

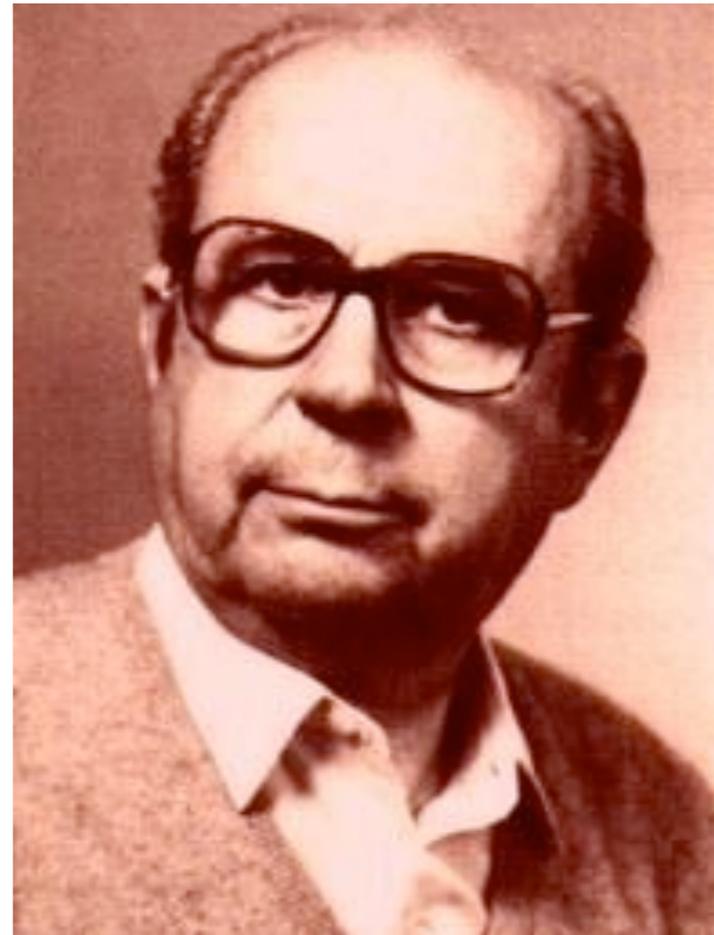
Thermodynamique des transitions économiques

François Roddier

Exposé du 19 septembre 2017
à Toulouse

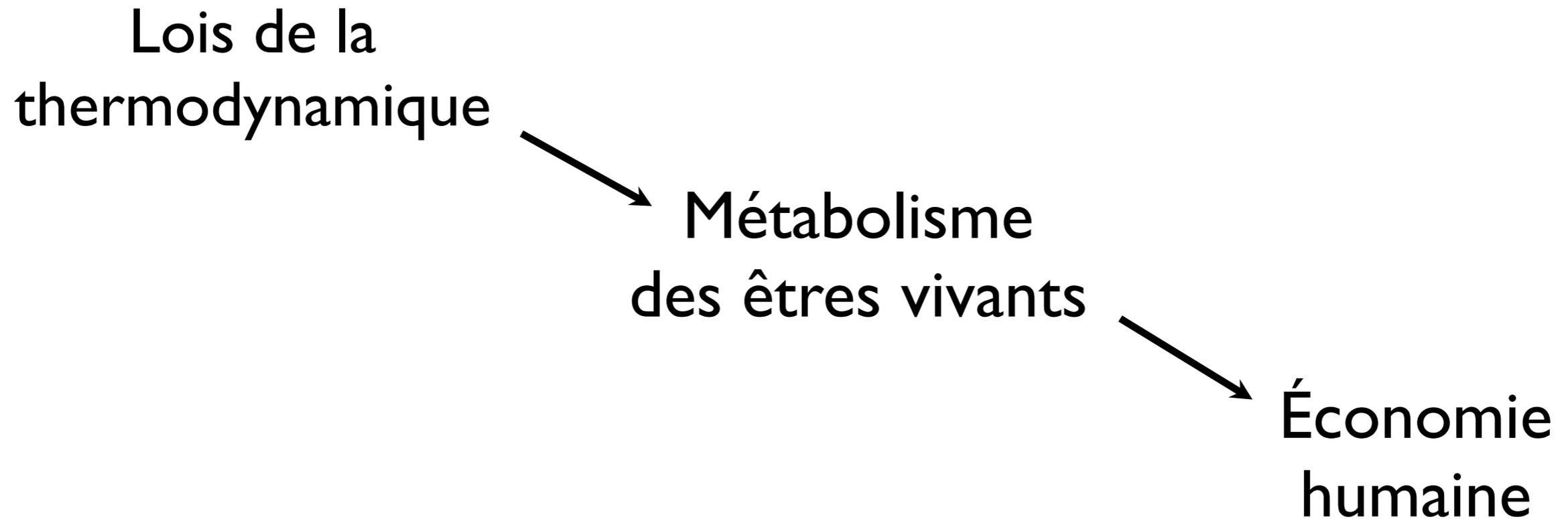
Nicholas Georgescu-Roegen

1971: « La thermodynamique et la biologie sont les flambeaux indispensables pour éclairer le processus économique. »



Nicholas Georgescu-Roegen
(1906-1994)

De la thermodynamique à l'économie



L'économie étudie le métabolisme des sociétés humaines

Références

(F. Roddier)

- Thermodynamique et économie: des sciences exactes aux sciences humaines. *Res-Systemica*, vol. 12, article 3, nov. 2014.
- La thermodynamique des transitions économiques. *Res-Systemica*, vol. 14, article 1, sept. 2015.
- L'équation de van der Waals appliquée à l'économie. *Res-Systemica*, vol. 16, article 2, printemps 2017.

Fondements théoriques

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.

Loi de Carnot

Sadi Carnot (1824):

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



Sadi Carnot

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

Loi de Carnot

Énoncé moderne: Si un moteur thermique reçoit une quantité de chaleur Q_1 d'une source chaude à la température absolue T_1 et rend une quantité de chaleur Q_2 à une source froide à la température absolue T_2 , alors:

$Q_2/T_2 = Q_1/T_1$ si les transformations sont réversibles.

$Q_2/T_2 > Q_1/T_1$ si les transformations sont irréversibles.

Le travail fourni est: $W = Q_1 - Q_2$



Sadi Carnot

L'entropie de Clausius

Clausius (1865) donne le nom d'*entropie* à la quantité Q/T .

Les transformations réversibles conservent l'*entropie*.

Les transformations irréversibles augmentent de l'*entropie*.

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



Rudolf Clausius
(1822-1888)

Mécanique statistique

Systemes fermés (isolés)



Ludwig Boltzmann
(1844 - 1906)

Systemes ouverts (traversés
par un flux d'énergie)



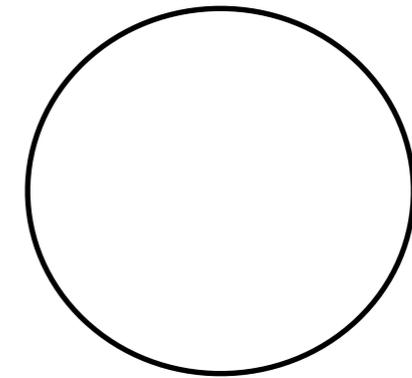
Ilya Prigogine
(1917-2003)

Systemes fermés (isolés)

Un système fermé tend vers l'équilibre *thermodynamique*:

Il se désorganise: toute structure (différences) tend à disparaître.

Tout mouvement s'arrête (mort): (équilibre thermodynamique).



Systeme fermé

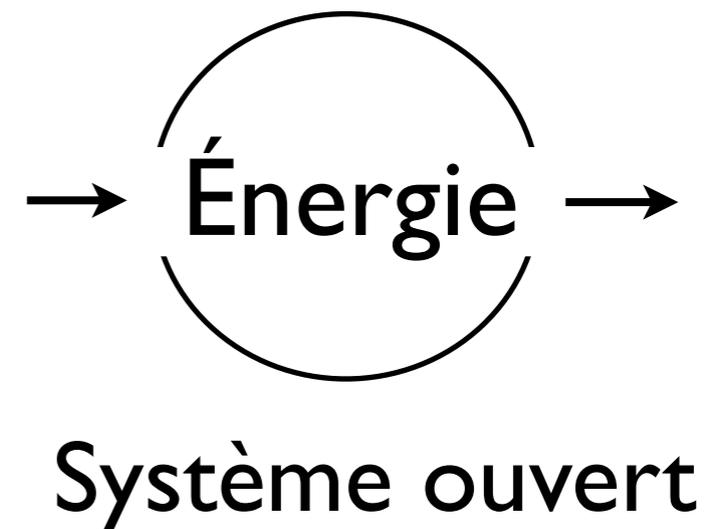
Il y a perte irréversible d'*information* (*désorganisation* = augmentation d'*entropie*).

Systemes ouverts

Un systeme ouvert est en *déséquilibre thermodynamique*:

Il s'auto-organise: des structures ordonnées apparaissent.

Il y a apparition de mouvements:
(déséquilibre thermodynamique).



Il y a apparition d'*informations nouvelles*
(diminution d'*entropie*) d'où l'imprédictabilité.

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 de matière ou d'énergie.

Exemples de structures dissipatives

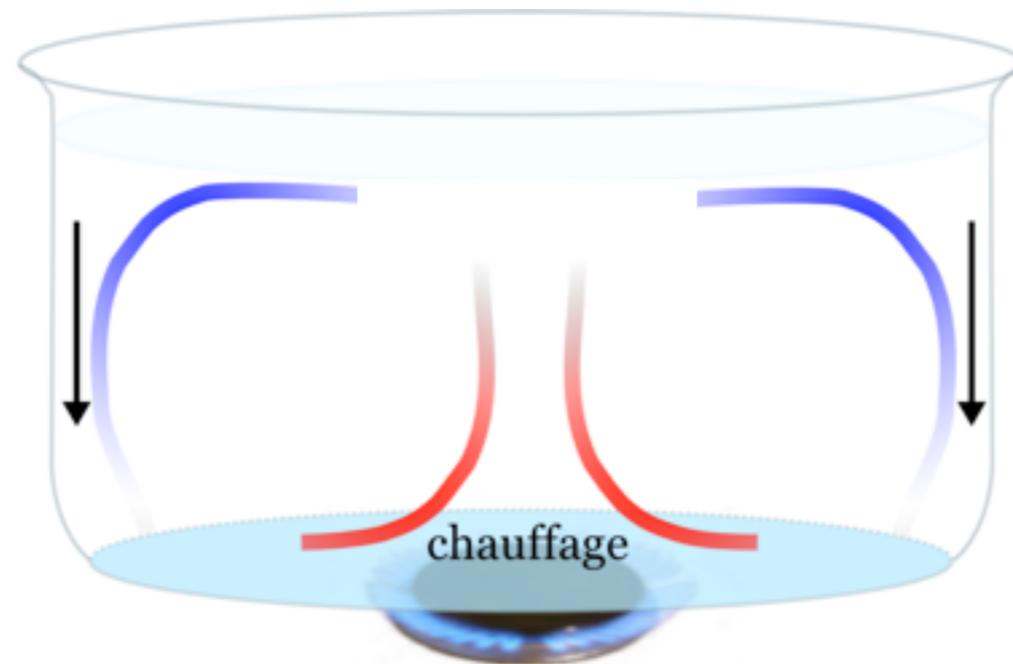
- L'atmosphère terrestre,
- *Un cyclone*
- Une espèce animale ou végétale,
- *Un organisme vivant*
- **Une société humaine**
- *Un être humain*

L'auto-organisation des structures dissipatives

- **Pourquoi s'auto-organisent-elles?**
Elles s'auto-organisent pour dissiper l'énergie.
- **Comment s'auto-organisent-elles?**
En produisant du travail mécanique qu'elles dissipent.

Une structure dissipative élémentaire: la convection

Source froide



Source chaude

Les structures dissipatives atmosphériques

Source froide

Cycles



(Cyclone)

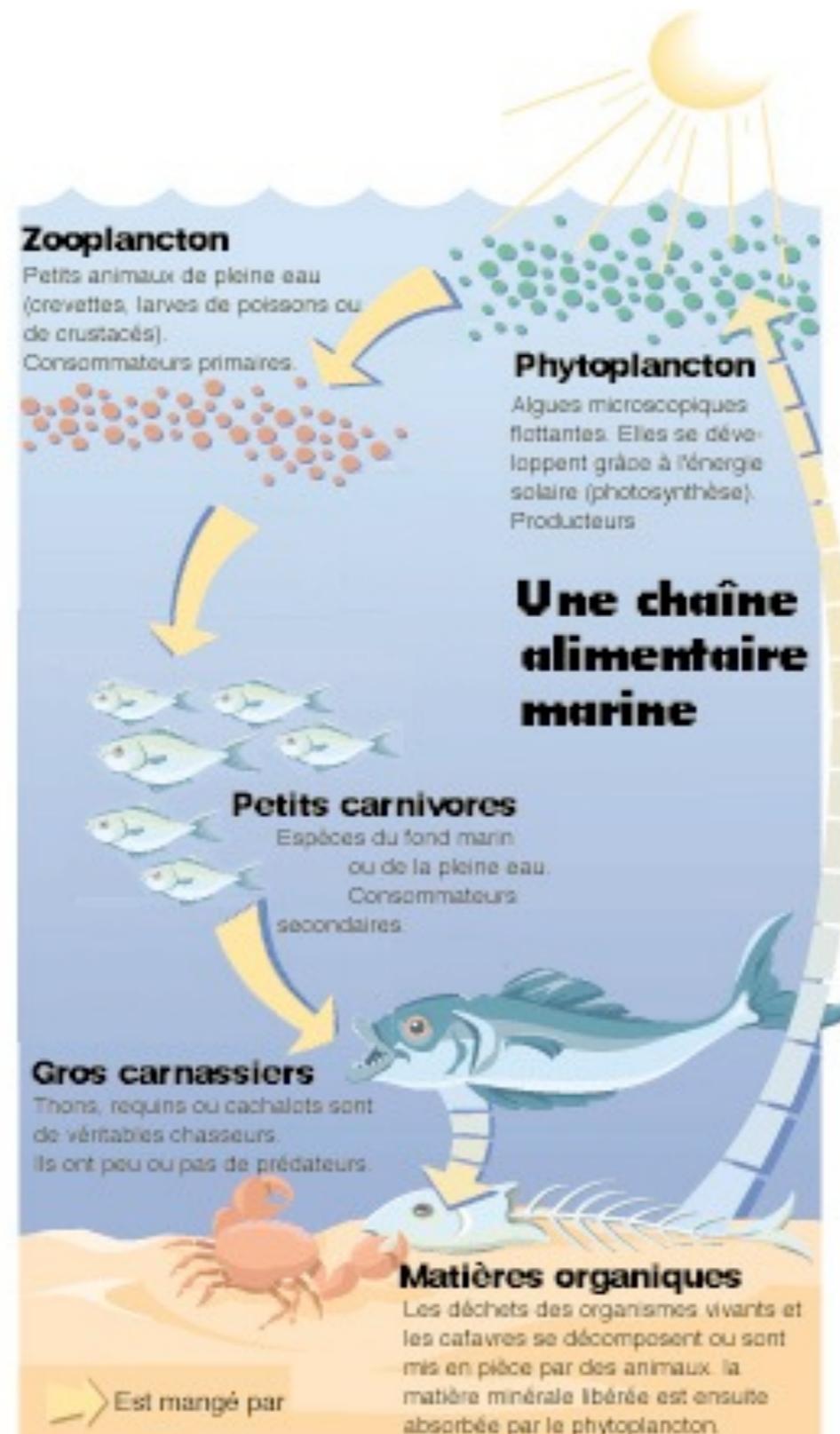
Source chaude

sont des machines thermiques naturelles.

