# Dynamique, stabilité, résilience

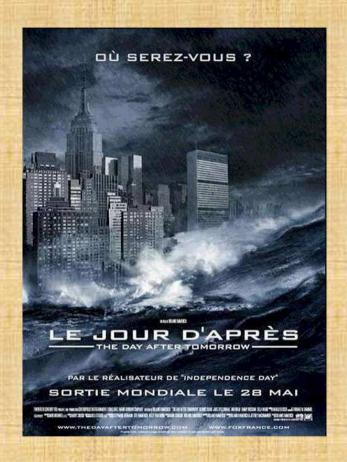
S. Barot IRD, Bioemco

http://millsonia.free.fr/

### Objectifs du cours + TD

- Partir d'un problème complexe
- → Etudier les notions permettant d'aborder ce problème en cours: dynamique, résilience, stabilité
- → Montrer en quoi ce sont des notions fondamentales en écologie, en utilisant des exemples variés
- → Résoudre le problème en TD

### Le problème





Quel est le scénario du film?

→ Un tel scénario est il réaliste?

# Pourquoi est il important de répondre à cette question?

- Que sait on du changement climatique actuel?
- → Quelles sont les causes?
- → A quelle vitesse les changements se réalisent-ils?
- → Quels sont les risques?
- → Peut-on diminuer ces risques?

# Pourquoi un scénario du type « Jour d'après » serait si terrible?

- Changement extrêmement brutal/rapide
- Changement imprévisible

### Pour répondre à toutes ces questions...

- Notion de système dynamique
- Dynamique des systèmes
- But du cours : aborder les bases de cette méthode sans mathématique

Plan Cours 1

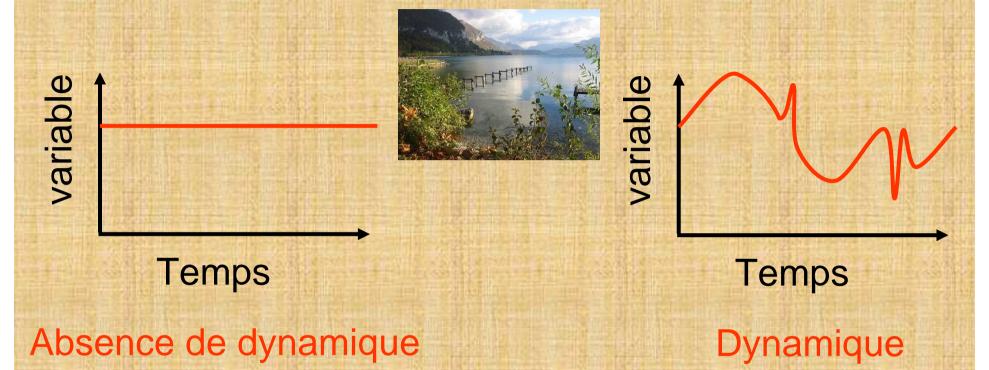
Qu'est ce qu'un système dynamique en écologie?

- → Pourquoi une approche systémique en écologie?
- → Comment étudier un système dynamique?
- Grands types de comportement d'un système dynamique
- → Exemples
- Conclusion
   Généralisation à d'autres domaines

Cours &

## Qu'est ce qu'un système dynamique en écologie?

# Qu'est ce que la dynamique d'un système?

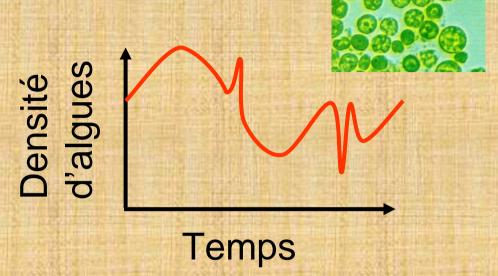


→ La plupart des phénomènes écologiques sont variables dans le temps : dynamique !!!

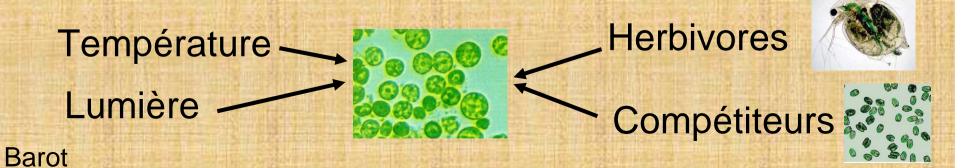
### Qu'est ce qu'un système écologique?

→ Exemple du lac



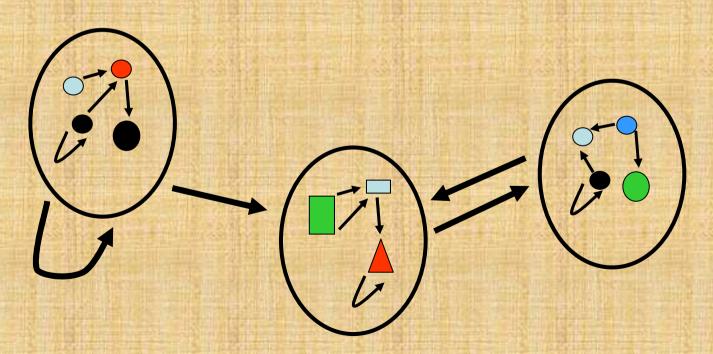


Pourquoi la densité d'algue fluctue? Interactions avec d'autres "acteurs" ou variables



### Définition général du terme "système"

Un système est un objet complexe, formé de composants distincts reliés entre eux par un certain nombre de relations. Les composants sont considérés comme des sous-systèmes, ce qui signifie qu'ils entrent dans la même catégorie d'entités que les ensembles auxquels ils appartiennent. Un sous-système peut être décomposé à son tour en sous-systèmes d'ordre inférieur ou être traité (au moins provisoirement) comme un système indécomposable, c'est-à-dire comme un système réduit à un seul élément.



### Les systèmes écologiques classiques

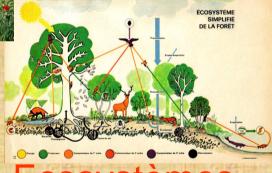
#### **Population**





Communauté





Ecosystèmes



Biosphère

→ Des échelles emboîtées!

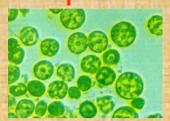
11

#### **Définitions**

- Population : ensemble d'individus conspécifiques en interaction
- Communauté : ensemble d'espèces en interaction (et tous leurs individus)
- → Ecosystème : ensemble des espèces en interaction avec le milieu physique local
- → Biosphère : ensemble des écosystèmes de la planète terre en relation avec le milieu physique à grande échelle (lithosphère, atmosphère)

### Variables d'intérêt écologique

#### **Population**



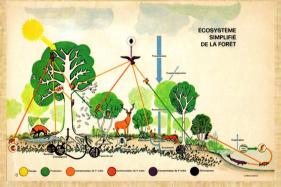
Nombre d'individus = densité Traits des individus = caractéristiques (taille, sexe, physiologie, gènes ...etc)



Nombre d'espèces = biodiversité Nature des espèces Biomasse de chaque espèce

#### Communauté

Caractéristiques physicochimiques : t°, concentration en CO<sub>2</sub>, humidité, quantité de MO...



Ecosystèmes



Biosphère<sub>13</sub>

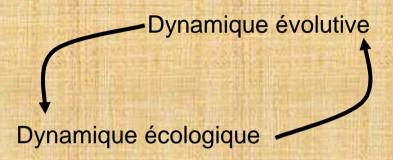
Des échelles temporelles et spatiales très variables Généralement accroissement proportionnel de l'échelle temporelle et spatiale Echelle temporelle Millénaire Siècle Année Journée Toujours la même pente? Heure Infra-organisme Infra-collulaire 14 **Echelle spatiale** Barot

### Echelle écologique/échelle évolutives

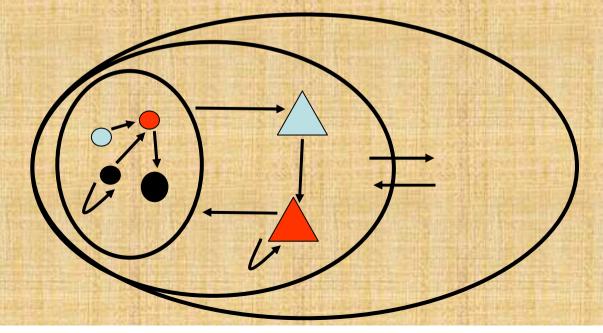
- → Echelle écologique : le génotype des organismes n'a pas le temps de changé (croissance, dynamique de population, changements physico-chimique de l'écosystème)
- → Echelle évolutive : on considère que les organismes ont le temps de s'adapter, leur génotype change, leur phénotype change aussi
- → Echelle évolutive > échelle écologique Est-ce toujours vrai?

