



Ecologie de la conservation, contrôle des systèmes (agro-)écologiques

Indicateurs de durabilité: contrôle des systèmes socio-écologiques : contributions à la gestion des plantes invasives

Sophie Martin (LISC)

AG MIA – 22 MAI 2019



Financement : Irstea – EDF (LNHE)
Début de la thèse : octobre 2018

TITRE DE LA THÈSE

Invasions biologiques végétales : modéliser les stratégies d'intervention précoce et de contrôle sur le long-terme et évaluer leur efficacité en fonction du niveau de prolifération

Doctorant :

- François Lavallée

Collaborations:

- F. Dommaget, F. Martin, B. Reineking, C. Smadi (Irstea - LESSEM)
- G. Cherel, M. Leclaire, R. Reuillon (ISC)
- M. Boyer (CCEAU)
- L. Santoni : LNHE (EDF)
- I. Alvarez, S. Martin (Irstea – LISC)

Stratégie :



- Modéliser la croissance d'un tache de renouée
- Modéliser la croissance de renouée dans un paysage (phénomènes de dispersion)
- Définir les objectifs de gestion et évaluer l'efficacité des modes de gestion

La renouée du Japon



Tiges : de 1 a 3 metres.

Rhizome : jusqu'a 8 cm de diamètre, longueur : 15 - 20 m, profondeur : 2 - 3 m, représente 2/3 de la masse totale de la biomasse de la plante.

Le rhizome résiste au froid et lui permet de passer la mauvaise saison enfouie dans le sol.

La renouée du Japon

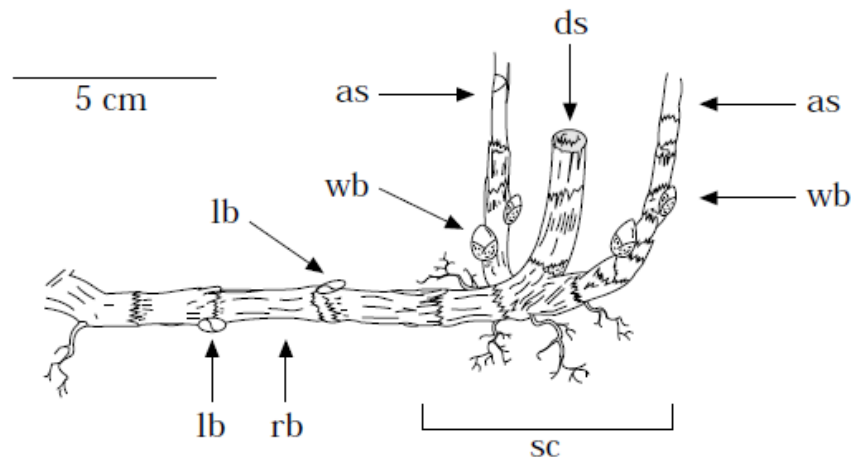


Figure - Schéma du développement des tiges et des bourgeons le long du rhizome, extrait de [Adachi et al., 1996] as : tige aérienne, ds : tige aérienne morte, rb : rhizome, sc : couronne, lb : bourgeon latéral, wb : bourgeon hivernal.

Etude de la littérature : pas de modèle décrivant la croissance d'une tache fauchée

- [Smith et al., 2007] ont construit une marche aléatoire 3D corrélée pour le développement du réseau de rhizome souterrain.
- [Dauer and Jongejans, 2013] proposent un modèle de type "Integral Projection Model" (IPM), inspire de "Matrix Population Model", pour la dynamique de la plante au niveau d'une tache.
- [Gourley et al., 2016] ont développé un modèle de biocontrôle de la Renouée, base sur l'insecte Psyllid *Aphalara itadori* qui se nourrit de la sève des tiges de la Renouée. Modèle déterministe qui décrit l'évolution du nombre d'insectes (larve et adulte) ainsi que l'évolution du nombre total de tiges et de la biomasse totale du rhizome.