Les structures dissipatives vivantes

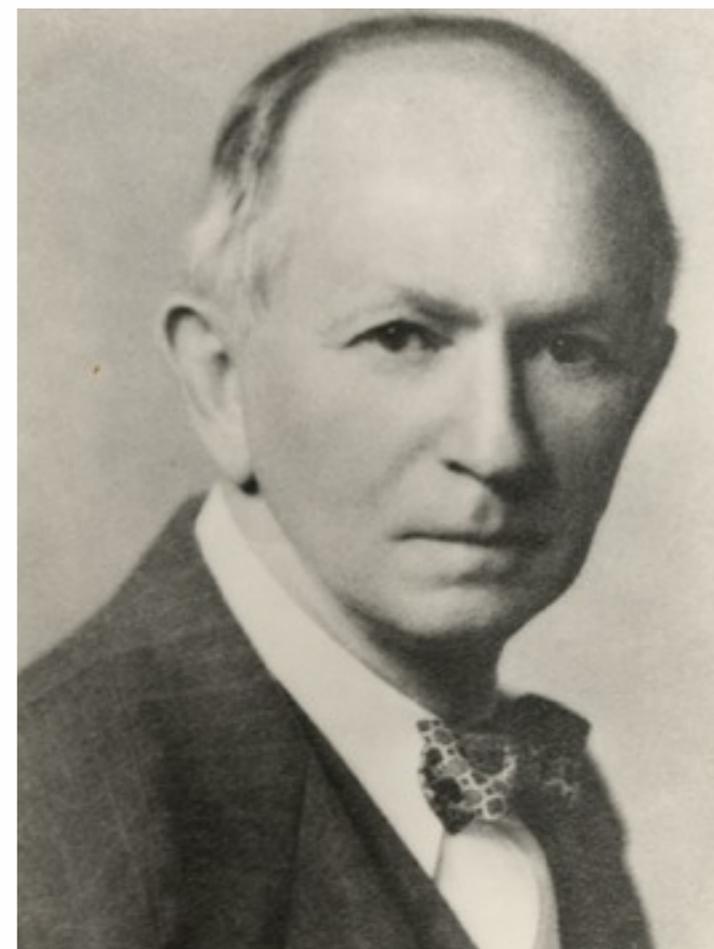
Source froide
(3° K)

Source chaude
(6.000° K)



Alfred Lotka

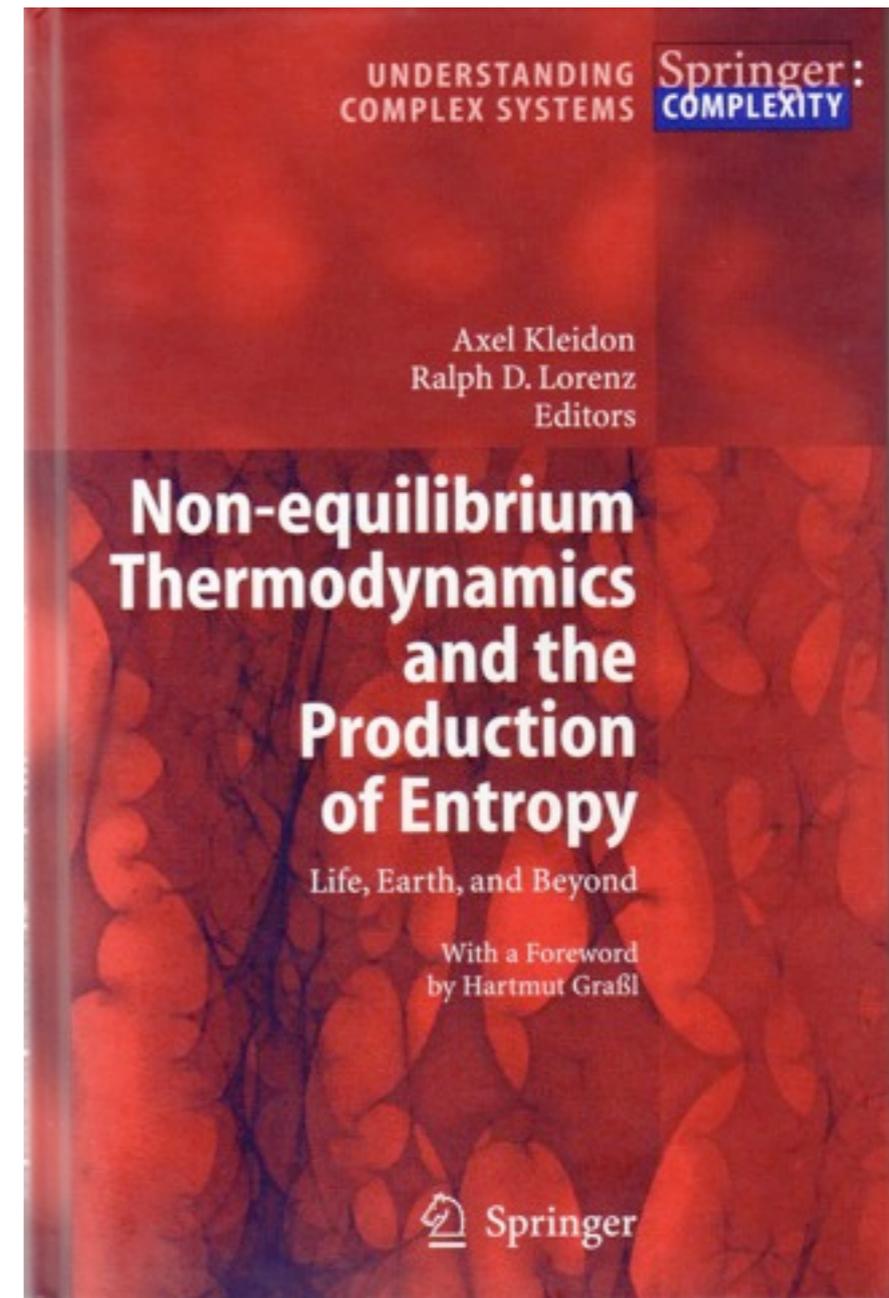
1922: La sélection naturelle favorise les organismes qui dissipent le plus d'énergie (produisent le plus d'*entropie*). Elle agit comme une *troisième loi de la thermodynamique*.



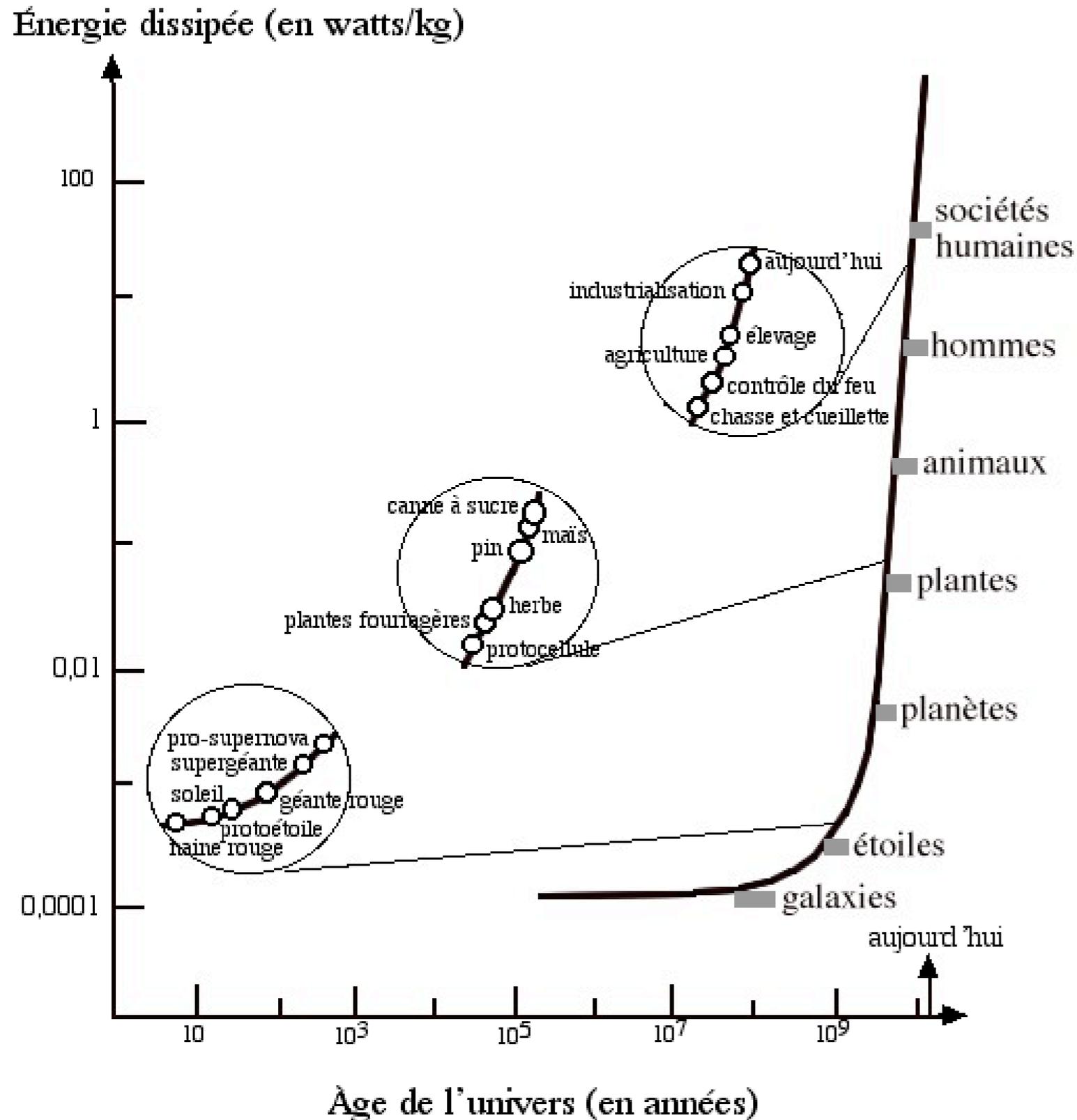
Alfred Lotka
(1880 – 1949)

Loi de production maximale d'entropie (2003)

Les structures dissipatives
tendent à maximiser la vitesse à
laquelle l'énergie se dissipe.



L'évolution de l'univers



Éric Chaisson (2001)

Per Bak (1987)

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

Les structures dissipatives s'auto-organisent à la manière des transitions de phase*.



Per Bak

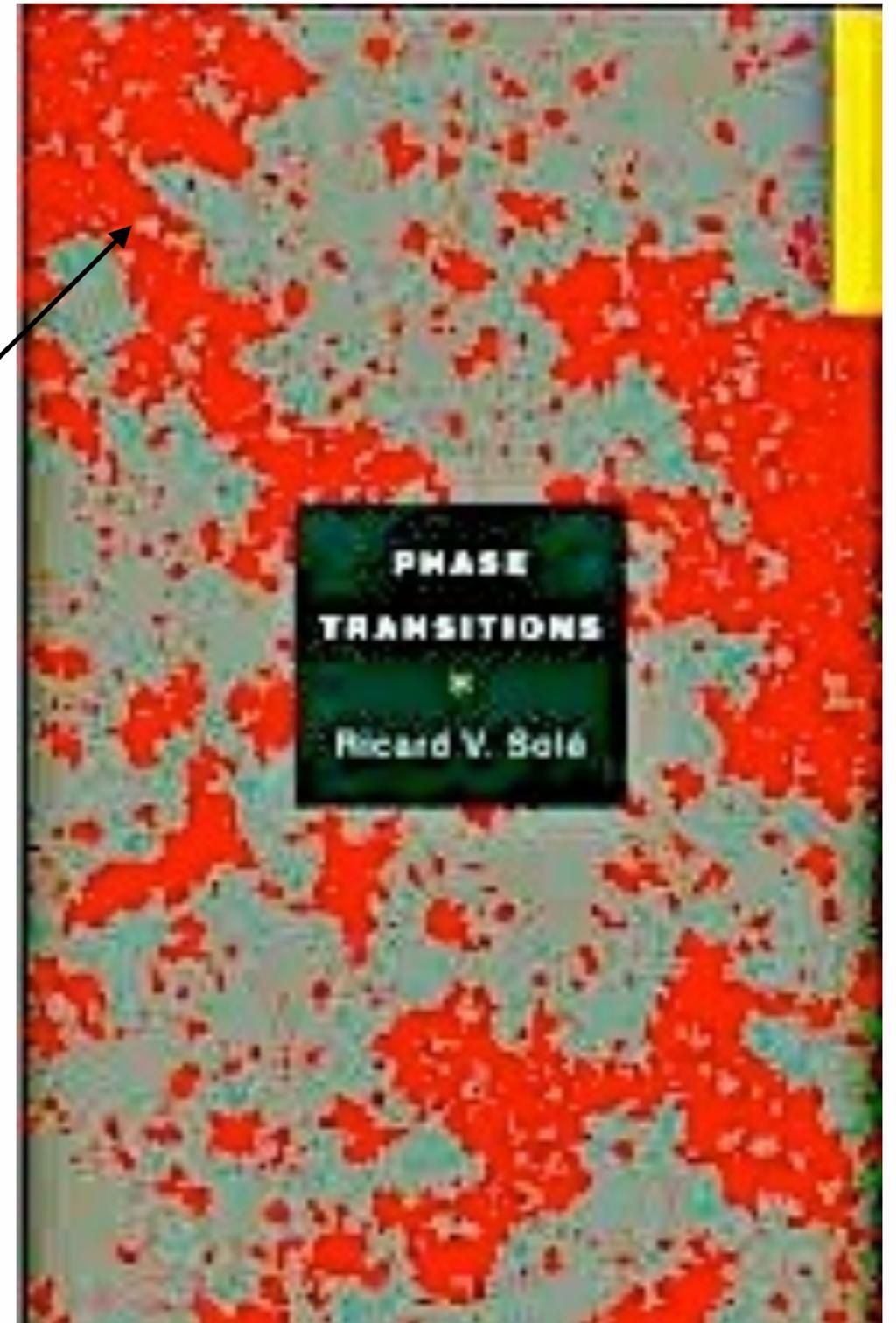
* Changement de structure d'une substance

Ricard V. Solé (2011)

Quelques têtes de chapitre:

- Transitions de phase
- Bifurcations
- Percolation
- Origines de la vie
- Dynamique des virus
- Réseaux de gènes
- Dérives écologiques
- Intelligence collective
- **Effondrements sociaux**

*Domaines
d'Ising*

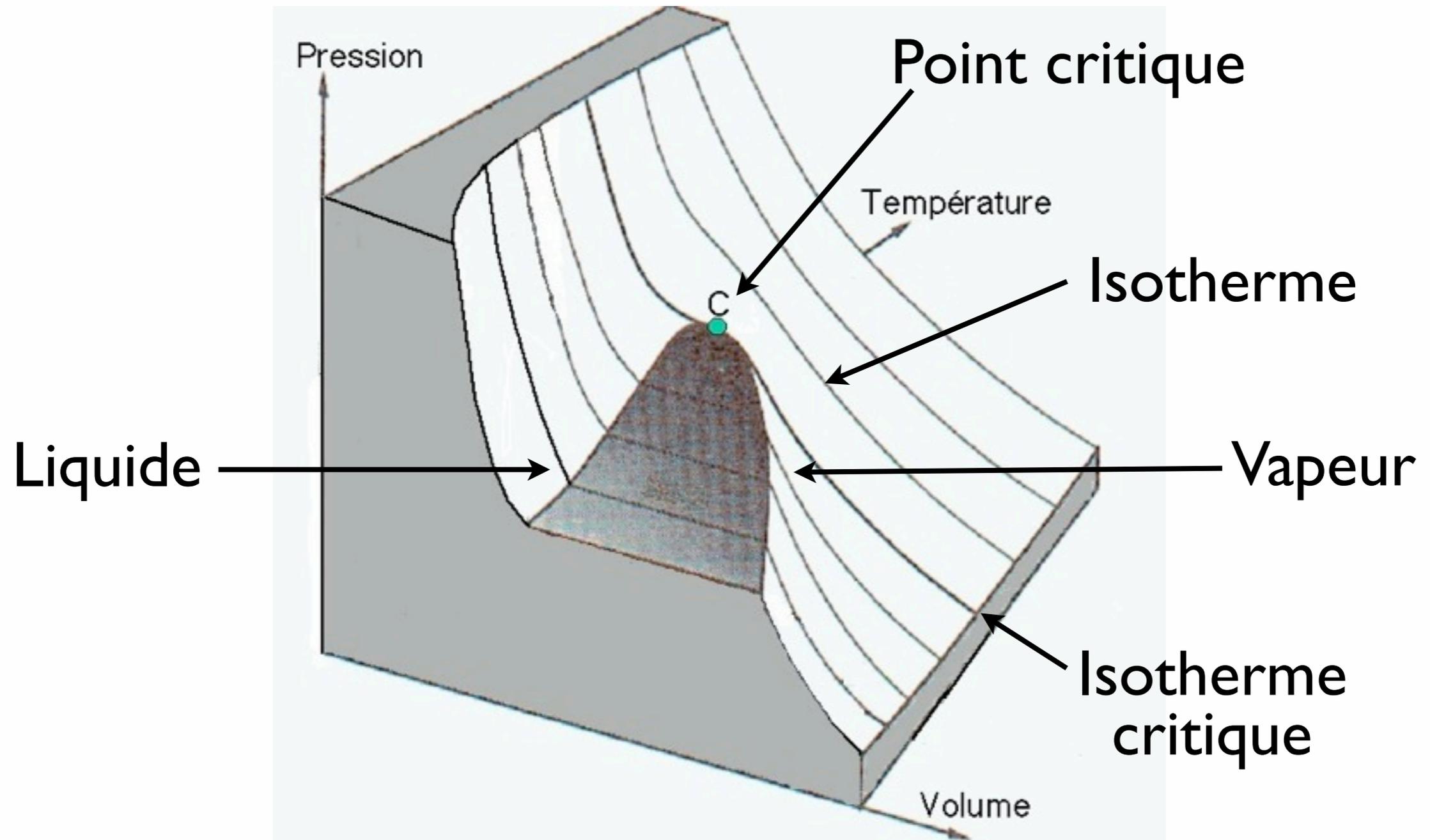


Transition de phase abrupte



(Nécessité d'un germe de cristallisation)

Transition de phase continue



Per Bak (1987)

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

Les structures dissipatives s'auto-organisent en oscillant autour d'un "point critique".