### Intégration des différentes échelles

→ Echelle évolutive + échelle écologique

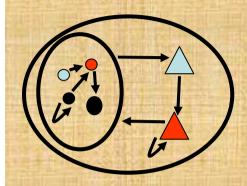


### → Echelles emboitées

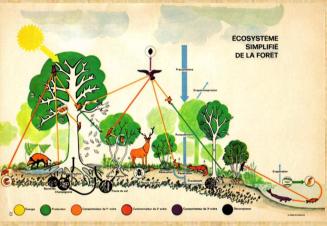


### **Exemples**

### Croissance des plantes ↑ Décomposition de la MO des sols ↑



Réponse climatique



**Ecosystèmes** 



Grands flux atmosphériques et échanges de chaleur

Réponse des écosystèmes au changement global:
CO2 atmosphérique ↑

t° ↑

17



Dynamique évolutive Dynamique écologique

Réponse climatique À long terme

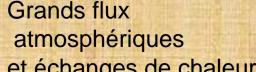


Ecosystèmes

Réponse évolutive des organismes des écosystèmes



Grands flux atmosphériques et échanges de chaleur





# Pourquoi l'approche systémique en écologie?

# Toutes les questions écologiques sont plurifactorielles

→ Pourquoi l'espèce X est en train de disparaître dans l'écosystème Y?

Action directe de l'homme? Changement environnemental?

Un nouveau parasite? Interaction entre tous ces facteurs?

Pourquoi la fertilité de nombreux sols agricoles diminue-t-elle?

Disparition d'organismes du sol favorable?

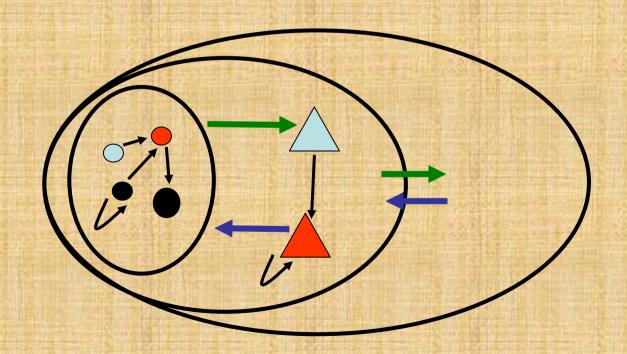
Un nouveau parasite dans le sol?

Changement physico-chimique du sol?

Interaction entre tous ces facteurs?

# Les éléments d'un système écologique ne sont jamais isolés

- Echelles emboîtées
- → Interaction bottom-up et top-down



#### Diversité des acteurs en interaction

- Très grand nombre d'espèces
  - 1.75 million d'espèces décrites
  - 10 million d'espèces au total?
  - Chaque espèce à des propriétés uniques Chaque espèce tisse un réseau d'interaction unique
- Très grande variabilité génétique intraspécifique

Au départ, rôle de la diversité génétique pour l'évolution

Maintenant, rôle de la diversité génétique pour le fonctionnement des communautés et des écosystèmes

### Aspects historiques très importants

→ Les organismes ont une histoire : évolution

→ La terre a une histoire

Depuis le début de son refroidissement Coévolution organismes-terre

→ Aspects historique à plus petite échelle

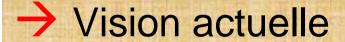
L'histoire (sur plus sieurs centaines d'année) d'une forêt ou d'un sol agricole influence son fonctionnement actuel

Influence durable de l'homme

# Des systèmes fondamentalement dynamiques

Vision ancienne (Rousseau, de scientifique après la seconde que seconde que après la seconde que la seconde

Equilibre de la nature comme témoignage d'harmonie Preuve de bon fonctionnement



Il y a peu d'équilibres écologiques réellement stables sur le long terme

Des phénomènes dynamiques font partie du fonctionnement normal des écosystèmes



## Différences avec les autres sciences de la nature?

Expérience sur la supraconductivité

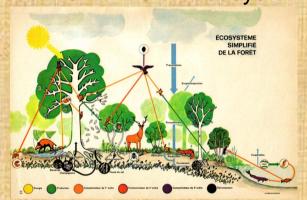


Nombre d'acteurs faible Nombre de facteurs faible

Pas de prise en compte du temps: lois universelles

Expérience déconnectée du reste de l'univers

Fonctionnement d'un écosystème



Nombre d'acteurs élevé
Nombre de facteurs élevé
De nombreuses échelles
temporelles
Connexion avec le reste
de la biosphère

### Cas de la biologie

→ La biologie a souvent été "réductionniste"

le réductionnisme désigne une méthode scientifique qui consiste à décomposer un phénomène en des éléments plus simples auxquels on peut appliquer des disciplines considérées comme plus fondamentales

Organisme

**Organes** 

Cellules

Molécules

Gènes

### Caricature de la biologie moléculaire

→ La biologie a souvent été "réductionniste"

Un gène

Une protéine

Une fonction

Une voie métabolique

#### **Problèmes**

- → La méthode a fait ses preuves mais...
- On perd la vue d'ensemble
- On perd les interactions
- On perd la possibilité de construire des explications générales

Organisme

**Organes** 

Cellules

Molécules

Gènes

### Vision systémique .... holisme

système de pensée pour lequel les caractéristiques d'un être ou d'un ensemble ne peuvent être connues que lorsqu'on le considère et l'appréhende dans son ensemble, dans sa totalité, et non pas quand on en étudie chaque partie séparément

- On insiste sur les interactions
- On insiste sur les propriétés globales
- On se donne la possibilité de faire des prédictions sur les états futurs du système global

# Vers une biologie systémique ou intégrative

- On se rend compte qu'une cellule ou un organisme est un système complexe
- Nécessité de comprendre les propriétés globales de ces systèmes
- Par exemple pour mettre au point un médicament et prédire tous ces effets

#### Exemple d' Escherichia coli programme EcoCyc

4 497 gènes qui codent presque autant de protéines 956 opérons, 3 629 réactions biochimiques, 182 voies métaboliques, 1 133 enzymes et 197 transporteurs Barot

### Notion de propriété émergente

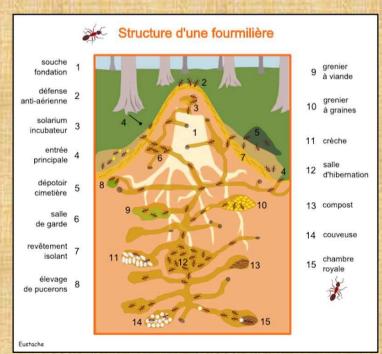
- → L'ensemble est plus que la somme de ses parties. On ne peut pas forcément prédire le comportement de l'ensemble par la seule analyse de ses parties.
- → L'ensemble adopte un comportement caractérisable, la propriété émergente, sur lequel la connaissance détaillée de ses parties ne renseigne pas complètement.
- → Ce sont ces propriétés émergentes qui sont intéressantes : type de dynamique du système …etc
- Développement de méthodes particulières pour analyser et prédire ces propriétés

### Emergence faible et forte

- → Emergence faible : La dynamique du tout est entièrement déterminée par la dynamique causale des parties, et est subjectivement interprétée comme émergente par un observateur extérieur.
- → Emergence forte : Il n'existe plus de lien causal entre les constituants de la structure émergente et ses propres propriétés.
- → Déterministe / Non déterministe

