

Thermodynamique et évolution

François Roddier

Exposé du 19 septembre 2017
à l'Observatoire Midi-Pyrénées

Émergence de la notion d'évolution

1707-1788



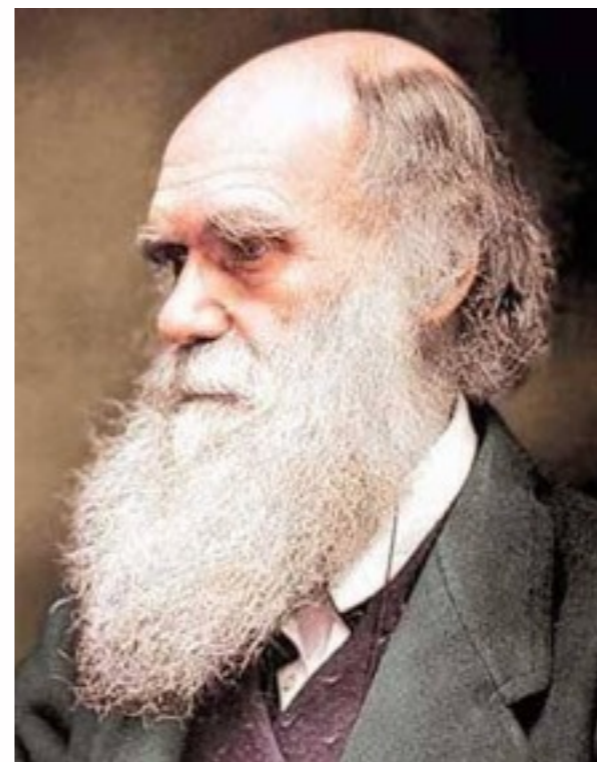
Buffon

1744-1829



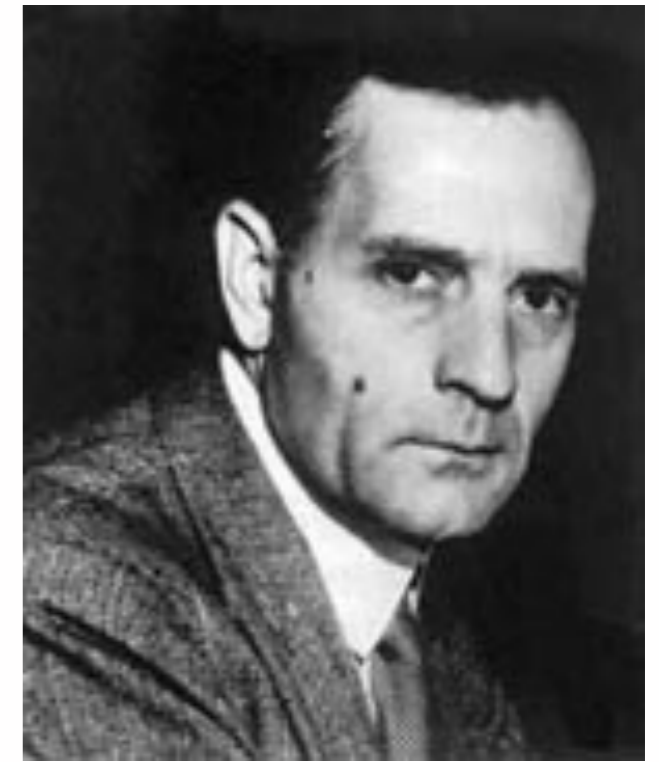
Lamarck

1809-1882



Darwin

1889-1953



Hubble

Quel rapport avec la thermodynamique?

Les lois fondamentales de la physique (mécanique, optique) ne dépendent pas du sens du temps.

Pourtant tout évolue: les êtres vivants naissent, vieillissent et meurent, mais aussi: les montagnes, les étoiles et même l'univers observable.

Seule la dissipation de l'énergie est irréversible:

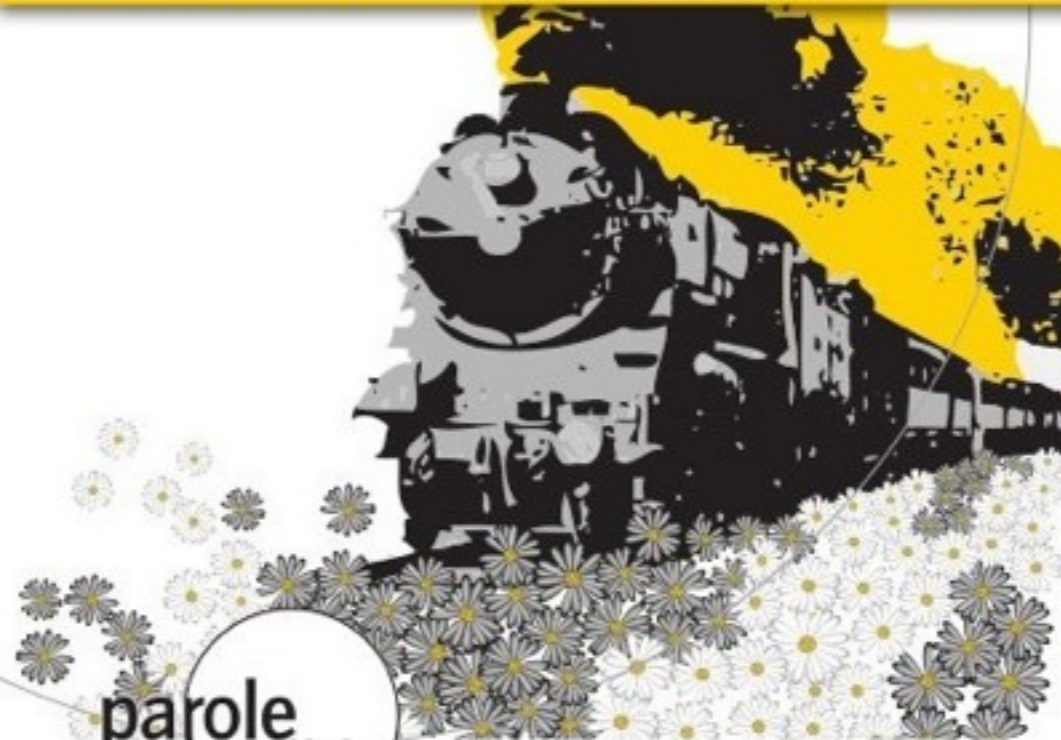
**L'évolution est
un processus de dissipation d'énergie.**

François Roddier

LE TEMPS D'APPRENDRE

Thermodynamique de l'évolution

Un essai de thermo-bio-sociologie



parole
éditions

Les lois de la thermodynamique

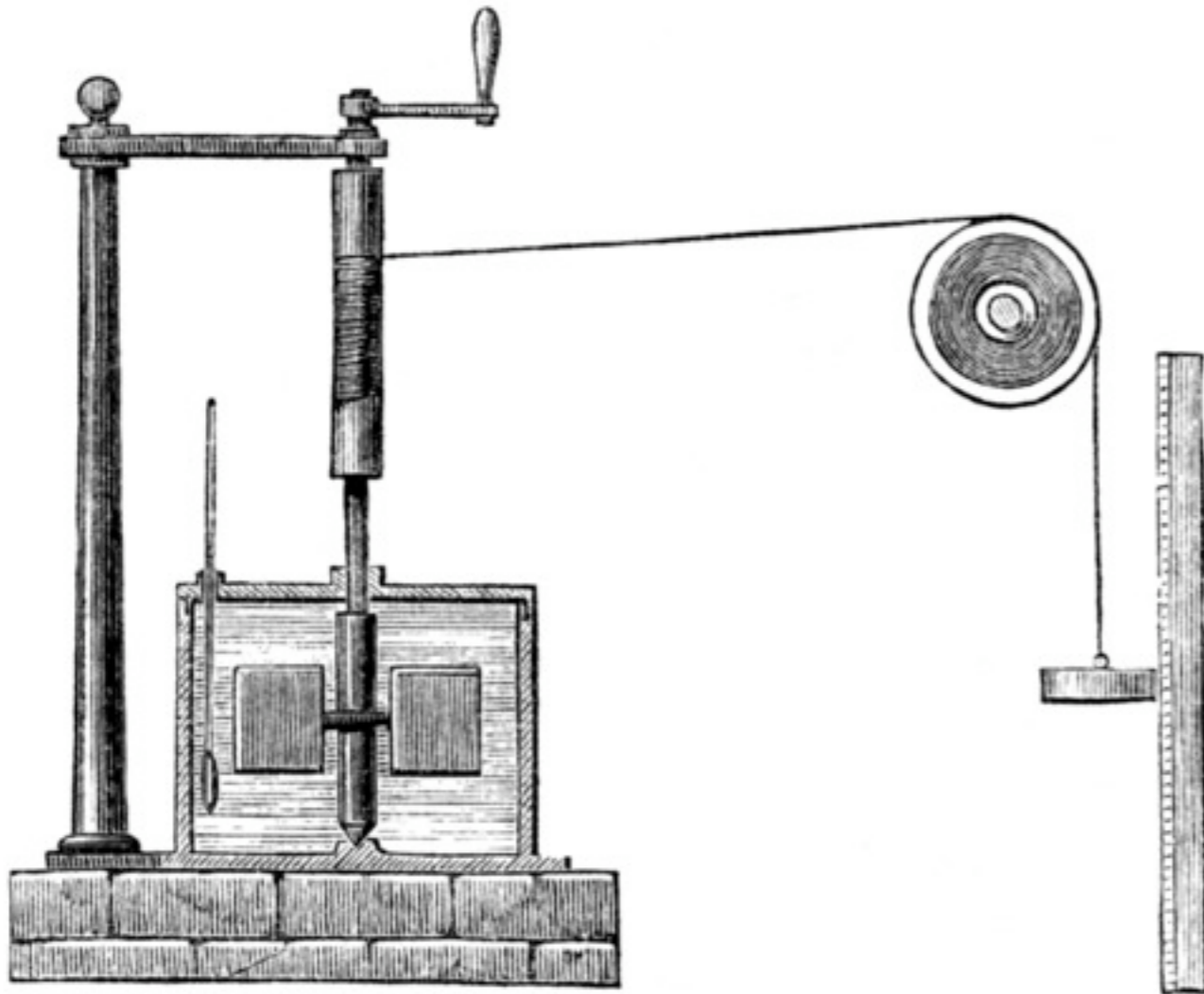
Les lois de la thermodynamique

Première loi: l'énergie se conserve. La chaleur est une forme particulière d'énergie.

Deuxième loi: l'énergie se dissipe. Elle tend à se transformer irréversiblement en chaleur (forme désordonnée d'énergie).

Troisième loi: l'énergie se dissipe le plus vite possible, compte tenu des contraintes.

James Prescott Joule



James Prescott Joule
(1818 - 1889)

Sadi Carnot

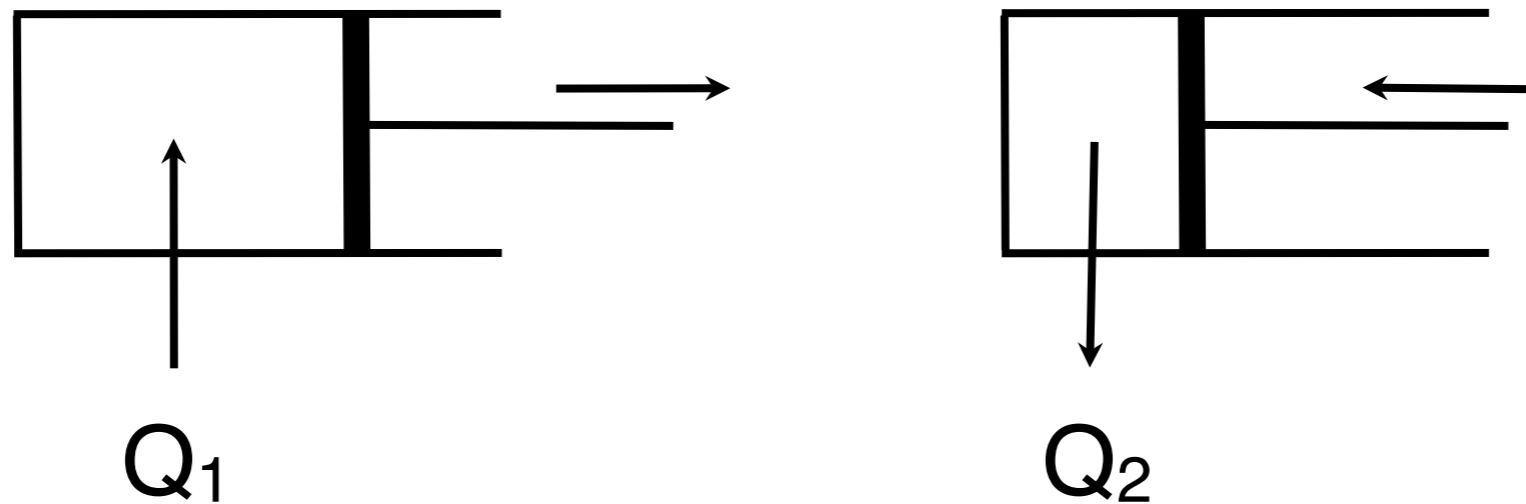
On ne peut *durablement* produire du travail mécanique que par des cycles fermés de transformations extrayant de la chaleur d'une source chaude *pour en rendre une partie* à une source froide (second principe de la thermodynamique).



Sadi Carnot
(1796 - 1832)

Seule une fraction de la chaleur (appelée rendement de Carnot) peut être convertie en énergie mécanique.

Rendement de Carnot



Pour des transformations réversibles: $Q_1/T_1 = Q_2/T_2$

Rendement maximal dit rendement de Carnot:

$$r = W/Q_1 = (Q_1 - Q_2)/Q_1 = (T_1 - T_2)/T_1$$

Rudolf Clausius

$S = Q/T$ est une fonction d'état (définie à une constante additive près) qu'il a baptisée entropie.

Les transformations réversibles conservent l'entropie.

Les transformations irréversibles produisent de l'entropie.

La production d'entropie mesure l'irréversibilité d'une transformation.



Rudolf Clausius
(1822-1888)

Entropie d'un système isolé

L'entropie d'un système isolé ne peut qu'augmenter. Elle croît jusqu'à ce que le système atteigne un équilibre thermodynamique pour lequel:

- toute différence de température disparaît.
- toute activité mécanique cesse.

La mort est un état d'équilibre thermodynamique.

L'entropie de l'univers

Pour Clausius, l'univers est nécessairement *fermé (isolé)*:

- Son énergie est constante.
- Son entropie augmente.

On sait aujourd'hui que l'univers observable est un système thermodynamique *ouvert*:

- de la matière s'en échappe (horizon cosmique, trous noirs).
- des différences de température apparaissent spontanément.
- la vie s'y développe.

C'est un système *hors-équilibre*.