Développement du modèle MIMAK

PROCESSUS STOCHASTIQUES A VALEURS MESURES

Les individus, ici les couronnes (ie les lieux où se situent les bourgeons terminaux et d'où sortent les tiges) sont caractérisés par :

- leur position (dans le plan)
- un trait décrivant la biomasse souterraine (ie celle du rhizome qui est relié à la couronne)

.Hypothèses de modélisation :

- Taux de naissance et la loi de dispersion de la couronne fille (compétition intra-spécifique)
- Taux de mortalité
- Equation différentielle gouvernant l'évolution de la biomasse souterraine en absence de fauche
- Effet de la fauche : diminution de la biomasse souterraine, ressources du rhizome utilisées pour la croissance des parties aériennes (plus important pour les biomasses faibles)

Les paramètres du modèle

Variable	Description
Biomasse	
K	biomasse maximale (g)
L	taux de croissance à faible biomasse
a_0	biomasse initiale d'une couronne qui naît (g)
Fauche	
τ	nombre moyen de fauches par année
<i>proportionMowing</i> <i>mowingParameter</i>	proportion des plantes fauchées effet de la fauche
Mortalité	
<i>deathParameterScaling</i>	pour les faibles biomasses
<i>deathParameterDecrease</i>	vitesse de décroissance du taux
Naissance	
<i>distanceParent</i>	distance dominance apicale (m)
<i>distanceCompetition</i>	distance de compétition intra spécifique (m)
\bar{b}	taux de naissance (conditions idéales)
(shape, scale)	loi Gamma, dispersion de l'individu créé

Equation différentielle stochastique

$$\begin{aligned}
 Z_t = & \sum_{i=1}^{N_0} \delta_{(X_i(Z_0), A_b(t, 0, A_i(Z_0)))} \\
 & + \int_0^t \int_{\mathbb{N}^*} \int_{\mathbb{R}_+} \int_{\mathbb{R}^2} \mathbf{1}_{\{i \leq N_{s-}\}} \delta_{(X_i(Z_s) + z, A_b(t, s, a_0))} \\
 & \times \mathbf{1}_{\{\theta \leq b(X_i(Z_s), Z_s)\}} \mathbf{1}_{\{X_i(Z_s) + z \in C_{X_i(Z_s), Z_s}\}} \times M_1(ds, di, d\theta, dz) \\
 & + \int_0^t \int_{[0,1]^{\mathbb{N}^*}} \int_0^1 \sum_{i=1}^{N_{s-}} \mathbf{1}_{y_i \leq \text{proportionMowing}} \\
 & (\delta_{(X_i(Z_s), A_b(t, s, A_i(Z_{s-})).F(A_i(Z_{s-})))}) - \delta_{(X_i(Z_s), A_b(t, s, A_i(Z_s)))}) M_2(ds, dy) \\
 & - \int_0^t \int_{\mathbb{N}^*} \int_{\mathbb{R}_+} \mathbf{1}_{\{i \leq N_{s-}\}} \mathbf{1}_{\{\theta \leq m(A_i(Z_s))\}} \delta_{(X_i(Z_s), A_b(t, s, A_i(Z_s)))} M_3(ds, di, d\theta).
 \end{aligned}$$

$M_1(ds, di, d\theta, dz)$ est une mesure ponctuelle de Poisson sur $E_1 := \mathbb{R}_+ \times \mathbb{N}^* \times \mathbb{R}_+ \times \mathbb{R}^2$ d'intensité $\nu_1 = ds \otimes n(di) \otimes d\theta \otimes D(dz)$.

Etude du modèle

- Sans terme de fauche : convergence en loi vers un processus solution d'une équation aux dérivées partielles
- Avec terme de fauche : étude par simulations

Calibration

Données fournies par F. Martin (LESSEM) : 48 taches de renouées dans les Alpes, mesures réalisées en 2008 et en 2015

tache	taille 2008	Aire 2008	Taille 2015	Aire 2015	τ	FullMow
1	261	14.525	112	10.815	0	0
2	1878	52.177	872	42.187	1	0
3	1063	75.899	1493	72.829	1	1
4	1771	104.203	852	49.273	2	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

OpenMole utilise une méthode issue des algorithmes génétiques pour la calibration



Variable	Valeur Calibration
K	12.72
L	0.26
distanceCompetition	0.15
distanceParent	0.20
shape	4.34
scale	2.36
deathParameterDecrease	2.32
deathParameterScaling	1.12
mowingParameter	0.11
bbar	0.18
a0	1.73
delta	26.06
evolution.samples	79

Valeurs obtenues

Evolution de l'aire et de la taille moyennes finales d'une tache en fonction des caractéristiques de la fauche

