

Thermodynamique et économie.

Des sciences exactes aux sciences humaines

François Roddier

Exposé du 2 décembre 2013 au CNAM

La classification des sciences d'Auguste Comte (1830):

Mathématiques

Astronomie

Physique

Chimie

Biologie

Sociologie

Les lois établies dans une catégorie
s'appliquent à la catégorie suivante.

Un point de vue plus moderne:

Mathématiques

Physique

Thermodynamique

Chimie

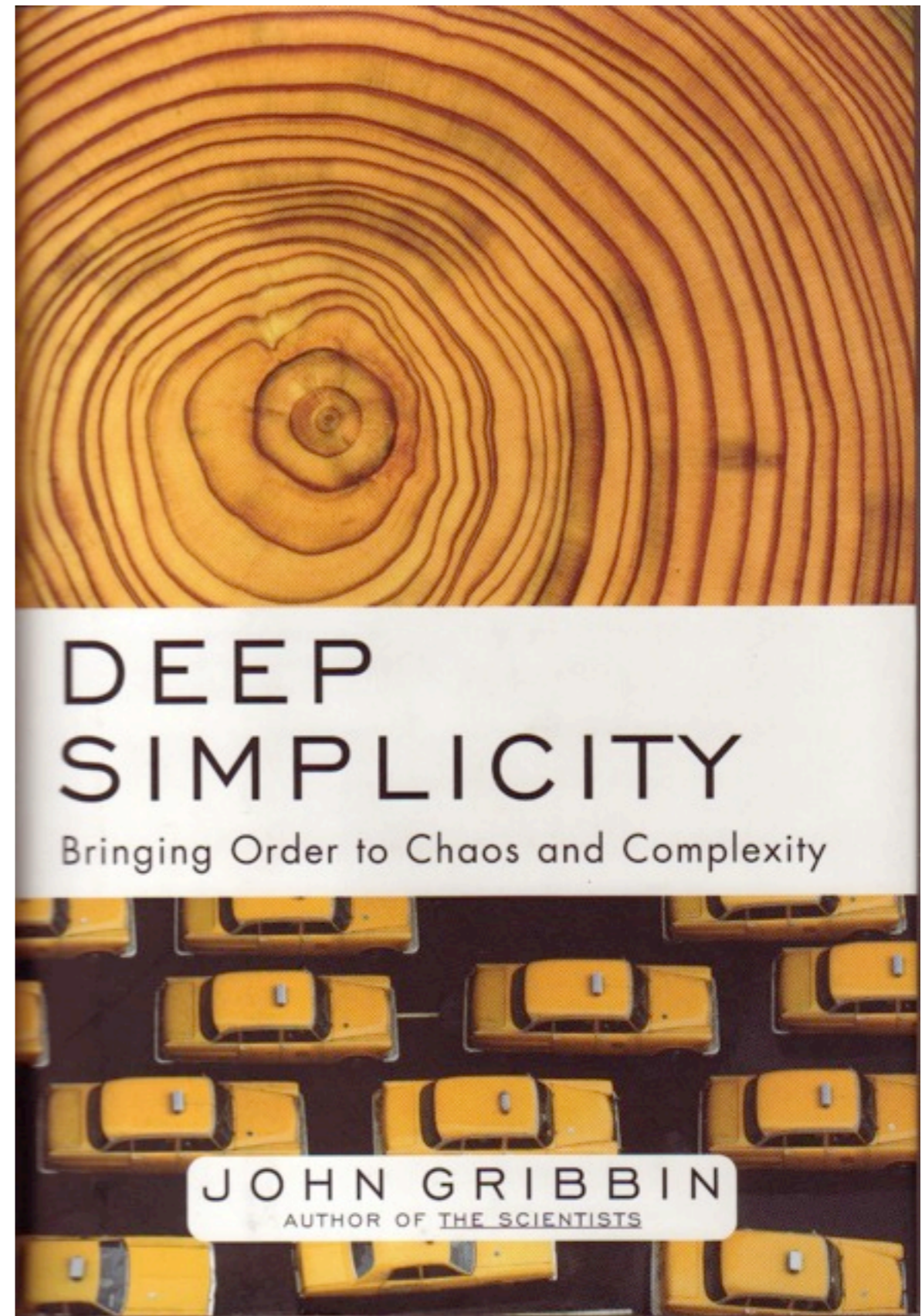
Biochimie

Biologie

Sciences humaines

Les lois de la physique suffisent (en principe)
mais la *complexité* augmente.

La complexité,
mais c'est très
simple...

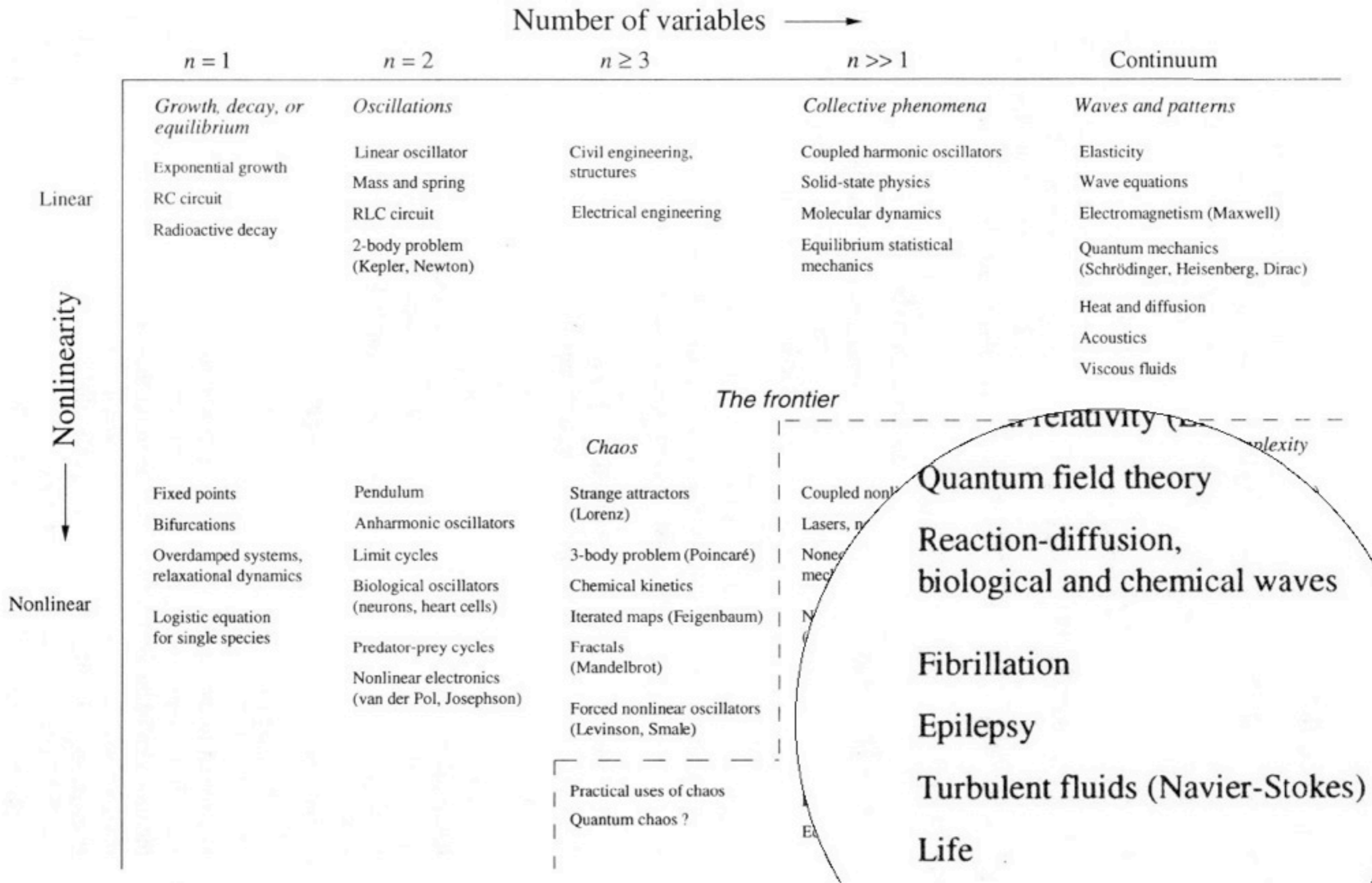


Qu'est-ce que la complexité?

Nombre élevé de variables

+

relations non linéaires

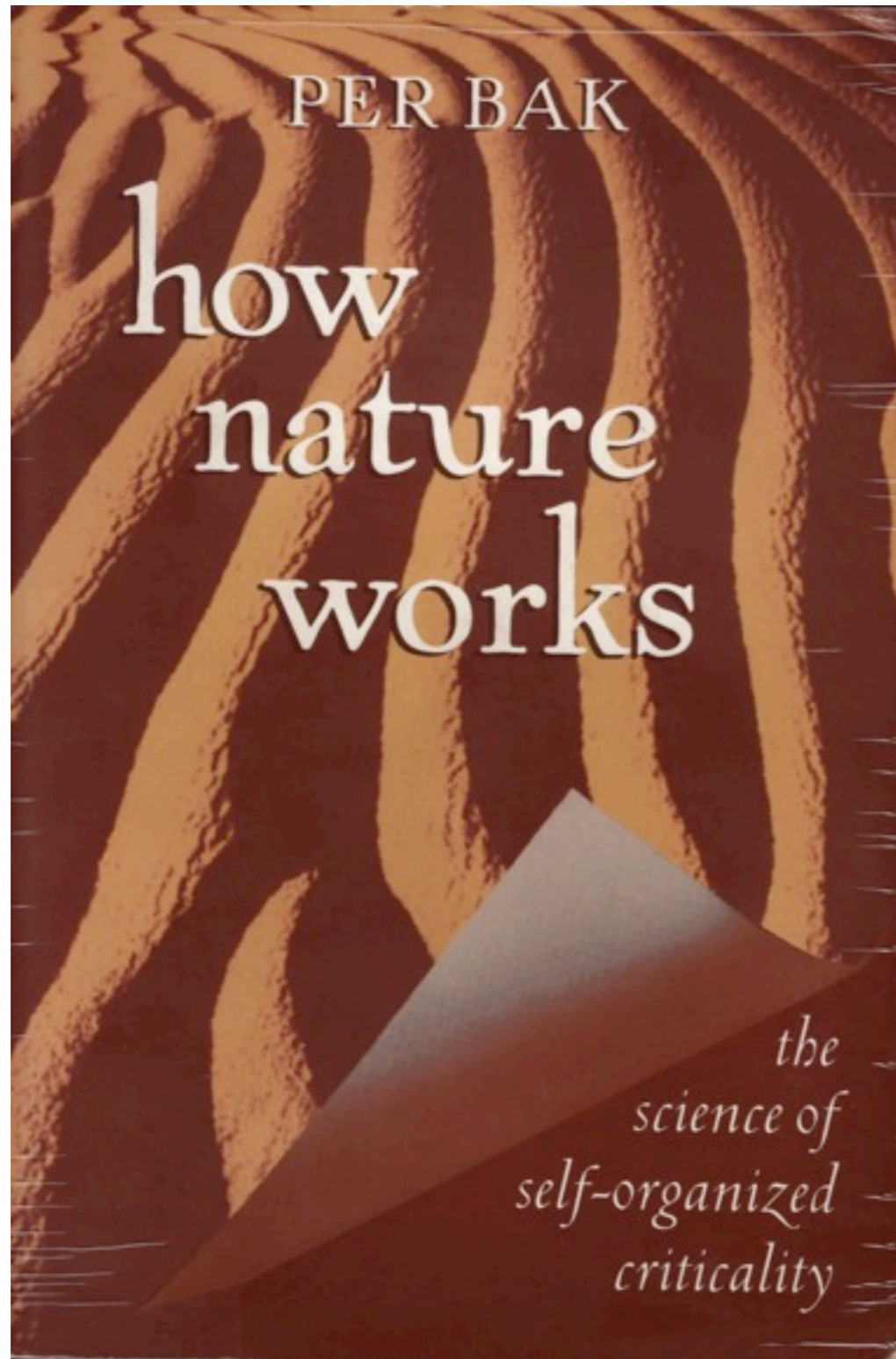


D'après Strogatz, NonLinear Dynamics and Chaos (1994)

