

# PFIA 2023

## Session Résilience et IA

**Fonder le concept de resilience sur la théorie de la viabilité  
dans le cas de dynamiques incertaines**

**Jean-Denis Mathias et al.**

**INRAE, Laboratoire d'Ingénierie pour les Systèmes Complexes,  
9 avenue des landais, 63170 Aubière, France.**



## Les concepts de « *limites planétaires* », d'« *espace de fonctionnement sûr* » (safe operating space) vus comme un problème de contrôle

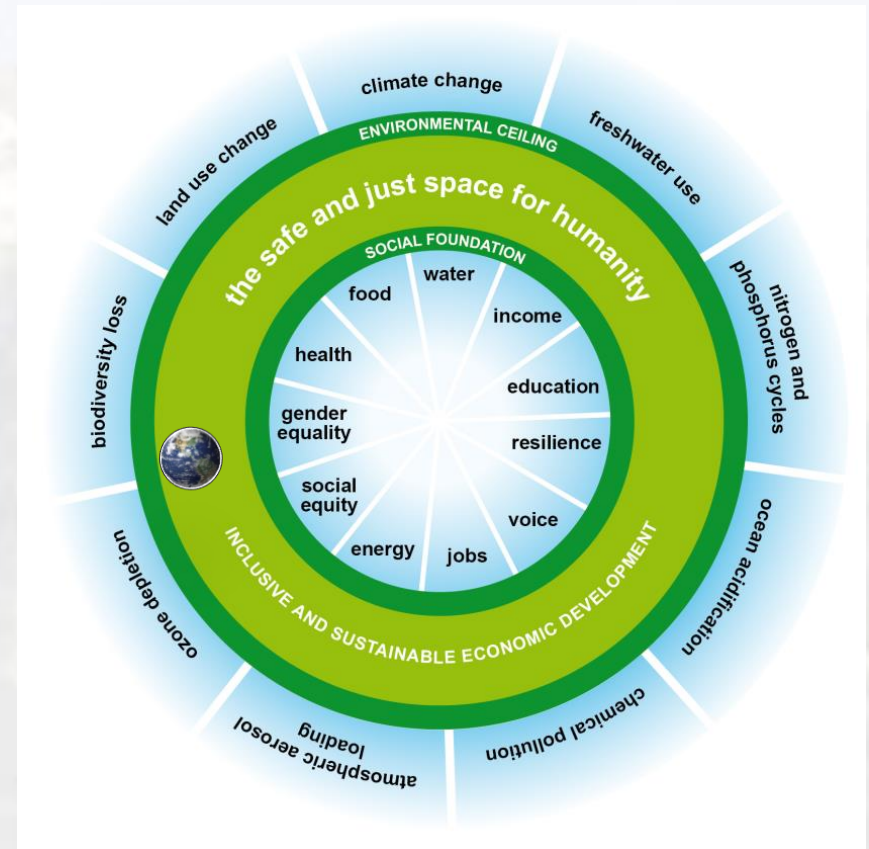
*Maintenir le système « Terre » dans un état désirable...*

**safe operating space**

- Définir la « désirabilité » à partir de propriétés d'intérêt
- Définir des contraintes ou des limites

**Problème de contrôle**

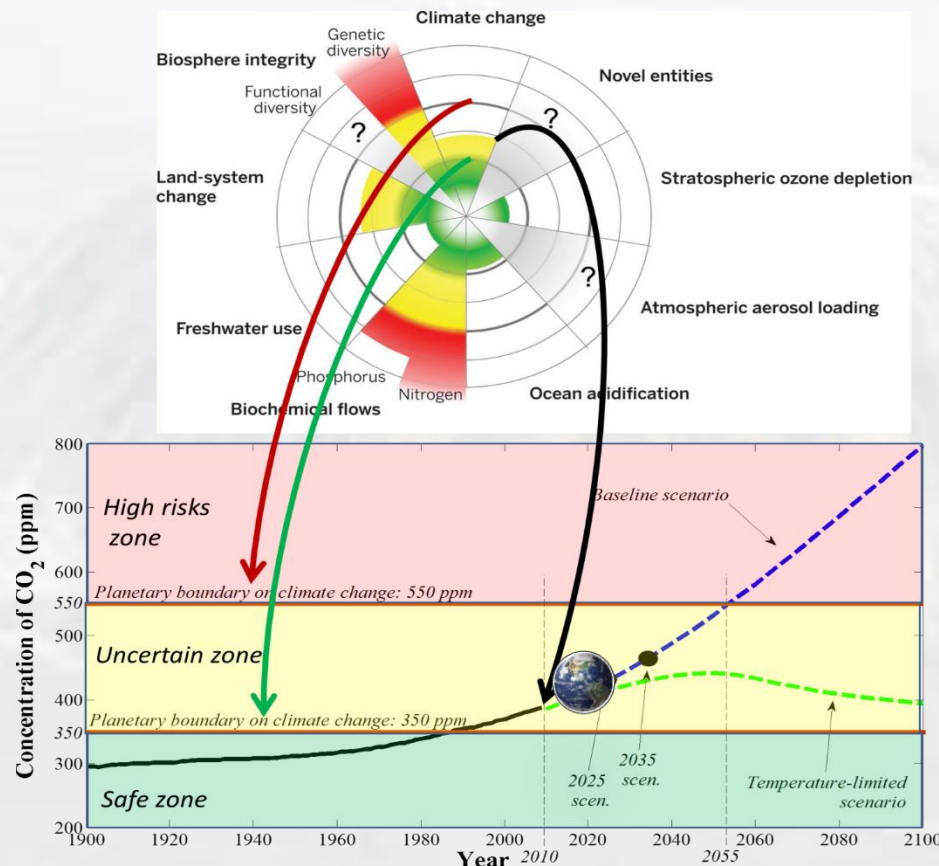
- Définir la dynamique de la Terre
- Définir le contrôle comme notre capacité d'actions



<https://chrisriedy.me/2014/01/28/living-in-the-doughnut-of-sustainability/>

## Les concepts de « *limites planétaires* », d'« *espace de fonctionnement sûr* » (safe operating space) vus comme un problème de contrôle

Retrouver un état désirable du système Terre ➡ concept de résilience



(Rockström et al 2009; Steffen et al 2015)

## Définir le concept de résilience en milieu incertain...

Intempéries/crue au Texas et Oklahoma



*Elaine Thompson / The Associated Press*



Les dynamiques et les perturbations sont difficiles à caractériser et à prévoir.

