

L'économie: *un processus de criticalité auto-organisée*

François Roddier (francois.roddier@wanadoo.fr)

Blog: <http://www.francois-roddier.fr/>

Paris, Institut Momentum, le 21 avril 2017

Nicholas Georgescu-Roegen

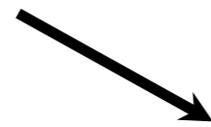
1971: « La thermodynamique et la biologie sont les flambeaux indispensables pour éclairer le processus économique. »



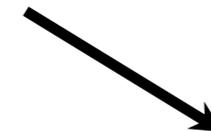
Nicholas Georgescu-Roegen
(1906-1994)

De la thermodynamique à l'économie

Lois de la
thermodynamique



Métabolisme
des êtres vivants



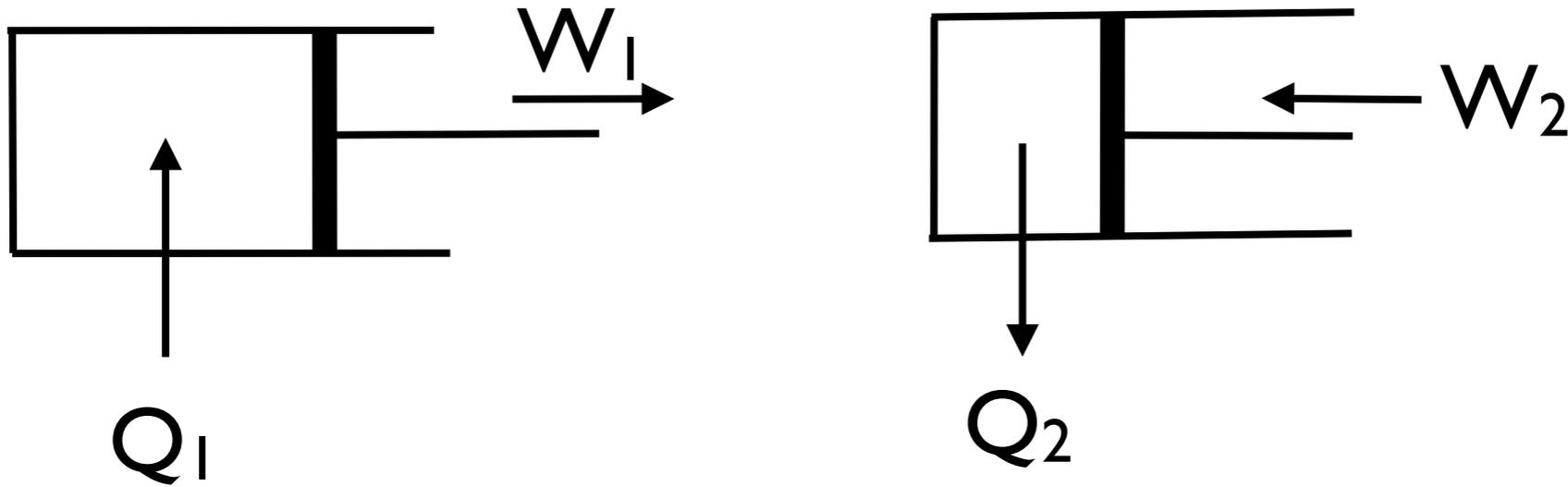
Économie
humaine

L'économie étudie le métabolisme des sociétés humaines

I

Notions de thermodynamique

Les machines thermiques



Conservation de l'énergie:

$$W = W_1 - W_2 = Q_1 - Q_2$$

Principe de Carnot (1824)

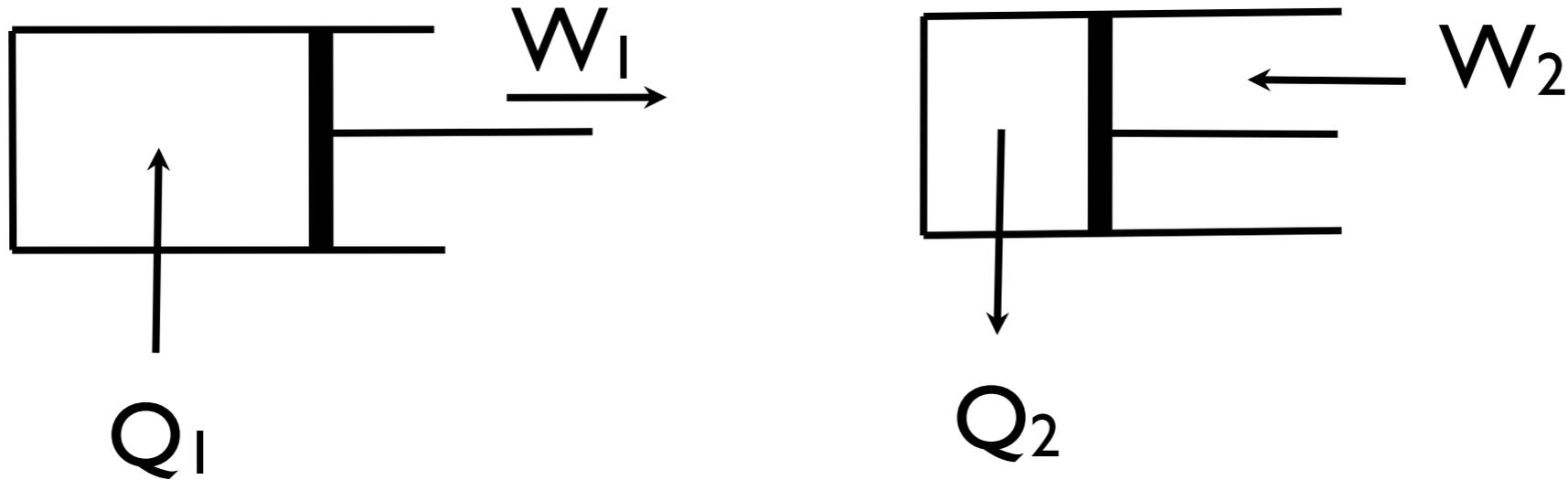
On ne peut *durablement* produire du travail mécanique que par des *cycles fermés* de transformations extrayant de la chaleur d'une source chaude *pour en rendre une partie* à une source froide (second principe de la thermodynamique).



Sadi Carnot
(1796 -1832)

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

Les machines thermiques



$$W = -P(V_1 - V_2)$$

$$Q = T(S_1 - S_2)$$

Flux d'énergie: $dU = W + Q = -P.dV + T.dS$

P et T sont des variables intensives (potentiels)

V et S sont des variables extensives (flux)

Rudolf Clausius (1865)

Clausius considère la quantité Q/T comme la variation d'une fonction S qui caractérise l'état d'un système et qu'il appelle *entropie*.

L'entropie d'un système *isolé*:

- ne change pas s'il subit des transformations réversibles.
- augmente s'il subit des transformations irréversibles.



Rudolf Clausius
(1822-1888)

Attention!

L'entropie d'un système non isolé
(traversé par un flux d'énergie)
diminue lorsque le système
s'organise.

Entropie = désordre = perte d'information

II

Les structures dissipatives

Ilya Prigogine

- Les structures dissipatives sont des machines thermiques naturelles.
- Elles ne subsistent que traversées par un flux permanent d'énergie.
- Elles diminuent leur entropie interne (s'auto-organisent) pour maximiser leur production d'entropie (dissipation d'énergie sous forme de chaleur).



Ilya Prigogine
(1917 - 2003)

Exemples de structures dissipatives

Un cyclone

L'atmosphère terrestre

Un organisme vivant

Une espèce animale ou végétale

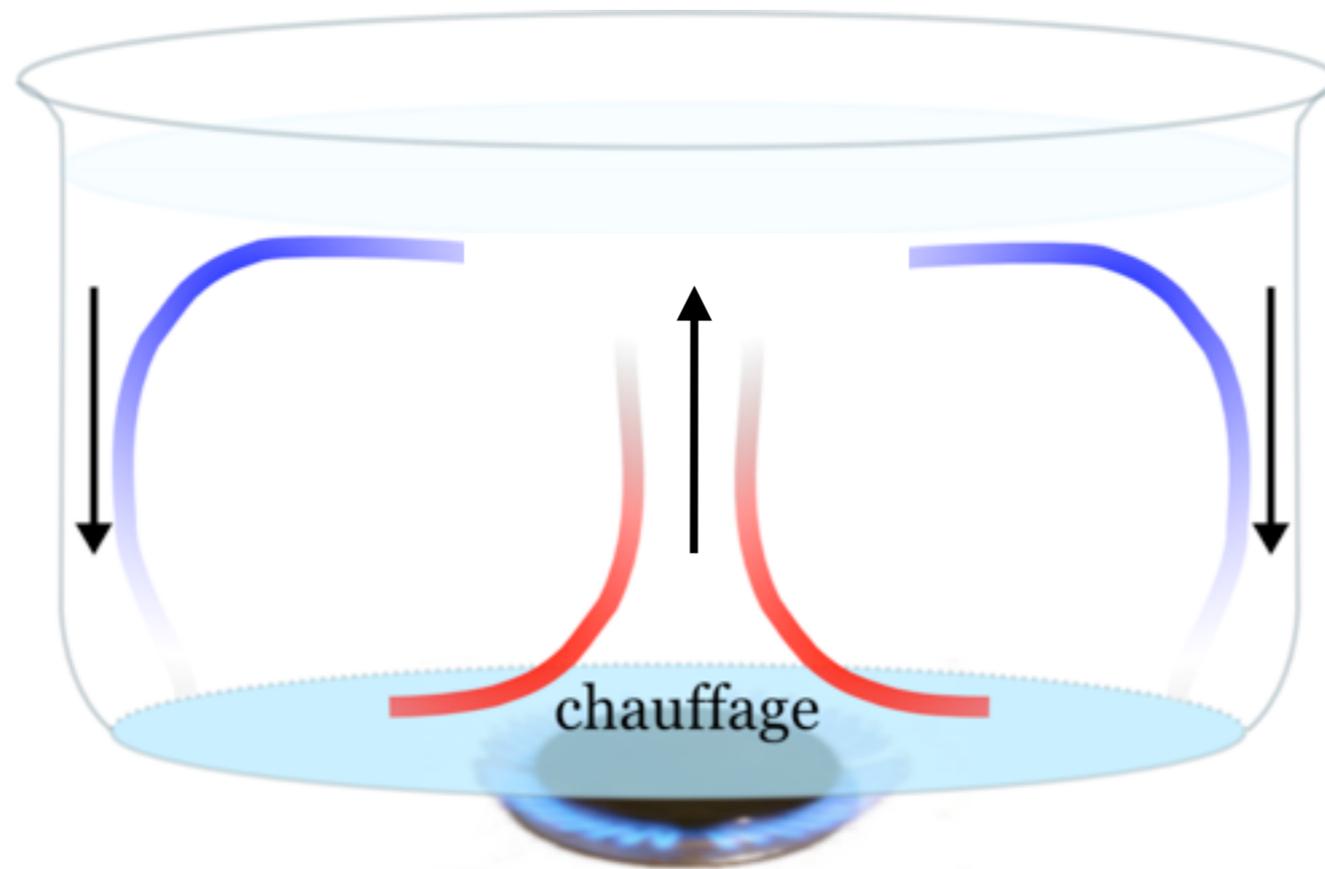
L'homme

Une société humaine

Les structures dissipatives sont des phénomènes de
thermodynamique hors équilibre.