### **Exemples**

- → La vie
- → La conscience
- → La production primaire d'un écosystème
- → L'intelligence collective des insectes sociaux





SIMPLIFIE DE LA FORET

# Comment étudier un système dynamique?

### Définition du système

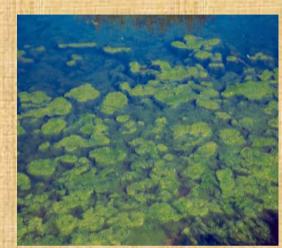
→ Echelle spatiale
 Echelle temporelle
 Acteurs/variables pris en compte
 Mécanismes pris en compte

#### Comment choisir?

- → En fonction de la question posée
- En fonction des connaissances déjà acquises sur le système
- Récolte de données empiriques complémentaires

### Exemple: eutrophisation d'un lac

Multiplication des algues Diminution du taux d'oxygène Disparition d'organismes

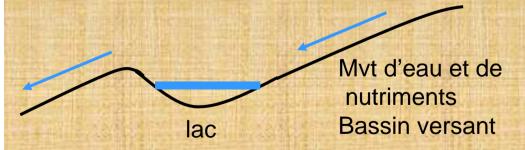


- → De nombreuses questions
  - + Quels sont les facteurs de l'eutrophisation?
  - + Quelle est leur importance relative?
  - + L'eutrophisation est elle réversible?
  - + Que faire pour éviter l'eutrophisation?
- Pourquoi parle-t-on tant des problèmes d'eutrophisation?

### Exemple: eutrophisation d'un lac

→ Variables à prendre en compte
 Biomasse d'algue Taux d'oxygène
 Taux d'azote minéral Taux de phosphore minéral
 L'ensemble du réseau trophique du lac

→ Echelle spatiale et temporelle

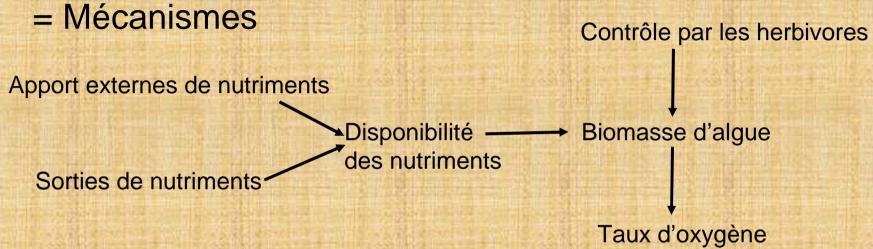


Echelle temporelle : au moins une année Dynamique pluriannuelle

#### On trouve

### Exemple: eutrophisation d'un lac

→ Déterminer les liens entre les différentes variables



Déterminer l'importance de chaque mécanismes Prédire l'évolution du système Forme des relations

ΔBiomasse d'algue = f(disponibilité des nutriments, herbivores)
ΔDisponibilité des nutriments = f(apports, sorties, biomasse d'algue)

### Passage à système d'équations différentielles

Pour 3 variables A, b, C et le temps considéré comme discontinu

$$\Delta A = f(A, B, C)$$
  
 $\Delta B = g(A, B, C)$   
 $\Delta C = h(A, B, C)$ 

→ Passage au temps continu

$$dA/dt = f(A, B,C)$$
  
 $dB/dt = g(A, B,C)$   
 $dC/dt = h(A, B,C)$ 

→ Il existe d'autres formalismes mathématiques mais c'est un des plus communs et qui offre le plus d'outils d'analyse

**Barot** 

### Pourquoi a-t-on besoin d'un modèle mathématique?

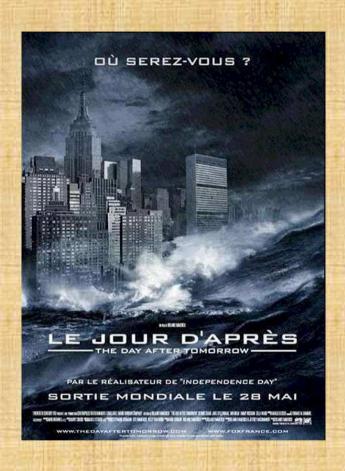
→ Pour faire des prédictions quantitatives

#### **Applications**

- → Pour décrire qualitativement la dynamique du système
- → Pour faire une étude de sensibilité : déterminer quelle est l'influence relative de tel ou tel mécanisme /acteur sur la dynamique du système (qualité et quantité)

Pour comprendre le fonctionnement du système

### Cas étudié en TD





Quel est le système dynamique intervenant?

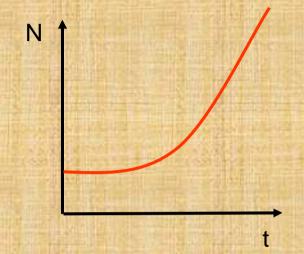


### Méthodes d'étude mathématique

Intégration algébrique

Densité d'une population : N

$$\frac{dN}{dt} = Nr \qquad N = N_0 e^{rt}$$



Est-ce réaliste écologiquement?

- Dans la plupart des cas on ne peut pas intégrer algébriquement
  - + Trop de compartiments
  - + Equations non linéaires

### Méthodes d'étude mathématique

→ Trouver les points d'équilibre

$$dA / dt = f(A, B, C) = 0$$
  $dB / dt = f(A, B, C) = 0$   $dC / dt = f(A, B, C) = 0$  .....

#### Les variables du système ne varient plus

Densité d'une population : N

$$\frac{dN}{dt} = Nr \qquad N = N_0 e^{rt} \frac{dN}{dt} = 0 \quad K$$

$$\frac{dN}{dt} = Nr(1 - \frac{N}{K})$$

$$N_0$$

→ Déterminez le sens des variations Signe de dA /dt

### Simulations numériques

- Intégrer le système d'équations par des approximations numériques
- → Rôle des ordinateurs
- → Problèmes?

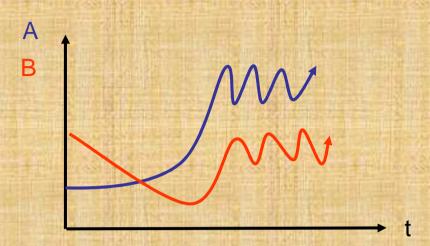
Difficile de décrire tous les comportements possibles en fonction des paramètres

dA /dt= f(A, B,C, p1,p2,p3 ...) dB/dt = g(A, B,C, p1,p2,p3 ...)

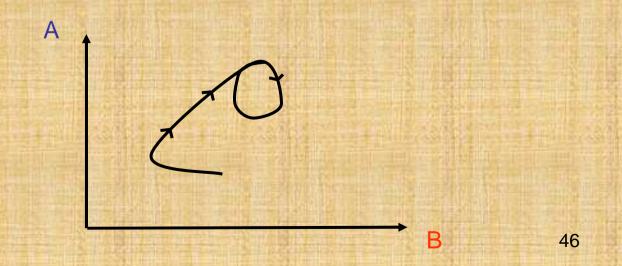
Barot p1,p2,p3 t P1',p2',p3'

### Représentations graphiques

→ En fonction du temps



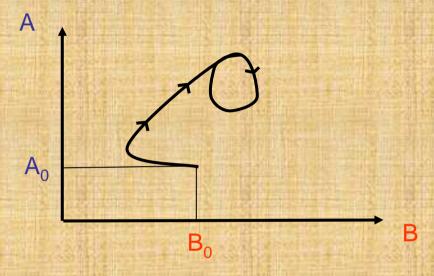
→ Une variable en fonction de l'autre Surtout pour un système à deux ou trois variables