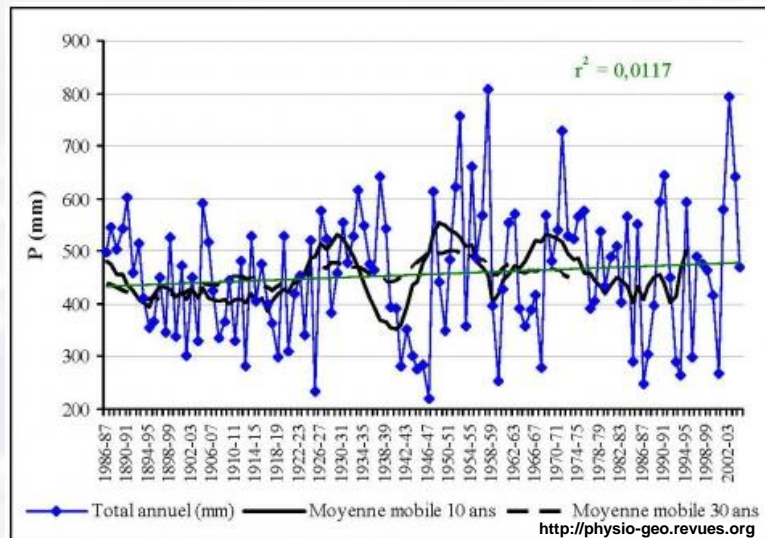


... quelques réflexions

Aléas « standards »

vs

Evènements rares





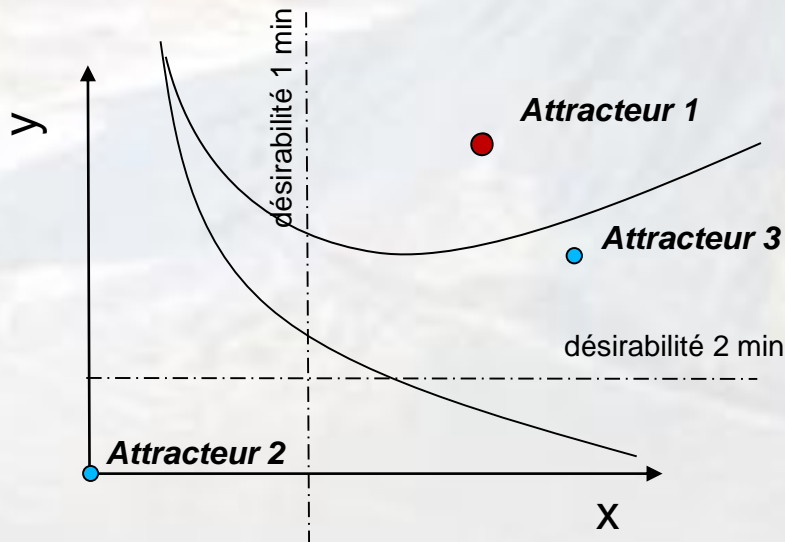
## ... quelques réflexions

Management de SES, pour la « résilience » de SES...

Engineering Within Ecological Constraints (1996)

### Engineering Resilience versus Ecological Resilience

C. S. HOLLING



### The Role of Adaptive Management as an Operational Approach for Resource Management Agencies

[Barry L. Johnson](#)

*"...that allows managers to react when conditions change. The result is that, rather than managing for a single, optimal state, we manage within a range of acceptable outcomes while avoiding catastrophes and irreversible negative effects."*



**Respecter des contraintes données dans un cadre de système dynamique (contrôlé)**

## I. Illustration du concept de résilience

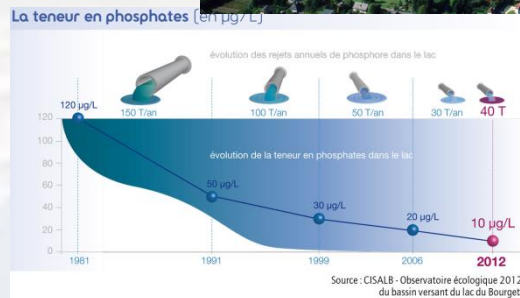
## II. La théorie de la viabilité

## III. Exemple de la gestion d'un lac eutrophe

## IV. Conclusions

## Exemple de l'eutrophisation d'un lac

Lac du Bourget



Eaux peu transparentes et peu oxygénées, présence de végétaux aquatiques...



Enjeux sur l'environnement et l'économie (tourisme, pratiques agricoles...)

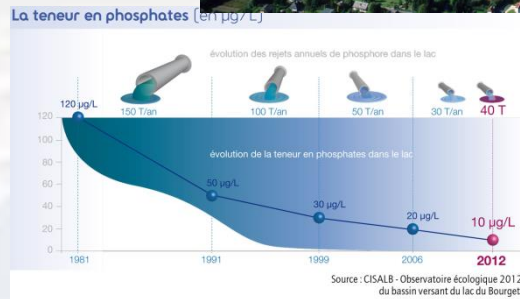


Aide à la décision pour définir des politiques d'actions viables et résilientes



## Exemple de l'eutrophisation d'un lac

Lac du Bourget



Eaux peu transparentes et peu oxygénées,  
présence de végétaux aquatiques...



Enjeux sur l'environnement et  
l'économie (tourisme, pratiques  
agricoles...)



Aide à la décision pour définir des politiques d'actions  
viables et résilientes

## Prémisses

Définir une propriété d'intérêt



Définir la dynamique du système

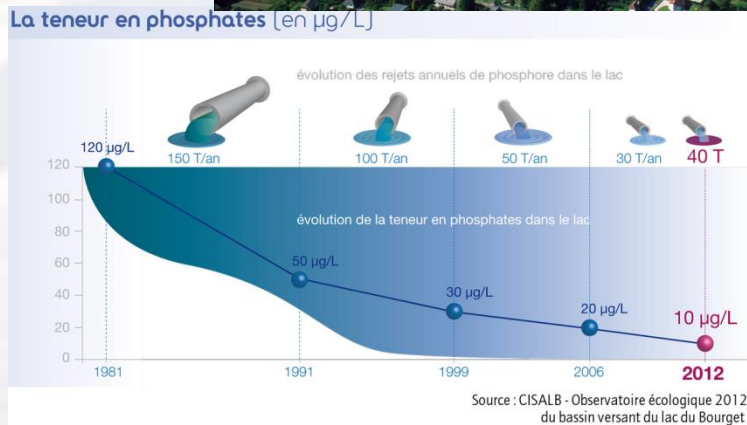
« Définir » les incertitudes

Définir les politiques d'actions possibles

## Propriétés d'intérêt

### Exemple de l'eutrophisation d'un lac

Lac du Bourget



Exemple de propriété d'intérêt:

« Avoir une concentration de phosphore inférieure à  $10 \mu\text{g/L}$  »

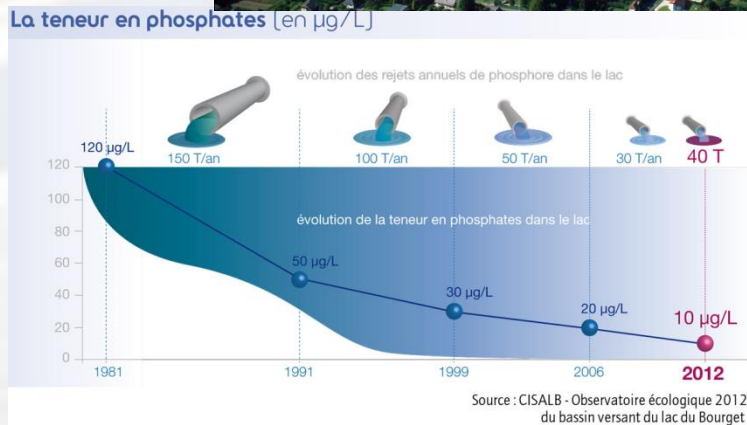


Difficultés à définir et à formaliser les propriétés d'intérêt

## Système dynamique

### Exemple de l'eutrophisation d'un lac

Lac du Bourget



Exemple de propriété d'intérêt:

« Avoir une concentration de phosphore inférieure à  $10 \mu\text{g/L}$  »



Cette propriété évolue dans le temps



Nécessité d'intégrer la composante temporelle

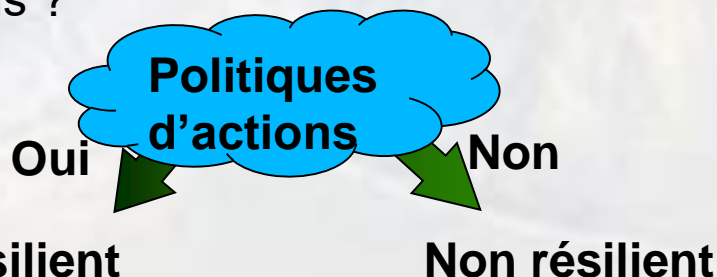
## Résilience 1.0

**La résilience est définie comme la capacité à retrouver une propriété d'intérêt à un horizon de temps donné.**

- Exemple de propriété d'intérêt:  
« Avoir une concentration de phosphore inférieure à 10 µg/L »



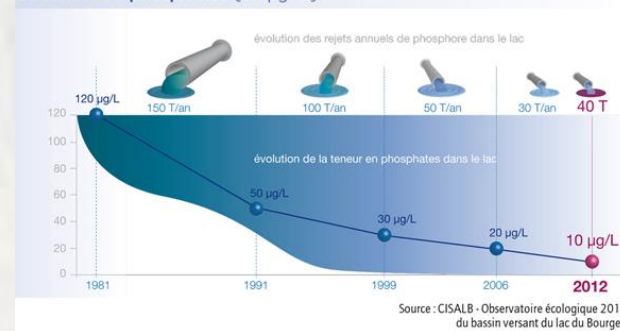
Est-ce que la concentration de phosphore va retrouver un niveau inférieur à 10 µg/L d'ici 5 ans ?



Lac du Bourget



La teneur en phosphates [en µg/L]



**Aucune garantie de garder ces propriétés dans le temps...**

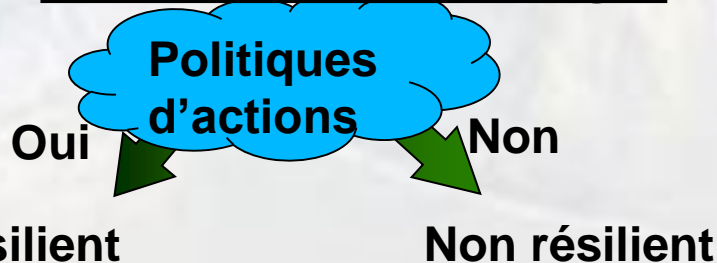
## Résilience 2.0

La résilience est définie comme la capacité à retrouver une propriété d'intérêt à un horizon de temps donné et à la garder dans le temps.

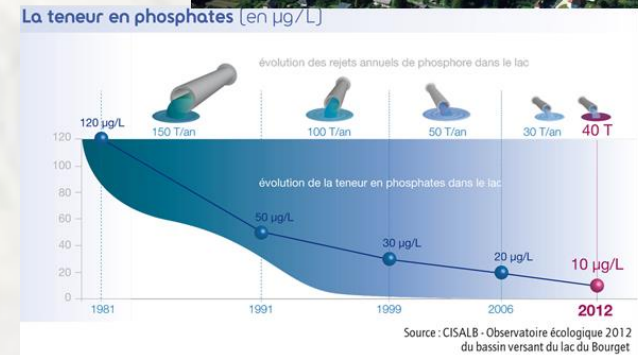
- Exemple de propriété d'intérêt:  
« Avoir une concentration de phosphore inférieure à  $10 \mu\text{g/L}$  »



Est-ce que la concentration de phosphore va retrouver un niveau inférieur à  $10 \mu\text{g/L}$  d'ici 5 ans et rester inférieur à  $10 \mu\text{g/L}$  ?