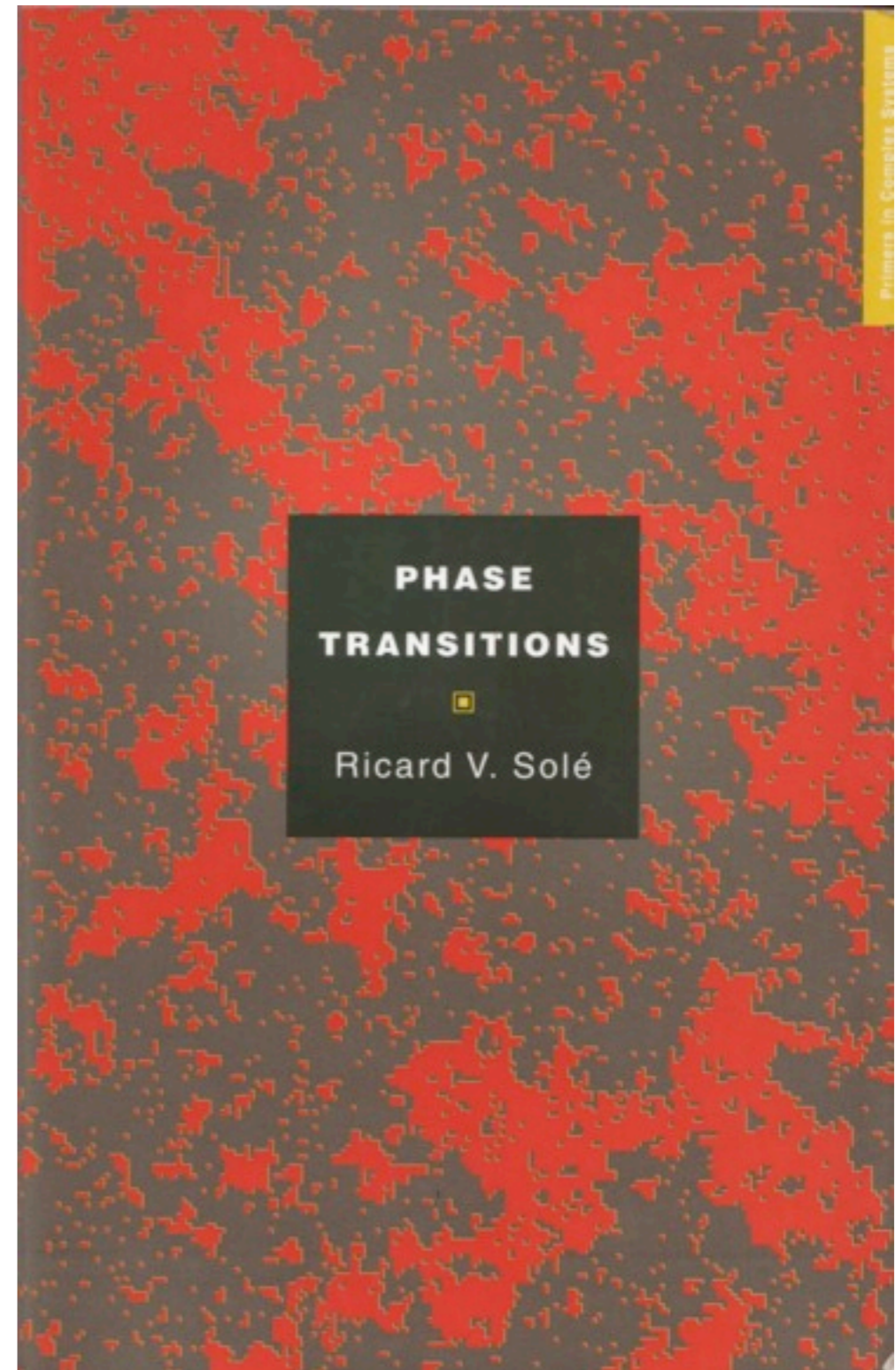
Solution

Dynamique non-linéaire
+
Mécanique statistique
(Thermodynamique)

Dynamique non-linéaire

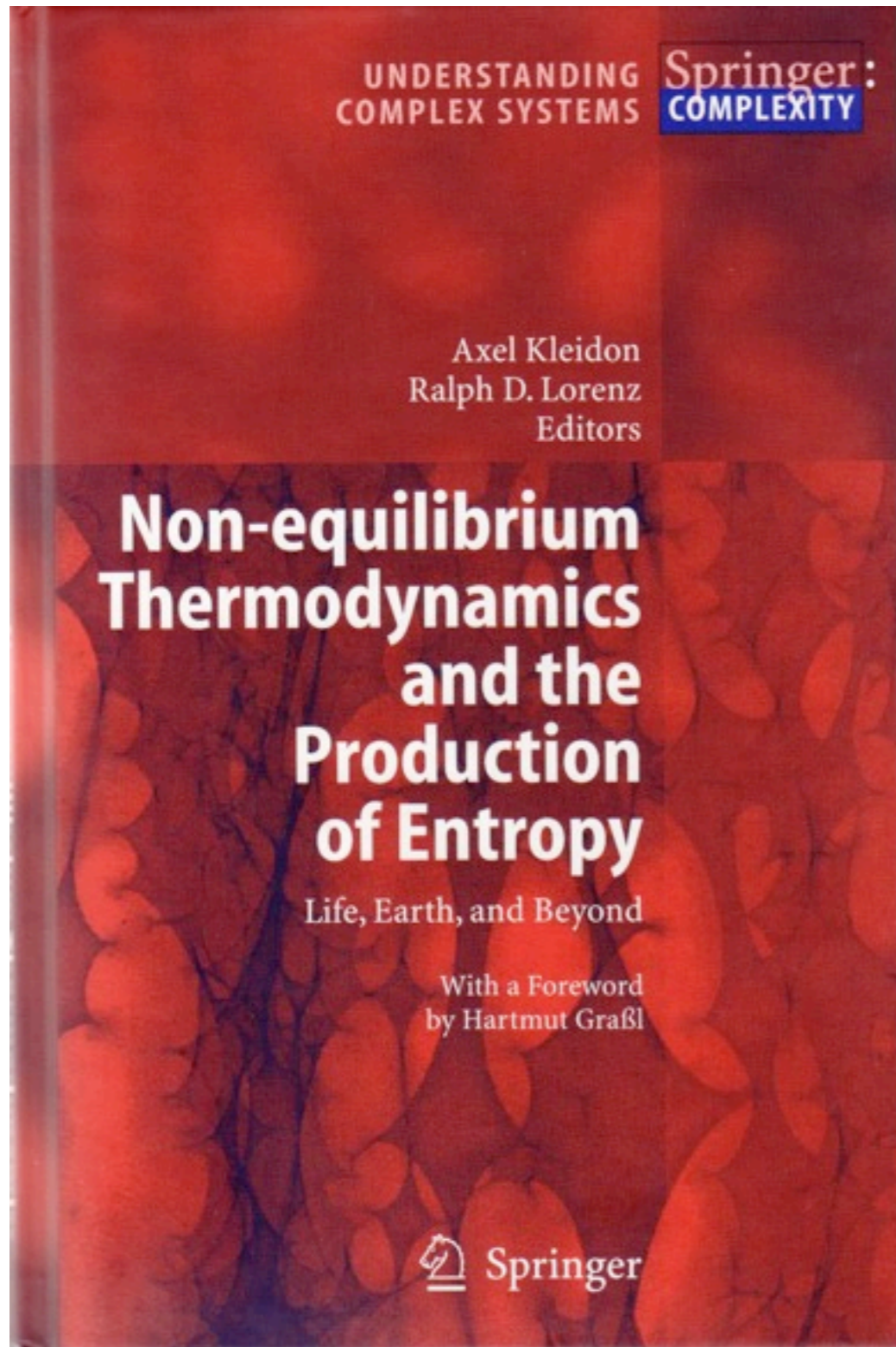


1996

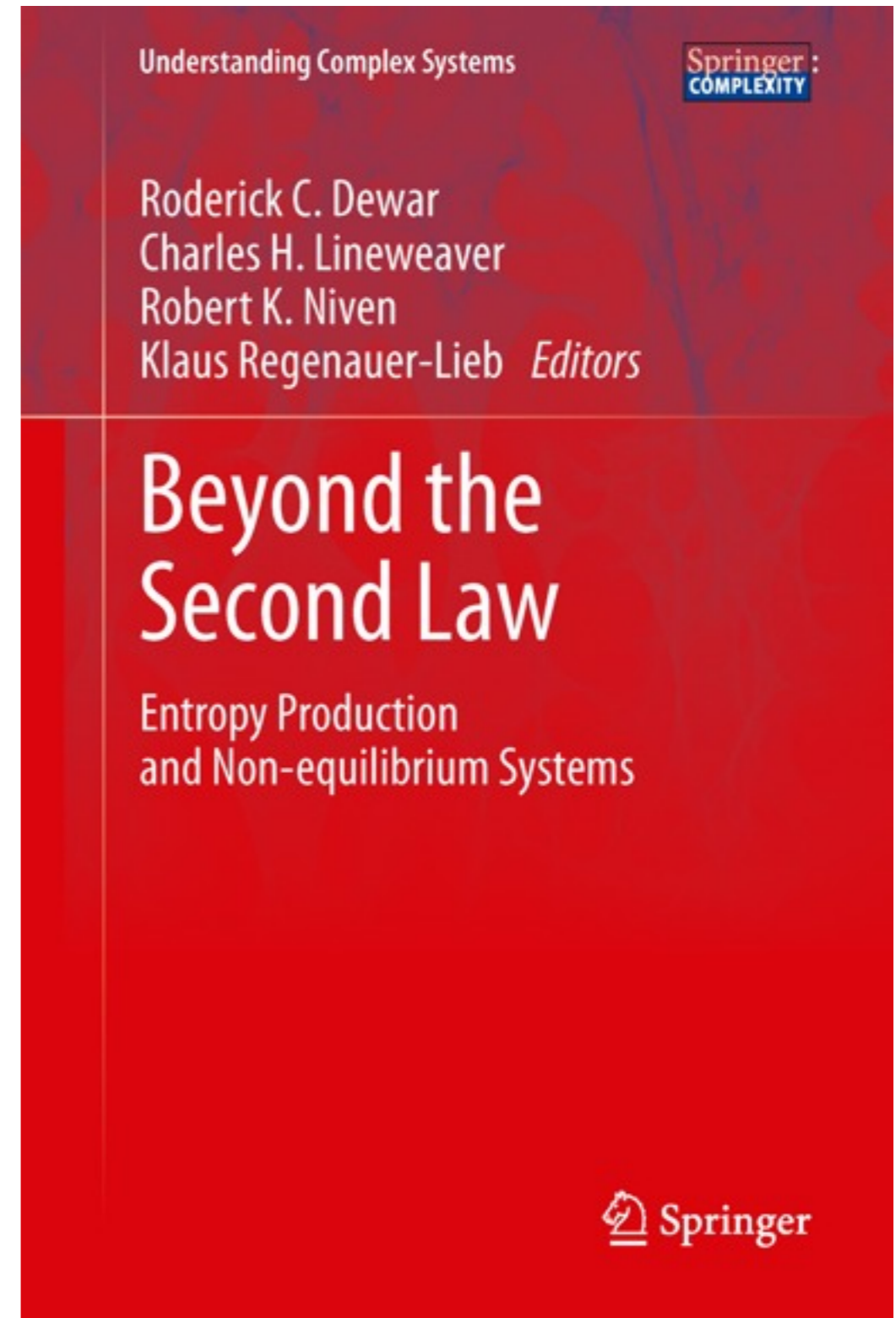


2011

Thermodynamique hors-équilibre



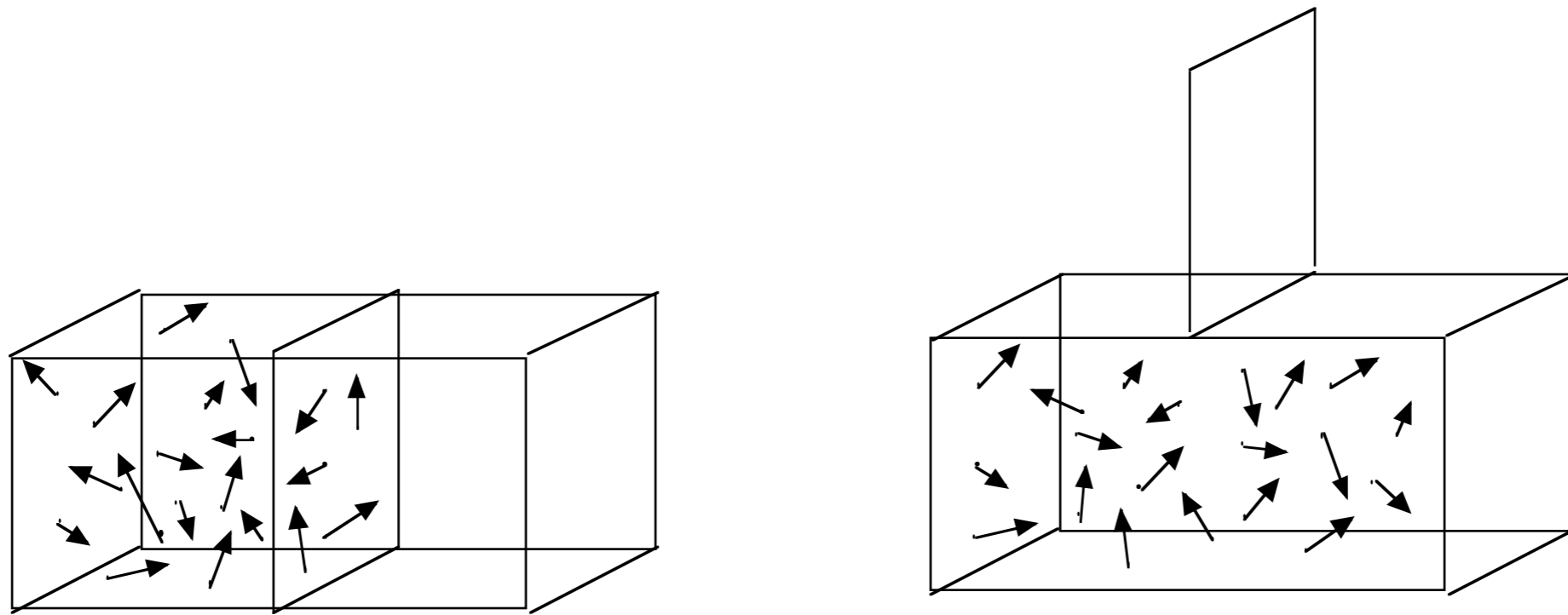
2005



2013

La mécanique statistique explique
l'irréversibilité et la *non-reproductibilité*.

L'irréversibilité



Bien que les lois fondamentales de la physique soient réversibles, l'évolution de l'univers est irréversible.

Elle suit les lois de la thermodynamique.

