

Les Systèmes Ecologiques
un terrain d'inspiration pour la démarche
systemique intégrative.

Séminaire Emergence
Paris, le 12 janvier 2015

Jacques de Gerlache
Dr. Sc. Pharm, (Eco)toxicologue

V14

Mieux comprendre notre réel ...

◆ Entre l'atomique et le sociologique ...

Quels sont les principes, les processus, les mécanismes fondamentaux qui leur sont communs ?

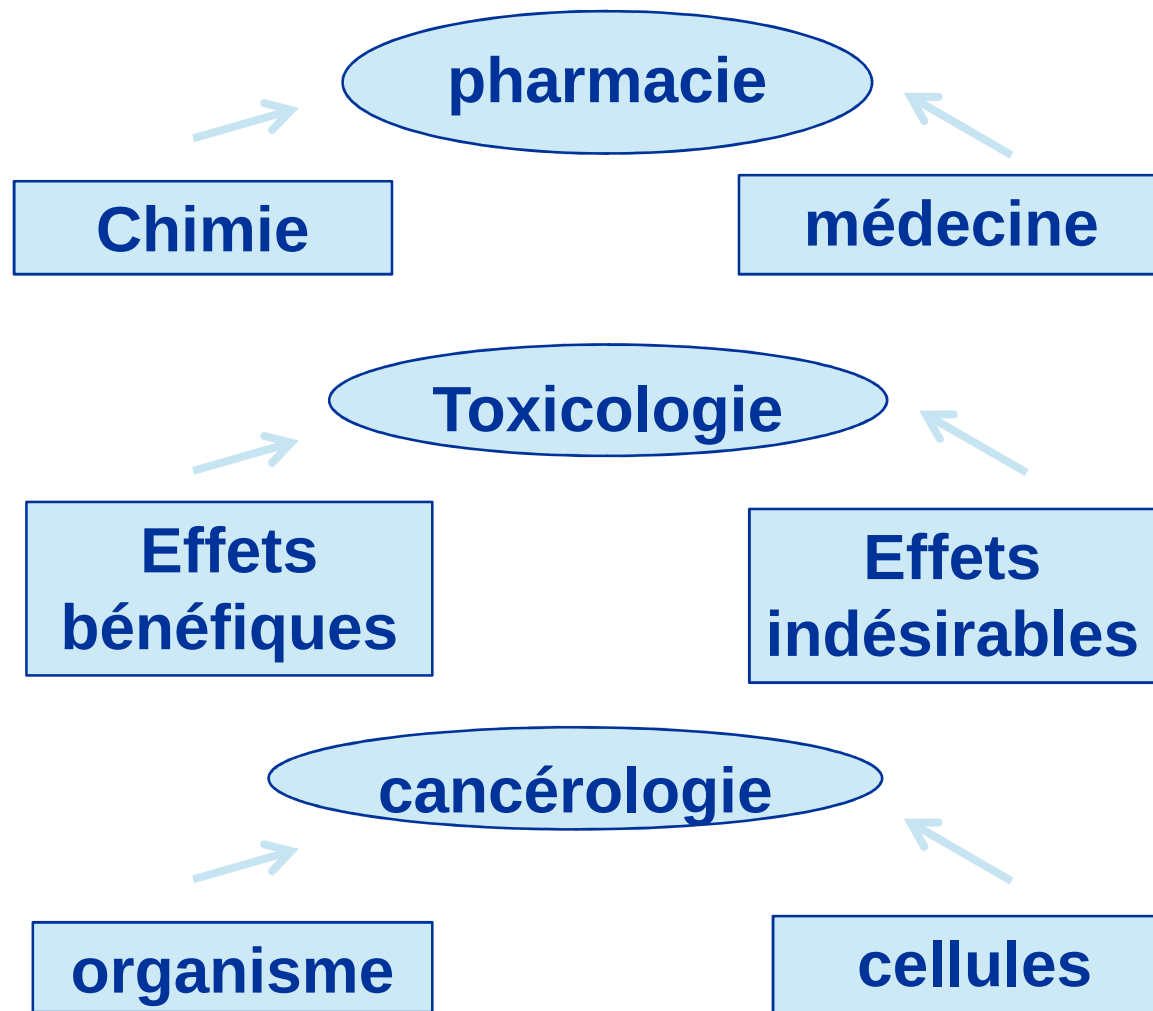
◆ Entre démarche dissociative et intégrative ...

Quelle démarche qui nous permette de continuer à progresser dans notre compréhension ?

« Un ingénieur connaissant seulement le fonctionnement des machines à vapeur qui examinerait un moteur électrique serait prêt à admettre qu'il ne comprend rien aux principes de fonctionnement de ce nouveau moteur. »

(E . Schroedinger What's Life),

Un parcours interdisciplinaire ...



Approche systémique et écologie

Toxicologie

Protection de
l'espèce humaine

Centrée sur l'organisme :

- ◆ Une seule espèce
- ◆ La protection de l'individu
- ◆ Extrapolation des résultats sur l'animal

⇒ L'organisme isolé

Ecotoxicologie

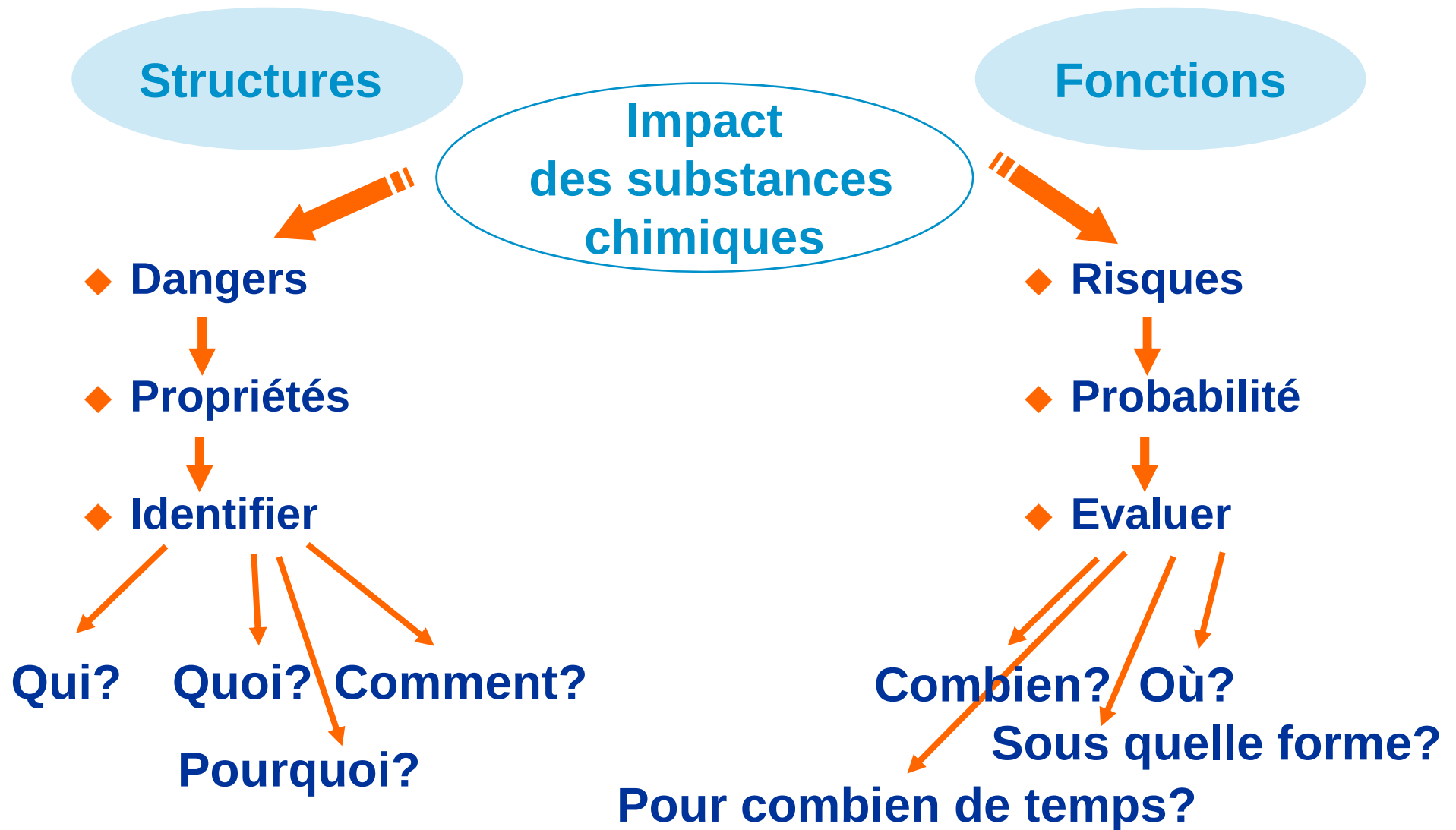
Protection de
toutes les espèces

Centrée sur la population :

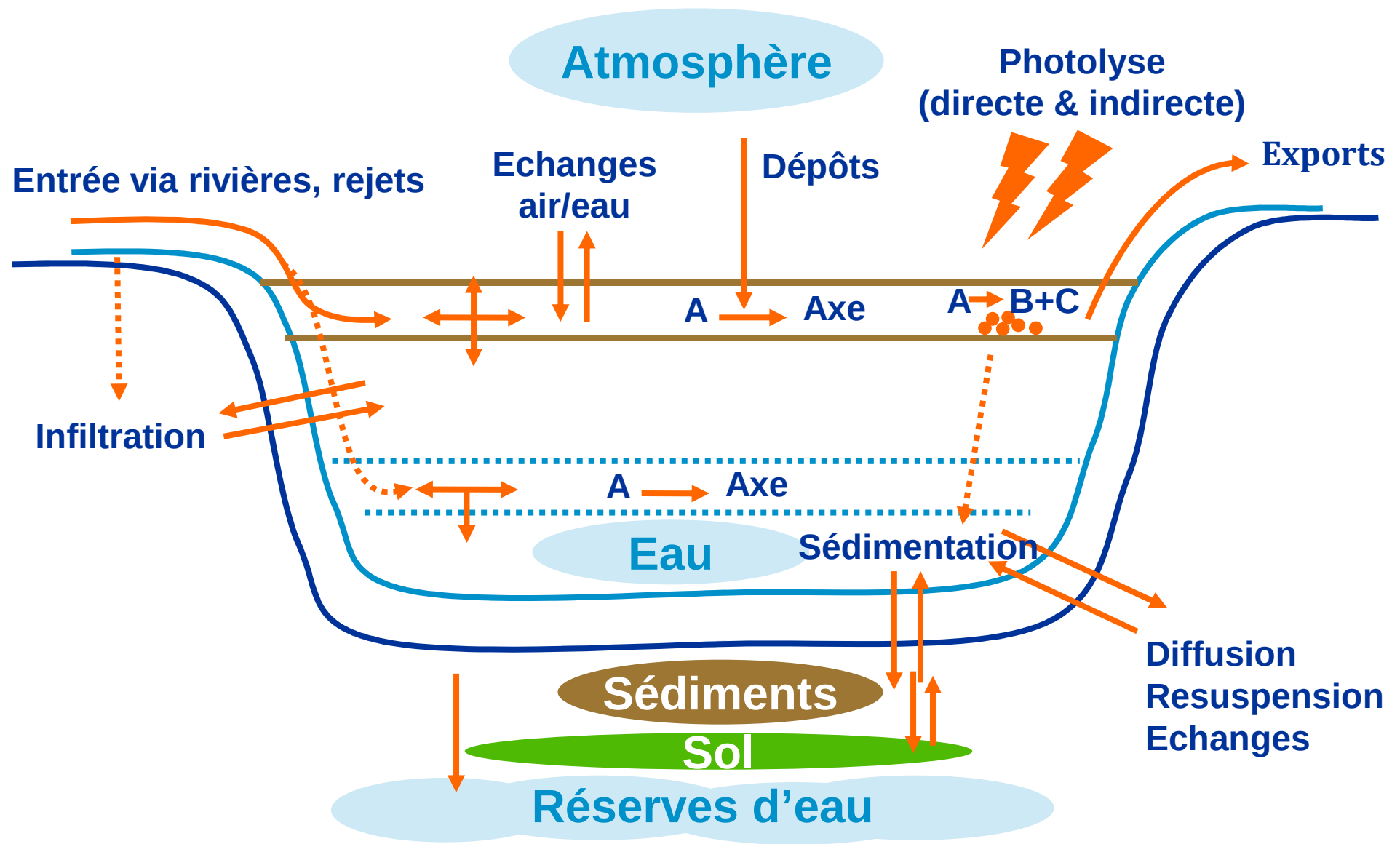
- ◆ Des espèces
- ◆ Des structures
- ◆ Des fonctions