Lac du Bourget



Utilisation de la théorie de la viabilité pour cette garantie

I. Illustration du concept de résilience

**II. La théorie de la viabilité**

III. Exemple de la gestion d'un lac eutrophe

IV. Conclusions

### Résilience 2.0

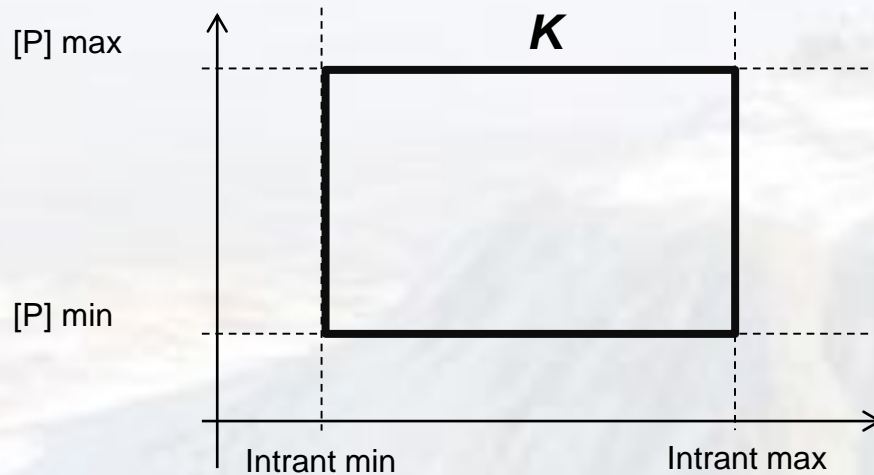
**La résilience est définie comme la capacité à retrouver une propriété d'intérêt à un horizon de temps donné et à la garder dans le temps**



1. Trouver l'ensemble des points qui permet de garder la propriété durant un horizon de temps donné: formaliser mathématiquement cet ensemble à travers le « noyau de viabilité stochastique »
2. Trouver l'ensemble des points résilients (résilience 2.0) par rapport à ce noyau de viabilité stochastique



### 1. Noyau de viabilité déterministe

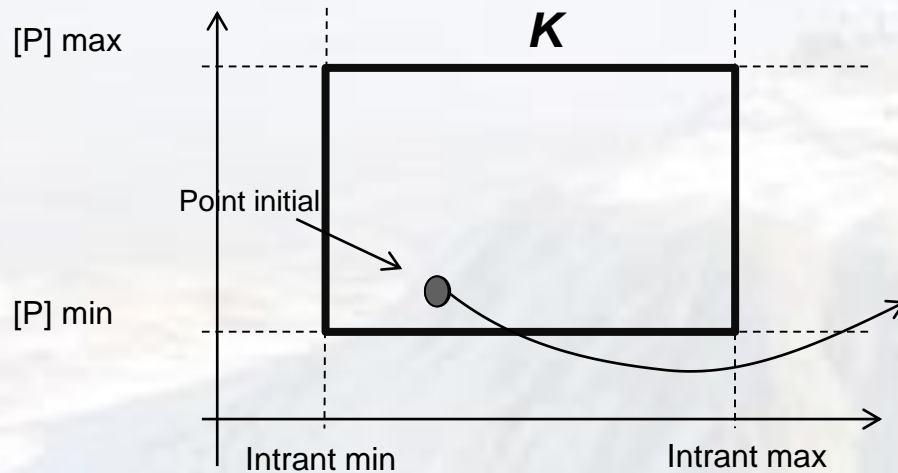


4 propriétés d'intérêt:

« Ne pas dépasser une concentration minimale et maximale de phosphore »  
(composante écologique)

« Avoir une valeur minimale et maximale d'intrants » (composante économique)

### 1. Noyau de viabilité déterministe

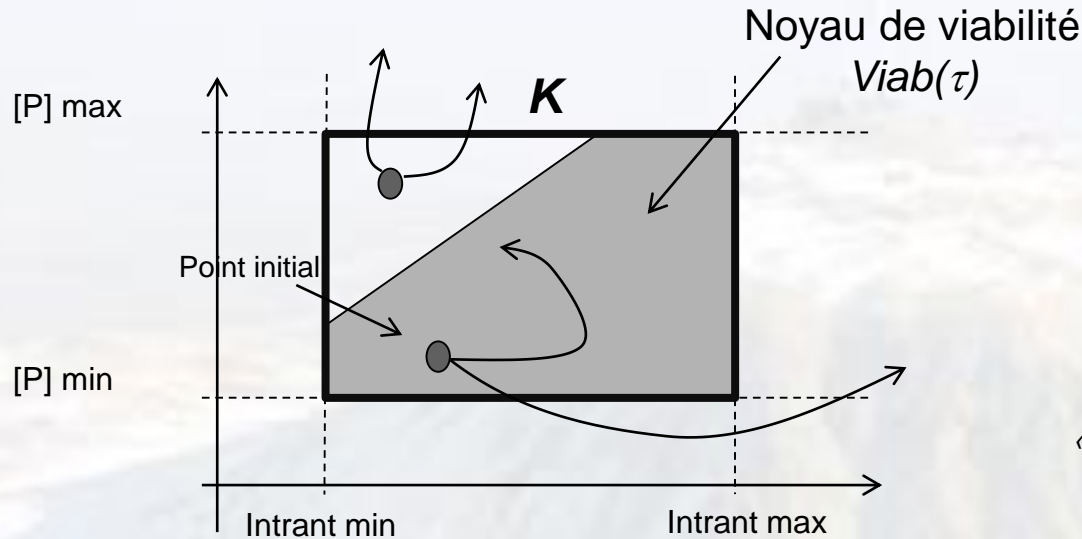


4 propriétés d'intérêt:

« Ne pas dépasser une concentration minimale et maximale de phosphore » (composante écologique)

« Avoir une valeur minimale et maximale d'intrants » (composante économique)

### 1. Noyau de viabilité déterministe



4 propriétés d'intérêt:

« Ne pas dépasser une concentration minimale et maximale de phosphore »

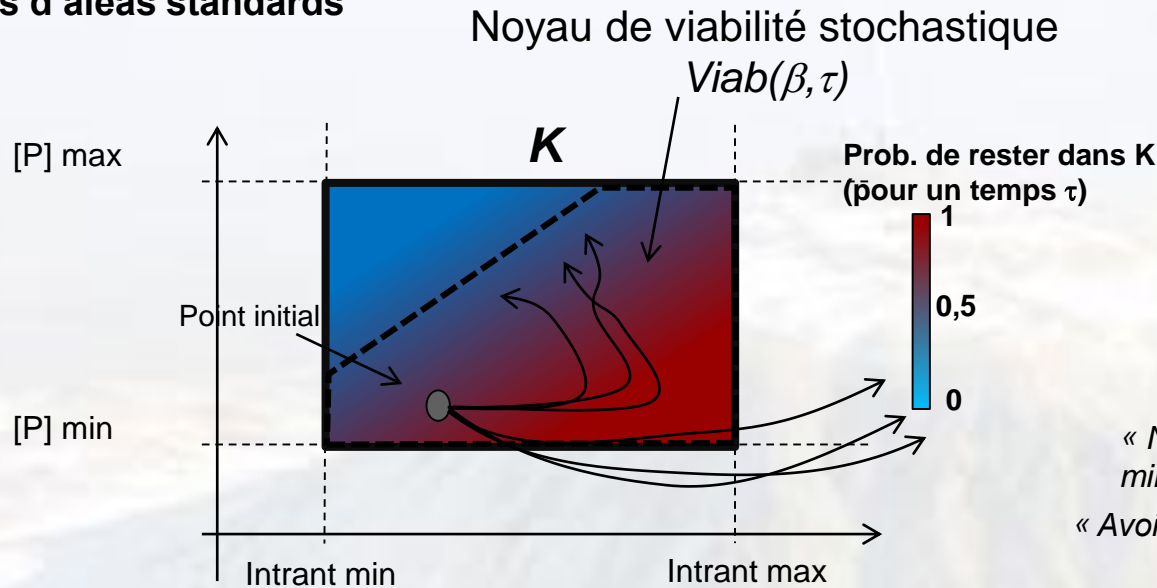
« Avoir une valeur minimale et maximale d'intrants »

