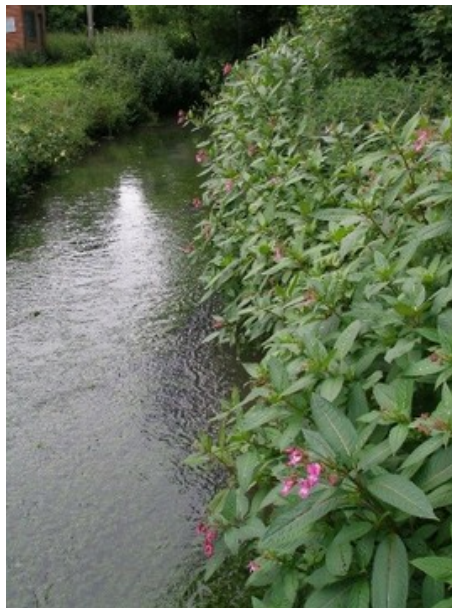


UCLouvain
Faculté des bioingénieurs



LBRTI2102 - Process-based modelling in bioscience engineering

Modélisation de la propagation d'*Impatiens glandulifera* le long d'un cours d'eau



GUILLAUME DE MEUE

**Encadrement : Emmanuel HANERT
Léolo GONAY**

Année académique 2018-2019

Table des matières

1	Introduction	2
2	Description du système	2
3	Processus clés	3
3.1	Advection	3
3.2	Diffusion	4
3.3	Réaction	5
3.4	Equations globales	6
4	Estimation des paramètres	7
5	Résultats et validation du modèle	8
6	Prédictions	10
7	Conclusion	12
8	Bibliographie	13
9	Annexes	14
9.1	Annexe 1 : Code MATLAB	14
9.2	Annexe 2 : Résultats détaillés pour B et R séparément	18

1 Introduction

La balsamine de l'Himalaya, de son nom latin *Impatiens glandulifera*, est une plante présente aujourd'hui dans de très nombreux pays. Elle est originaire, comme son nom l'indique, de l'Himalaya. Elle a été introduite en Europe comme plante ornementale, mais est maintenant considérée comme invasive en Belgique.

J'ai découvert cette plante lors d'un job étudiant à la commune d'Incourt. Pendant une journée, nous sommes allés arracher des balsamines de l'Himalaya le long des cours d'eau de la commune. C'est de là que m'est venue l'idée du sujet de ce travail.

La balsamine de l'Himalaya, bien qu'étant assez jolie, peut nuire de manière importante à la biodiversité. Appréciant les milieux humides, il est courant de la voir se répandre le long des cours d'eau où elle peut apparaître très compétitive vis-à-vis des espèces indigènes. Elle produit de grandes quantités de graines dans des capsules, qui lorsqu'elles éclatent peuvent projeter les graines à plusieurs mètres. A proximité des cours d'eau, une partie des graines peut se disperser par hydrochorie. Elle produit également un nectar très apprécié des insectes pollinisateurs. *Impatiens glandulifera* est une plante annuelle. Dans les endroits qu'elle a grandement colonisés, elle laisse donc les berges à nu pendant l'hiver, ce qui peut provoquer des problèmes d'érosion.

Le but de ce travail est de modéliser le comportement d'une population de balsamines de l'Himalaya le long d'un cours d'eau à l'aide d'un modèle *advection-diffusion-réaction* qui sera résolu grâce à la fonction `pdepe` de MATLAB.

2 Description du système

Le système étudié se situe le long d'une portion de cours d'eau de 200 mètres, qui ne sera considérée que dans une seule dimension spatiale. Elle sera exprimée par la variable x [m]. Un méandre important est présent à 130 mètres du début du domaine.

Les simulations s'effectuent sur une durée de 6 ans, avec une résolution temporelle de 1 an. Cela nous permet d'avoir un aperçu de la situation chaque année, ce qui constitue un pas de temps adéquat sachant que l'on s'intéresse à une plante annuelle. Le temps sera exprimé par la variable t [an].

On supposera qu'une fois les graines dispersées, elles restent dans la banque de graines pendant 1 an avant de germer. Il s'agit d'une relativement bonne approximation car les graines de balsamine de l'Himalaya germent rarement l'année même de leur dispersion et ne restent généralement pas plus d'un an dans la banque de graines.

La condition initiale établit une concentration de plantes sur les berges de 0.25

ind./m entre 45 et 55 mètres. On peut imaginer qu'un habitant proche du cours d'eau dispose de quelques plantes dans le fond de son jardin et qu'elles se sont répandues sur les rives.

Les conditions limites sont telles que $p + q f = 0$ avec $p = 0$ et $q = 1$ aussi bien à gauche qu'à droite.

3 Processus clés

3.1 Advection

Etant donné que la balsamine de l'Himalaya peut expulser ses graines à plusieurs mètres, on s'attend à ce que, chaque année, une partie des graines tombe dans le cours d'eau. Elles vont alors être emportées dans la direction du courant et être déposées plus loin sur les berges. Le phénomène d'advection est donc traduit par le fait que la propagation de la plante aura tendance à être accentuée dans la direction de l'écoulement du cours d'eau. Une des principales difficultés rencontrées lors de la conception de ce modèle est qu'il a fallu tenir compte du fait que seule une partie de la population est impactée par le phénomène d'advection. En effet, si certaines graines sont expulsées dans le cours d'eau, d'autres sont directement disséminées sur les berges à proximité de la plante qui les a produites. Ces dernières n'ont donc aucune raison de subir ce phénomène d'advection puisqu'elles ne sont pas emportées par le cours d'eau.