Ludwig Boltzmann

Boltzmann fonde la *mécanique statistique*.

À l'équilibre, l'énergie Q se répartit également entre tous les degrés de liberté du système et vaut:

$kT/2$ par degré de liberté

où k est la constante de Boltzmann, d'où:

$$Q/T = n \cdot k/2$$

À l'équilibre, l'entropie d'un système mesure le nombre n de degrés de liberté entre lesquels l'énergie est distribuée.



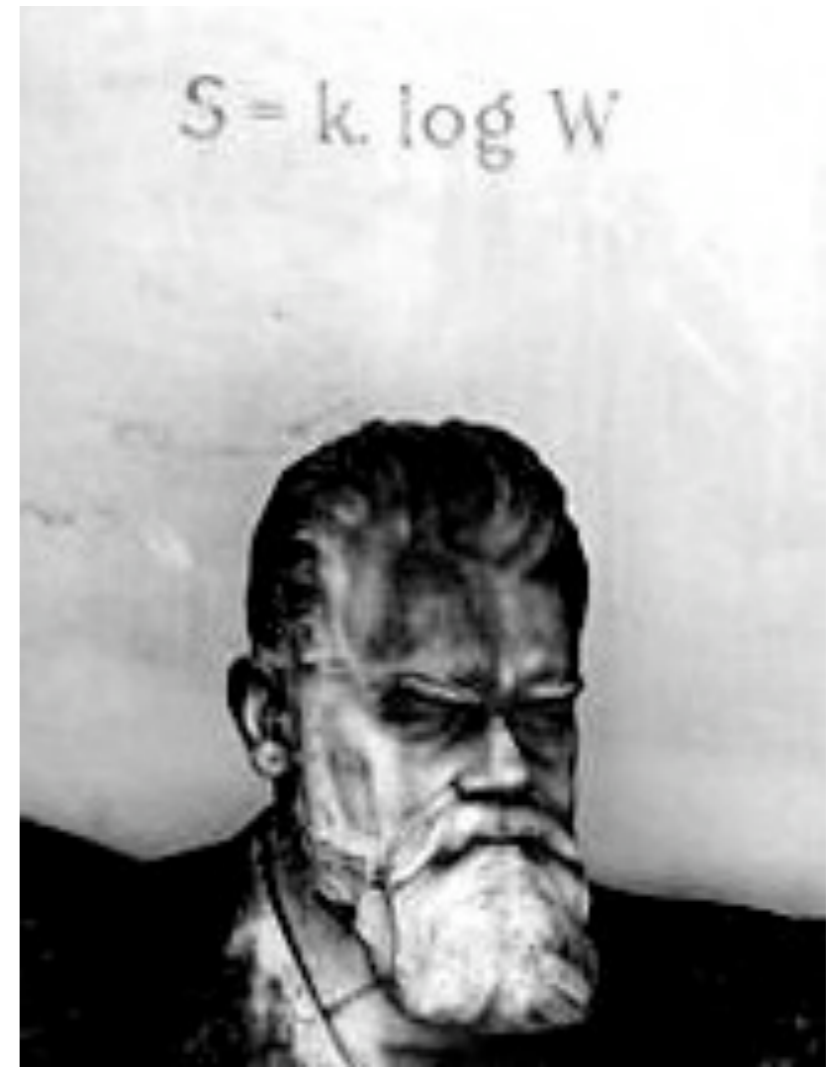
Ludwig Boltzmann
(1844-1906)

L'espace des phases

L'ensemble de tous les paramètres (degrés de liberté) forme un espace appelé *espace des phases* dont chaque point représente un état microscopique particulier.

Un même état macroscopique correspond à de nombreux états microscopiques occupant un volume Ω de l'espace des phases:

$$S = k \cdot \log \Omega$$



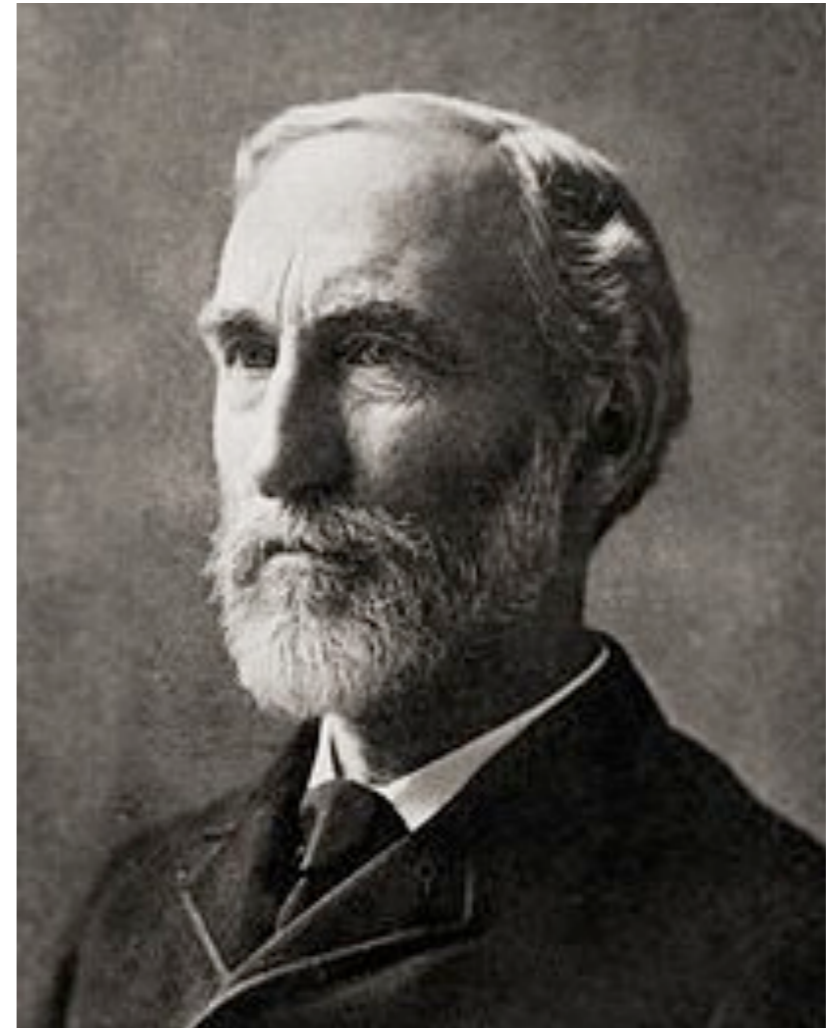
Tombe de Boltzmann
à Vienne

Willard Gibbs

Gibbs généralise l'expression de Boltzmann au systèmes *hors-équilibre*:

$$S = -k \cdot \sum p_i \cdot \log p_i$$

où p_i est la probabilité de l'état microscopique i . Pour $p_i = 1/\Omega$, on retrouve l'expression de Boltzmann.



Willard Gibbs
(1839 - 1903)

Claude Shannon

Entropie = Perte d'information

1861: Paradoxe de Gibbs.

1861: Démon de Maxwell.

1929: Leo Szilard

1944: Erwin Schrödinger

1948: **Claude Shannon**

1956: Léon Brillouin

1961: Ralph Landauer

1972: Charles Bennett

1982: Ed Fredkin

2015: Lutz et al. (preuve expérimentale).



Claude Shannon
(1916 - 2001)

Qu'est-ce que l'information?

(au sens de Shannon)

- C'est une grandeur physique mesurable (en bits).
- Elle s'applique à tout ce qui est mémorisable (dans un cerveau ou tout autre mécanisme physique).
- La mémorisation permet à la cause de précéder l'effet (d'où l'irréversibilité et le sens du temps).
- Les cycles de mémorisation sont des cycles d'*hystérésis*.
- L'énergie dissipée est donnée par l'aire d'un cycle d'*hystérésis* (analogue d'un cycle de Carnot).
- L'information peut être répliquée, opération qui accroît la dissipation de l'énergie.

La thermodynamique hors-équilibre

Ilya Prigogine

En présence d'un flux permanent d'énergie, des structures dites "dissipatives" *s'auto-organisent* pour dissiper l'énergie.



Ilya Prigogine
(1917-2003)

Ilya Prigogine

Exemples de structures dissipatives:

- Un cyclone.
- L'atmosphère terrestre.
- Un organisme vivant.
- Une espèce animale ou végétale.

*La vie s'est organisée sur Terre
pour dissiper l'énergie.*



Ilya Prigogine
(1917-2003)

Propriétés des structures dissipatives

Les expressions suivantes sont équivalentes:

Une structure dissipative:

- s'auto-organise de façon à augmenter sa dissipation d'énergie.
- diminue son entropie interne de façon à augmenter l'entropie qu'elle produit et évacue.
- importe de l'information qu'elle mémorise.

Les structures dissipatives décrivent des cycles de Carnot

Une structure dissipative:

- s'alimente à une source d'énergie d'entropie faible (source chaude).
- produit du travail mécanique qu'elle dissipe.
- évacue de la chaleur vers une source d'entropie élevée (source froide): c'est la chaleur "*latente*" d'auto-organisation.

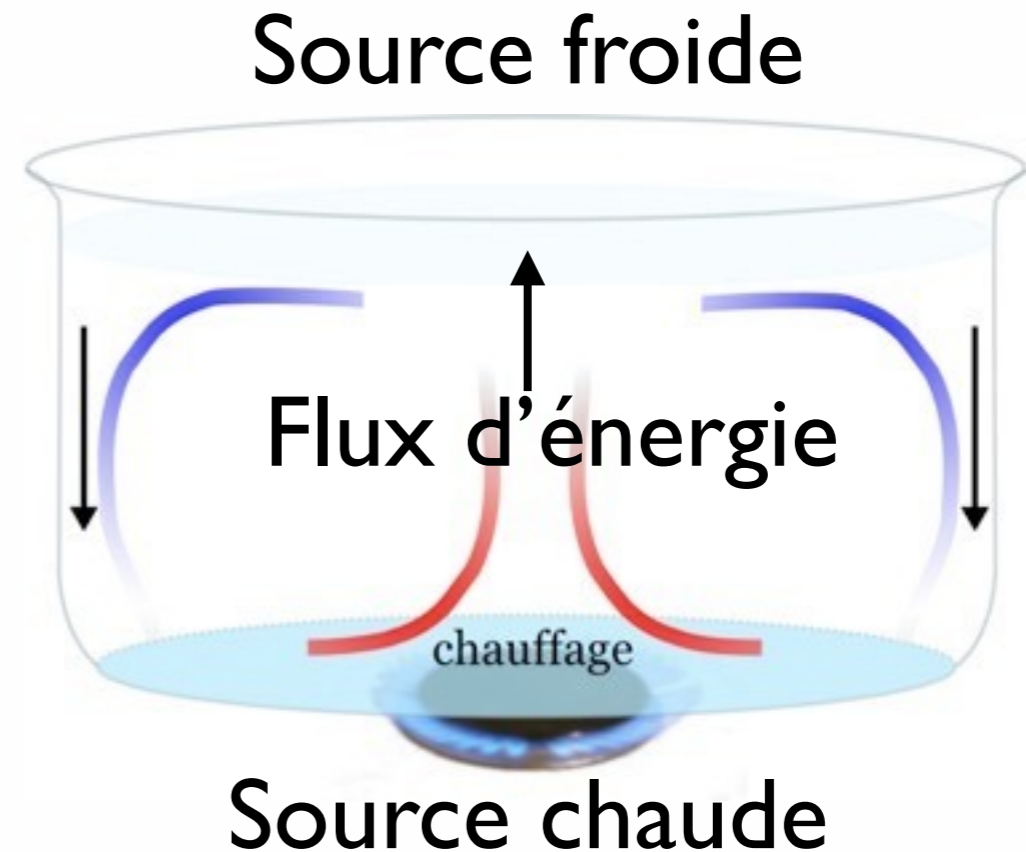
Les structures dissipatives décrivent des cycles de Carnot

Elles:

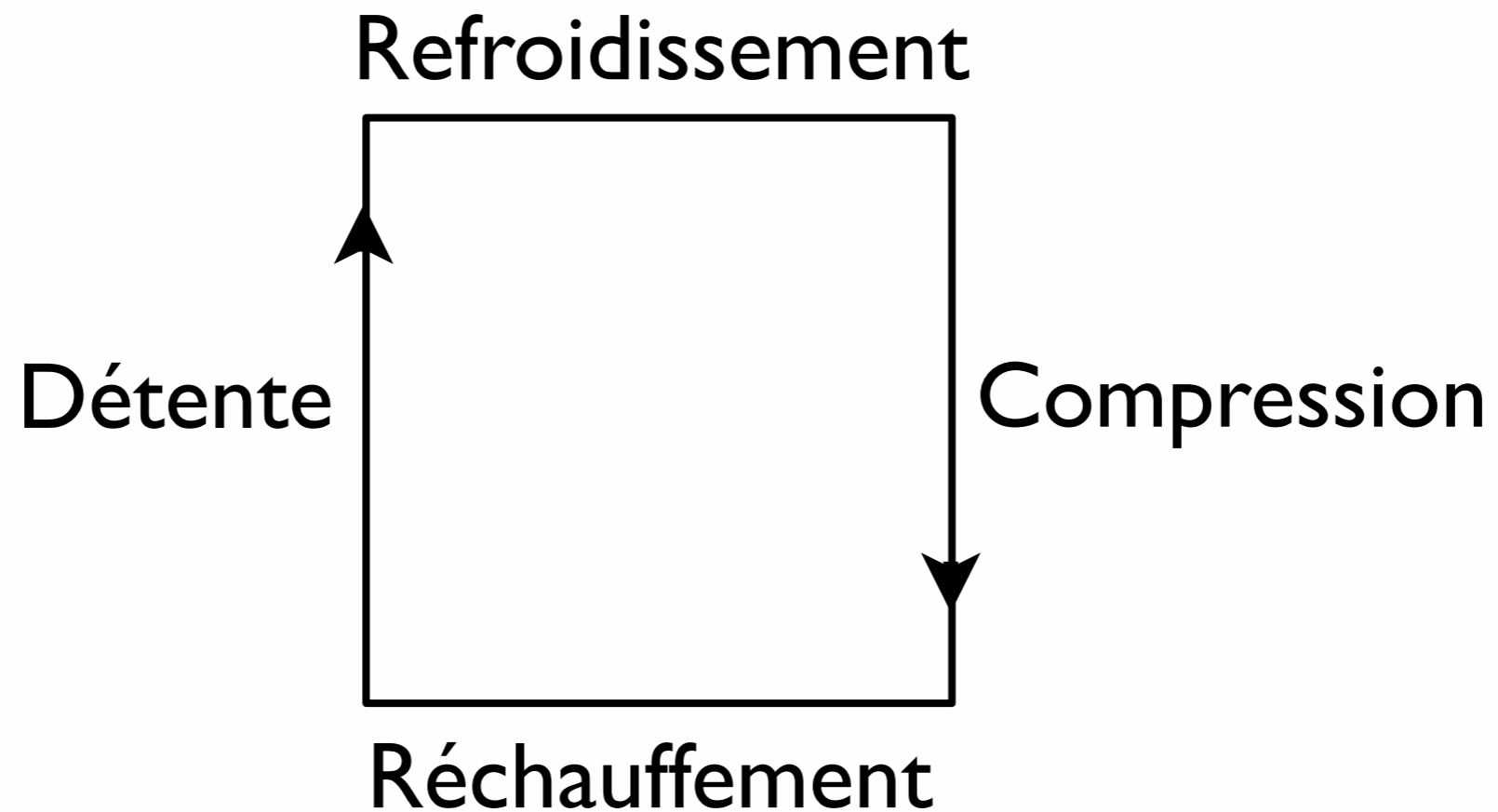
- s'auto-organisent pour produire du travail mécanique qu'elles dissipent.
- évacuent de l'entropie vers leur environnement, ce qui le modifie.
- s'effondrent quand elles ne sont plus adaptées au nouvel environnement.
- se réorganisent pour s'adapter au nouvel environnement.