Analyse du modèle par simulation



Sorties peuvent être approchées par des lois normales

Leurs moyennes par des fonctions relativement simples

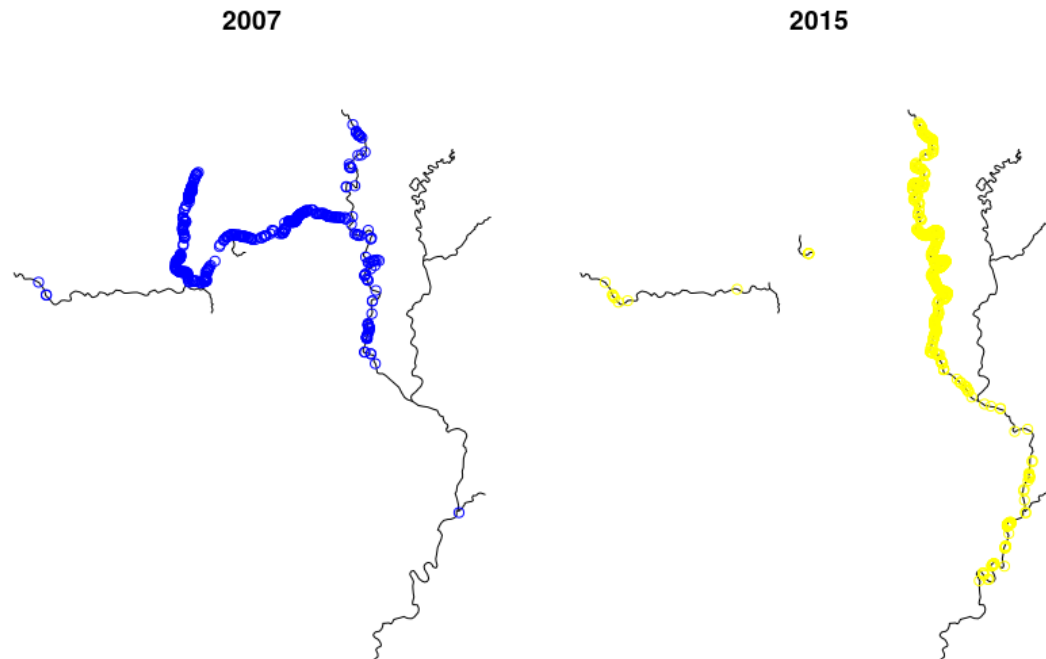
Taille Moyenne Finale = Taille Initiale $\times \exp(-T(\zeta-a)/b)$

Aire Moyenne Finale = $\max((c \times \zeta + d \cdot T^2 + \text{Aire Initiale}), 0)$

	Mean Area	Mean Size
Regression tool	<i>lm</i>	<i>nls</i>
Correlation	> 0.99	> 0.99
95 % confident interval	$c \in [-0.0342; -0.0336]$	$a \in [0.90; 0.94]$
	$d \in [0.0960; 0.0998]$	$b \in [20.46; 20.77]$

Quelles politiques de fauche pour confiner les taches de renouées le long d'un linéaire?

Berges de l'Hérault et de ses affluents : données récoltées par équipe de M. Boyer (ingénieur au CCEAU)



Modèle de dynamiques de taches de Renouée le long d'un cours d'eau

Etude bibliographique de la dispersion de la Renouée par hydrochorie : dispersion essentiellement de manière clonale par transport de morceaux de tiges ou rhizomes, mais par les akènes issus de reproduction sexuée.

Hypothèses de modélisation :

- L'aire de chaque tache évolue suivant l'évolution moyenne déterminée dans la première partie
- Une variable globale compte chaque année les propagules dispersées et présentes sur les berges (accumulateur de propagules) qui peuvent servir à créer de nouvelles taches.
- Pour modéliser le fait que toutes les propagules dispersées ne germent pas, et ne forment pas toutes une plantule viable, nous considérons un paramètre qui indique le nombre de propagules nécessaire pour créer une nouvelle tache (différent pour les akènes et pour les rhizomes).