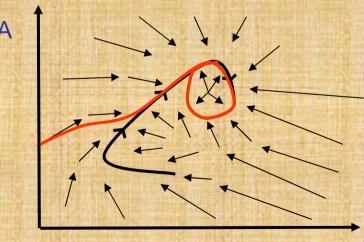


Barot

### Représentations graphiques

→ Cartes vectorielles

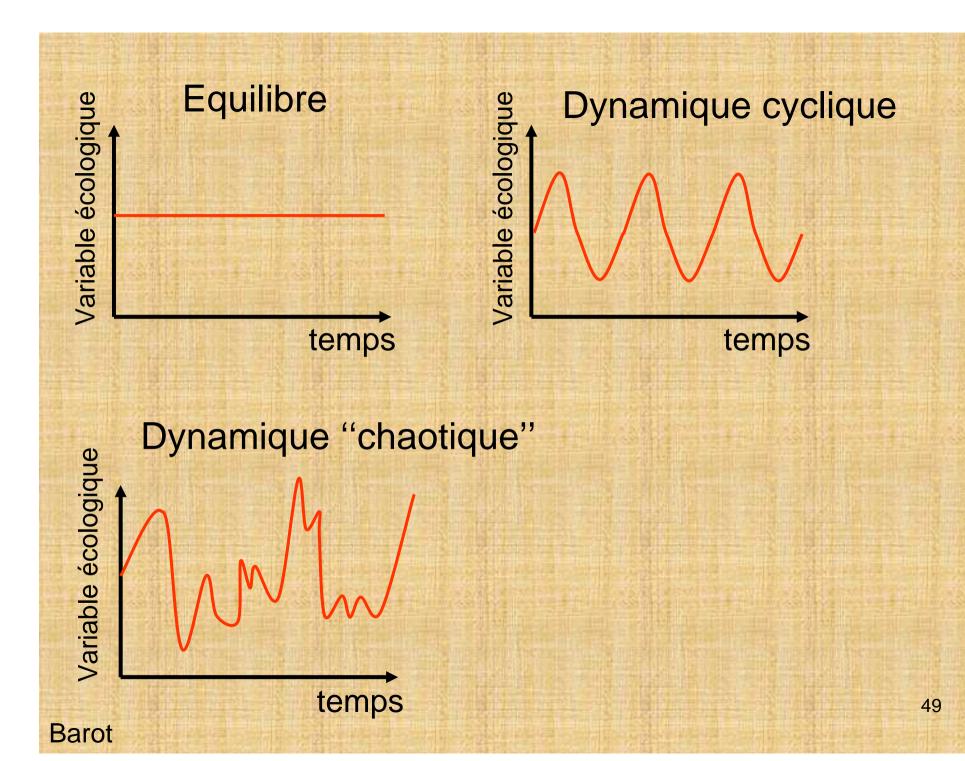




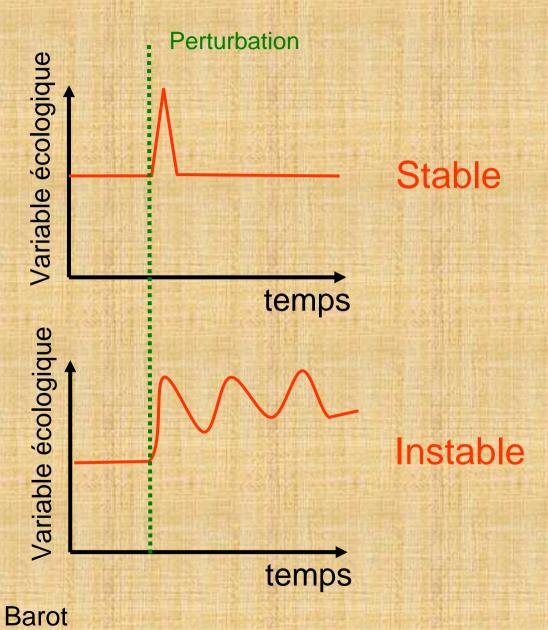
Permet d'avoir une idée globale du comportement du système Quelles que soient les conditions initiales

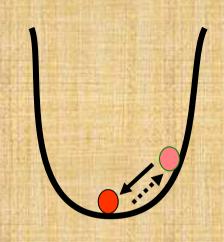
В

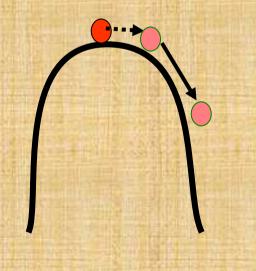
# Grands types de comportement d'un système dynamique