Exemple de cycle de Carnot

Les structures dissipatives décrivent des cycles de Carnot: elles produisent du travail mécanique qu'elles dissipent.



Analogie avec la machine à vapeur



L'auto-organisation

Les structures dissipatives s'auto-organisent
à la manière des réseaux neuronaux

Exemples de réseaux neuronaux

Flux d'énergie

Chaleur

Chaleur

Chimique

Chimique

Chimique

Chimique

Chimique

Chimique

Multiple

Multiple

Agents

Molécules

Molécules

Molécules

Molécules

Bactéries

Insectes

Êtres vivants

Organes

Êtres humains

Êtres humains

Information

M^{ts} cinétiques

M^{ts} électriques

Électrons

Enzymes

Plasmides

Phéromones

Trophique

Hormones

Monnaie

Langage

Structure

Convective

État condensé

Chimique

Biochimique

Colonie

Essaim

Écosystème

Être vivant

Économie

Sociologie

Modèle de cerveau

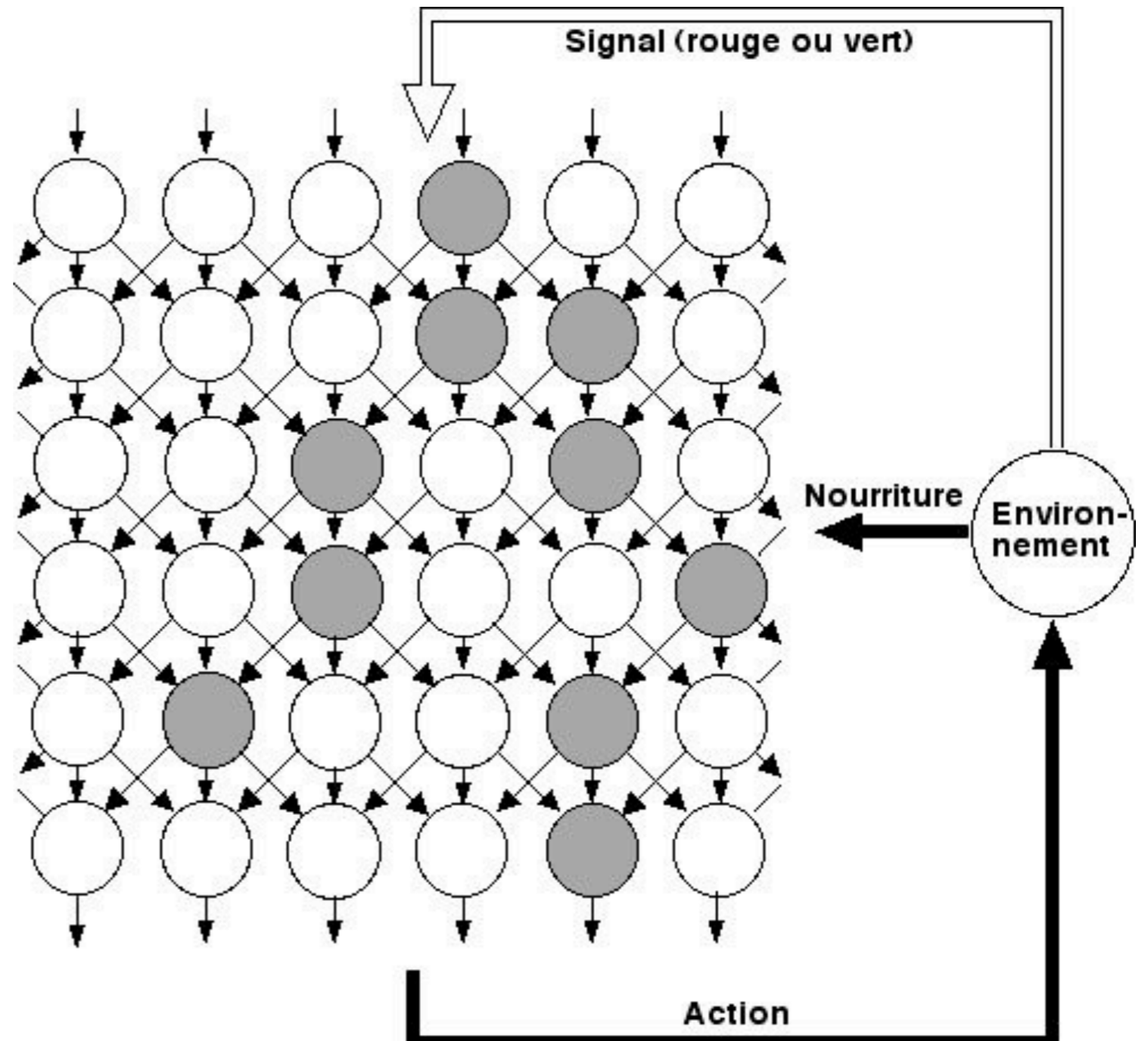
*Dimitris Stassinopoulos
and Per Bak (1995):*

Democratic
reinforcement:

A principle for brain
function.

S'applique à un réseau
neuronal *quelconque*
(irrégulier).

*En gris: neurones
excités.*

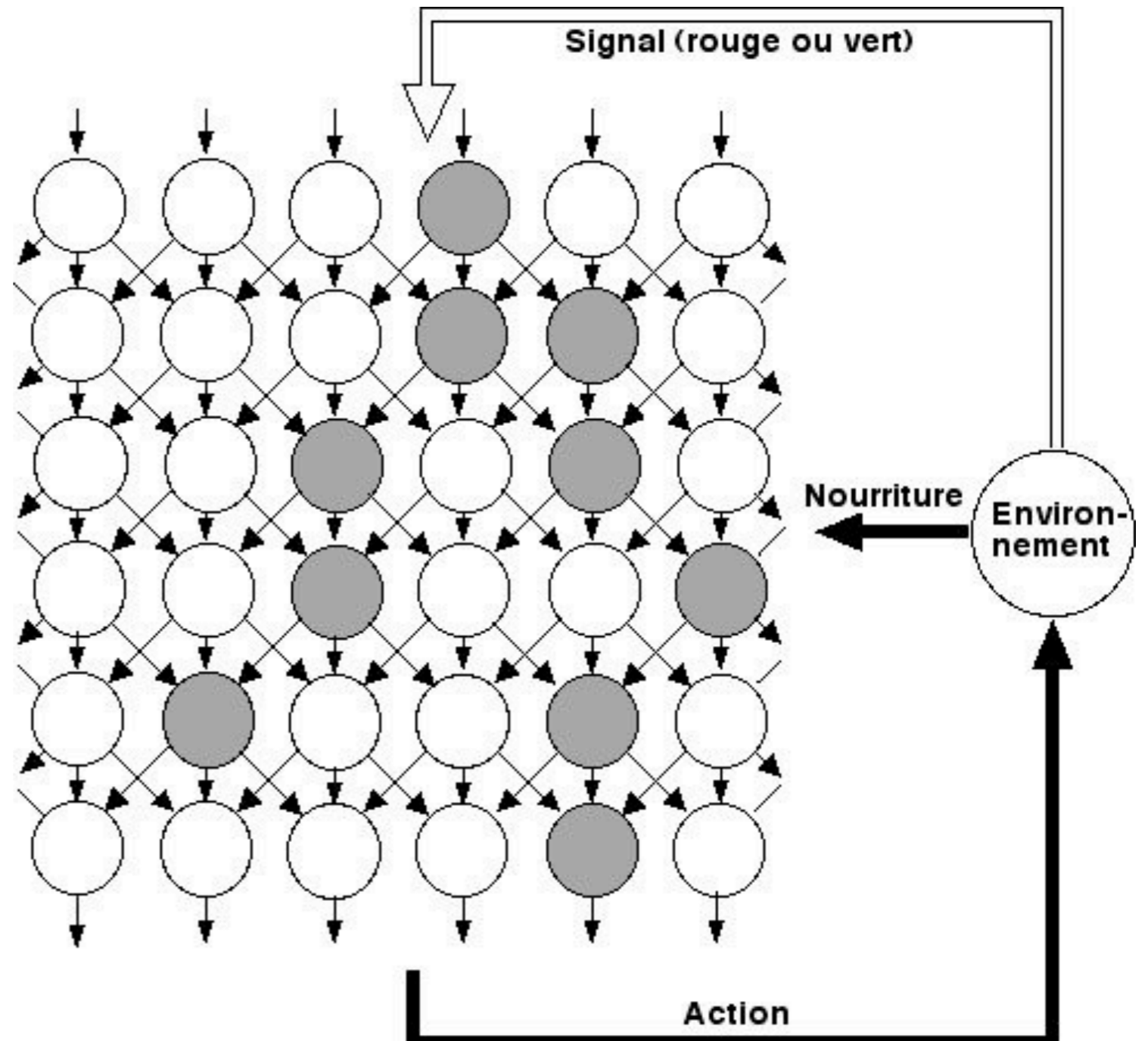


Modèle de cerveau

Au delà d'un certain *seuil* dit "*critique*", un neurone excité peut en exciter un autre.

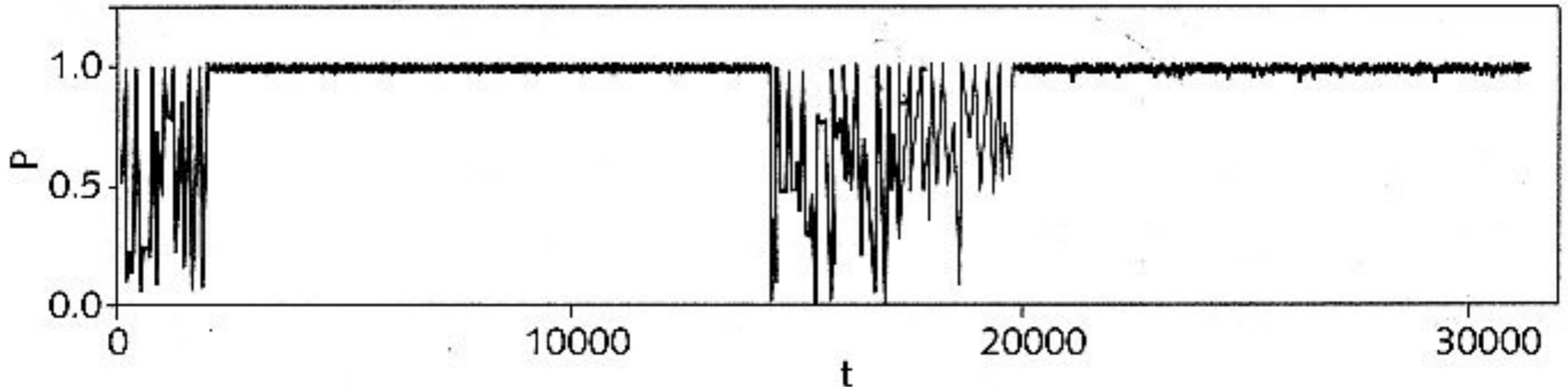
La "*satisfaction*" augmente la "*force*" des connexions de tous les neurones excités.

Le cerveau se maintient au seuil de *percolation*.



Modèle de cerveau

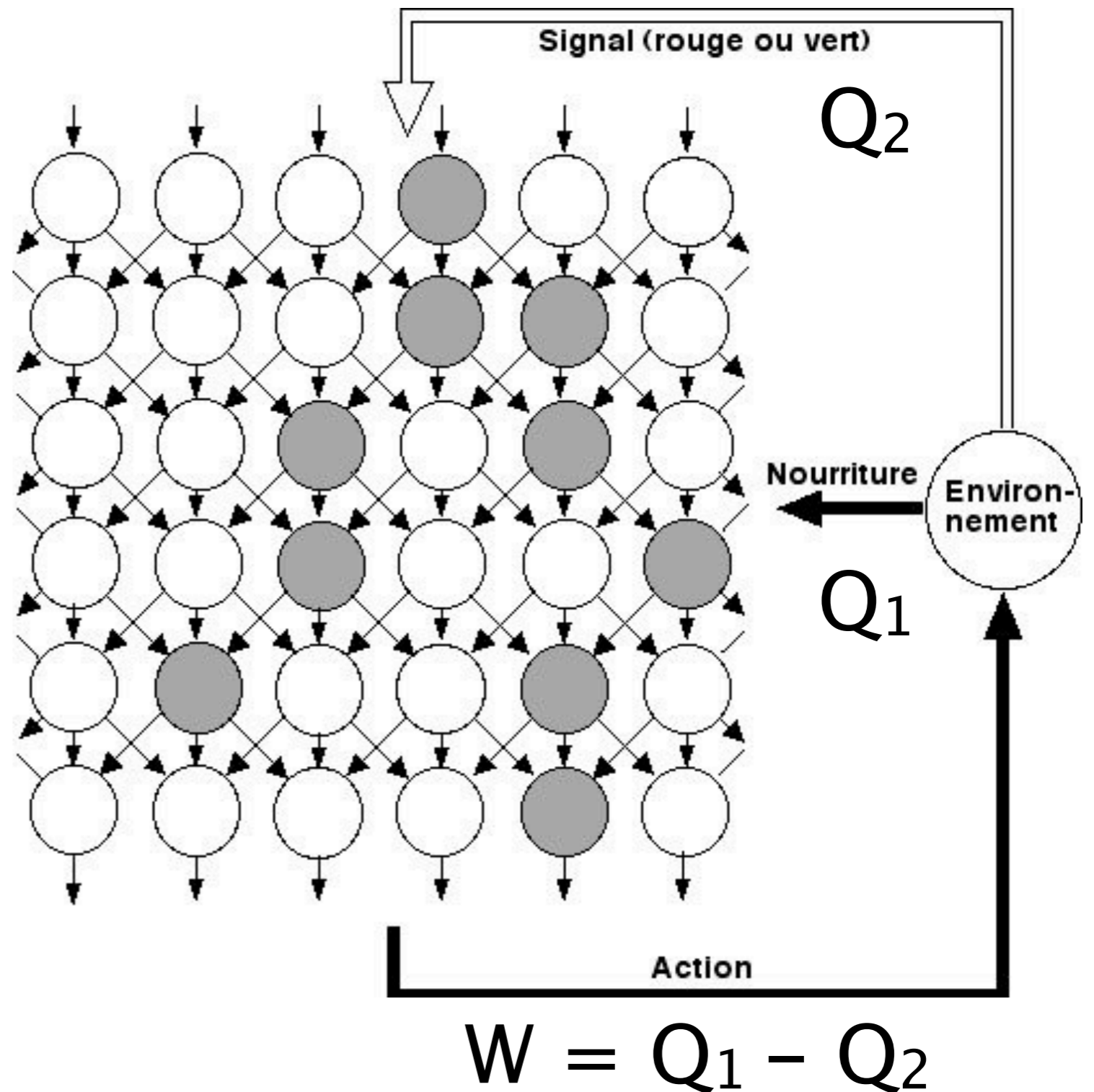
Performance du modèle
(réseau de 16x16 neurones)