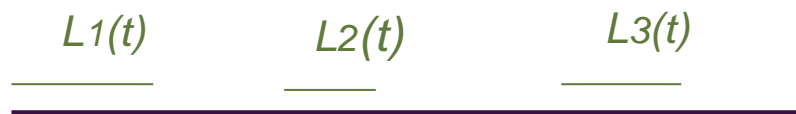
Inclusions différentielles

A partir d'un état initial, un ensemble d'évolutions est envisagé, chaque évolution pouvant correspondre à une stratégie de fauche et une suite d'occurrences de perturbations.

Problèmes de viabilité à résoudre :

Étant données une situation initiale et une capacité de fauche,

- est-il possible de limiter la zone infestée? Si oui, comment allouer l'effort de fauche pour y parvenir?
- Est-il possible de réduire la taille de cette zone? Jusqu'à quel seuil?



$$\sum_i l_i(t) \leq S$$

Les concepts de la théorie mathématique de la viabilité

Etude de la compatibilité entre des dynamiques multivoques et un ensemble de contraintes dans l'espace des états.

Formalisme : inclusions différentielles : $x'(t) \in F(x(t))$

Par exemple, système dynamique contrôlé : $x'(t) = f(x(t), u(t))$ avec $u(t) \in U(x(t))$.

Etant donné un sous-ensemble de l'espace des états, K , et un point de ce sous-ensemble, x , existe-t-il une fonction de contrôle qui soit telle que l'évolution issue de x reste dans K pour tout t ?

Si oui, x est dit viable et appartient au **noyau de viabilité** de K .

Un formalisme adapté à l'ingénierie de l'environnement et du développement durable

1^{ER} ATOU : UNE FORMULATION DE PROBLÈME CENTRÉE SUR LES CONTRAINTES

Viabilité : maintenir un système dynamique dans un ensemble de contraintes

–Les contraintes s'expriment dans l'espace d'état

En pratique : on ne choisit pas de critère d'optimisation ou de scénario d'action prédéfini, mais on choisit les zones de fonctionnement souhaitable et les actions possibles

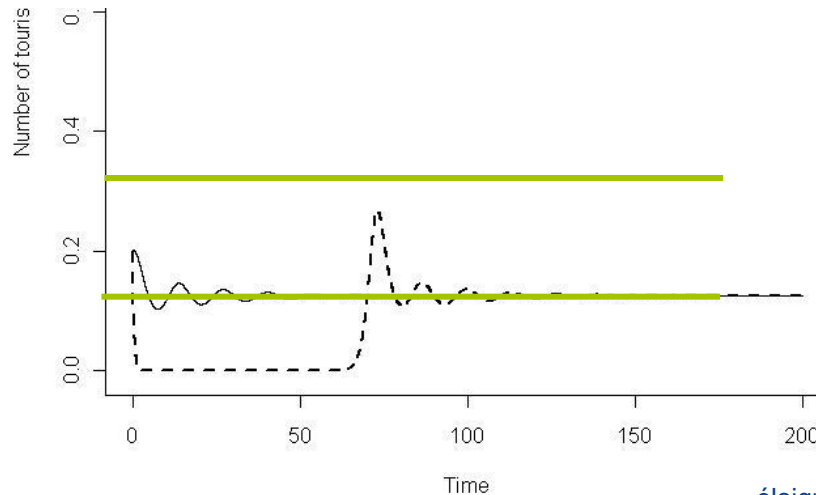
Intérêt : formalisme mieux adapté

–à la gestion environnementale (seuils, évitement, difficulté à définir ce qui est optimal, etc.)

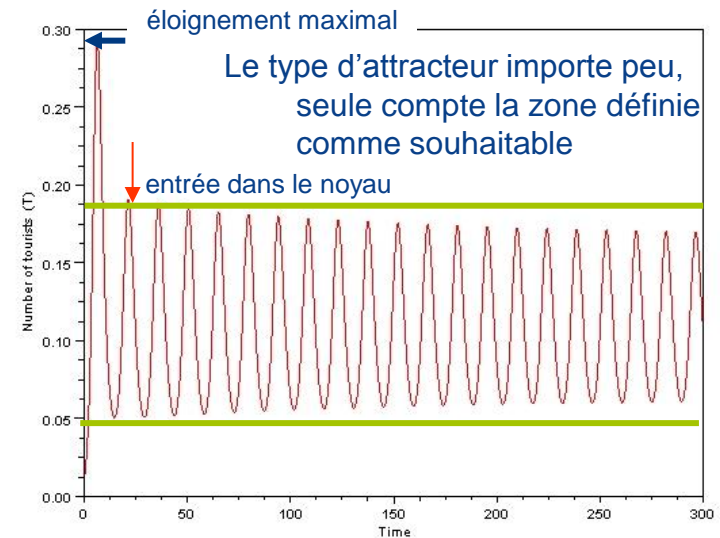
–à la négociation entre acteurs

Un formalisme adapté à l'ingénierie de l'environnement et du développement durable