La convection

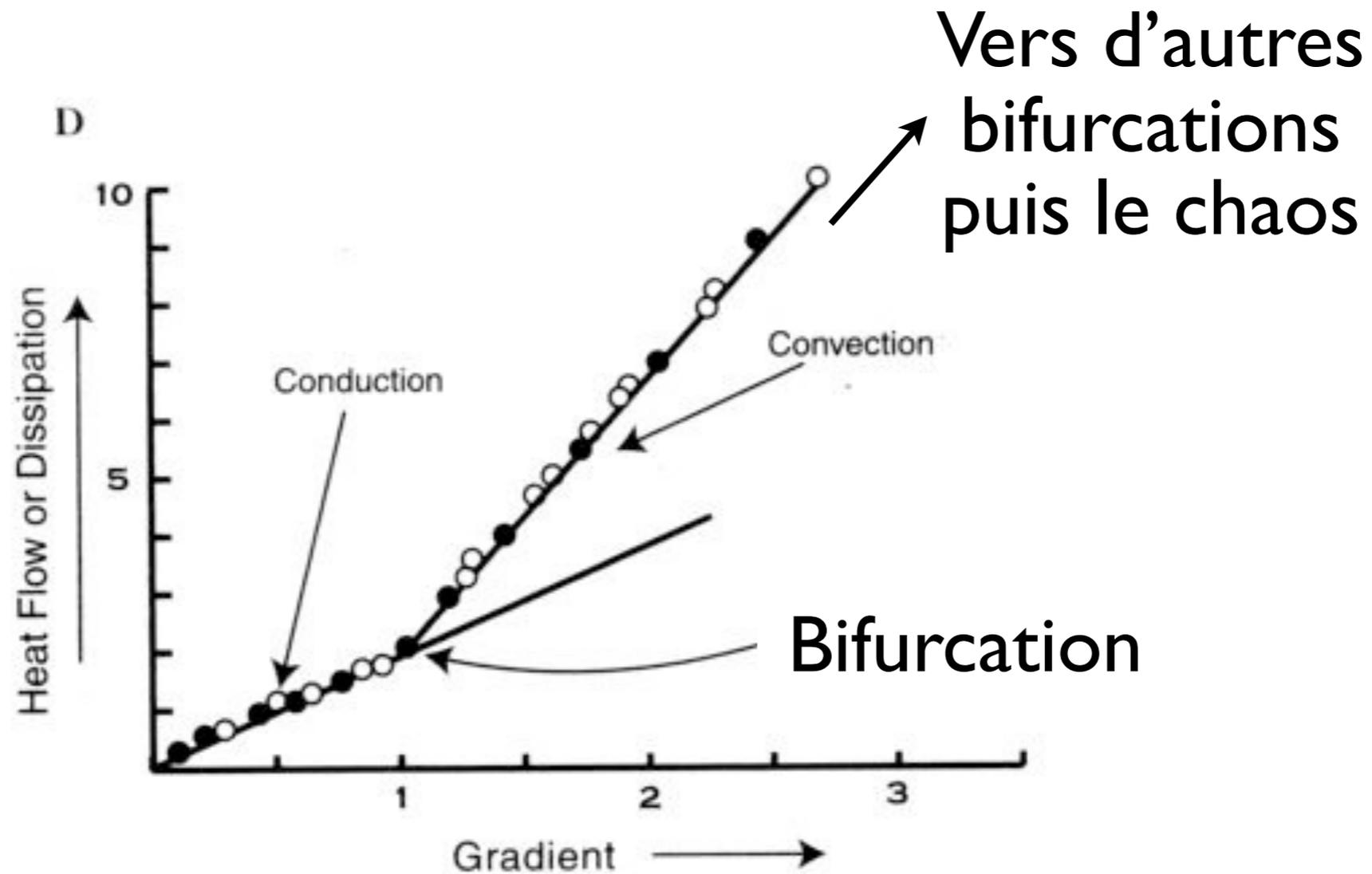
Source froide



Source chaude

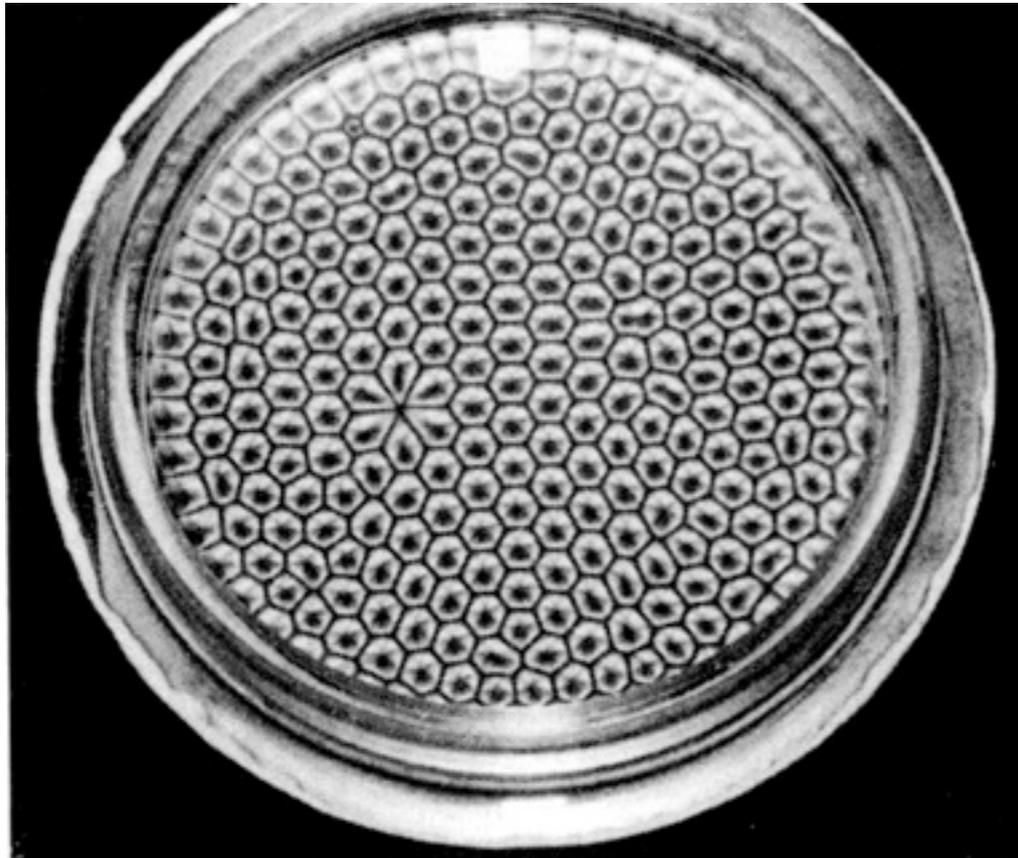
Les structures dissipatives sont des machines thermiques naturelles.

La convection

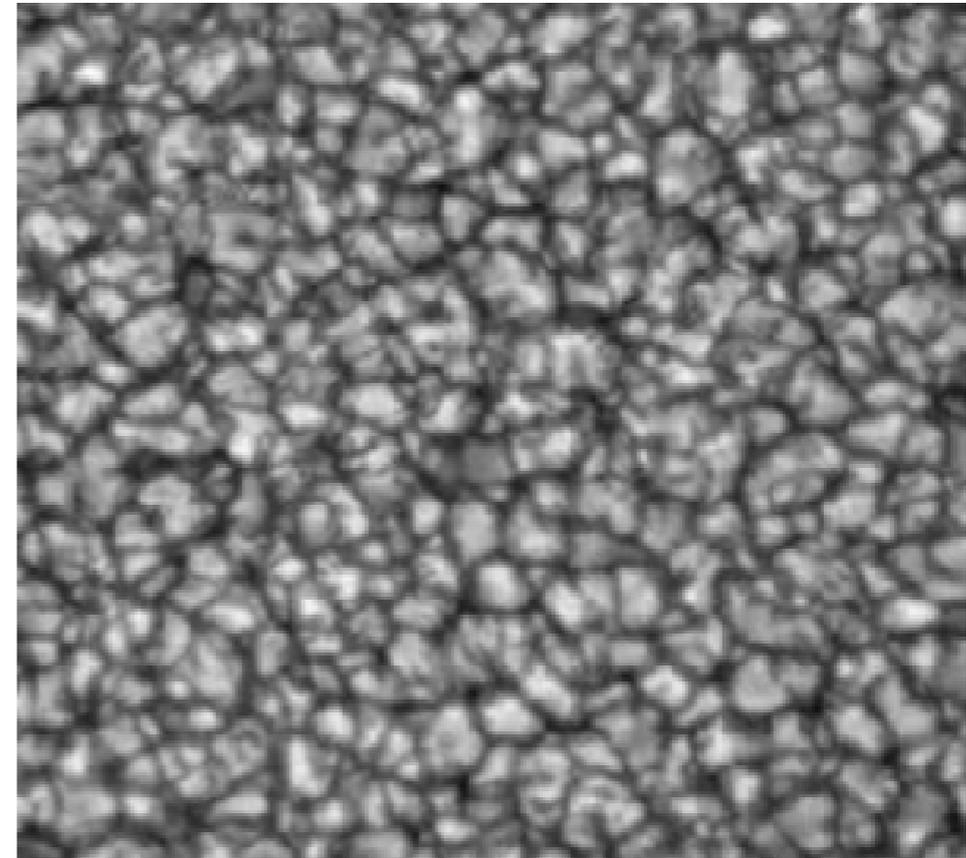


Au delà de la première bifurcation, des différences de température apparaissent *spontanément*.

Invariance par changement d'échelle



Cellules de Rayleigh-Bénard



Granulation solaire

Tornade ou cyclone

Source froide



Source chaude

La loi de Carnot impose que toute structure dissipative décrive des cycles.
(une économie durable est nécessairement circulaire).

III

Application à l'économie

Frederick Soddy (1926)

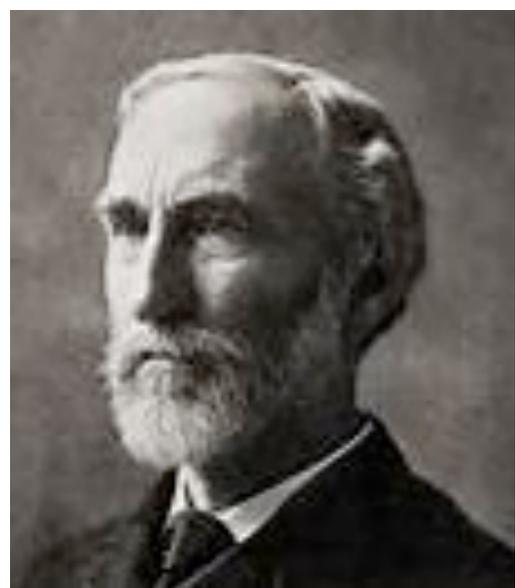
Le bien-être des individus se mesure en termes de flux d'énergie dissipée par les individus dans une société.

- 👉 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.*



Willard Gibbs
(1839-1903)



Pierre Duhem
(1861-1916)

De la thermochimie à l'économie

Potentiels chimiques



Potentiels économiques



Valeur d'usage



Demande



Pression P

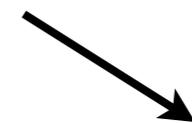
Volume V

$$G = \text{flux d'énergie}$$

Valeur d'échange



Offre



Température T

Monnaie \$

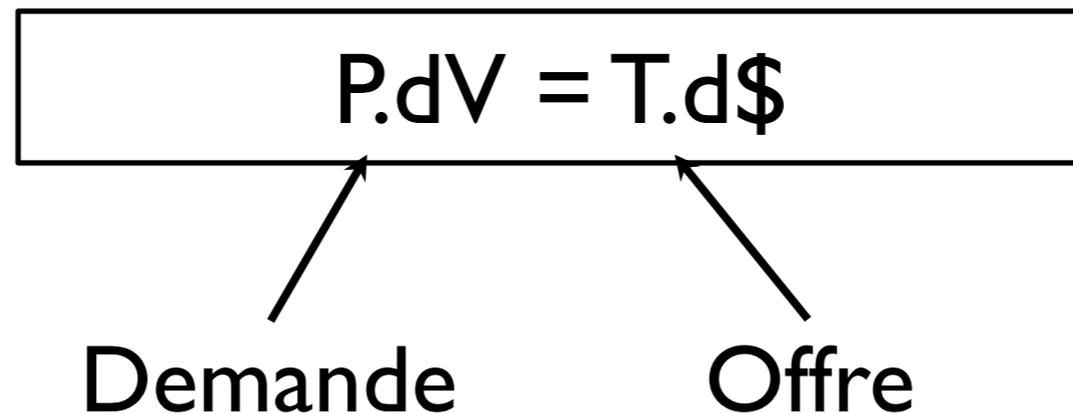
$$dG = -P.dV + T.d\$$$

De la thermochimie à l'économie

Note: Les potentiels P et T sont des grandeurs propres à l'économie. Elles jouent cependant un rôle analogue à la pression P et la température T d'un gaz en physique: P est une "pression" sociale au sens d'Émile Durkheim T est une "température" au sens usuel de prendre la "température" de l'économie, ou de refroidissement ou surchauffe économique.