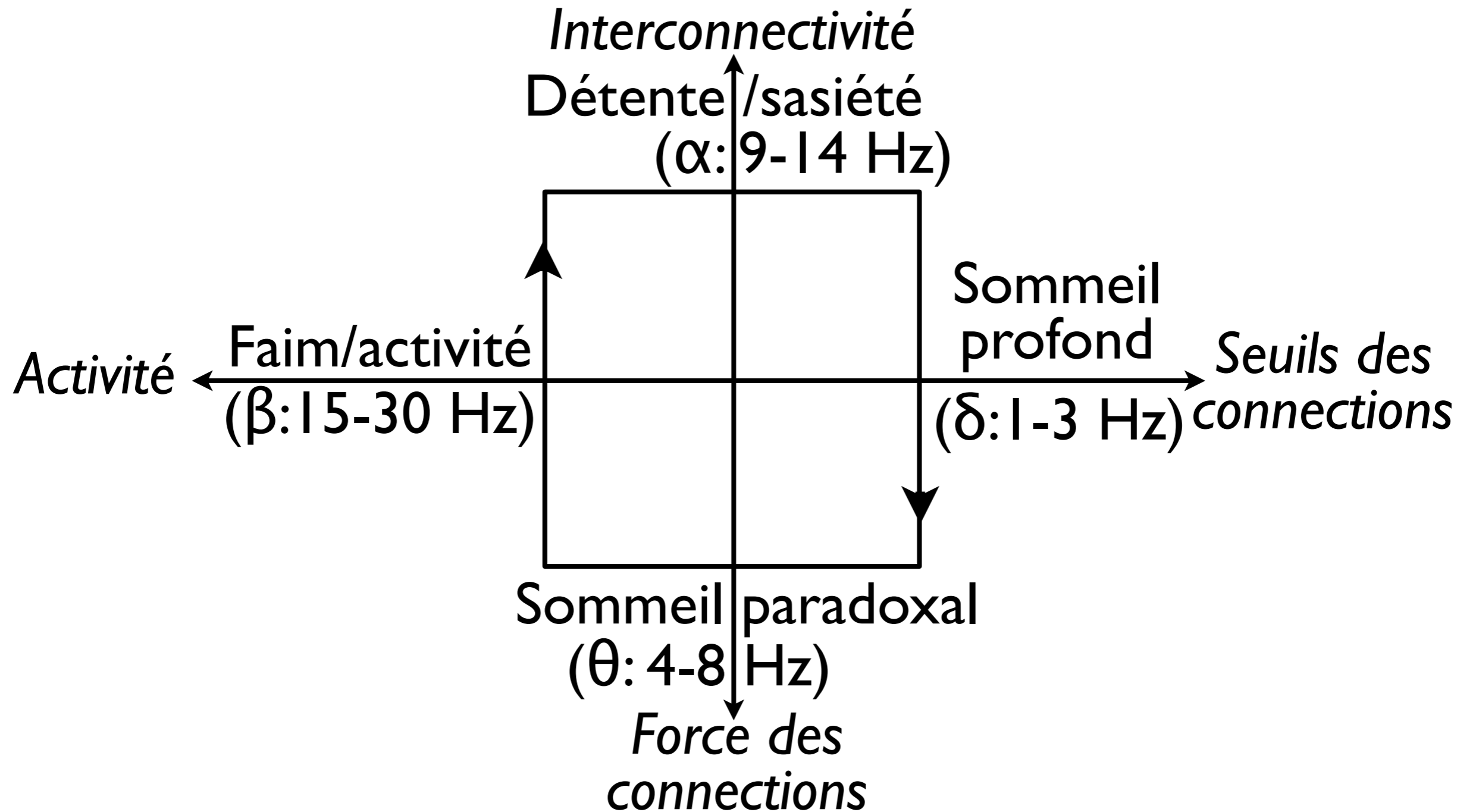
Pourcentages de bonnes réponses:
à l'instant $t=15000$, un bloc de 6x5 neurones a été supprimé.

Le cerveau est une machine de Carnot

Il reçoit Q_1 d'une source chaude (calories de la nourriture) et rend Q_2 à une source froide (chaleur latente d'auto-organisation). L'entropie évacuée Q_2/T_2 correspond à un apport (mémorisation) d'information. Le travail fourni est $W = Q_1 - Q_2$.



Cycle diurne du cerveau



Conjecture

*Ce modèle de cerveau s'applique
à tous les réseaux neuronaux.*

Renormalisation:

- “Température” = $1/\text{seuil}$ des connections
(*offre économique*).
- “Pression” = *force* des connections
(*demande économique*).

Fréquence des cycles

Les structures dissipatives n'ont *pas de fréquence propre*.

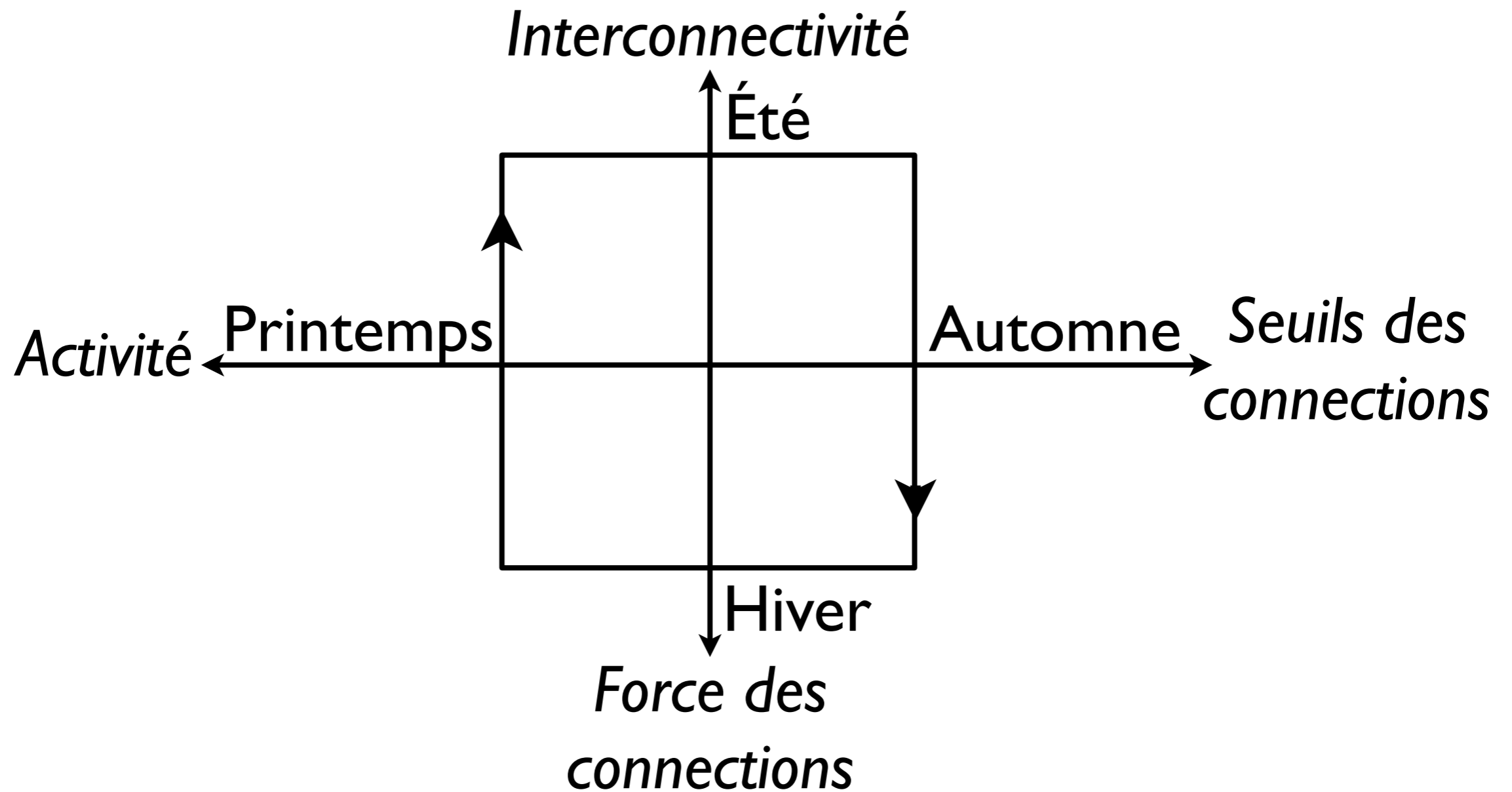
La *période* des oscillations est liée au flux d'énergie (oscillations de relaxation). Elle est proportionnelle à leur amplitude (loi en $1/f$).

Les oscillations se synchronisent facilement sur une période extérieure:

- Cycle diurne du sommeil
- Cycle saisonnier des écosystèmes

Cycle saisonnier des écosystèmes

(Échanges trophiques)



Le modèle de Robert Ulanowicz

Un écosystème s'auto-organise,
c'est-à-dire diminue son entropie
interne S , en augmentant son
interconnectivité.

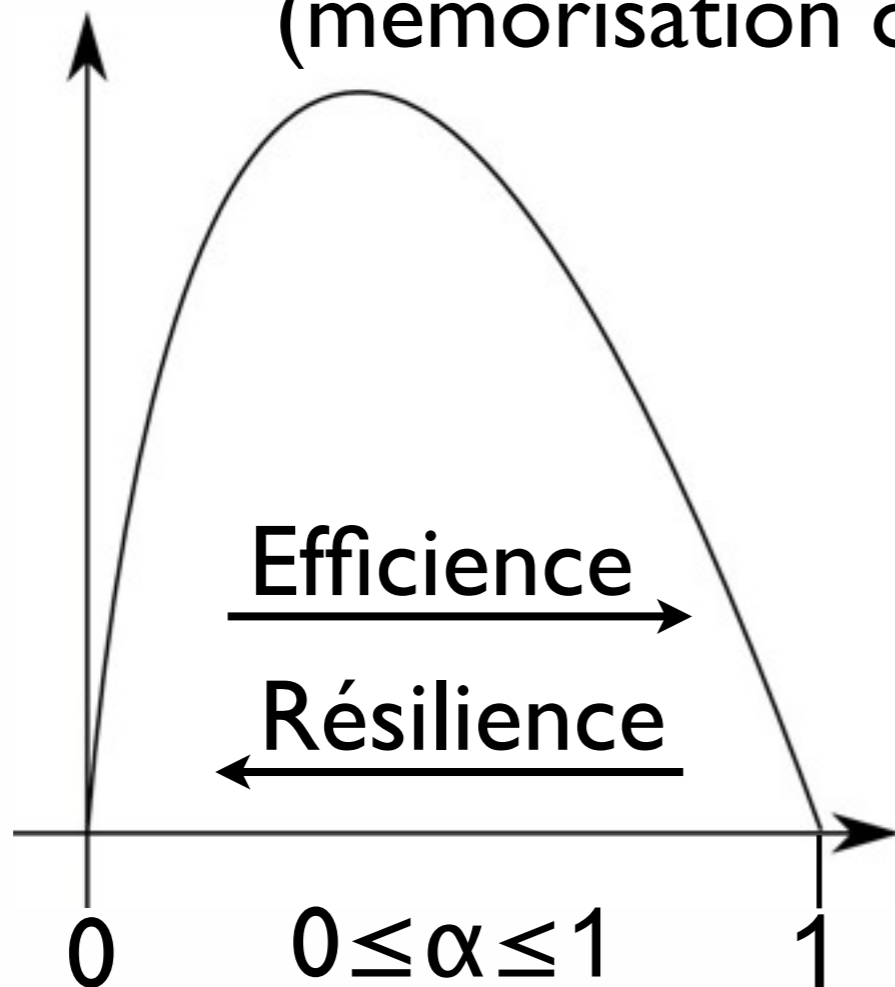
Int. J. of Design & Nature and
Ecodynamics. Vol. 4, No. 2 (2009)
83-96



Robert Ulanowicz

Le modèle de Robert Ulanowicz

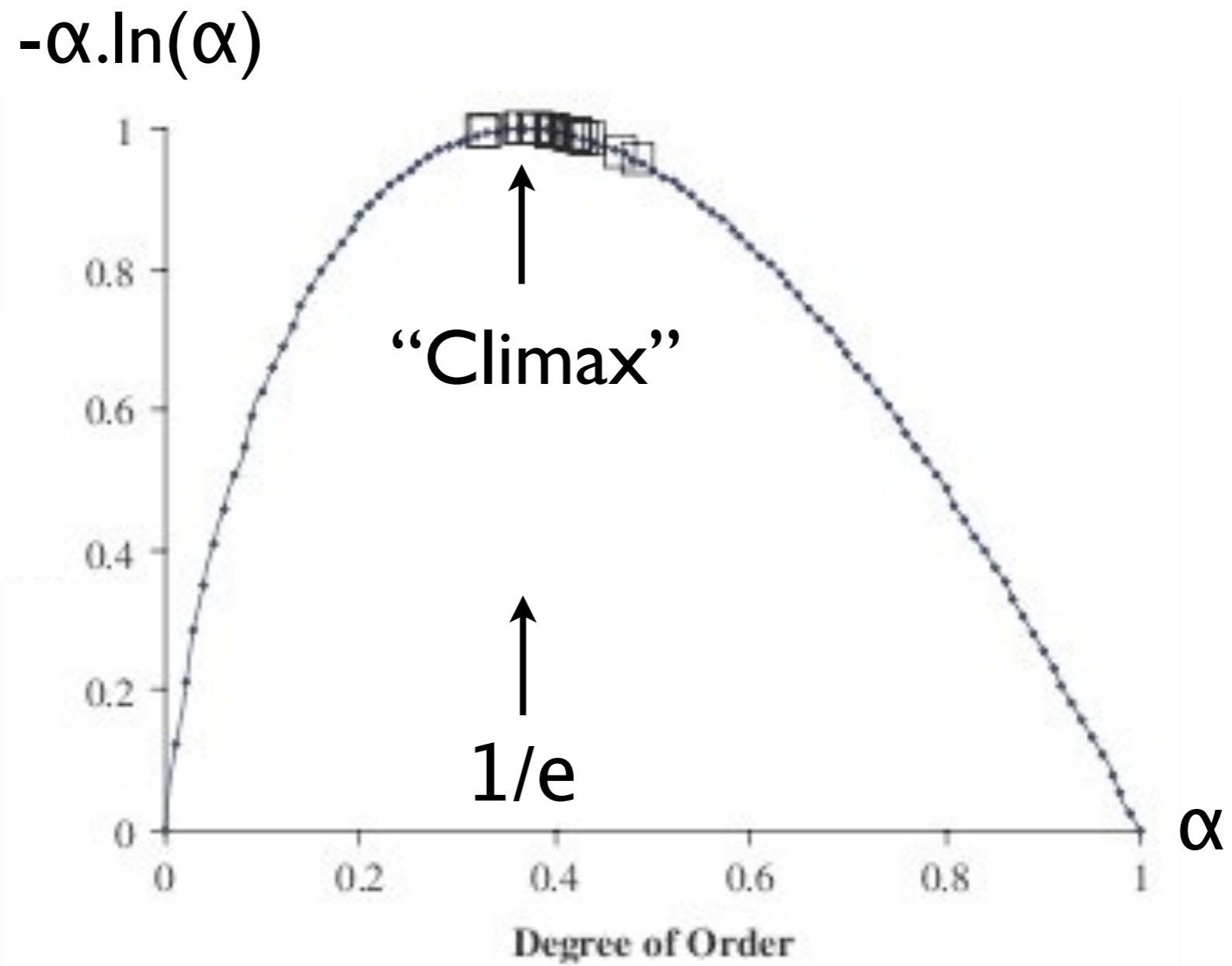
$-\alpha \cdot \ln(\alpha)$ = taux de production d'entropie
(mémorisation ou croissance)



α = paramètre d'ordre.
= diminution interne
d'entropie
= information
mémorisée.

