

Une mesure de résilience dans les modèles de systèmes écologiques et sociaux

Sophie Martin

Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes
Complexes

4 février 2021





Le concept de résilience

Fin du 19^{ème} siècle, en **physique des matériaux**, désigne la capacité d'un métal à retrouver sa forme initiale suite à une déformation produite par un choc.

Au cours du 20^{ème} siècle, le concept s'étend au domaine de la **psychologie**, la résilience d'un individu est sa capacité à retrouver une vie normale après un traumatisme, dans le domaine de l'**informatique** où la résilience d'un système est sa capacité à fonctionner malgré les pannes de certains composants, dans les domaines de l'**écologie**, de l'**économie**, des **sciences sociales** également.

Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

P. 2 / 30

INRAE



La résilience en écologie

Résilience (Holling, 1973)

La capacité d'un système à recouvrer certaines propriétés essentielles perdues à la suite de perturbations.

L'enjeu de l'étude de la résilience est d'éviter des situations dans lesquelles des perturbations peuvent conduire à des situations irrémédiables et faciliter la restauration des propriétés essentielles, lorsque cela est possible.

Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

P. 3 / 30



(a) Lac oligotrophe



(b) Lac eutrophe



L'intérêt d'évaluer la résilience

Une valeur de résilience doit renseigner sur l'impact d'une perturbation éventuelle sur la capacité du système à préserver certaines propriétés.

Mesure de la résilience

L'inverse du coût nécessaire pour restaurer et préserver certaines propriétés du système suite à une perturbation.

- la valeur de la résilience sera infinie si à la suite de toute perturbation envisagée, la propriété peut être préservée,
- la valeur de la résilience sera nulle si l'une des perturbations envisagées cause une perte irrémédiable de la propriété,
- la valeur de la résilience sera finie mais non nulle si à la suite d'une des perturbations envisagées la propriété sera perdue, mais qu'elle peut toujours être restaurée. Le coût maximal de cette restauration étant l'inverse de la valeur de la résilience.

Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

P. 4 / 30

INRAE



La mesure de la résilience

Dans le formalisme de la théorie de la viabilité :



Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

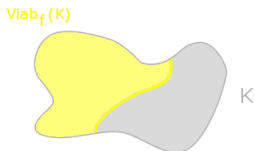
P. 5 / 30

INRAE



La mesure de la résilience

Dans le formalisme de la théorie de la viabilité :



Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

- noyau de viabilité (Aubin, 1991)

P. 6 / 30

INRAE



La mesure de la résilience

Dans le formalisme de la théorie de la viabilité :



Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

- noyau de viabilité (Aubin, 1991)

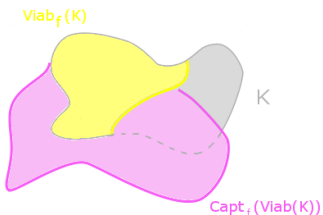
P. 7 / 30

INRAE



La mesure de la résilience

Dans le formalisme de la théorie de la viabilité :



Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

- noyau de viabilité (Aubin, 1991)
- bassin de capture (Aubin et al., 2011)

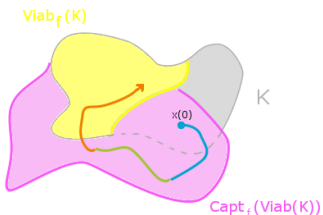
P. 8 / 30

INRAE



La mesure de la résilience

Dans le formalisme de la théorie de la viabilité :



Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

- noyau de viabilité (Aubin, 1991)
- bassin de capture (Aubin et al., 2011)

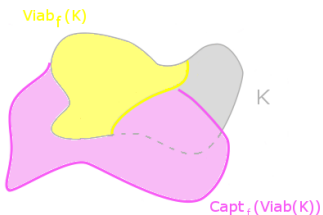
P. 9 / 30

INRAE



La mesure de la résilience

Dans le formalisme de la théorie de la viabilité :



Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

- noyau de viabilité (Aubin, 1991)
- bassin de capture (Aubin et al., 2011)

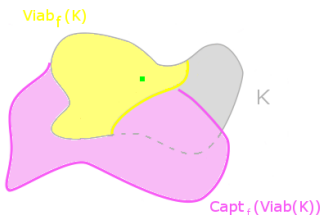
P. 10 / 30

INRAE



La mesure de la résilience

Dans le formalisme de la théorie de la viabilité :



Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

- noyau de viabilité (Aubin, 1991)
- bassin de capture (Aubin et al., 2011)

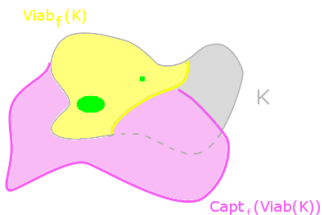
P. 11 / 30

INRAE



La mesure de la résilience

Dans le formalisme de la théorie de la viabilité :



Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

- noyau de viabilité (Aubin, 1991)
- bassin de capture (Aubin et al., 2011)

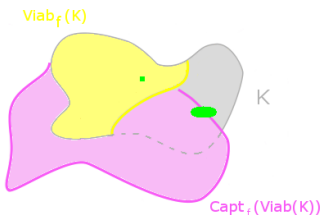
P. 12 / 30

INRAE



La mesure de la résilience

Dans le formalisme de la théorie de la viabilité :



Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

- noyau de viabilité (Aubin, 1991)
- bassin de capture (Aubin et al., 2011)

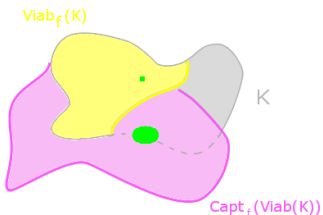
P. 13 / 30

INRAE



La mesure de la résilience

Dans le formalisme de la théorie de la viabilité :



Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

- noyau de viabilité (Aubin, 1991)
- bassin de capture (Aubin et al., 2011)

P. 14 / 30

INRAE



La mesure de la résilience

Dans le formalisme de la théorie de la viabilité :

$$R(x) := \frac{1}{\max_{x_1 \in D(x)} \min_{x_1(\cdot) \in \mathcal{S}(x_1)} \int_0^\infty (1 - \mathbb{1}_{\text{Viab}_S(K)}(x_1(\tau))) d\tau} .$$

Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

P. 15 / 30

INRAE



L'intérêt d'évaluer la résilience : illustration sur un exemple

1 Les dynamiques

- ▶ modèle de (Anderies, 2002) : la plante est constituée de racines et d'une partie aérienne :

$$\begin{aligned}c'(t) &= r_s s(t) - c(t) \\s'(t) &= (a_c c(t) + r_c c(t)s(t))(1 - s(t)) - \gamma_g(t)s(t)\end{aligned}$$

où c biomasse racinaire, s biomasse aérienne, r_s , a_c et r_c sont des paramètres et γ_g représente la pression de pâturage.



L'intérêt d'évaluer la résilience : illustration sur un exemple

① Les dynamiques

- ▶ la modification de la densité de bétail n'est pas instantanée :

$$\gamma'_g(t) = u(t) \in [\underline{u}; \bar{u}]$$

Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

P. 17 / 30

INRAE



L'intérêt d'évaluer la résilience : illustration sur un exemple

1 Les dynamiques

- ▶ Système dynamique de dimension 3 ($c(t)$, $s(t)$ et $\gamma_g(t)$) avec une variable de contrôle ($u(t)$) :

$$\begin{aligned}c'(t) &= r_s s(t) - c(t) \\s'(t) &= (a_c c(t) + r_c c(t) s(t))(1 - s(t)) - \gamma_g(t) s(t) \\ \gamma'_g(t) &= u(t) \in [\underline{u}; \bar{u}]\end{aligned}$$