Pour pallier à cette contrainte, il a été décidé de définir deux populations distinctes :

- R : la population d'*Impatiens glandulifera* provenant de graines issues du cours d'eau exprimée en concentration [ind./m]
- B : la population d'*Impatiens glandulifera* provenant de graines ayant été directement disséminées sur les berges exprimée en concentration [ind./m]

L'advection peut s'exprimer simplement comme suit,

$$\frac{\partial R}{\partial t} = -u \frac{\partial R}{\partial x} \quad (1)$$

avec u la vitesse d'advection [m/an] considérée constante et positive. Notons que cela ne correspond pas à la vitesse instantanée des graines dans le cours d'eau mais à une vitesse moyennée sur un an.

De plus, il est envisageable que les graines aient tendance à s'accumuler sur la berge au niveau du méandre. Cela est pris en compte par l'ajout d'un puits de potentiel défini par la fonction suivante :

$$\phi(x) = \begin{cases} \phi_{max} \exp\left(\frac{-(x-x_\phi)^2}{s_\phi^2}\right) & \text{si } x \leq x_\phi \\ 0 & \text{si } x > x_\phi \end{cases}$$

avec

ϕ_{max} potentiel d'attraction maximum [m²/an]

x_ϕ la position du puits de potentiel [m]

s_ϕ l'étendue du potentiel d'attraction [m]

Une fois le méandre dépassé, les graines ne sont plus attirées, ce qui explique pourquoi la fonction $\phi(x)$ est définie par morceaux avec $\phi = 0$ si $x > x_\phi$ (voir aussi figure 1).

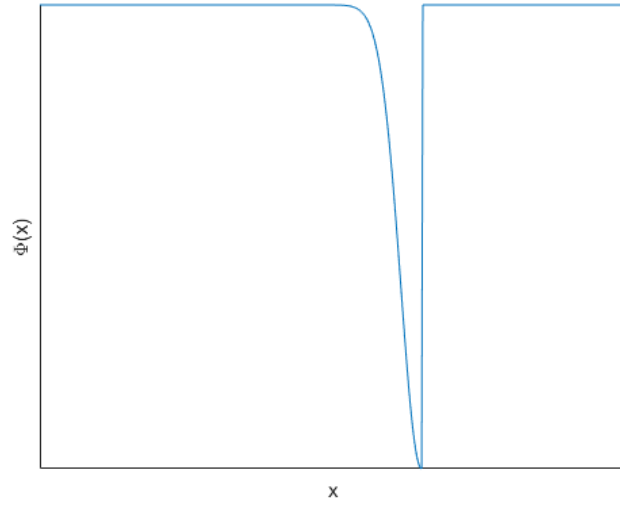


FIGURE 1 – Puits de potentiel créant une attraction vers le méandre

Ce puits de potentiel engendre une vitesse d'advection $-\frac{\partial\phi}{\partial x}$ vers le méandre. En l'ajoutant à l'équation (1), on obtient l'équation suivante pour l'advection :

$$\frac{\partial R}{\partial t} = -u \frac{\partial R}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial R}{\partial x} \quad (2)$$

3.2 Diffusion

Le phénomène de diffusion impacte nos deux populations R et B . Le caractère aléatoire de la circulation des graines dans le cours d'eau est exprimé comme suit :

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial R}{\partial x} \right) \quad (3)$$

avec K le coefficient de diffusion [m²/an] considéré constant.

La diffusion ne s'applique pas de la même manière sur la population des berges. Pour celle-ci, on a

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left((\alpha(x) + \beta(x)B) \frac{\partial B}{\partial x} \right) \quad (4)$$

avec

α le coefficient de diffusion [m^2/an] lié au caractère aléatoire de la dispersion des graines lorsqu'une capsule éclate. Il joue un rôle similaire à K bien qu'il s'agisse de coefficients différents.

βB le coefficient de diffusion [$\frac{\text{m}^3}{(\text{ind. an})} \frac{\text{ind}}{\text{m}}$] lié à la pression de population exprimant le fait que les nouvelles plantes auront tendance à pousser à l'écart des endroits trop densément peuplés.

3.3 Réaction

Une première composante du phénomène de réaction est liée aux échanges ayant lieu entre les deux populations R et B . D'une part, des graines provenant de plantes sur les berges vont être répandues dans le cours d'eau. D'autre part, les graines transportées par le cours d'eau vont rejoindre la rive. On peut traduire cela par les équations suivantes :

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \mu B - \sigma R \quad (5)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\mu B + \sigma R \quad (6)$$

avec

μ le taux auquel les individus entrent dans le cours d'eau [an^{-1}]

σ le taux auquel les individus rejoignent la rive [an^{-1}]

Remarque : R et B ont été définis comme des populations de plantes. Il est évident que ce sont des graines et non des plantes qui sont échangées entre la rive et le cours d'eau. On peut donc les voir comme les graines qui donneront naissance à une plante.