$Viab(\tau)$  est l'ensemble des points initiaux (appartenant à  $K$ ) tels qu'il existe au moins une politique d'action qui permette de rester dans  $K$  durant l'horizon de temps  $\tau$

$$Viab(\tau) = \{ x_0 \in K \mid \exists f \in F(\tau), \forall t \leq \tau, x_t = g_f(t, x_0) \in K \}$$

### 1. Noyau de viabilité stochastique

Cas d'aléas standards



4 propriétés d'intérêt:

« Ne pas dépasser une concentration minimale et maximale de phosphore »

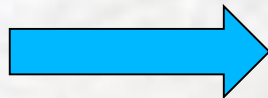
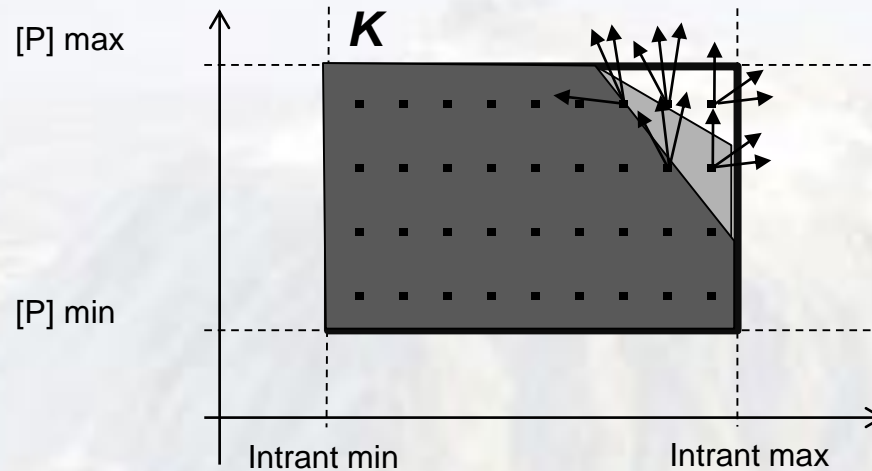
« Avoir une valeur minimale et maximale d'intrants »

$Viab(\beta, \tau)$  est l'ensemble des points initiaux (appartenant à  $K$ ) tels qu'il existe au moins une politique d'action qui permette de rester dans  $K$  durant l'horizon de temps  $\tau$ , avec une probabilité supérieur à  $\beta$

$$Viab(\beta, \tau) = \{ x_0 \in K \mid \exists f \in F(\tau), \mathbb{P}(\forall t \in [0, \tau], x_t = g_f(t, x_0) \in K) \geq \beta \}$$

### 1. Malédiction de la dimension

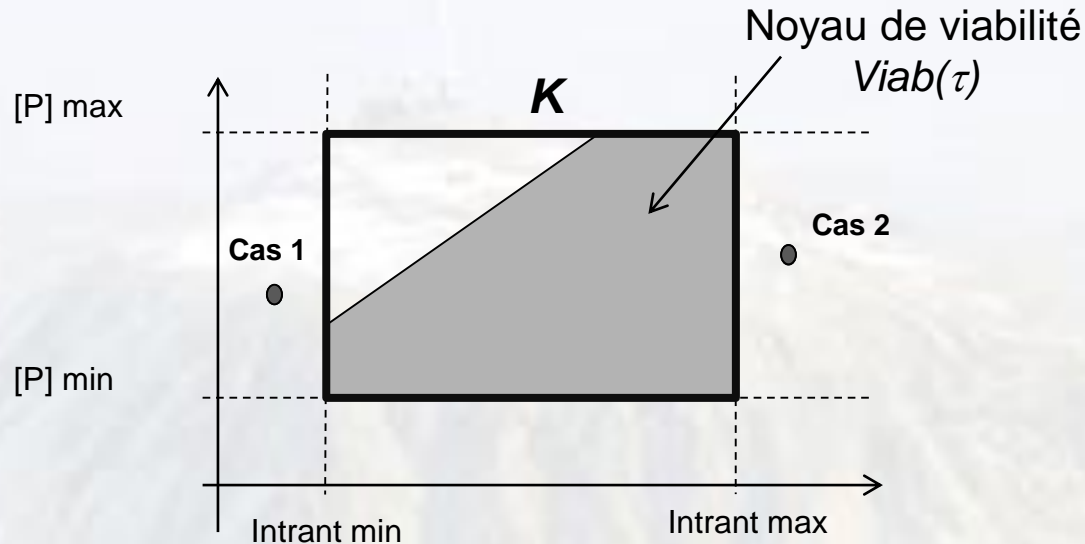
Algorithme basé sur la programmation dynamique



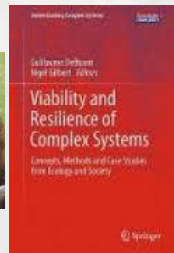
Utilisation de SVM pour approcher le noyau de viabilité  
(thèse de L. Chapel, 2007)

