

# Dynamique des écosystèmes : résilience, effondrement ?

## Enjeux scientifiques, épistémiques

Bénéficiant des travaux en cours de, discussions avec

- O. Delettre : notion de résilience (philosophie)
- T. France : formalisation mathématique de la résilience des socio-écosystèmes (mathématiques, écologie)
- G. Thummel : notion de complexité en écologie (philosophie)

# Dynamique des systèmes écologiques

Face à différents phénomènes, affectant ces systèmes, les modifiant

- Changements globaux
  - Quelles conceptualisation (au-delà de la notion d'équilibre) ?
  - Quelle gestion ?
  - Quelles relations entre conceptualisation, observation (que faut-il observer ?), interprétation des observations
  - Difficultés liées aux échelles d'espace et de temps impliquées

# Dynamique des systèmes écologiques : quelles entités concernées, quel est le système ?



De l'individu au (socio)-  
écosystème

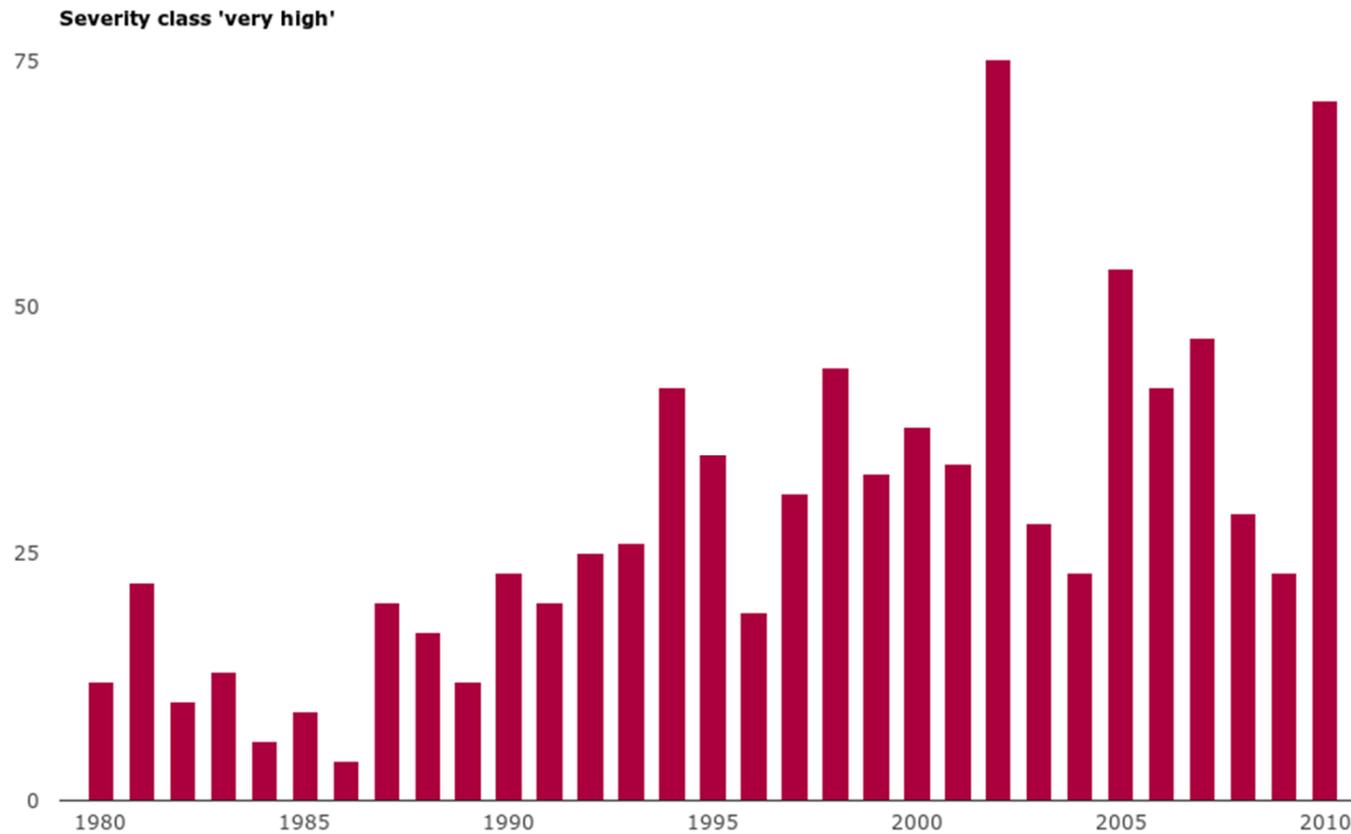


# Notions de perturbation

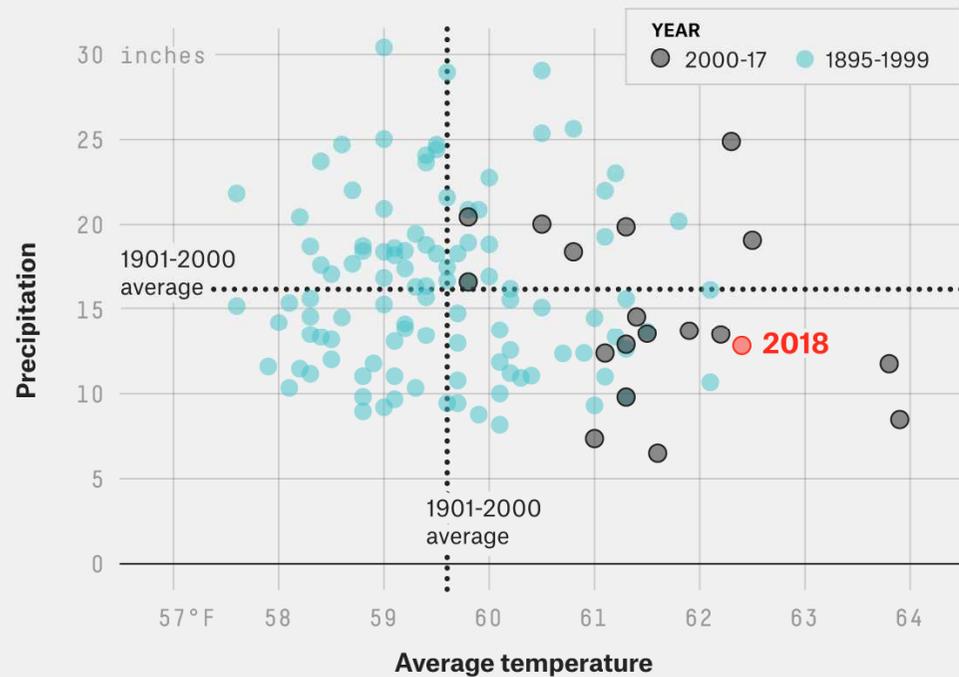
Changement abrupt de variables affectant un système écologique

- 'Naturelles'
    - Feux, crues, épidémies...
  - 'Sociales'
    - Crise économique, révolution...
  - Ces changements varient par leur intensité, extension, spatiale et temporelle, rythme
- Couplages possible entre le 'naturel' et le 'social'

# Perturbations : nombre de crues en Europe classées comme 'très sévères' (agence européenne de l'environnement)



Precipitation vs. average temperature in California from January through October of each year, 1895-2018



FiveThirtyEight

SOURCE: NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION

## Cas de la Californie et des incendies

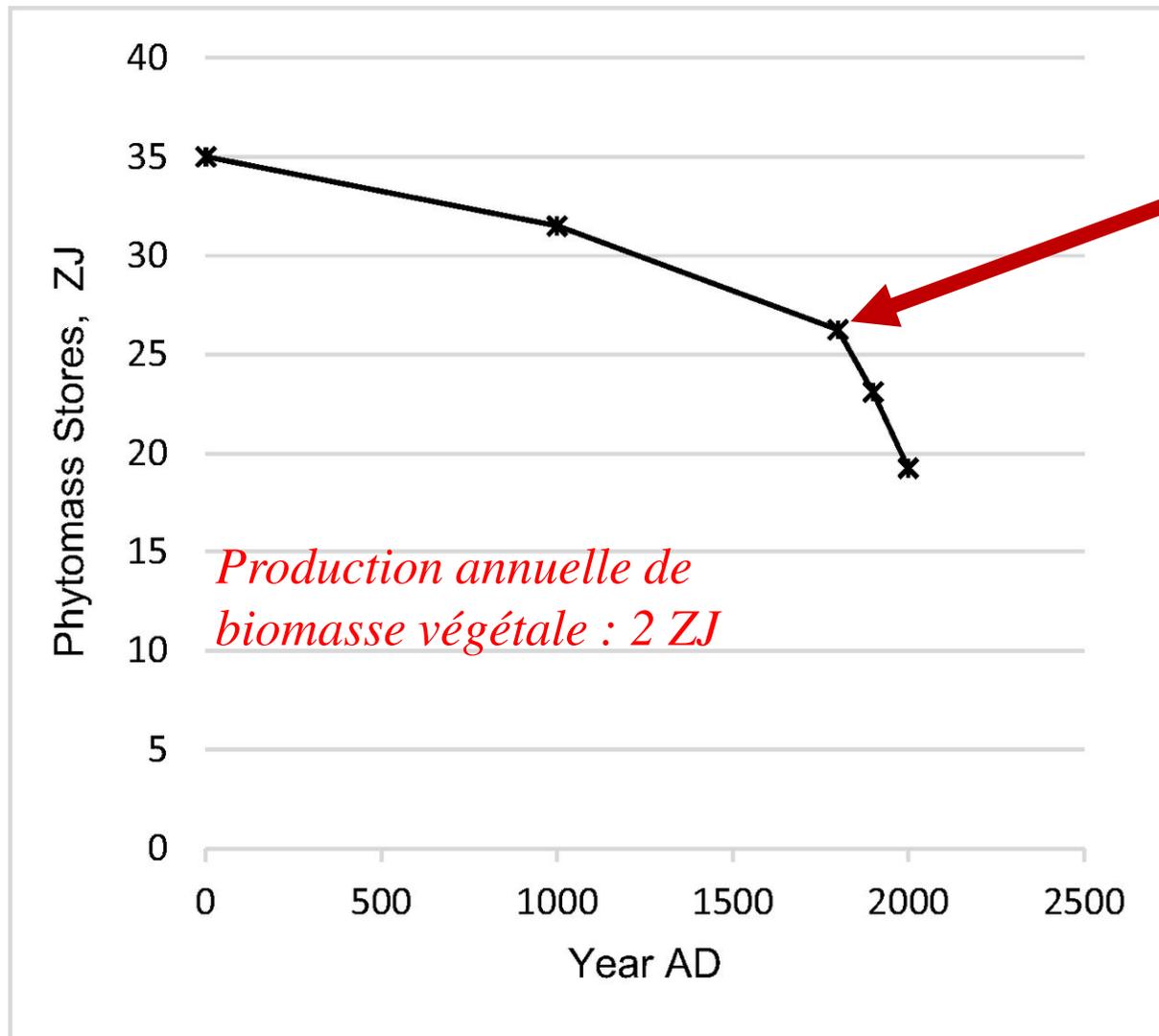


# Notion de variable de forçage 'lente' (slow variable)

Progression lente et continue de variables 'exogènes' à un système écologique (par contraste avec rétroactions, endogènes)