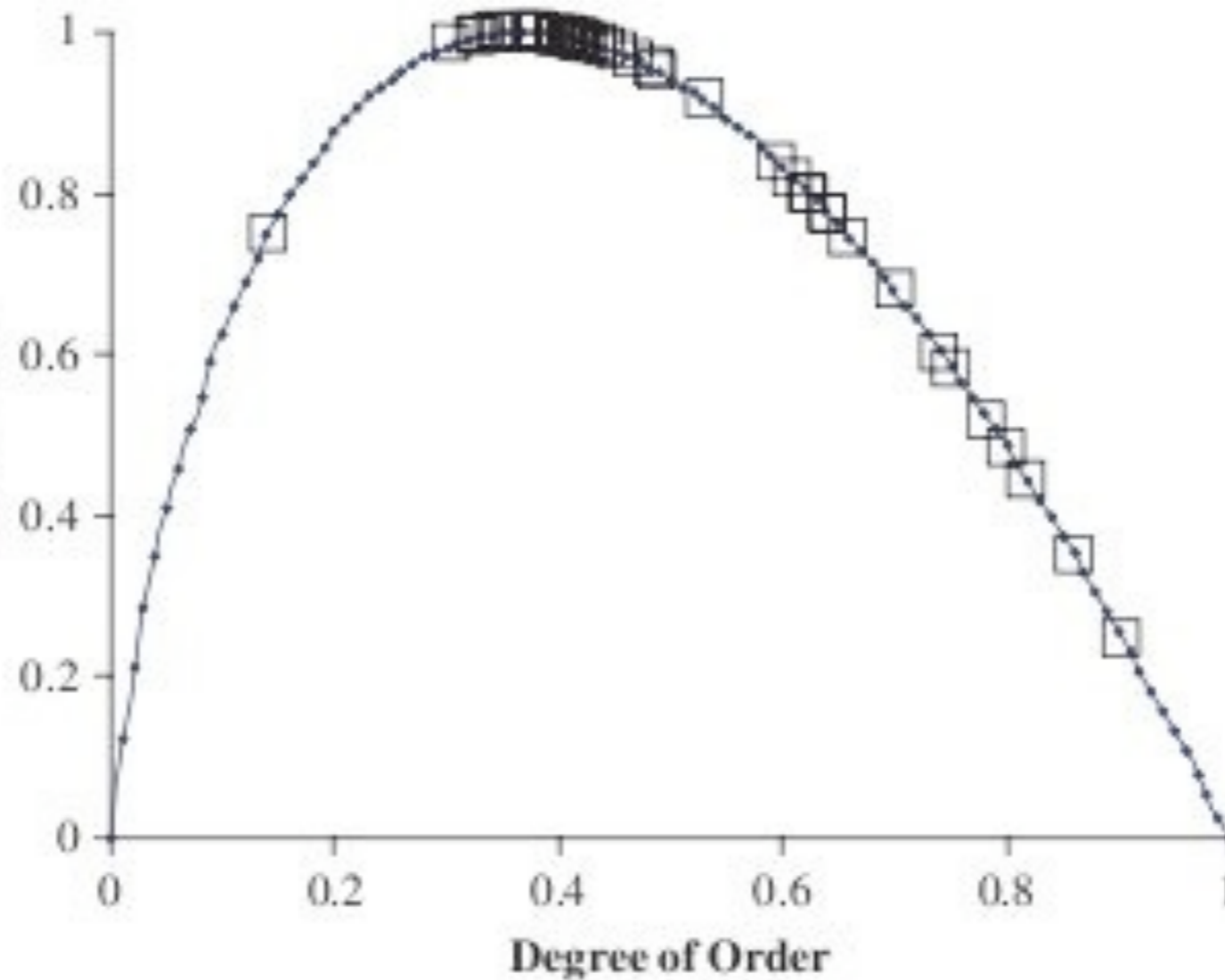
α = interconnectivité

Le modèle de Robert Ulanowicz



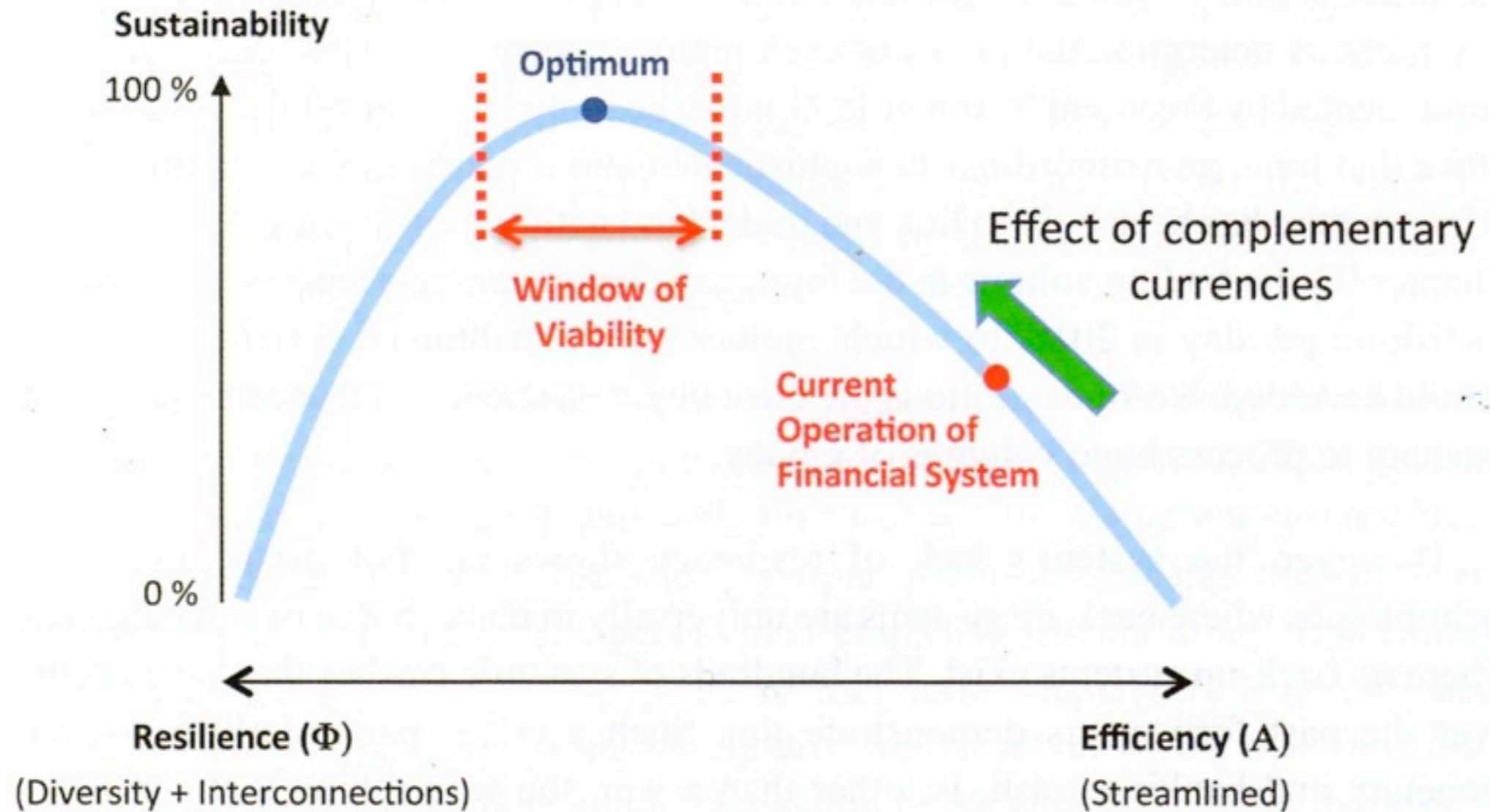
Le modèle de Robert Ulanowicz

$$-\alpha \cdot \ln(\alpha)$$



Lorsqu'un écosystème devient trop interconnecté, il s'effondre.

Application à l'économie



Bernard Lietaer et al., Money and Sustainability. The missing link (2012)

Dynamique des populations

1838: Verhulst modélise l'évolution démographique, à l'aide de l'équation empirique:

$$\frac{dN}{dt} = rN \left(1 - \frac{N}{K} \right)$$

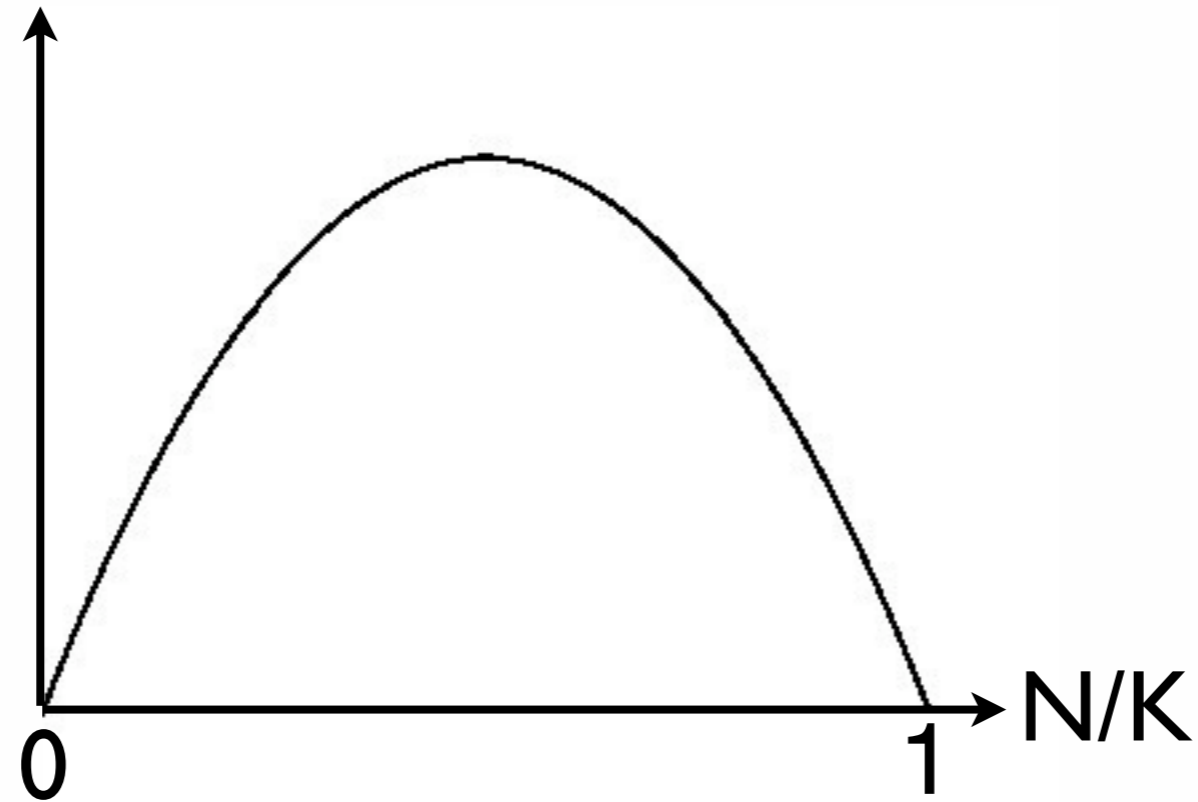
dont la solution est une sigmoïde.