Les lois de la thermodynamique

- Première loi: l'énergie se conserve. La chaleur est une forme d'énergie.
- Deuxième loi: l'énergie se dissipe. L'énergie tend à se transformer *irréversiblement* en chaleur (forme dispersée et désordonnée d'énergie).

L'évolution de l'univers est un processus *irréversible* de dissipation de l'énergie.

Deuxième loi: énoncé de Carnot

Sadi Carnot (1824):

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.



Sadi Carnot

Le rendement est maximal lorsque toutes les transformations sont réversibles.

La notion d'entropie

Carnot (1824): $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$

Clausius (1865): $\oint \frac{dQ}{T} = 0$ $S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ}{T}$

Boltzmann (1877): $S = k \cdot \log W$

(W = volume dans l'espace des phases)

Exemple: *gaz mono-atomique*

Nombre N de degrés de liberté: $N = \frac{2Q}{kT} = 2 \log W$

Gibbs (1875): $S = -k \cdot \sum p_i \cdot \log p_i$

À l'équilibre: $p_i = \frac{1}{W}$ $S = k \cdot \log W$

Shannon (1948): Information: $I = -\log p_i$

Information moyenne: $\bar{I} = -\sum p_i \cdot \log p_i$

(entropie informationnelle)

L'entropie thermodynamique est un cas particulier
d'entropie informationnelle

Rolf Landauer et Charles Bennett (1961):

Il est impossible d'effacer une mémoire sans dégager de la chaleur.

L'entropie informationnelle est un cas particulier
d'entropie thermodynamique

Conclusion:

Entropie informationnelle = entropie thermodynamique

Difficultés liées à la notion d'information

Exemple de la boule de billard (Ed Fredkin)

Interprétation physique de la notion de probabilité

(interprétation fréquentiste/bayésienne)

E. T. Jaynes, Probability Theory, The logic of science

Paradoxe de Gibbs

Compression de l'information

La thermodynamique

à l'équilibre



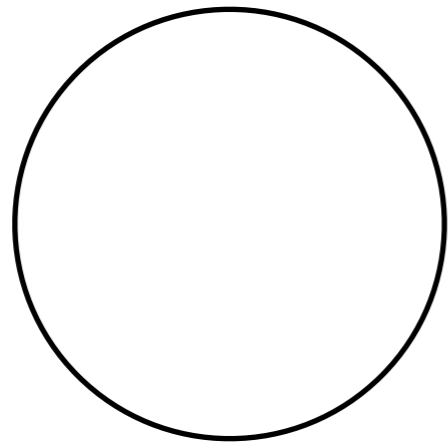
Nicolas Léonard
Sadi Carnot
(1796 - 1832)

hors l'équilibre



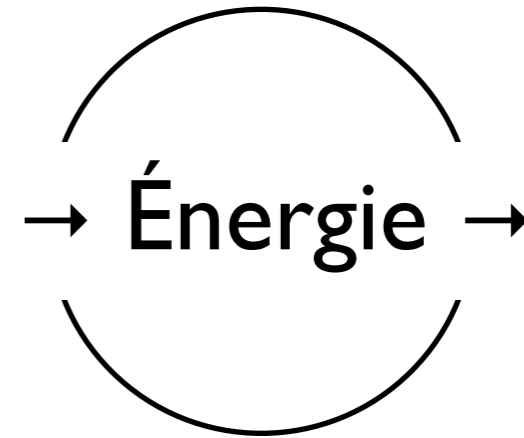
Ilya Prigogine
Prix Nobel 1977
(1917 - 2003)

à l'équilibre



Systeme fermé

hors-équilibre



Systeme ouvert

Systeme fermé:

tend au repos: équilibre thermodynamique.

se désorganise: toute structure tend à disparaître.

son entropie: augmente (évolution irréversible et reproductible).

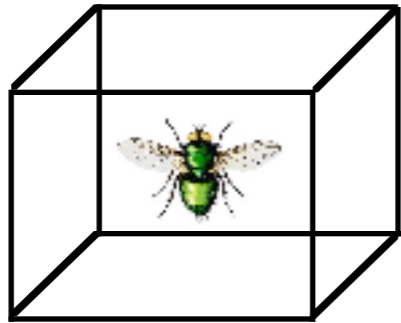
Systeme ouvert:

s'auto-organise: des structures peuvent apparaître.

se met en mouvement: déséquilibre thermodynamique.

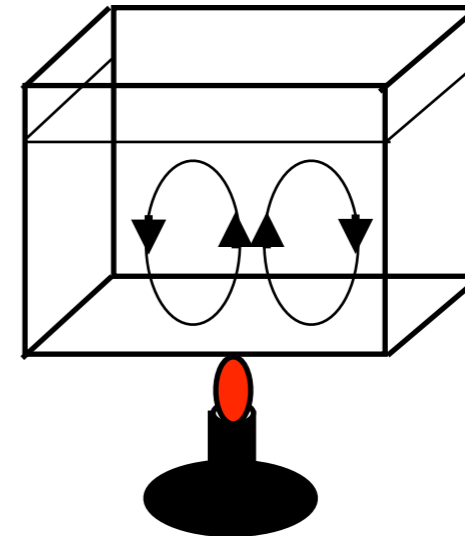
son entropie: peut diminuer (évolution non reproductible).

à l'équilibre



Systeme fermé

hors-équilibre



Systeme ouvert

Systeme fermé:

tend au repos: équilibre thermodynamique.

se désorganise: toute structure tend à disparaître.

son entropie: augmente (évolution irréversible et reproductible).

Systeme ouvert:

s'auto-organise: des structures peuvent apparaître.

se met en mouvement: déséquilibre thermodynamique.

son entropie: peut diminuer (évolution non reproductible).

Les structures dissipatives

Prigogine a donné le nom de *structures dissipatives* aux structures qui apparaissent dans les systèmes ouverts.

Celles-ci ne subsistent que si elles sont traversées par un flux permanent d'énergie.



Ilya Prigogine

Exemples de structures dissipatives

- Un tornade
- L'atmosphère terrestre
- Un organisme vivant
- Une espèce animale ou végétale
- L'homme
- Une *société humaine*

Moteur thermique naturel

Une structure dissipative produit de l'énergie mécanique qu'elle dissipe.



Tornado

L'auto-organisation des structures dissipatives

- **Pourquoi s'auto-organisent-elles?**
- **Comment s'auto-organisent-elles?**

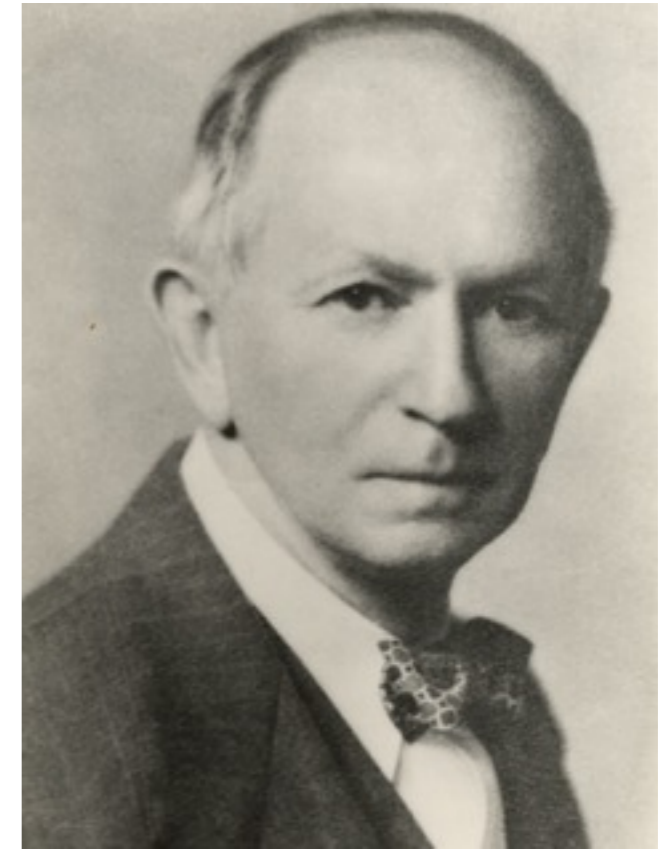
I. Pourquoi les structures dissipatives s'auto-organisent-elles?

Conjecture: pour maximiser le taux de production d'entropie (la vitesse à laquelle l'énergie se dissipe).

Lotka (1922)

Natural selection tends to make the energy flux through the [organic] system a maximum so far as compatible with the constraints to which the system is subject.

It functions as if it were as a third law of thermodynamics.



Alfred Lotka

Lotka, A., *Contribution to the energetics of evolution*. PNAS 8, 147-151, 1922

Lotka, A., *Natural Selection as a Physical principle*. PNAS 8, 151-154, 1922



La sélection naturelle favorise l'animal capable de dissiper le plus d'énergie.

La troisième loi de Lotka

1978: Un météorologiste Garth Paltridge constate que l'atmosphère terrestre est dans un état de dissipation maximale d'énergie (production maximale d'entropie).

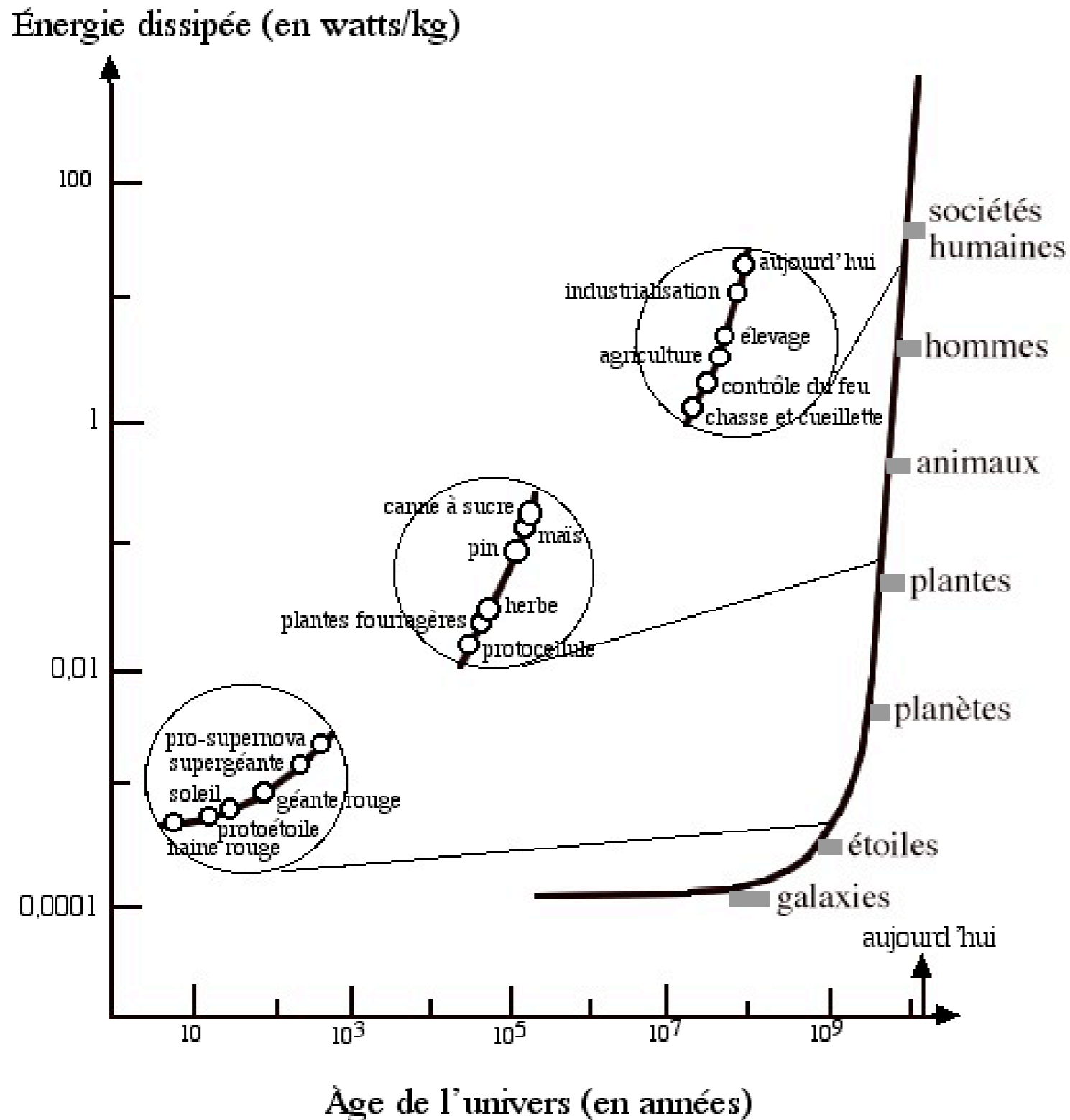
1988: Un biologiste Rod Swenson propose un principe général de production maximale d'entropie.

2001: Lorentz R. D. et al. montrent que l'atmosphère de Mars et celle de Titan sont dans un état de production maximale d'entropie.

2003: Un biophysicien Roderick Dewar propose une démonstration statistique du principe de production maximale d'entropie.

2007 à ce jour: la rigueur de la démonstration est discutée.

L'évolution de l'univers



Eric Chaisson (2001)

Conclusion:

Compte tenu des contraintes auxquelles elle est soumise, une structure dissipative s'auto-organise (autopoiesis en biologie) en cherchant à:

- maximiser le flux d'énergie qui la traverse.
- maximiser sa production d'énergie libre.
- maximiser le flux d'entropie qu'elle exporte (la quantité d'information qu'elle importe de son environnement).
- minimiser son entropie interne (maximiser la quantité d'information qu'elle mémorise).