- Gaz à effet de serre
  - Extension spatiale des agro-écosystèmes, des villes
  - Intensité de la consommation humaine : alimentation, énergie, transports
    - Intrants et déchets associés
  - Nombre d'espèces à l'échelle mondiale (?)
  - Abondance des communautés (végétation, insectes, oiseaux...)
- Quelles réponses, ruptures ?
- Difficulté : lenteur des processus écologiques, longueur des phases transitoires (voir Hastings et al. 2018, Science)
  - Entre effondrement, basculement et 'shifting base-line' ?

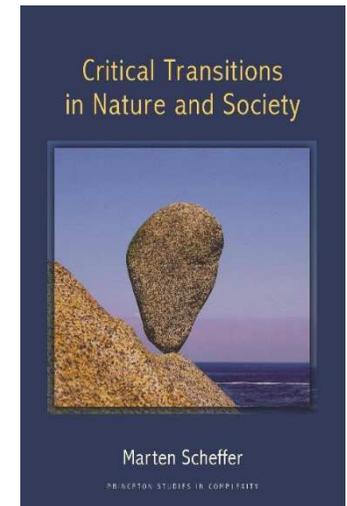
# Variation de la biomasse végétale présente, mondiale (Unité : zetajoules)



*Diminution rapide et importante à partir de la révolution industrielle (1800)*

Schramski et al. PNAS  
2015 112:9511-9517

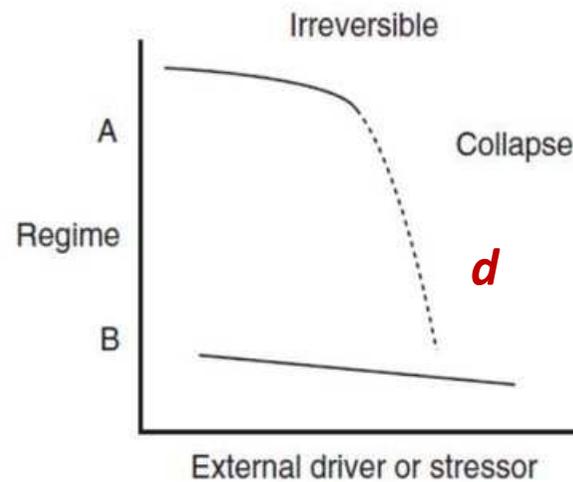
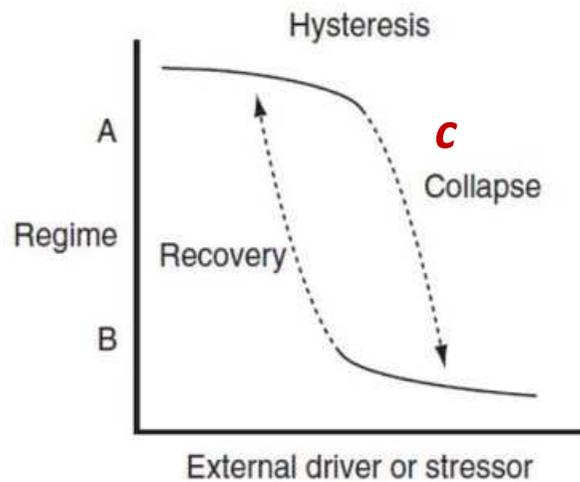
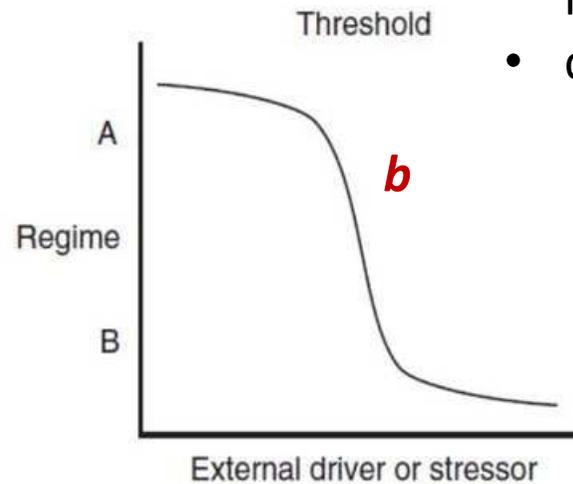
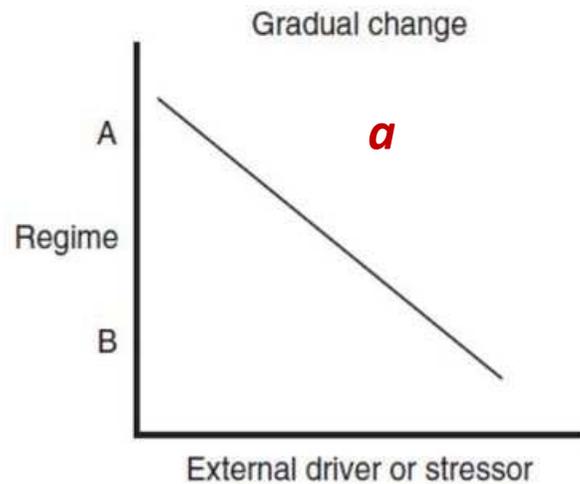
# Réponses des écosystèmes : notion de changement de régime, de transition critique



- Régime
  - Comportement caractéristique d'un système écologique (abondance des populations, architecture des réseaux, paysages...) maintenu par un ensemble de rétroactions
- Changement de régime : changement important et persistant du régime d'un système écologique
  - Proliférations de populations : criquets, maladies infectieuses
  - Effondrements de populations : stocks de poissons, pollinisateurs
  - Changements d'écosystème : algues-coraux, eutrophie/oligotrophie, forêt-savane...
- Notion de transition critique
  - Changement de régime abrupt
  - Anticiper, éviter, en tirer opportunité

# Types de réponses aux variables de forçage

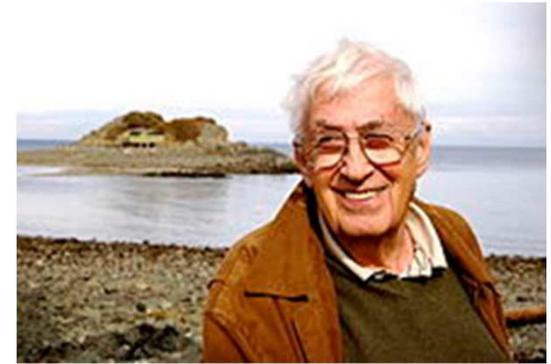
- a : 'shifting base-line',
- b : 'changement' 'réversible'
- c : 'changement' en partie 'réversible', temps de latence qui dépend de l'importance de l'hystérésis
- d : 'changement' 'irréversible'



## Deux grandes options face à une possibilité de changement de régime d'un système socio-écologique

- **Adaptabilité : éviter le changement de régime**
  - Maladies infectieuses : exemple de la vaccination (Pananos et al. PNAS, 2017)
- **Transformabilité : accompagner le changement de régime**
  - Se préparer au basculement, anticiper
  - Opportunité pour promouvoir une transition souhaitée
- **Tensions entre adaptabilité et transformabilité**
  - Probabilité de basculement, d'évitement
  - Conséquences

Résilience écologique, un concept proposé par Holling (1973, cité plus de 15.000 fois),  
'Pioneering the science of surprise'  
(Hommage en 2020)



- Resilience determines the *persistence of relationships within a system* and is a measure of the *ability of these systems to absorb changes* of state variables, driving variables, and parameters, and still persist
- Stability, on the other hand, is the ability of a system to return to an equilibrium state after a temporary disturbance. The more rapidly it returns, and with the least fluctuation, the more stable it is
- The resilience and stability viewpoints of the behavior of ecological systems can yield very *different approaches to the management of resources* (NB : de la transition écologique ?)
  - The stability view emphasizes the *equilibrium, the maintenance of a predictable world*, and the harvesting of nature's excess production with as little fluctuation as possible
  - The resilience view emphasizes *domains of attraction* and the need for persistence

# Lever les confusions sémantiques, conceptuelles

- Définir, redéfinir la résilience écologique
  - Holling and Meffe, 1996, Conservation Biology
  - Histoire –épistémique- du concept, Folke, 2010 (Ecology and Society)
- Relations entre résilience écologique, adaptabilité et transformabilité
  - Walker et al. 2004, puis Folke et al. 2010 (Ecology and Society)
  - Anderies et al., 2013 (Ecology and Society)
- Relations avec la notion de robustesse
  - Anderies et al. 2004 (Ecology and Society)

# Limites et critiques des travaux présentés

- Incertitudes sur l'existence, la position des points de basculement, la nature des variables motrices, de leurs interactions...
  - Changements de régime : Pimm et al. 2019, Nature sustainability
  - Limites planétaires : Montoya et al., 2018, TREE
- Alternatives
  - Autres approches dynamiques des écosystèmes : Collier and Cumming, 2011, Handbook of the philosophy of science, vol.11