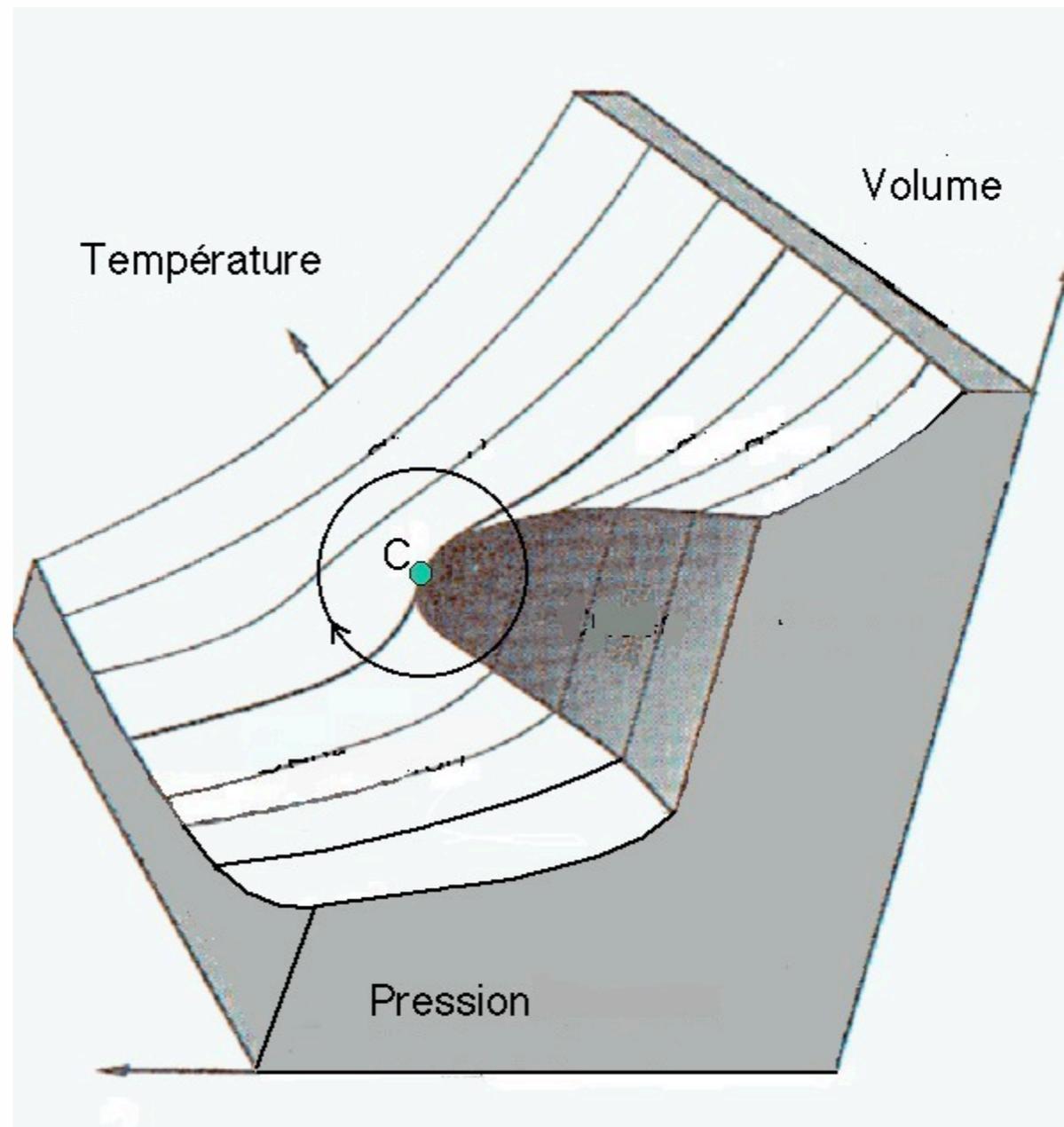
Per Bak

Ils donnent à ce processus universel le nom de *criticalité auto-organisée*.

Criticalité auto-organisée

Les structures dissipatives décrivent des cycles autour d'un "point critique" C.

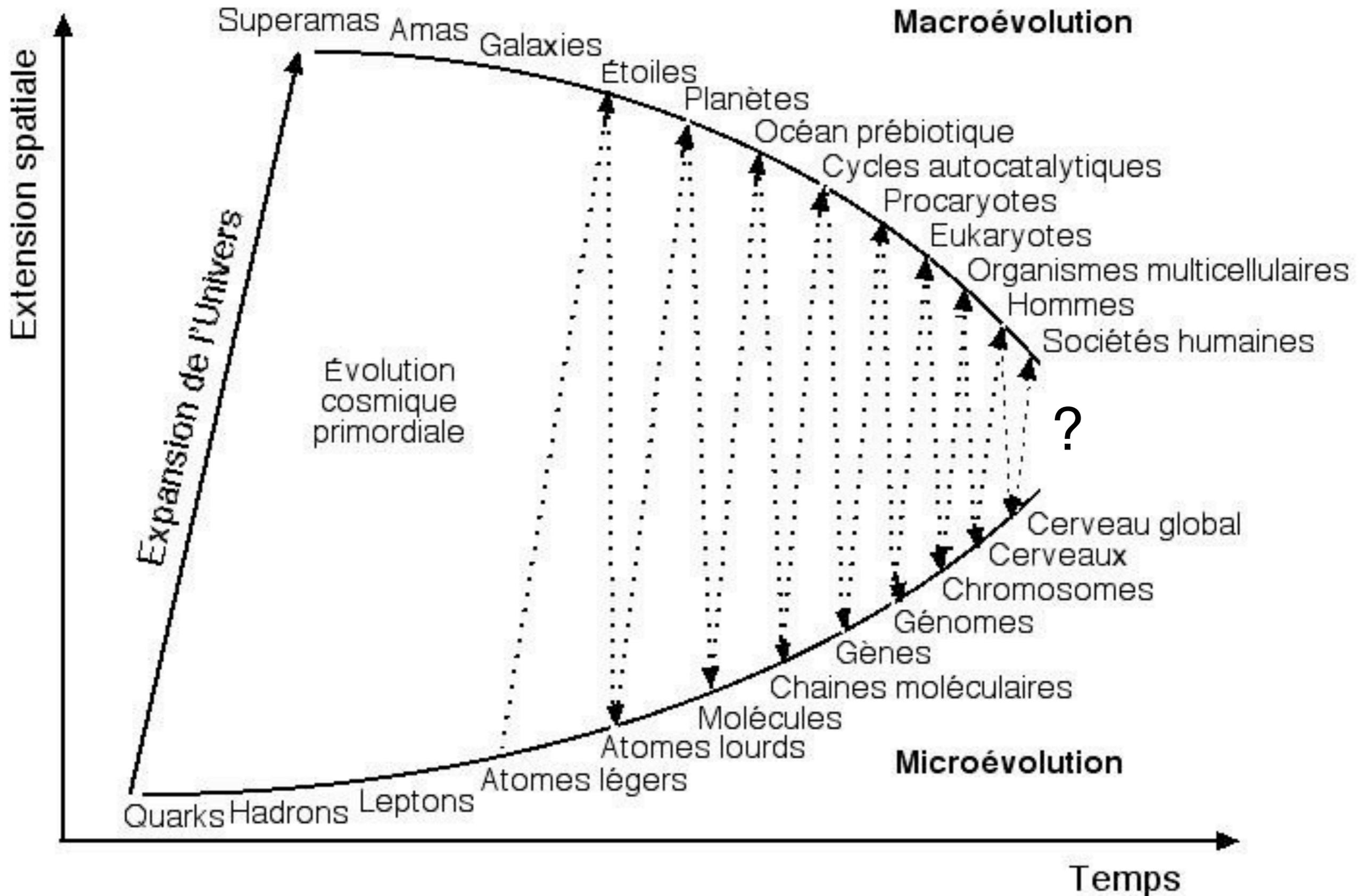
Transition
continue
(Macroévolution)



Transition
abrupte
(Microévolution)

L'auto-organisation de l'univers

(Erich Jantsch, 1980)



Application à l'économie

Frederick Soddy (1926)

Le bien-être se mesure en terme de flux d'énergie dissipée par les individus dans une société.

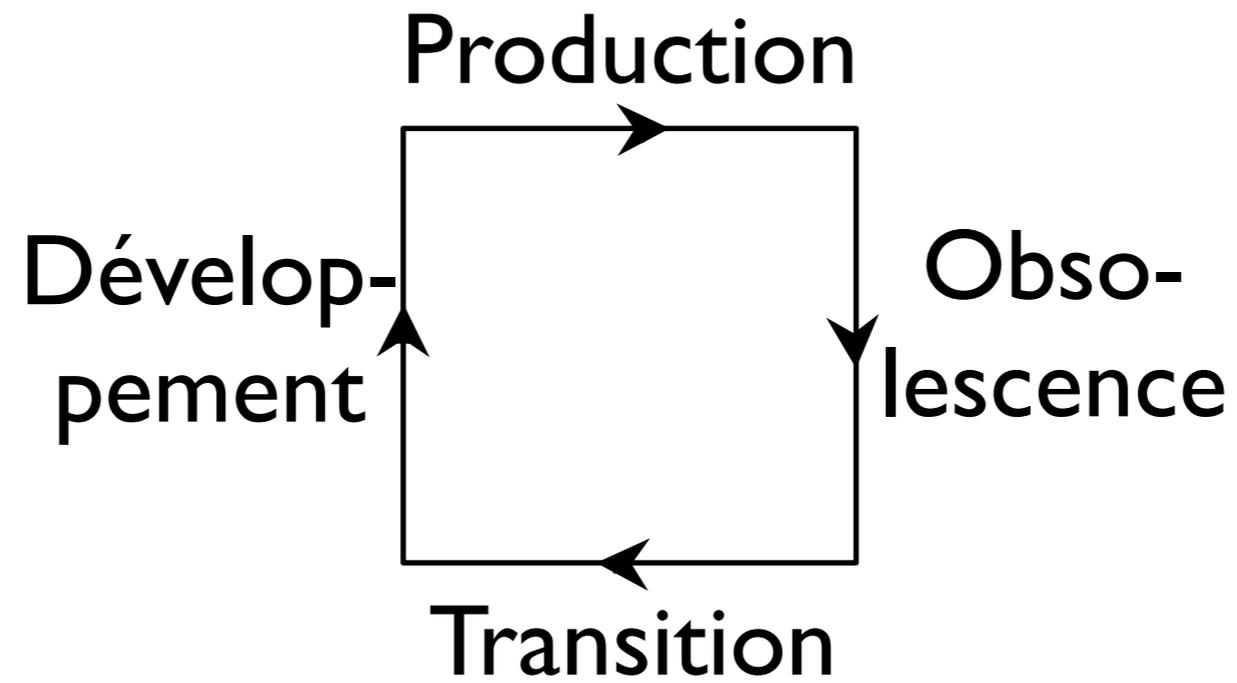
- ➔ En cherchant à maximiser son bien-être, l'humanité maximise le flux d'énergie qu'elle dissipe.



Frederick Soddy
(1877-1956)

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

Cycle fondamental: le cycle de production

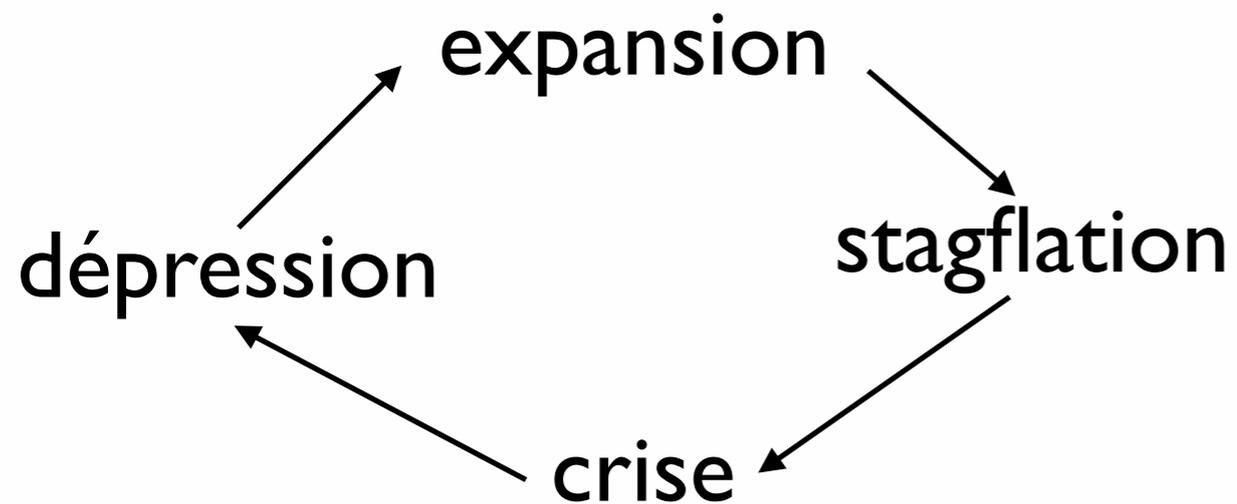


Période des cycles

Petite entreprise.....	Cycles de Kitchin.....	3 à 5 ans
Moyennes entreprises...	Cycles de Juglar.....	7 à 11 ans
Groupe d'entreprises....	Cycles de Kuznets.....	15 à 25 ans
Échelle d'un pays.....	Cycles de Kondratiev..	45 à 60 ans
Évolution historique....	Cycles séculaires.....	200 à 300 ans

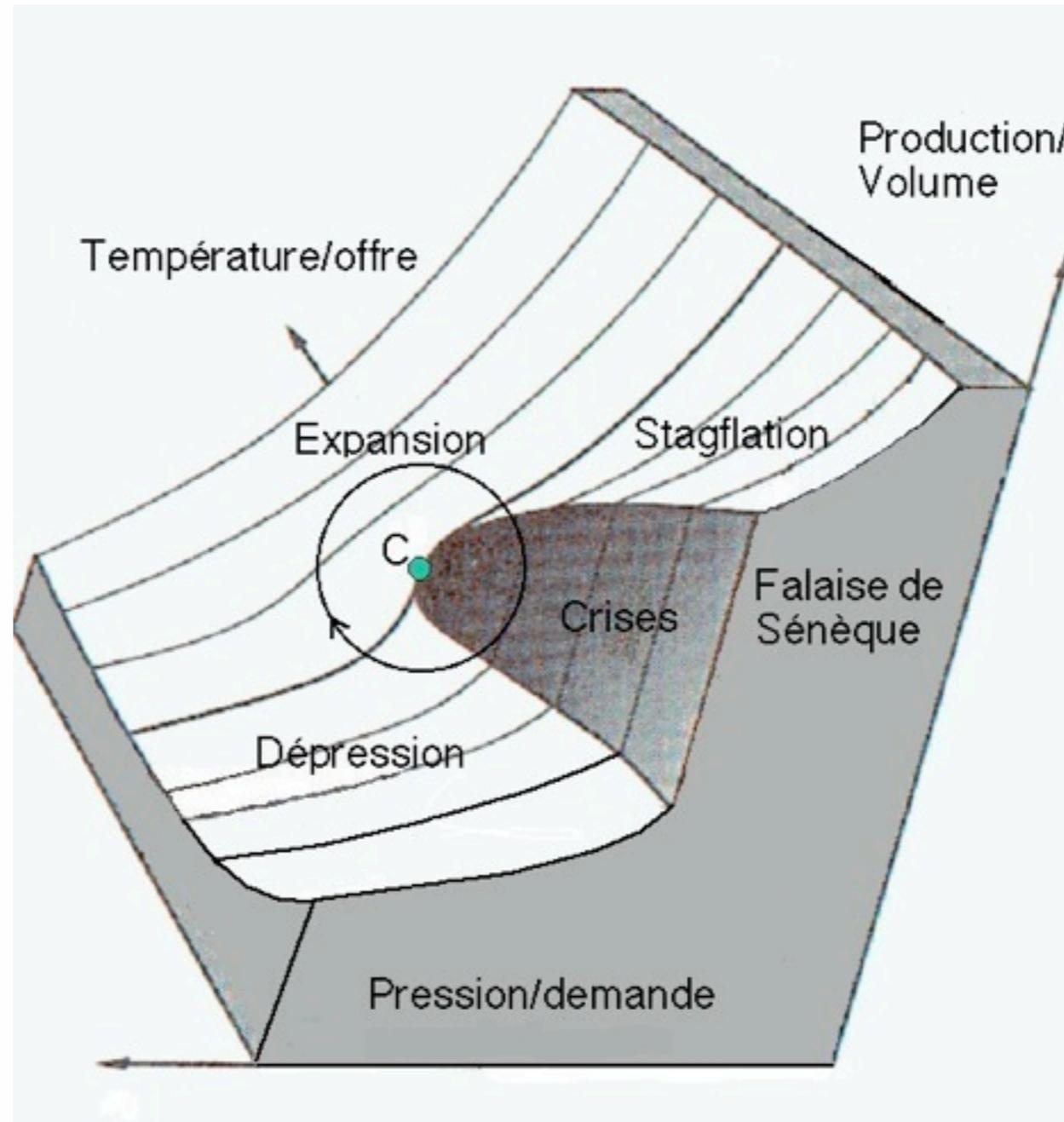
Cycles historiques

Peter Turchin & Sergey A. Nefedov ont mis en évidence 8 cycles économiques très semblables dans 4 pays différents et à 6 époques différentes:



Secular cycles
(Princeton, 2009)

Interprétation en termes de criticalité auto-organisée



Criticalité auto-organisée

L'universalité du processus implique
une *renormalisation* des grandeurs
physiques comme la température et
la pression.