### Types d'équilibre







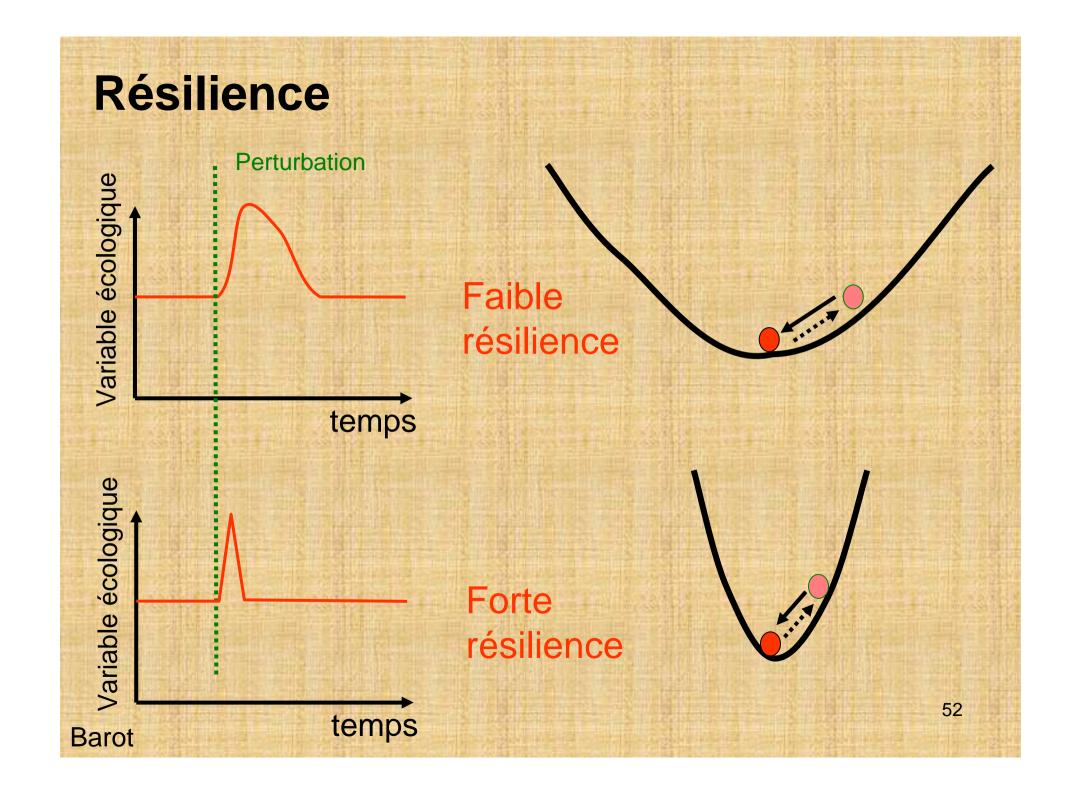
50

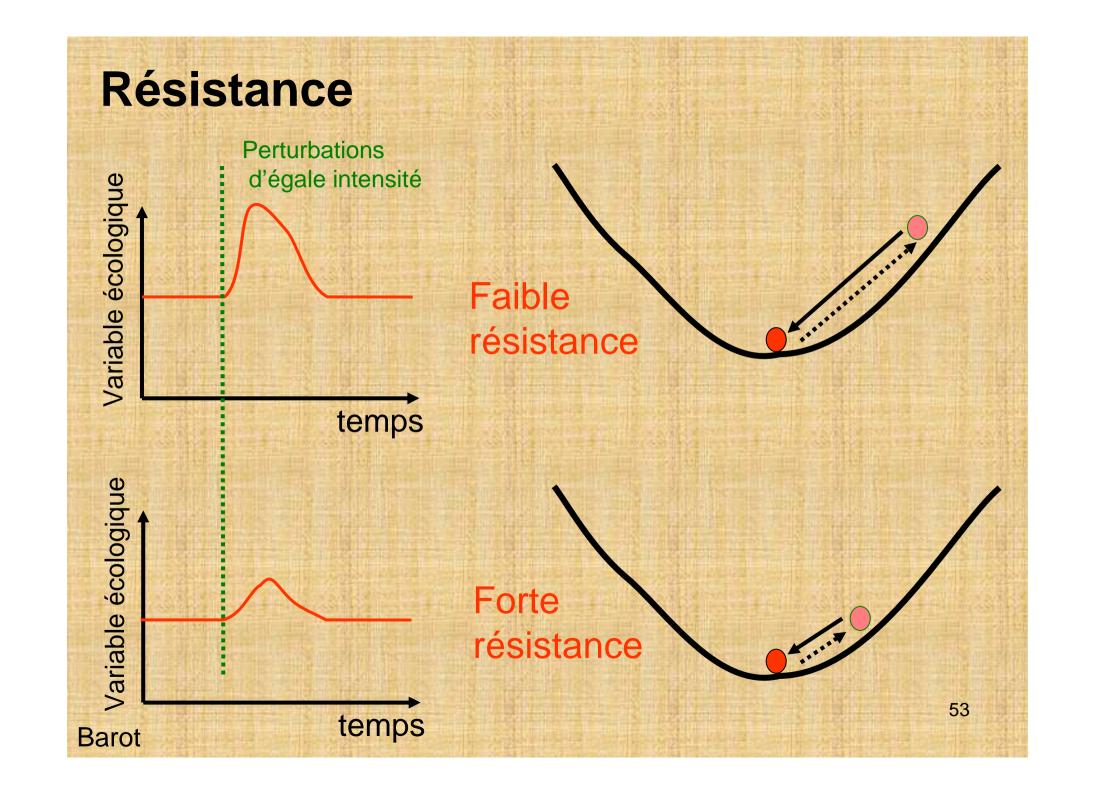
### **Définitions**

-> Equilibre : état d'un système dont aucune des variables ne varient plus

$$\frac{dv_1}{dt} = 0 \frac{dv_2}{dt} = 0 \dots$$

- Equilibre stable : le système retourne à son état d'équilibre après une petite perturbation
- -> Equilibre instable : le système ne retourne pas à son état d'équilibre après une petite perturbation... passe à un autre type de dynamique





### **Définitions**

Résilience: capacité du système à revenir vite à son état d'équilibre après une perturbation

Résistance: capacité du système à ne pas s'éloigné loin de son état d'équilibre après une perturbation

### Analyse mathématique

- Il existe des critères mathématiques permettant de déterminer si un équilibre est stable
- Il existe des méthodes pour mesurer la résistance et la résilience

## Pourquoi les notions de stabilité, résilience et résistance sont importantes? Applications?

- Parce que cela caractérise la capacité d'un système (écologique) a résister à une perturbation
- → Exemple



Stabilité de la prairie (production, composition spécifique)?

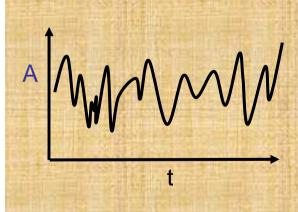
Effet de perturbations (changement climatique, espèce invasive) ?

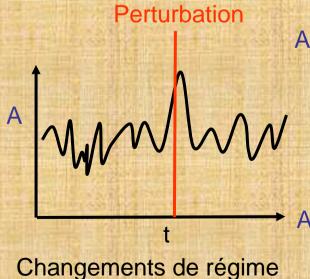
Effet de la biodiversités sur ces caractéristiques?

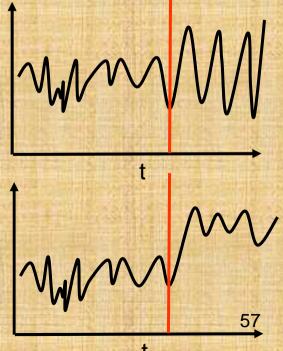
### Les systèmes écologiques sont ils à l'équilibre?

→ Vision ancienne : équilibre = harmonie = bon fonctionnement

→ Vision actuelle : un écosystème est en perpétuelle transformation = équilibre dynamique







Résistance Résilience

Barot

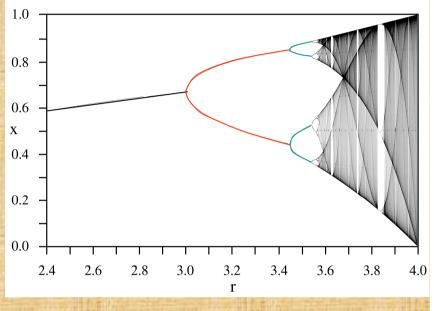
Mieux définir la notion de dynamique

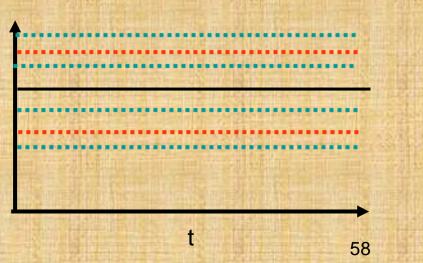
chaotique

Dynamique qualitative et quantitative du système dépend énormément des conditions initiales et des paramètres

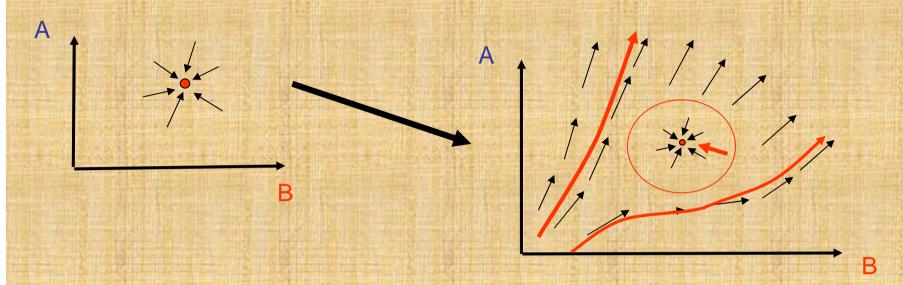
- → Une dynamique chaotique est elle aléatoire?
- → Conséquences pratiques?





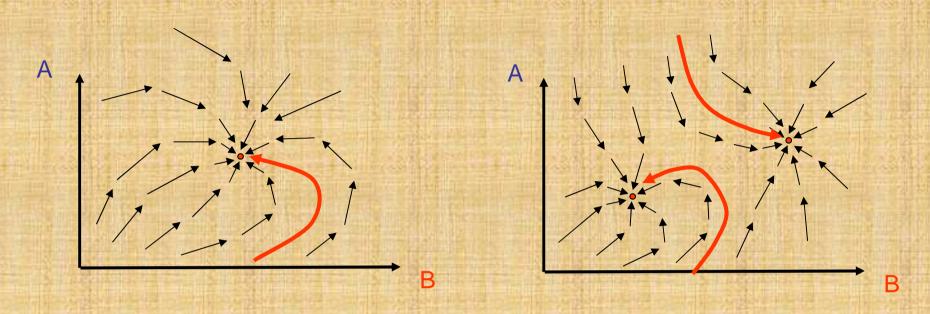


### Dynamique locale et dynamique globale



- Le comportement global peut être différent du comportement local
- Il peut exister différents comportements locaux qualitativement très différents

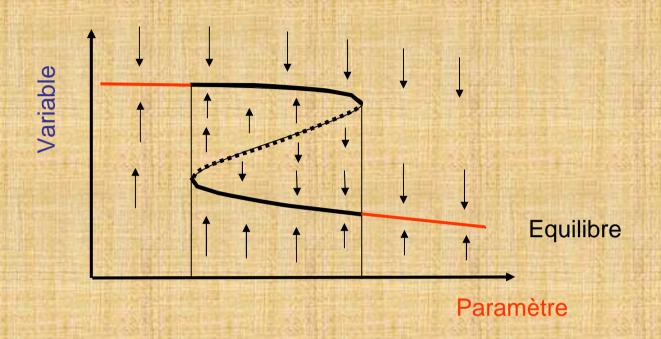
### Cas d'existence de multiples états d'équilibre