2^{EME} ATOUT : PRISE EN COMPTE DES COMPORTEMENTS TRANSITOIRES



La viabilité ne se focalise pas sur les résultats asymptotiques



Un formalisme adapté à l'ingénierie de l'environnement et du développement durable

3^{EME} ATOUT : DES RÉSULTATS CENTRÉS SUR L'ENSEMBLE DES POSSIBLES

L'effet des contrôles fait partie du modèle

Indicateurs sur les ensembles résultats

- critères géométriques de description du noyau ou du bassin de capture
- sensibilité

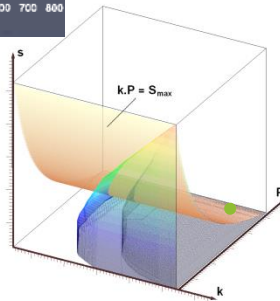
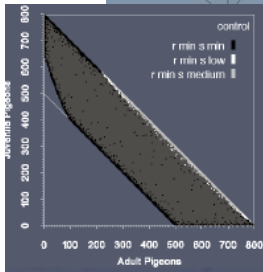
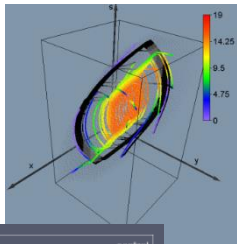
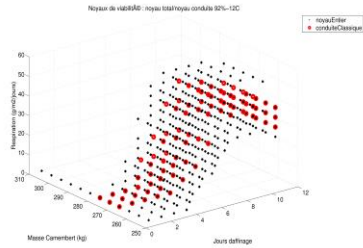
Indicateurs pour les états

- Fonction de sécurité (sensibilité sur les contraintes)
- Robustesse (à l'intérieur du noyau)
- Résilience (à l'extérieur du noyau)

Richesse des critères de sélection des stratégies viables

- Sélection à chaque instant du contrôle de norme minimale ou de variation minimale
- Prise en compte des critères de résilience et de robustesse dans la fonction d'optimisation pour prendre en compte la possibilité de perturbations

Réalisations



- Tube de viabilité de l'affinage du camembert (projet ANR Incalin, collaboration INRA, ISC-PIF, LIP6)
 - Avec test en hâloir pilote
- Viabilité du problème de la coexistence de plusieurs langues (projet européen Patres, collaboration IFISC, Palma de Mallorca)
- Viabilité du pigeon en ville (projet DeMagma, collaboration UPMC, MNHN)
- Préservation de la forêt malgache (projet ANR Déduction, collaboration CREA, IRD)

Plate-forme pour les études de viabilité (projet européen DREAM, INRA, ISC-PIF, LIP6),

<https://gitlab.iscpif.fr/viability/viabilitree>

Directions de recherche

Liens entre viabilité individuelle et collective

- Quelles hypothèses sont nécessaires pour obtenir des garanties au niveau individuel et au niveau global ?
- Comment les propriétés de viabilité sont affectés par les échanges entre deux systèmes? (Thèse T. France, dir. D. Couvet MNHN, Chaire MMB)

Indicateurs de risque

- Comment définir l'ensemble des événements contre lesquels se prémunir?
- Comment approcher les noyaux de viabilité garantis?