⇒ Ecosystèmes et leurs interactions

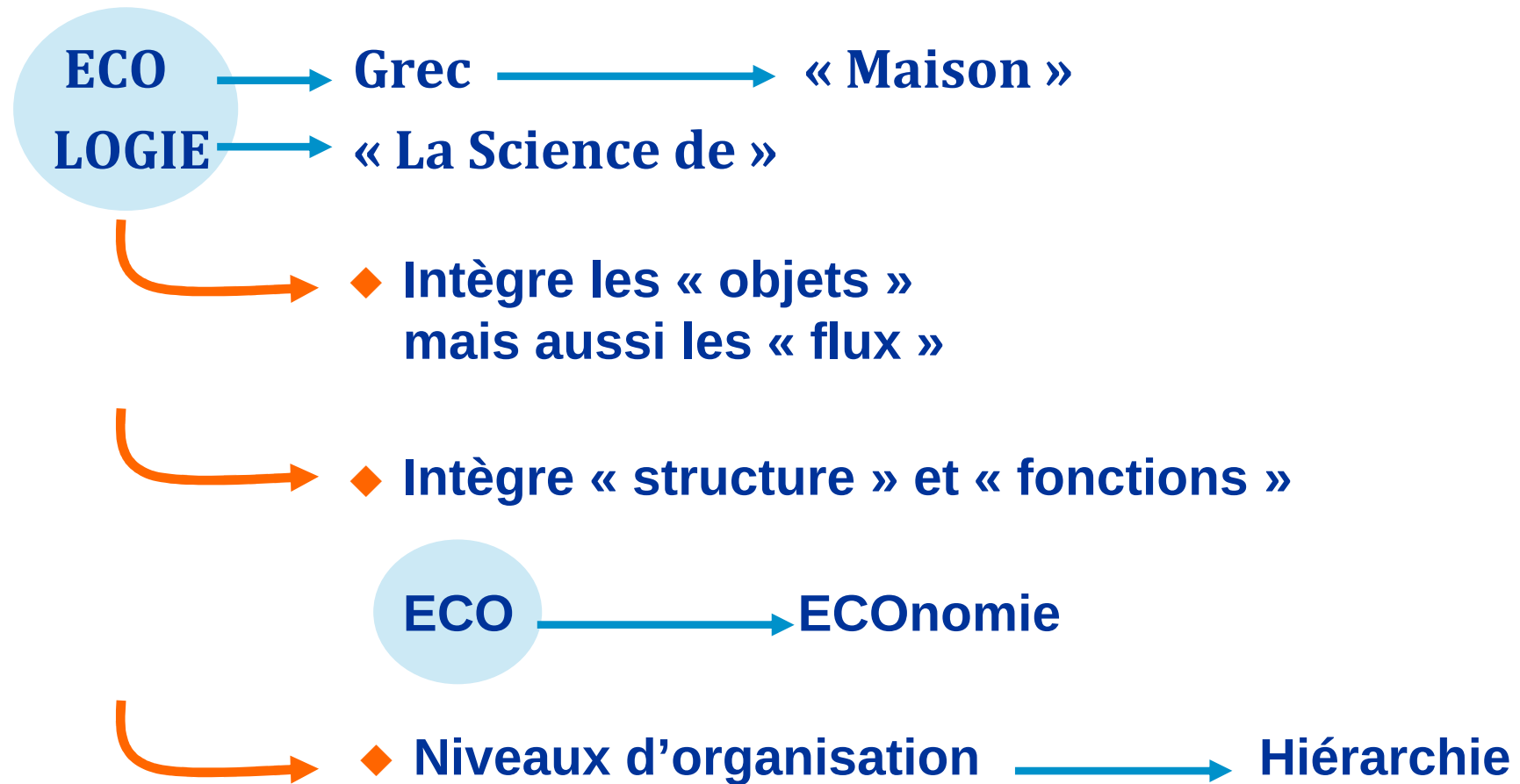
Ecotoxicologie



Où?



Ecologie : Définitions



L'écologie : une approche nécessairement systémique

“Le tout est plus que la somme des parties”

- Ex:
- H_2O , ou H_2O_2 et $\text{H}_2 + \text{O}_2$;
 - La cellule et l'organisme ;
 - La forêt et les arbres ;
 - Le rucher et l'abeille ;
 - la ville et les maisons;

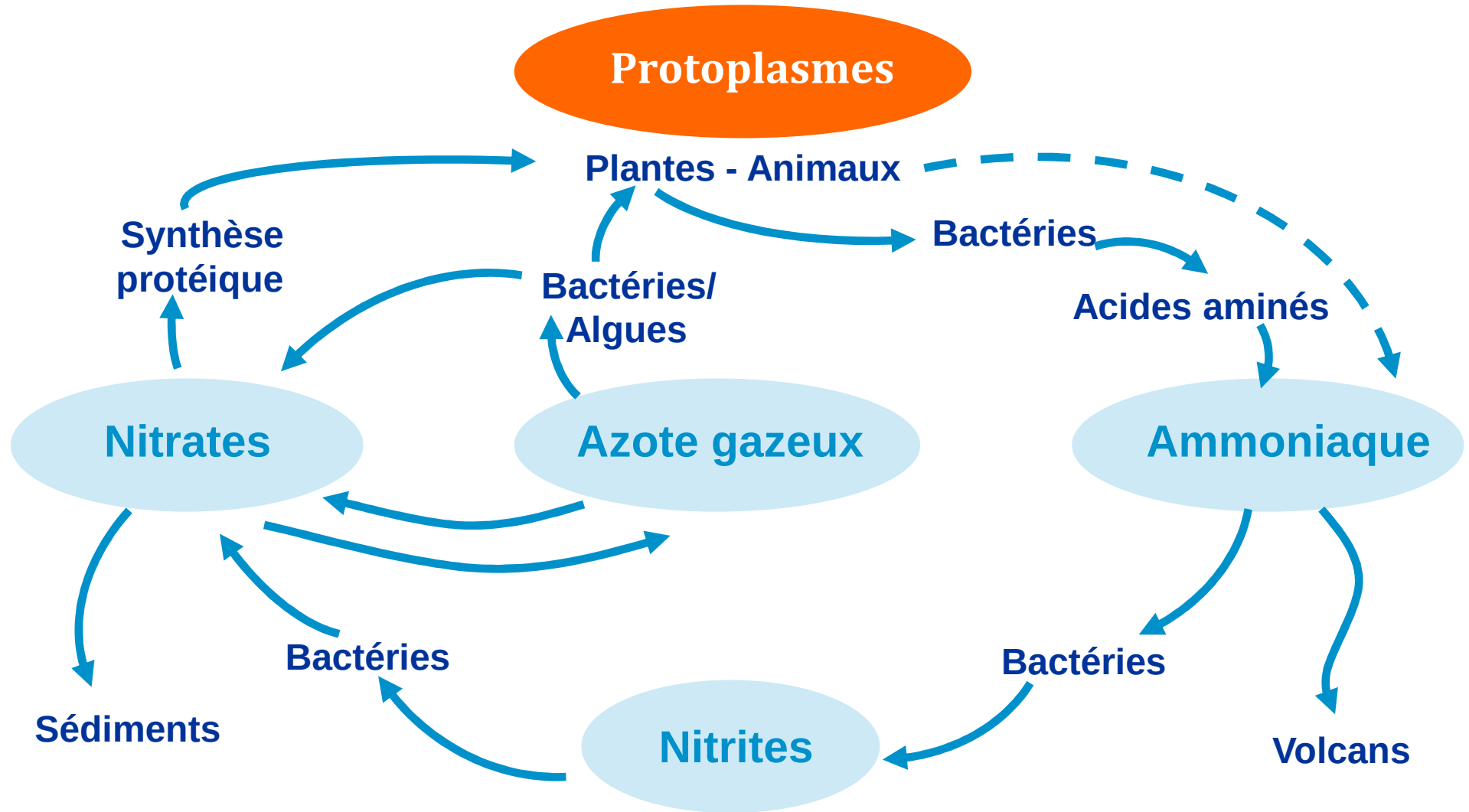
Système = Organisation d'un “tout” :

C'est une dynamique loin de l'équilibre qui implique :

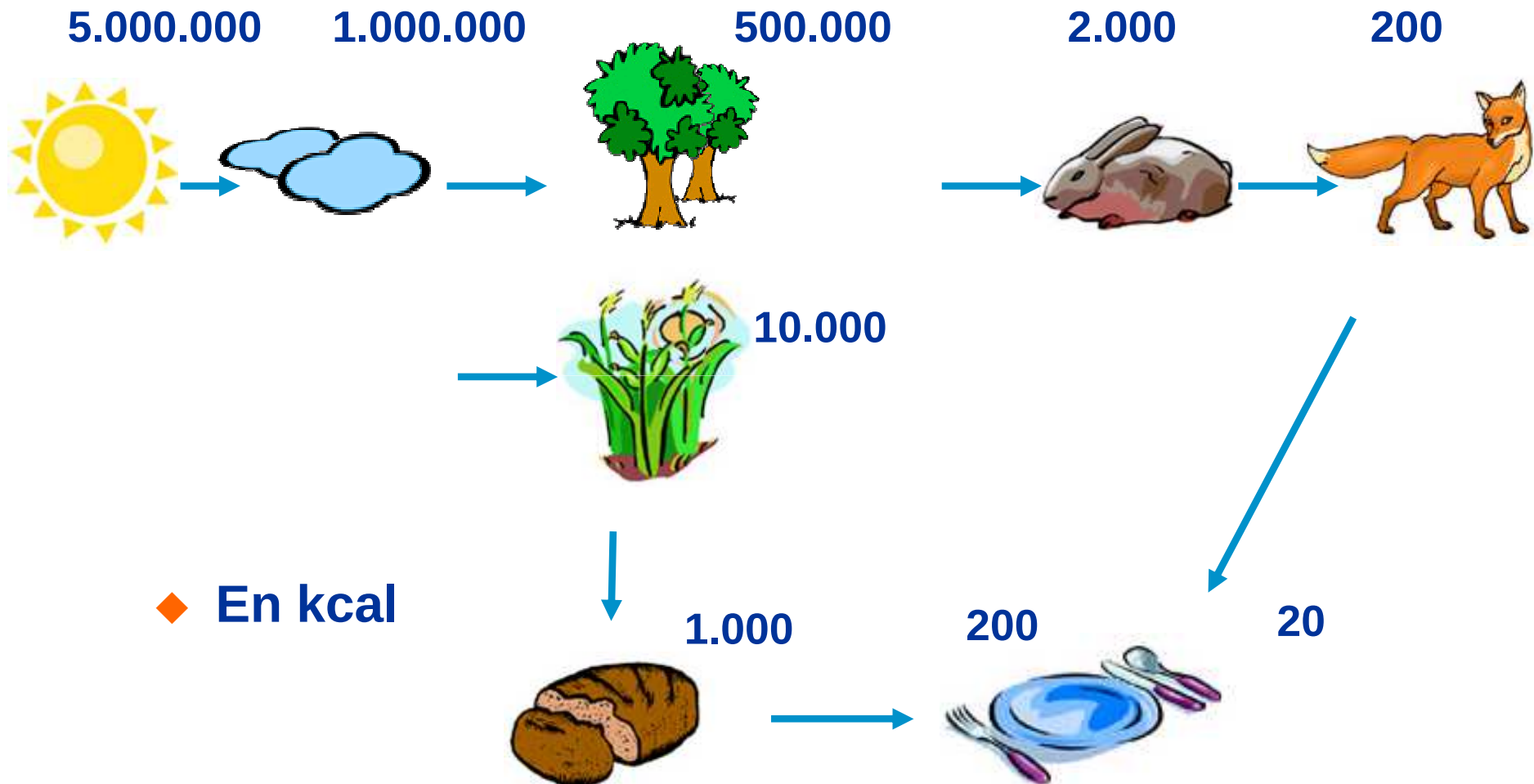
- ◆ Durée et attracteurs thermodynamiques ;
- ◆ Mécanismes de régulation homéostasique ;
- ◆ Hiérarchie – Boucles rétroactives – Auto-organisation,