### 2. Résilience 2.0 déterministe

Cas d'évènements rares

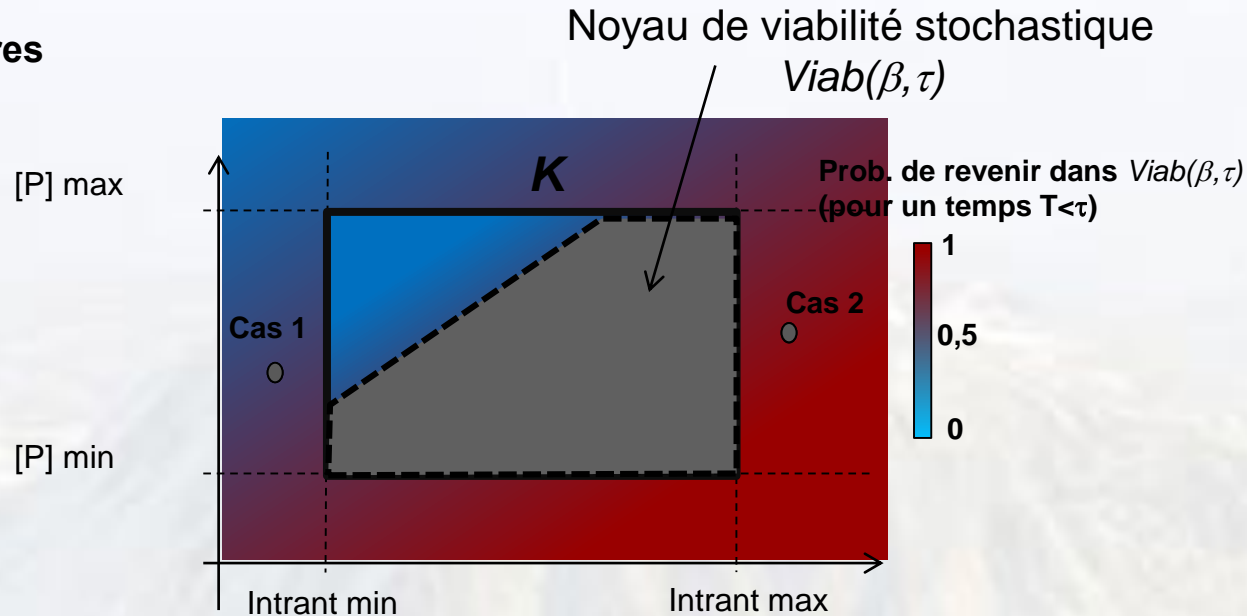


Cas 1: résilience 1.0 mais pas résilience 2.0;  
Cas 2: résilience 2.0 (garantie de conserver la propriété): c'est le bassin d'attraction de  $Viab(\tau)$  (thèse de Sophie Martin, projet européen PATRES (2007-2010))



### 2. Résilience 2.0 stochastique: probabilité de résilience

Cas d'évènements rares



La probabilité de résilience correspond à la probabilité de revenir dans l'ensemble  $Viab(\beta, \tau)$  pour un horizon de temps donné  $T < \tau$  (thèse de Charles Rougé).



Optimisation des politiques d'action

I. Le concept de résilience

II. La théorie de la viabilité

**III. Exemple de la gestion d'un lac eutrophe**

IV. Conclusions



## Problématique d'eutrophisation

Lac d'Aydat (Auvergne)



Eaux peu transparentes et peu oxygénées,  
présence de végétaux aquatiques...



Enjeux sur l'environnement et  
l'économie (tourisme, pratiques  
agricoles...)



Aide à la décision pour définir des politiques d'actions  
viables et résilientes

## Problématique d'eutrophisation

Lac d'Aydat (Auvergne)

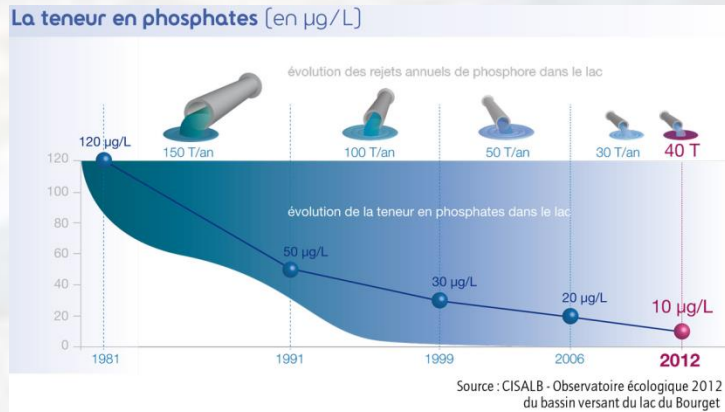


Modélisation de la dynamique du phosphore  $P$

$$\frac{dP}{dt} = \underbrace{-P}_{\text{Sortie}} + \underbrace{L^* + \varepsilon}_{\text{intrant}} + \underbrace{r \frac{P^8}{P^8 + 1}}_{\text{recyclage par les sédiments}}$$

$$\frac{dL^*}{dt} = u \quad u \in [U^{min}, U^{max}]$$

On suppose qu'on peut agir sur les intrants



Aide à la décision pour définir des politiques d'actions viables et résilientes

## Quelle propriétés d'intérêt?

Lac d'Aydat (Auvergne)



Contrainte écologique:

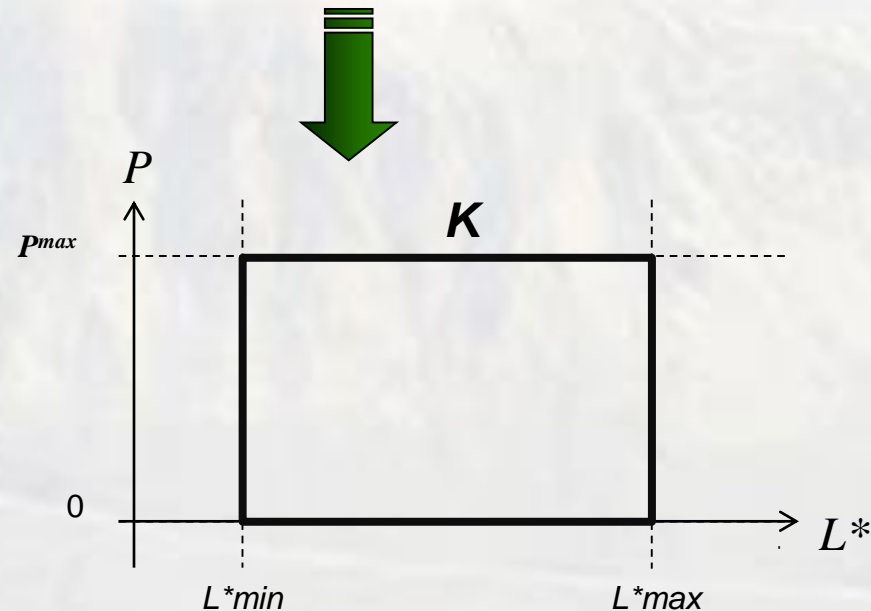
« Ne pas dépasser une concentration maximale de phosphore »