# Plan des trois cours

1. Notion de changement de régime (éventuel)
  - Cas de l'eutrophisation
  - Autres cas documentés, logique des limites planétaires
2. Adaptabilité : maintenir un régime, face à des variables de forçage, en situation d'incertitude
  - Relations avec la robustesse, la théorie du contrôle robuste
  - Couplages humains et écosystèmes : les représentations et institutions humaines comme actrices
3. Transformabilité
  - Théorie des cycles adaptatifs
  - Construire la notion de transformabilité : définir ce qui importe en situation de changement récurrent de régime

# Changement de régime : état trophique des écosystèmes aquatiques



## *Régime oligotrophe*

- Macro-algues
- Eaux claires, riches en oxygène
- Abondance poissons : chaînes trophiques longues



Expérimentation  
(fertilisants  
dans la partie  
inférieure)

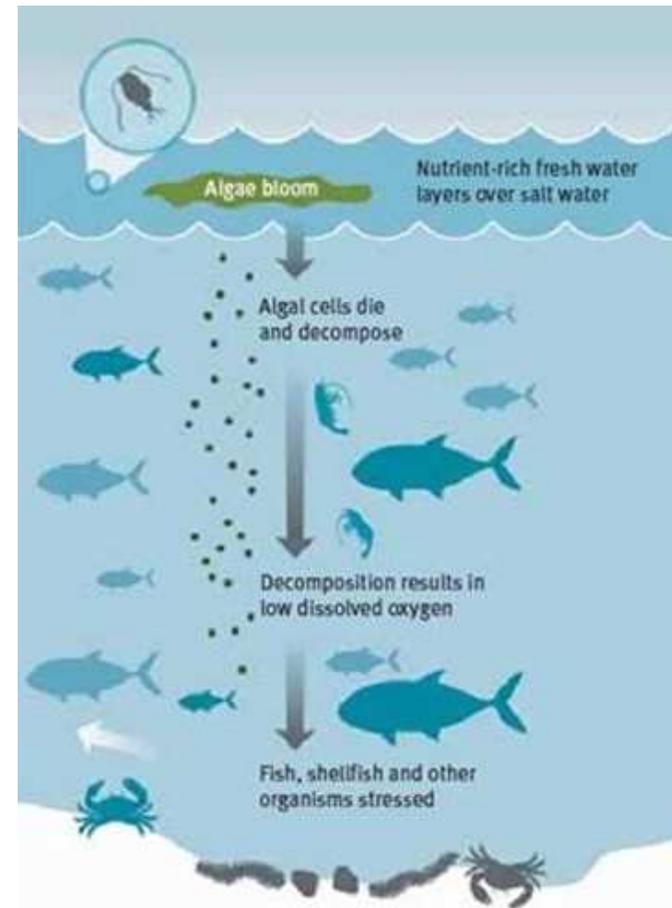


## *Régime eutrophe*

- Phytoplancton hyper-abondant
- Eaux turbides, anoxie (déficit en oxygène)
- Peu de poissons : chaînes trophiques courtes

# Mécanismes conduisant au basculement vers le régime eutrophe

1. Enrichissement en azote et/ou phosphate des lacs oligotrophes
2. Au-delà d'un certain seuil, prolifération du phytoplancton, échappant au contrôle de ses herbivores
3. Mortalité et décomposition du phytoplancton non consommé, consommatrices d'oxygène
4. Raréfaction de l'oxygène (anoxie)
5. Mortalité des poissons



## Formalisation du processus de changement de régime

$$\frac{dP}{dt} = a - bP + r \frac{P^2}{P^2 + m^2}$$

- $P$  : concentration en phosphates dans l'eau (variable 'rapide')
- $a$  : apports exogènes en phosphates (variable de forçage, 'lente')
- $b$  : capacité d'absorption des phosphates par l'écosystème (algues, sédiments)
- $r$  : taux de resuspension des phosphates absorbé par l'écosystème (algues, sédiments)
- $m$  : constante de resuspension
- Plusieurs équilibres possibles pour certaines valeurs de la variable lente ( $a$ )