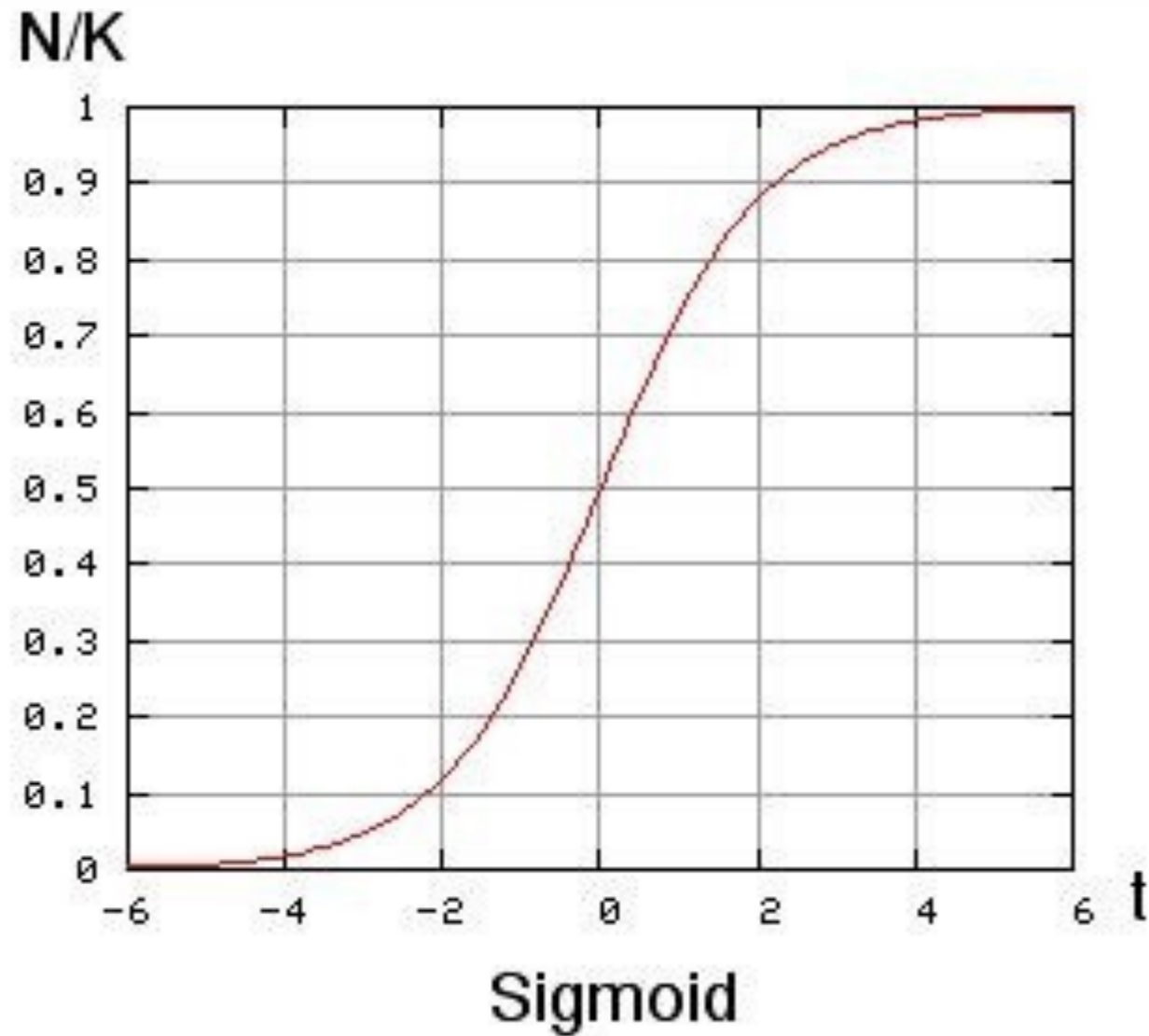
Pierre François Verhulst
(1804-1849)

Dynamique des populations

dN/dt = croissance démographique



Dynamique des populations

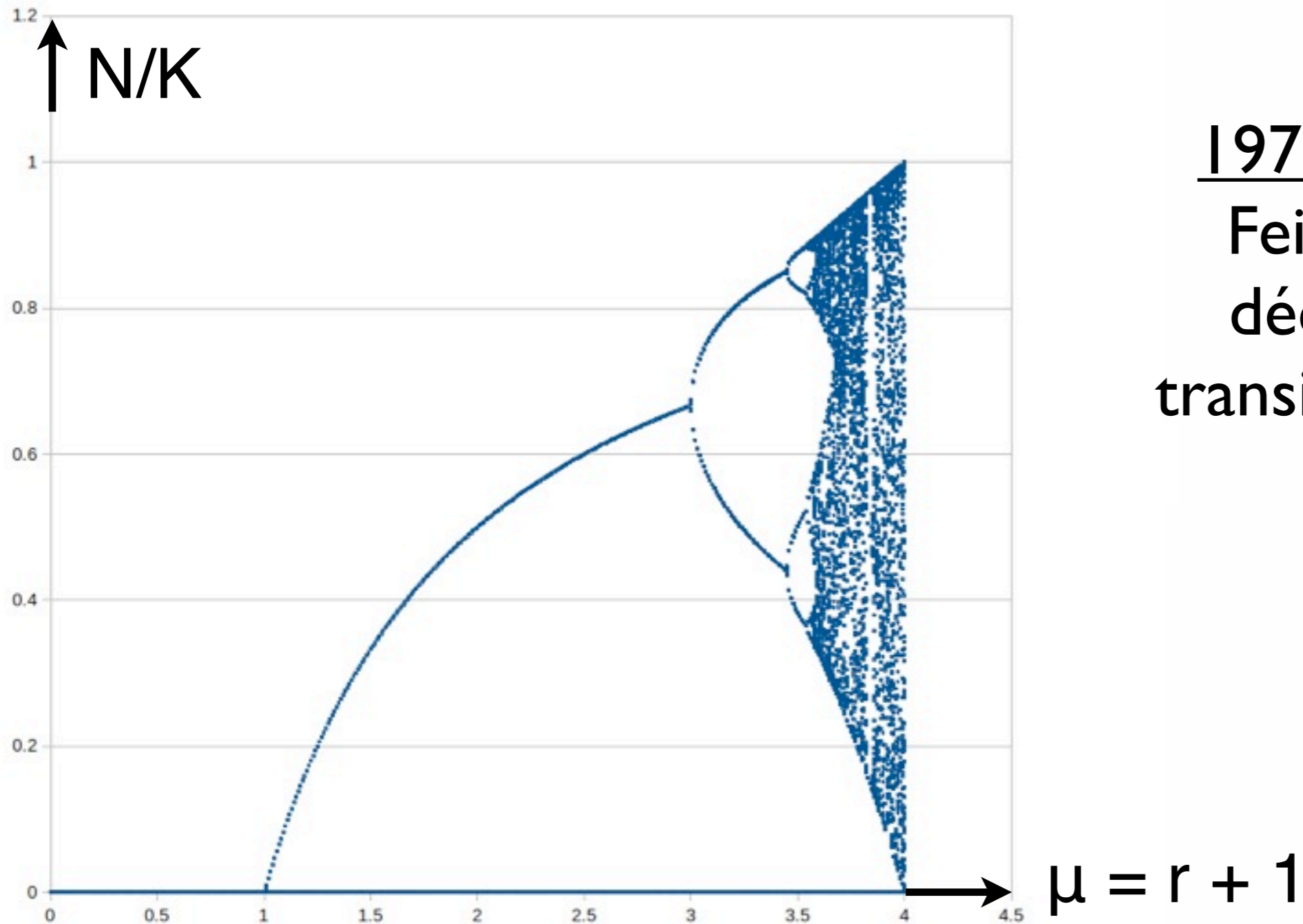


Transition démographique



Pierre François Verhulst
(1804-1849)

Solution discrétisée



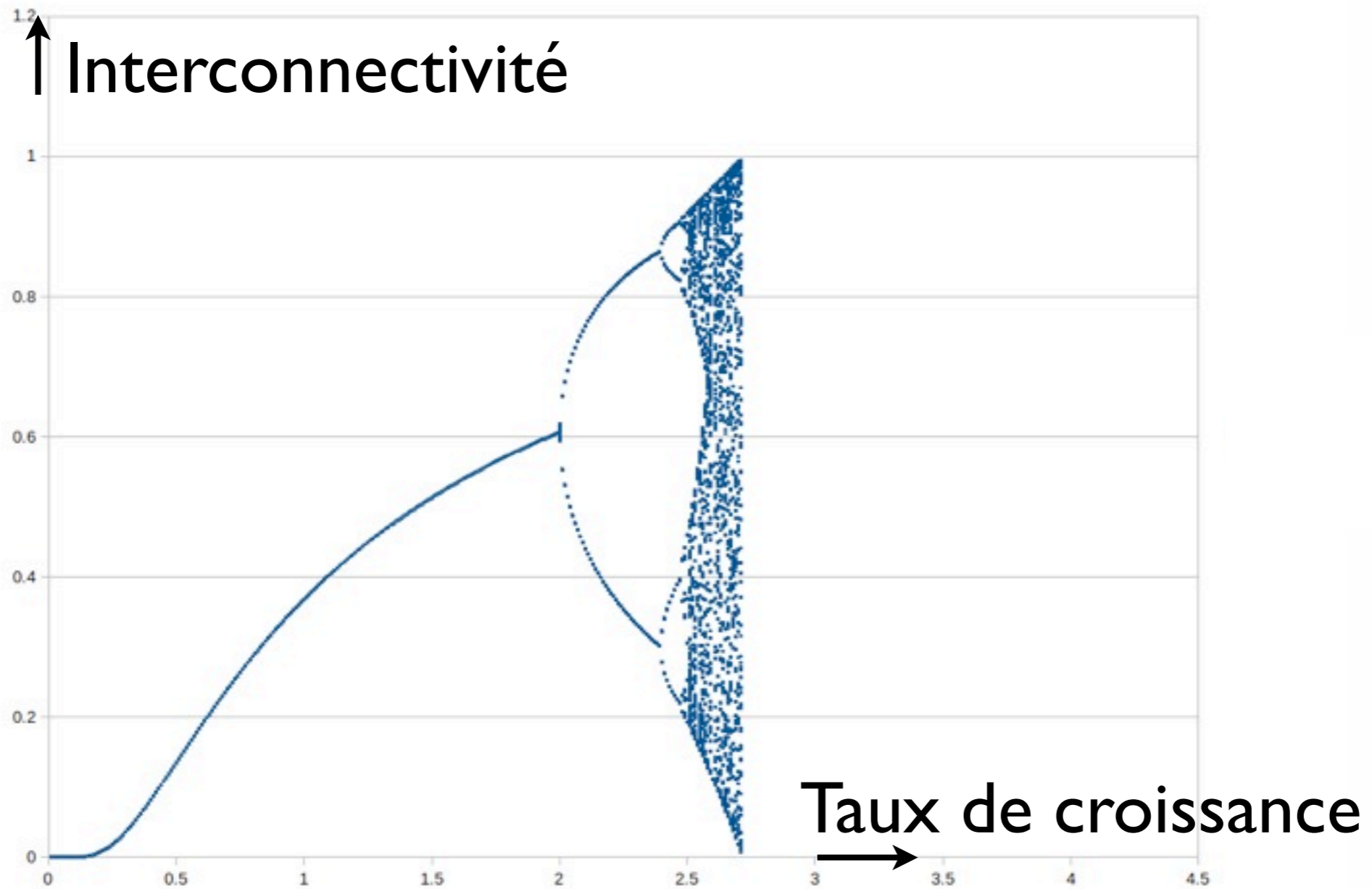
1975: Mitchell
Feigenbaum
découvre la
transition vers le
chaos.

Application à la convection

En 1982, Albert Libchaber découvre que la convection suit le modèle de Verhulst de croissance des populations! En 1986 Feigenbaum et Libchaber reçoivent le prix Wolf de Physique pour cette découverte.

Clairement, ce résultat s'applique à l'ensemble des systèmes dits "autocalytiques".

Modèle d'Ulanowicz



Cas d'un système qui s'adapte à son environnement.

La criticalité auto-organisée

Per Bak

*Per Bak, Chao Tang, Kurt
Wiesenfeld (1987):*

Les structures dissipatives
s'auto-organisent suivant un
processus qu'ils baptisent:
“*criticalité auto-organisée*”.



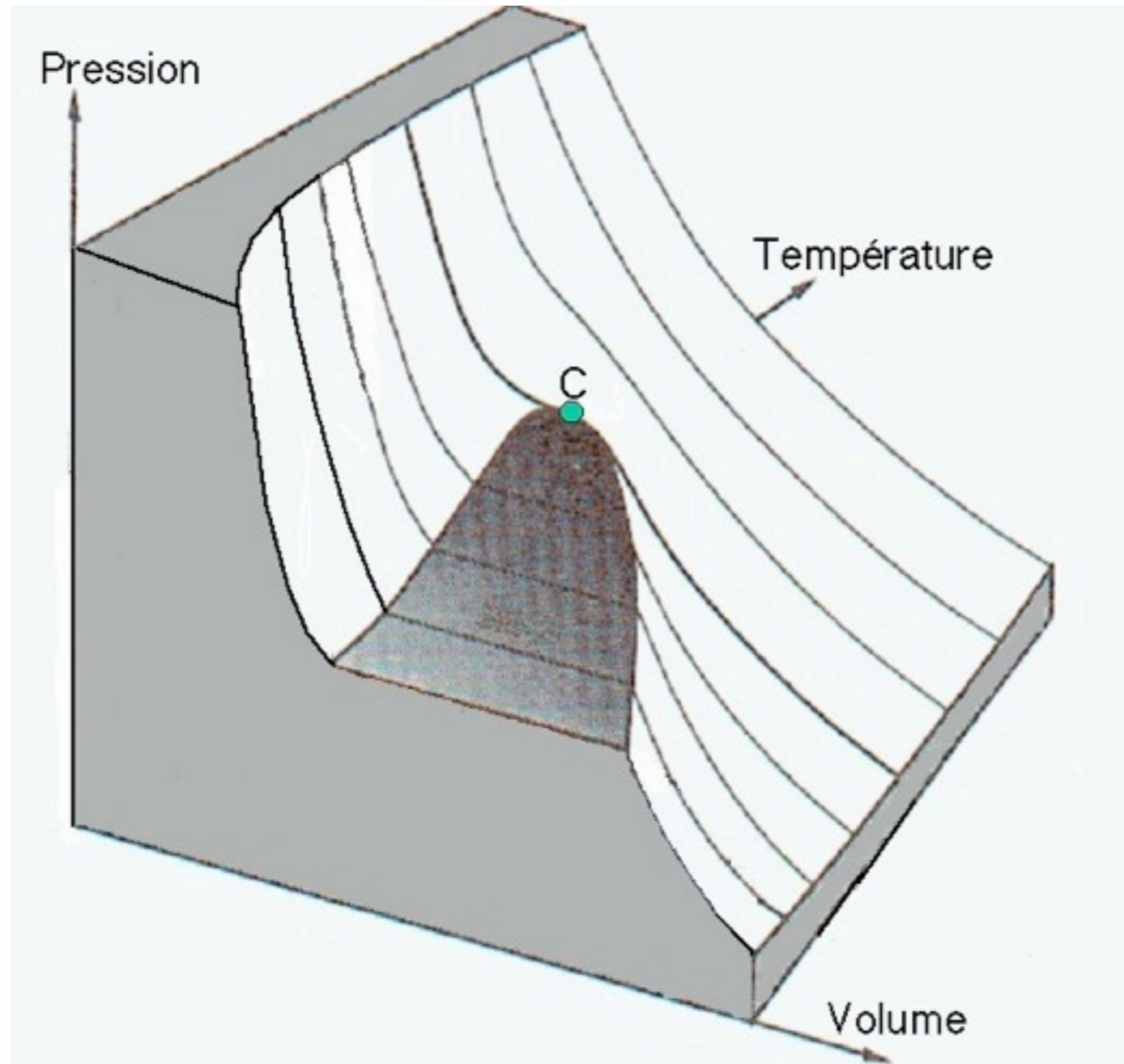
Per Bak
(1948 - 2002)