Justification théorique (renormalisation)

Relation fondamentale: $dU = -PdV + TdS$

<i>Grandeur</i>	<i>Fluide</i>	<i>Économie</i>
U	Énergie interne	Flux d'énergie
$P = \partial U / \partial V$	Pression	Valeur d'usage
V	Volume	Flux de production
$T = \partial U / \partial S$	Température	Valeur d'échange
S	Entropie	Flux monétaire (*)

(*) La monnaie est l'*information* qui permet à l'économie de s'organiser.

Pression économique

$$P = \partial U / \partial V$$

Elle est d'autant plus grande que le volume de production dV permet de dissiper plus d'énergie dU .

P est une *pression sociale* au sens d'Émile Durkheim (grandeur qui mesure le comportement statistique des individus en société).

P mesure la *valeur d'usage* de la production c'est-à-dire son *utilité*.

Température économique

$$T = \partial U / \partial S$$

Elle est d'autant plus grande que le coût dS de l'énergie dU est plus faible.

T est une mesure de l'activité économique. Elle mesure "l'agitation" des individus comme la température d'un gaz mesure l'agitation de ses molécules.

Exemple du sucre sur une fourmilière.

L'offre et la demande

La quantité $P.dV$ représente une demande élémentaire (plus ou moins “*pressante*” suivant la valeur de P) pour un volume de production dV . Par extension, on qualifiera P de “*demande*”.

La quantité $T.dS$ représente une offre (plus ou moins “*intéressante*” suivant la valeur de T) pour un prix unitaire dS . Par extension, on qualifiera T “*d’offre*”.

La relation $P.dV = T.dS$ indique reflète l'équilibre de l'offre et de la demande.

Conditions d'application

La notion de *demande* s'applique à une production particulière. Elle s'apparente à la notion de *pression partielle* pour un mélange de gaz. C'est une *pression économique partielle*.

On peut définir une *demande globale* comme étant une moyenne pondérée des *demandes partielles* sur l'ensemble de la production.

En physique, la notion de température implique un équilibre thermodynamique local. En économie, l'*offre* implique un équilibre économique local autour d'une *même monnaie*.

Élasticité de l'offre et de la demande

Le volume V d'un fluide est une fonction $V(P,T)$ de sa pression P et de sa température T , appelée *fonction d'état* du fluide.

De même, il apparaît naturel de considérer le volume V de la production comme une fonction $V(T,P)$ de l'offre T et de la demande P qu'on appellera la *fonction d'état* de l'économie.

Les économistes appellent élasticité de l'offre et élasticité de la demande, l'inverse des dérivées dV/dT et dV/dP . Ces dérivées apparaissent comme les dérivées partielles $\partial V/\partial T$ et $\partial V/\partial P$ d'une même *fonction d'état* $V(T,P)$.

L'équation d'état des gaz parfaits

Lorsque la température d'un fluide est suffisamment élevée, son équation d'état tend vers celle des gaz parfaits:

$$P.V = R.T$$

Lorsque la température d'une économie est suffisamment élevée (énergie bon marché), la valeur d'usage devient négligeable devant la *valeur d'échange* (exemple: placements immobiliers, métaux précieux, objets de luxe). La demande P est d'autant plus grande que le volume V de la production est plus faible. On retrouve l'équation d'état des gaz parfaits.

L'équation d'état de van der Waals

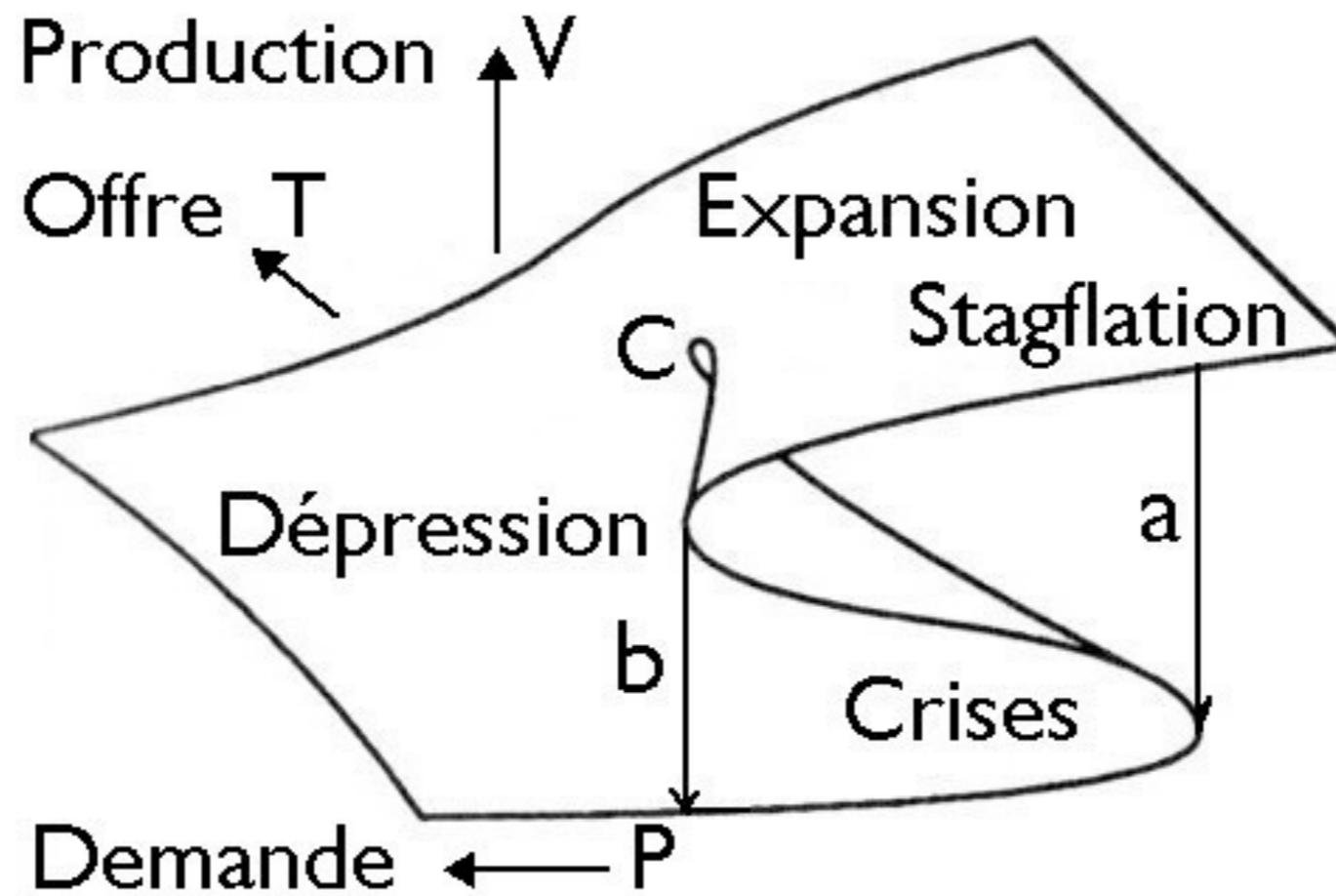
En 1873, van der Waals propose l'équation suivante:

$$(P + a/V^2)(V-b) = rT$$

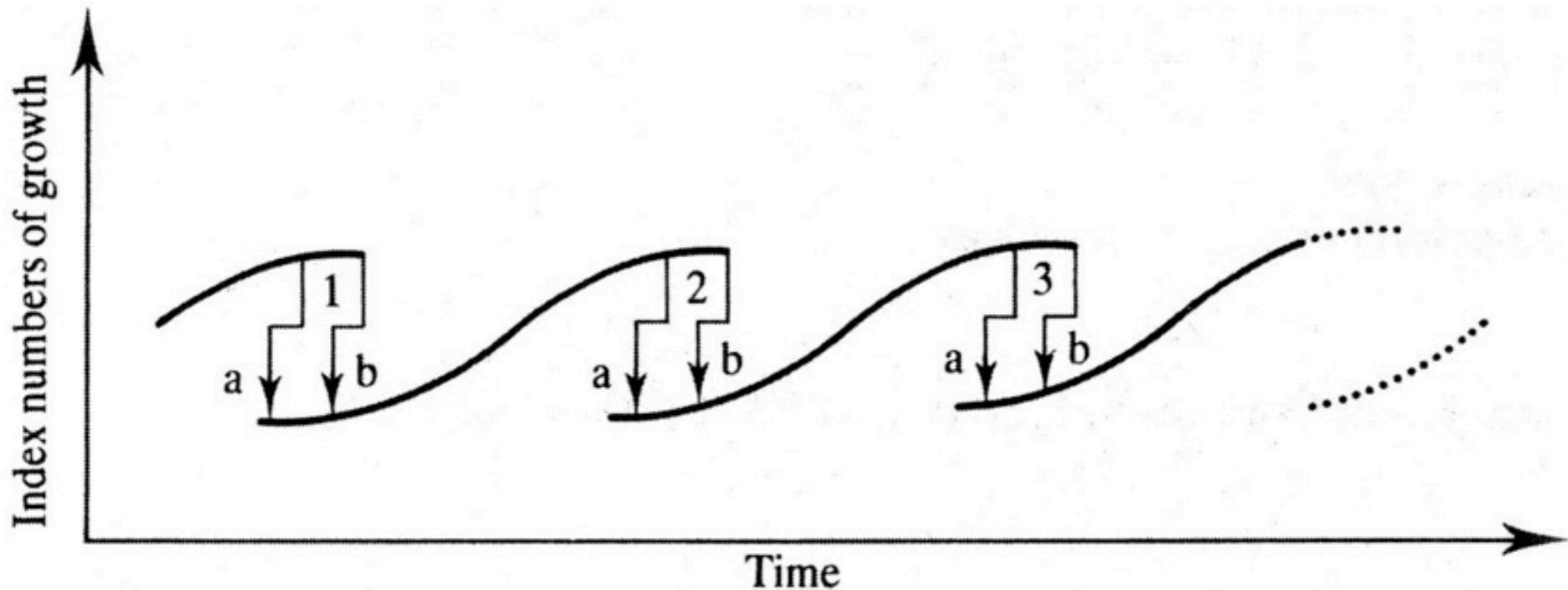
Elle tient compte du volume b des molécules et des forces dipolaires d'attraction entre elles.

En économie, l'équation de van der Waals implique un volume de production minimal b de survie et une demande P d'autant plus importante qu'elle est partagée (télécommunications, transports en commun).

Surface de van der Waals



Le modèle de Mensch

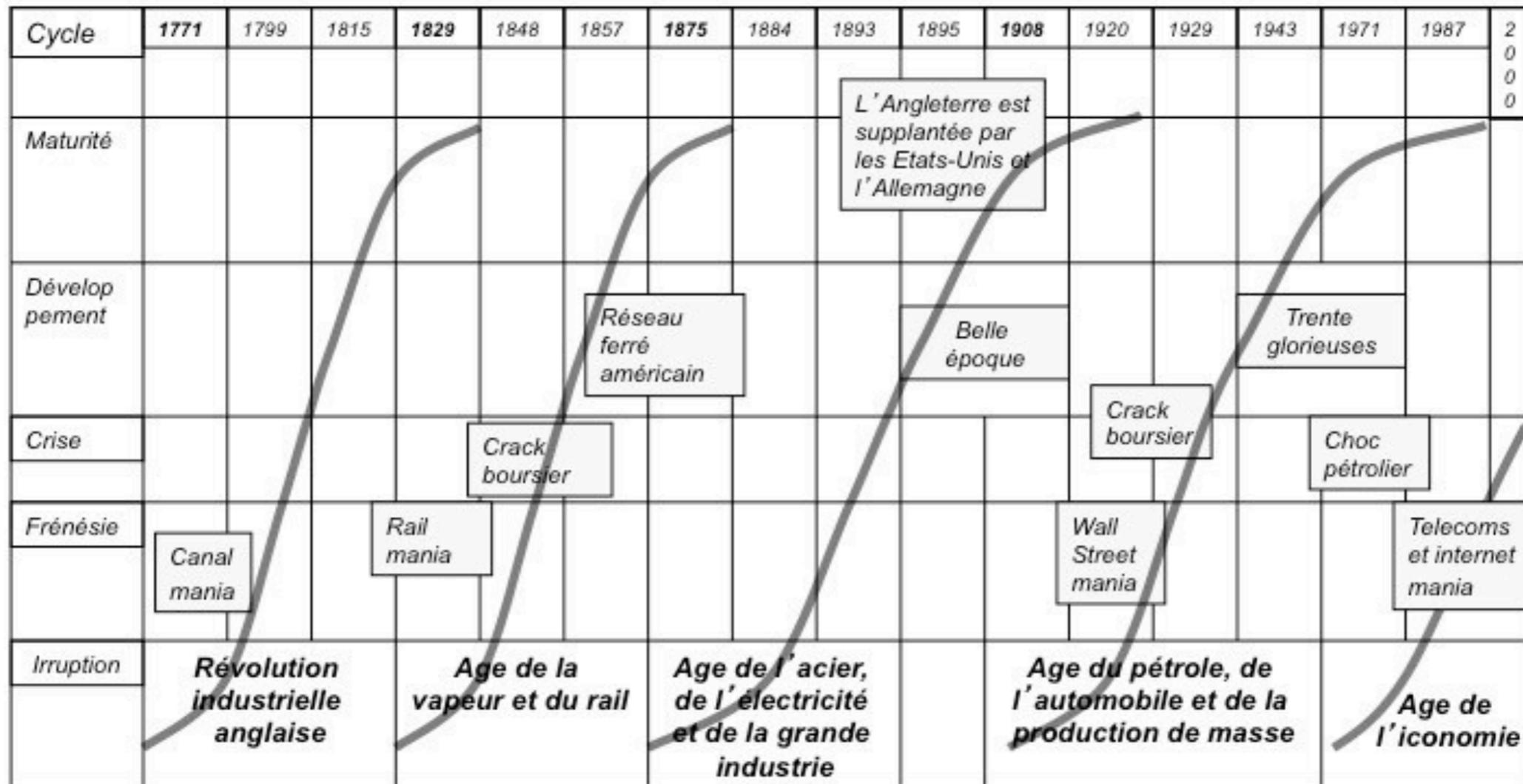


Source: Mensch (1979: 73).

La zone de recouvrement (entre a et b) est une zone de *transition économique*. Elle correspond aux *transitions de phase* en physique.

