu. *Dry weight and cell density of individual algal and cyanobacterial cells for algae research and development*. Thesis, University of Missouri–Columbia, 2014. Accepted : 2015-08-05T18 :48 :44Z Publication Title : Submitted by University of Missouri–Columbia Graduate School.
- [6] Yadvinder Malhi, Janet Franklin, Nathalie Seddon, Martin Solan, Monica G. Turner, Christopher B. Field, and Nancy Knowlton. Climate change and ecosystems : threats, opportunities and solutions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 375(1794) :20190104, January 2020. Publisher : Royal Society.
- [7] H. Ronald Pulliam. Sources, Sinks, and Population Regulation. *The American Naturalist*, 132(5) :652–661, 1988. Publisher : [The University of Chicago Press, The American Society of Naturalists].

- [8] Ana M. Queirós, Klaus B. Huebert, Friedemann Keyl, Jose A. Fernandes, Willem Stolte, Marie Maar, Susan Kay, Miranda C. Jones, Katell G. Hamon, Gerrit Hendriksen, Youen Vermard, Paul Marchal, Lorna R. Teal, Paul J. Somerfield, Melanie C. Austen, Manuel Barange, Anne F. Sell, Icarus Allen, and Myron A. Peck. Solutions for ecosystem-level protection of ocean systems under climate change. *Global Change Biology*, 22(12) :3927–3936, 2016. \_eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/gcb.13423>.
- [9] David A. Vasseur and Kevin S. McCann. A Mechanistic Approach for Modeling Temperature-Dependent Consumer-Resource Dynamics. *The American Naturalist*, 166(2) :184–198, August 2005.
- [10] Daniel J. Wieczynski, Holly V. Moeller, and Jean P. Gibert. Mixotrophic microbes create carbon tipping points under warming. *Functional Ecology*, 37(7) :1774–1786, 2023. \_eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1365-2435.14350>.