Algorithmes d'approximation des noyaux de viabilité

- En plus grande dimension, approcher une domaine viabilité particulier plutôt que le noyau de viabilité

Qualifier les objets numériques viables, exploiter les résultats des calculs de viabilité :

- VINOscope : plate-forme Web de dépôt et d'étude d'objets numériques viables
- Définition d'un assistant viabilité pour l'aide à la gestion participative (Thèse de L. Zaleski, Idex Sorbonne Universités, partenariat UPMC-LIP6/PUC(Brésil))

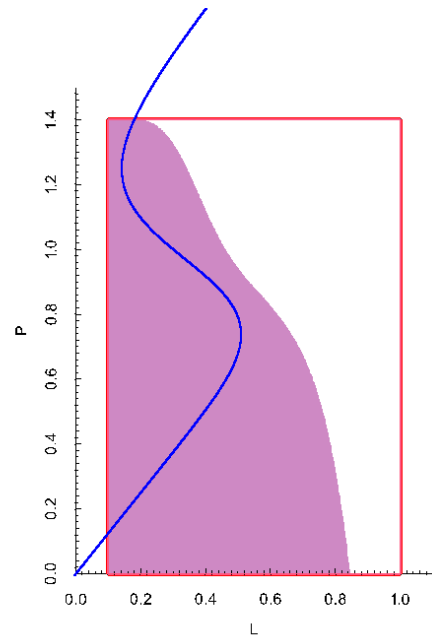
Robustesse du système aux perturbations

Conserver la propriété souhaitée

La robustesse aux perturbations : un indicateur à l'intérieur du noyau de viabilité (Alvarez et al, 2013 ; Martin et Alvarez, 2019)

La situation de deux points dans le noyau de viabilité peut être très différente face aux perturbations éventuelles.

La distance à la frontière renseigne sur la robustesse du système en un point.

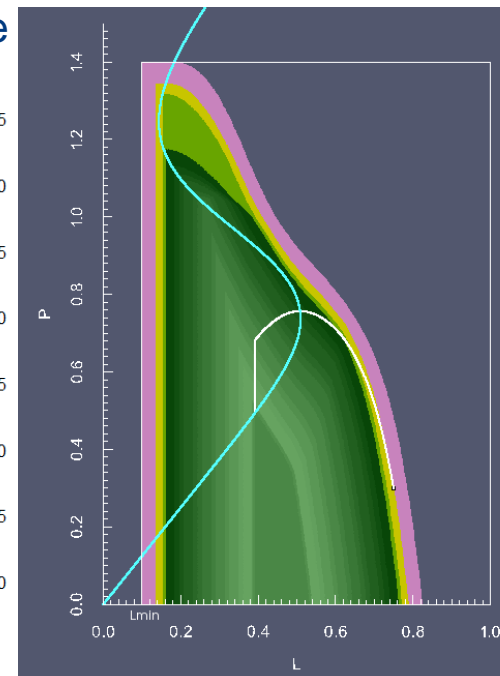
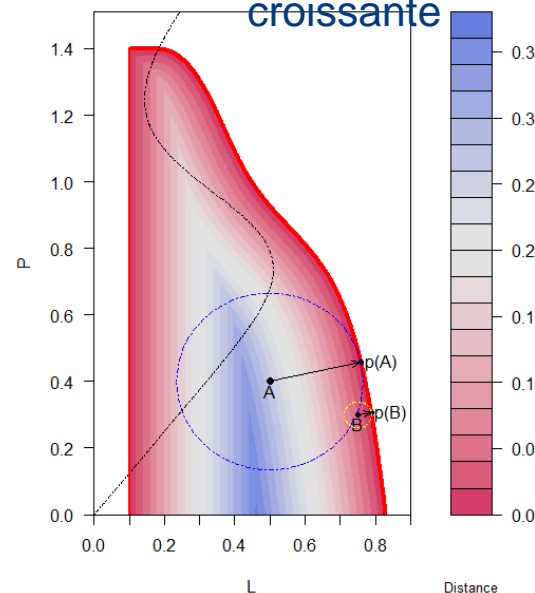


A est plus robuste que B car il est plus éloigné de la frontière du noyau de viabilité : une perturbation de faible ampleur ne fera pas sortir le système du noyau de viabilité.