L'écologie : une série de cycles interconnectés

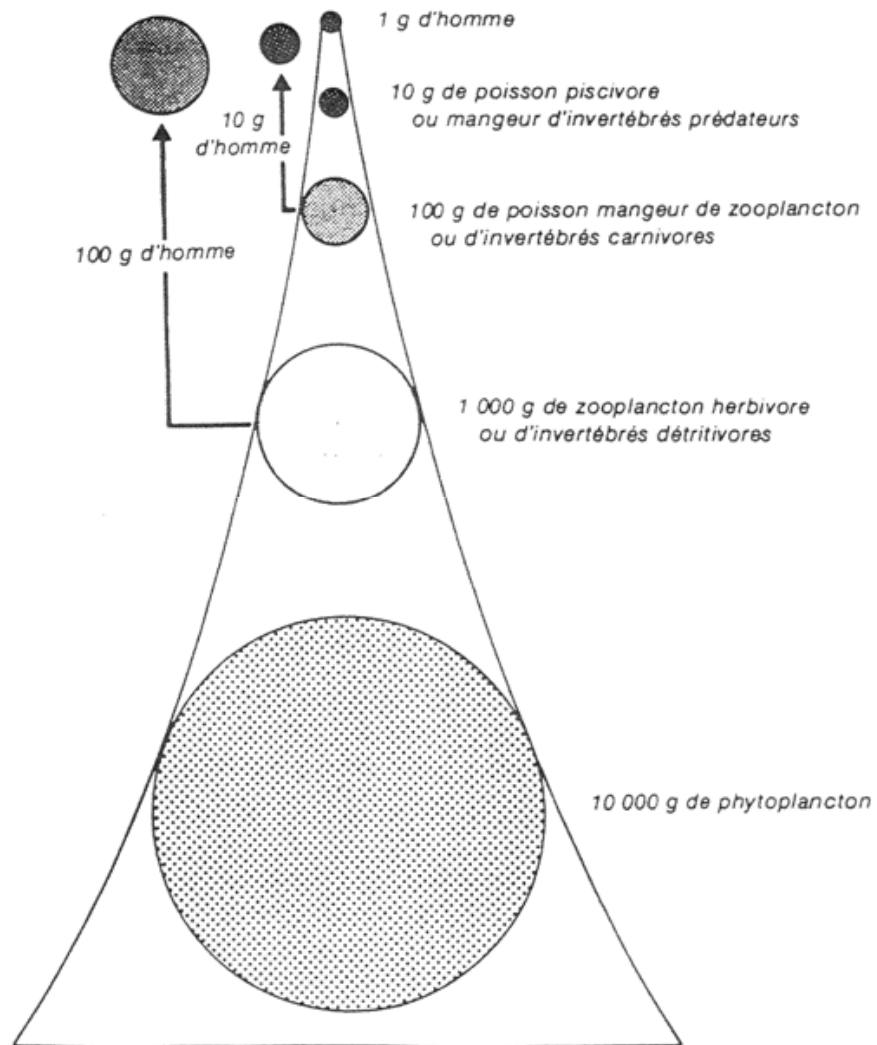
exemple de l'azote



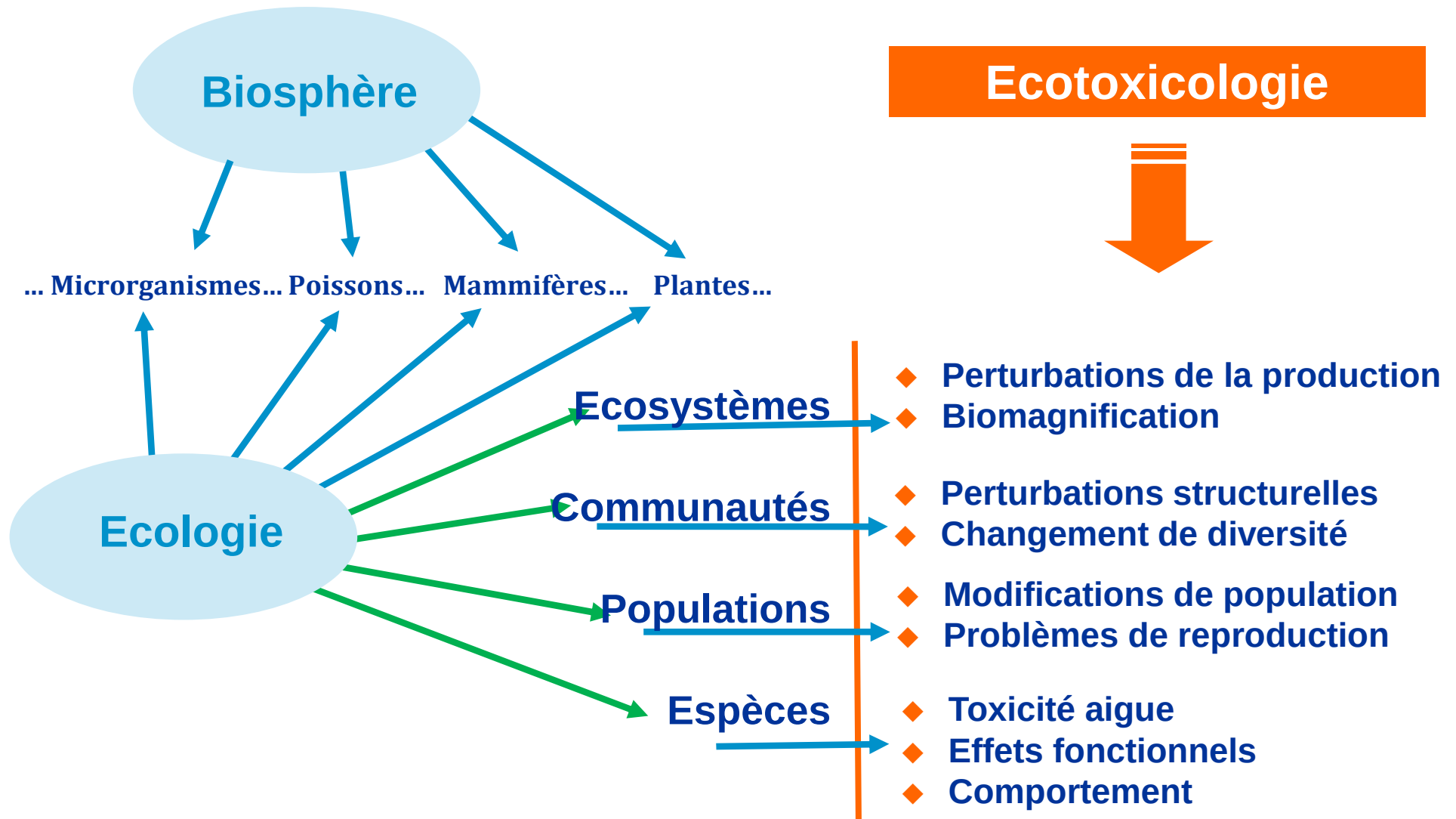
Flux et « stockage » d'énergie dans les écosystèmes



LE RENDEMENT DES CHAINES ALIMENTAIRES
(L'Enfant et l'Environnement, CNDP, 1973)



De l'écologie à l'écotoxicologie



Diversité des communautés et structures écologiques

⇒ = composées de divers compartiments à rôles identiques

Ex: Microflore → Décomposition → Champignons
Bactéries

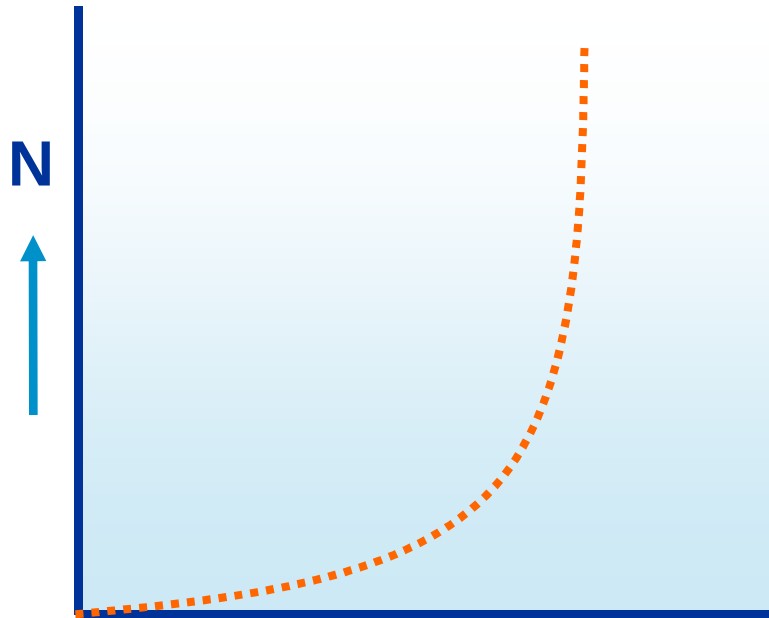
⇒ = composées de compartiments à plusieurs rôles

Ex: Saprophytes → Décomposition en substrat pour microflore

Ex: Vers de terre → Décomposition
→ Modification de la structure du sol
→ Redistribution de la matière organique

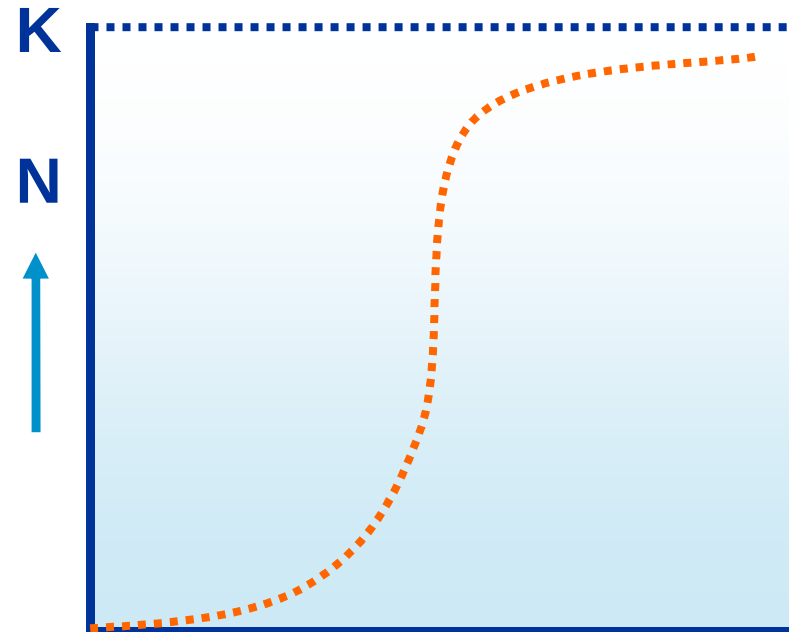
La croissance des populations : limitée par la disponibilité des ressources énergétiques

Exponentielle



$$\frac{dN}{dt} = r.N$$

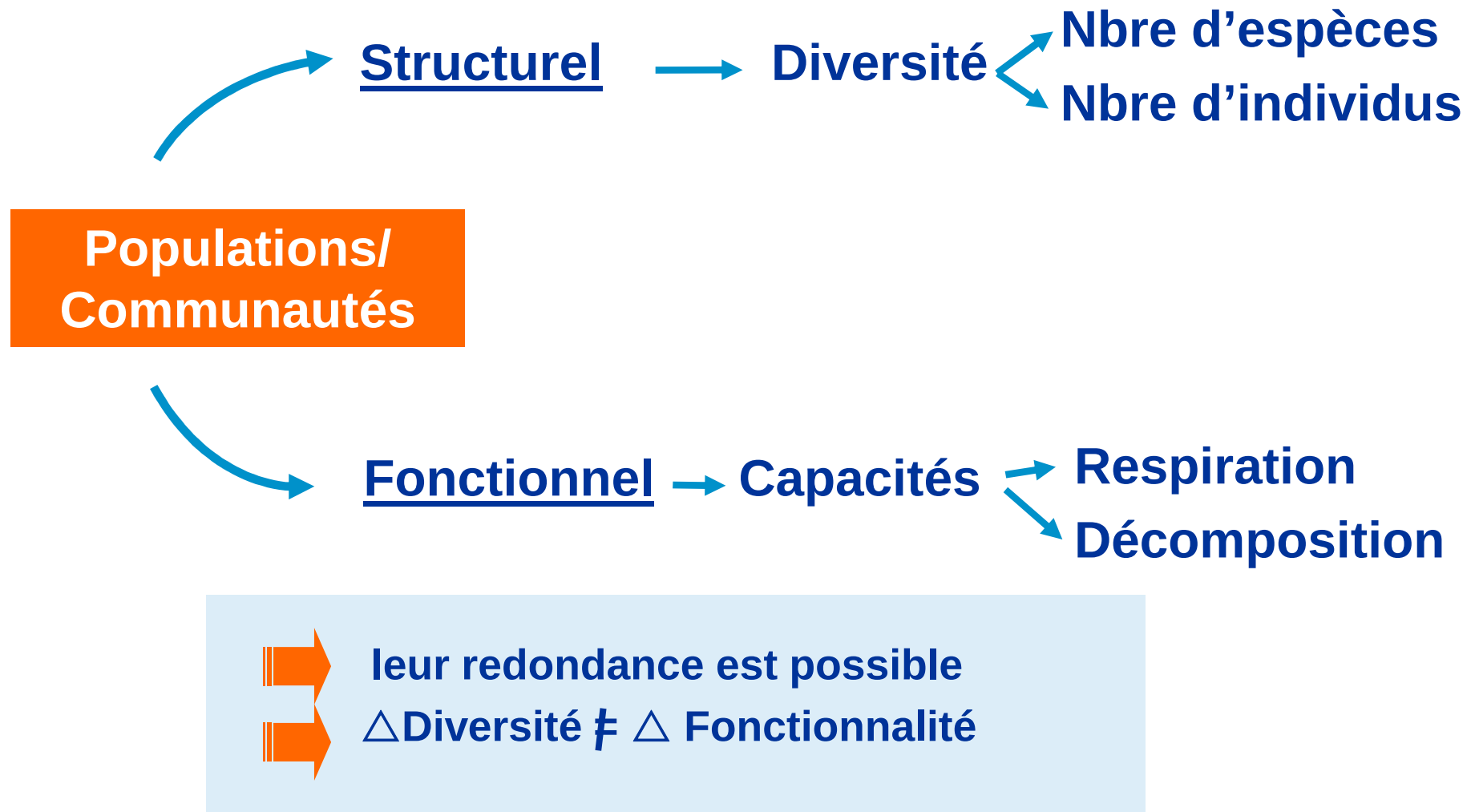
Logistique



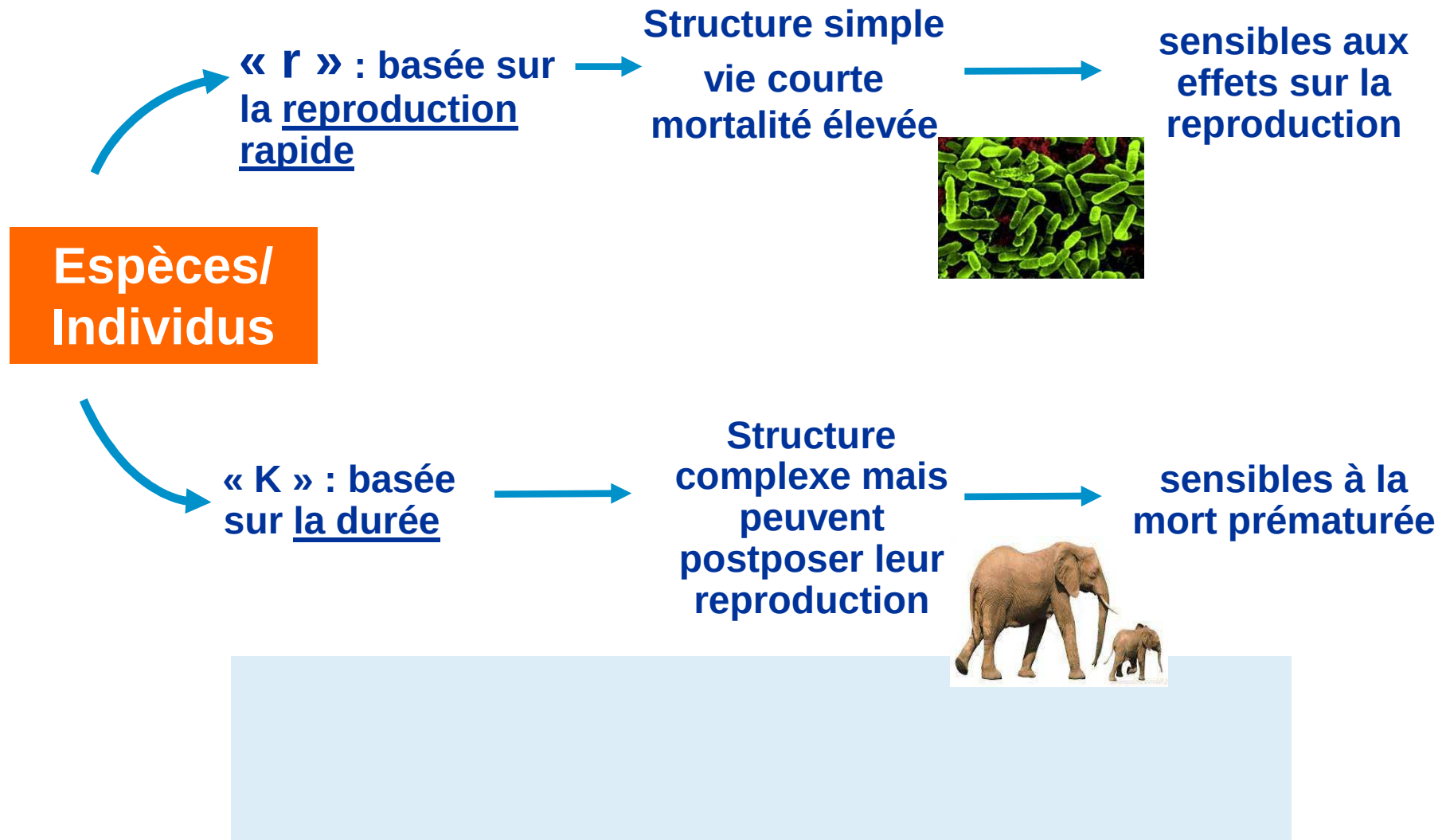
$$\frac{dN}{dt} = r \left\{ \frac{(K-N)}{K} \right\} N$$