11. Comment les structures dissipatives s'auto-organisent-elles?

Réponse: à la manière
des transitions de phase
continues

Per Bak, Chao Tang, Kurt Wiesenfeld (1987)

Les structures dissipatives s'auto-organisent comme des *transitions de phase continues*. Elles oscillent constamment au voisinage d'un état critique à partir duquel se produisent des avalanches de bifurcations (*criticalité auto-organisée*).

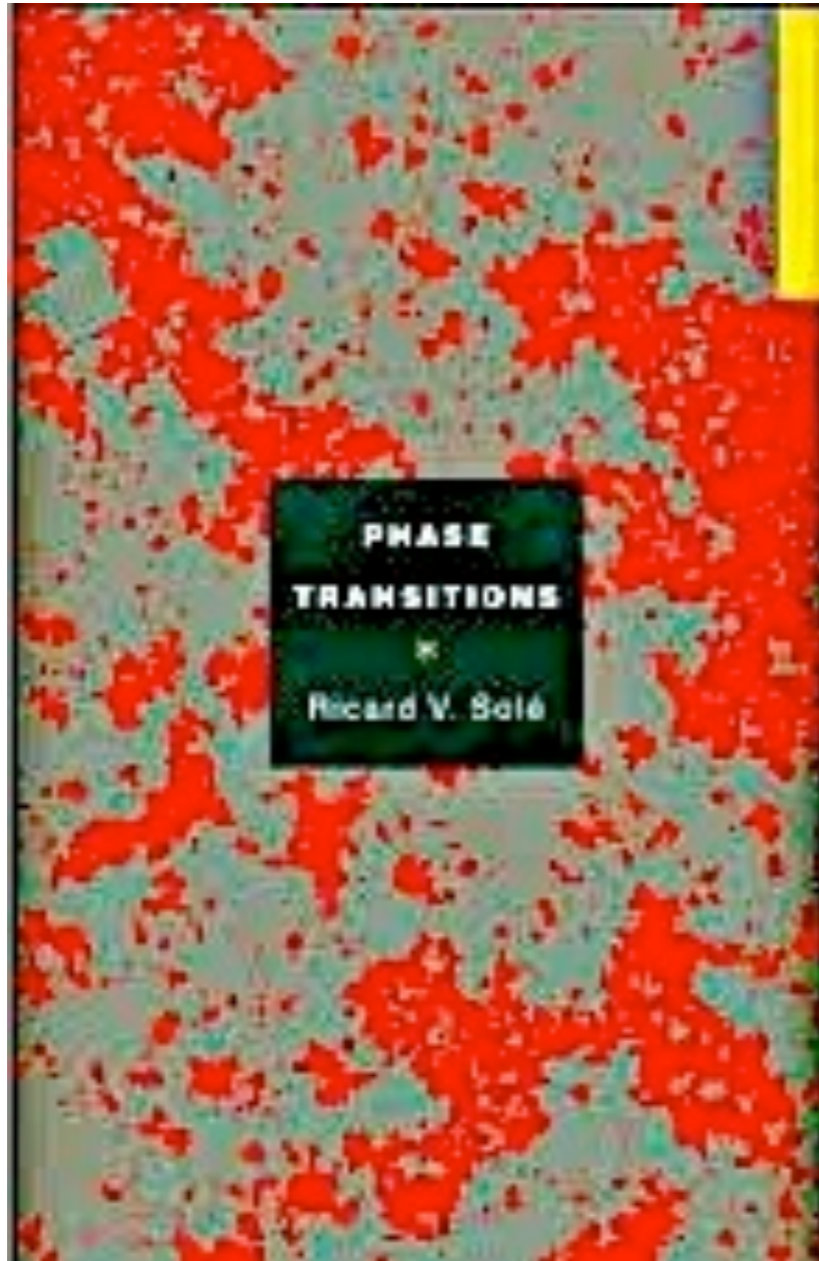


Per Bak (1948-2002)

L'amplitude des avalanches est inversement proportionnelle à leur fréquence (loi de puissance en $1/f$ ou f^{-1}).

Exemples: tremblements de terre, avalanches.

Ricard V. Solé: Phase transitions



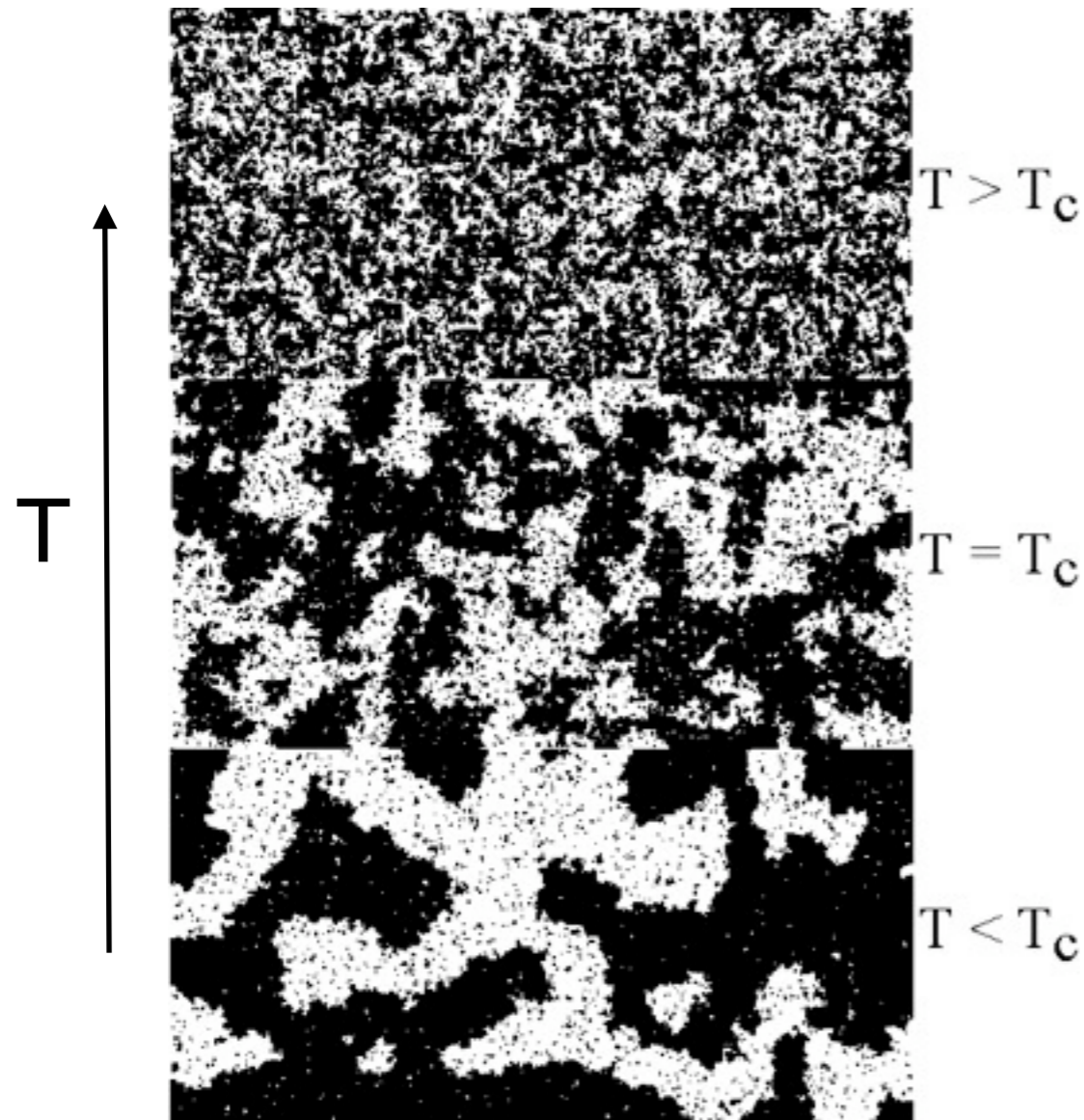
2011

Quelques têtes de chapitre:

- Phase change
- Life origins
- Virus dynamics
- Gene networks
- Ecological shifts
- Collective intelligence
- *Social collapse*

Modèle de transition de phase continue

Domaines d'Ising



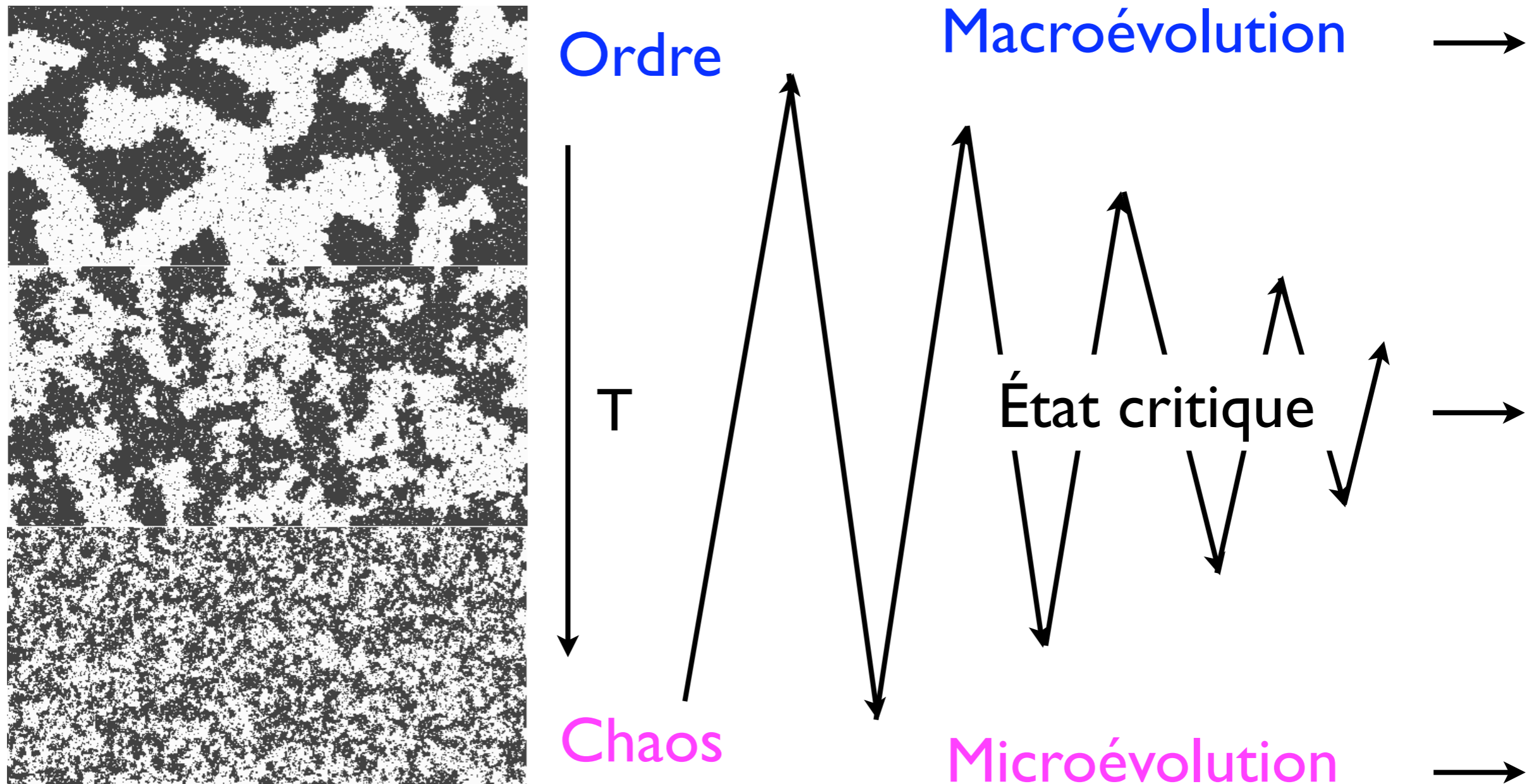
Paramagnétisme

Point critique
(point de Curie)