Ensuite, il faut bien sûr tenir compte du fait que chaque balsamine de l'Himalaya sur la rive peut produire de nombreuses graines, ce qui peut conduire rapidement à une croissance exponentielle de la population. L'introduction d'un seuil correspondant à une densité maximale d'individus S_{max} , par l'intermédiaire d'une fonction logistique, permet d'éviter l'obtention de densités surréalistes. La figure 2 illustre la fonction logistique $S(t) = S_{max} \frac{1}{1+ae^{-rt}}$ avec a un réel quelconque et r le coefficient de réaction [an^{-1}].

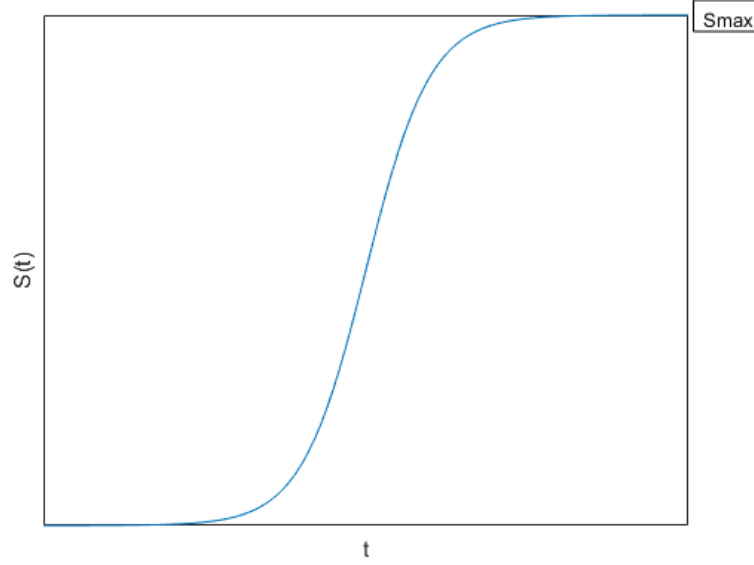


FIGURE 2 – Fonction logistique

En dérivant cette fonction, on obtient $\frac{\partial S}{\partial t} = rS \left(1 - \frac{S}{S_{max}}\right)$.

L'équation de réaction pour B devient donc

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\mu B + \sigma R + r(B + R) \left(1 - \frac{B + R}{S_{max}}\right) \quad (7)$$

3.4 Equations globales

Cette section a pour objet de présenter les équations globales résultant de la synthèse des processus d'advection, de diffusion et de réaction.

Pour la population du cours d'eau, en regroupant les équations 2, 3 et 5, on obtient

$$\frac{\partial R}{\partial t} = -u \frac{\partial R}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial R}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial R}{\partial x} \right) + \mu B - \sigma R \quad (8)$$

Pour la population des berges, en combinant les équations 4 et 7, on obtient

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left((\alpha(x) + \beta(x)B) \frac{\partial B}{\partial x} \right) - \mu B + \sigma R + r(B + R) \left(1 - \frac{B + R}{S_{max}}\right) \quad (9)$$

Ces équations seront résolues numériquement dans le modèle à l'aide de la fonction `pdepe` de MATLAB.

4 Estimation des paramètres

La vitesse d'advection u peut être vue comme la distance que parcourt en moyenne une graine dans le cours d'eau avant de rejoindre la rive, divisée par l'intervalle de temps d'un an afin de bien avoir une vitesse. On prend ici $u = 30$ m/an.

La position du puits de potentiel x_ϕ est fixée à 130 m, ce qui correspond simplement à la distance à laquelle se trouve le méandre par rapport à l'origine du système. L'étendue du potentiel d'attraction s_ϕ choisie est de 10 m, représentant l'estimation de la distance au méandre à partir de laquelle les graines vont être attirées, à condition qu'elles se trouvent en amont, vers la rive de celui-ci. Le potentiel d'attraction maximum ϕ_{max} est choisi comme le produit de s_ϕ avec la vitesse de déplacement maximale vers le méandre. En considérant cette dernière de 1 km/an, $\phi_{max} = 10^4$ m²/an.

Le comportement des graines dans le cours d'eau étant assez difficile à prédire précisément, le coefficient de diffusion K a son importance et la valeur de 20 m²/an lui est attribuée.

Les balsamines de l'Himalaya peuvent expulser leurs graines jusqu'à plus de 7 mètres. Si les graines projetées à cette distance sont moins nombreuses que celles qui tombent au pied de la plante, cela crée tout de même de la diffusion traduite par le paramètre α de 10 m²/an. Les nombreuses graines produites par la plante peuvent amener à une rapide augmentation de la concentration de plantes. β valant $\frac{\alpha}{S_{max}} = 0.5$ m³/ind. s tient compte de la pression de population que cela entraîne.