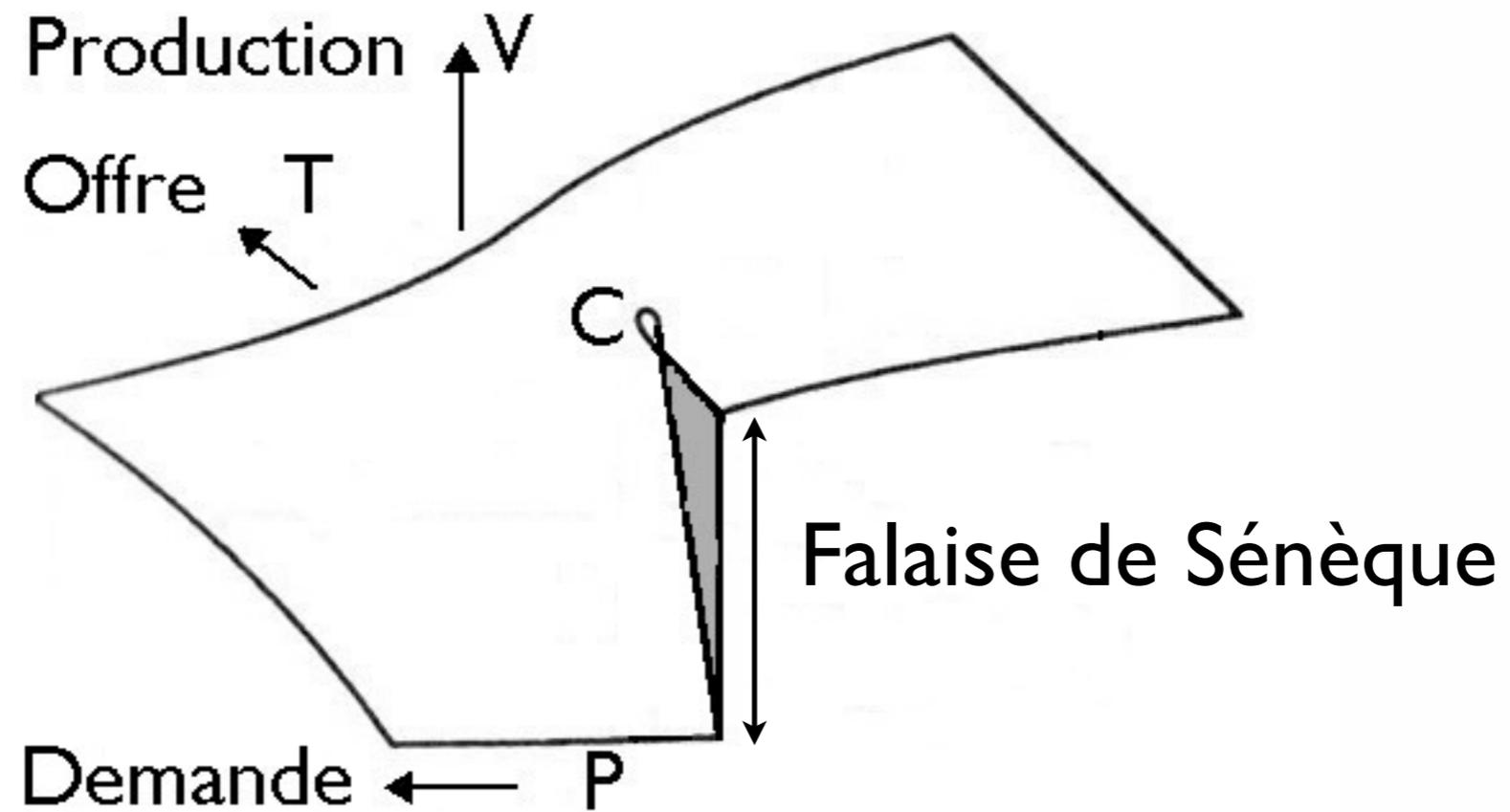
Exemple de cycles

La succession des cycles



Source: site de Claude Rochet

La construction de Maxwell

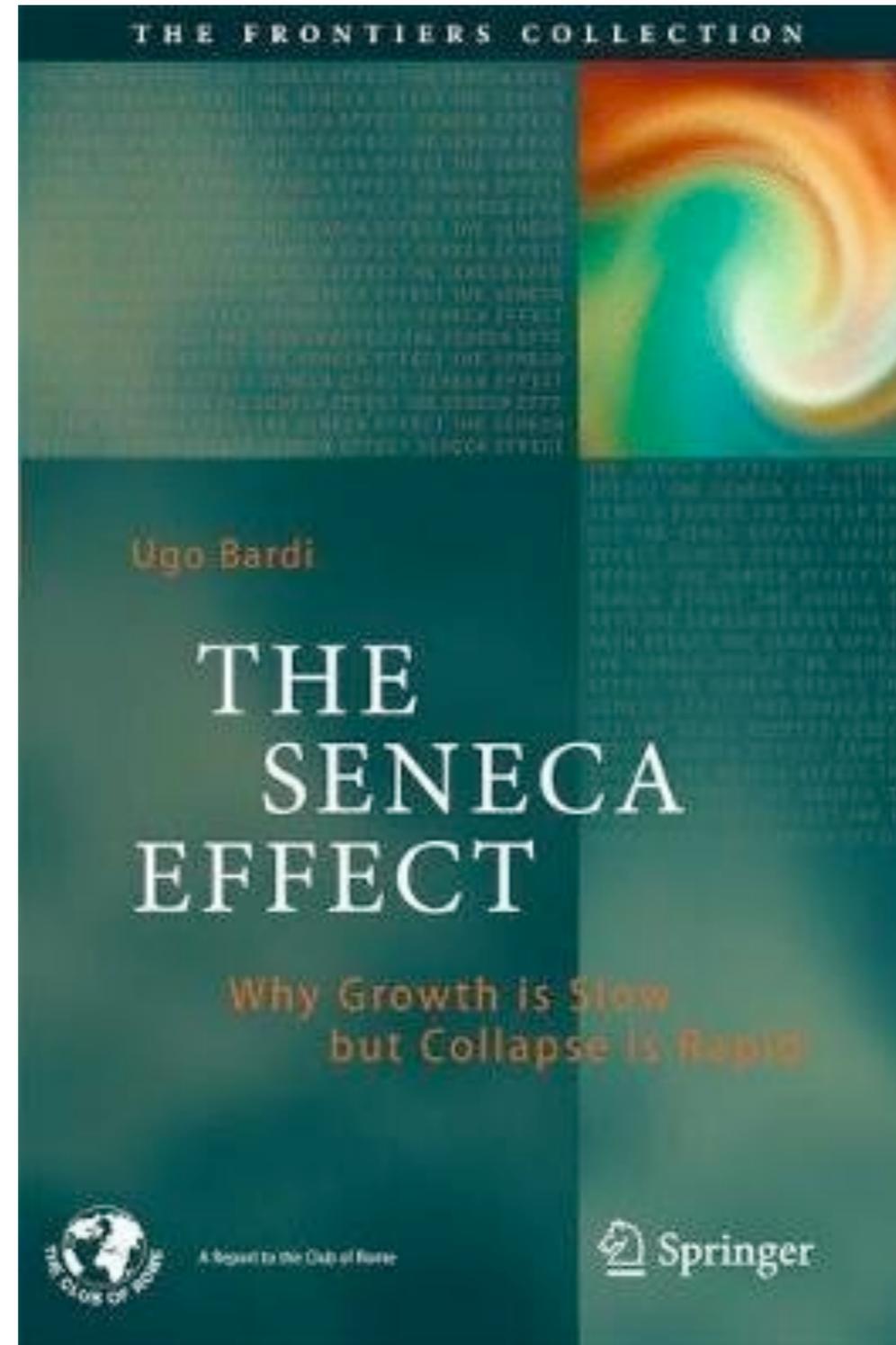


La falaise de Sénèque

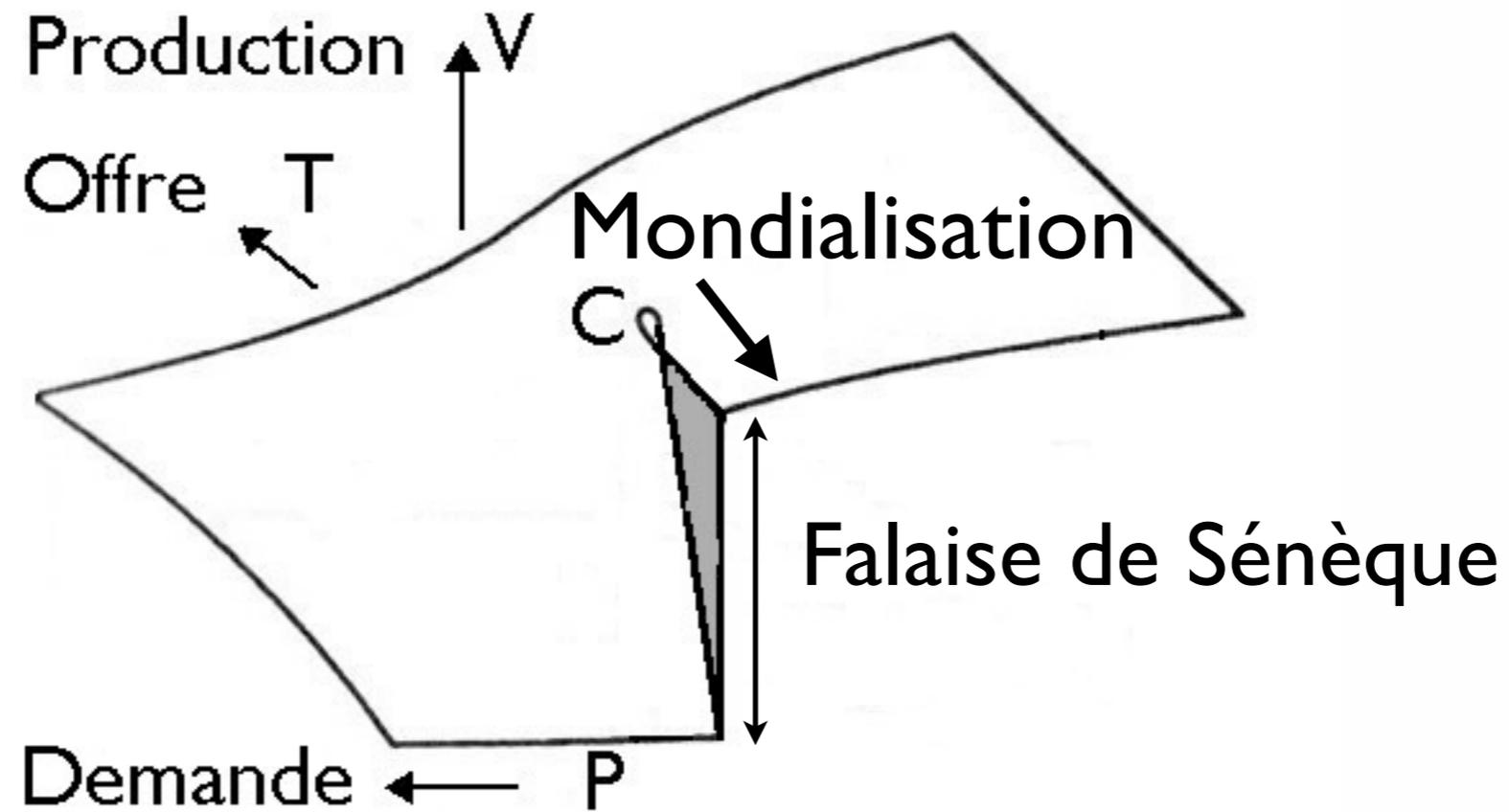
« Ce serait une consolation de notre faiblesse et de celle de notre travail si toute chose disparaissait progressivement comme elle est apparue; mais la croissance est lente tandis que la ruine est brutale. »

Lucius Anneaus Seneca,
Lettre à Lucilius no. 91.

L'effet "Sénèque" d'Ugo Bardi

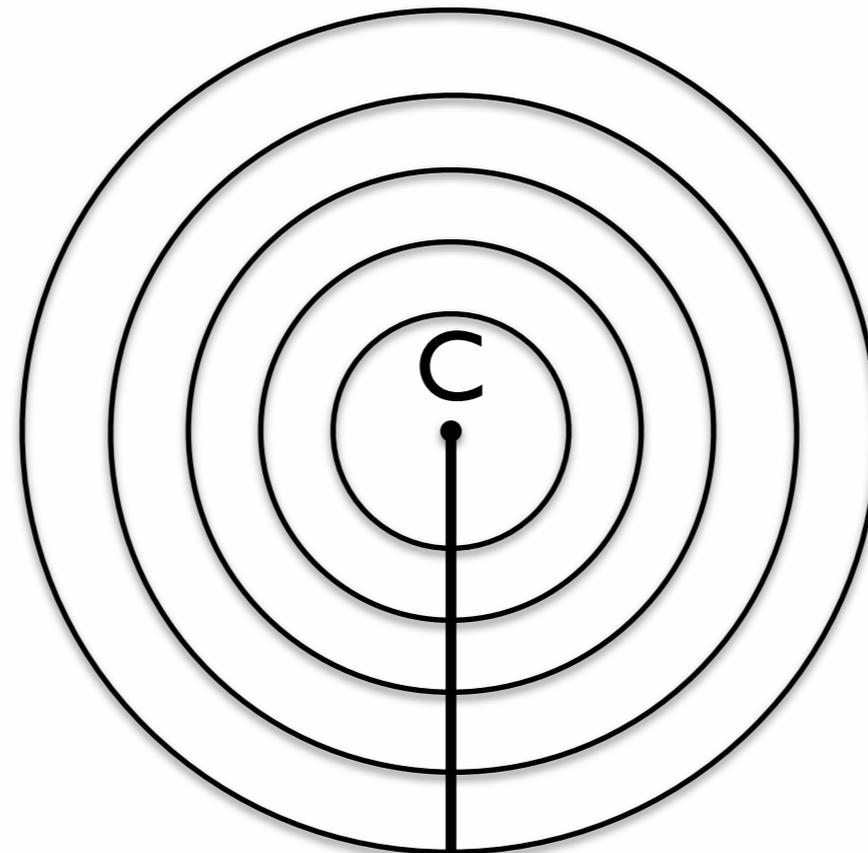


Mondialisation de l'économie



Plus on mondialise l'économie, plus la falaise devient haute (exemple de l'empire romain).

La tornade de Schumpeter



Falaise de Sénèque

L'amplitude des effondrements est inversement proportionnel à leurs fréquences. Il y a alors "*destruction créatrice*".

Les fluctuations économiques

Plus le marché est étendu plus l'amplitude des fluctuations est importante.

Les inégalités croissent entre États partageant la même monnaie:

Union européenne: Allemagne/Grèce

USA: Californie-Texas/ Middle West

Il en est de même entre les individus d'un même État.

La condensation des richesses

L' invariance par changement d'échelle implique qu'*au point critique* la distribution des richesses suit une loi de puissance de variance infinie (*opalescence critique*).