# Régime : relation(s) avec la variable de forçage (apports exogènes en phosphates)

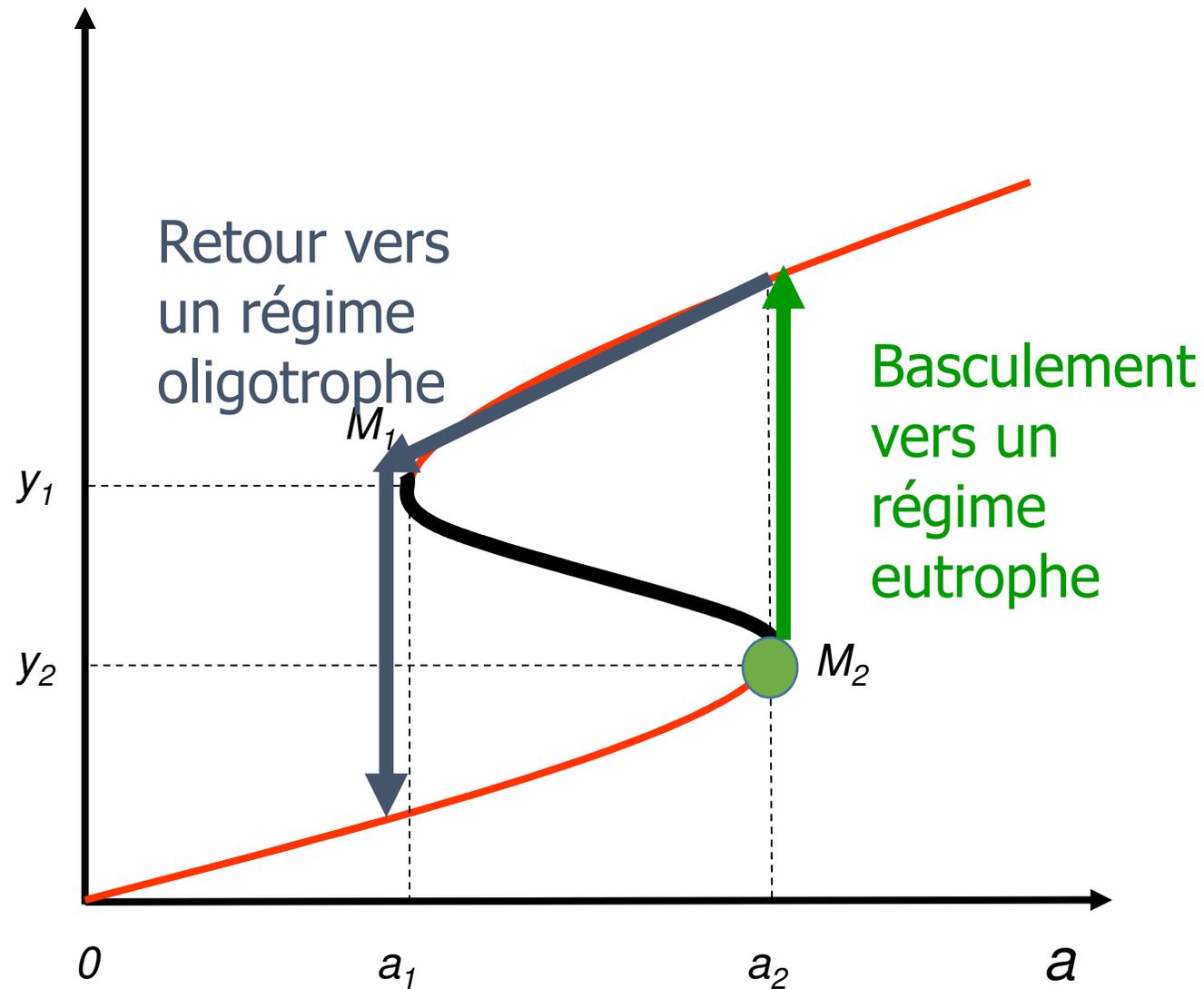
Teneur en phosphates dans l'eau

Régime

Eutrophe

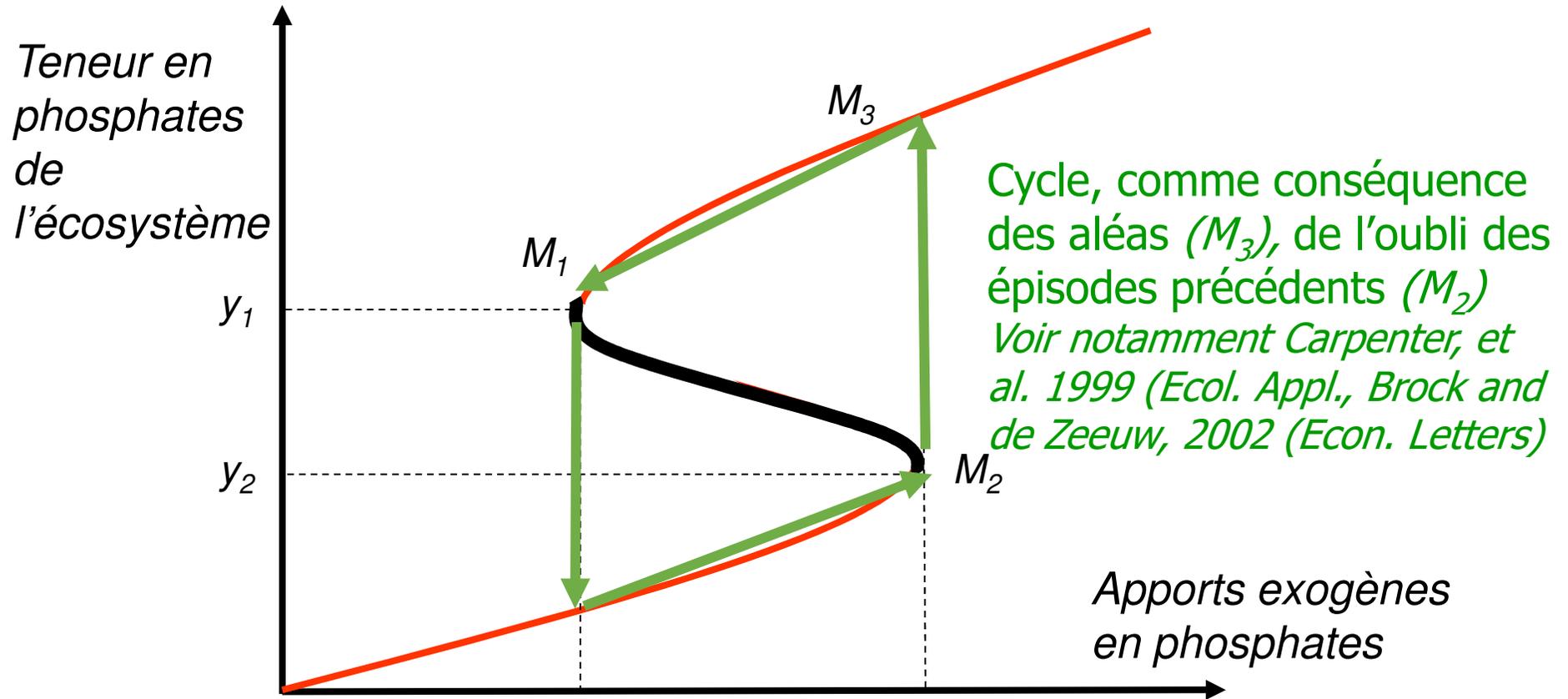


Oligotrophe

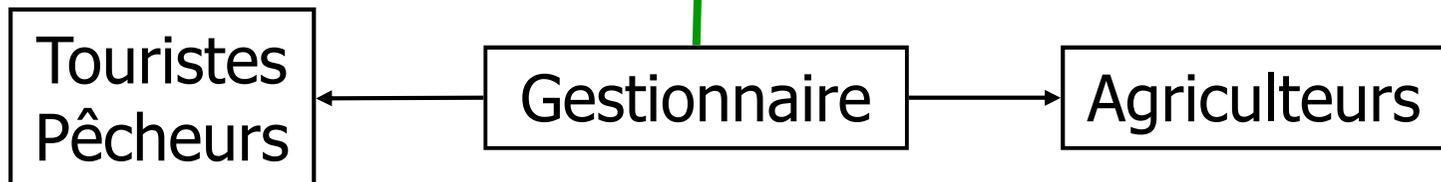


Apports exogènes en phosphates (variable 'lente')

# Changement de régime et gestion

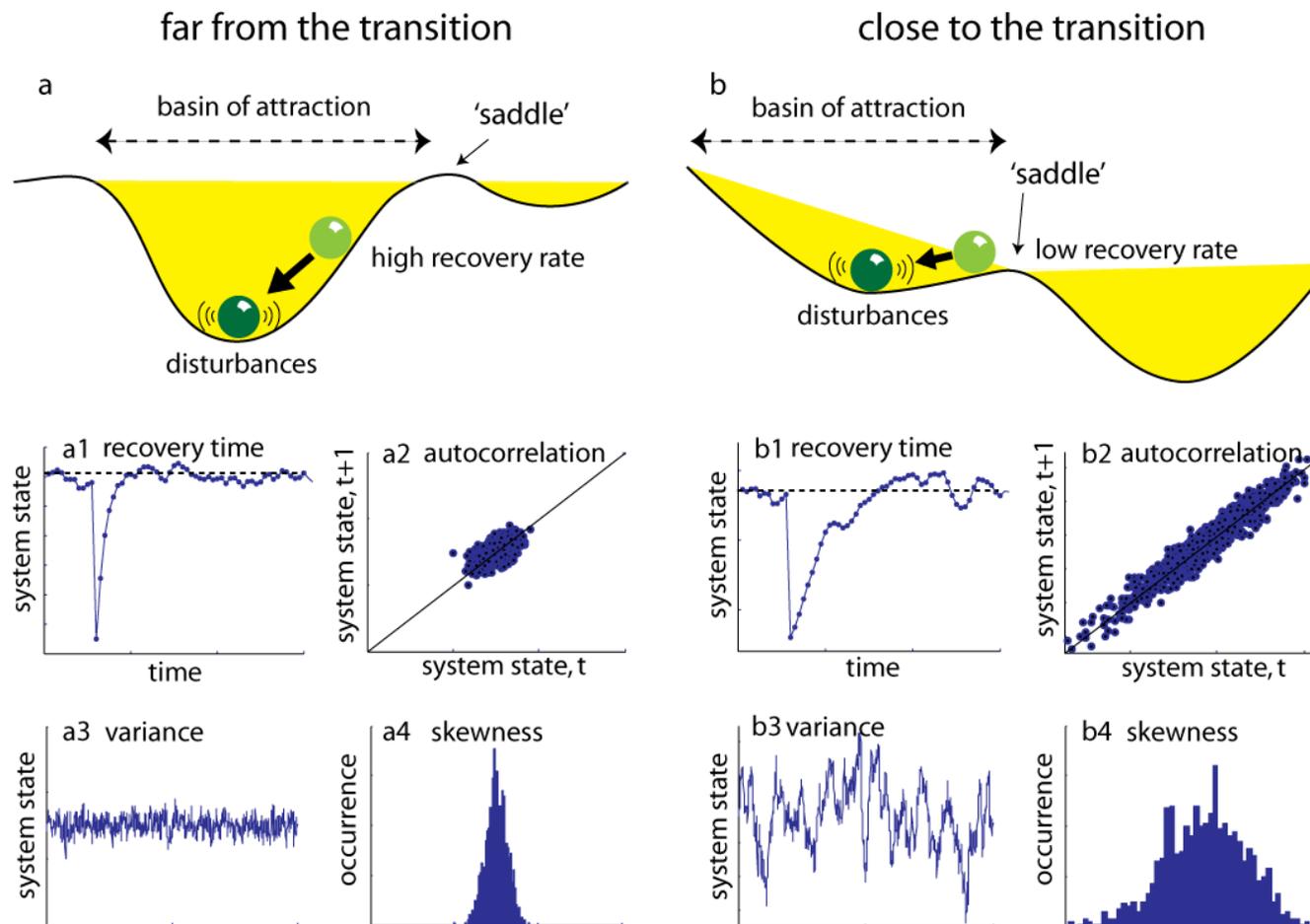


M2: Optimum en l'absence de variations environnementales ?

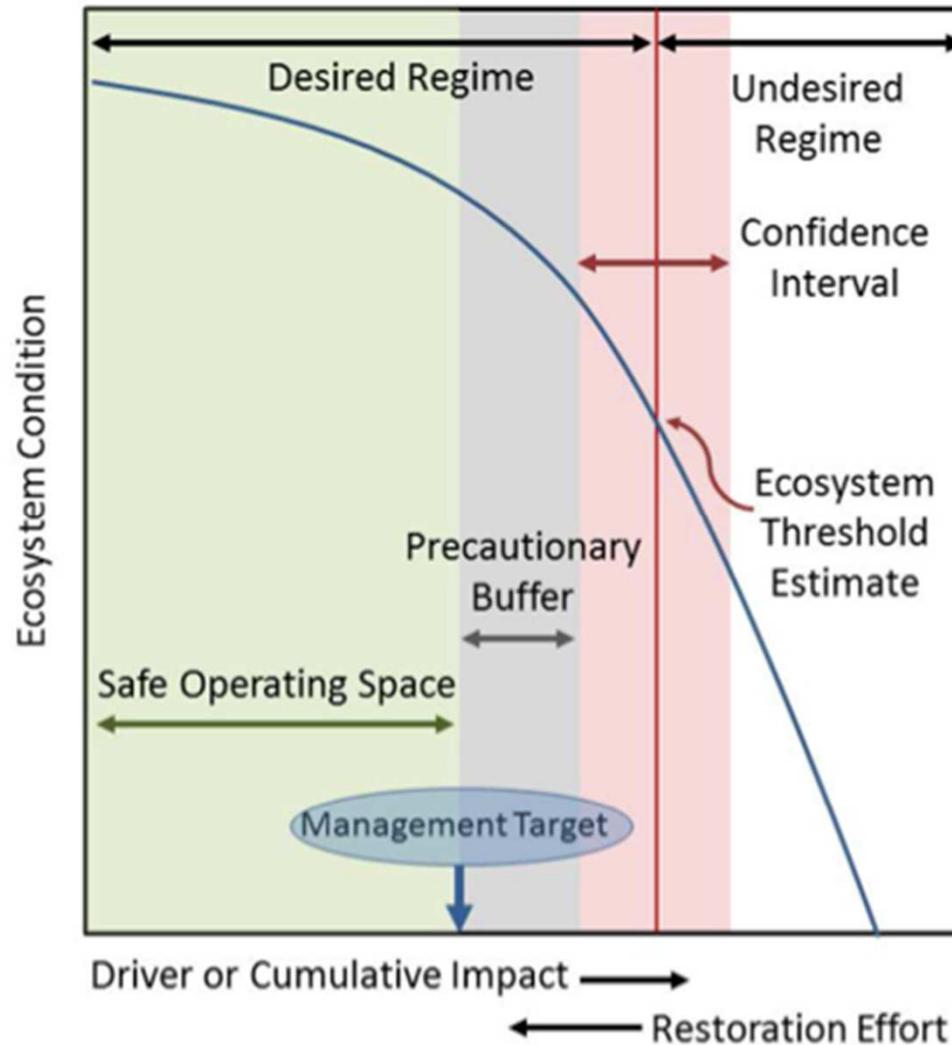


# Anticiper, éviter, un changement de régime : les EWS (early-warning signals)

- EWS : font l'hypothèse que le comportement des variables du système change lorsque l'on se rapproche d'une transition critique (Scheffer et al. 2009, Science)