Relation de Gibbs-Duhem pour l'économie

À l'état stationnaire:
 $dG = -PdV + Td\$ = 0$

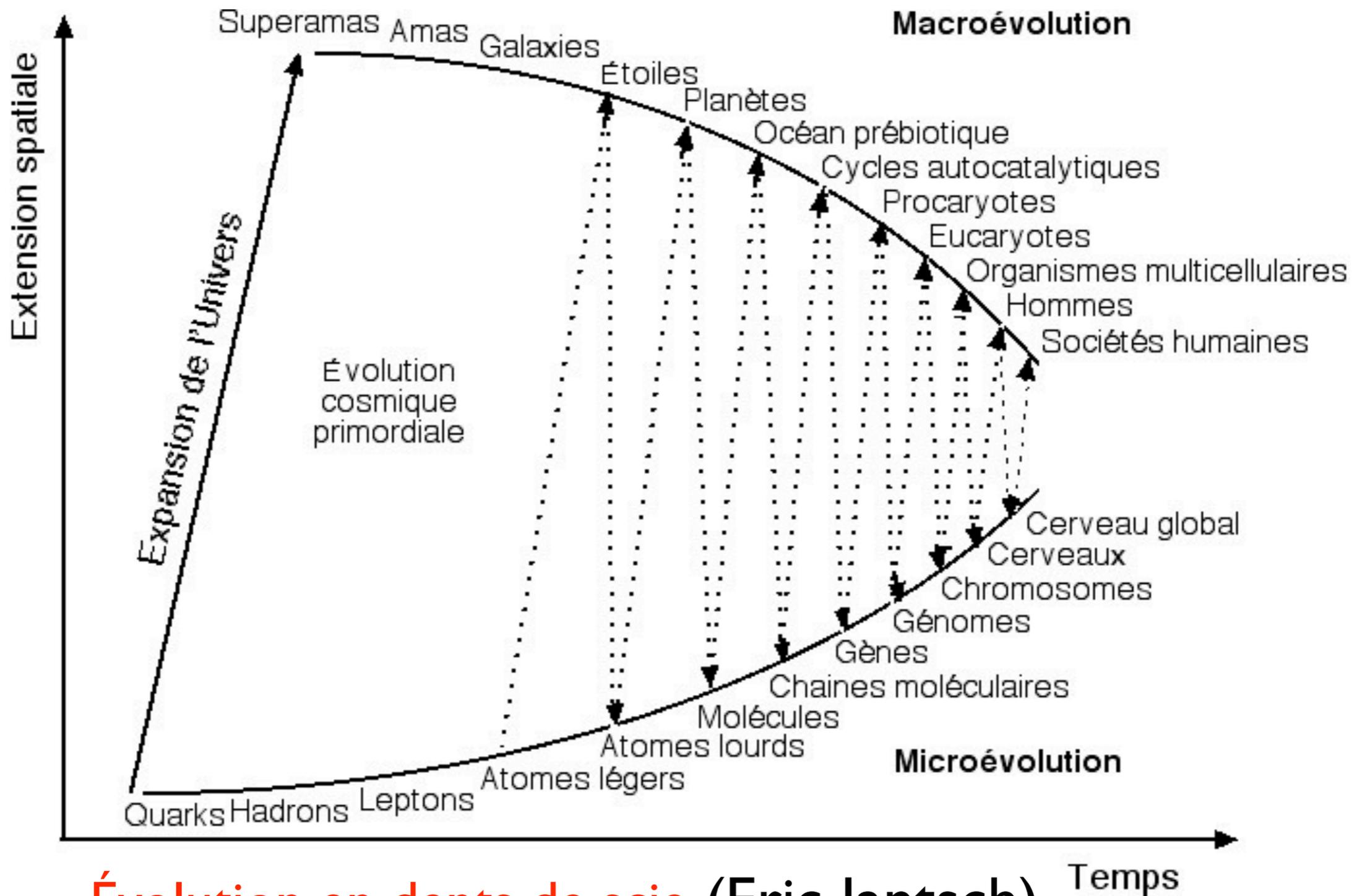


Remarque: l'énergie n'apparaît pas dans cette relation.
Elle est ignorée par les économistes.

IV

L'auto-organisation: un mécanisme universel

L'auto-organisation de l'univers



Évolution en dents de scie (Eric Jantsch)

Per Bak

Les structures dissipatives s'auto-organisent à la manière des transitions de phase au voisinage d'un point critique.

Il a appelé ce processus:

Criticalité auto-organisée



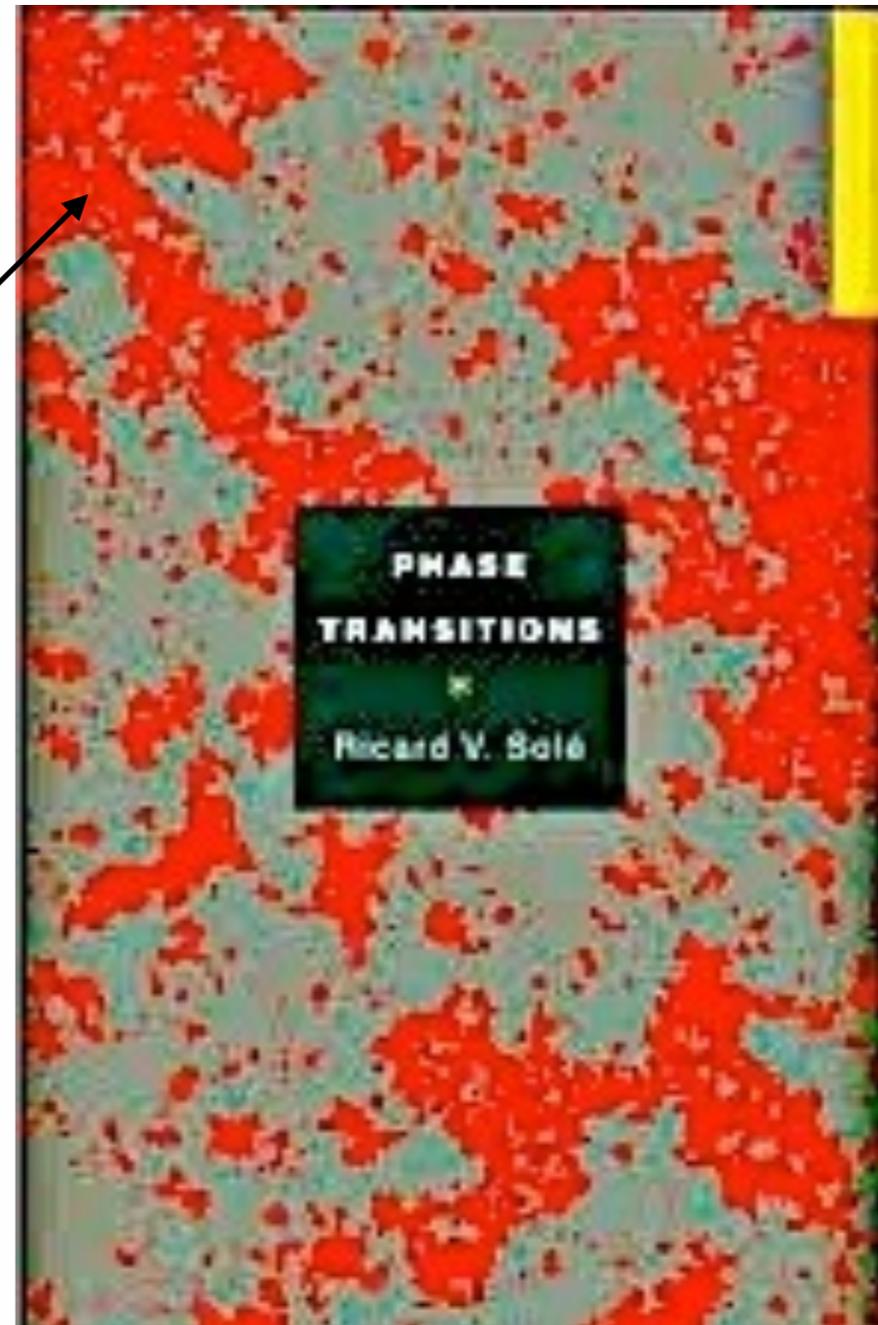
Per Bak
(1948-2002)

Ricard V. Solé

Quelques têtes de chapitre:

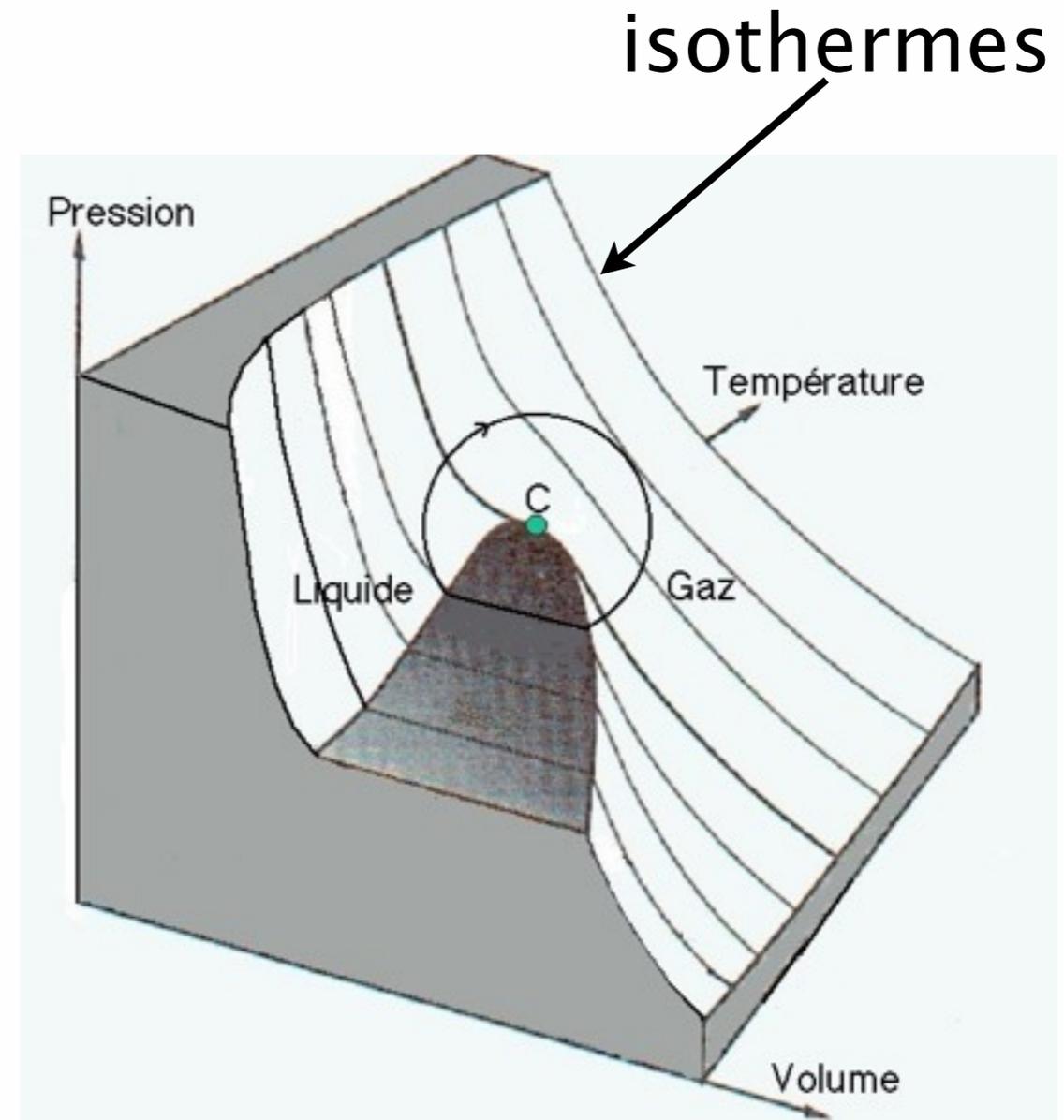
- Phase change
- Bifurcations
- Percolation
- Life origins
- Virus dynamics
- Gene networks
- Ecological shifts
- Collective intelligence
- **Social collapse**

Domaines
d'Ising



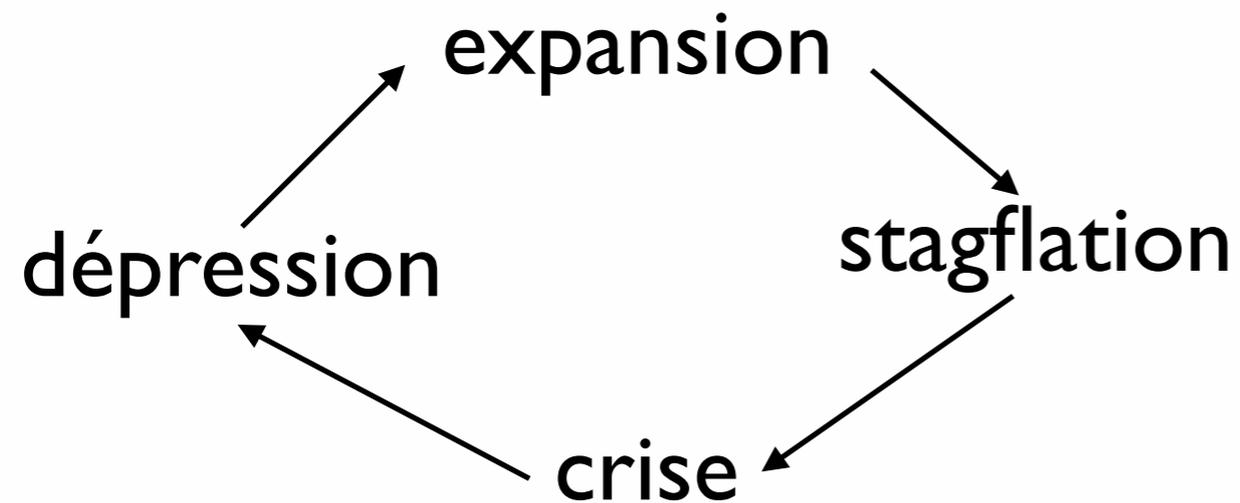
Cycle autour d'un point critique

La transition est continue dans la zone claire, abrupte dans la zone sombre (condensation).