$K = f$ (limite nutritionnelle)

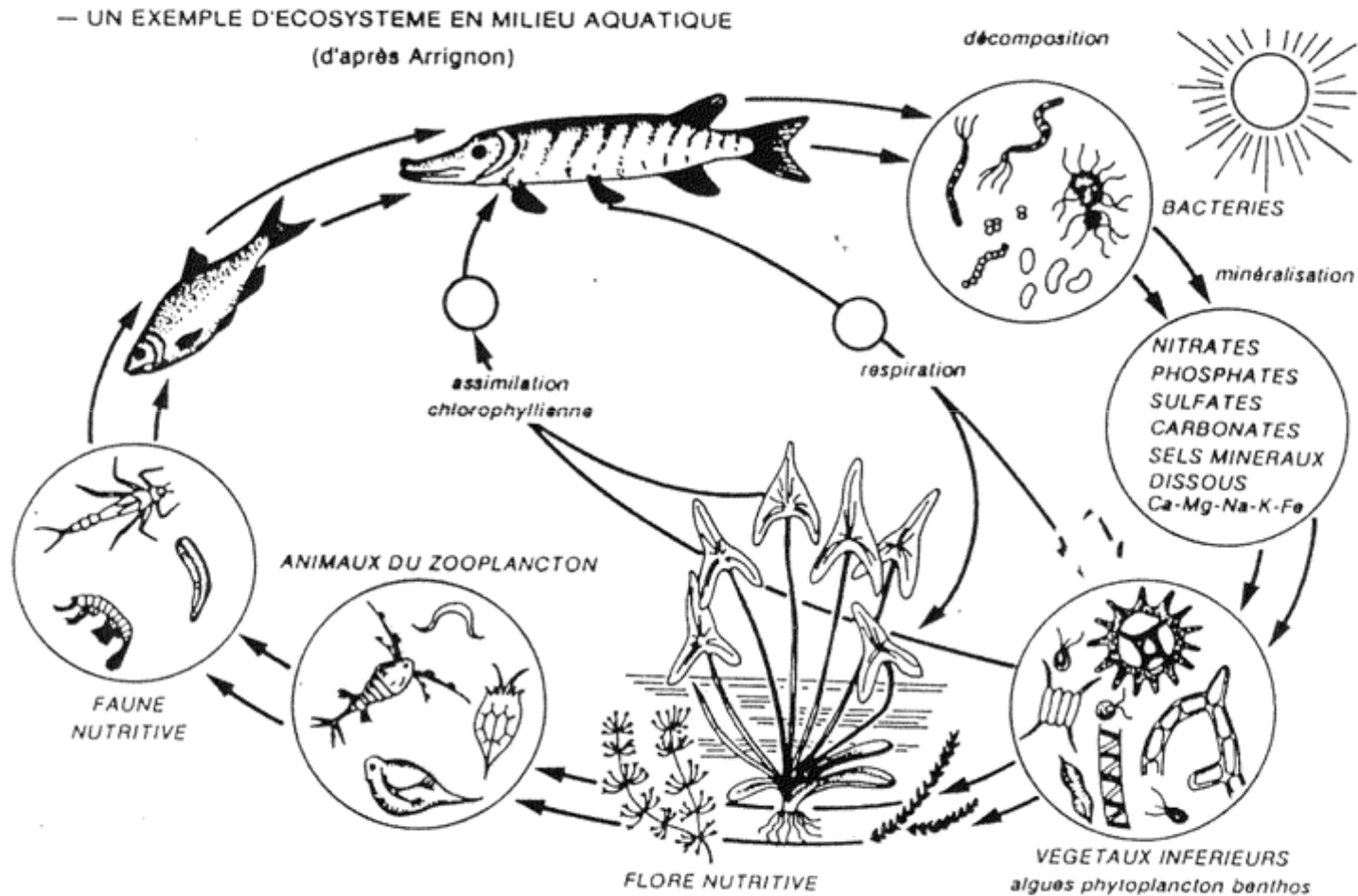
Les effets sur les populations et communautés écologiques : à deux niveaux



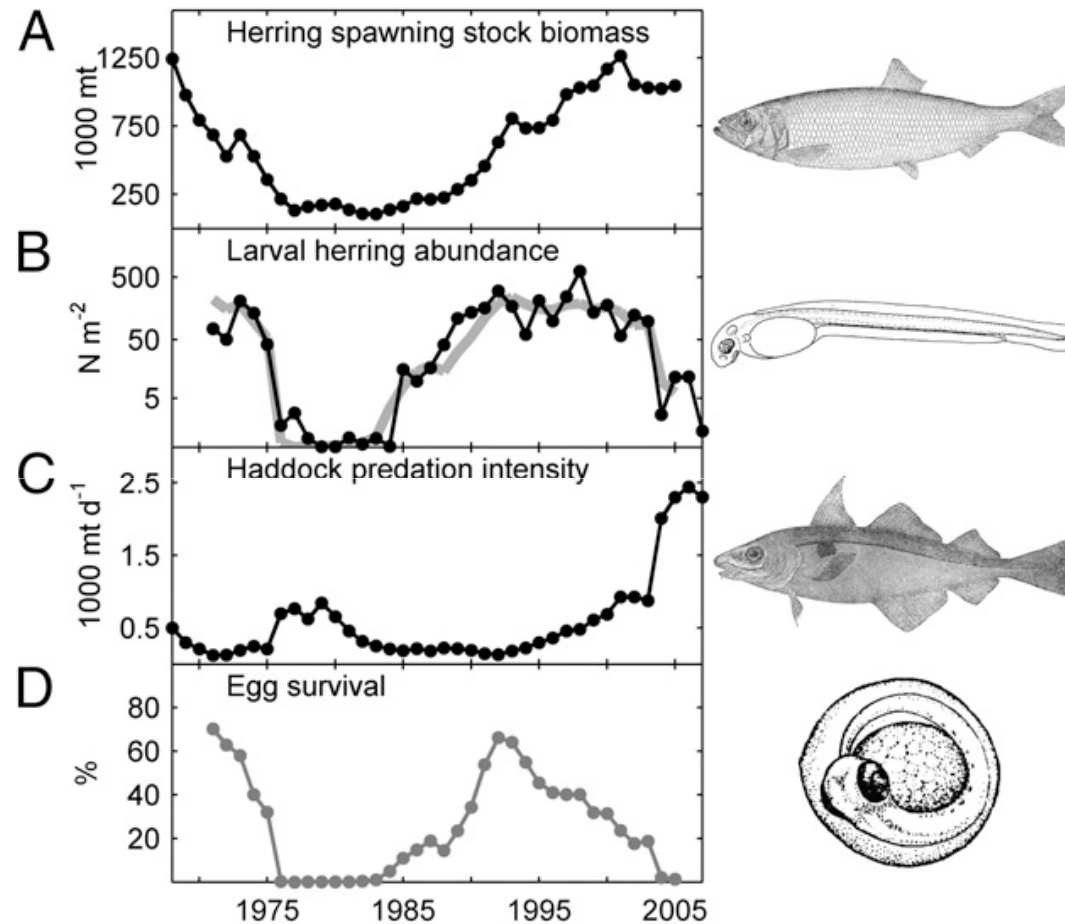
Résilience des espèces : 2 stratégies possibles



Un exemple de cycle trophique



Pourquoi le moratoire sur la pêche au cabillaud n'a pas rétabli leurs populations ?



<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3158212/pdf/pnas.201015400.pdf>

Exemple des limites d'une approche purement analytique : ce sont les interactions systémiques entre cabillaud et de harengs qui sont en jeu.

- ◆ Quand il y a beaucoup de cabillauds, ils mangent beaucoup de harengs
=> les populations de harengs sont donc “maîtrisées”;
- ◆ Quand il y a peu de cabillauds (*ex: surpêche*), ils mangent moins de harengs
=> les populations de harengs augmentent ;

Le problème : Le harengs mangent aussi les oeufs de cabillauds !

- ◆ Peu de cabillauds = peu d'oeufs de cabillauds
- ◆ Beaucoup de harengs mangent le peu d'oeufs de cabillauds !

Conséquence ; les populations de cabillauds ne sont pas restaurées ...

- ◆ Size-based species interactions shape herring and cod population dynamics in the face of exploitation
P. Daniël van Denderen^{1,2,†} and Tobias van Kooten^{1†} Wageningen Institute for Marine Resources and Ecosystem
Studies (IMARES), <https://www.esajournals.org/doi/abs/10.1890/ES13-00164.1>

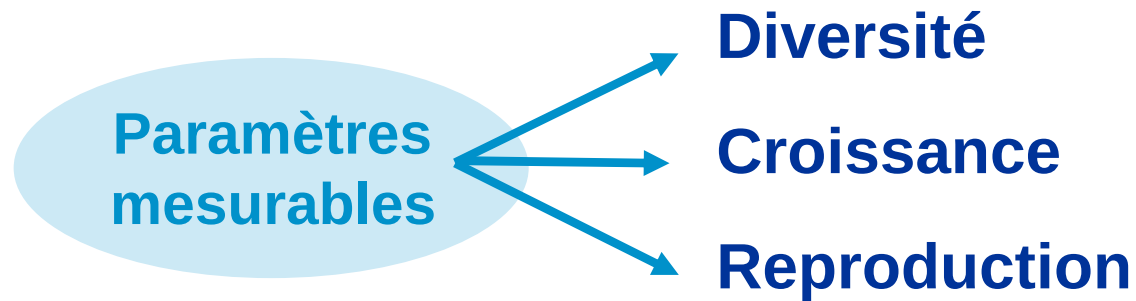
Une stratégie de type « r » : un paramètre de résilience du système

- ◆ La stratégie de type « r » favorise les populations d'organismes simples qui se développent et se reproduisent rapidement. Ils ont une durée de vie plus courte.
- ◆ En cas de perturbation importante (prédation, catastrophe naturelle, ...) les petits organismes mieux capables de s'adapter à un environnement en évolution rapide prennent le dessus sur les grands organismes.
- ◆ Alors qu'une stratégie de type « r » favorise la résilience, au détriment de l'efficacité avantagée par une stratégie de type « K ».

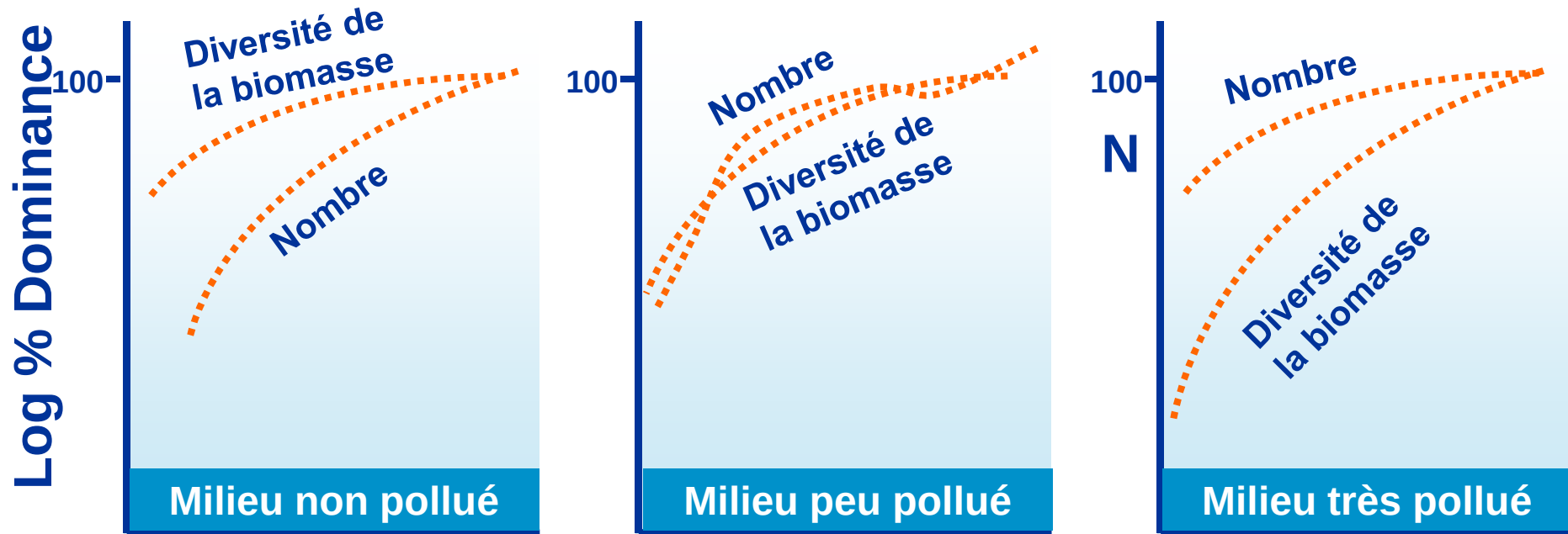
« K » et « r » : paramètres de résilience

Forte densité
Forte compétition }  Haute densité d'équilibre « K »

Densité réduite
Forte croissance }  Grande vitesse de reproduction « r »



Résilience et stabilité d'un écosystème



Dominance : Nombre d'individus/espèce en % du total

Beaucoup d'espèces, peu d'individus par espèce :
compétition, redondance → stabilité du système

Peu d'espèces, nombre élevé d'individus par espèce :
risque de perturbation dans une espèce → fragilité du système

« K » et « r » comme paramètres de sélection

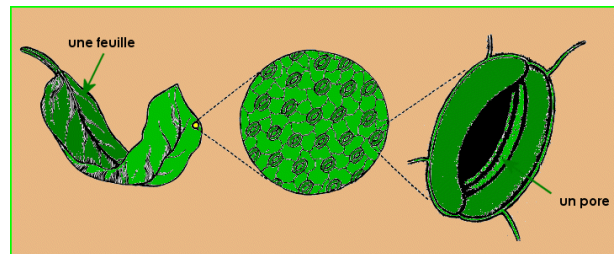
- ◆ Une Stratégie « K » favorise les organismes qui transmettent et partagent aussi le plus fidèlement des relations-informations extra-génétiques;
 - Parmi les animaux évolués, elle favorise ceux qui transmettent (par « éducation ou enseignement») le mieux cette information
 - Dans une société humaine, cela s'est traduit par le développement de systèmes culturels et éducatifs.
- ◆ Une Stratégie « r », au contraire, ne favorise pas la transmission d'information extra-génétique à la « progéniture ».
 - Mais plus des espèces de stratégie K dissipent d'énergie, plus leur environnement est susceptible d'évoluer (s'épuiser) et plus il est difficile pour leur écosystème de s'adapter.
 - Inévitablement, privé de ressources à dissiper, il finit par s'effondrer
 - ...