# Notion de noyau de viabilité (SOS, 'safe operating space')



# Changements de régime, autres travaux de modélisation

## Cas des réseaux écologiques (plantes-pollinisateurs...)

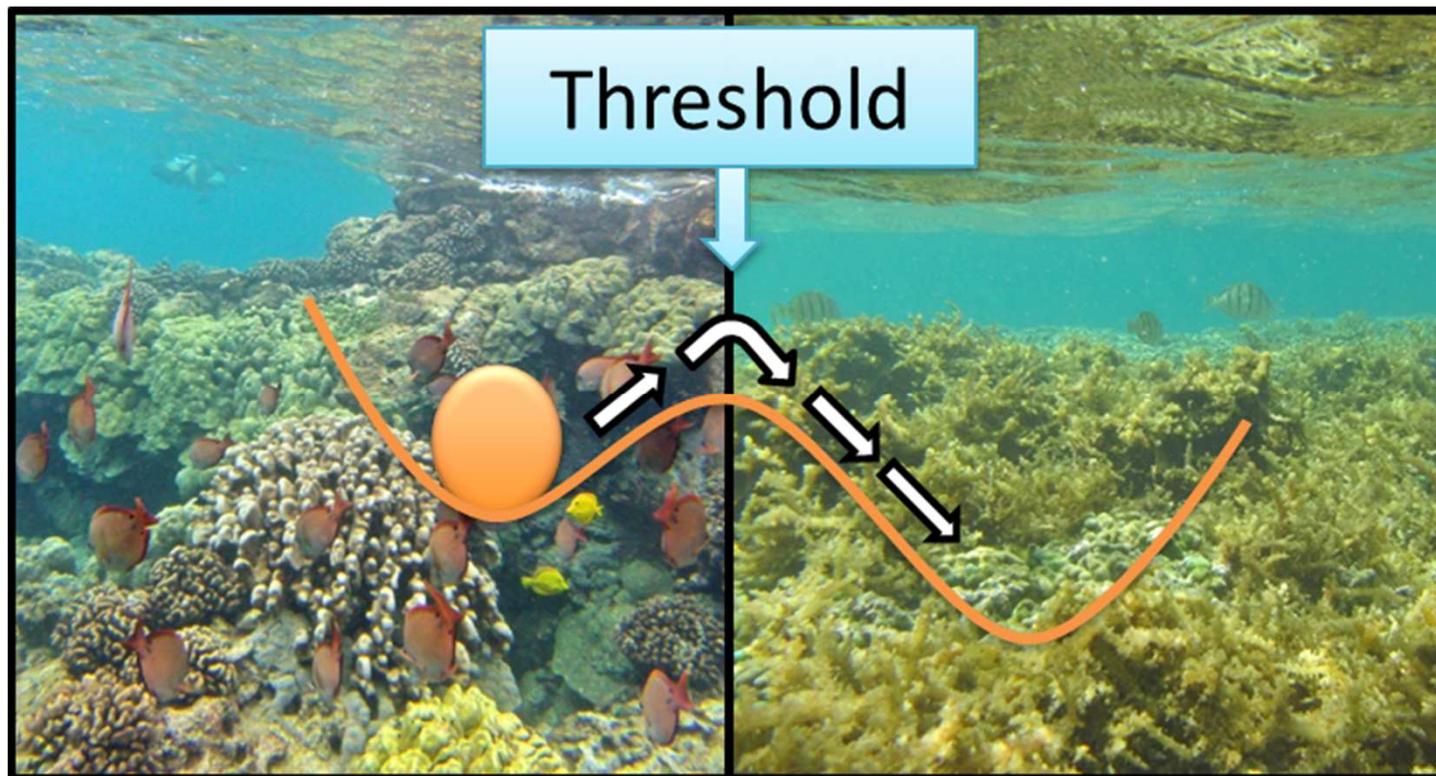
- Entités et interactions bien identifiées (comparativement)
  - Grand nombre
- Exemple Gao et al. Nature, 2016

## Processus spatiaux de diffusion (Martin et al. 2015, PNAS)

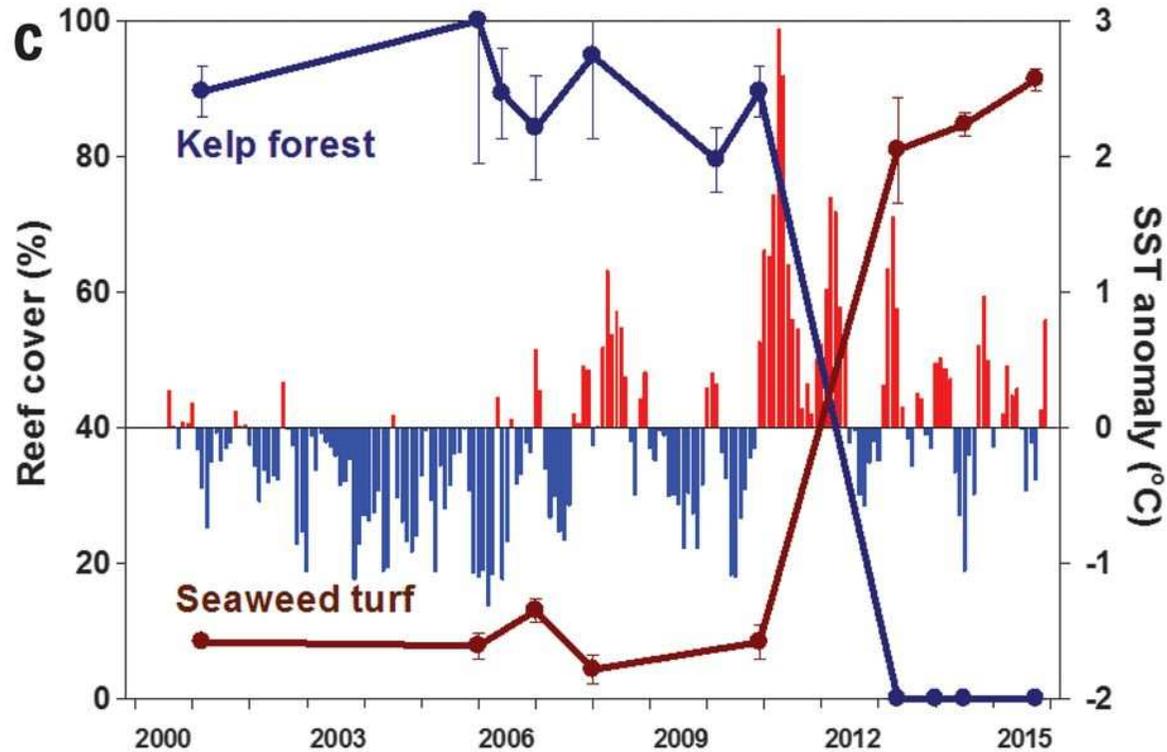
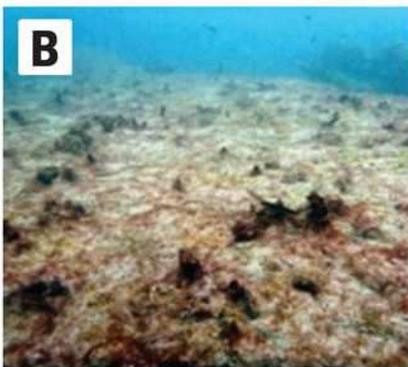
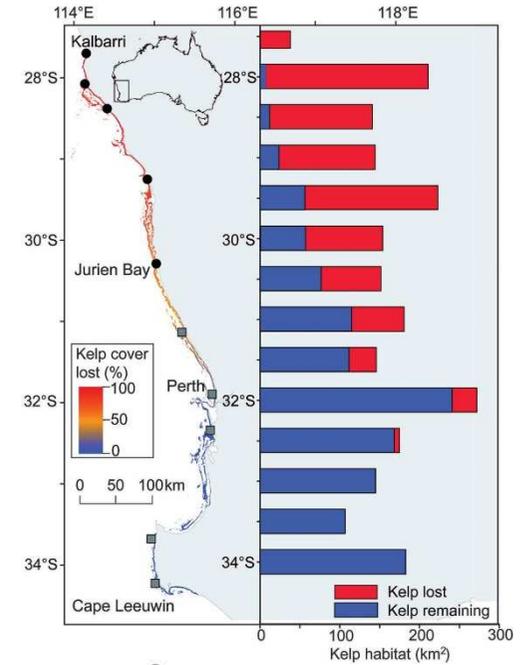
- Ont la capacité de rendre les transitions moins abruptes