Le taux de retour des individus sur la rive σ est fixé à 1 an⁻¹ pour signifier qu'une graine qui a été dispersée dans l'eau rejoint la rive au terme d'un an. En pratique, c'est bien sûr plus rapide mais dans ce modèle, on travaille avec des vitesses moyennées sur un an.

Le taux auquel les individus entrent dans le cours d'eau μ ne doit à priori pas être trop élevé car il faut tenir compte du fait que la majorité des graines est sans doute dispersée sur les berges et non dans le cours d'eau. Cependant, plus les plantes se situent proches du cours d'eau, plus μ aura tendance à être grand. C'est aussi le cas si les berges sont fortement inclinées vers le cours d'eau. Il est également envisageable que des graines initialement disséminées sur les berges rejoignent ensuite le cours d'eau suite, par exemple, au ruissellement. La valeur choisie pour μ est 0.4 an⁻¹.

Le paramètre r est le plus déterminant quant à l'évolution du nombre d'individus puisqu'il synthétise le produit du nombre de graines par plante avec le taux de germination. La valeur choisie pour r est 2. Cela peut paraître assez faible au regard de l'important nombre de graines que produit une balsamine de l'Himalaya mais le

taux de germination peut être limité par différents éléments comme des conditions météorologiques peu favorables, un enfouissement trop ou pas assez important, la prédation, la concurrence avec les autres plantes ... De plus, à cause de la fonction de croissance logistique, un r trop élevé requiert un pas d'espace très fin pour la résolution numérique du problème, sinon on observe un effet de diffusion non désiré.

Impatiens glandulifera peut croître dans des populations assez denses mais il s'agit tout de même d'une grande plante, pour une annuelle. La concentration maximale de plantes S_{max} est estimée à 20 ind./m.

5 Résultats et validation du modèle

Le code MATLAB servant à la résolution numérique du problème est présenté en annexe 1.

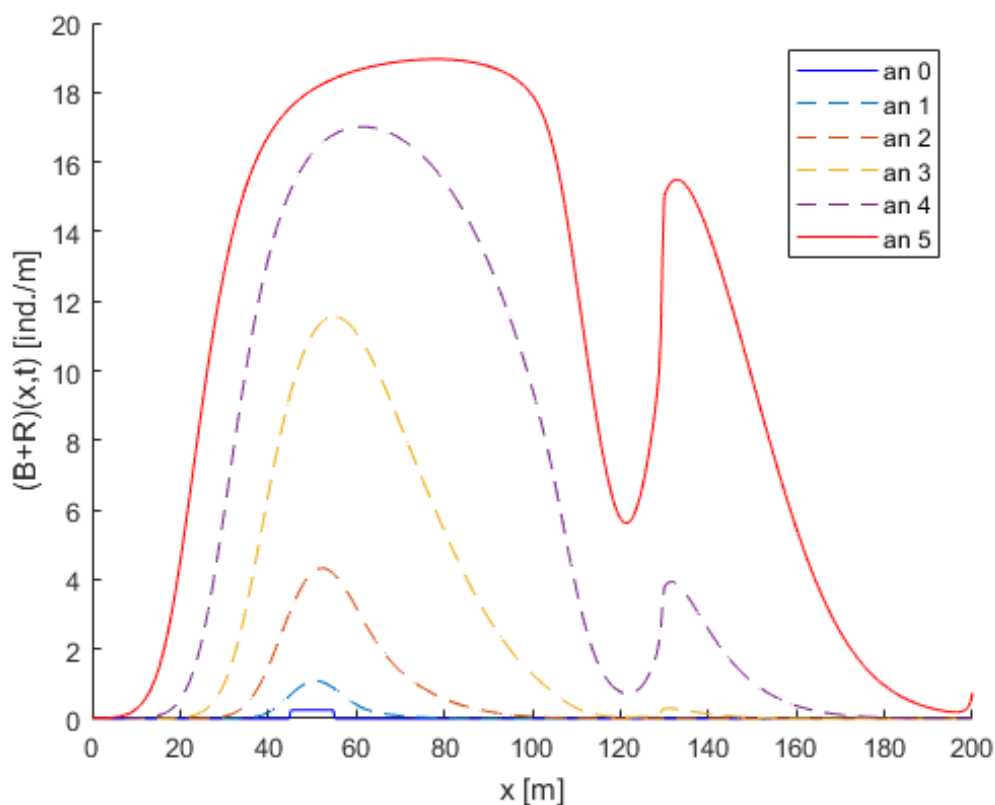


FIGURE 3 – Evolution de la population d'*Impatiens glandulifera* au cours du temps dans le domaine considéré

La figure 3 ci-dessus en présente les résultats. Elle montre l'évolution au cours du temps de la population totale de balsamines de l'Himalya dans notre domaine.