Contrainte économique:

« Avoir une valeur minimale d'intrants »

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dt} = \underbrace{-P}_{\text{Sortie}} + \underbrace{L^*}_{\text{intrant}} + \underbrace{\varepsilon + r \frac{p^8}{p^8 + 1}}_{\text{recyclage par les sédiments}} \\ \frac{dL^*}{dt} = u \quad u \in [U^{\min}, U^{\max}] \end{array} \right.$$

On suppose qu'on peut agir sur les intrants



## Noyau de viabilité stochastique

Lac d'Aydat (Auvergne)



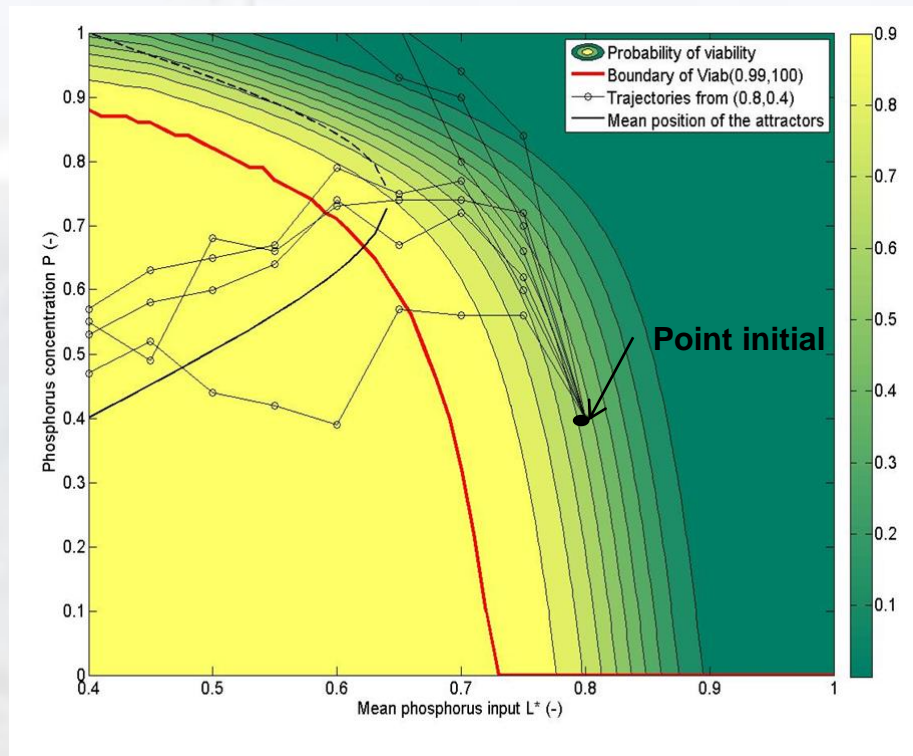
Horizon de temps = 100,  $\varepsilon=N(0,0.2)$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dt} = \underbrace{-P}_{\text{Sortie}} + \underbrace{L^*}_{\text{intrant}} + \underbrace{\varepsilon + r \frac{p^8}{p^8 + 1}}_{\text{recyclage par les sédiments}} \\ \frac{dL^*}{dt} = u \quad u \in [U^{\min}, U^{\max}] \end{array} \right.$$

On suppose qu'on peut agir sur les intrants

« Ne pas dépasser une concentration maximale de phosphore »

« Avoir une valeur minimale et maximale d'intrants »



## Résilience

Lac d'Aydat (Auvergne)

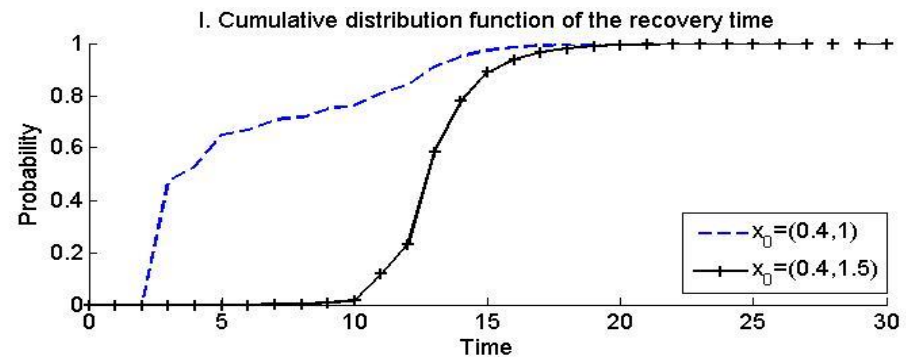
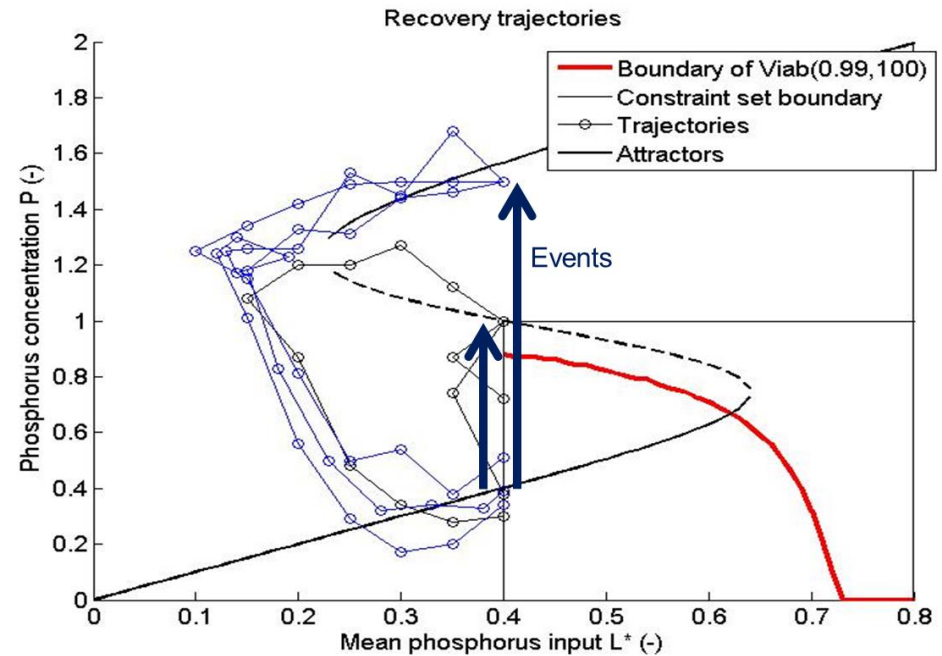