Ferromagnétisme

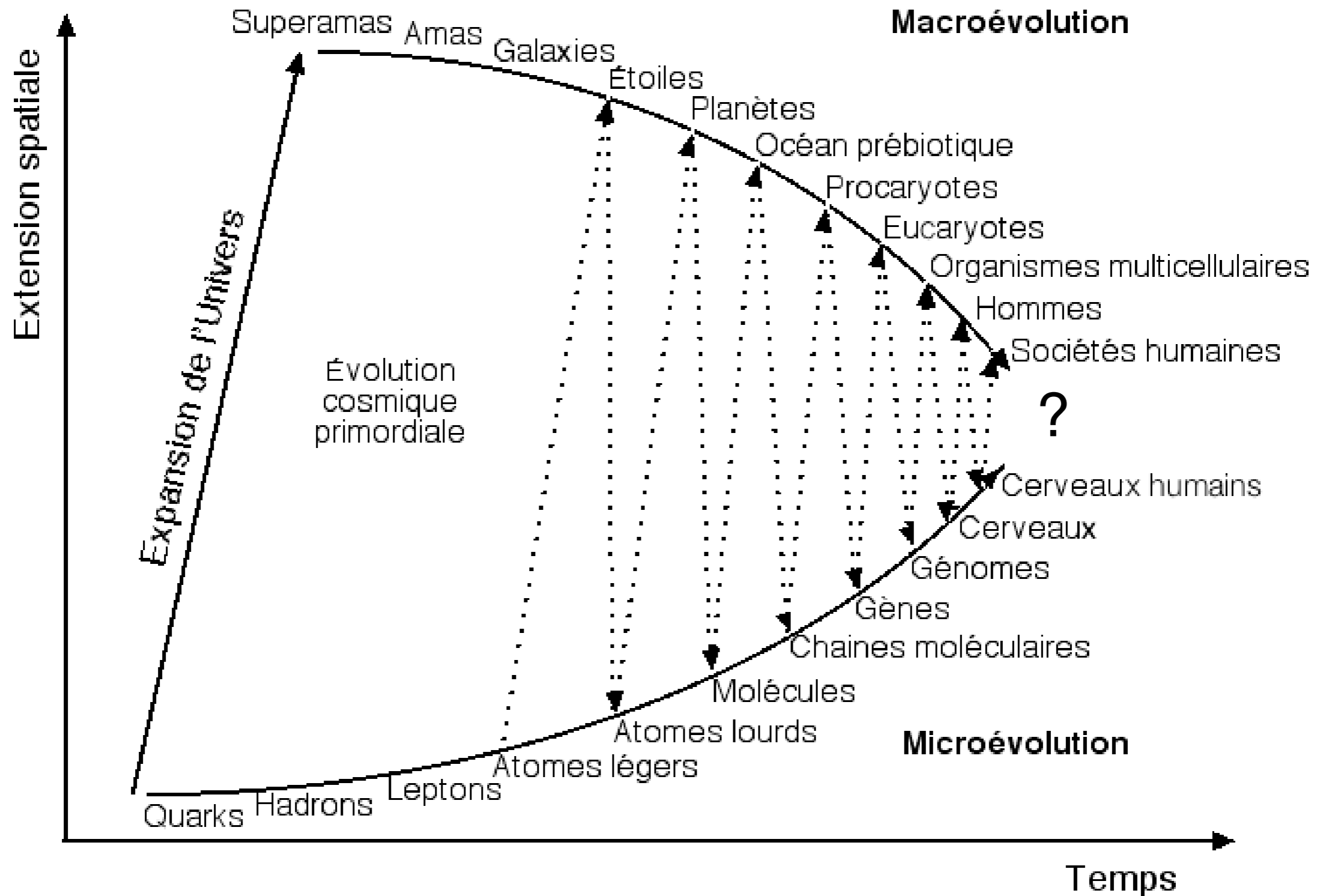
Modèle d'Ising

Alternance entre l'ordre et le chaos



Algorithme de « recuits » successifs maximisant l'information mémorisée (complexité) et le taux de dissipation d'énergie.

L'évolution de l'univers



D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.

Évolution des supports de l'information

<i>Structure dissipative</i>	<i>Mémoire</i>	<i>Code</i>
<i>Hydrodynamique</i>	Inertielle	Cellules, tourbillons
<i>Espèces animales</i>	Gènes	Code génétique
<i>Homo sapiens</i>	Cerveau	Langage
<i>Sociétés historiques</i>	Livres	Écriture
<i>Sociétés modernes</i>	Supports informatiques	Codes informatiques

Chez l'homme la *culture* a pris le rôle des gènes

Macroévolution et microévolution

Physique

Biologie

Sociologie

Macroévolution

Grandes cellules convectives
(**Ordre**)

Sélection « K »:
Grands organismes
Évolution lente
Efficience

Solidarité
Intégration culturelle
Coopération
Adaptation

État critique. Invariance d'échelle. Distribution en loi de puissance.
Transition entre **ordre** et **chaos**.

Microévolution

Turbulence pleinement développée
(**Chaos**)

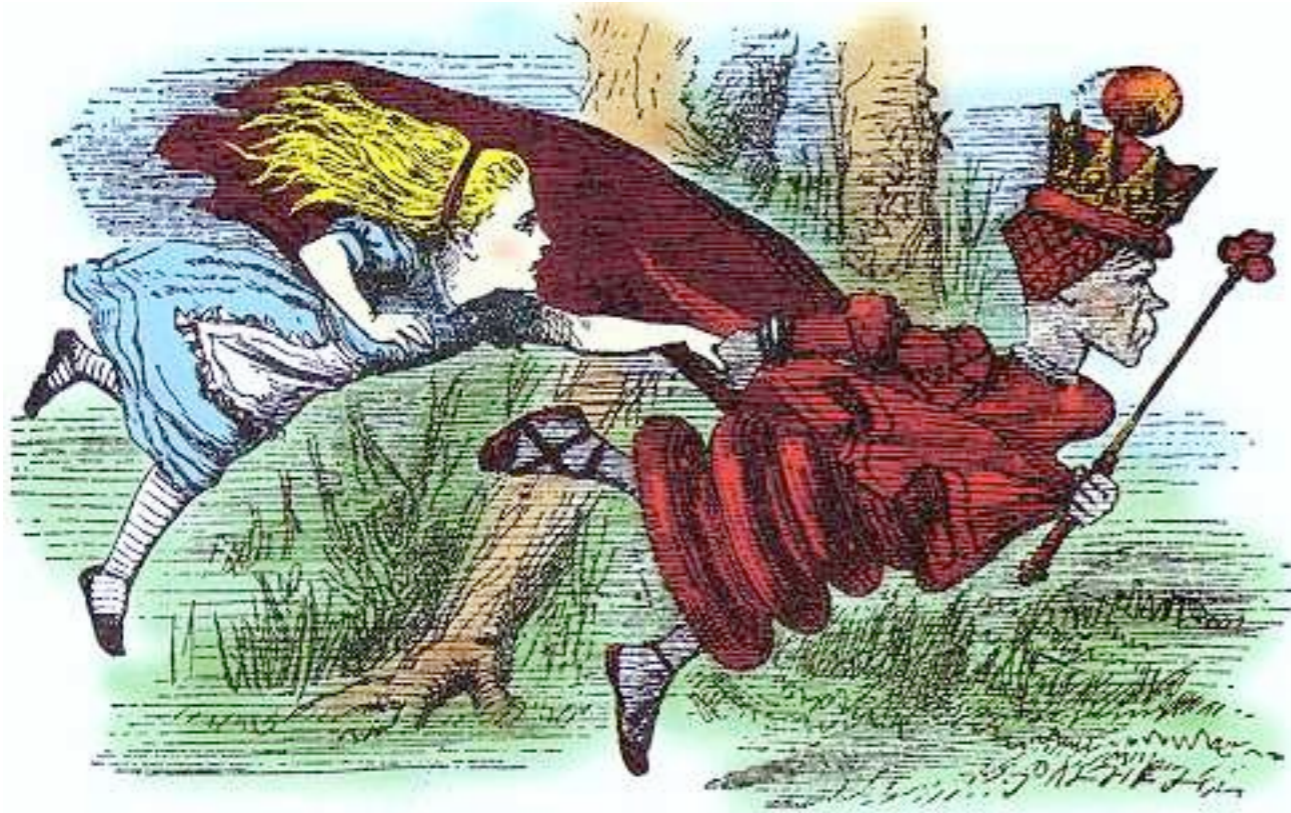
Sélection « r »:
Petits organismes
Évolution rapide
Résilience

Individualisme
Ségrégation culturelle
Compétition
Adaptabilité

L'alternance entre l'ordre et le chaos

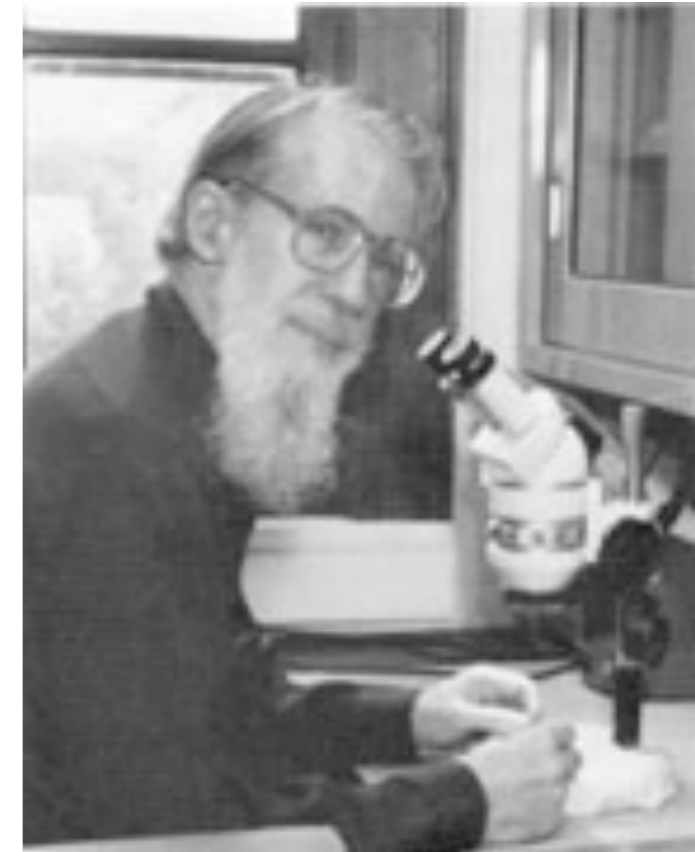
- Une structure dissipative maximise la dissipation d'énergie en s'adaptant à son environnement.
- Mieux elle s'adapte plus elle dissipe d'énergie.
- Plus elle dissipe d'énergie plus vite elle modifie son environnement.
- Plus vite elle modifie son environnement plus vite elle doit se réadapter.
- D'où une alternance de plus en plus rapide entre l'ordre et le chaos.

L'effet de la reine rouge en biologie



« Ici, il faut courir le plus vite possible pour rester en place »

(Lewis Carroll: "De l'autre côté du miroir")



Leigh van Valen
(1973)

**Application à l'auto-organisation
des sociétés humaines (économie)**

Boltzmann (1905)

“[The] struggle for existence is a struggle for *free energy* available for doing *work*.”



Ludwig Boltzmann

Boltzmann, L., *Populare Schriften (Popular Writings)*. Leipzig: J.A. Barth.

Soddy (1926)

“Economics deals [...] with the flow of *useful and available energy* and its transformations into useless forms, and *physical wealth* as a product of the control and direction of this flow”.



Frederick Soddy
(1877-1956)

Frederick Soddy (1926). *Wealth, Virtual Wealth and Debt.*

Physical wealth:

Real wealth (wealth = being well)

Le bien-être mesuré en termes du flux d'énergie libre dont on dispose.

Virtual wealth:

Valuables (wealth = being rich)

La richesse mesurée en termes de monnaie (*information*).



Frederick Soddy
(1877-1956)

En cherchant à maximiser son bien-être, l'humanité maximise le flux d'énergie qu'elle dissipe (MEP).

Georgescu-Roegen (1971)

« La thermodynamique et la **biologie** sont les flambeaux indispensables pour éclairer le processus économique. »



Nicholas Georgescu-Roegen
(1906-1994)

Information en biologie

Information en économie

ADN

Culture

ARN

Savoir

ARN Messenger

Instruction

ARN ribosomique

Savoir-faire

ARN de transfert

Instruction technique

Hormones

Information venant des médias

Enzymes

Monnaies locales

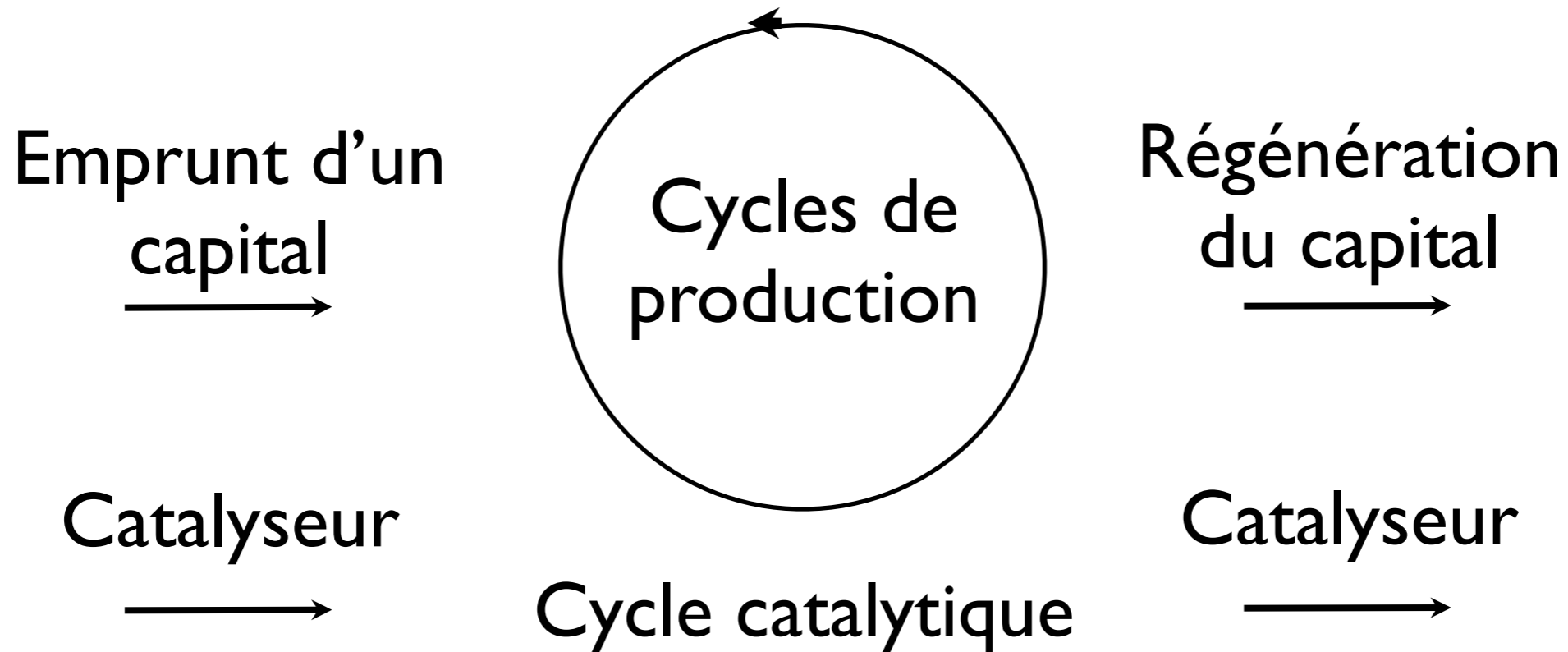
ATP

Étalon monétaire

La monnaie joue le rôle d'un enzyme (catalyseur).