L'an 0 correspond à la condition initiale. On part donc d'une densité de plantes de 0.25 ind./m entre 45 et 55 m. On remarque directement que la concentration de plantes dans le domaine augmente considérablement d'une année à l'autre. A environ 55 mètres, par exemple, entre l'an 2 et l'an 3, la concentration a presque triplé. Entre l'an 4 et l'an 5, cette augmentation est plus limitée, ce qui est dû à l'approche du seuil de concentration maximale S_{max} et à la pression de population induisant une plus grande diffusion pour des hautes densités de population. En regardant ce qu'il se passe entre 0 et 120 mètres, avant l'influence du méandre, le phénomène de diffusion de manière générale est d'ailleurs bien visible, la zone de répartition des plantes s'élargissant au fil des ans. Le courant du cours d'eau, bien qu'agissant uniquement sur les graines disséminées dans celui-ci, est suffisant pour observer un phénomène d'advection. On voit en effet que les pics de concentration se déplacent vers la droite. Après quelques années, la répartition des balsamines de l'Himalaya est telle que certaines sont présentes au-delà des 120 mètres. Les graines dispersées dans le cours d'eau sont alors attirées vers le méandre. Vers 130 mètres, un nouveau pic de population se forme. Le modèle permet donc d'expliquer une réalité observée sur le terrain, à savoir que les balsamines ne semblaient pas avoir une concentration constante, ni suivant la forme d'une gaussienne le long du cours d'eau mais présentaient des pics de concentration à des endroits localisés pouvant correspondre aux méandres.

Les différents processus clés pris en compte semblent bien représentés par le modèle et la population se comporte conformément aux attentes. Malheureusement, je n'ai pas eu accès à des données chiffrées permettant une validation plus poussée.

Les figures 7 et 8 de l'annexe 2 montrent les mêmes résultats mais respectivement pour les populations B et R représentées séparément. On y voit par exemple que l'advection liée au cours d'eau impacte uniquement la population R .

6 Prédiction

Lorsqu'on remarque une population de balsamines de l'Himalaya, mieux vaut essayer d'agir pour éviter sa propagation. Pour cela, il est préférable d'arracher les balsamines au début de l'été, avant la dispersion des graines. Essayons d'évaluer l'impact de différentes actions sur la propagation des balsamines. Pour cela, on va considérer que r vaut -1 lorsqu'il y a intervention et reste de 2 sans intervention.

Un premier cas possible est celui pour lequel l'arrachage des balsamines est effectué une seule année sur l'entièreté du domaine. La figure 4 illustre ce cas pour un arrachage lors de l'an 2.

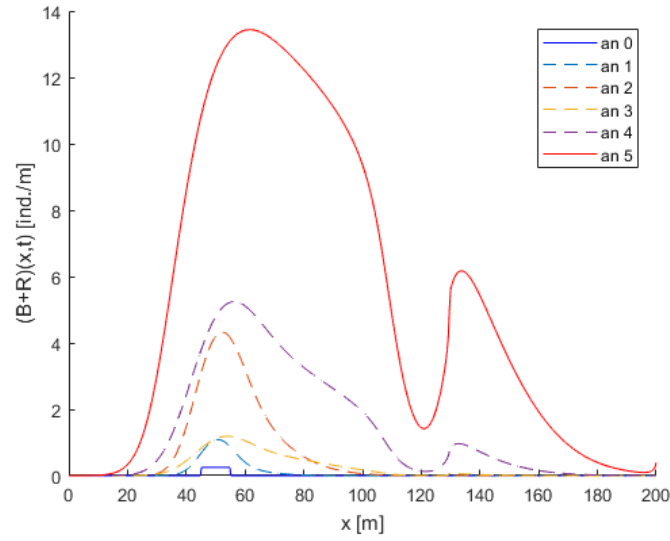


FIGURE 4 – Evolution de la population d'*Impatiens glandulifera* au cours du temps dans le domaine considéré avec intervention sur tout le domaine lors de l'an 2

Comme attendu, la propagation reprendra son cours les années suivantes et on ne fait que réduire temporairement le nombre de balsamines.

Si les moyens ne sont pas suffisants pour couvrir l'entièreté du domaine, il vaut mieux procéder à l'arrachage en amont plutôt qu'en aval. La figure 5 illustre l'évolution de B avec un arrachage au-delà des 120 m lors de l'an 4. La simulation est effectuée sur une année de plus que les autres. L'importante densité de plantes en amont, ainsi que la proximité du méandre provoque une augmentation conséquente de la concentration de plantes à l'endroit d'intervention durant les années suivantes.

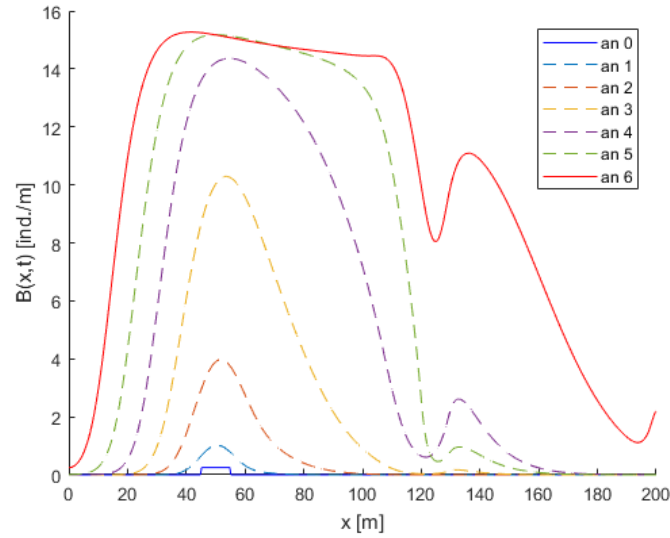


FIGURE 5 – Evolution de B au cours du temps dans le domaine considéré avec intervention en l'an 4 pour $x > 120\text{m}$

L'idéal est bien entendu de répéter l'arrachage chaque année sur l'entièreté du domaine (figure 6). De cette manière on peut réduire le nombre de balsamines et maintenir la population à une faible densité, jusqu'à éventuellement l'éradiquer.