Cycles historiques

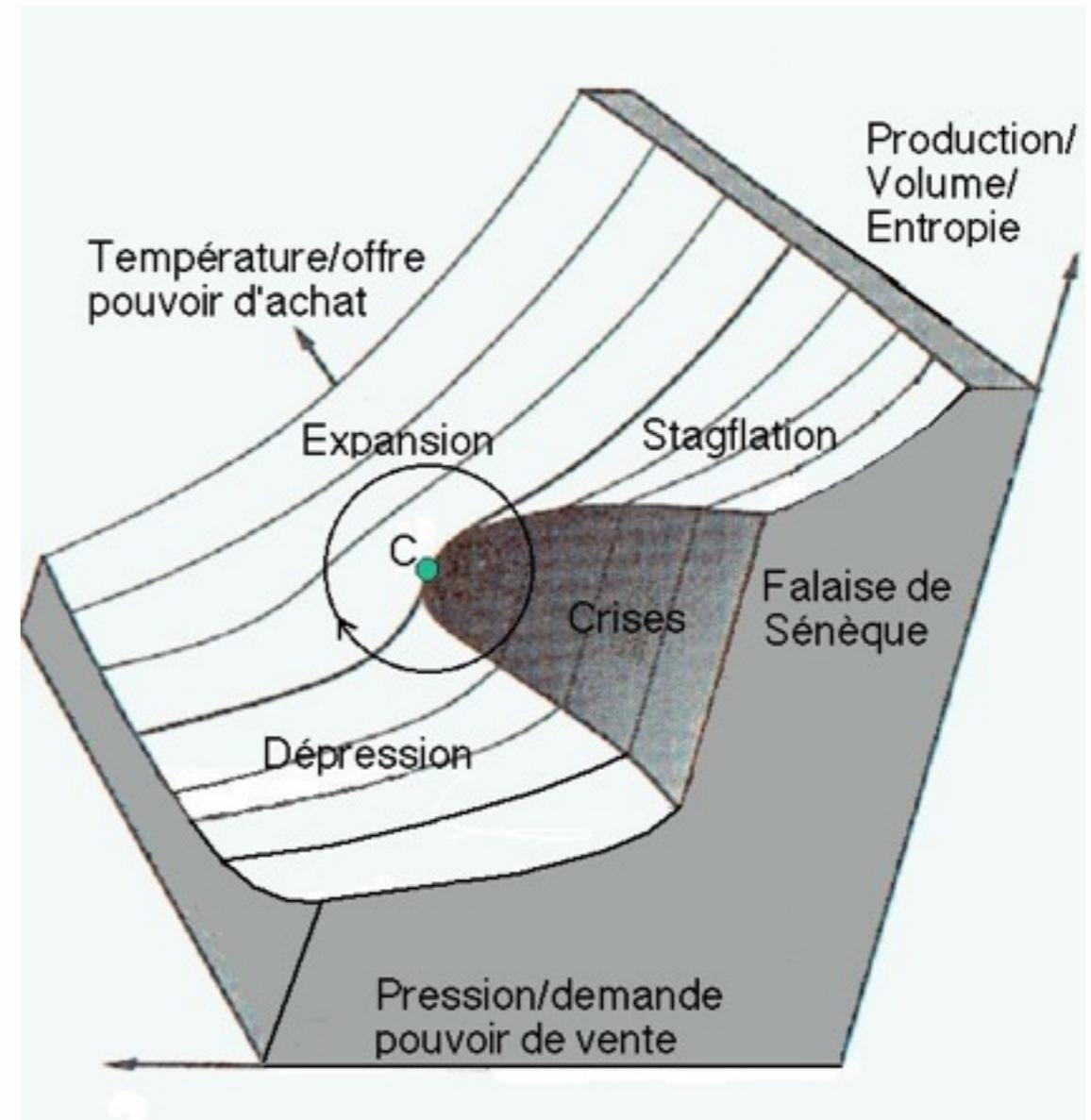
Peter Turchin & Sergey A. Nefedov ont mis en évidence 8 cycles économiques très semblables dans 4 pays différents et à 6 époques différentes:



Secular cycles
(Princeton, 2009)

Application à l'économie

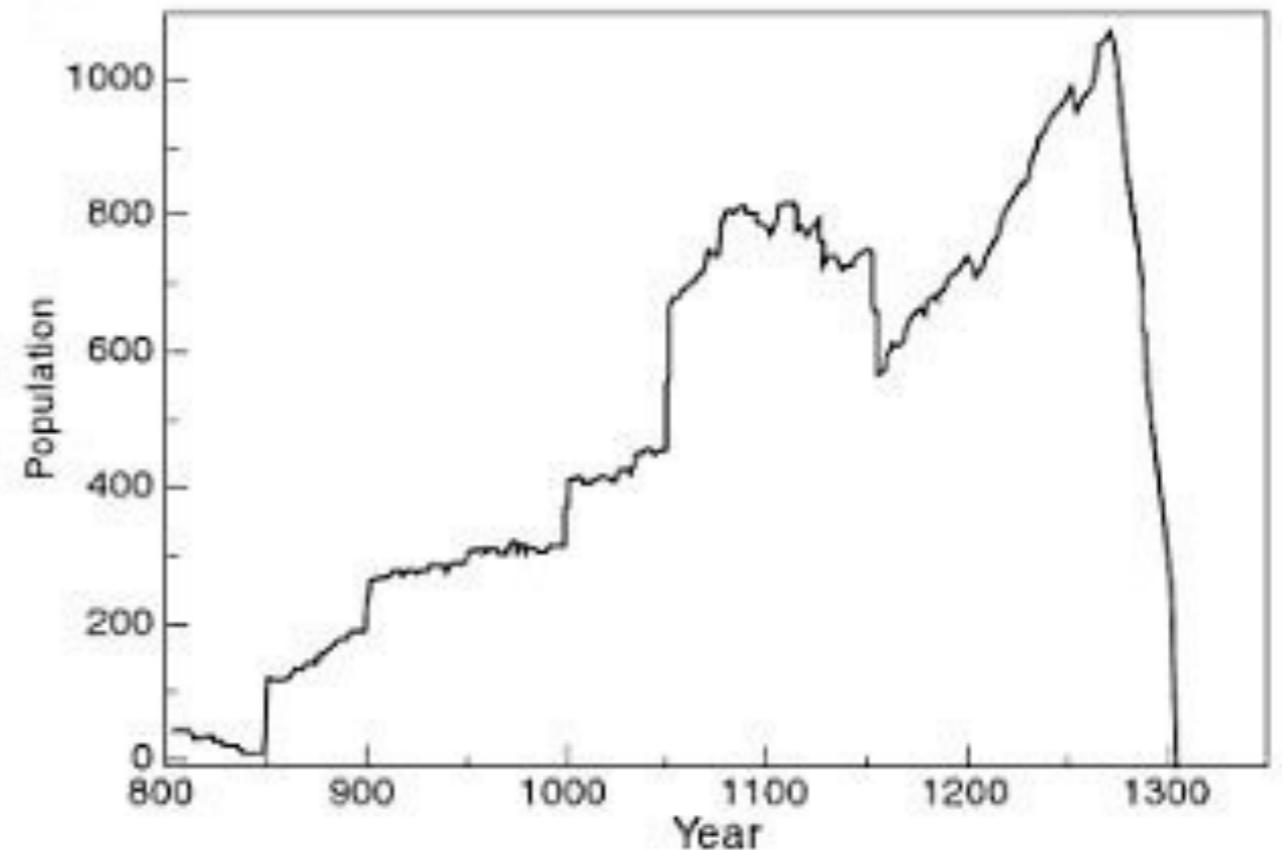
Les cycles historiques
(Turchin & Nefedov, 2009)
sont des cycles autour
d'un point critique



En crise, les sociétés peuvent s'effondrer



Île de Pâques



Population Anasazi

La notion d'équation d'état

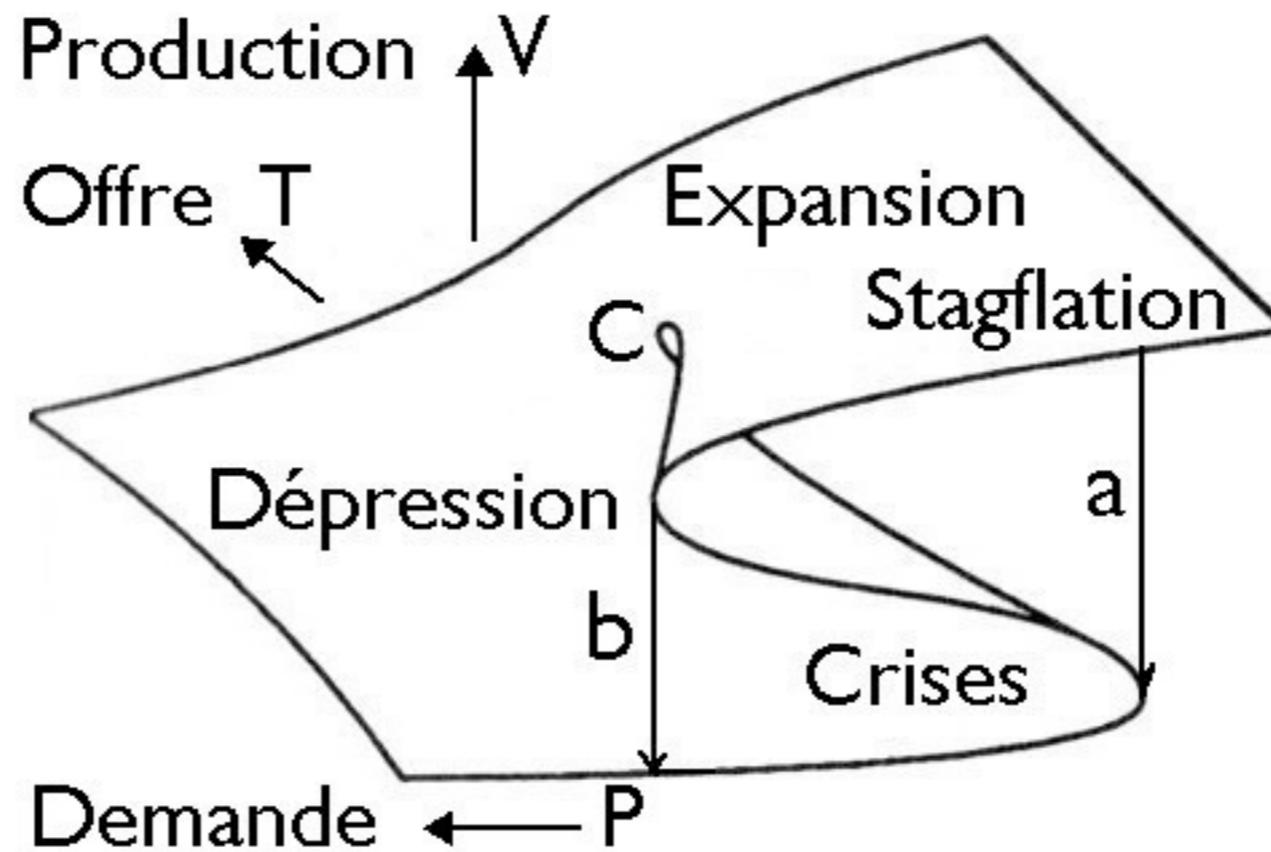
Équation des gaz parfaits:

$$PV = rT$$

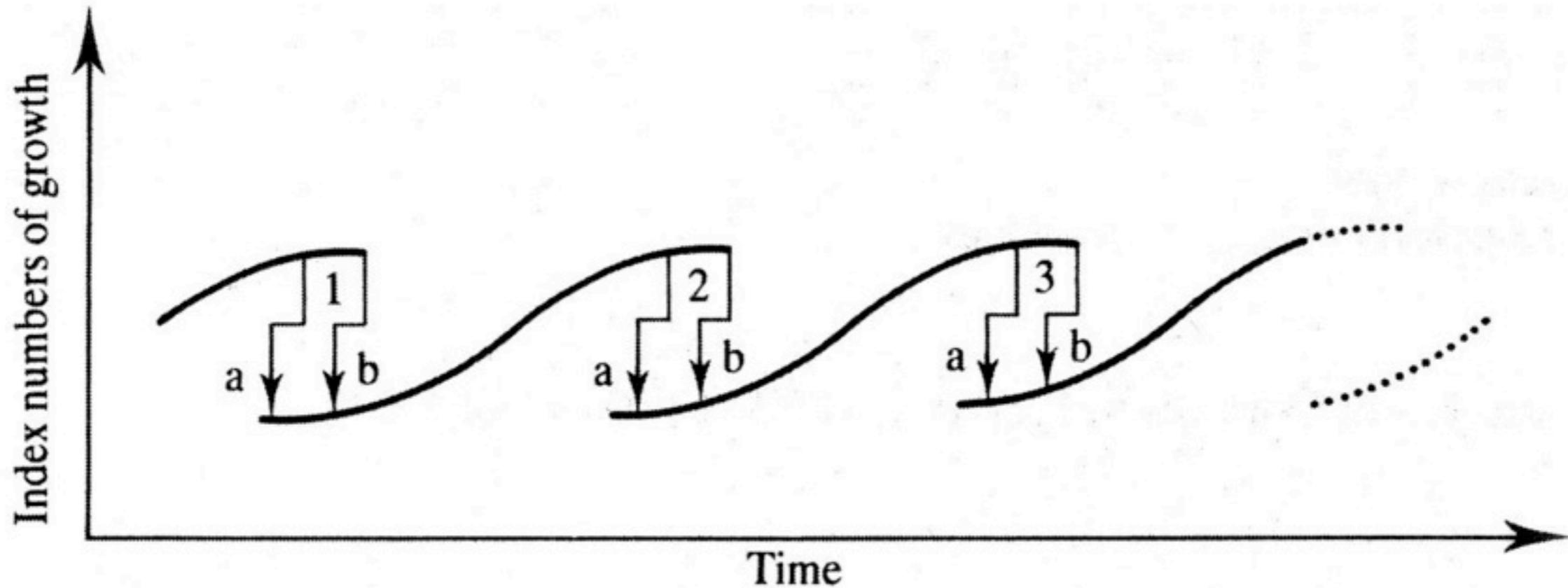
Équation de van der Waals:

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

Surface de van der Waals



Le modèle de Mensch

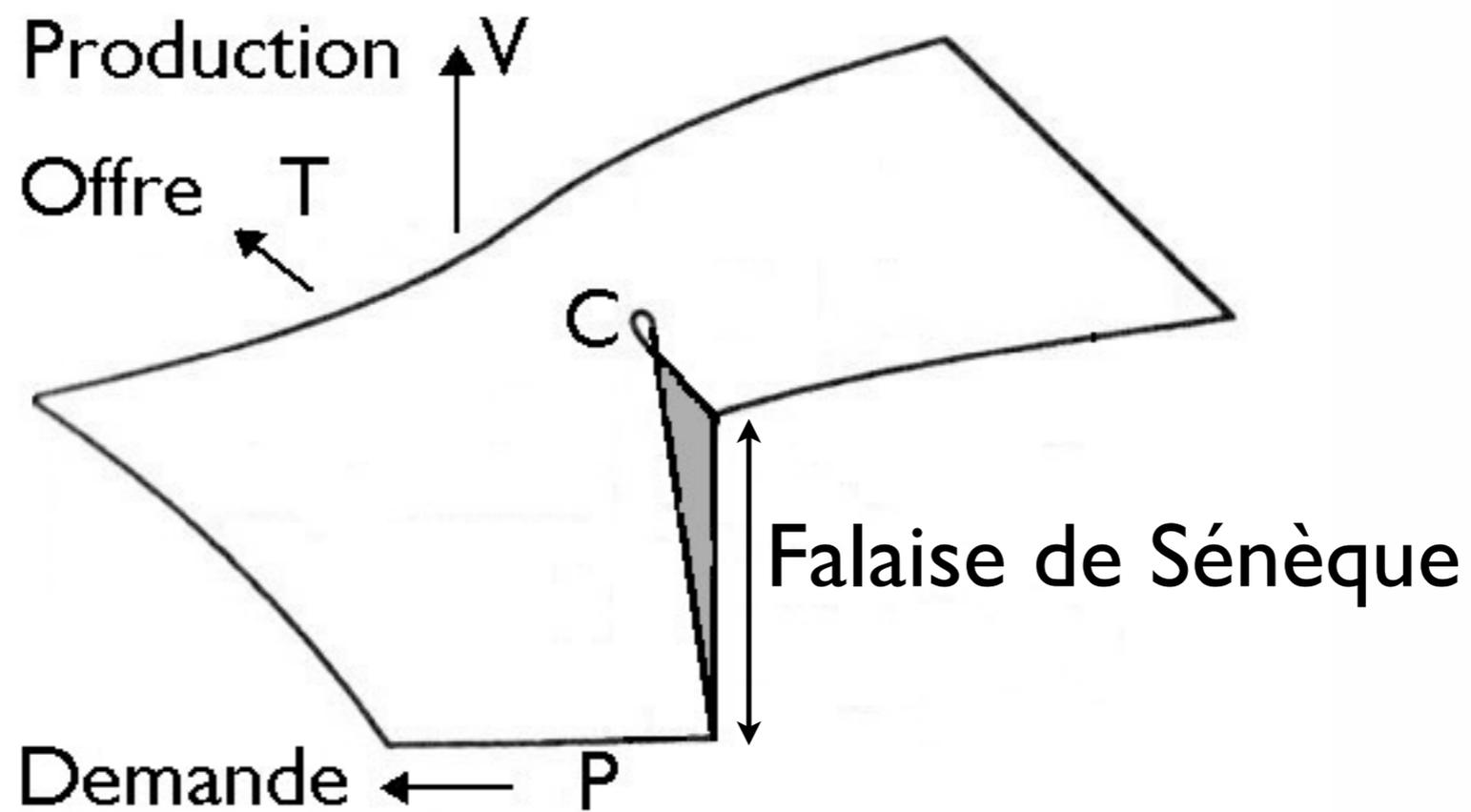


Source: Mensch (1979: 73).

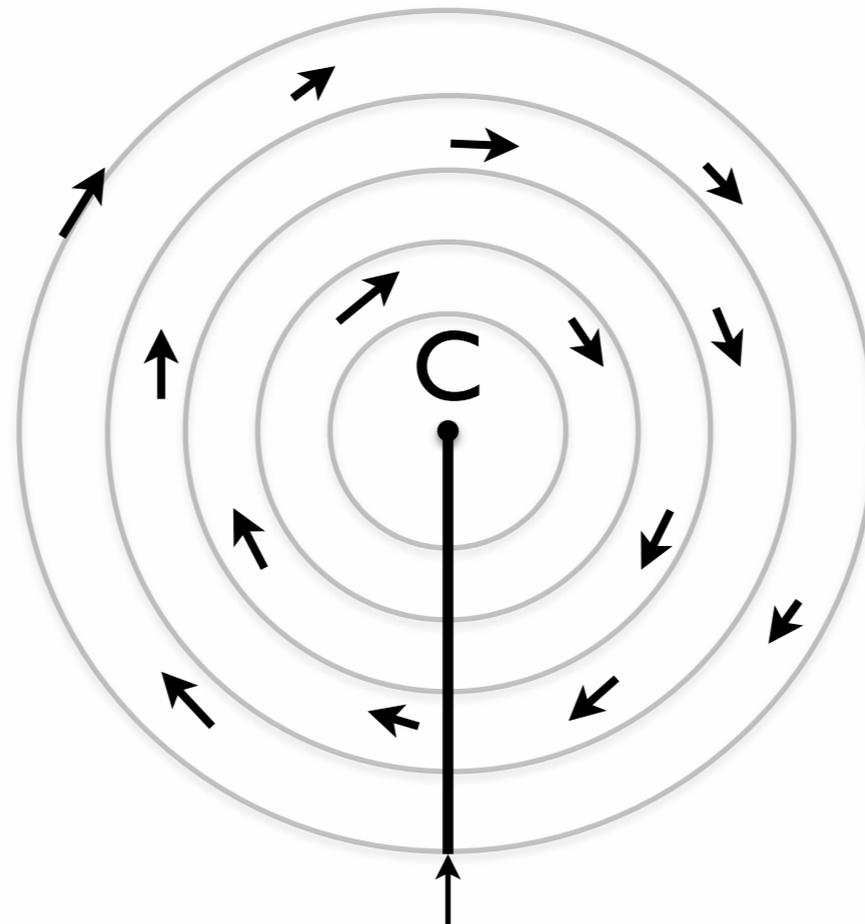
Gerhard Mensch, *Stalemate in Technology*, (Ballinger, 1979).

Évolution en dents de scie

La construction de Maxwell



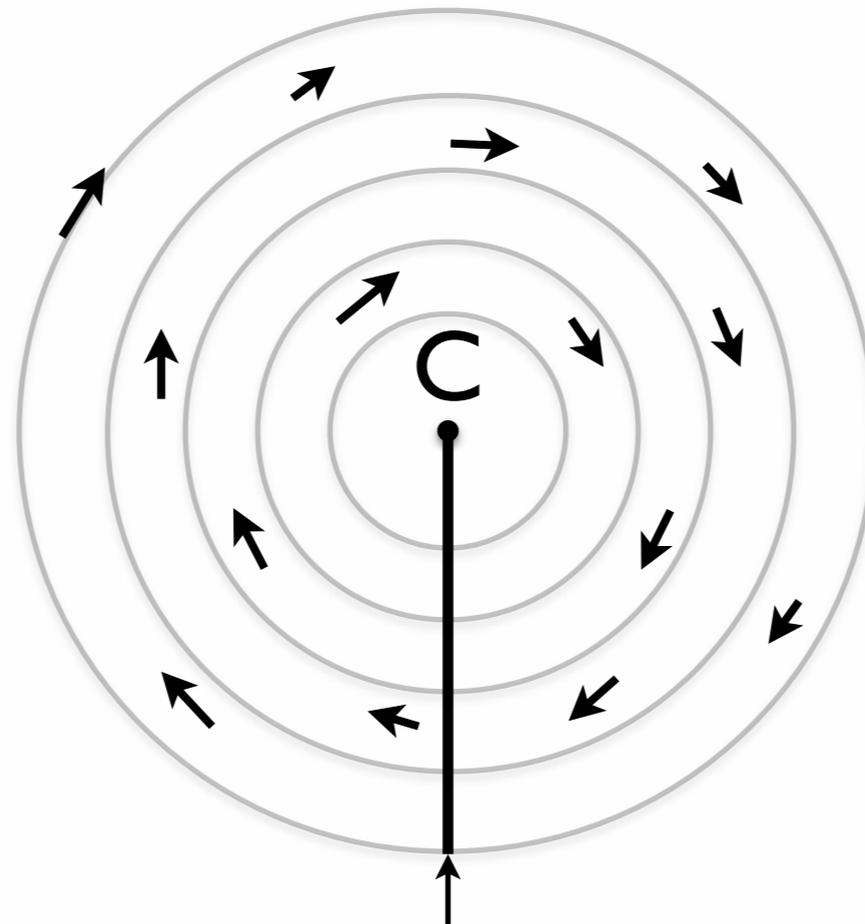
La tornade de Schumpeter



Falaise de Sénèque

L'amplitude des crises est en $1/f$

La tornade de Schumpeter



Falaise de Sénèque

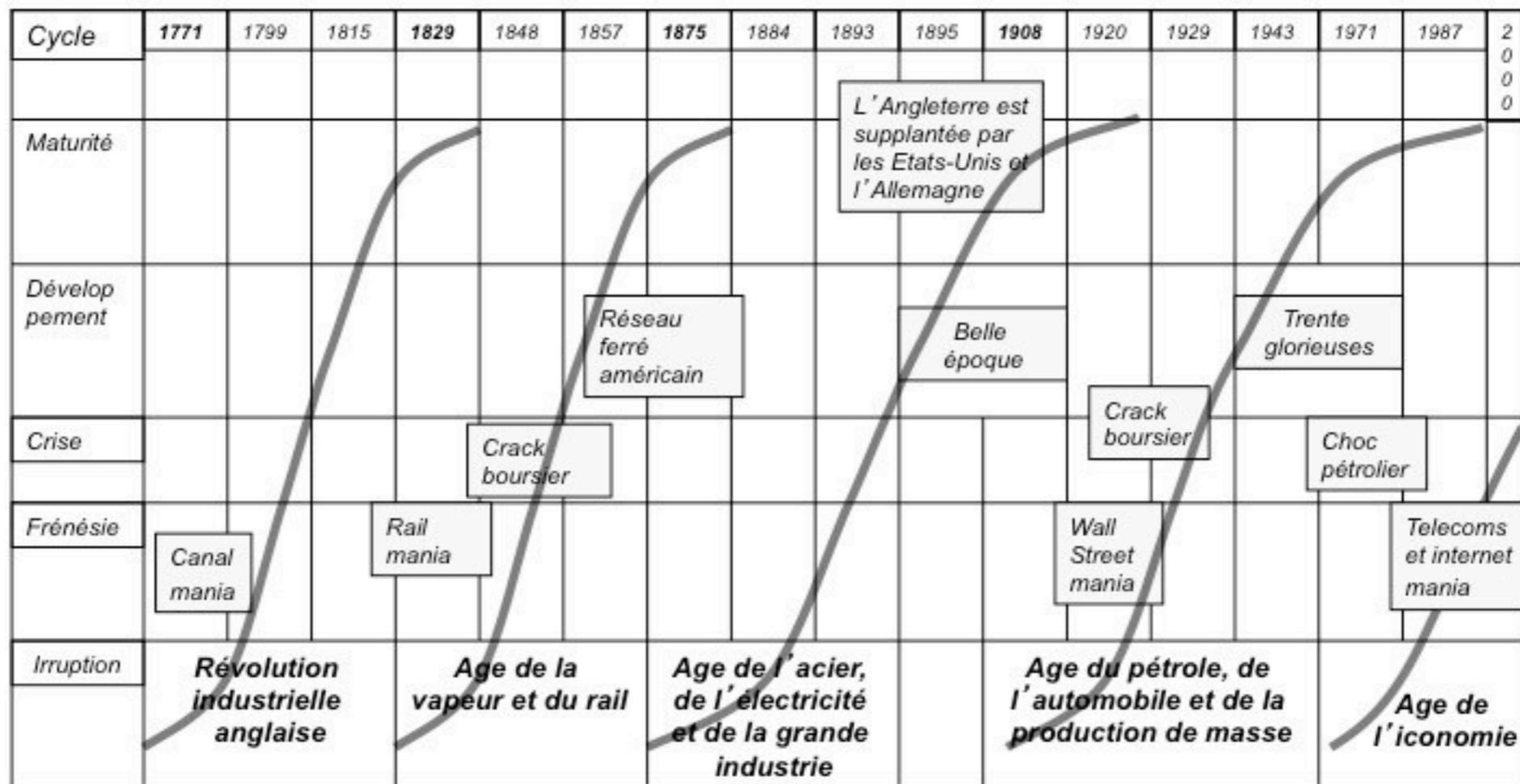
La phase de crise est d'autant plus importante que les productions sont *interconnectées* (tornade excentrée): Mensch note que les innovations ne sont pas uniformément réparties.