Résilience en biologie végétale et stratégies r et K

- ◆ Pour la végétation, une comparaison permet de comprendre la différence entre résilience et adaptation: celui d'une forêt naturelle et d'une prairie d'herbes folles :
 - - la forêt naturelle (Stratégie K) évolue facilement autour d'un état moyen au fil des saisons et des années, parce qu'elle s'adapte avec élasticité aux variations régulières du climat, mais elle sera durablement détruite après le passage d'un cyclone ;
 - - les herbes folles d'une prairie (stratégie r) disparaîtront sous l'action du passage d'un troupeau de buffles ou seront tuées par la sécheresse de l'été, mais elles renaîtront dès la première pluie.

« Comment il y a des arbres ? » (1)

- ◆ La plante adapte son activité photosynthétique à sa capacité de transport de l'eau.
- ◆ Un arbre peut transpirer jusqu'à 220 litres/h. La transpiration des plantes serait comparable à six fois la transpiration d'un plan d'eau de même taille.
- ◆ Les plantes favorisent une évaporation optimale afin que le flux d'énergie net entrant dans le système soit presque entièrement évacué dans l'atmosphère sous forme de flux de chaleur latente.
 - Sur une échelle journalière, elles y parviennent par le biais de la modification de la résistance des stomates de leurs feuilles.



« Comment il y a des arbres » (3)

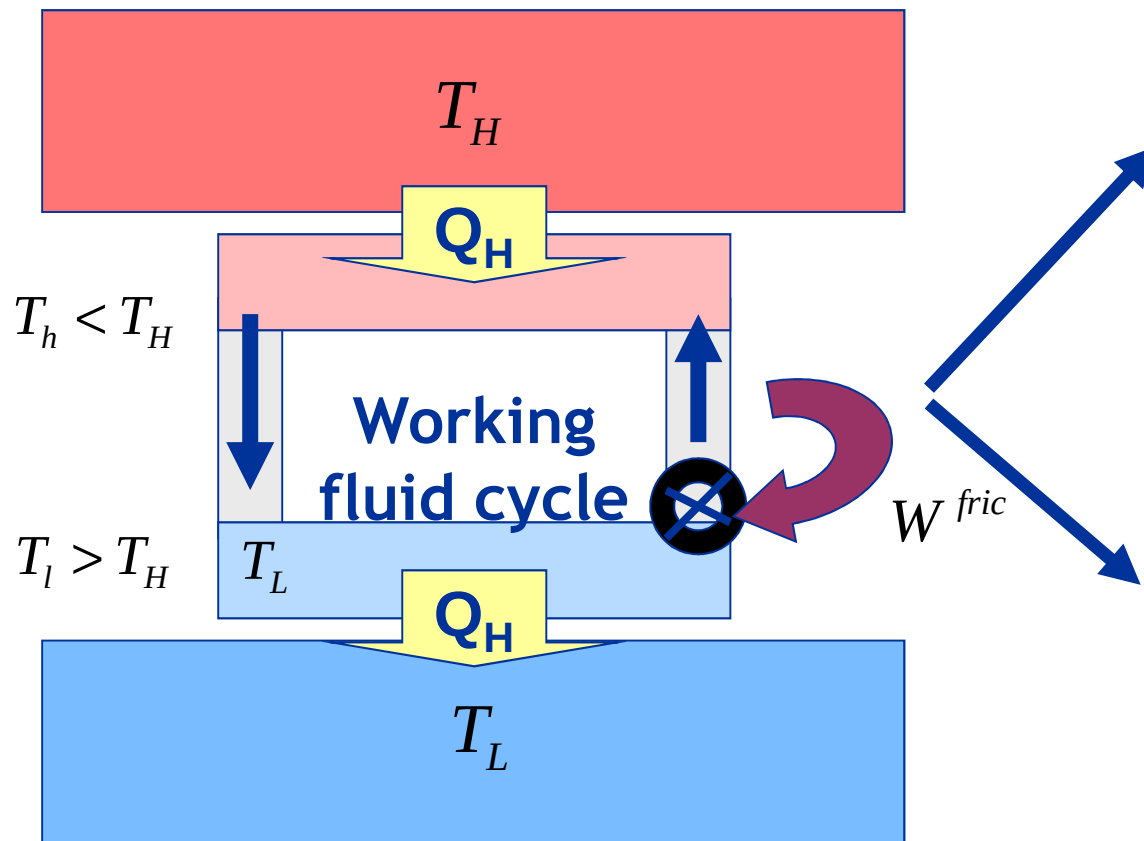
- ◆ L'absorption inélastique de la lumière par les organismes photosynthétiques fournit - indépendamment des autres processus physiques – un canal de transfert de l'énergie lumineuse entre le visible et les bandes infrarouges thermiques.
- ◆ Un calcul élémentaire a montré que cette forme d'absorption augmente la capacité de transport de capacité thermique par un facteur de 10^9 pour chaque atome agissant comme un absorbeur photosynthétique de l'énergie des rayons du soleil que le même atome à l'état abiotique.
 - Cependant, le bilan de cette capacité d'énergie est atténué par le grand volume de biomasse nécessaire pour créer chaque site d'absorption photosynthétique.

L'adaptation des végétaux au problème du maintien de l'équilibre thermique

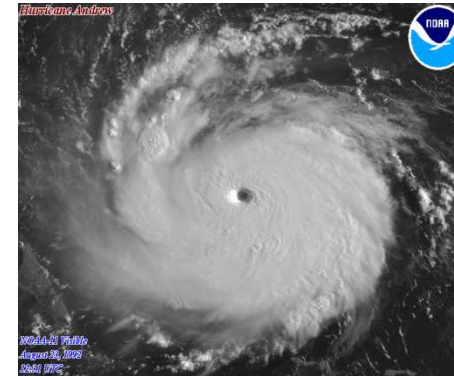
- ◆ **Les adaptations varient fortement entre les grands biomes.**
- ◆ forêts équatoriales: l'eau n'étant pas limitante, l'évapotranspiration est la voie principale d'évacuation de chaleur;
- ◆ - forêts tropicales avec saison sèche: diminution des dimensions foliaires et / ou feuilles profondément découpées, permettant un refroidissement plus efficace par convection
- ◆ - plantes cactiformes des semi-déserts: l'eau étant très limitante, et l'absence de feuilles empêchant un refroidissement efficace par convection, c'est la réduction de l'interception du rayonnement solaire incident grâce au port "en chandelier" qui joue un rôle essentiel ;
- ◆ - forêts caducifoliées tempérées: régulation par transpiration en été; la grande dimension des feuilles entraînerait un refroidissement excessif en hiver, ce qu'évite l'abscission.
- ◆ - conifères des taïgas: les feuilles aciculaires ont des couches limites très minces, permettant un réchauffement efficace par convection durant les périodes où le bilan radiatif est le plus déficitaire.

« Mais pourquoi il y a des arbres ? »

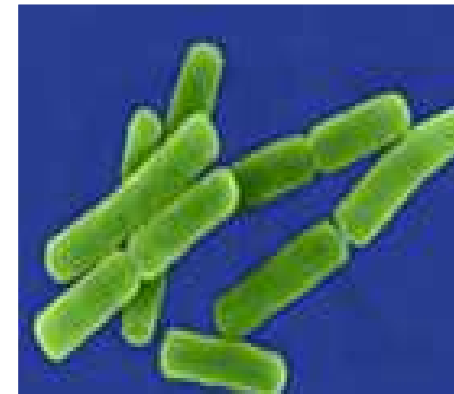
Car ce sont des machines à dissiper l'énergie !



Cyclones



Organismes & Ecosystèmes



« Pourquoi il y a des arbres ? » (2)

- ◆ Comme les cyclones, ce sont des machines thermiques de dissipation par évapo-transpiration .
 - On peut utiliser une équation dérivée de la loi de Fick pour estimer le flux de chaleur dissipée par une feuille par évapotranspiration :

$$Q_{EV} = C_{VAP} K_{VAP}^{air} [(E_{fle} - E_{air})/z]$$

où :

- C_{VAP} = enthalpie de vaporisation de l'eau (kJ mol^{-1})
- E_{fle} = tension de vapeur d'eau dans la feuille (hPa)
- E_{air} = tension de vapeur d'eau dans l'air à l'extérieur de la couche limite (hPa)
- K_{VAP}^{air} = coefficient de conductibilité de l'air pour la vapeur d'eau ($\text{kg hPa}^{-1} \text{ m}$)
- z = épaisseur de la couche limite (m)

« *Ceci n'est pas un arbre* » ou un bel exemple
de renversement « copernicien » !



L'eau ne « sert » donc pas principalement à
la croissance de la plante,
C'est la plante qui « sert » à l'évaporer !!

*Mais est-on prêt à ne fut-ce qu'envisager
une « autre réalité » ???*



Et les écologues n'aiment pas beaucoup voir le vivant comme générateur d'entropie ...

- Un changement de paradigme n'est pas facile à assumer ... :
- Une série d'autres formulations et de propriétés ont été utilisées pour caractériser le fonctionnement d'un écosystème :
 - Exergy Maximum power (Odum,1955)
 - Emergy and Maximum emergy (Odum,1983)
 - Ascendency (Ulanowicz, 1986)
 - Minimum specific entropy (Mauersberger, 1983)
 - Maximum Exergy (the “Fourth Law” of Jorgensen, 2004)



La loi de maximisation de la production d'entropie

- ◆ Alfred Lotka fut le premier à formuler explicitement le fait que les organismes vivants « *maximisent le flux d'énergie qui les traverse* » ;
- ◆ Dans un article du PNAS intitulé *Natural Selection as a Physical Principle* (1922), il affirme que la sélection naturelle fonctionne comme réponse à une 3^{ème} loi de la thermodynamique en favorisant comme organismes les plus aptes à survivre et à se reproduire, ceux maximisant le taux global de dissipation de l'énergie.
- ◆ Il faudra attendre Prigogine, Swanson, Dewar ou Per Bak et quelques autres avant que cette notion prenne tout son sens au travers des sciences au travers de la formulation de cette 3^{ème} loi phénoménologique , dite « MEP »...

Les stratégies r et K dans le paradigme dissipatif

- ◆ Comme suggéré par Lotka (1922), la loi de la dissipation maximale donne tout son sens physique à la sélection naturelle en favorisant les organismes qui dissipent le plus d'énergie ;
- ◆ Lorsque le milieu est stable, ce sont ceux qui sont les plus efficaces, ceux à laquelle s'applique la stratégie K, dont la taille est la plus grande. (ex: les dinosaures) ;
- ◆ La transition d'une stratégie K à une stratégie r se produit lors de catastrophes écologiques, comme il y a 65 millions d'années avec le développement des petits mammifères
- ◆ Ce type de transition correspond en fait à un processus de transition de phase au point critique, au sens de Ising .

La loi de Production Maximale d'Entropie

- ◆ La Loi de Production Maximale d'Entropie (*MEP en anglais*) permet de comprendre que l'évolution n'est pas *seulement* le fruit du hasard. Les structures qui sont sélectionnées, sont les plus probables parce qu'elles dissipent l'énergie le plus facilement.
- ◆ Cela permet de comprendre que la complexité dans la nature n'est pas un phénomène improbable, mais au contraire, le phénomène le plus probable compte tenu des configurations énergétiques qui se sont succédées sur terre.
- ◆ Cela ne signifie pas pour autant que l'évolution tend toujours vers davantage de complexité, qu'il y a un sens a-priori à l'évolution; seulement que la complexité, est une configuration probable vers laquelle tend tout système dissipatif loin de l'équilibre.

Dissipation, évolution, sélection

- ◆ Le processus naturel d'évolution d'un système loin de l'équilibre thermodynamique est de cheminer le long de la descente la plus rapide menant à une uniformisation de ses états énergétiques via divers processus de transformation et de dissipation, tels que les flux de chaleur, de courants électriques, de réactions chimiques.
- ◆ Ces flux d'énergie qui optimisent les chemins les plus dissipatifs constituent le moteur de l'évolution de tout système auto-organisé : minéral, organique ou biologique.
- ◆ A grande échelle, l'évolution dissipative des systèmes loin de l'équilibre, formulée en terme de physique statistique, est donc un mouvement probable.

Caractéristiques des états dissipatifs «émergents »

- ◆ L'émergence et le maintien d'une organisation locale dissipative se produit sans qu'il y ait une partition écrite à l'avance, (*ni nécessairement de «chef d'orchestre » dans les systèmes les plus simples*) autre que « l'attracteur dissipatif » ;
 - Quand localement, sous l'influence de forces synergiques, des éléments au sein d'un système global s'influencent mutuellement, le système finit par atteindre un seuil dit «critique » ;
 - Lorsque ce seuil critique est atteint, une petite fluctuation peut suffire à ce que le système bifurque, c'est-à-dire qu'il change brutalement de comportement (de « phase ») pour passer d'un attracteur à un autre, caractérisé par un plus grand état de dissipation . *Par exemple, l'avalanche, le cyclone, mais aussi un mouvement de panique collective.*
- ◆ Ce qui caractérise donc un système auto-organisé localement, c'est que l'on observe au niveau macroscopique d'autres propriétés qu'au niveau microscopique, propriétés liées aux interactions synergiques qui se sont créées localement entre certains de ses éléments constitutifs.