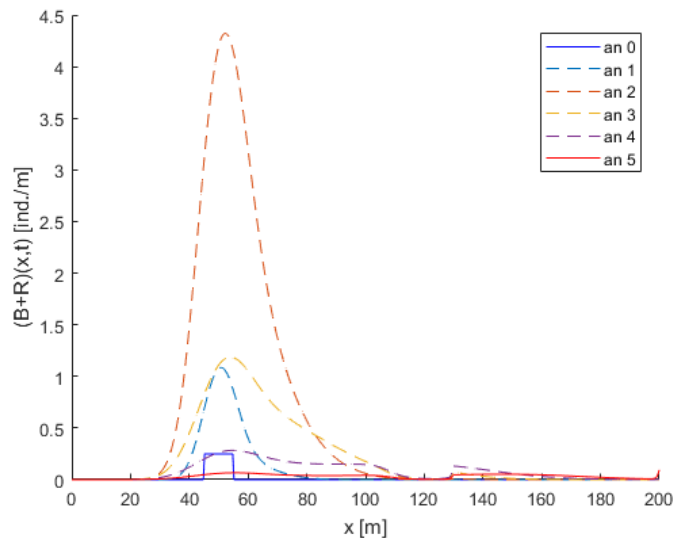


FIGURE 6 – Evolution de la population d'*Impatiens glandulifera* au cours du temps dans le domaine considéré avec intervention chaque année à partir de l'an 2 sur tout le domaine

7 Conclusion

Le modèle élaboré vise à décrire le comportement d'une population d'*Impatiens glandulifera* le long d'un cours d'eau. Il permet de visualiser facilement l'évolution de la population en combinant différents processus clés. Bien sûr, il est différent de la réalité et pourrait être grandement amélioré, à commencer par une validation basée sur des données chiffrées qui auraient notamment permis un choix plus affiné des paramètres. A mesure que la compréhension du système s'améliore, l'introduction ou la modification de certains processus est toujours possible. Comme pour tout modèle, il faut rester critique vis-à-vis des résultats. S'il n'est pas exempt de défauts, le modèle proposé soutient néanmoins le fait que les modèles *advection-diffusion-réaction* sont souvent des outils très intéressants et pertinents dans le domaine de l'écologie.

8 Bibliographie

Fournier, A. (2018). *Modéliser et prédire les invasions biologiques*. 264. En ligne : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01826647/document>, consulté le 27/07/19.

Contrat de rivière Dyle-Gette. (2012). *Lutte plantes invasives 2010-2012 - rapport final*. 30. En ligne : <http://www.crdg.eu/component/jdownloads/send/30-invasives/230-bilan-invasives-2010-2012>, consulté le 27/07/19.

Fédération des Conservatoires botaniques nationaux. (s. d.). *Impatiens glandulifera Royle*. 5. En ligne : http://www.fcbn.fr/sites/fcbn.fr/files/ressource_telechargeable/fiche_impatiens_glandulifera_sr.pdf, consulté le 27/07/19.

Image de la page de garde issue de :

Marchin, (s. d.). *Balsamine de l'Himalaya : Le Contrat de Rivière fait appel aux bonnes volontés*. En ligne : <http://www.marchin.be/la-commune/institutions/contrat-de-riviere-du-hoyoux/balsamine-de-lhimalaya-le-contrat-de-riviere-fait-appel-aux-bonnes-volontes-1>, consulté le 27/07/19.

Marteau, B. (2013). *Invasions biologiques en Milieu Aquatique : Modèles prévisionnels de dispersion*. 57. En ligne : <http://www.gt-ibma.eu/wp-content/uploads/2013/01/Invasionsbiologiquesenmilieuxaquatiques-Mod%C3%A8lespr%C3%A9visionnelsdedispersion-.pdf>, consulté le 27/07/19.

Pachepsky, E., Lutscher, F., Nisbet, R. M., Lewis, M. A. (2005). Persistence, spread and the drift paradox. *Theoretical Population Biology*, 67(1), 61-73. En ligne : <https://escholarship.org/uc/item/53t692mh>, consulté le 27/07/19.