Période des cycles

Petites entreprises.....Cycles de Kitchin.....3 à 5 ans
Moyennes entreprises..Cycles de Juglar.....7 à 11 ans
Grosses 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 de Kondratiev

La succession des cycles



Source: site de Claude Rochet

V

Le rôle de la monnaie

La température économique

$T = \text{offre} = (\partial G / \partial \$)_V = \text{énergie dissipable}$
par unité monétaire.

Comme pour la convection, des différences de température économiques apparaissent *spontanément*.

Une monnaie ou “marché” unique implique une température moyenne unique, mais plus le marché est étendu plus l’amplitude des fluctuations est importante.

Les fluctuations économiques

Les inégalités croissent entre États partageant la même monnaie:

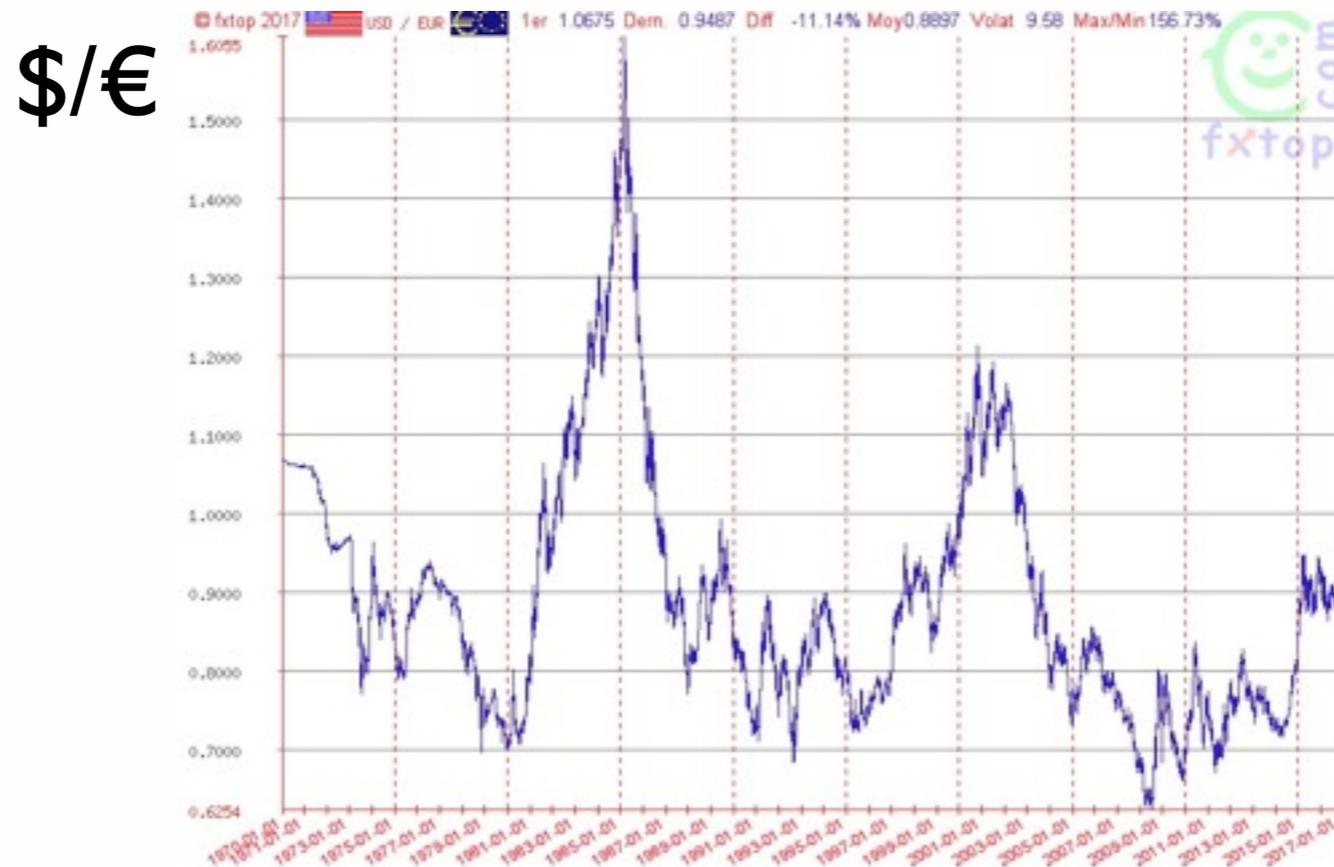
Union européenne: Allemagne/Grèce

USA: Californie-Texas/ Middle West

Entre individus, les inégalités de richesses sont invariantes par changement d'échelle (loi en $1/f$ dite de Pareto).

Cas de deux monnaies

Exemple du Dollar et de l'Euro



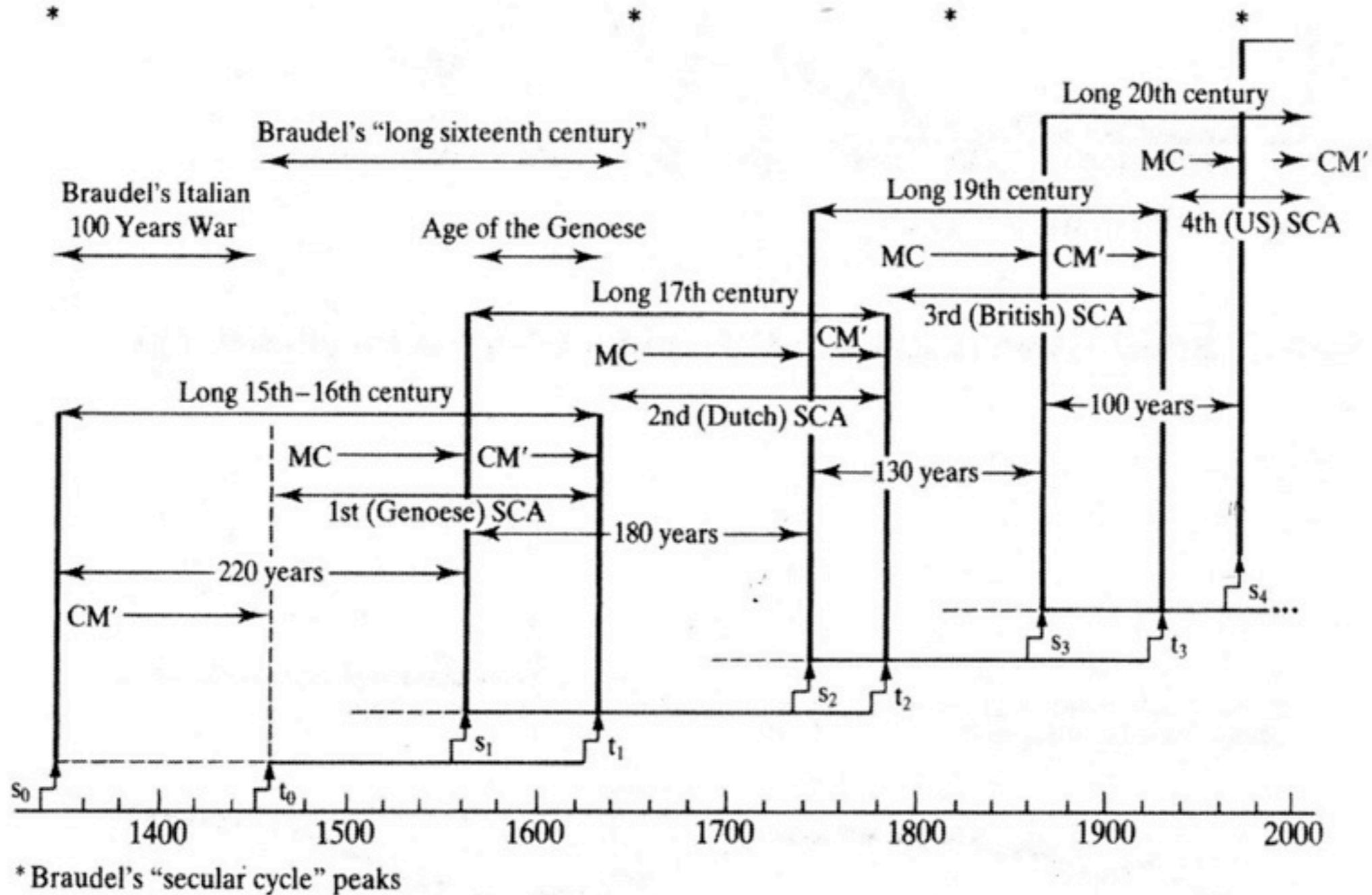
Comme la chaleur, la monnaie \$ va en moyenne de la source la plus chaude vers la source la plus froide:
L'usage de plusieurs monnaies est stabilisatrice
(dans la mesure où elles sont indépendantes)

Cas de deux monnaies

Exemple des colonies

Au XIXème siècle, les colonies ont servi de “source froide” aux pays européens qui ont investi des capitaux dans leurs colonies.

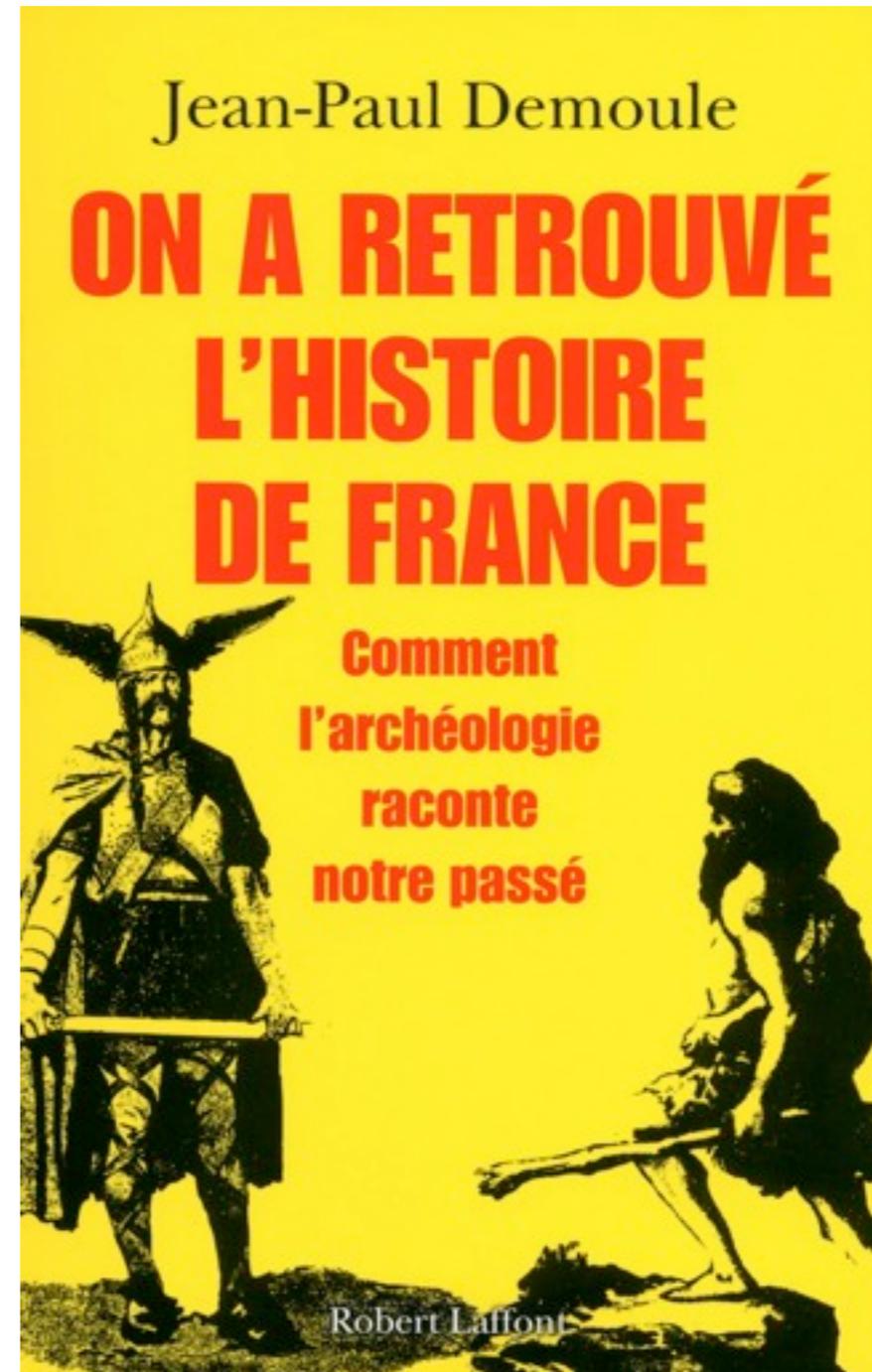
Cas de deux monnaies



Source: Giovanni Arrighi. The Long Twentieth Century

Résultats 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 » (2012)



Les grands effondrements de civilisation

Effondrement paléolithique..... 10.000 B.C.