ἔνζυμον (énzymon) = ancienne monnaie grecque

ζυμον (zymon) = levain (azyme = sans levain)



Analogie



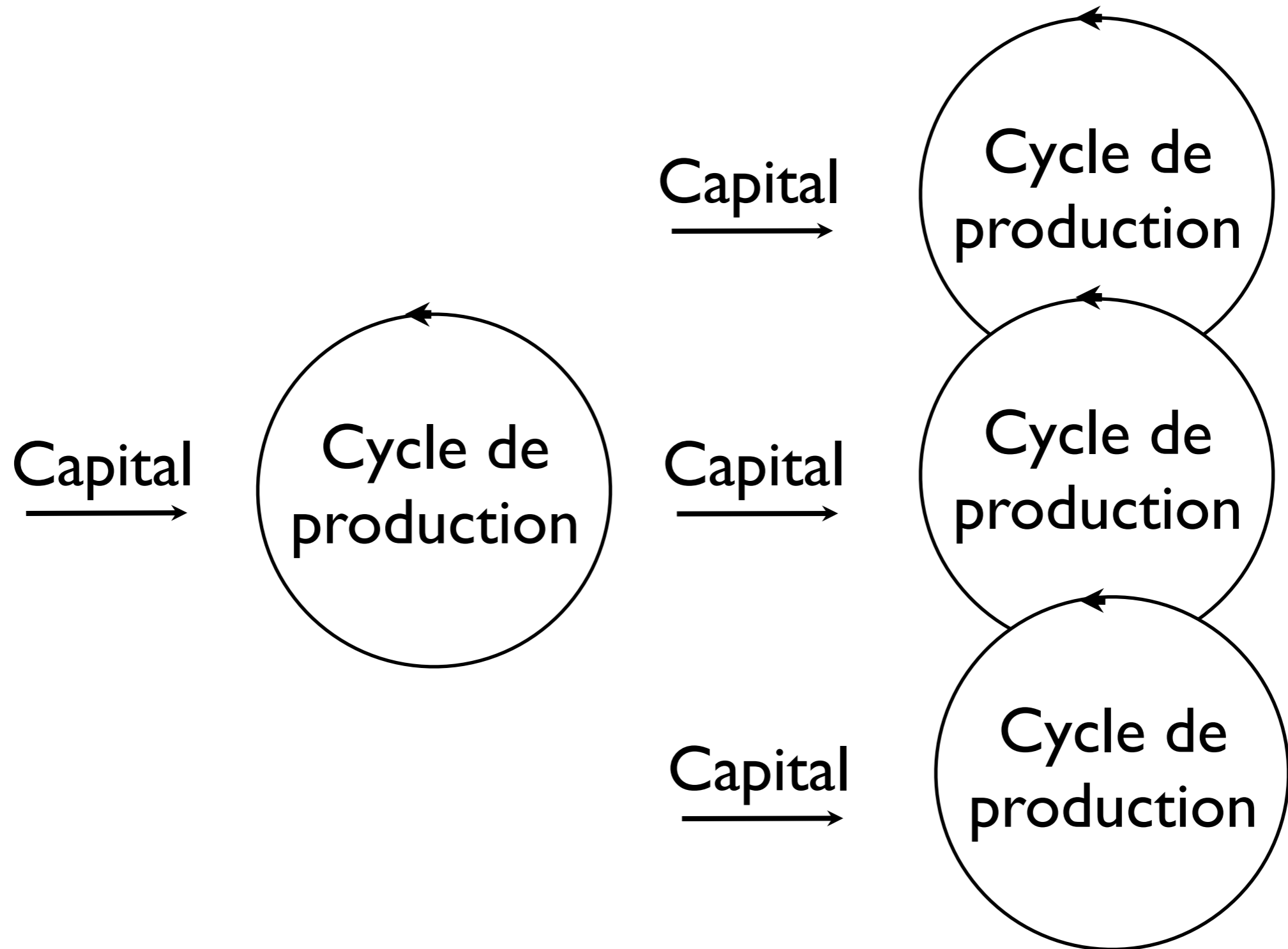
Énergie + Capital = Énergie libre

E - T•S = F

À lui tout seul, le levain ne permet pas de faire du pain. Il faut aussi de la farine et un environnement favorable (température, etc...).

L'économie ne se limite pas à la monnaie!

Cycles autocatalytiques



Reproduction des cycles → avalanches de biens et de profits

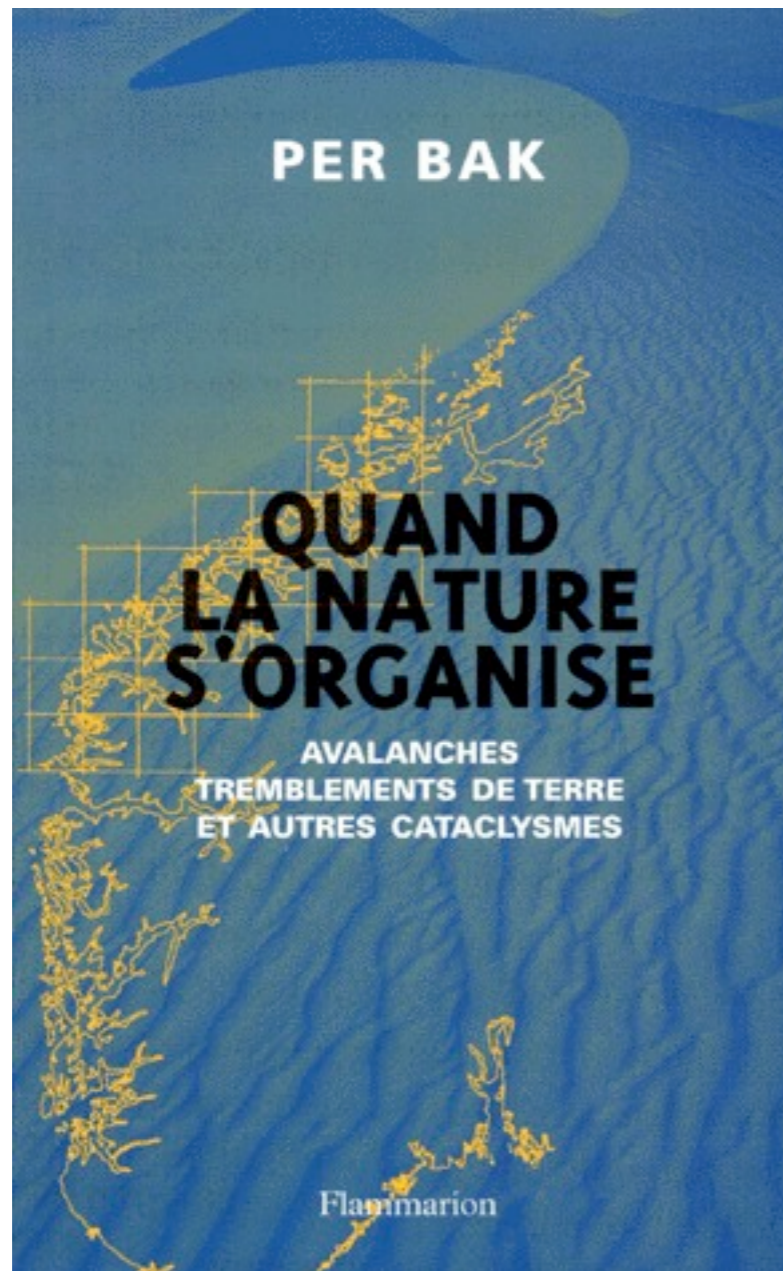
Mandelbrot (1959)



Benoît Mandelbrot

Les fluctuations de la production économique sont inversement proportionnelle à leur fréquence.

Criticalité auto-organisée



Per Bak

1996: L'économie est un processus de criticalité auto-organisée (SOC).
(avalanches en 1/f)

La notion de température

Définition de la température en mécanique statistique:

$$\frac{1}{T} = \left. \frac{\partial S}{\partial E} \right|_{V,N}$$

« The inverse of the temperature is the cost of buying energy from the rest of the world*. »

James P. Sethna (2006)

*One must accept entropy $\delta E / T$ when buying energy δE .

Application à l'économie

Température T d'une économie:

Inverse de la quantité d'information nécessaire pour obtenir une certaine quantité d'énergie.

Exemples:

Sociétés primitives: information nécessaire pour trouver de la nourriture. Plus la nourriture est abondante plus la température est élevée.

Sociétés évoluées: coût de l'énergie. Plus l'énergie est bon marché plus la température est élevée.

Température critique

- $T < T_c$ L'intérêt de chacun coïncide avec l'intérêt général. La **coopération** l'emporte sur la compétition. Idéologie favorisant les égalités sociales. Entreprises majoritairement publiques.
- $T = T_c$ Équilibre public/privé.
- $T > T_c$ Les intérêts particuliers divergent. La **compétition** l'emporte sur la coopération. Idéologie favorisant les inégalités sociales. Entreprises majoritairement privées.

La condensation des richesses

À l'état critique la distribution des richesses suit une loi de puissance (invariance par changement d'échelle de l'opalescence critique).

Distribution de Pareto (1896):
20% de la population possède 80% des richesses.



Vilfredo Pareto

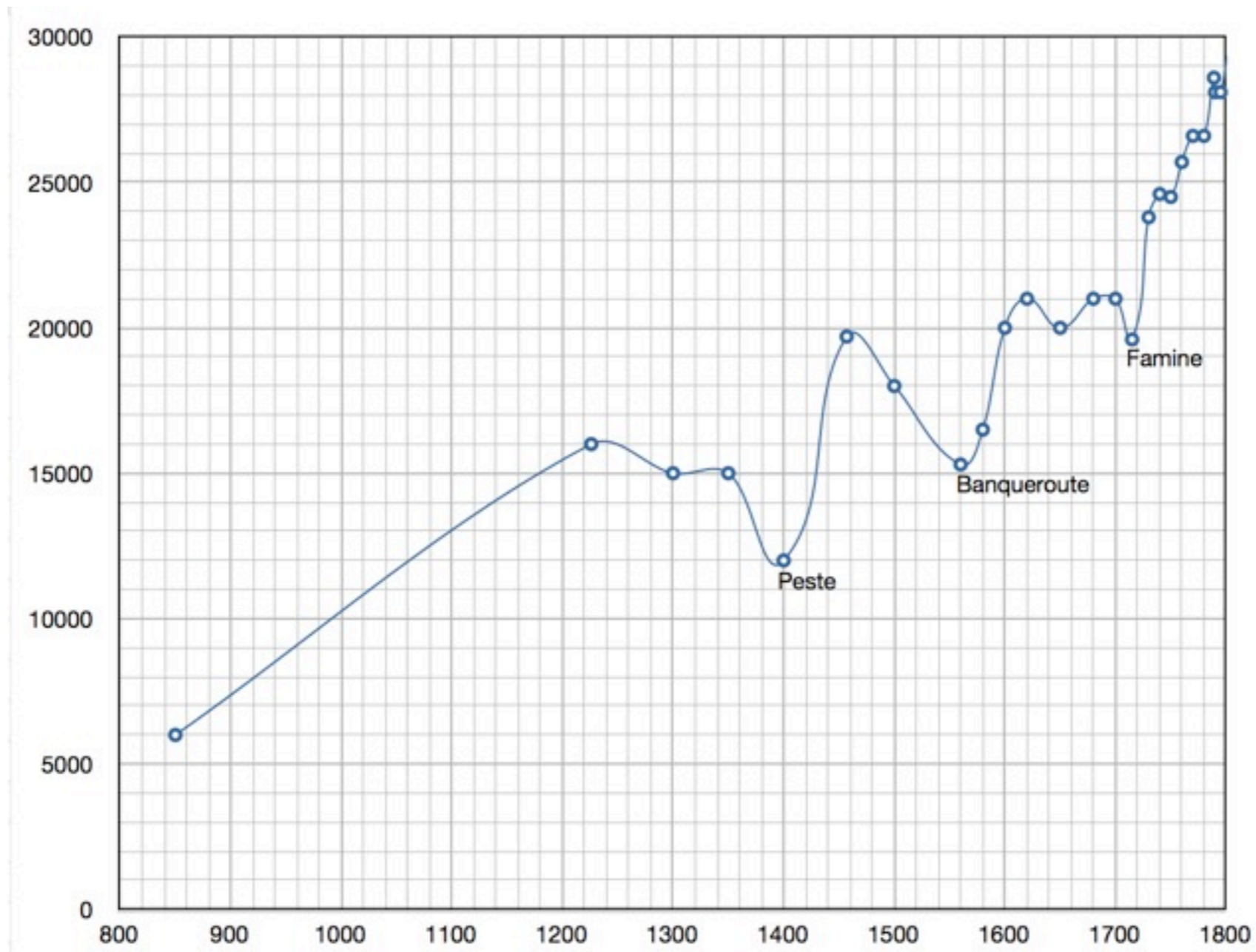
Les fluctuations économiques

Les processus économiques sont de nature instable (fluctuations en $1/f$) d'où la *nécessité de les réguler*.