$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dt} = \underbrace{-P}_{\text{Sortie}} + \underbrace{L^* + \varepsilon + r \frac{p^8}{p^8 + 1}}_{\text{intrans + recyclage par les sédiments}} \\ \frac{dL^*}{dt} = u \quad u \in [U^{\min}, U^{\max}] \end{array} \right.$$

On suppose qu'on peut agir sur les intrants

« Ne pas dépasser une concentration maximale de phosphore »

« Avoir une valeur minimale et maximale d'intrants »



I. Le concept de résilience

II. La théorie de la viabilité

III. Exemple de la gestion d'un lac eutrophe

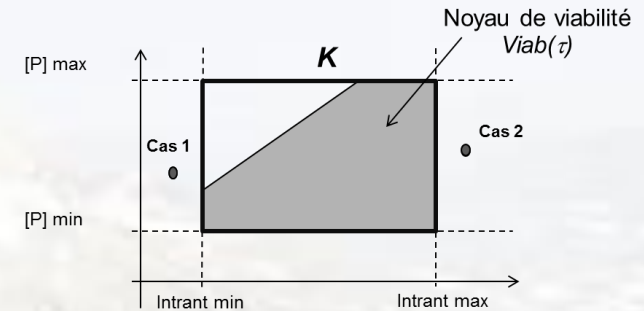
**IV. Conclusions**

## Résilience 1.0 vs résilience 2.0

- Retrouver les propriétés d'intérêt (1.0) et les conserver (2.0)



Utilisation de la théorie de la viabilité  
(noyau de viabilité)



## Cas stochastique

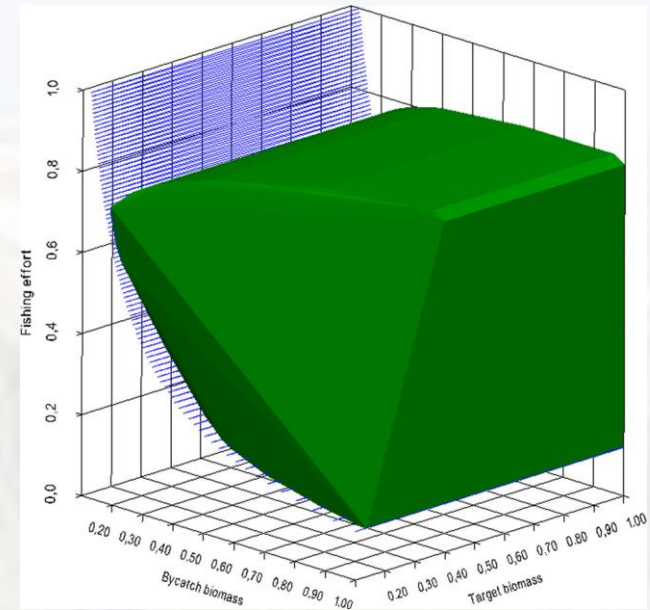
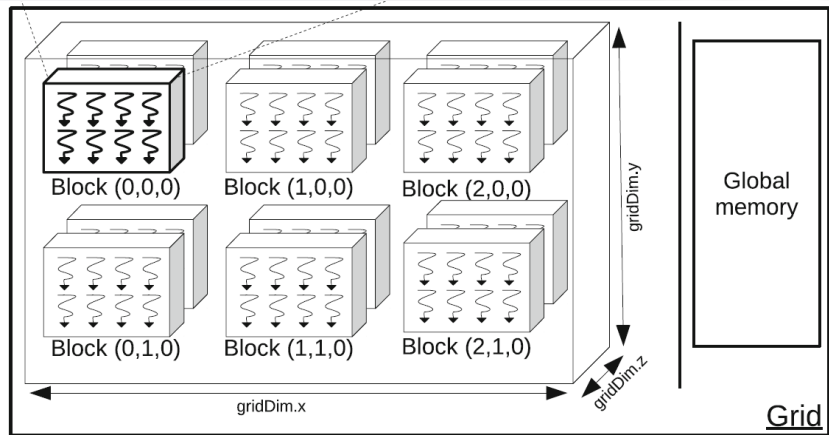
- Probabilité de garder une propriété (pour un horizon de temps donné);
- Probabilité de retourner dans le noyau (pour un horizon de temps donné).

## Formalisation de concepts

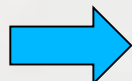
- Vulnérabilité;
- Capacité d'adaptation.

## Apport de l'IA pour conjurer la malédiction (fléau) de la dimension

Utilisation de GPU permettant le calcul de noyaux jusqu'en dimension 10



Brias, A., Mathias, J.D. & Deffuant, G. Accelerating viability kernel computation with CUDA architecture: application to bycatch fishery management. *Comput Manag Sci* 13, 371–391 (2016).

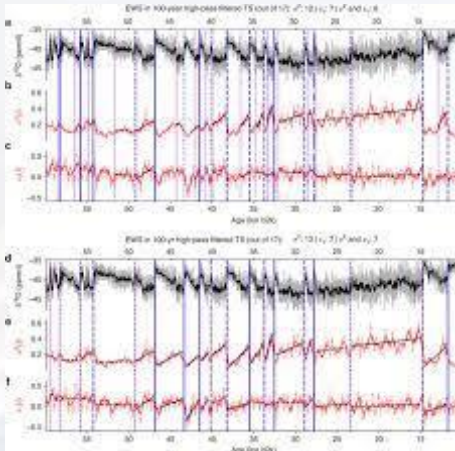


réduction de la dimension, réseau de neurones

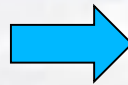


## Apport de l'IA pour déterminer des indicateurs de résilience à partir de données

Hétérogénéité de données



Boers, N. Early-warning signals for Dansgaard-Oeschger events in a high-resolution ice core record. *Nat Commun* 9, 2556 (2018).



Calcul de signaux précoces



Big Tech and Artificial Intelligence can support Early Warnings for All

Tags: Early Warnings

31 Published 31 May 2023

<https://public.wmo.int/en/media/news/big-tech-and-artificial-intelligence-can-support-early-warnings-all>



Quelle méthode pour prédire la défaillance d'un système face à un évènement extrême? Détecter un évènement? Pour prédire la résilience?



**Merci!**