- → Pourquoi ce type de comportement est il important?
  - + Une équilibre stable : le système écologique est proche de ce point
  - + Deux équilibres stables : on ne sait plus a priori dans quel état est le système écologique 60

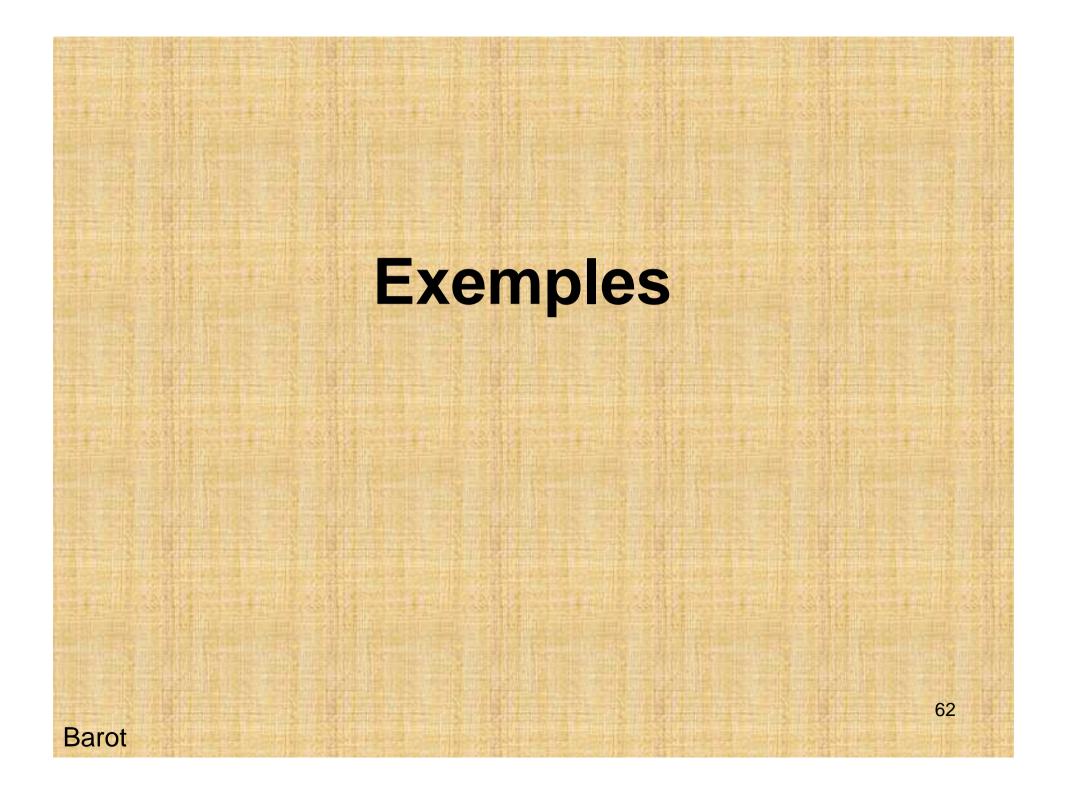
Barot

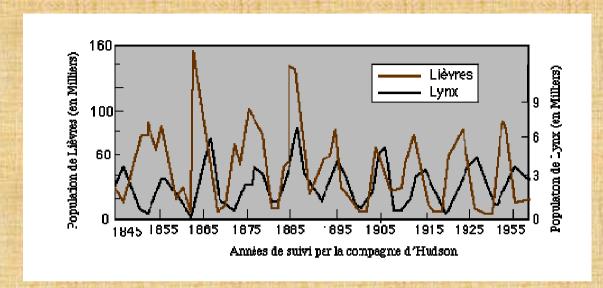
### Cas d'existence de multiples états d'équilibre



### → Pourquoi ce type de comportement est il important?

Quand on vient de passer d'un équilibre à l'autre, il ne suffit pas de changer le paramètre pour revenir à l'état initial









- Comment expliquer ces oscillations?
- → Modèle mathématique P= proie C = prédateur

$$\frac{dP}{dt} = (r - \alpha C)P \qquad \frac{dC}{dt} = (\varepsilon \alpha P - \delta)C$$

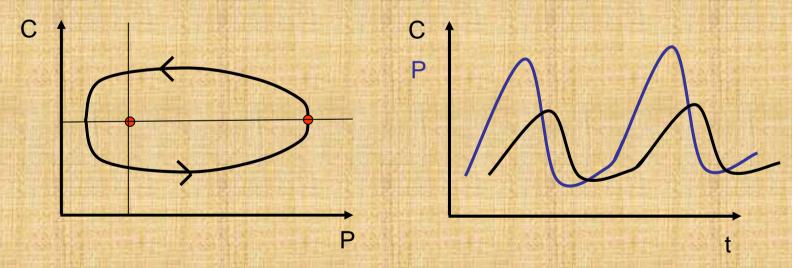
→ Equilibre

$$\frac{dP}{dt} = (r - \alpha C)P$$

$$\frac{dC}{dt} = (\varepsilon \alpha P - \delta)C$$

$$C = \frac{r}{\alpha}$$
  $P = \frac{\delta}{\epsilon \alpha}$  ou  $C = 0$   $P = 0$ 

→ L'équilibre peut il être atteint?



→ Pourquoi?

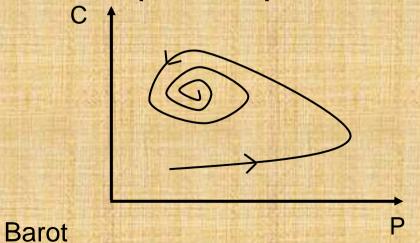
On retrouve le même type de dynamique que pour les données empiriques mais est ce réaliste?

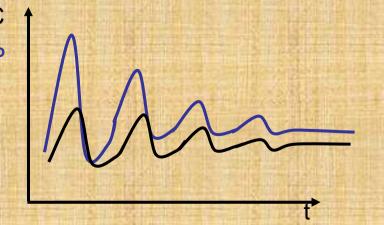
$$\frac{dP}{dt} = (r - \alpha C)P \qquad \text{sans prédateur} \qquad \frac{dP}{dt} = r > 0$$

$$\frac{dP}{dt} = \left[ r(1 - \frac{P}{K}) - \alpha C \right] P \quad \text{Équilibres} \qquad P = \frac{\delta}{\epsilon \alpha} \quad C = \frac{r}{\alpha} \left[ 1 - \frac{\delta}{\epsilon \alpha K} \right]$$

$$P = 0 \quad C = 0 \qquad P = K \quad C = 0$$

→ L'équilibre peut il être atteint?





Passage d'un système cyclique (très variable) dont les cycles dépendent des conditions initiales à un système ayant un seul équilibre stable ne dépendant pas des conditions initiales(système "complètement déterminé")

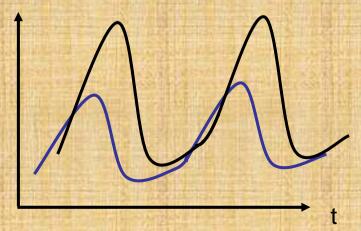
- Du coup, comment expliquer le maintient des oscillations pour les données empiriques?
- → Forçage extérieur?

66

### Dynamique évolutive

- On imagine que tous les paramètres démographiques dépendent de la taille de la proie et du prédateur
  - + en supposant que sans prédateur, une taille intermédiaire est optimale pour la proie
  - + la taille optimale des proies du prédateur augmente avec la taille du prédateur
- Sous certaines conditions on trouve des oscillations évolutives, ou extinction du prédateur

Taille du prédateur Taille de la proie P



### Dynamique évolutive

- D'une manière générale on peut trouver à l'échelle évolutive toute les types de dynamiques observables à l'échelle écologique
- Equilibre stable ou non
   Dynamique cyclique
   Dynamique locale et globale

. . . . . .