Régulation monétaire: maintenir la température de l'économie au point critique. Analogie: rôle de l'insuline en biologie.

Régulation des échanges: Analogie hydrodynamique: maintient des écoulements dans une zone laminaire.

Les fluctuations démographiques



L'évolution démographique illustre SOC et MEP

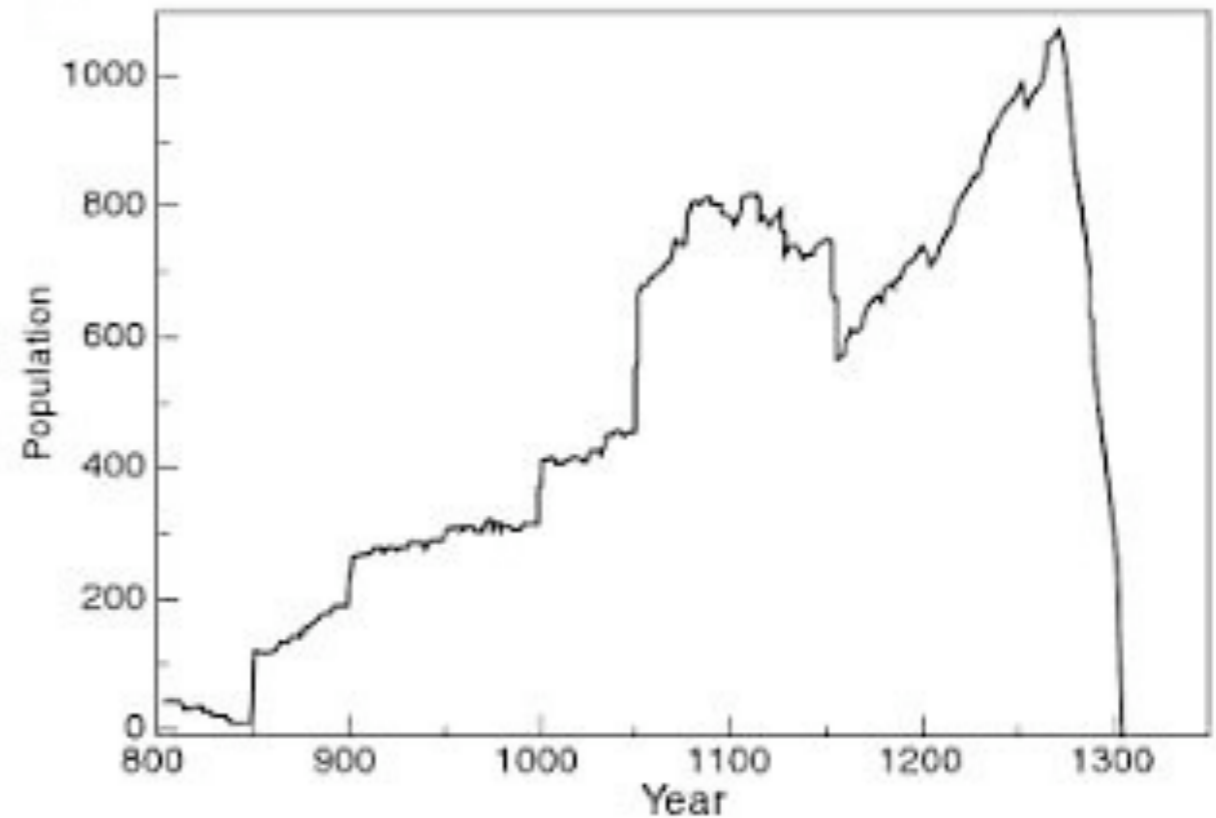
Données archéologiques

« L'histoire s'accélère [...] la population ne cesse de croître. [On assiste à] une montée *en dents de scie* des inégalités sociales [...] à une alternance, selon les régions, de sociétés fortement inégalitaires et de sociétés qui le sont moins. [...] Cette alternance [...] concerne toute l'Europe »

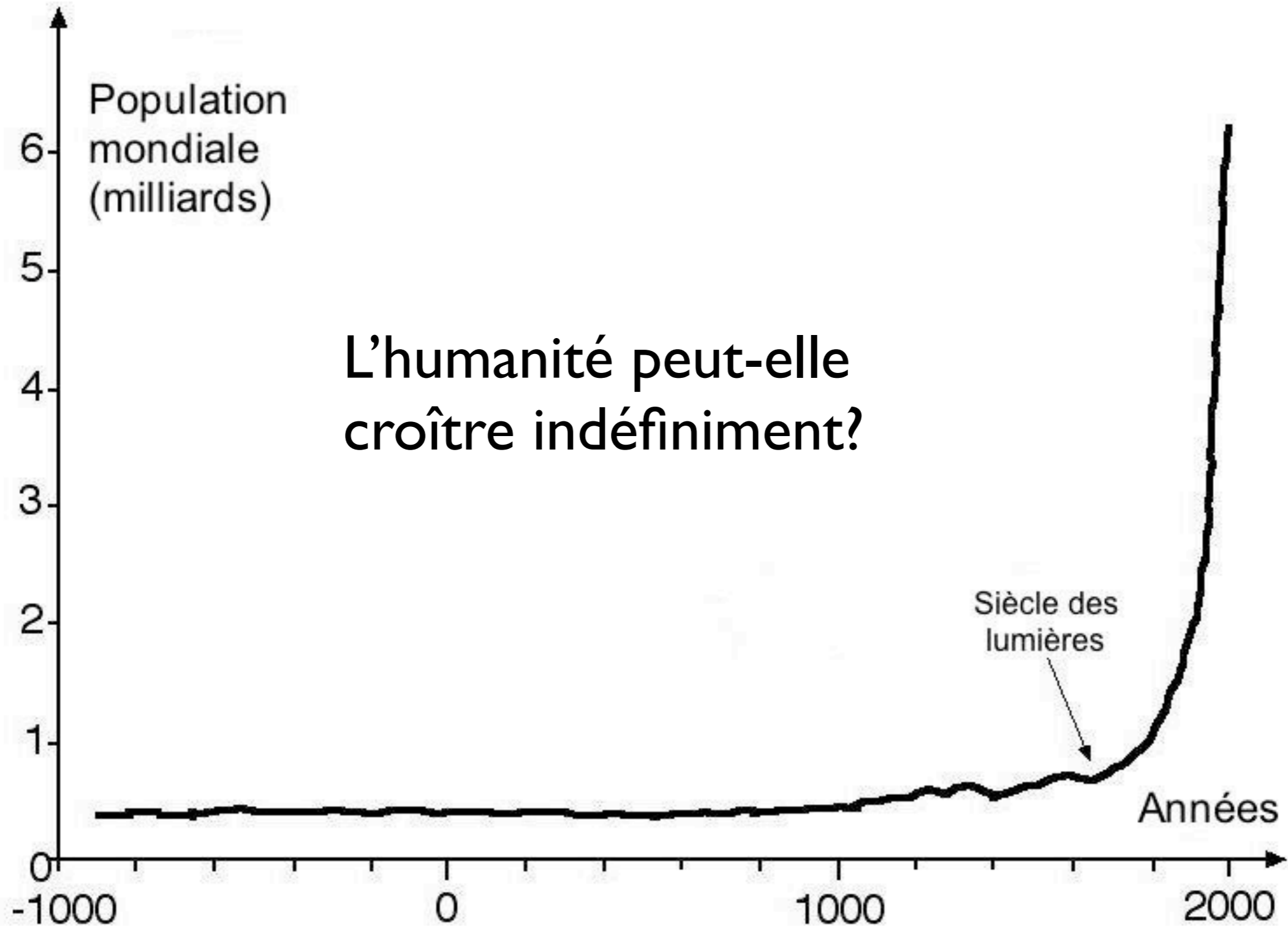
Jean-Paul Demoule, On a retrouvé l'Histoire de France (Robert Laffont, 2012)

L'effondrement de sociétés

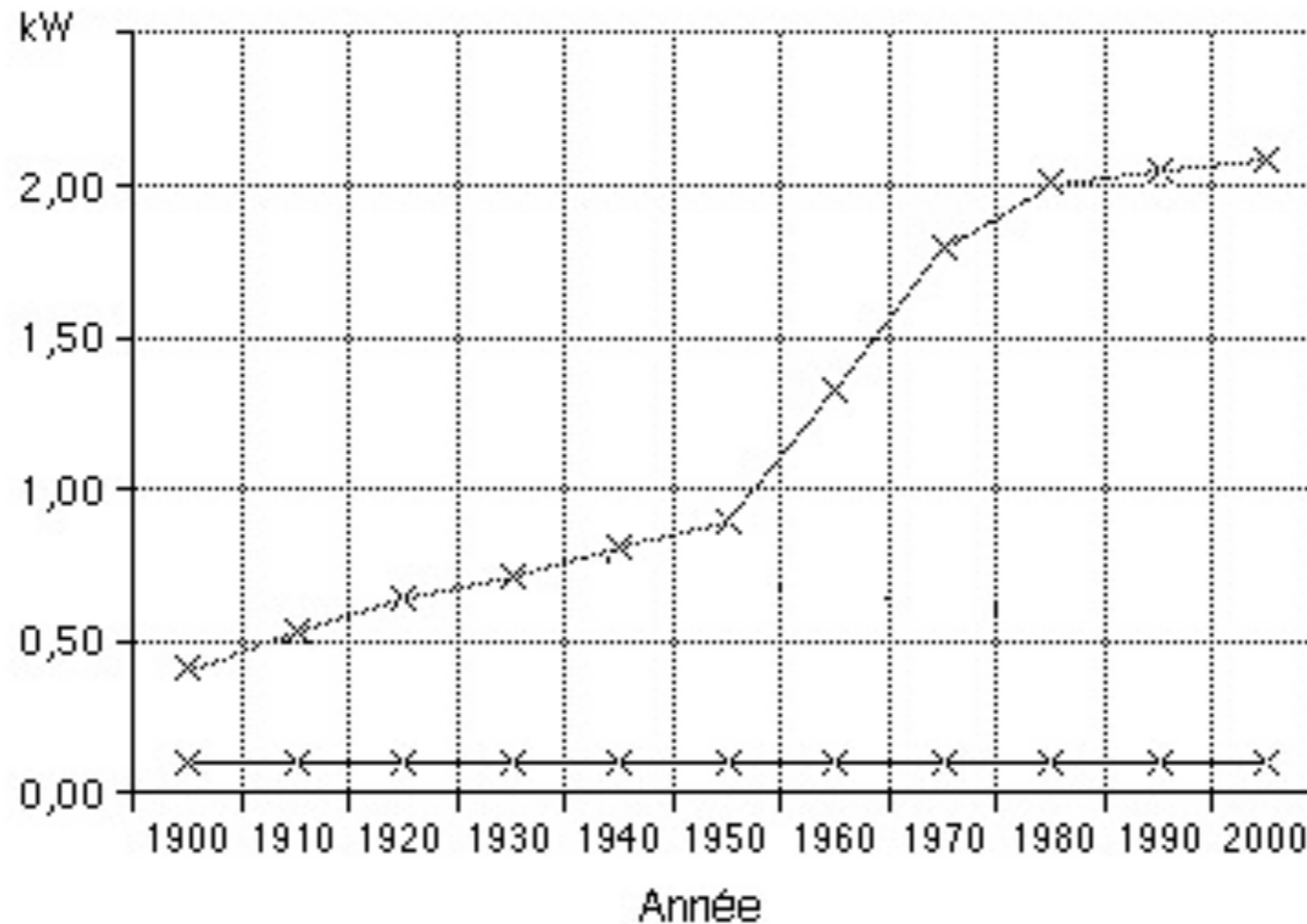
Dans l'antiquité, de très nombreuses civilisations se sont effondrées. Parmi les exemples les plus connus: les Pascuans, les Anasazis, les Mayas, les Sumériens.