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

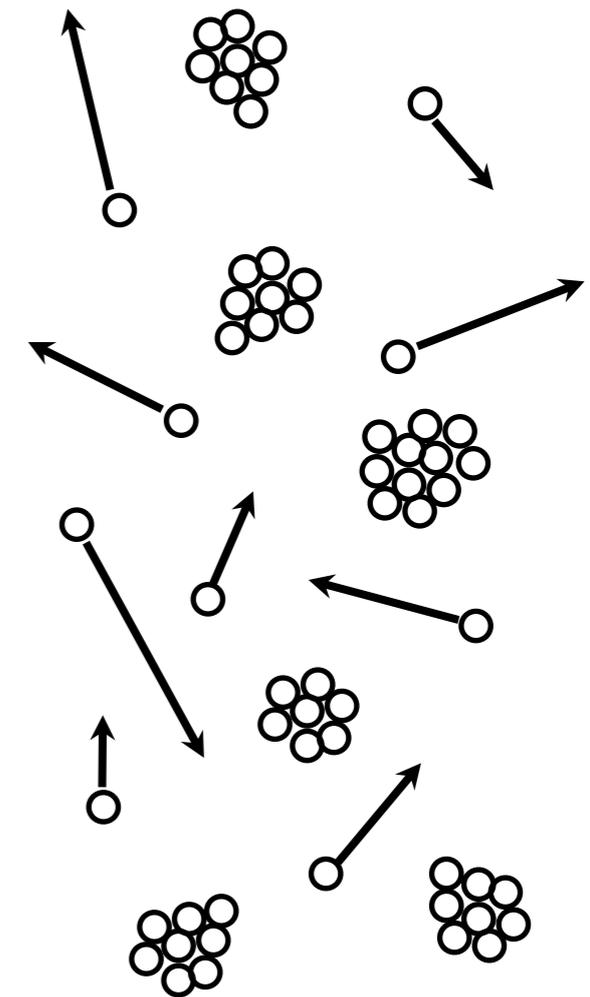


Vilfredo Pareto

La condensation des richesses

Au moment de la transition, la richesse se condense en deux phases:

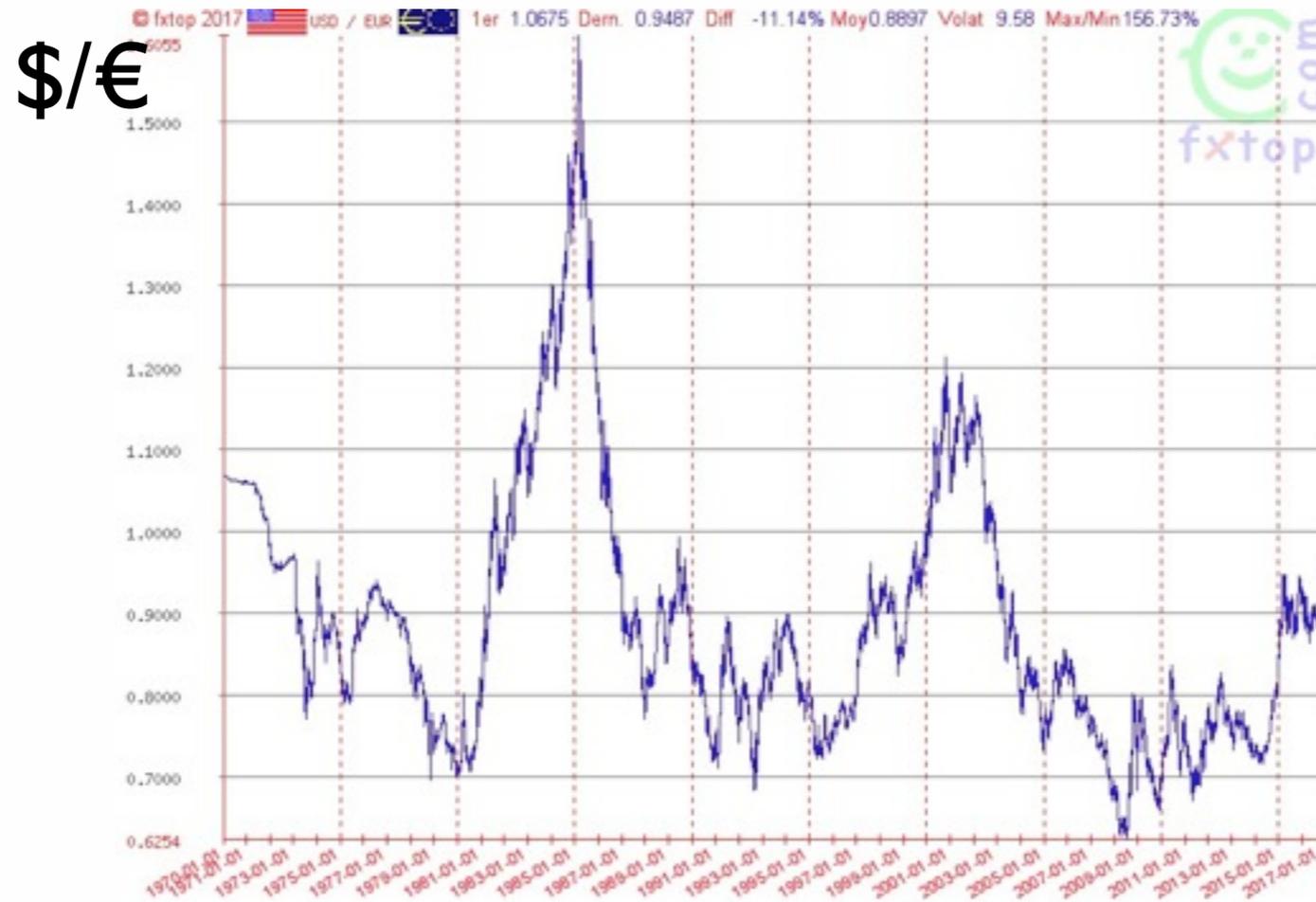
- une phase « gazeuse » constituée d'un petit nombre de gens riches, jouissant d'énergie et de liberté.
- une phase « liquide » dans laquelle sont emprisonnés un grand nombre de gens pauvres privés d'énergie et de liberté.



La classe moyenne d'effondre.

Cas de deux monnaies

Exemple du Dollar et de l'Euro



Comme la chaleur, la monnaie S va de la source chaude vers la source froide:

L'usage de plusieurs monnaies est stabilisatrice.

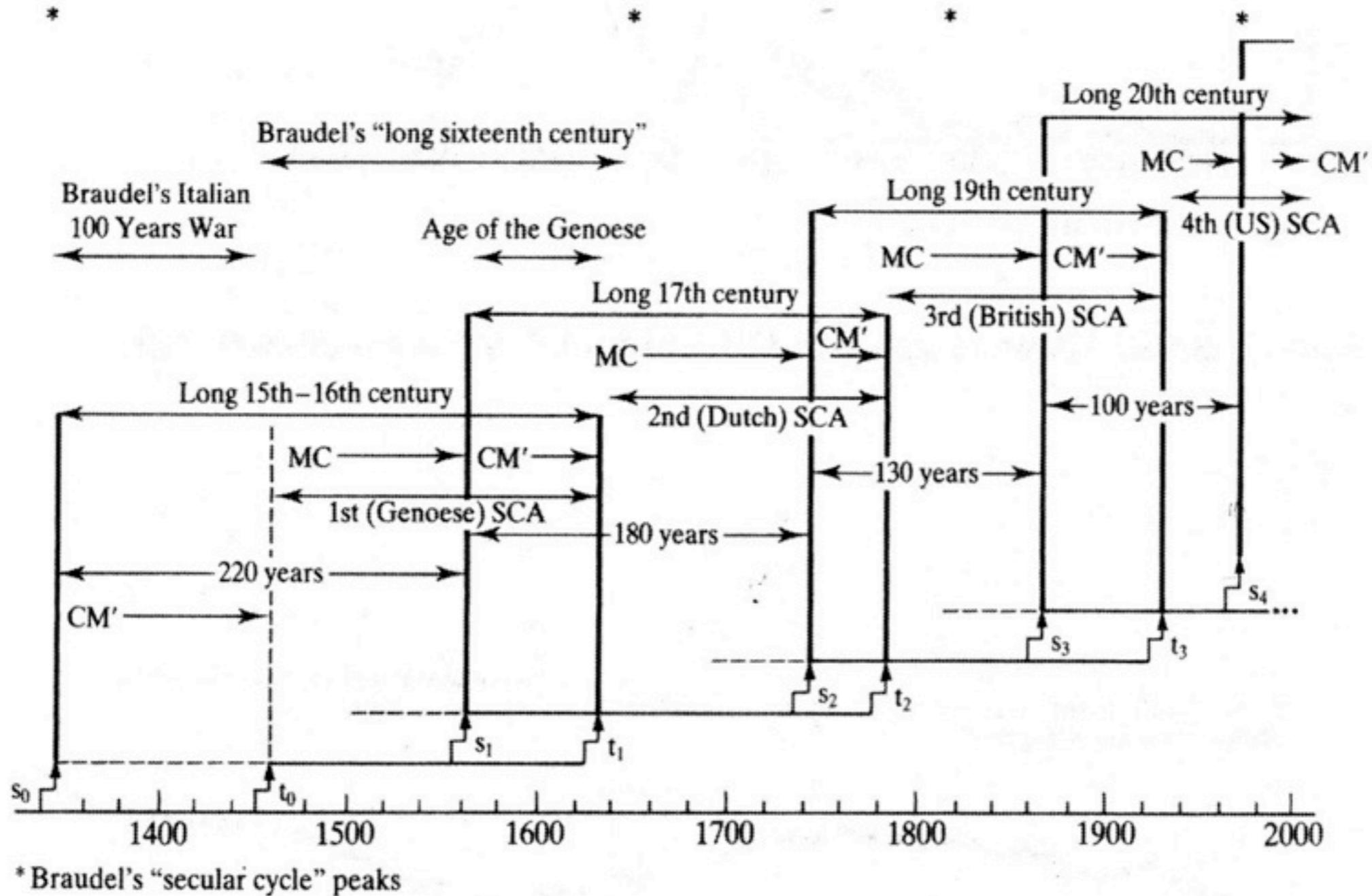
Cas de deux monnaies

Exemple des colonies

Au XIX^{ème} siècle, les colonies ont servi de “source froide” aux pays européens qui ont investi des capitaux dans leurs colonies.

Cas de deux monnaies

Les cycles séculaires de Braudel

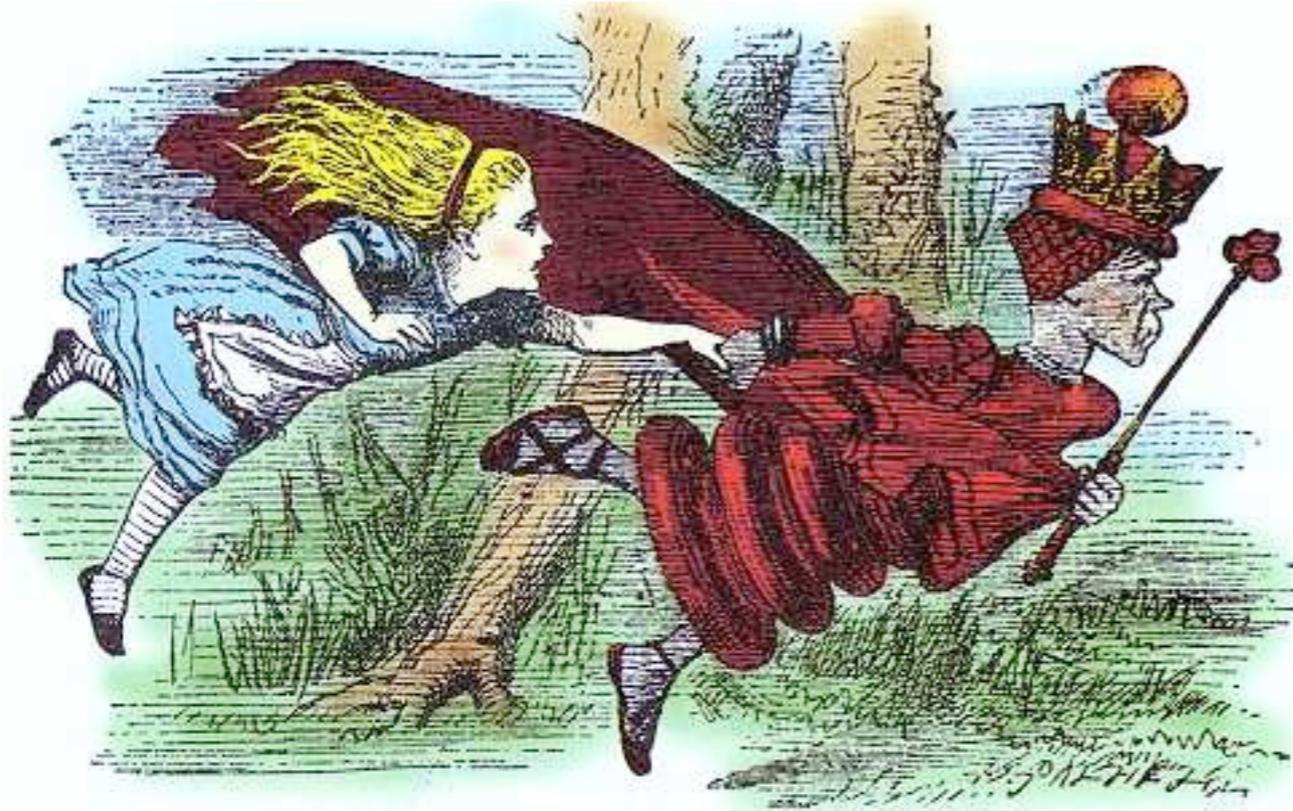


L'effet de la reine rouge

- Une société maximise la dissipation d'énergie en s'adaptant à son environnement.
- Plus elle dissipe d'énergie plus vite elle modifie son environnement.
- Plus vite elle modifie son environnement plus vite elle doit se réadapter, jusqu'au moment où elle s'effondre.

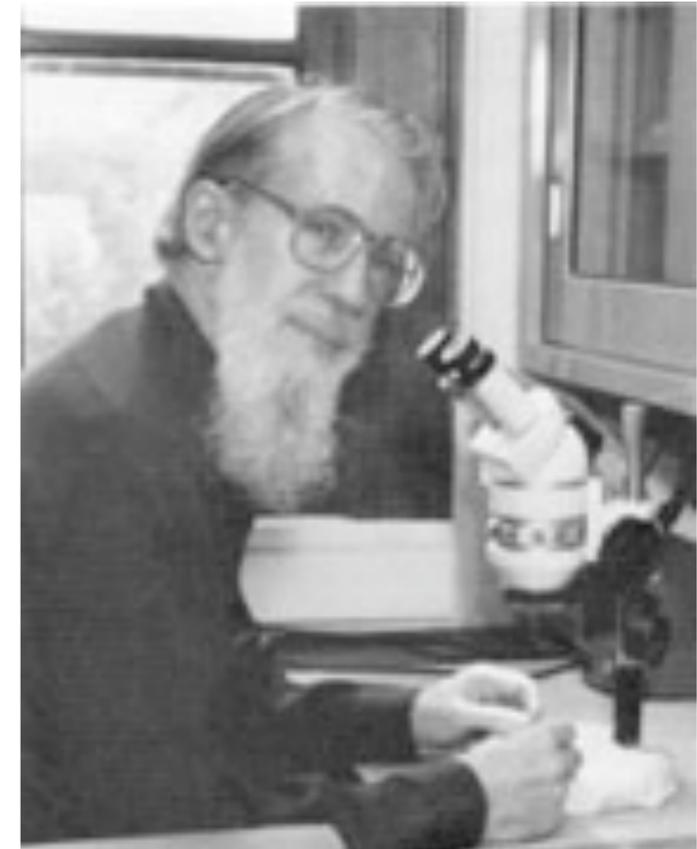
C'est l'effet «reine rouge» de Leigh van Valen