# Changements de régime : exemples, cas documentés

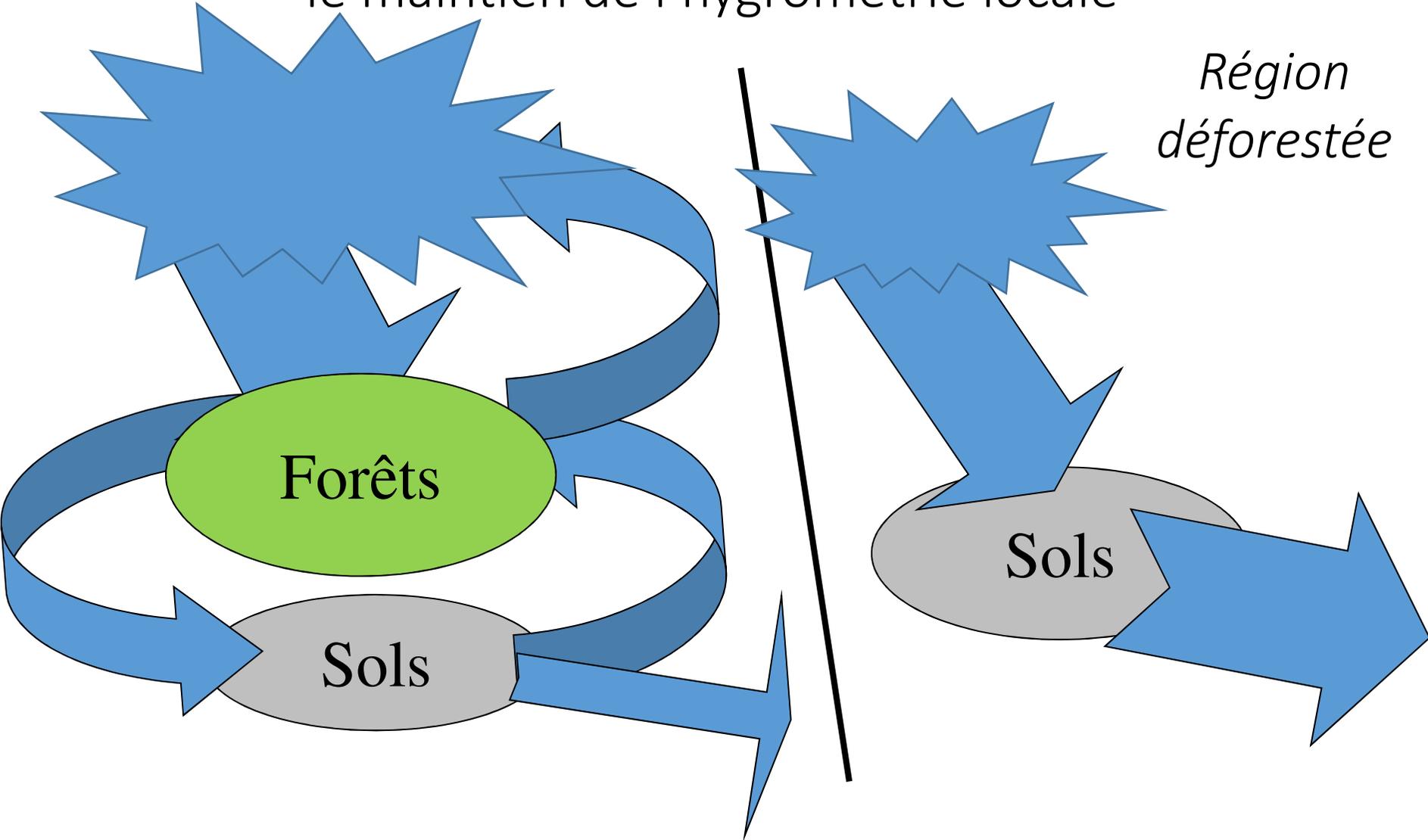
(cas de la transition coraux-algues)