Robustesse d'après B. Roy, 2002

Perturbation dans le sens de l'incertitude de Regan et Ben-Haïm, 2005

Cartes de robustesse croissante



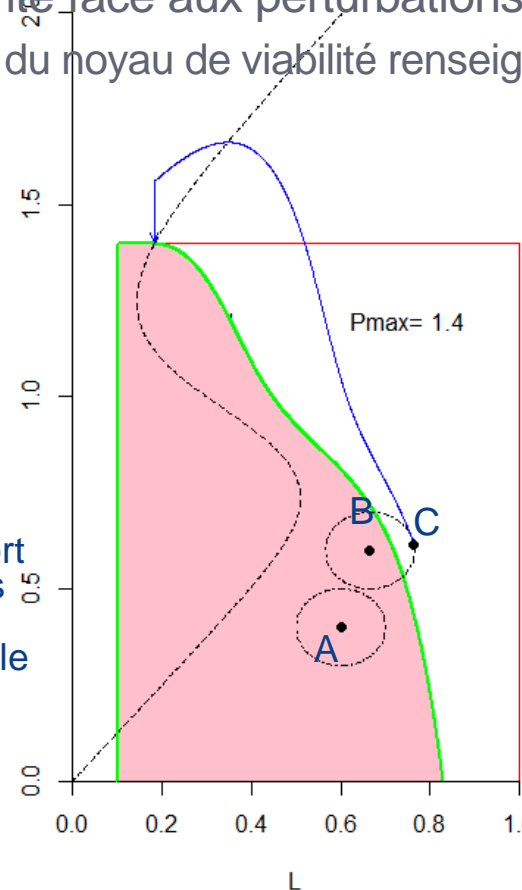
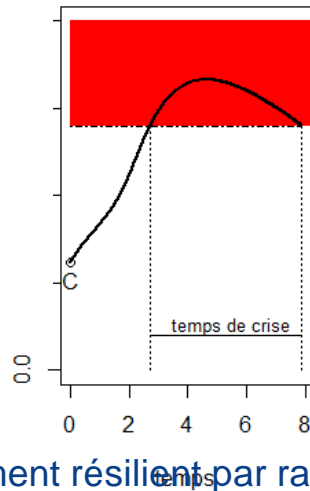
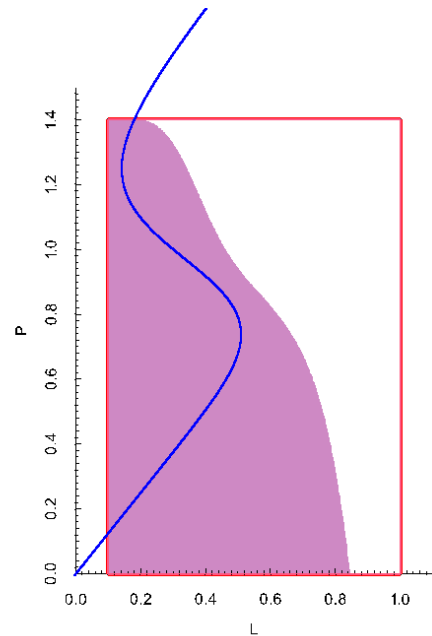
Résilience du système face aux perturbations envisagées

Restaurer la propriété souhaitée

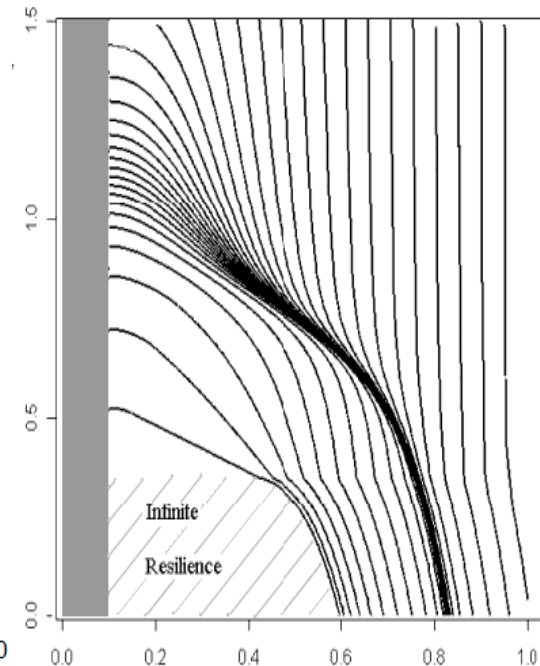
La résilience : un indicateur lié aux perturbations (Martin, 2004)

La situation des points dans ou hors du noyau de viabilité peut être très différente face aux perturbations éventuelles.

Le coût d'atteinte du noyau de viabilité renseigne sur la résilience.



Carte de résilience



A est infiniment résilient par rapport aux perturbations représentés par la boule.

B a une résilience finie car une telle perturbation peut conduire le système de B à C à partir duquel le retour dans le noyau de viabilité a un coût.

Merci pour votre attention