### Exemple du cannibalisme

- De nombreuses espèces pratiquent le cannibalisme: Les adultes mangent les jeunes plus petites
- Cela peut augmenter la survie des adultes et donc de l'espèce quand la nourriture est peu abondante mais diminue la descendance
- Quelles stratégie est sélectionnée par l'évolution?



### Exemple du cannibalisme

F. Dercole, S. Rinaldi | Theoretical Population Biology 62 (2002) 365-374

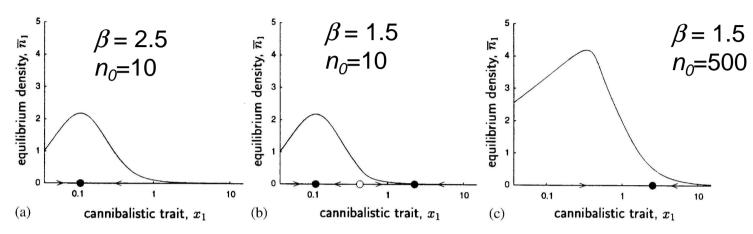


Fig. 2. The equilibrium density  $\bar{n}_1(x_1)$  of model (1)–(4) and monomorphic dynamics on the horizontal axis, where circles indicate equilibria of model (6), (7): (A)  $n_0 = 10$ ,  $\beta = 2.5$ , (B)  $n_0 = 10$ ,  $\beta = 1.5$ , and (C)  $n_0 = 500$ ,  $\beta = 1.5$ . Other parameter values:  $A_{i0} = 1$ ,  $A_{ij} = 10$ ,  $x^0 = 0.1$ , x = 0.5, x = 5, y = 0.2, y = 0.2, z = 0.5, z

- n₀ = disponibilité de la nourriture
   β: plus b est grand plus le cannibalisme est restreint à de petits individus
- Existence d'un ou deux équilibres évolutifs
   Possibilité de suicide évolutif

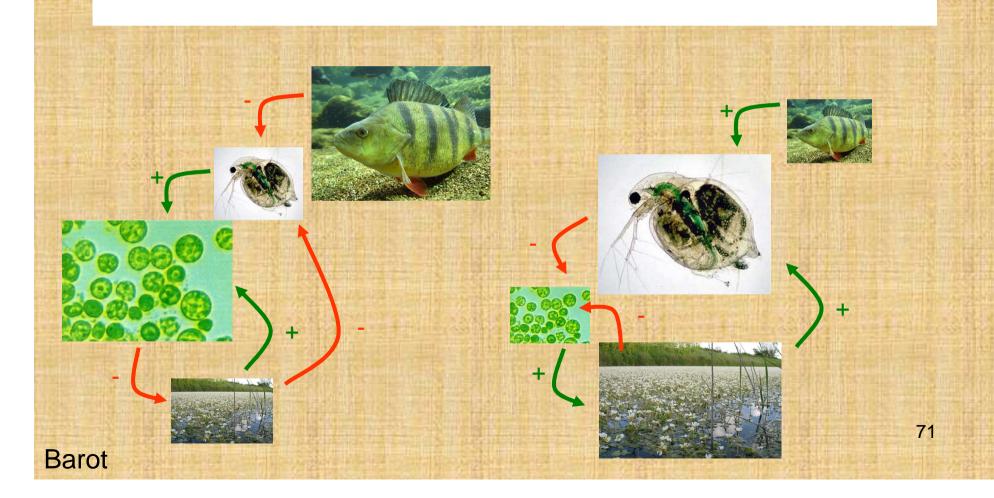
70

Barot

368

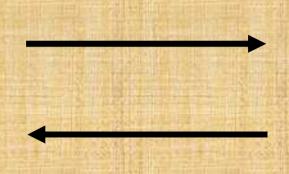
### Cas de l'eutrophisation

### Rétroaction positive = Stabilisation

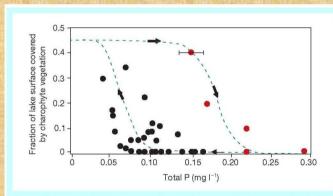


### Cas de l'eutrophisation

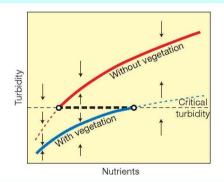






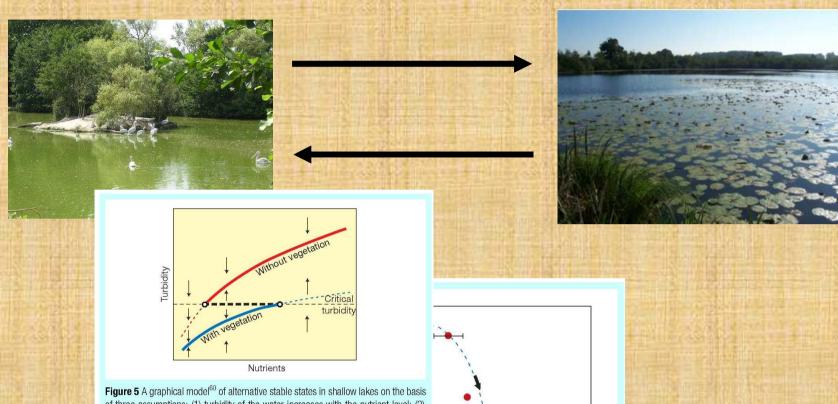


**Figure 4** Hysteresis in the response of charophyte vegetation in the shallow Lake Veluwe to increase and subsequent decrease of the phosphorus concentration. Red dots represent years of the forward switch in the late 1960s and early 1970s. Black dots show the effect of gradual reduction of the nutrient loading leading eventually to the backward switch in the 1990s. From ref. 59.

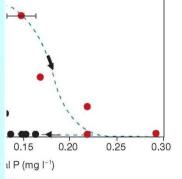


**Figure 5** A graphical model<sup>60</sup> of alternative stable states in shallow lakes on the basis of three assumptions: (1) turbidity of the water increases with the nutrient level; (2) submerged vegetation reduces turbidity; and (3) vegetation disappears when a critical turbidity is exceeded. In view of the first two assumptions, equilibrium turbidity can be drawn as two different functions of the nutrient level: one for a vegetation-dominated situation, and one for an unvegetated situation. Above a critical turbidity, vegetation will be absent, in which case the upper equilibrium line is the relevant one; below this turbidity the lower equilibrium curve applies. As a result, at lower nutrient levels, only the vegetation-dominated equilibrium exists, whereas at the highest nutrient levels, there is only an unvegetated equilibrium. Over a range of intermediate nutrient levels, two alternative equilibria exist: one with vegetation, and a more turbid one without vegetation, separated by a (dashed) unstable equilibrium.

### Cas de l'eutrophisation



**Figure 5** A graphical model<sup>60</sup> of alternative stable states in shallow lakes on the basis of three assumptions: (1) turbidity of the water increases with the nutrient level; (2) submerged vegetation reduces turbidity; and (3) vegetation disappears when a critical turbidity is exceeded. In view of the first two assumptions, equilibrium turbidity can be drawn as two different functions of the nutrient level: one for a vegetation-dominated situation, and one for an unvegetated situation. Above a critical turbidity, vegetation will be absent, in which case the upper equilibrium line is the relevant one; below this turbidity the lower equilibrium curve applies. As a result, at lower nutrient levels, only the vegetation-dominated equilibrium exists, whereas at the highest nutrient levels, two alternative equilibria exist: one with vegetation, and a more turbid one without vegetation, separated by a (dashed) unstable equilibrium.

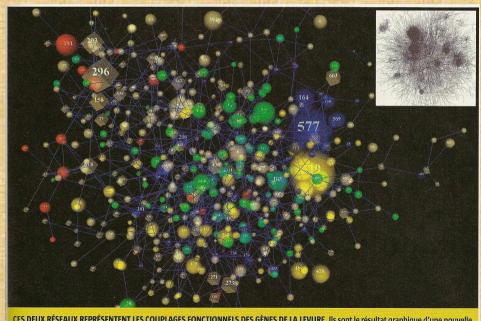


rophyte vegetation in the shallow Lake se of the phosphorus concentration. Red n the late 1960s and early 1970s. Black

dots show the effect of gradual reduction of the nutrient loading leading eventually to the backward switch in the 1990s. From ref. 59.