La probabilité de la transition biologique

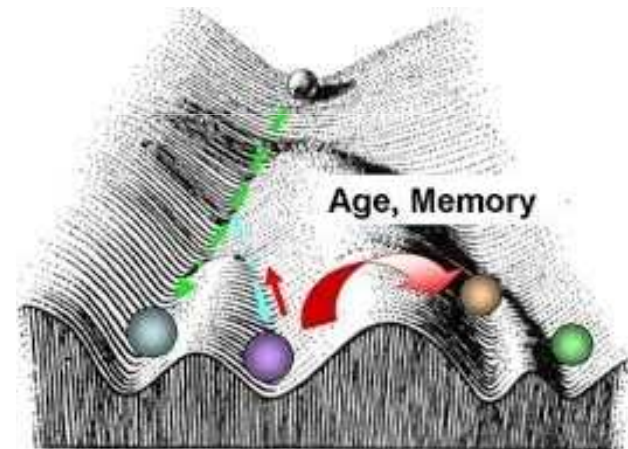
- ◆ La création de canaux de dissipation d'énergie via des transitions de phase fournit un moyen de comprendre comment le cœur biochimique de la vie est resté stable à tous les âges de la terre: un état de la géosphère qui comprend la vie était devenu plus probable qu'un état purement abiotique ;
 - Dans des conditions de production continue d'énergie libre géochimique, la Terre sans vie aurait été métastable. Sa transition ou "effondrement" vers un état de grande stabilité correspond à l'émergence des états biologiques ;
- ◆ La phase de transition du milieu abiotique au milieu cellulaire est cependant nettement plus complexe qu'une transition de phase dans un gaz ou un alliage.
 - Les états dissipatifs biologiques impliquent notamment des phénomènes de diffusion et de transport moléculaires.

(adapté de H Morowitz)

Bifurcations et homéorhésie



- ◆ D'un point de vue local, la nature «bricole », et chaque structure aura une histoire singulière, qui correspond à une trajectoire de « l'espace des phases » de son paysage évolutif.
- ◆ Mais d'un point de vue global, sur de grandes périodes de temps, il s'agit bien d'un processus d'optimisation, qui ne retient que les formes les mieux adaptées, celles qui dissipent l'énergie disponible dans l'environnement le plus efficacement.
- ◆ Ce qui correspond à la notion d'*homéorhésie* introduite par Conrad Waddington il y a un siècle.



Les écosystèmes : intrinsèquement complexes

- ◆ Il est probable que les cellules sont apparues comme la forme la plus efficace de métabolisme dissipatif, dont les caractéristiques individuelles et la variabilité génétique, essentielle pour la sélection darwinienne, ont émergé comme une conséquence.
- ◆ Les espèces qui constituent un système écologique mettent conjointement en œuvre un ensemble métabolique « universel », tandis que la prédation, le comportement saprophyte, le parasitisme et la symbiose, créent entre leurs individus un équilibre dynamique de flux de molécules organiques.
- ◆ Ces flux métaboliques sont à son tour contraints par la taille des organismes, celle des individus et par les transferts de masse dans ce qui constitue alors un écosystème.

(adapté de H Morowitz)

Les écosystèmes : inexorablement plus stables et plus complexes

- ◆ En principe, de nombreux systèmes distincts peuvent satisfaire ces contraintes avec une efficacité énergétique globale comparable, mais ils ne peuvent être transformés l'un en l'autre que par les avalanches complexes de remplacement des espèces et de restructurations trophiques.
- ◆ La vie est ainsi une confédération - de constituants chimiques, de voies métaboliques et de fonctions - et la forme modulaire de son émergence continue à être reflétée dans son organisation actuelle.
- ◆ La succession, essentiellement thermodynamique, d'une biogéosphère d'états plus stables explique aussi pourquoi le métabolisme semble montrer une progression claire et déterministe, tandis que les espèces et leurs écosystèmes semblent avoir fait l'objet de vagues continues d'extinction.

(adapté de H Morowitz, 2006)

Les conséquences de la loi de MEP au niveau des organismes les plus complexes

- ◆ Cette tendance naturelle à privilégier les états de dissipation maximal peut cependant prendre une nouvelle dimension lorsqu'apparaissent dans les hémisphères cérébraux des états de « conscience individuelle » des éléments (individus) d'une telle structure ... ;
- ◆ Ces états de conscience offrent certes de nouvelles possibilités d'adaptations évolutives mais aussi une possibilité émergente : celle de « choix », qu'il soit collectif ou individuel, quant à l'évolution de cette maximalisation ;
- ◆ C'est tout l'enjeu d'une écologie dite « politique » qui ferait émerger une réelle conscience de la responsabilité qui en découle pour l'espèce concernée !



La nature matérielle des processus engendrant des états auto-organisés

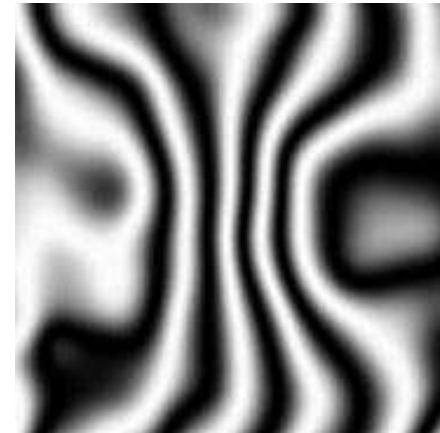
- ◆ Les processus d'auto-organisation d'une structure dissipative sont ceux observés lors d'une *transition de phase continue* ;
- ◆ Il se produisent dans des conditions spécifiques appelés un *point critique* et ont pour effet d'engendrer un phénomène de « supraconductivité » dissipative ;
- ◆ Caractérisé d'abord au niveau atomique et moléculaire, un certain nombre d'exemples en ont été étudiés en biologie, de l'origine de la vie et la dynamique des virus jusqu'à la propagation d'une épidémie, ou l'évolution des écosystèmes ;
- ◆ Ils s'appliquent aussi à l'intelligence individuelle et collective, à la dynamique des langues et aux systèmes socio-économiques.

Le modèle d'Ising : exemple physique de principe auto-organisateur

- ◆ L'exemple le plus commun de *transition de phase continue* est la transition entre le ferromagnétisme et le paramagnétisme.
- ◆ Cette transition de phase est représenté par le modèle d'Ising décrivant l'orientation des spins des atomes de fer.
- ◆ Placé dans un champ magnétique, les spins se couplent en s'orientant de la même façon et le fer acquiert une propriété émergente : il est lui-même « magnétisé » :
- ◆ Une fois le champ magnétique retiré, les spins conservent leur orientation et le fer conserve son état appelé ferromagnétique ; c'est un aimant.
- ◆ Au-delà de 770°C , *la température critique* du point de Curie, les spins se découplent et le fer perd son caractère magnétique.

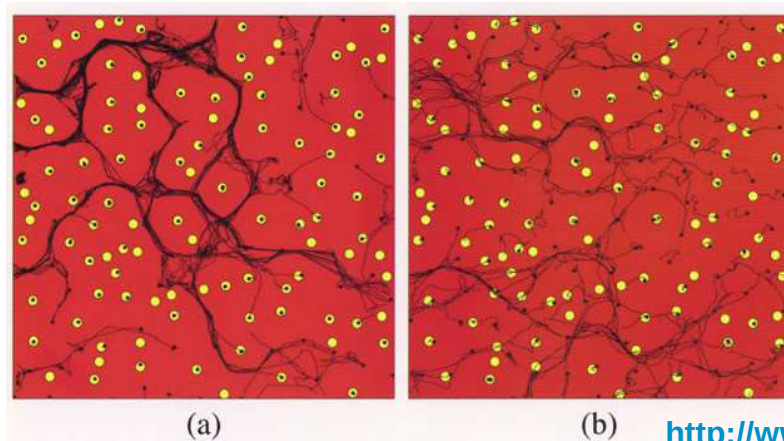
Effet supra conducteur : déjà un phénomène de couplage

- ◆ La première théorie largement acceptée pour expliquer la supraconductivité de l'électricité (BCS) affirme que, quand les électrons passent à travers un réseau cristallin, le réseau se déforme vers l'intérieur en générant des « paquets » d'électrons appariés appelés « phonons ».
- Ces phonons produisent un déficit de charge positive dans la zone de déformation, ce qui favorise le passage ultérieur d'électrons dans la même région dans un processus connu sous le nom de couplage phonon-médié.
- L'énergie nécessaire pour briser une paire d'électrons est $E_g = 7/2 K T_c$ où K est la constante de Boltzmann et T_c la température critique de transition.



Effet supra conducteur : un phénomène de couplage

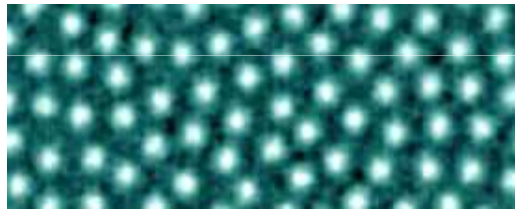
- ◆ Un autre mécanisme par lequel la supraconductivité peut s'expliquer est par réaction des électrons à des rayonnements électromagnétiques ou des champs magnétiques à des fréquences discrètes (effet ESR).
- ◆ Les électrons en mouvement créent des moments magnétiques minuscules qui influencent positivement ou négativement les électrons à proximité.
- ◆ Quand les moments magnétiques minuscules sont complémentaires (« couplés ») et se repoussent mutuellement, il se crée un tourbillon (vortex) et, comme ils se comportent d'une façon ordonnée, il en résulte un réseau périodique structuré.



<http://www.aaas.org/science/beyond/htm>

Effet supra conducteur : un phénomène de couplage

- ◆ Une configuration dite flux-treillis se crée lorsque les lignes de flux à partir d'un champ magnétique puissant tentent de pénétrer dans la surface d'un supraconducteur.
 - Les moments magnétiques minuscules dans chaque vortex résultant se repoussent mutuellement et il en résulte de réseau périodique (treillis ou maillage) ,dit de Abrikosov, ordonné comme une matrice.

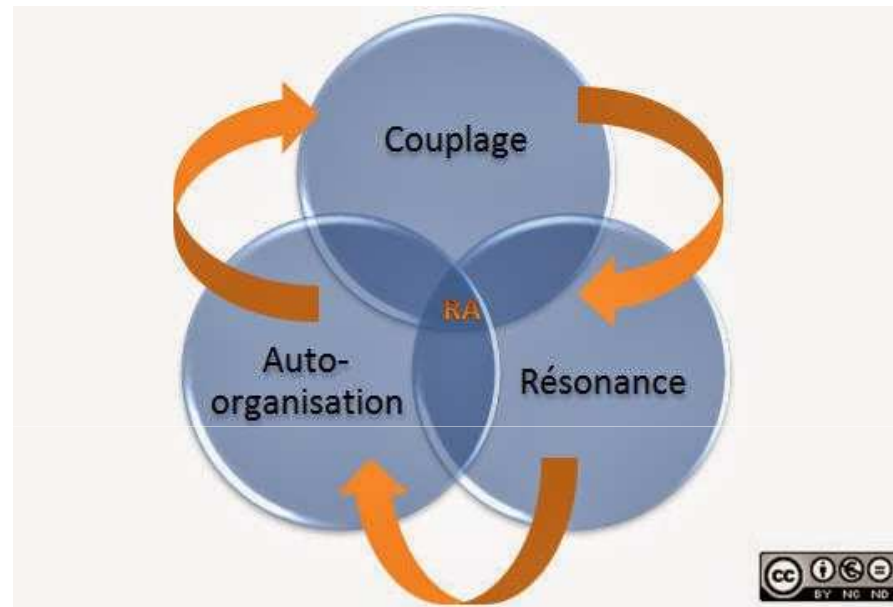


- ◆ Une fois en mouvement, le courant circule dans une boucle fermée - proche du mouvement perpétuel, un «phénomène quantique macroscopique».
 - Il existe des supraconducteurs «moléculaires» qui sont typiquement de grandes molécules de 20 ou plus atomes de carbone, composés d'une molécule organique plane et d'un anion non organique.

La non-intégrabilité des systèmes complexes : L'origine de la résistance aux processus d'émergence?

- ◆ La raison de l'impossibilité de définir les invariants du mouvement qui correspondent à la représentation d'un système dynamique intégrable tient à un mécanisme de résonance identifié par Poincaré ;
 - La notion de chaos dynamique implique donc d'abandonner les notions de trajectoire et de déterminisme ;
 - L'abandon du modèle des systèmes intégrables, a, en mécanique quantique comme en mécanique classique. la même signification : il nous permet de déchiffrer le message de l'entropie (Prigogine) ;
 - La collision, transfert de quantité de mouvement et d'énergie cinétique entre deux particules, constitue, du point de vue dynamique, un exemple de résonance.
- ◆ Par exemple, déjà la masse du proton provient des interactions non-linéaires entre gluons (Lattice quantum chromodynamics, Davies et al., PRL 2004)

Vers un modèle général des processus d'auto-organisation ?



A approfondir ailleurs ...

Auto-organisation et dissipation : la criticalité auto-organisée

- ◆ Les couples dissipatifs qui s'auto-organisent oscillent constamment à la frontière entre l'ordre et le chaos dans un processus baptisé criticalité auto-organisée, comparable aux déclenchement des avalanches dans un tas de sable ;
 - Il s'agit d'un état où le système est globalement métastable tout en étant localement instable. Cette instabilité locale (*de petites avalanches dans le modèle du tas de sable*) peut générer par bifurcations successives une instabilité globale (*de grosses avalanches entraînant l'effondrement du tas*) qui ramène ensuite le système vers un nouvel état métastable : le tas de sable connaît une nouvelle base ;
 - ◆ Selon P. Bak, l'une des particularités des systèmes auto-organisés à l'état critique est de posséder une double signature fractale, temporelle et spatiale. Les variables qui décrivent le comportement du système suivent des lois puissance et les systèmes auto-organisés critiques construisent ces formes fractales.
-

Avalanches et catastrophes

- ◆ Un processus d'auto-organisation se produit à travers la succession de ces bifurcations appelées avalanche.
 - Chaque bifurcation déclenche la suivante. Par Bak compare ces avalanches à ceux créés lors de la coulée de sable dans un tas.
- ◆ La pente de la pile de sable augmente jusqu'à ce qu'il atteigne une valeur critique (*l'équivalent du point critique*), au-delà duquel les avalanches se produisent.
- ◆ La probabilité d'apparition d'une avalanche est inversement proportionnelle à son amplitude.
 - C'est ce qu'on appelle la « loi en $1/f$ », f étant la fréquence d'apparition d'une avalanche.
 - Cette loi se applique aux réseaux de semi-conducteurs , aux avalanches de neige et tremblements de terre. Ainsi qu'aux écosystèmes.