L'intérêt d'évaluer la résilience : illustration sur un exemple

② La propriété considérée

- ▶ une densité minimale de bétail sur la pâture
- ▶ une quantité minimale d'herbe
- ▶

$$\begin{aligned} \gamma_g(t) &\geq \underline{\gamma_g} \\ s(t) &\geq \underline{s} \end{aligned}$$

Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

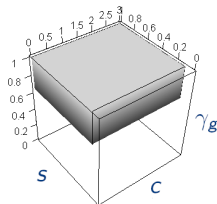
P. 19 / 30

INRAE



L'intérêt d'évaluer la résilience : illustration sur un exemple

② La propriété considérée



Ensemble de contraintes, sous-ensemble de l'espace des états (c, s, γ_g) avec $\underline{s} = 0.1$ et $\underline{\gamma_g} = 0.65$.

Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

P. 20 / 30

INRAE



L'intérêt d'évaluer la résilience : illustration sur un exemple

3 Les perturbations envisagées

Une période de sécheresse cause une diminution rapide de la biomasse aérienne de l'herbe : un saut dans l'espace des états de (c, s, γ_g) à $(\tilde{c}, \tilde{s}, \tilde{\gamma}_g)$ avec :

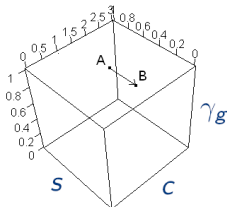
- ▶ $\tilde{c} = c$, on suppose que les événements de sécheresse envisagés n'affectent pas la biomasse racinaire,
- ▶ $\tilde{\gamma}_g = \gamma_g$, la sécheresse n'a pas d'impact direct sur la pression de pâturage,
- ▶ $\tilde{s} = s - \alpha s$ où $\alpha \in [0, \bar{\alpha}]$ représente la sévérité de cette sécheresse, la sévérité maximale envisagée vaut $\bar{\alpha} \leq 1$.

Ainsi les perturbations envisagées sont des sauts de (c, s, γ_g) à $(c, s - \alpha s, \gamma_g)$ avec $\alpha \in [0, \bar{\alpha}]$.



L'intérêt d'évaluer la résilience : illustration sur un exemple

3 Les perturbations envisagées



Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

P. 22 / 30

INRAE

Sécheresse : un saut dans l'espace des états, par exemple, de $(c = 2, s = 0.7, \gamma_g = 0.8)$ à $(c = 2, s = 0.35, \gamma_g = 0.8)$. La biomasse aérienne est divisée par 2, la sévérité α d'une telle sécheresse est de 0.5.



L'intérêt d'évaluer la résilience : illustration sur un exemple

- ④ La fonction de coût
Le préjudice est évalué par le temps nécessaire pour retrouver une situation sûre :
 - ▶ les biomasses et la pression de pâturage sont supérieures aux valeurs minimales
 - ▶ ces valeurs minimales peuvent être satisfaites indéfiniment suivant des pratiques de pâturage appropriées.

Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

P. 23 / 30

INRAE



L'intérêt d'évaluer la résilience : illustration sur un exemple

La première étape consiste à étudier la compatibilité entre :

- les dynamiques

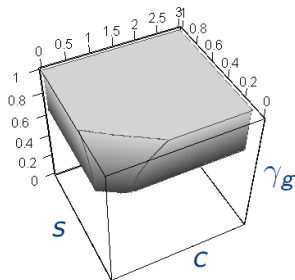
$$\begin{aligned}c'(t) &= r_s s(t) - c(t) \\s'(t) &= (a_c c(t) + r_c c(t) s(t))(1 - s(t)) - \gamma_g(t) s(t) \\ \gamma'_g(t) &= u(t) \in [\underline{u}; \bar{u}]\end{aligned}$$

- et la propriété souhaitée

$$\begin{aligned}\gamma_g &\geq \underline{\gamma_g} \\s &\geq \underline{s}\end{aligned}$$



L'intérêt d'évaluer la résilience : illustration sur un exemple



Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

P. 25 / 30

Noyau de viabilité pour $r_s = 3$, $a_c = 0.1$, $r_c = 1$,
 $\underline{\gamma}_g = 0.65$, $\underline{s} = 0.1$ and $\bar{u} = -\underline{u} = 0.05$.