L'effet de la reine rouge



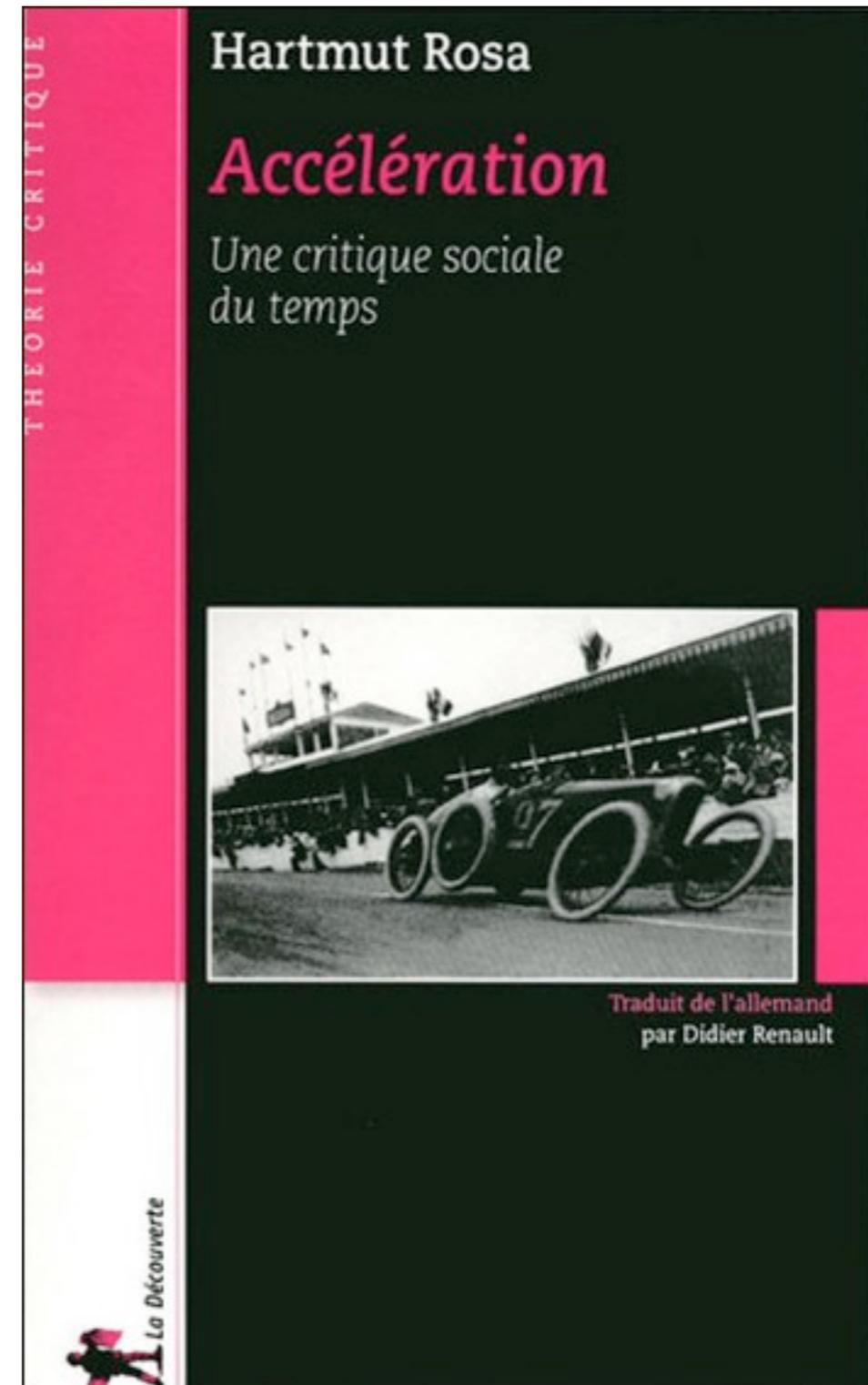
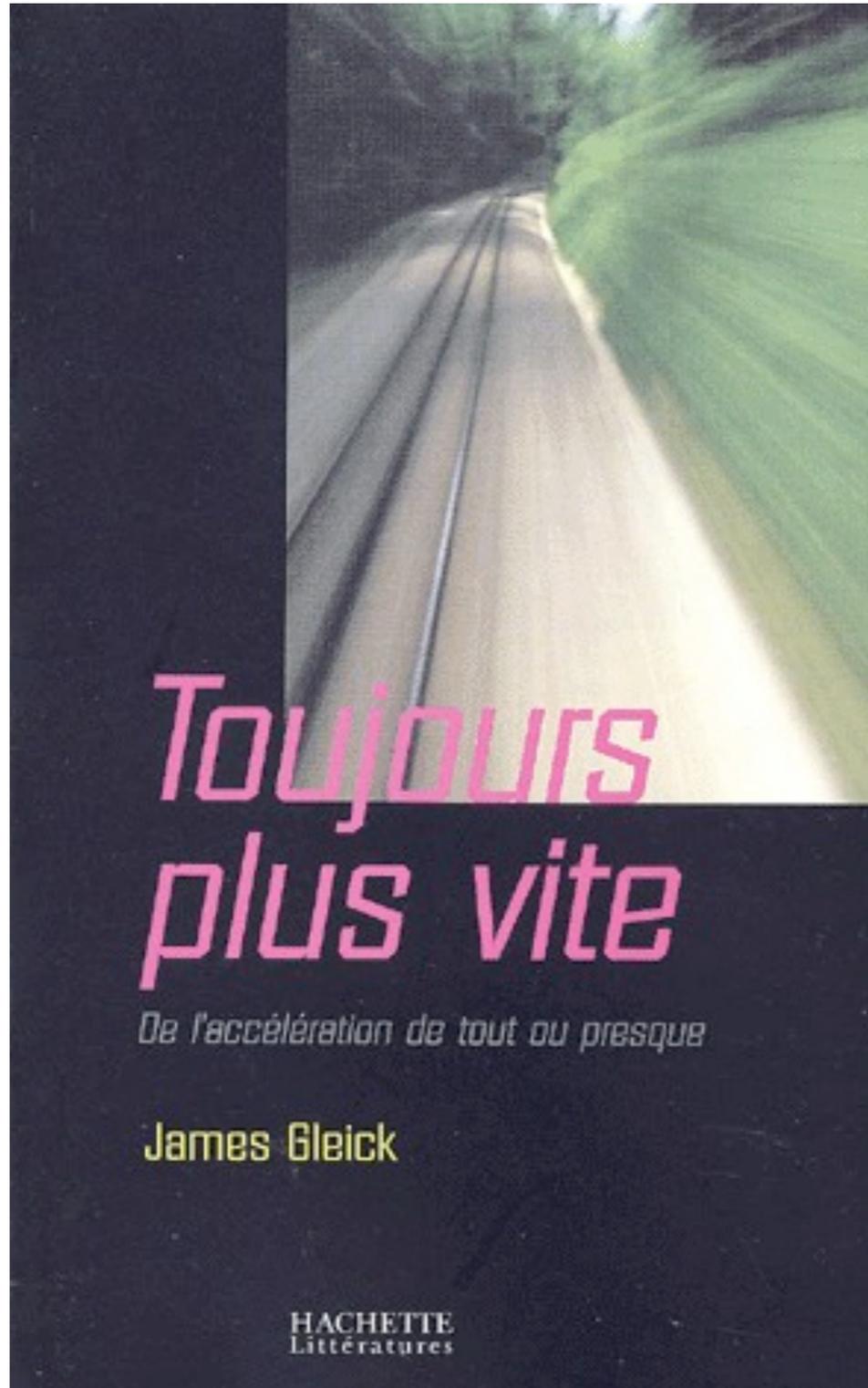
« Ici, il faut courir le plus vite possible pour rester en place »

(Lewis Carroll: “De l’autre coté du miroir”)



Leigh van Valen
(1973)

L'effet de la reine rouge s'applique aux sociétés



L'évolution des sociétés humaines

Deux tendances opposées s'affrontent. La dissipation croissante de l'énergie favorise:

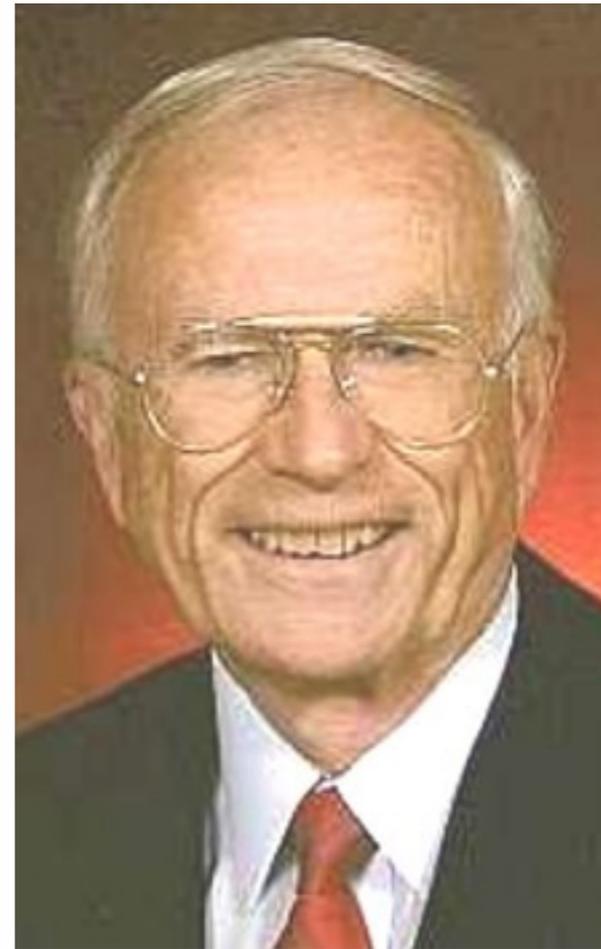
- L'expansion des sociétés qui dissipent le plus d'énergie.
- La fragmentation de ces sociétés due à l'effet de la reine rouge (empire romain, empires coloniaux, bloc soviétique).

L'alternance conduit à l'apparition de sociétés de plus en plus complexes qui mémorisent de plus en plus d'information et dissipent l'énergie de plus en plus rapidement.

L'évolution des écosystèmes

Le modèle de Robert Ulanowicz

**Un écosystème s'auto-organise,
en augmentant son
interconnectivité.**

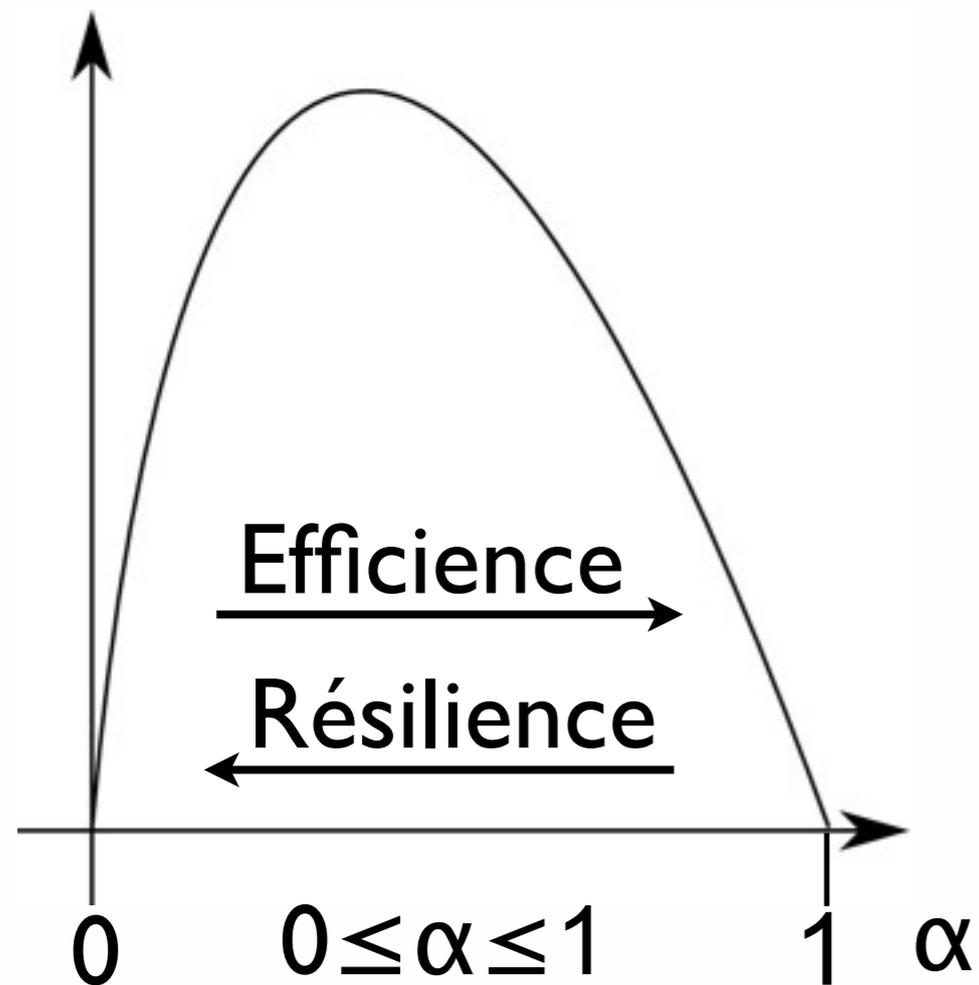


Robert Ulanowicz

Le modèle de Robert Ulanowicz

α = interconnectivité

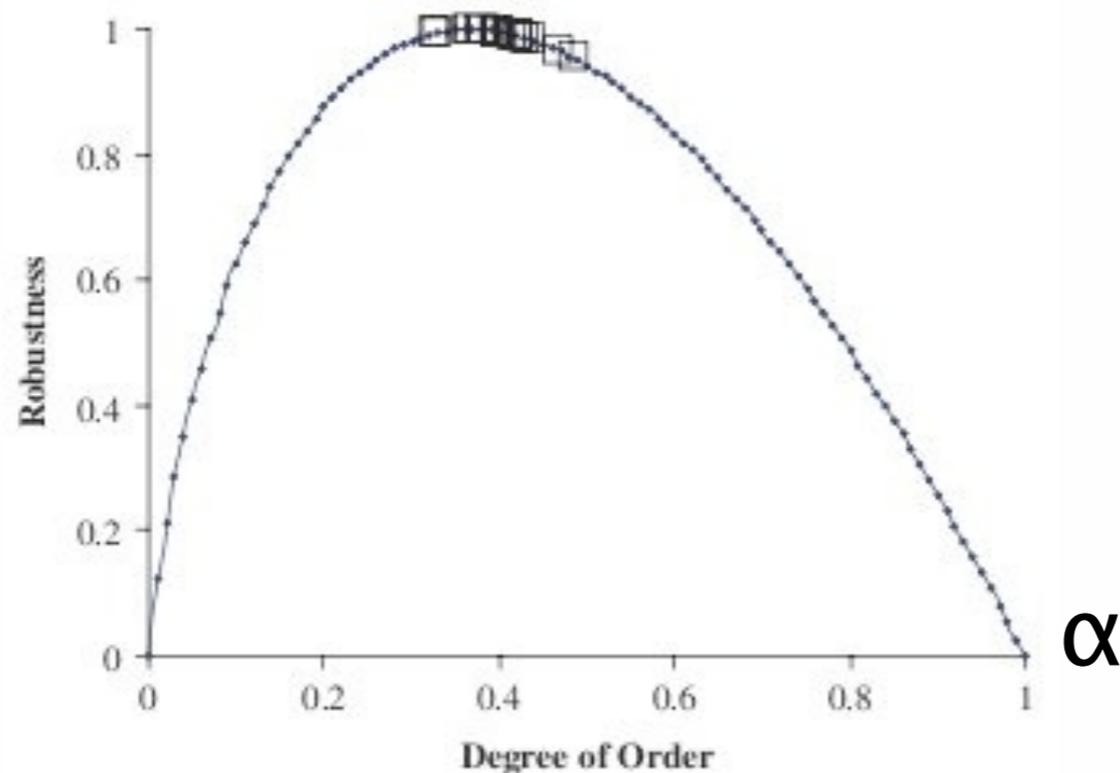
$-\alpha \cdot \ln(\alpha)$ (robustesse)