9 Annexes

9.1 Annexe 1 : Code MATLAB

```
function [] = Impatiens_glandulifera()

clear; close all; clc;

% Physical parameters
L = 0.2*1e3;           % Domain size (m)
Smax = 20;             % Maximal population density(plants/m)

alpha = 10;            % Diffusivity in absence of
                        % other plants ( $m^2/an$ )
beta = alpha/Smax;     % Diffusivity contribution due to
                        % other plants ( $m^3/(ind*an)$ )

mu = 0.4;              % rate of entry in the stream ( $1/an$ )
sigma = 1;             % rate of return to banks ( $1/an$ )
u = 30;                % stream advection ( $m/an$ )
k = 20;                % stream diffusivity ( $m^2/an$ )

sPhi = 10;             % Spread of potential for meander
                        % attraction (m)
umax = 5*L;           % Max velocity in direction of
                        % meander (m/s)
xPhi = 0.65*L;         % meander position (m)
Phimax = sPhi*umax;    % Max of potential for environmental
                        % attraction ( $m^2/s$ )

% Definition of a structure containing
% all the problem parameters
my_para = struct('L',L,'Smax',Smax,'alpha',alpha,'beta',beta,...
    'mu',mu,'sigma',sigma,'u',u,'k',k,...
    'sPhi',sPhi,'umax',umax,'xPhi',xPhi,'Phimax',Phimax);

% Numerical parameters
m = 0;
x = linspace(0, L ,501); % 300 pas d'espace
t = linspace(0,5,6);     % 10 pas de temps

% PDE solver
options = odeset;
```

```

sol = pdepe(m,@pde,@ic,@bc,x,t,...
    options,my_para);

R = sol(:,:,1); B = sol(:,:,2);

figure; set(gcf,'Color',[1 1 1]) % 2D snapshots of the solution
% -> plot with R
ax1 = gca;
set(ax1,'Xlim',[0 my_para.L],'YLim',[0 1.001*my_para.Smax],...
    'fontsize',15,'Ycolor','b','xtick',[]);
set(get(ax1,'YLabel'),'String','R(x,t)','fontsize',15)
for i=1:length(t)
    hl1 = line(x,R(i,:), 'Color','b');
    if i==1
        set(hl1,'linewidth',2)
    end
end
% -> plot with B
ax2 = axes('Position',get(ax1,'Position'),'YAxisLocation','right',...
    'Color','none');
set(ax2,'Xlim',[0 my_para.L],'YLim',[0 my_para.Smax],'fontsize',15,...
    'Ycolor','r');
set(get(ax2,'YLabel'),'String','B(x,t)','fontsize',15)
set(get(ax2,'XLabel'),'String','x [miles]','fontsize',15)
for i=1:length(t)
    hl2 = line(x,B(i,:), 'Color','r','Parent',ax2);
    if i==1
        set(hl2,'linewidth',2)
    end
end

% -> 2D snapshots of the solution B
figure
set(gcf,'Color',[1 1 1]); set(gca,'fontsize',15);
plot(x,sol(1,:,2),'-b'); hold on
for i=2:length(t)-1
    plot(x,sol(i,:,2),'--'); hold on
end
plot(x,sol(length(t),:,2),'-r');
box off; xlabel('x [m]'); ylabel('B(x,t) [ind./m]');

% -> 2D snapshots of the solution R
figure
set(gcf,'Color',[1 1 1]); set(gca,'fontsize',15);
plot(x,sol(1,:,1),'-b'); hold on

```

```

for i=2:length(t)-1
    plot(x,sol(i,:,1),'--'); hold on
end
plot(x,sol(length(t),:,1),'-r');
box off; xlabel('x [m]'); ylabel('R(x,t) [ind./m]');

% -> 2D snapshots of the solution B+R
figure
set(gcf,'Color',[1 1 1]); set(gca,'fontsize',15);
plot(x,sol(1,:,2)+sol(1,:,1),'-b'); hold on
for i=2:length(t)-1
    plot(x,sol(i,:,2)+sol(i,:,1),'--'); hold on
end
plot(x,sol(length(t),:,2)+sol(length(t),:,1),'-r');
box off; xlabel('x [m]'); ylabel('(B+R)(x,t) [ind./m]');

% -> Potential for meander attraction
figure
set(gcf,'Color',[1 1 1]); set(gca,'fontsize',15);
plot(x,get_Phi(x,my_para));
box off; xlabel('x'); ylabel('\Phi(x)');
return

function [c,f,s] = pde(x,t,u,dudx,my_para)
% Function to define the PDE
c = [1; 1];
K = [my_para.k; my_para.alpha + my_para.beta*u(2)];
V = [my_para.u + get_advvel(x,my_para); 0];
f = K .* dudx - V .* u;
s = [my_para.mu*u(2)-my_para.sigma*u(1);...
     -my_para.mu*u(2)+my_para.sigma*u(1) + ...
     get_r(x,t,my_para)*(u(2)+u(1)) .* (1-((u(2)+u(1))/my_para.Smax))];
return

function u0 = ic(x,my_para)
% Function to define the initial condition
R0 = zeros(size(x));
B0 = 0.25 .* (x>my_para.L*0.25-5 & x<my_para.L*0.25+5) + ...
     0 .* not(x>my_para.L*0.25-5 & x<my_para.L*0.25+5);
u0 = [R0; B0];

function [pl,ql,pr,qr] = bc(xl,ul,xr,ur,t,my_para)
% Function to define the left and right bc: p+q*f = 0
pl = [0; 0]; ql = [1; 1];
pr = [0; 0]; qr = [1; 1];