La croissance démographique mondiale



L'évolution actuelle des pays développés



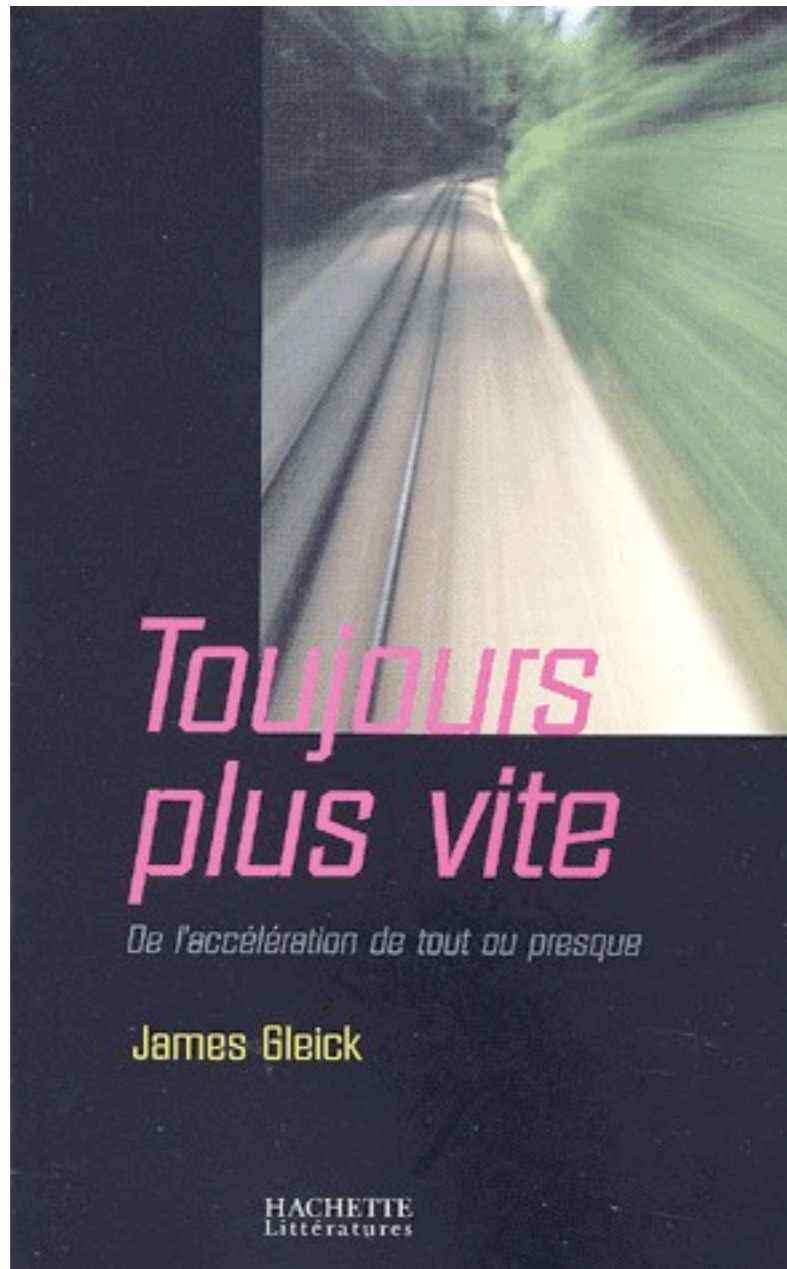
Évolution de la puissance mondiale dissipée par individu au cours du XX^e siècle

L'évolution actuelle des pays développés

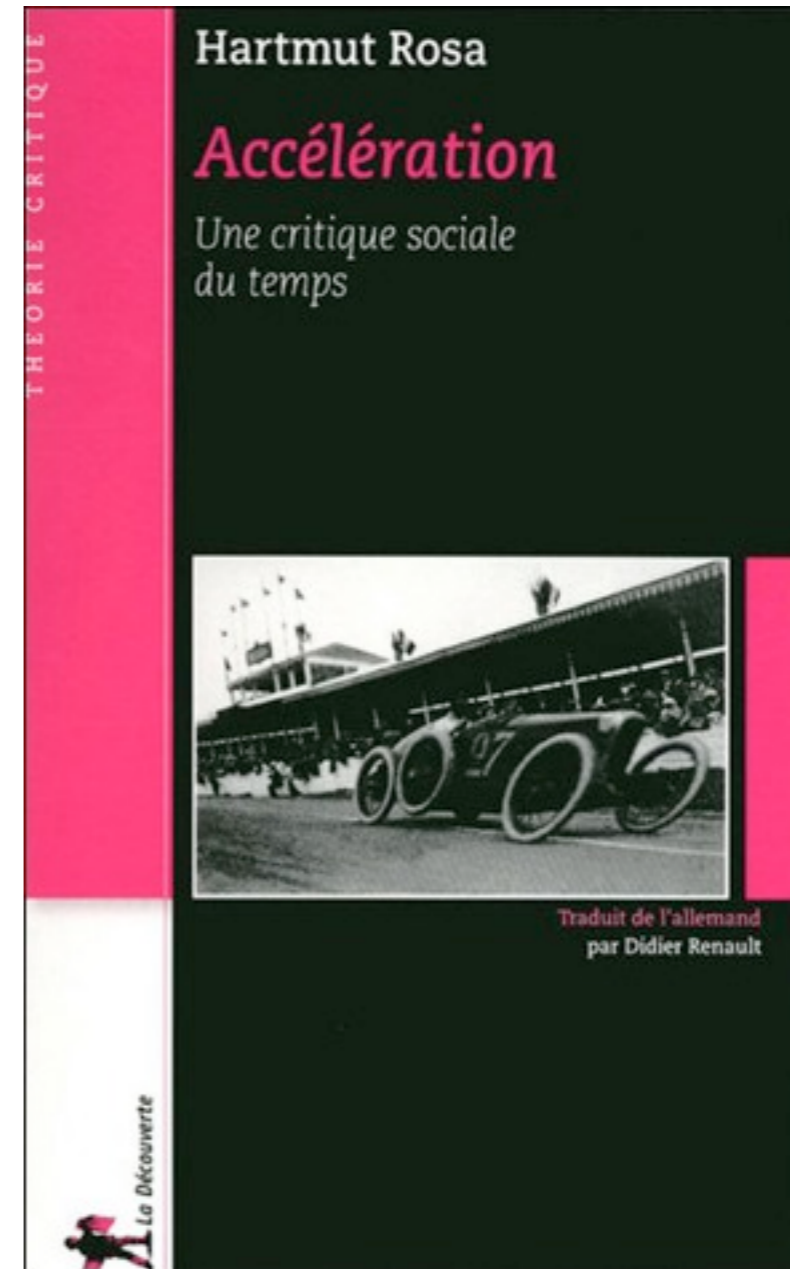
Les pays développés sont dans une phase supercritique ($T > T_c$) caractérisée par:

- un ralentissement de la croissance.
- une montée de l'endettement.
- une évolution accélérée de l'environnement.
- un individualisme et une compétition exacerbés.
- une ségrégation culturelle (société, école).

L'effet de la reine rouge



2001



2010

L'effet de la reine rouge

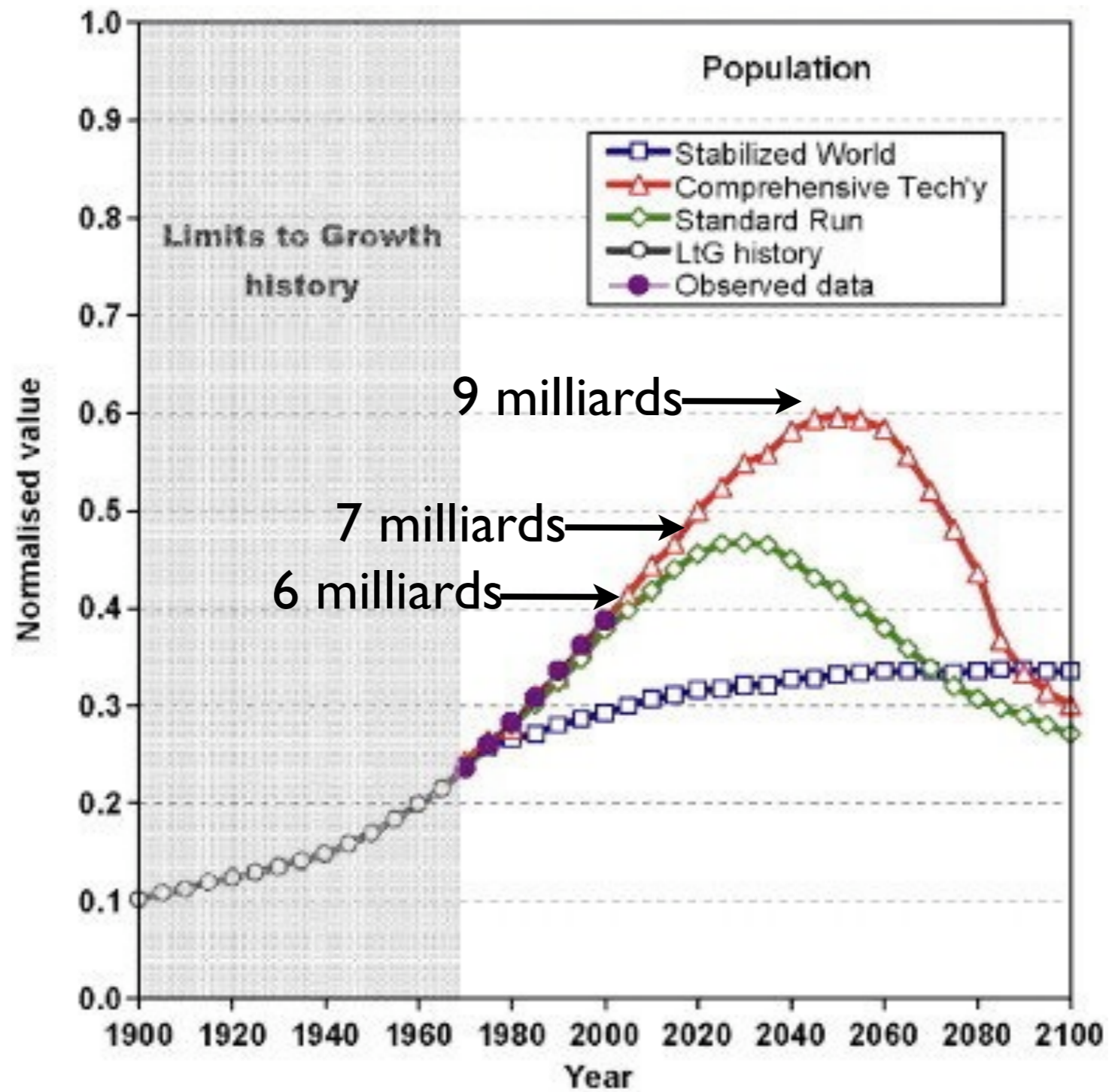
- Les pays développés dépensent une fraction sans cesse croissante de leur budget pour maintenir en place les structures existantes devenues inadaptées.
- Dans une société de compétition, celui qui ralentit se fait doubler par les autres.
- C'est la course vers le précipice du film de James Dean: La fureur de vivre (Rebel without cause).

Exemple d'effondrement

Gare de
Detroit
(USA)

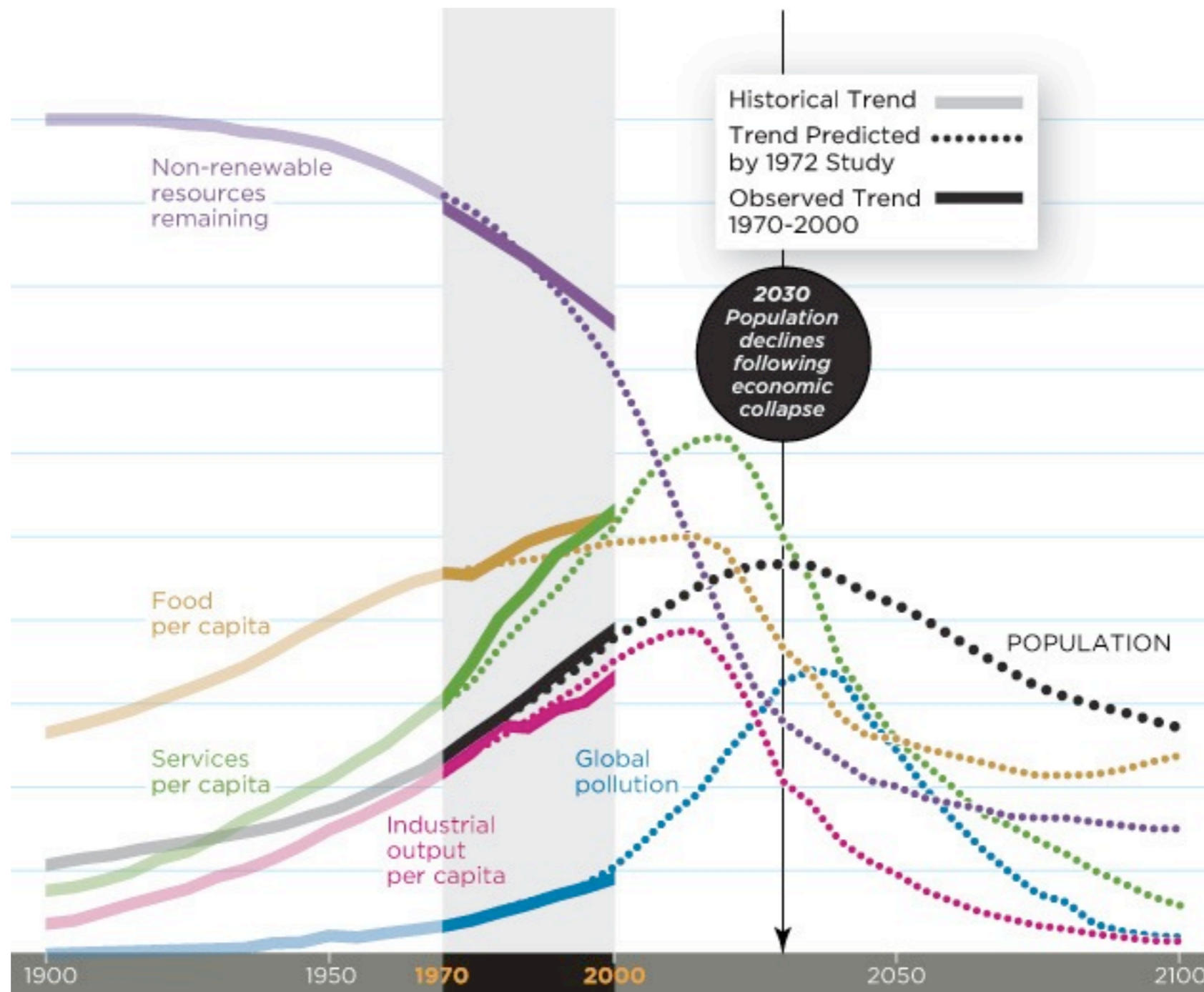


Prévisions du Club de Rome



Démographie

Prévisions du Club de Rome



Prévisions générales

Seule solution pour une humanité durable

Sadi Carnot (1824):

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.

Soleil: 6000°K



Ciel nocturne: 3°K

Le rendement est maximal lorsque toutes les transformations sont réversibles.

Fin