Forces d'interaction

À l'exception des structures convectives qui font intervenir une force *extérieure* (la gravité), les forces agissant sur les "agents" sont fondamentalement des forces d'interaction:

- forces de répulsion à grandes distances
- forces d'attraction à courtes distances

Modèle des états condensés



Cycle de Carnot

Expansion

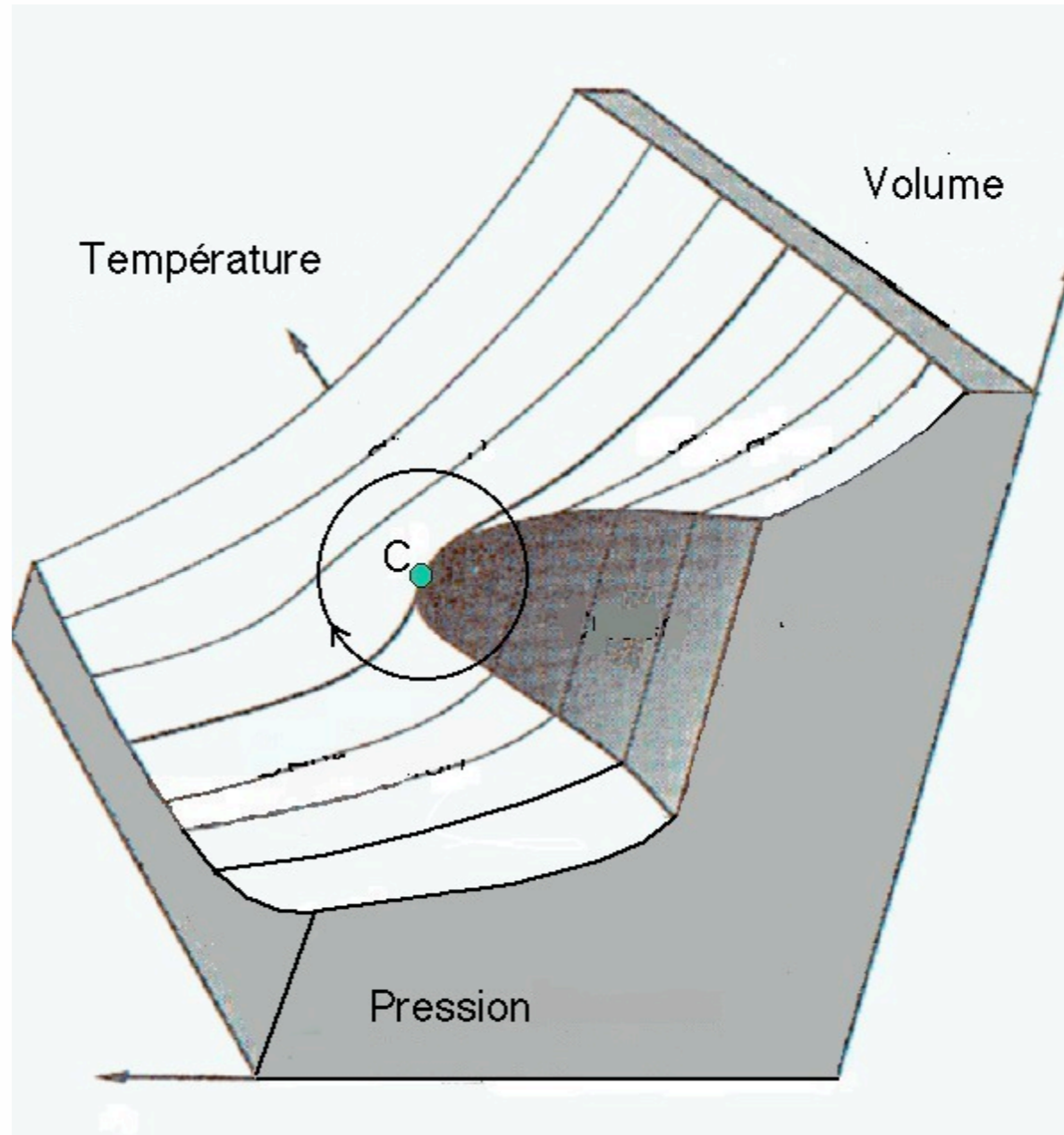
Refroidissement

Transition
continue

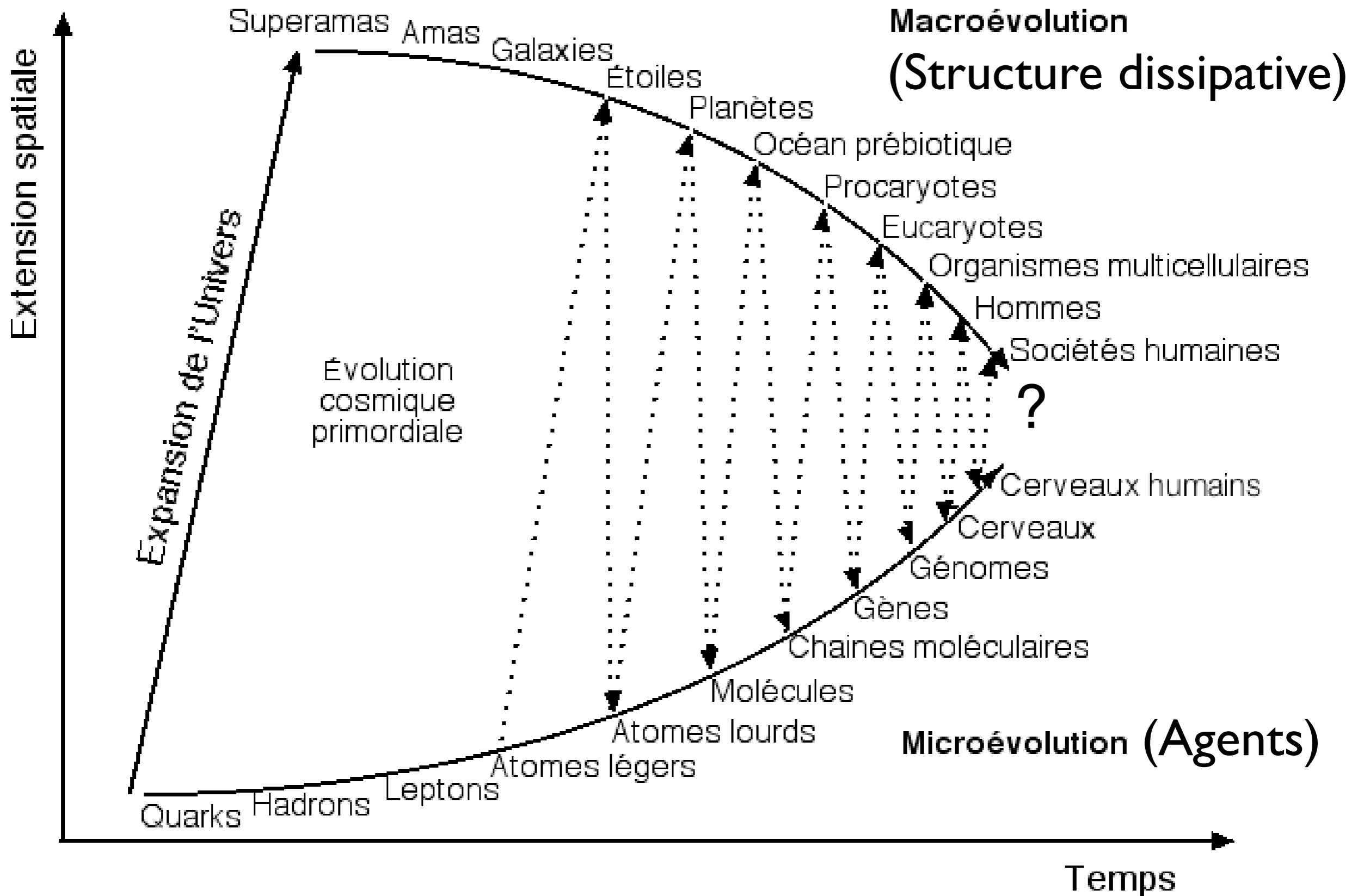
Transition
abrupte

Réchauffement

Effondrement



Preuve observationnelle (Erich Jantsch, 1980)



Les trois caractéristiques fondamentales de la vie

<i>Flux d'énergie</i>	<i>Agent</i>	<i>Structure</i>	<i>Étape</i>
Chaleur	Molécules	Convective	Avalanches
Chaleur	Molécules	État condensé	
Chimique	Molécules	Chimique	Métabolisme
Chimique	Molécules	Biochimique	
Chimique	Bactéries	Colonie	Reproduction
Chimique	Insectes	Essaim	
Chimique	Êtres vivants	Écosystème	
Chimique	Organes	Être vivant	
Multiple	Êtres humains	Économie	
Multiple	Êtres humains	Sociologie	

Étapes vers la vie

Étapes fondamentales:

- 1) *Avalanches* (hors équilibre thermodynamique local).
Caractéristique de tous les systèmes auto-organisés.
Transition vers le chaos. Nombres de Feigenbaum.
Caractéristique des systèmes chimiques dits *autocatalytiques*.
- 2) *Métabolisme*. Sous-entend un flux d'énergie chimique.
S'applique à la réaction de Belousov et Zhabotinsky.
- 3) *Reproduction* de l'information. S'applique aux bactéries.

Une origine vraisemblable de la vie

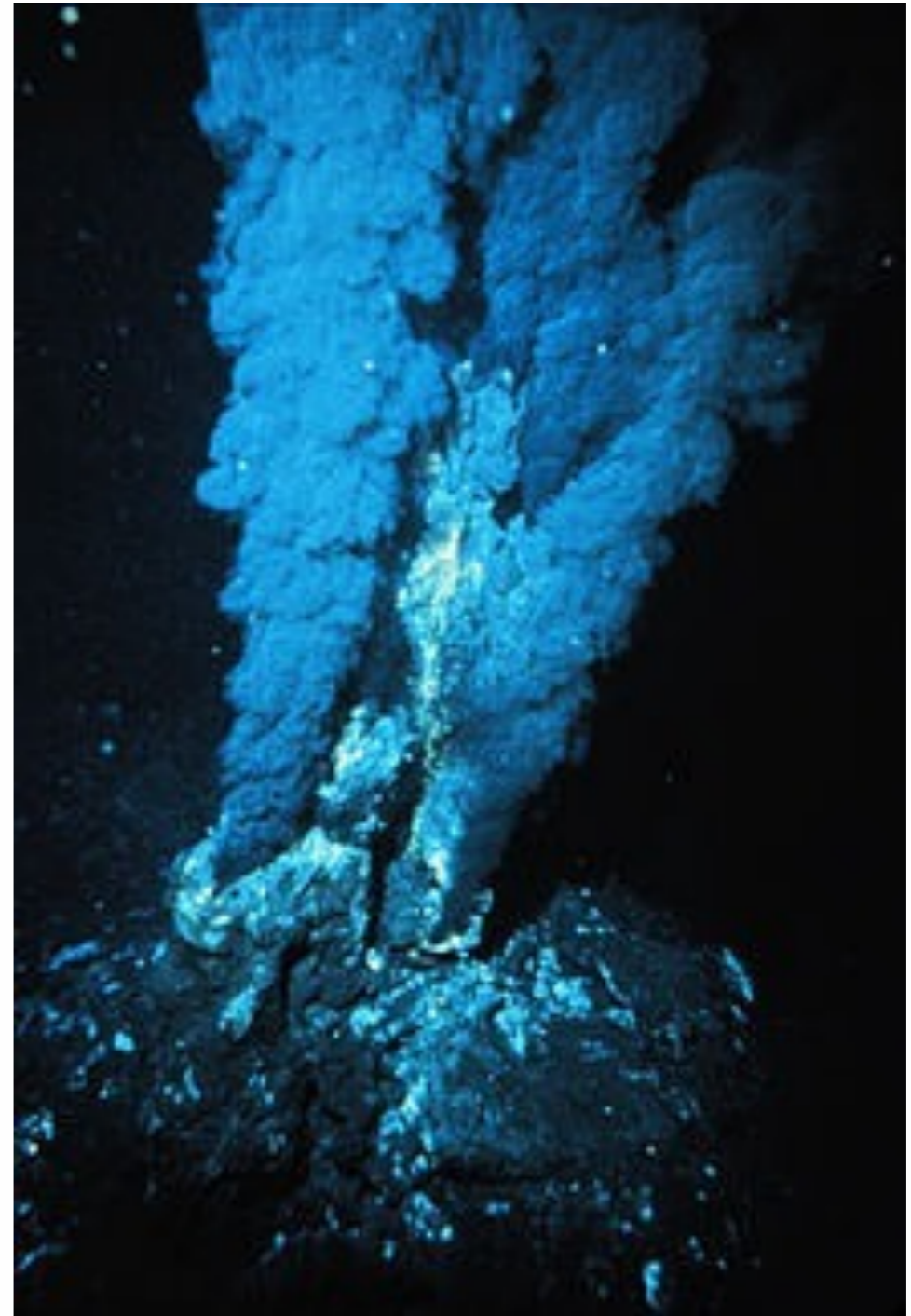
L'assemblage de molécules complexes est catalysé par la présence de micro-gouttelettes d'eau:

*Ali Fallah-Araghi et al., Enhanced Chemical Synthesis at Soft Interfaces: A Universal Reaction-Adsorption Mechanism in Microcompartments, Phys. Rev. Lett. **112**, 028301, Published 13 January 2014.*

Les microgouttelettes se forment en abondance au voisinage du point critique de l'eau (374°C, 217 bars): c'est le phénomène d'*opalescence critique*.
Mais ce processus semble oublié...