« L'homme est chassé du paradis terrestre »

Fin de l'âge de bronze..... 1.200 B.C.

« Apparition du monothéisme »

Fin de l'empire romain..... 400 A.C.

« Fin du polythéisme »

Fin de nos civilisations?..... 2.000 A.C.

« Civilisation planétaire en homéostasie ? »

Cycle de 1.600 ans?

VI

Le processus autocatalytique

Une société est une structure dissipative

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, c'est-à-dire investit une fraction α ($0 \leq \alpha \leq 1$) de son revenu (diminue ses liquidités \$) afin de produire davantage de liquidités \$.

L'économie est un processus autocatalytique

Comme l'accroissement des populations animales ou végétales, l'accroissement des richesses est un processus autocatalytique (intérêts composés) conduisant à une croissance exponentielle: $dn/dt = r.n$

Quel processus limite la croissance?

Le modèle de Pierre-François Verhulst

1838: **Verhulst** modèle la croissance d'une population, au moyen de l'équation empirique:

$$dn/dt = r.n(1-n/K)$$

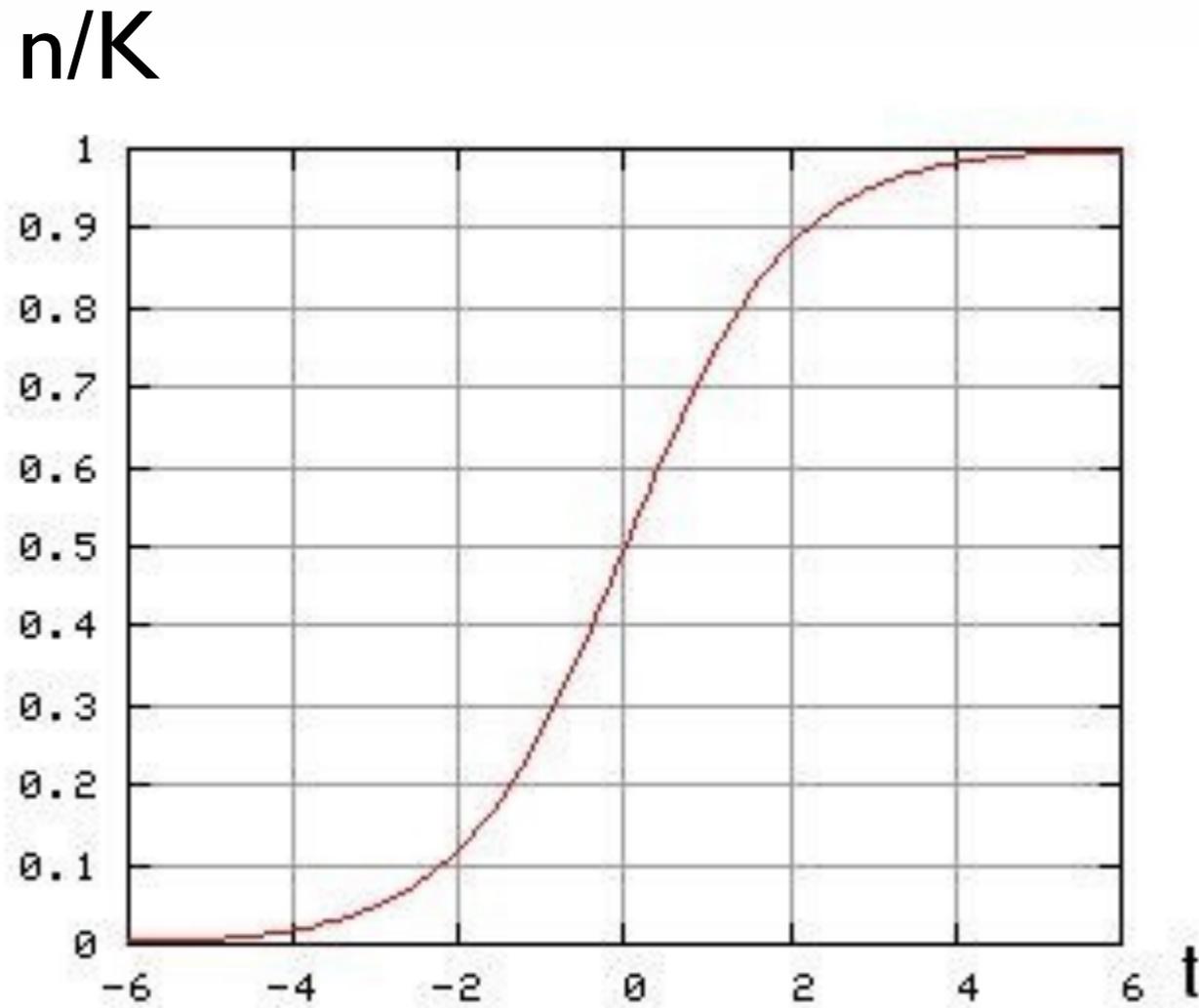
K = "Population limite" due au flux d'énergie fini.

Le modèle s'applique à la richesse d'une société.



Pierre François Verhulst
(1804-1849)

Solution continue

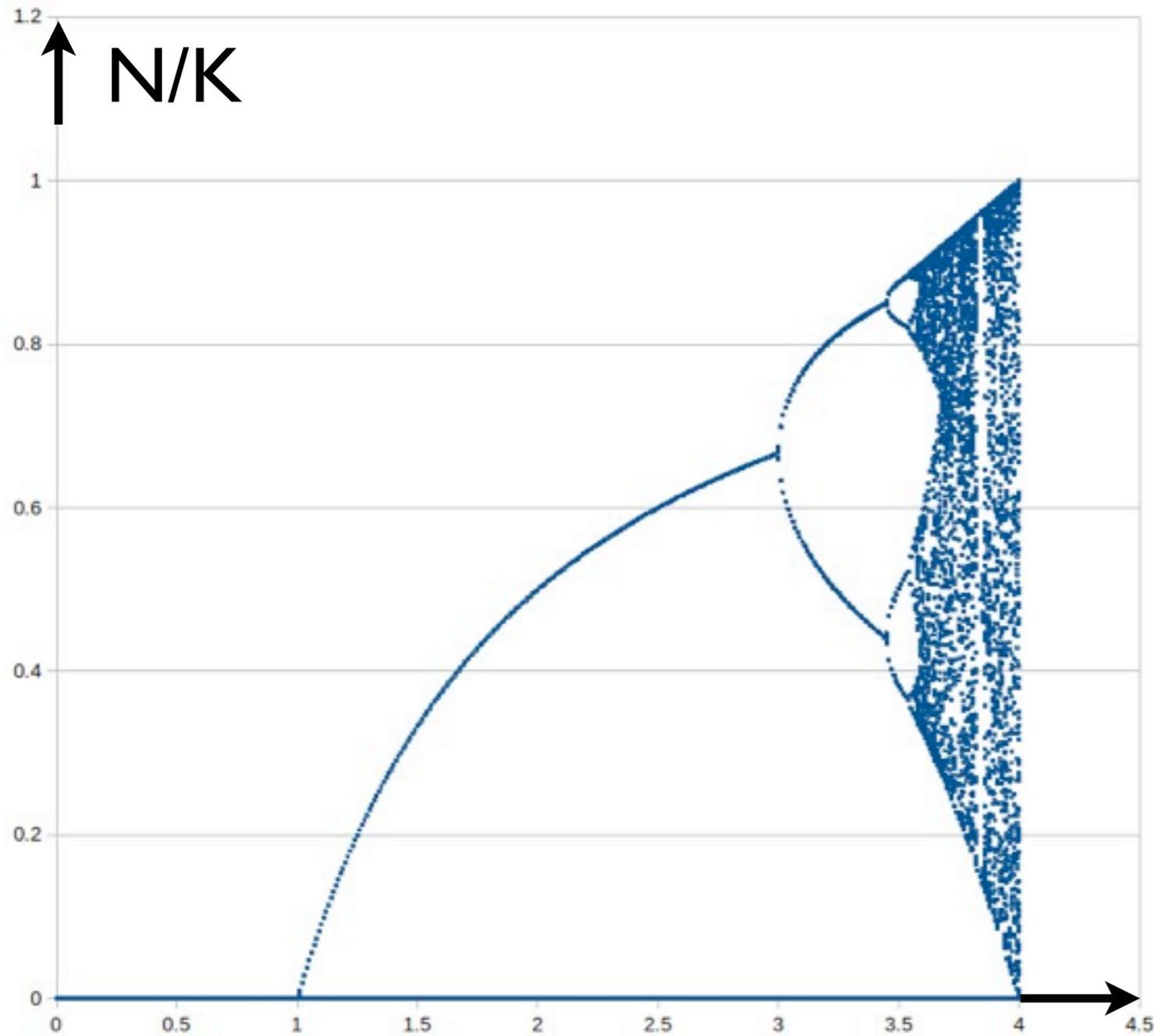


Sigmoïde



Pierre François Verhulst
(1804-1849)

Solution discrétisée



1975: Mitchell Feigenbaum découvre la transition vers le chaos.

Taux de croissance

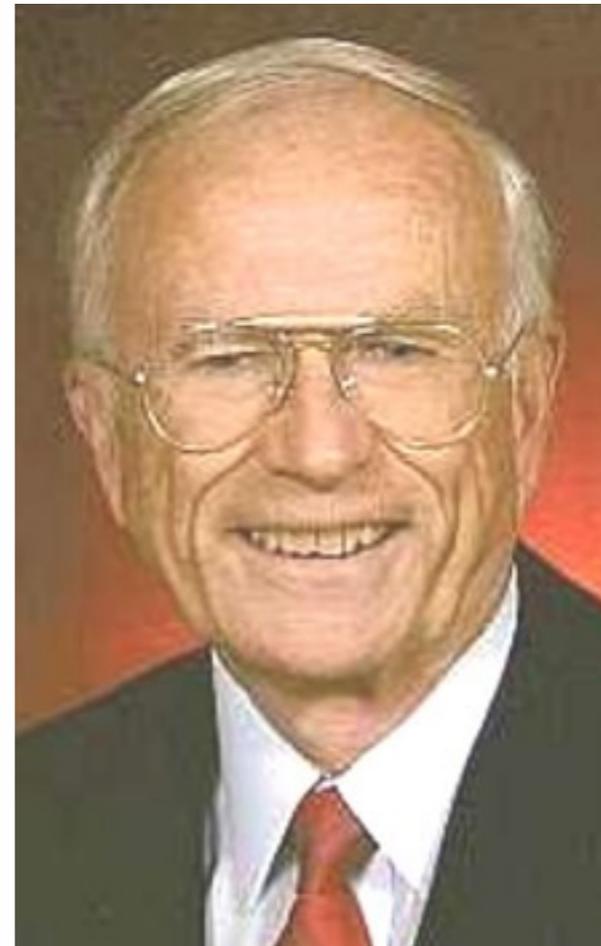
Les fluctuations économiques

En 1982, Albert Libchaber découvre que la convection obéit aux mêmes lois que la croissance des populations. En 1986 Feigenbaum et Libchaber reçoivent le prix Wolf de Physique pour cette découverte.

Clairement, ce résultat s'applique à tous les systèmes autocatalytiques donc aux écosystèmes et à l'économie.