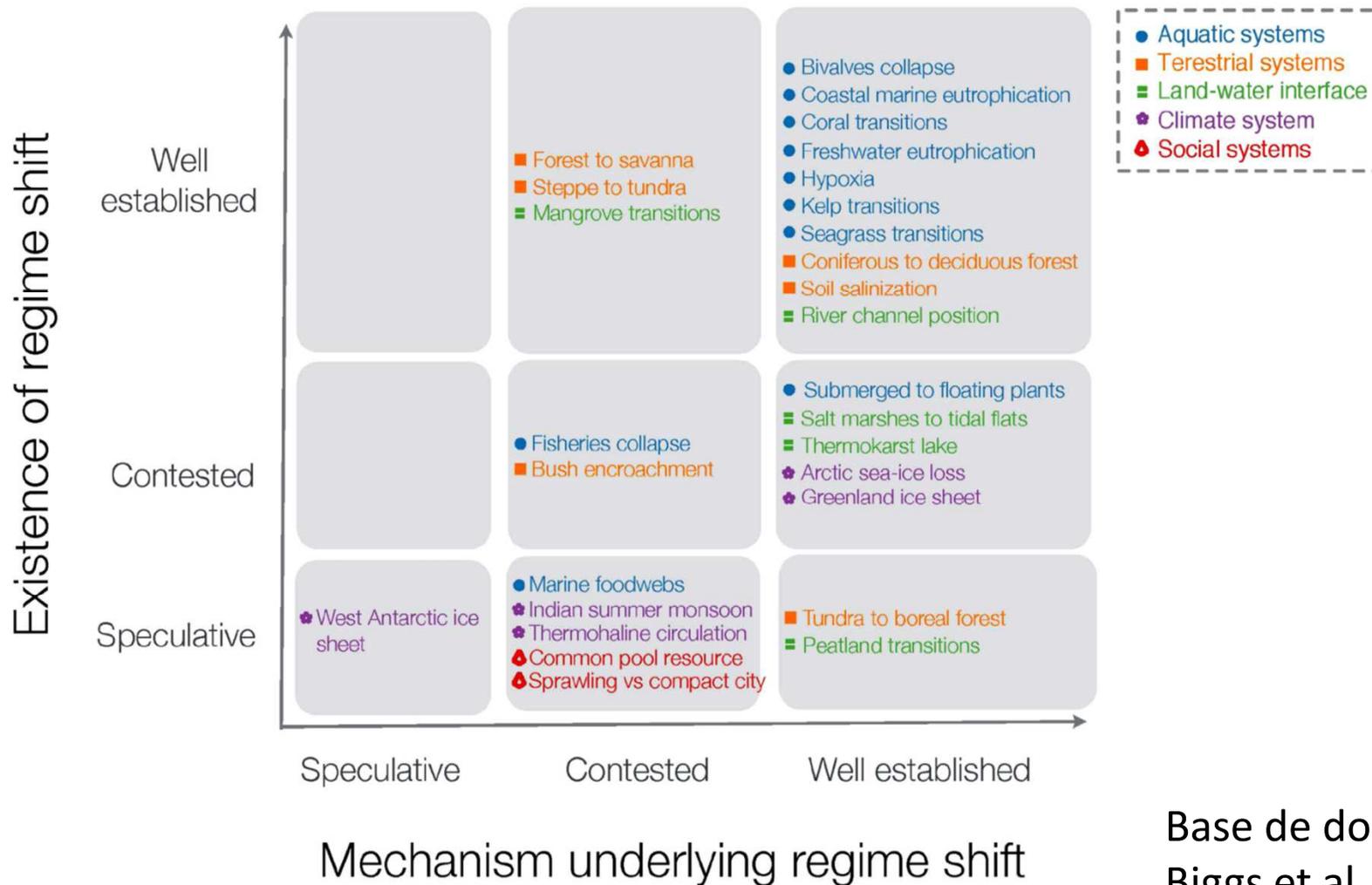
# Wernberg et al. Science, 2016



# Bascullement forêt-savane : rôle de la végétation dans le maintien de l'hygrométrie locale

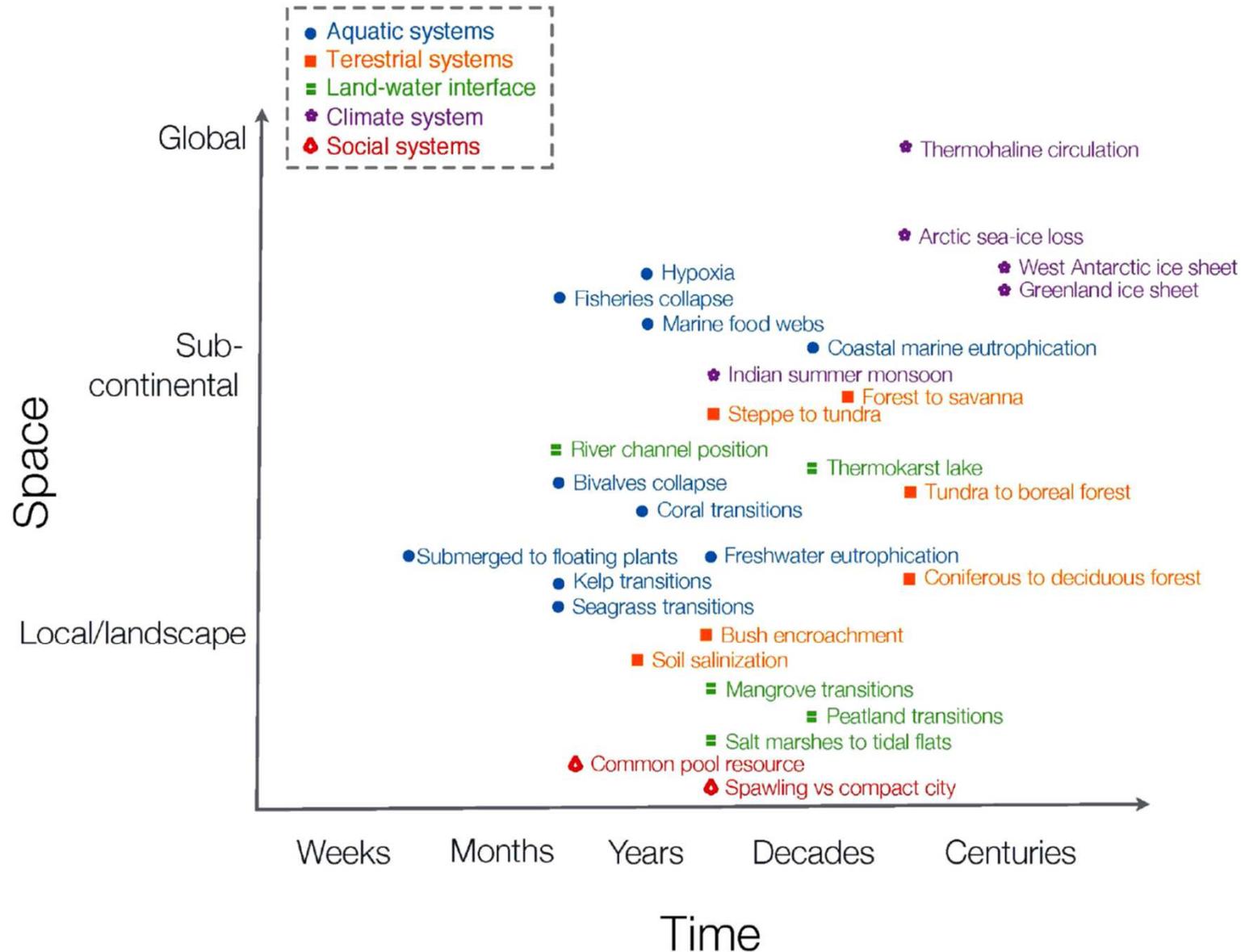


# Changements de régime : cas documentés, solidité scientifique

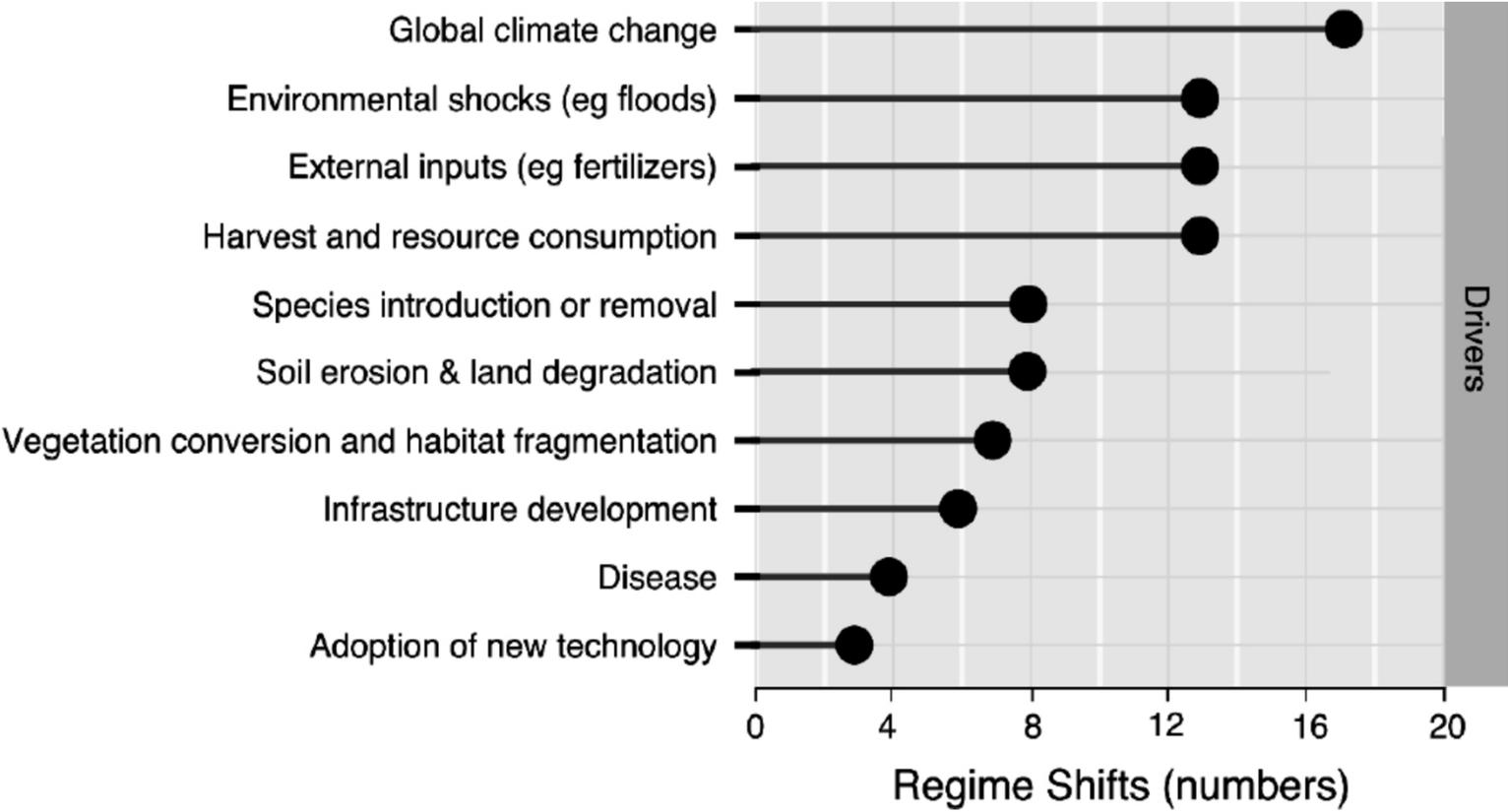


Base de donnée : voir Biggs et al. 2018 (Ecology and society)

# Changements de régime : diversité des échelles d'espace et de temps



# Causes putatives des changements de régime (Biggs et al. 2018)

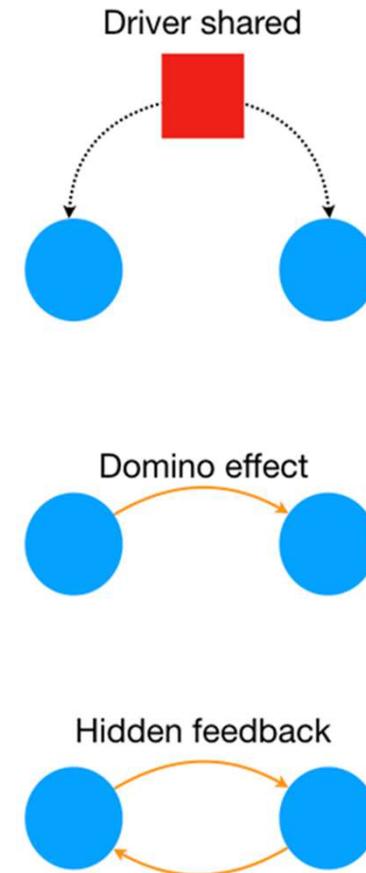


# Changements de régime : importance des interactions entre socio-écosystèmes

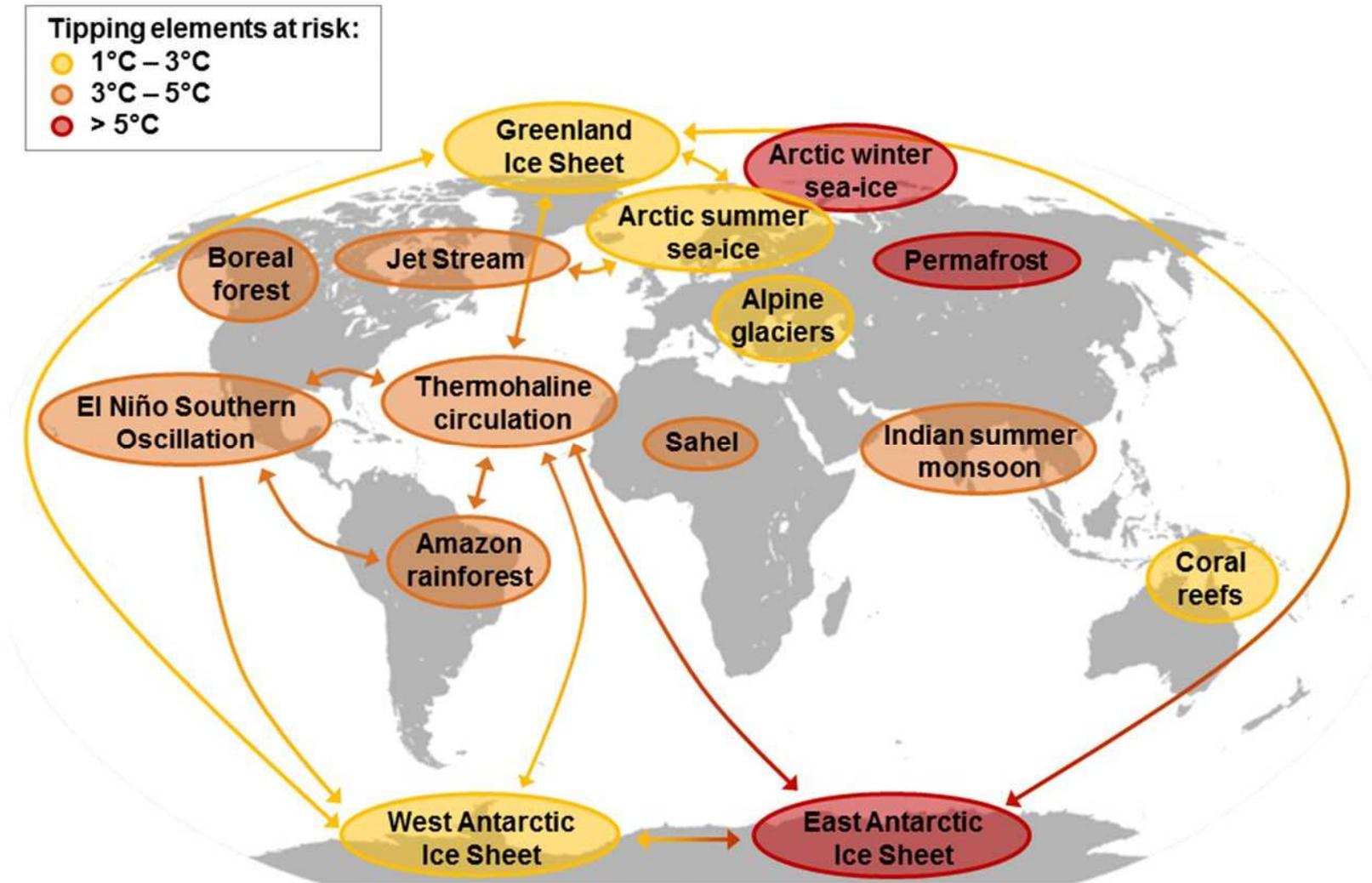
Voir Rocha et al. 2018, Science

- Trois types d'interaction possibles
- En distinguant variables de forçage (exogènes, motrices) et variables de rétro-action