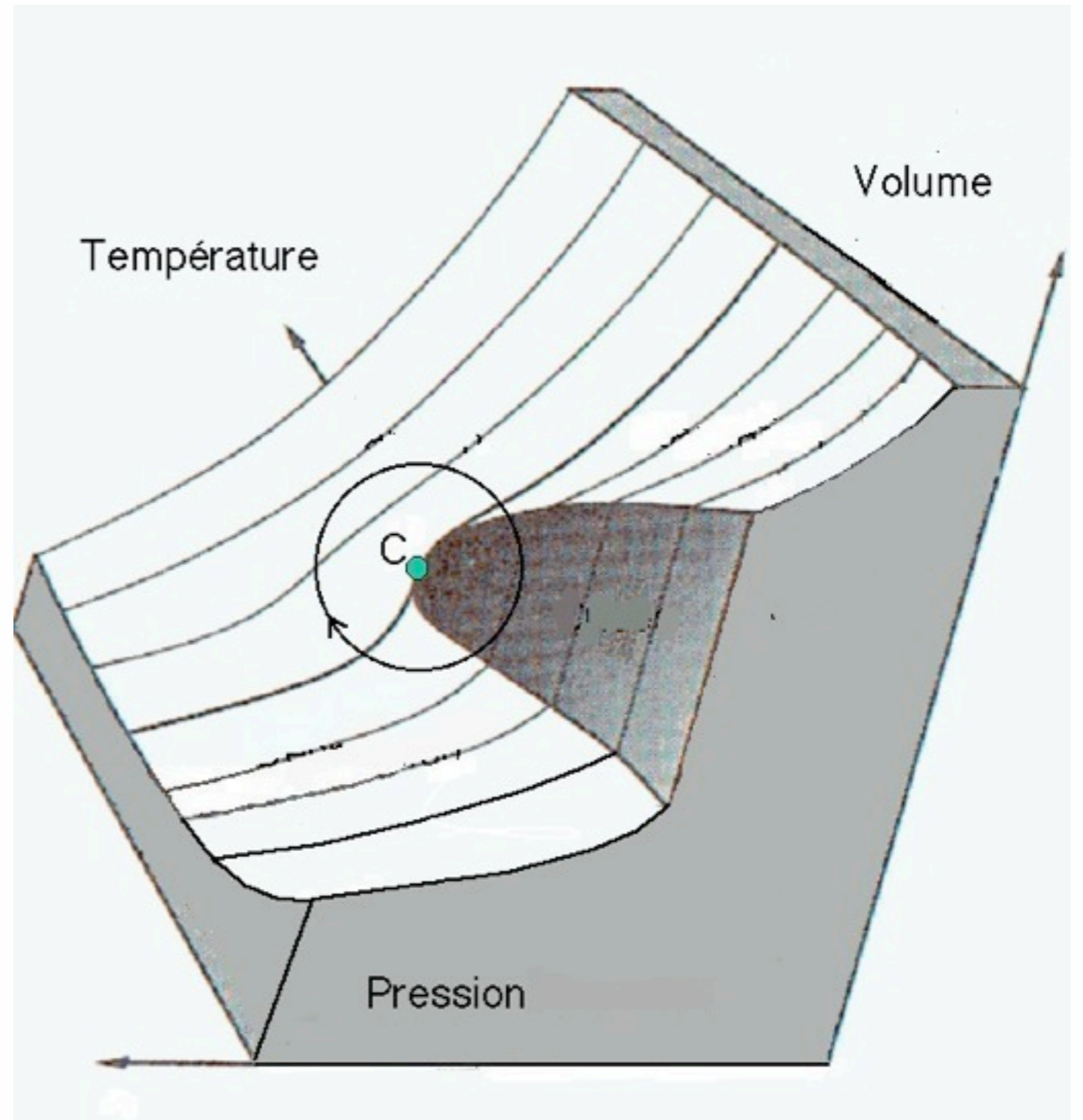
Une origine vraisemblable de la vie

Les premières cheminées hydrothermales ont été découvertes en 1977 à 2.600m de profondeur. L'eau y est supercritique (plus de 374°C et plus de 217 bars). Ces cheminées déclenchent nécessairement des cycles convectifs autour du point critique de l'eau. La condensation a lieu au retour vers la source.
Molécules nécessaires: CH₄, NH₃, SH₂.

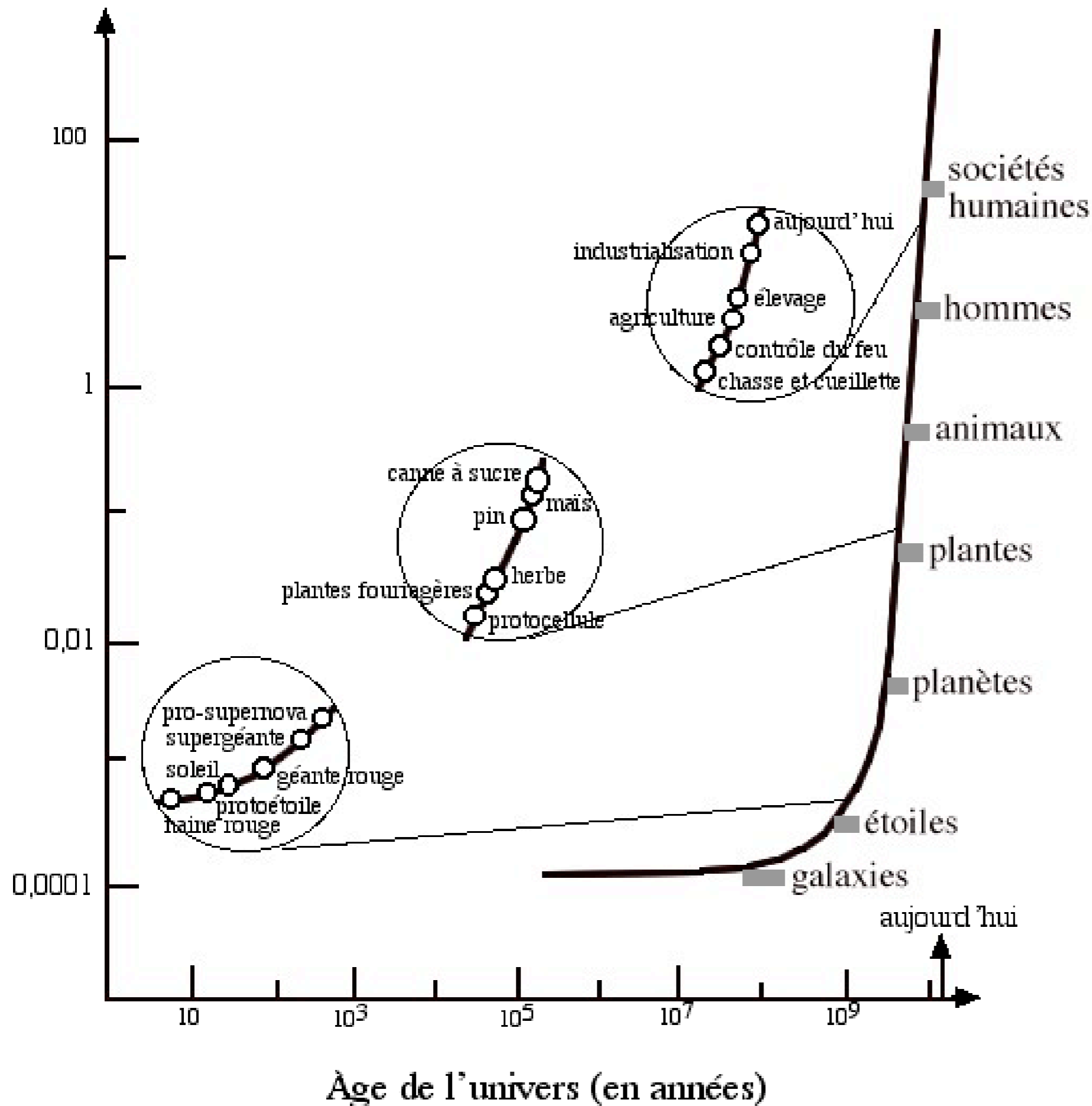


Une origine vraisemblable de la vie

Le processus de condensation se répète indéfiniment lors de cycles convectifs autour du point critique.



Énergie dissipée (en watts/kg)



Eric Chaisson
(2001)

Modèle de cerveau

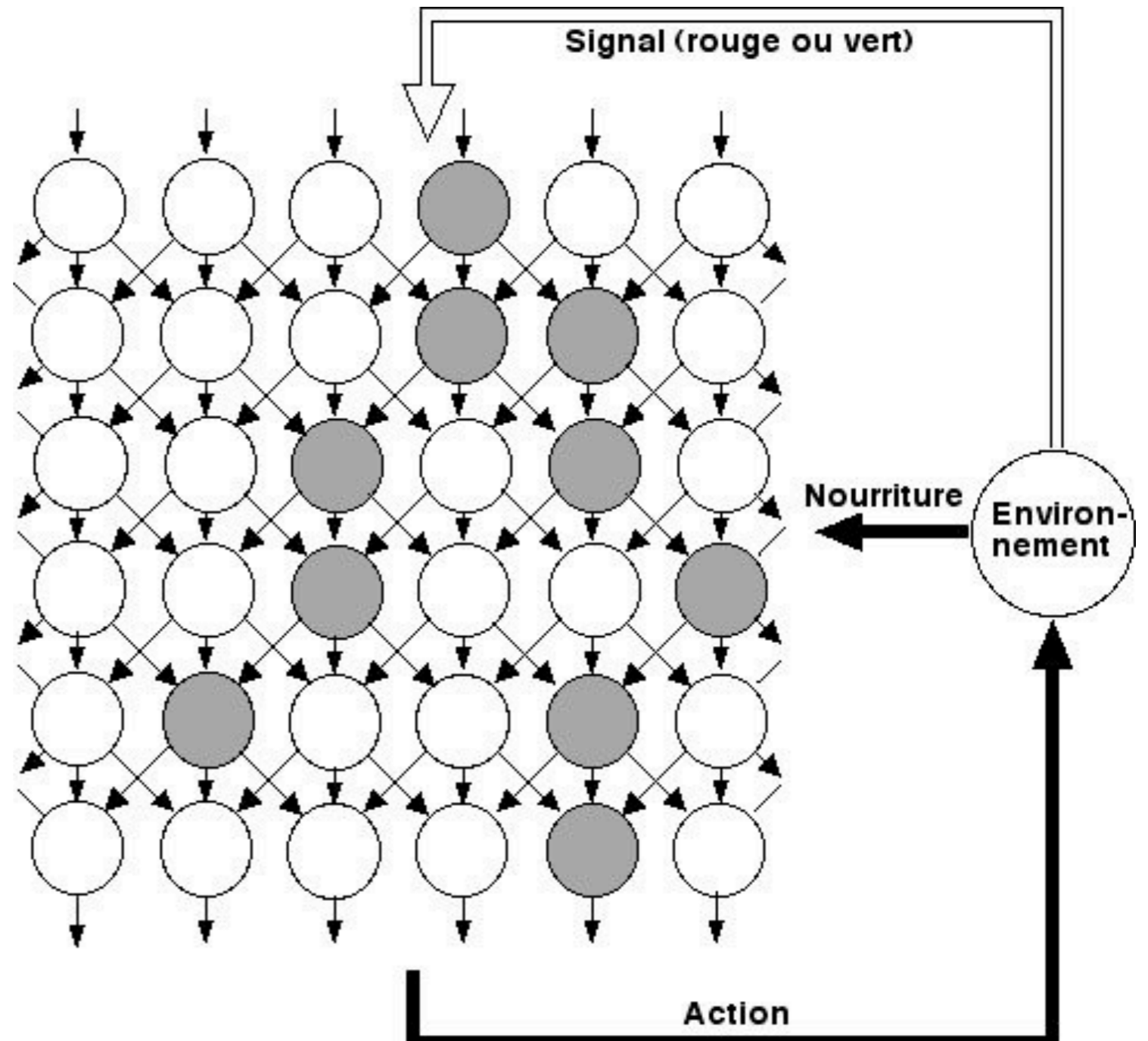
*Dimitris Stassinopoulos
and Per Bak (1995):*

Democratic

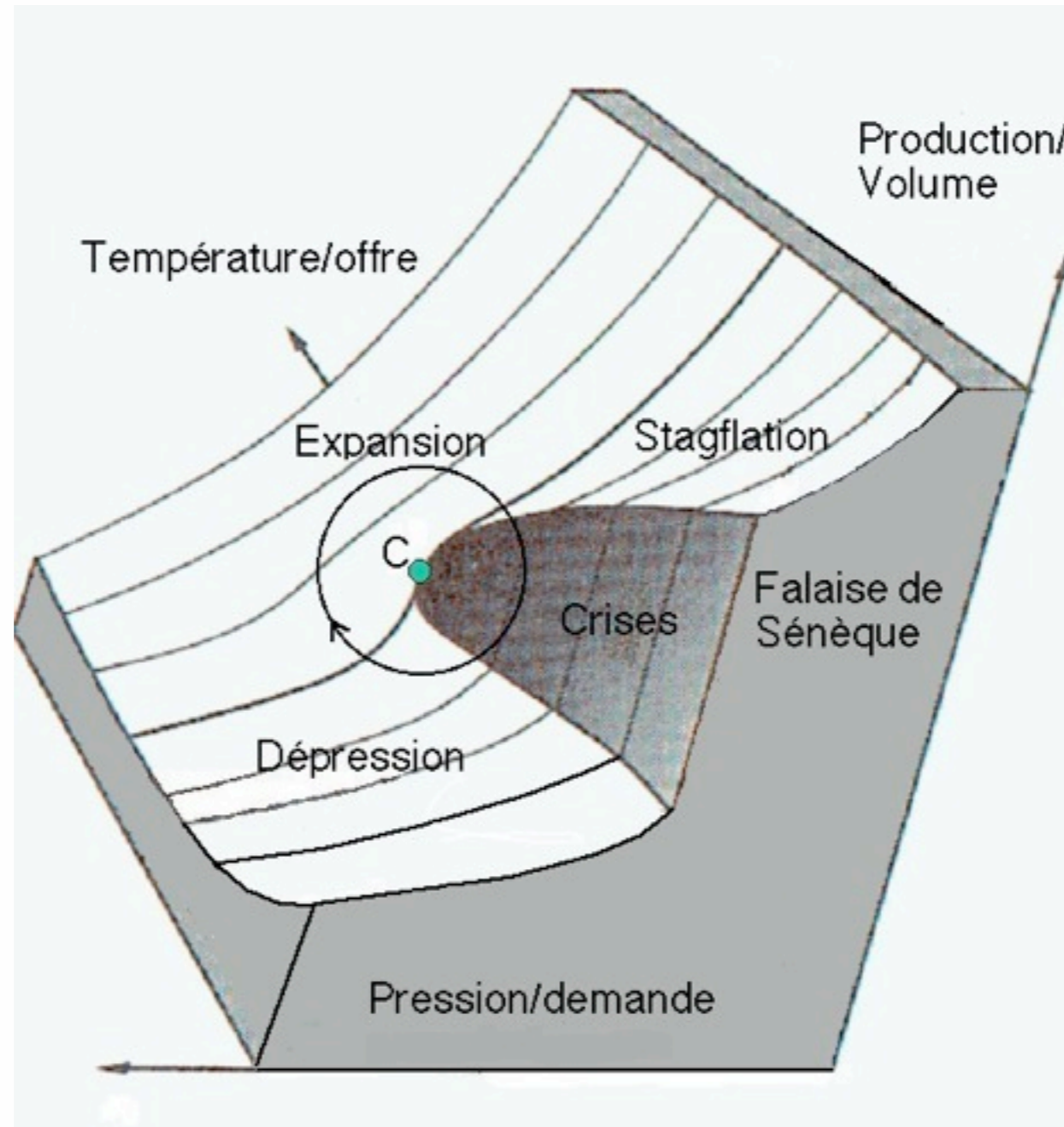
reinforcement:

A principle for brain
function.

S'applique à
l'auto-organisation
d'une société humaine.



Application à l'économie



Fin