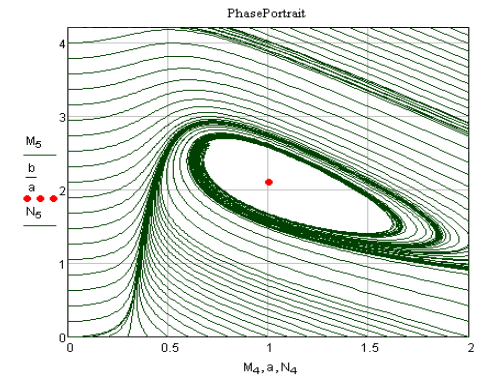
http://www.fys.uio.no/super/files/altshuler_RMP.pdf

Adaptation des structures dissipatives

- ◆ Les structures dissipatives s'adaptent donc à partir des fluctuations perçues de l'environnement par les suites d'avalanches consécutives à l'établissement et l'accumulation de relations couplées (*ce que l'on nomme le feedback d'information en cybernétique*) entre leurs éléments constitutifs.
- ◆ Plus de relations - informations sont intégrées *c-à-d perçues comme « signaux »*), plus elles peuvent s'accumuler et s'organiser en cycles, et plus d'énergie est dissipée.
 - Dans un cyclone, les relations sont conservées par inertie ;
 - Dans un organisme vivant, elles sont captées puis traduites et conservées par les processus génétiques ET épigénétiques. ;
 - Dans les écosystèmes, s'y ajoutent les phénomènes d'apprentissage.
- ◆ Les états métastables de relations - informations accumulées par les organismes vivants sont alors transmis à travers les générations et permettent leur évolution.

Couplages chimio-diffusifs : le *Brusselator*

- ◆ Lefever (1968) calcula avec Ilya Prigogine les conditions d'une distribution stable pour un système de réactions chimiques à "deux boîtes" (le "Brusselator") et démontra les capacités "morphogénétiques" des processus de *couplage chimio-diffusifs*.
 - Si les frontières du système sont maintenues constantes, sous l'influence d'un courant (flux) thermodynamique, le système évolue spontanément vers un état d'équilibre dynamique stationnaire.
 - En fonction de valeurs bien précises du système, et notamment des constantes de diffusion des produits entre les compartiments, certains de ces états seront oscillants alors que d'autres seront stables.
 - Pour certains de ces états stationnaires loin de l'équilibre, Lefever montre que des perturbations ou des fluctuations, même plus importantes que celles qui les ont générées (*par exemple variations de la vitesse réactionnelle dans l'un ou l'autre compartiment*), n'altèrent pas irréversiblement leur stabilité.



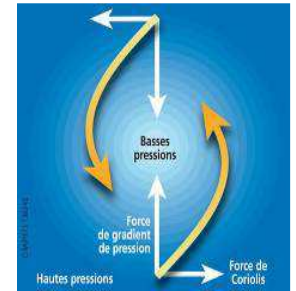
Couplages supraconducteurs : un (le) principe organisateur fondamental ?

- ◆ Les phénomènes d'auto-organisation par « couplage supraconducteur » s'observent aussi bien :
 - dans les sociétés cellulaires et organismiques : *organisation énergétique, informationnelle, communicationnelle, reproductive, ...*
 - Dans les sociétés végétales : *lichens, mousses, prairies, forêts, écosystèmes, ...*
 - Dans les sociétés animales : *organisation de fourmilières, de hordes, de troupes, de vols et migration d'oiseaux, ...)*
 - dans les sociétés humaines : *applaudissements, panique collective, manifestations, intentions de vote, cultures, religions, associations civiles et politiques , ...)*
 - Dans les sociétés socio-économiques (*les entreprises, les réseaux urbains, industriels, commerciaux, etc*).

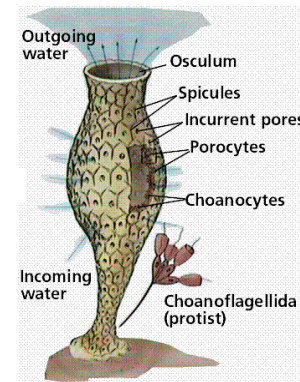
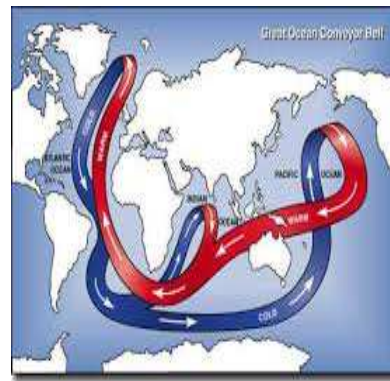
Couplages supraconducteurs :

- ◆ Ils sont fondateurs de l'émergence des processus biologiques à tous les niveaux de complexité :
 - Les couplage (auto-)catalytiques(feed-back par diffusion, effet « Turing »)
 - Le couple anabolisme/catabolisme ;
 - Les couples hétérocycliques ARN/ADN et ARN/protéines ;
 - Le couple noyau/ cytoplasme ;
 - Les couplage symbiotique noyau/mitochondries ,
 - Le couple de la reproduction sexuée ;
 - Les couplages ago-antagonistes régulateurs de l'homéostasie : (hormonaux, par exemple) ... ;
 - Les couplages neuro-sensoriels ;
 - Le couplage des hémisphères cérébraux ;
 - Les couplages inné/acquis : instinct, apprentissage, culture ;
 - Les systèmes écologiques ;
 - ...

MaxEP : des processus comparables tous les niveaux d'organisation



- ◆ Localement, de la matière peut donc s'ordonner, s'organiser à l'échelle macroscopique pour favoriser la croissance du désordre entropique à l'échelle microscopique.
- ◆ Au niveau d'un point dit "critique", c'est un couplage de forces thermodynamiques qui va spontanément créer entre un grand nombre de molécules des interactions qui vont produire des structures résonantes "organisées" qui accélèrent et maximalisent la dissipation entropique de l'énergie ;
- ◆ Du cyclone à l'arbre, de l'animal à la cité, le principe est identique.



Exemple de couplage entre organismes unicellulaires

- ◆ Des interactions cellulaires entre des organismes unicellulaires peuvent se produire entre les membres de la même espèce.
- ◆ Par exemple, les membres de la famille *Plasmodium*, le parasite unicellulaire qui cause la malaria, peuvent coupler (synchroniser) leur maturation en réponse à la mélatonine produite par leur hôte ;
- ◆ Cette synchronisation assure que le sang de leurs victimes contienne la plus forte concentration de parasites matures au moment où leur vecteur, le moustique, est susceptible de mordre sa victime (Srinivasan et al., 2009).

L'importance de l'environnement sur l'évolution d'une espèce

- ◆ Pour des taxons comme celui du ver *Caenorhabditis elegans* on manque d'information fonctionnel pour la plupart de leurs gènes.
- ◆ Comme leur micro-environnement influence de façon déterminante leur adaptation (fitness), l'information sur leur système écologique devrait améliorer notre connaissance de la fonction de ces gènes.
- ◆ Ces facteurs biotiques agissent en effet comme une force motrice dans l'élaboration de la composition et de la structure du génome du nématode.
- ◆ Des exemples existent qui montrent comment l'information écologique et les variations naturelles ont été essentielles dans l'identification inattendue de fonctions de certains gènes.

Les équilibres biologiques sont tous métastables

- ◆ Un des exemples les plus curieux : la capture des insectes par une plante carnivore, la *Venus dioneae* :
 - au repos, ses feuilles sont convexes, comme une coque de navire, ce qui correspond à une situation de basse énergie dans un puits de métastabilité peu profond ;
 - quand un Insecte se pose sur la feuille, elle commence à se fermer par une réaction cellulaire, puis, en quelques dixièmes de seconde, sa courbure s'inverse, et elle se referme brutalement, en emprisonnant sa proie.
- ◆ La petite quantité d'énergie apportée par l'insecte a suffi pour que la feuille sorte du puits de métastabilité et tomber très vite dans un autre puits de métastabilité, correspondant à une courbure inversée, comme un couvercle de boîte de conserve qui se courbe en produisant un « clic » sonore.

L'évolution biologique dans l'espace des phases (François Roddier)

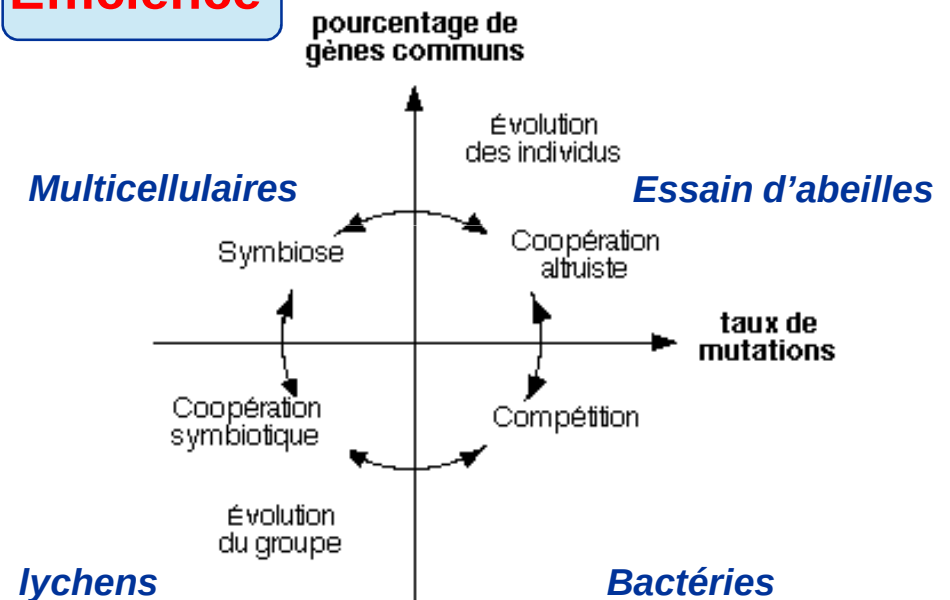


L'espace de phases permet de suivre l'évolution d'un système physique dans le temps. Pour ce faire, on attribue à un point dans un repère les caractéristiques du système à un instant donné.

Cela permet de montrer qu'en biologie de l'évolution, un système évoluera entre **efficience** et **résilience** :

- en fonction du taux de mutations et de gènes communs ;
- mais aussi en fonction de l'évolution de l'environnement induite par la dissipation de son énergie (effet de la "reine rouge").

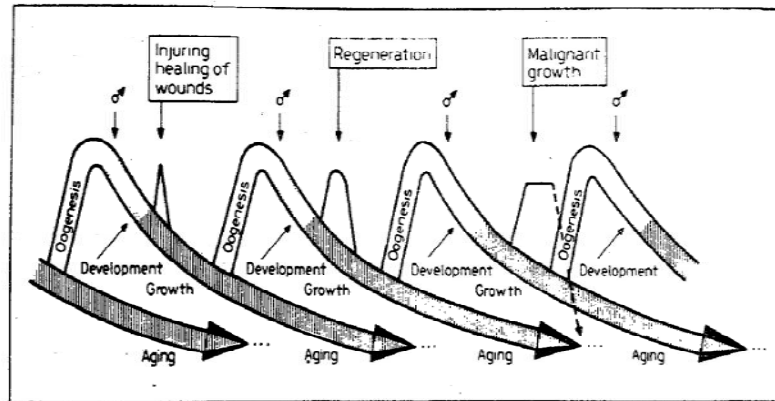
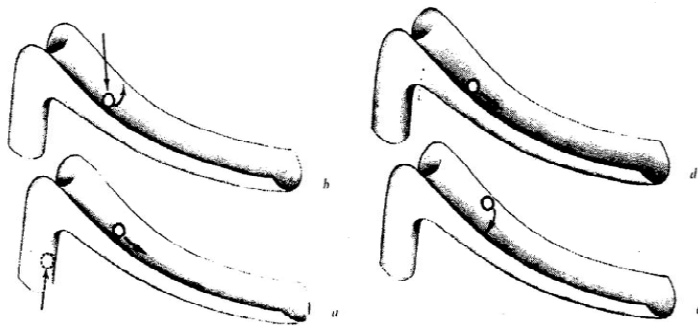
Efficience



Résilience

Déviations inductives et constitutives des états d'équilibres dissipatifs biologiques

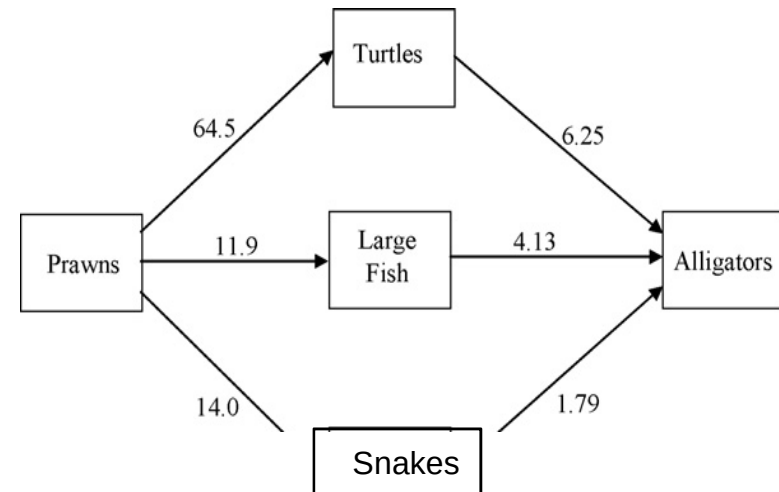
- ◆ Deux types de déviations des états d'équilibre stationnaire correspondent à ces perturbations subies par les organismes vivants:



- les déviations inductives, résultant de la variation transitoire autour de l'état stationnaire d'homéostasie et permettant de préserver son efficacité; ce qu'illustrent les mouvements de la bille sur les parois de la rigole :
- les déviations constitutives, correspondant à des transitions de phase en réponse à des perturbations dépassant les capacités d'adaptation inductives. Ce sont des mouvements de la bille par rapport à la rigole, vers le haut, vers le bas ou hors de la gorge.