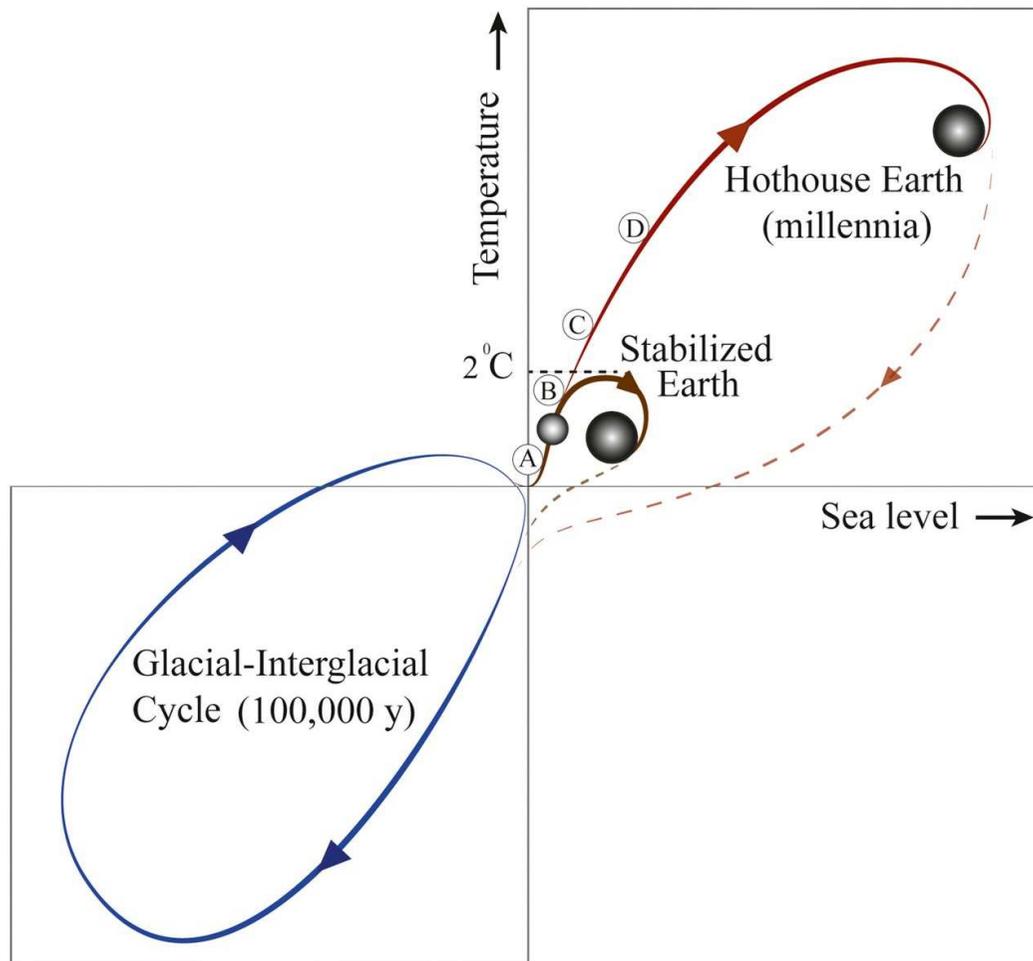
➤ Nombreux cas d'interactions ?



# Changements de régime selon l'intensité du changement climatique, possibilités d'interaction



Trajectoire climatique possible, en référence aux cycles glaciaires-interglaciaires récents, en cas de rétroaction positive entre changements locaux et changement climatique



**D : milieu éocène  
(autour de - 50  
million d'années)**

*Steffen et al. 2018 8252-8259*

PNAS

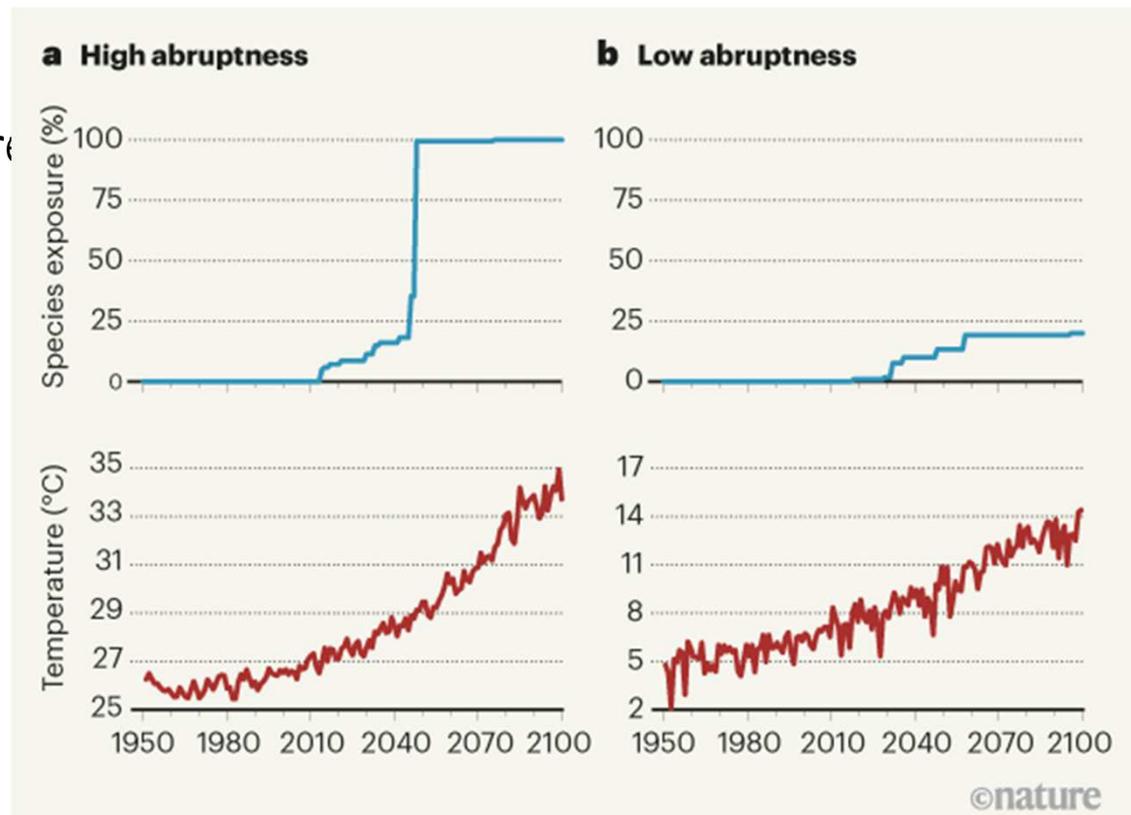
# Quid de la biodiversité ?

Sensibilités comparables des espèces au changement climatique

- Basé sur leurs sensibilités passées

Par rapport à d'autres perturbations anthropiques

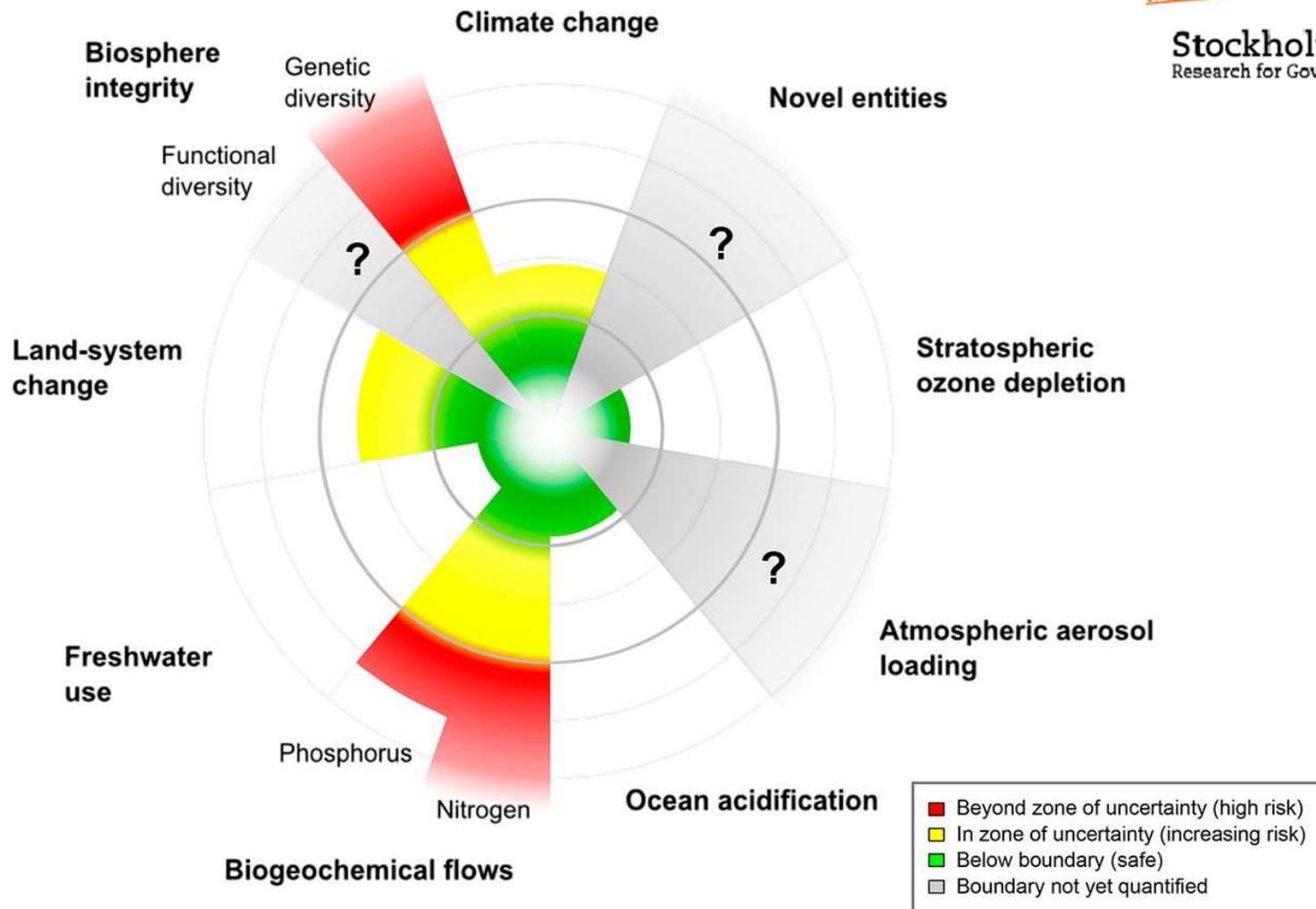
- Déforestation
- Eutrophisation
- Ecotoxicité
- Voir Trisos and Pigot, Nature



La proposition de neuf 'limites planétaires' : s'inspire de la notion de SOS, de résilience écologique (?)



**Stockholm Resilience Centre**  
Research for Governance of Social-Ecological Systems



Questions ?