#### Fonctionnement cellulaire

- La biologie a de plus en plus une approche systémique
- → Voir une cellule ou un organe comme un système qui est défini par la concentration en différentes molécules qui sont régulées génétiquement



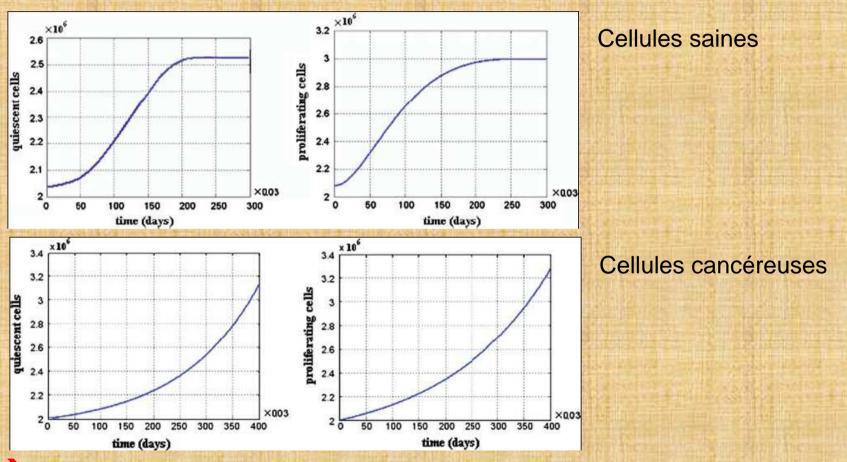
CES DEUX RÉSEAUX REPRÉSENTENT LES COUPLAGES FONCTIONNELS DES GÈNES DE LA LEVURE. Ils sont le résultat graphique d'une nouvelle méthode d'intégration des données de la génomique fonctionnelle. Le plus précis (en médaillon) montre que, sur les 4681 gènes considérés, 3285 sont regroupés en 627 modules (zones noires denses). L'Image en couleur est un zoom sur 564 de ces modules, et les 950 liens les plus forts qui les unissent (traits bleus). La couleur et la forme de chaque module indiquent le type de fonction à laquelle contribuent les gènes. Par exemple, les sphères jaunes regroupent les gènes qui codent les molécules impliquées dans la transcription de l'ADN en ARN.

### Utilité???

- Compréhension du système
- Mise au point de médicaments?

### Modélisation d'une population de cellules

On suit le nombre de cellules quiescentes et en multiplication, taux de cycline D

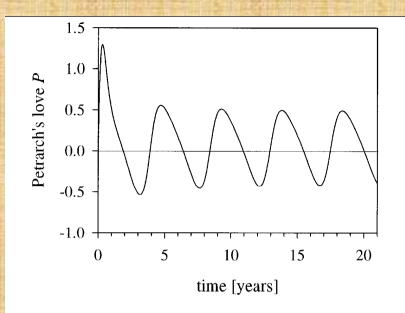


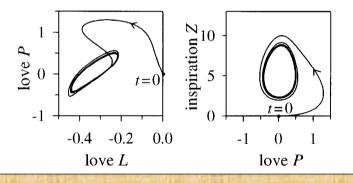
Mise au point de méthode de détection et de contrôle des cellules cancéreuses?

Brikci 2007 Math Biol

### Dynamique amoureuse

- Un couple, on modélise l'attirance de l'un pour l'autre au cours du temps
- Tient compte de l'attractivité intrinsèque mais aussi de la réponde à l'amour de l'autre et de la capacité d'oubli
- Comportement cyclique, le couple ne se stabilise jamais!



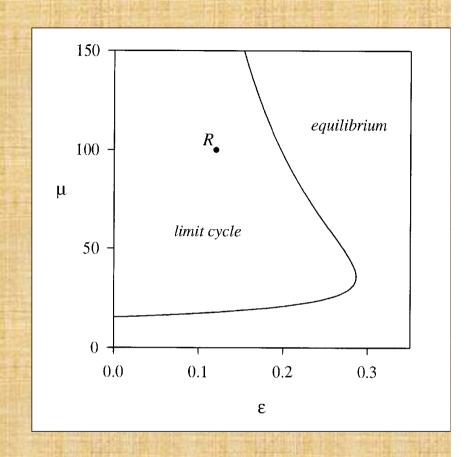


### Dynamique amoureuse

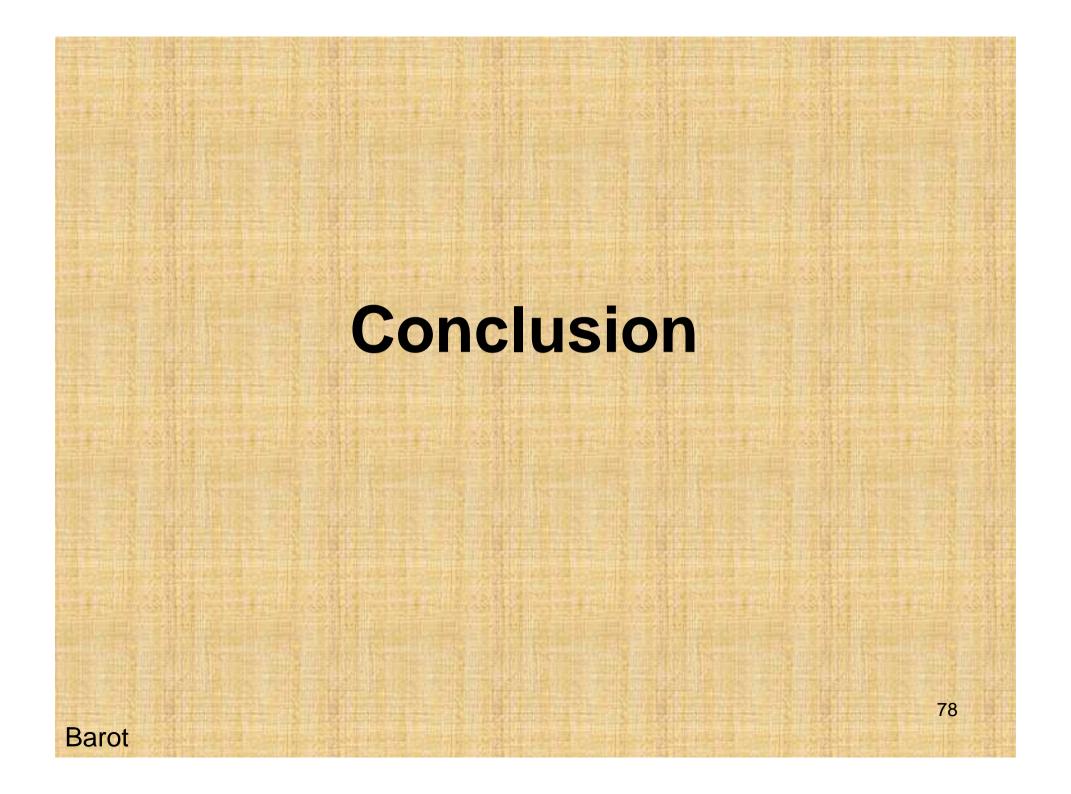
Conditions pour qu'un équilibre stable existe?

La réactivité de leur amour à celui de l'autre dépasse leur capacité d'oubli





 Application à la relation amoureuse entre Petraque (1304-1374) et Laure



- L'approche systémique est indispensable pour comprendre les systèmes écologiques, biologiques, sociaux....
- L'approche systémique est indispensable pour faire des prédictions et manipuler les systèmes écologiques, biologiques, sociaux....
- Il existe de nombreux outils mathématiques pour analyser le comportement des systèmes dynamiques
- Importance des notions de stabilité, résistance et résilience

# Il existe un manque d'éducation à la pensée systémique et aux outils d'analyse des systèmes

- → Politique, économie....
- → Rôle potentiellement important de l'écologie scientifique
- Rôle potentiellement important de l'écologie scientifique