Exemple d'adaptation d'espèces en écosystèmes (1)

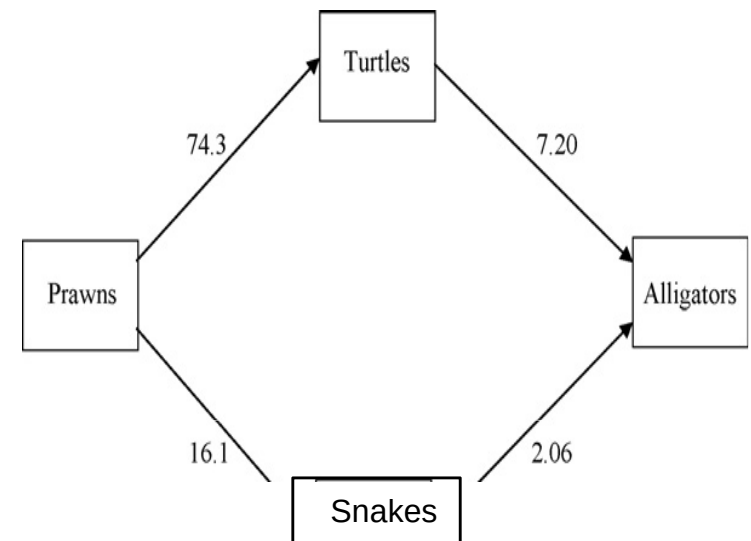
- ◆ La figure représente trois voies de flux de carbone dans l'écosystème des zones humides des cyprès de en Floride du Sud : des crevettes d'eau douce à l'alligator américain via les catégories de prédateurs intermédiaires : tortues, gros poissons et serpents .



- La voie de transfert énergétique la plus efficace entre les crevettes et les alligators est celle via les grands poissons.
- L'adaptation des flux aux faibles perturbations selon cette voie en assure l'homéostasie;
- Si l'efficacité était le seul critère pour le développement des flux, l'itinéraire via les poissons devrait croître au détriment des voies moins efficaces, jusqu'à ce qu'il domine le transfert.

Couplage d'espèces en écosystèmes (2)

- ◆ Mais si une catastrophe, comme un virus dévaste la population de poissons, tous les transferts d'énergie des crevettes vers les alligators la subiraient en proportion directe.
- ◆ Si la santé des populations de tortues et serpents a été préservée lors de la catastrophe, ils peuvent amortir la perte.



Le système s'adapte alors sur le mode homéorhésique pour amortir la perte de performance par des caractéristiques structurelles offrant des voies alternatives.

Elles lui confèrent sa résilience mais se traduisent par une efficacité non optimale de l'ensemble.

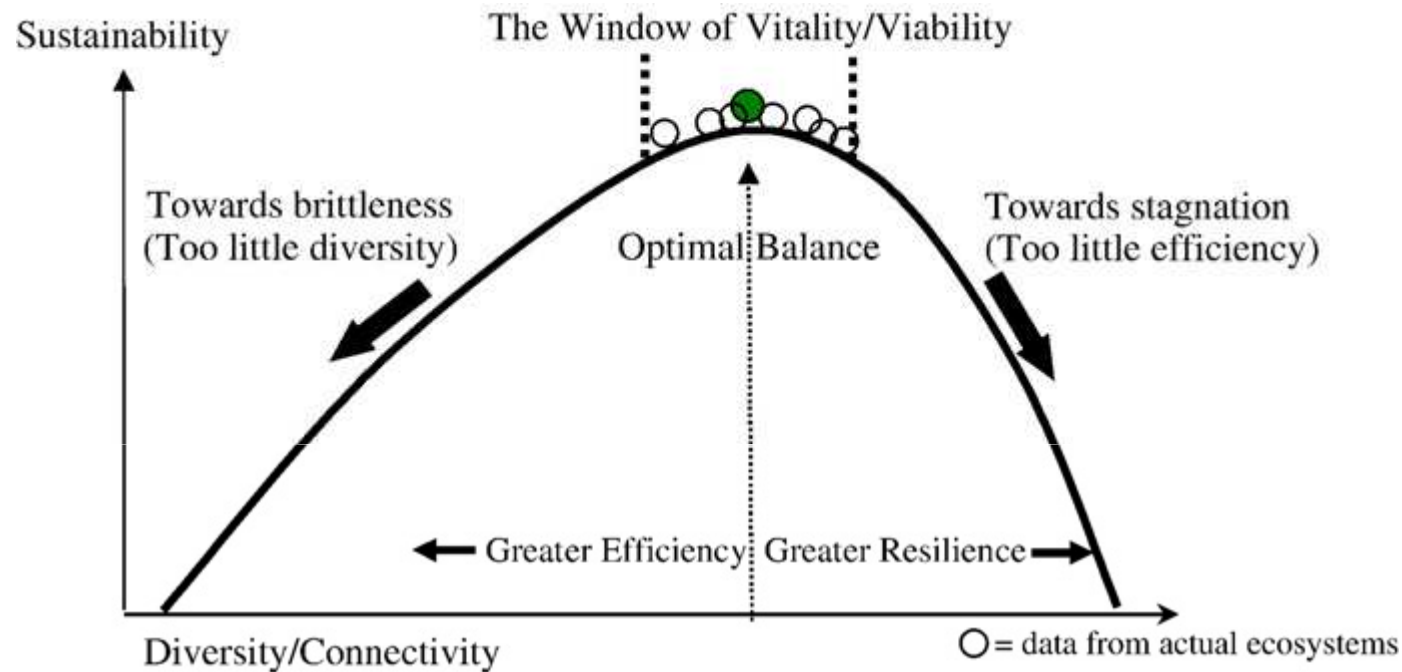
Les facteurs de stabilité d'un éco-système

- ◆ Le maintien à long terme de vitalité semble donc reposer fortement sur deux attributs structurels:
 - 1) l'efficacité dissipative: la capacité du réseau à maintenir son intégrité au fil du temps d'une manière suffisamment organisée et efficace (homéostasie);
 - 2) la capacité de résilience: l'existence d'une diversité de positions flexibles de repli et d'actions qui peuvent être utilisées, par transitions de phase, pour répondre aux contraintes nouvelles issues de perturbations et offrant l'opportunité d'émergence de nouveaux états nécessaires au maintien développement et à l'évolution du système dans son ensemble (homéorhèse) .

Résilience et efficacité : opposées mais complémentaires

- ◆ Dès lors que résilience et efficacité sont à la fois nécessaire, mais agissent dans des directions opposées, la nature a tendance à favoriser les systèmes qui permettent d'atteindre un équilibre optimal des deux.
- ◆ La balance optimale efficacité/résilience d'un système peut être calculée par l'intermédiaire de la configuration de sa diversité et de sa connectivité.
- ◆ Cela permet d'apprécier la pérennité du système via un seul paramètre qui établit son niveau d'équilibre dans un continuum entre *fragile* (insuffisamment diversifié) et *stagnant* (insuffisamment efficace).
- ◆ Les données provenant des écosystèmes naturels semblent confirmer la formulation mathématique de cette mesure de durabilité des écosystèmes.

La durabilité d'un système dissipatif : Un équilibre entre efficacité et résilience



L'écoulement de flux d'énergie impose un système d'interactions et de circulation efficaces afin de catalyser correctement à tous les niveaux les processus essentiels à l'ensemble du système.

From R. Ulanowicz and B. Lietaer

Les modèles observés dans les systèmes vivants sont bien le résultat de deux tendances antagonistes

- **D'une part, les processus qui contribuent à l'augmentation de l'organisation dans les systèmes vivants.**
 - u En particulier les processus d'autocatalyse, capables d'exercer une pression de sélection sur les éléments d'un système et d'exercer une attraction centripète sur les matériaux et l'énergie, les attirant dans son orbite ;
- **Dans exactement la direction opposée, la pente de la dissipation correspondant à la contrainte (attracteur) imposé par la seconde loi de la thermodynamique.**
 - u Si, au niveau local , ces tendances sont antagonistes, au niveaux supérieurs, ces attributs deviennent mutuellement contraignants ou « ago-antagonistes » .
- **Une performance ordonnée efficace dépend de ce couplage avec les capacités de flexibilité (réserve) dans le système.**
 - u Par conséquent, ces systèmes sont très limités en performance optimisée (dans le sens de la second loi) et la dissipation des gradients externes se fera à des taux bruts toujours plus élevés.
(adapté d'Ulanowicz, 1986, 1997).

Auto-organisations neuronales

- ◆ Les organismes évolués vont aussi stocker et organiser des relations- informations dans leurs cerveaux.
 - Les processus de criticalité, d'avalanches, de boucles supraconductrices y seront aussi déterminants.
 - ◆ Du fait du développement des hémisphères cérébraux complémentaires et couplés, les sociétés de primates ont, plus que d'autres espèces, acquis la capacité particulière de pouvoir réactiver volontairement le contenu de leur mémoire.
 - Ils stockent et ré-organisent alors ces informations dans des objets culturels (*images, sons, mouvements, recettes, sculptures, danses, ...*) ou dans des écrits dont les supports ont, eux aussi, évolué avec le temps.
 - Il en résulte de nouvelles opportunités d'accroître la capacité de dissipation par la création d'accès à d'autres flux énergétiques : agriculture, élevage, extractions minières, manufactures, commerce.
-

Résilience d'un système : entre taille et structure

- ◆ Ulanowicz (1980) avait déjà observé que la durabilité à long terme d'un système de flux dépend aussi d'un équilibre approprié entre sa taille et sa structure interne .
- ◆ Dans les écosystèmes, la taille est généralement évaluée par le débit total du système (TST) tandis que dans les économies, elle est mesurée sur base du produit intérieur brut (PIB).
 - PIB et de TST sont cependant des mesures pauvres de la durabilité, parce qu'ils mesurent uniquement le volume, tout en ignorant la structure nécessaire au réseau pour traiter les ressources et l'énergie circulant dans l'ensemble.
 - Cela rend impossible de distinguer entre croissance et développement ou entre une économie résiliente et de 'bulle' .
 - Mais cela devra faire l'objet de développements ultérieurs ...

Exemples des limites de la résilience d'un système

- ◆ Le développement massif des algues sur les plages de Bretagne illustre ce qui se passe lorsque la croissance est non contrôlée dans un circuit du système (sans feed-back).
 - Il se crée un vortex de ressources concentrées qui érode activement le réseau plus large dont la santé systémique dépend pourtant en dernier ressort.
- ◆ La crise financière initialement provoquée par la dérive de la bulle hypothécaire montre comme fonctionne ce processus.
 - Les banquiers et les courtiers déréglementés à la recherche de nouvelles sources de revenus ou de produits à vendre, et beaucoup d'investisseurs ont formé un circuit d'auto-amplification non compensé dans lequel les gains dans un segment alimentait les gains dans les autres.
 - Cette boucle autocatalytique a pompé les ressources du réseau économique périphérique pour la concentrer dans le moyeu jusqu'à son épuisement.
- ◆ Un cancer métastasique représente un phénomène comparable

Effondrement des écosystèmes

- Des modèles ci-dessus, on peut élaborer un mécanisme général de l'effondrement d'un écosystème, animal ... ou humain !
 - 1) Il est associé à une grande fluctuation de son activité et il survient après une période de croissance inhabituelle de la taille de sa population ;
 - 2) Initialement l'énergie est disponible à faible coût, provoquant une augmentation de la température de l'activité bien au-delà de la température critique au-delà duquel des avalanches de bifurcations se produisent;
 - 3) La richesse se condense en produisant un accroissement des inégalités entre groupes au sein de l'écosystème;
 - 4) progressivement la concurrence (de sélection r) l'emporte sur la coopération (de sélection K) favorisant la résilience sur l'efficacité;
 - 5) En raison de « l'effet de la Reine Rouge, » les écosystèmes doivent se réorganiser plus en plus vite en raison de l'accélération des changements environnementaux;
 - 6) Un événement externe peut finalement leur faire dépasser le seuil de leur effondrement.

(Adapté de François Roddier)

De la résilience écologique à la résilience économique

- ◆ L'autocatalyse explique aussi pourquoi sur-alimenter des circuits dominants ou ayant des contraintes insuffisantes conduit souvent à des cycles catastrophiques d'expansion-récession, au lieu de l'équilibre sain que prédisent certains théoriciens. Dans la nature, des boucles d'auto-amplification (*rétroaction positive*) provoquent éventuellement leur contraire: décélérations (*rétroaction négative*) boucles de recul vers un équilibre (*qui est souvent à tort, décrit comme «l'équilibre»*).
- ◆ La plupart des économistes omettent de mentionner que ces ajustements à la baisse peuvent également déclencher des pulsions autocatalytiques provoquant récessions, dépressions, paniques monétaires et bancaires ou l'effondrement économique si la résilience est faible ou que la spirale décroissante n'est pas contrôlée.

De la résilience écologique à la résilience économique

- ◆ « Les leçons tirées des écosystèmes sont cohérents avec les principales pierres de touche de la théorie de la libre-entreprise traditionnelle, tels que l'importance de la diversité et de la liberté, tout en intégrant parfaitement les préoccupations de justice sociale, des problèmes de délocalisation, des allégations d'abus des entreprises, ou des observations sur les dangers de l'excès de concentration dans des entités à priori plus équilibrée.
- ◆ Un équilibre reste la clé, bien sûr. Mais si , l'efficacité, la croissance du PIB et d'autres piliers de la pensée actuelle restent des préoccupations légitimes, leur poursuite excessive et simpliste doit en être tempérée par la conscience qu'ils ne sont ni toujours bon, ni le chemin vers la santé économique. »

Goerner, Lietaer & Ulanowicz. Ecological Economics 69 (2009) 76-81

- ◆ **Merci de votre attention !**
- ◆ **Désolé pour les nombreux raccourcis, imprécisions et (sur)simplifications ...**
- ◆ **Il restait tant de choses à dire, à préciser et ... à faire émerger !**
- ◆ **A l'écoute de vos commentaires, critiques ... et suggestions !**

Jacques