```



```

function Phi = get_Phi(x,my_para)
% Function to define the potential of env. attraction
%
Phi = (-my_para.Phimax * exp(-(x-my_para.xPhi)...
    .*(x-my_para.xPhi)/(my_para.sPhi*my_para.sPhi))).*(x<=my_para.xPhi) ...
    + 0 .* not(x<=my_para.xPhi);
return

function V = get_advvel(x,my_para)
% Function to define the advection vel. V = -dPhi/dx
V = (x-my_para.xPhi) .* get_Phi(x,my_para)...
    / (my_para.sPhi*my_para.sPhi);
return

function r = get_r(x,t,my_para)
% Function to define r
r = 2; % no intervention
% intervention year 2
%r = -1 .*(t<=3 & t>=2) + 2 .* not(t<=3 & t>=2);
% intervention year > 2
%r = 2 .* (t<=2) + -1 .* not(t<=2);
% intervention year 4, x > 120m
%r = -1 .* (x>120 & t>4 & t<5) + 2.* not(x>120 & t>4 & t<5);

return

```

9.2 Annexe 2 : Résultats détaillés pour B et R séparément

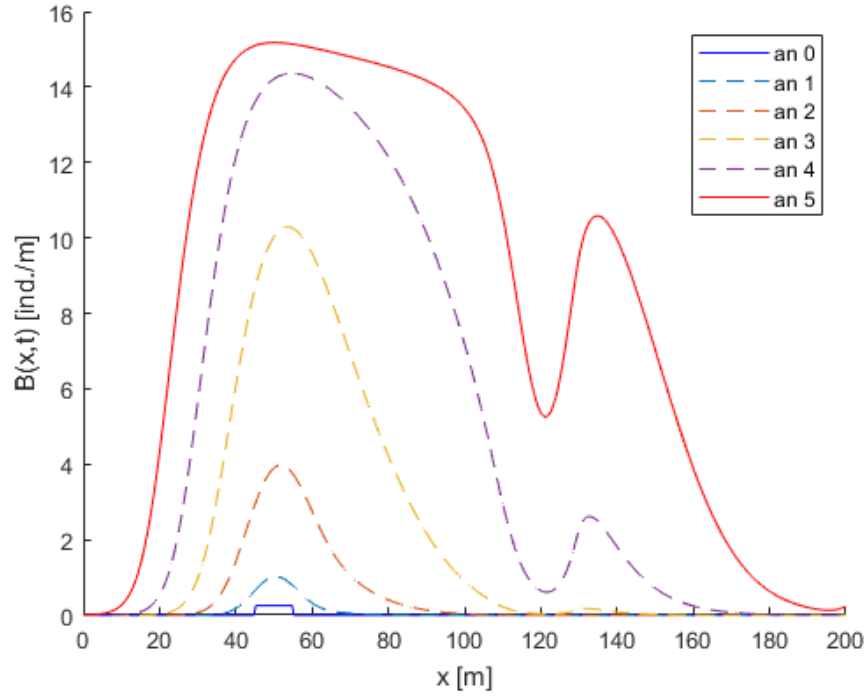


FIGURE 7 – Evolution de B au cours du temps dans le domaine considéré

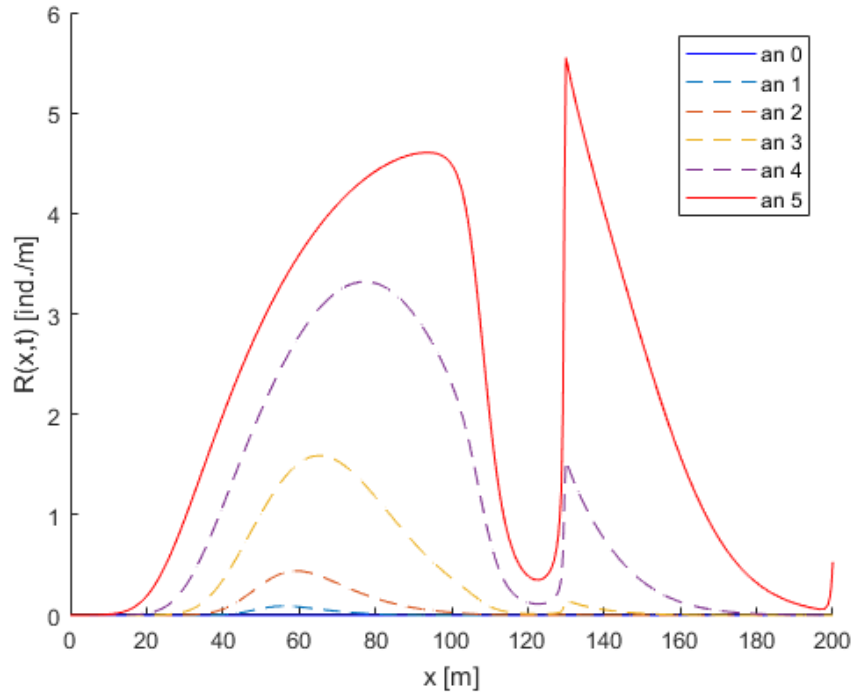


FIGURE 8 – Evolution de R au cours du temps dans le domaine considéré