Robert Ulanowicz

Le modèle de Robert Ulanowicz

α = interconnectivité

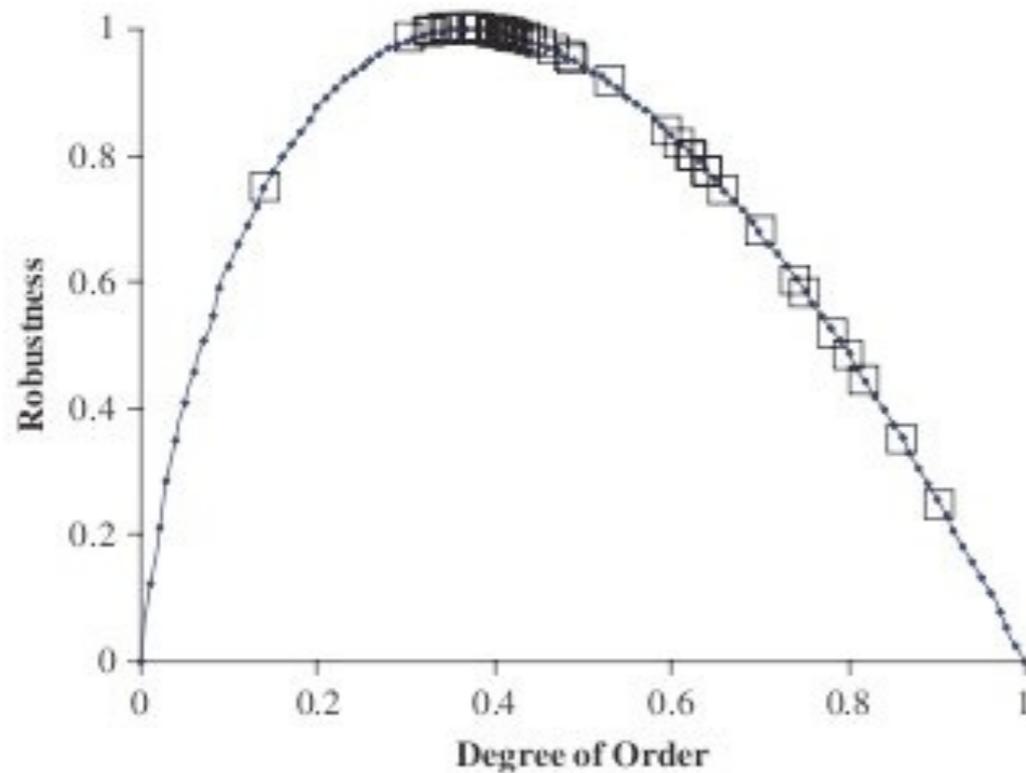


Robert Ulanowicz

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

Le modèle de Robert Ulanowicz

α = interconnectivité



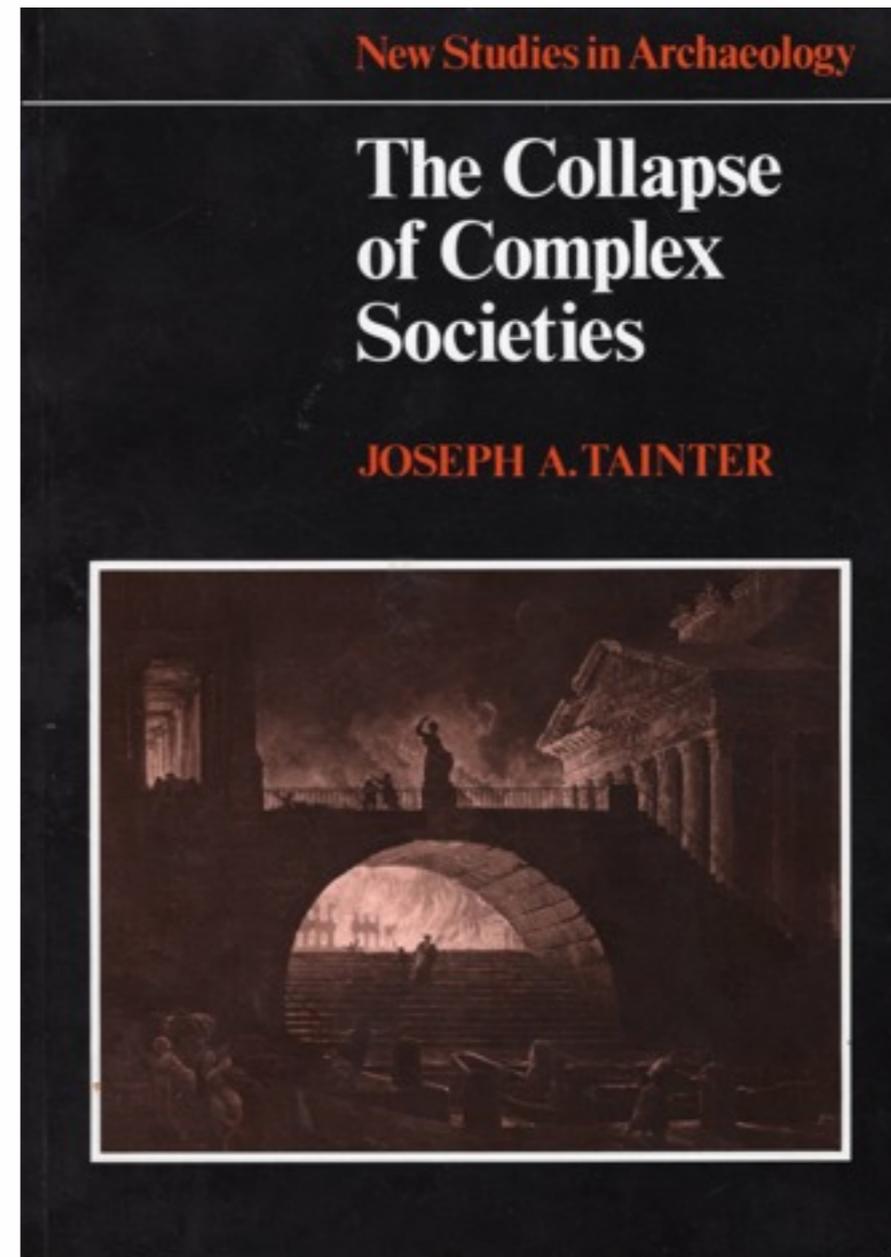
Robert Ulanowicz

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

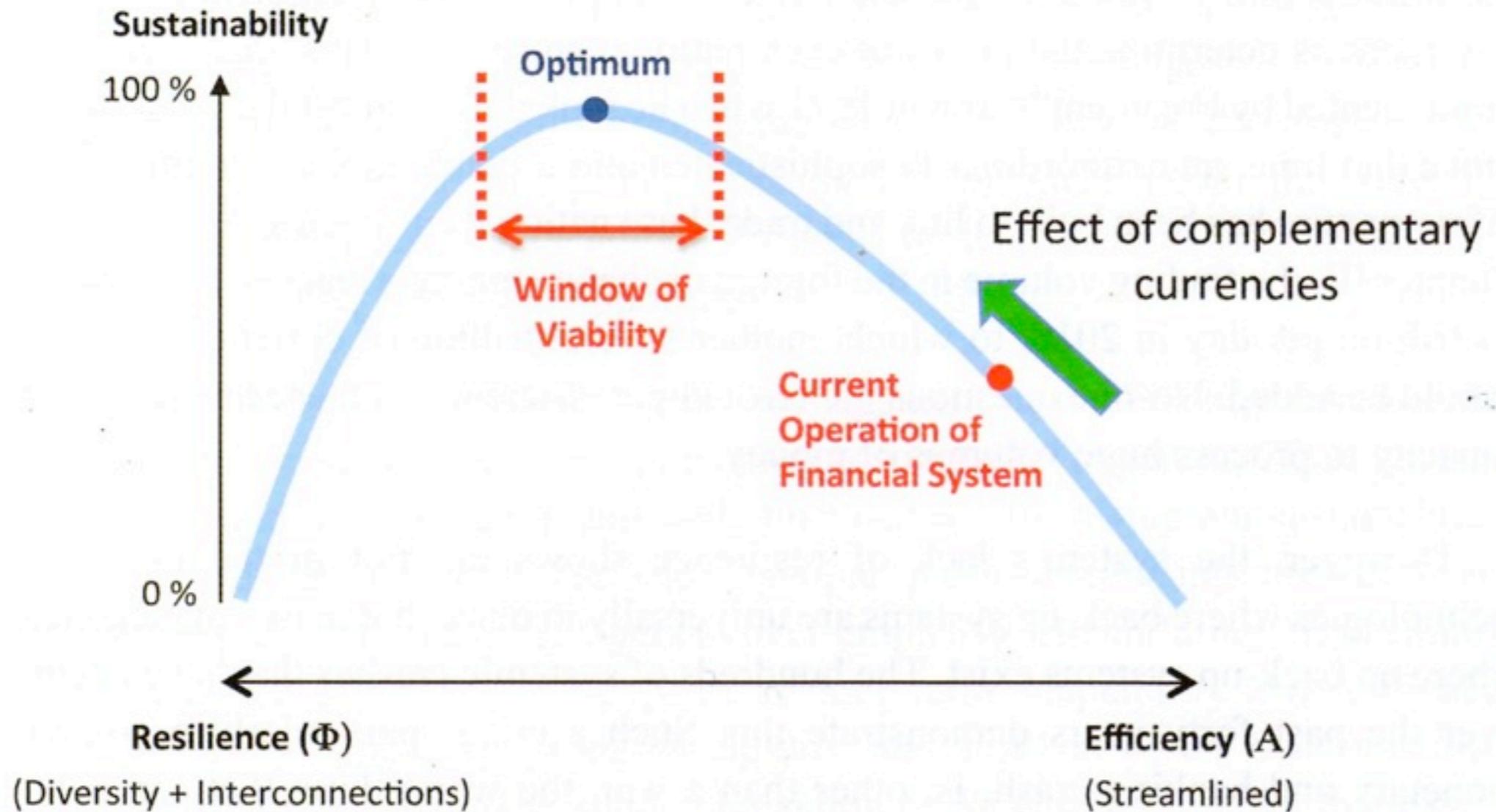
Joseph Tainter (1988)

Le modèle d'Ulanowicz s'applique aux sociétés humaines: les réseaux trophiques jouent le rôle des réseaux commerciaux.

Lorsqu'une société devient trop complexe ($\alpha \geq 1/e$), son rendement ($-\log \alpha$) devient inférieur à l'unité et elle s'effondre (1988).



Application à l'économie



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

Approche thermodynamique

Toute structure dissipative diminue son entropie interne S (s'auto-organise) afin de produire davantage d'entropie S (dissiper davantage d'énergie).

Une société s'auto-organise en investissant une fraction α ($0 \leq \alpha \leq 1$) de son revenu (elle diminue ses liquidités) afin de produire davantage de liquidités.

Robustesse maximale

α = capital/revenu (capital/travail de Marx!)

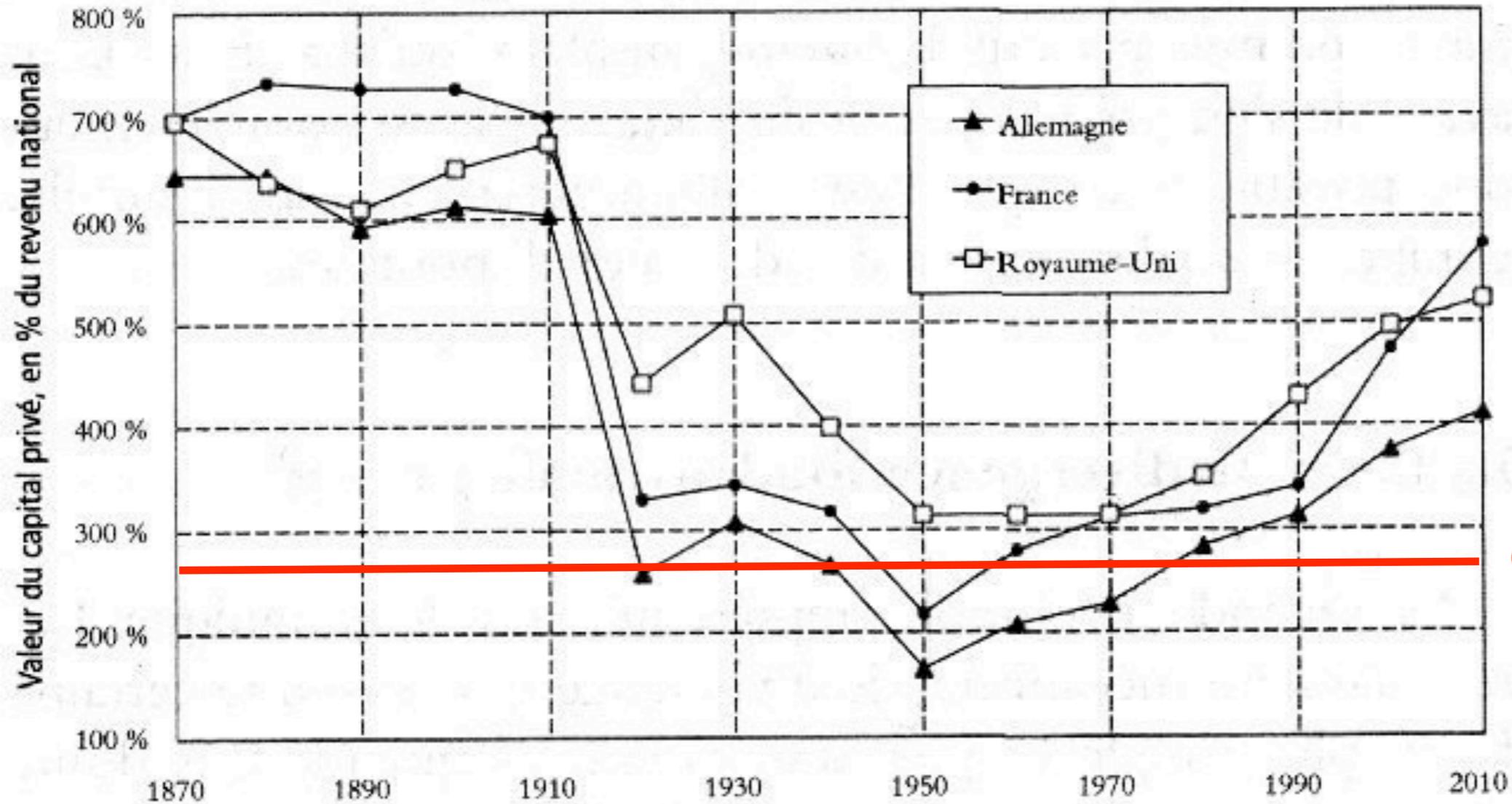
$1/\alpha$ = patrimoine exprimé en années de revenu

La robustesse r d'Ulanowicz et Lietaer est maximale pour $\alpha = 1/e$ c'est-à-dire lorsque le patrimoine vaut:

$$e = 2.718 \text{ années de revenu}$$

Comparaison historique

Graphique I.2.
Le rapport capital/revenu en Europe, 1870-2010



Lecture : le total des patrimoines privés valait entre 6 et 7 années de revenu national en Europe en 1910, entre 2 et 3 années en 1950, et entre 4 et 6 années en 2010.

Sources et séries : voir piketty.pse.ens.fr/capital21c.

Vers le chaos

Optimum

Inégalités de richesses au XXème siècle

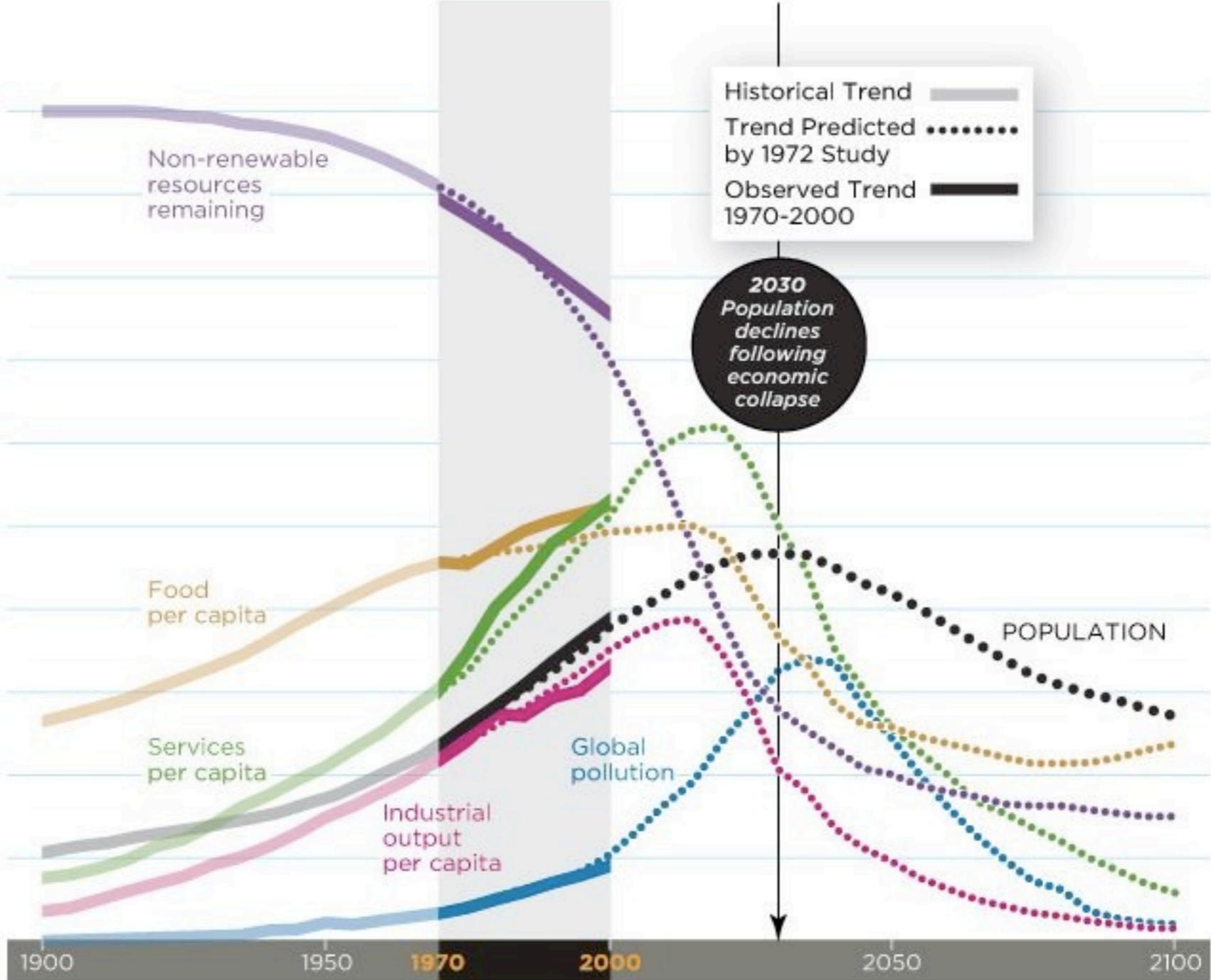
L'inégalité des revenus aux États-Unis, 1910-2010

Vers le chaos



Lecture : la part du décile supérieur dans le revenu national américain est passée de 45-50 % dans les années 1910-1920 à moins de 35 % dans les années 1950 (il s'agit de la baisse mesurée par Kuznets) ; puis elle est remontée de moins de 35 % dans les années 1970 à 45-50 % dans les années 2000-2010. Sources et séries : voir piketty.pse.ens.fr/capital21c.

Prévisions du Club de Rome



Fin