INRAE

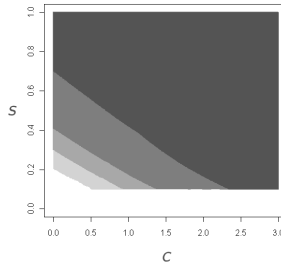


L'intérêt d'évaluer la résilience : illustration sur un exemple

Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

P. 26 / 30

INRAE



Sections de noyaux de viabilité pour $\gamma_g = 0.9$. En noir, $\bar{u} = -\underline{u} = 0$. Pour $\bar{u} = -\underline{u} = 0.03$, la section du noyau de viabilité s'étend la zone gris foncé et jusqu'à la zone la plus claire pour $\bar{u} = -\underline{u} = 0.1$.



Evaluation de la résilience

La seconde étape consiste à évaluer la résilience du système pâture-bétail à partir de l'impact potentiel d'événements de sécheresse sur sa capacité à préserver des niveaux minimaux de biomasse aérienne et de pression de pâturage.

La résilience est évaluée en chaque point de l'espace des états comme l'inverse du pire préjudice causé, ici le pire préjudice correspond à l'occurrence de la sécheresse de plus forte intensité $\bar{\alpha}$.

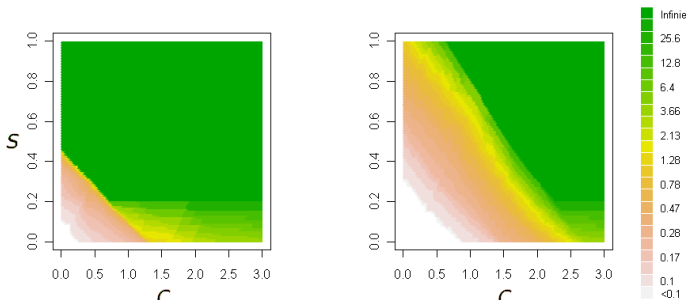
Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

P. 27 / 30

INRAE



Valeurs de résilience



Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

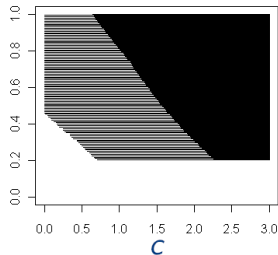
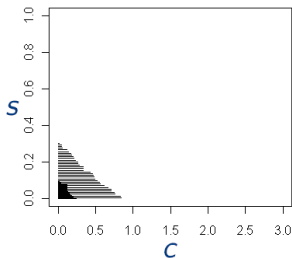
P. 28 / 30

INRAE

Deux sections ($\gamma_g = 0.65$ (gauche) et $\gamma_g = 0.9$ (droite)) des valeurs de résilience du système pâture-bétail face à des épisodes de sécheresse.
 $r_s = 3$, $a_c = 0.1$, $r_c = 1$, $\underline{\gamma}_g = 0.65$, $\underline{s} = 0.1$,
 $\bar{u} = -\underline{u} = 0.05$ and $\bar{\alpha} = 0.5$.



Valeurs de résilience



Gauche : résilience à la sécheresse inférieure à 0.1 (noir pour $\gamma_g = 0.65$ + zone hachurée pour $\gamma_g = 0.9$). Droite : résilience infinie (noir pour $\gamma_g = 0.9$ + zone hachurée pour $\gamma_g = 0.65$).

Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

P. 29 / 30

INRAE



■ Merci de votre attention.

Une mesure
de résilience
dans les
modèles de
systèmes
écologiques
et sociaux

P. 30 / 30

INRAE