Le modèle de Robert Ulanowicz

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

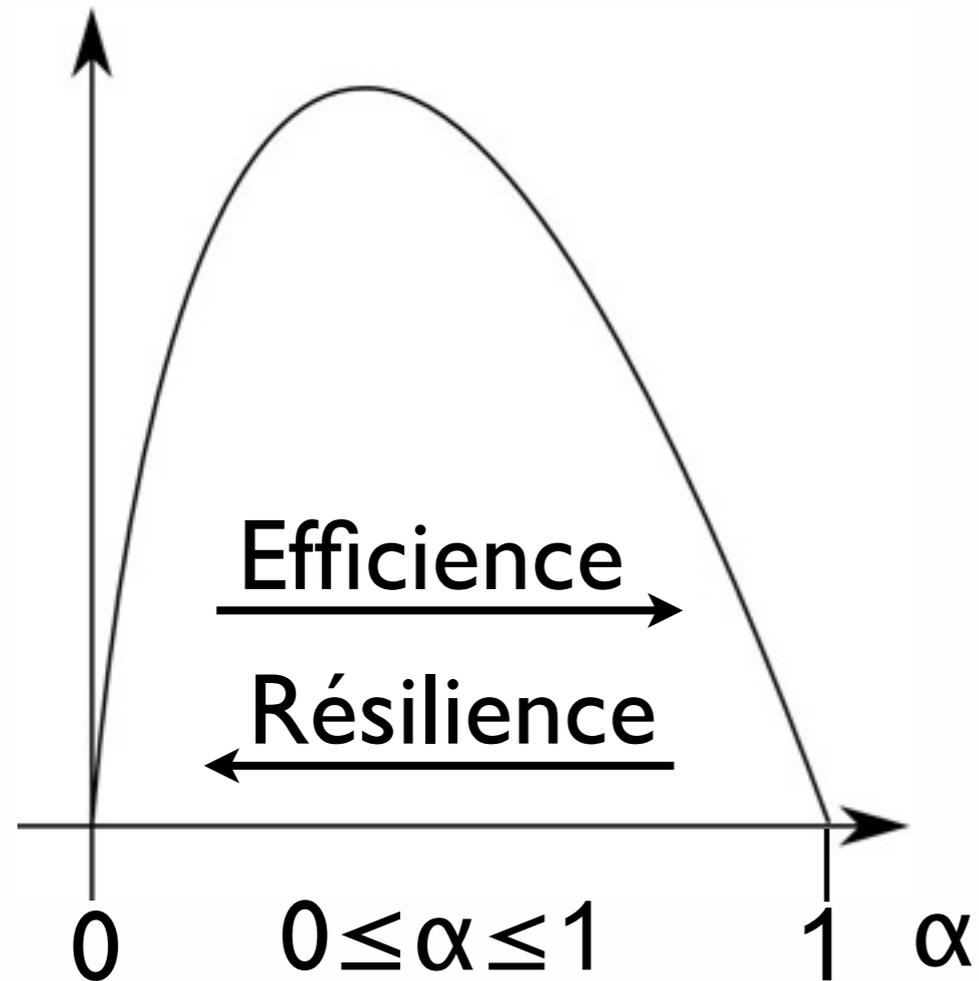


Robert Ulanowicz

Le modèle de Robert Ulanowicz

α = interconnectivité

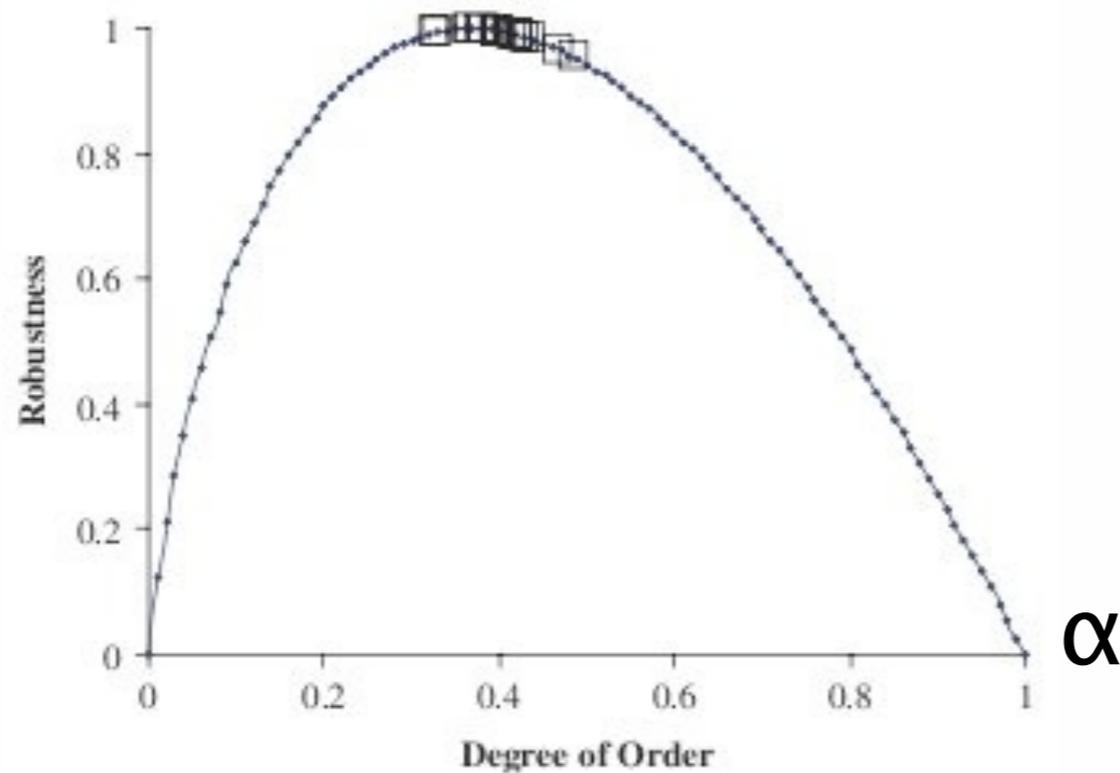
$-\alpha \cdot \ln(\alpha)$ (robustesse)



Robert Ulanowicz

Le modèle de Robert Ulanowicz

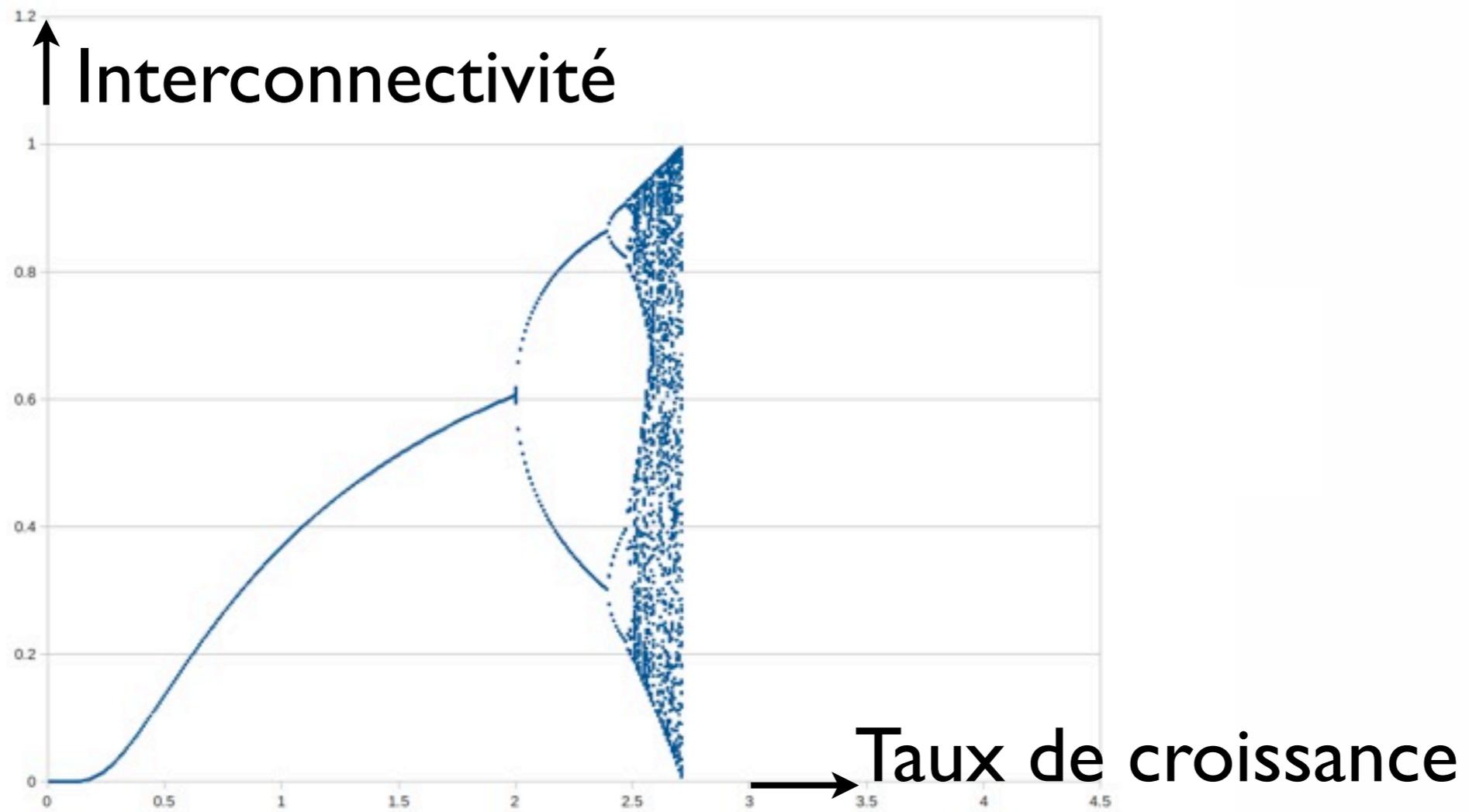
α = interconnectivité



Robert Ulanowicz

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

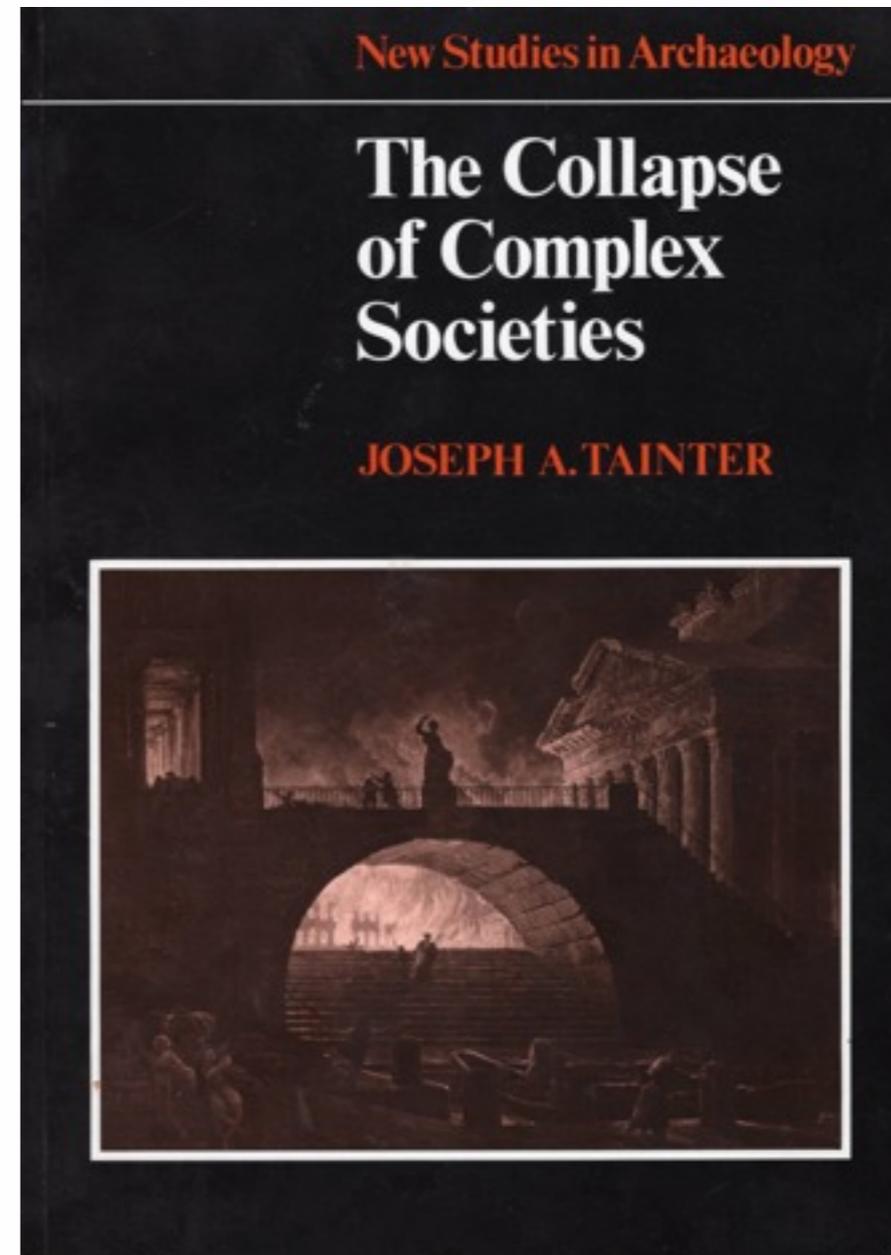
La transition vers le chaos



Joseph Tainter (1988)

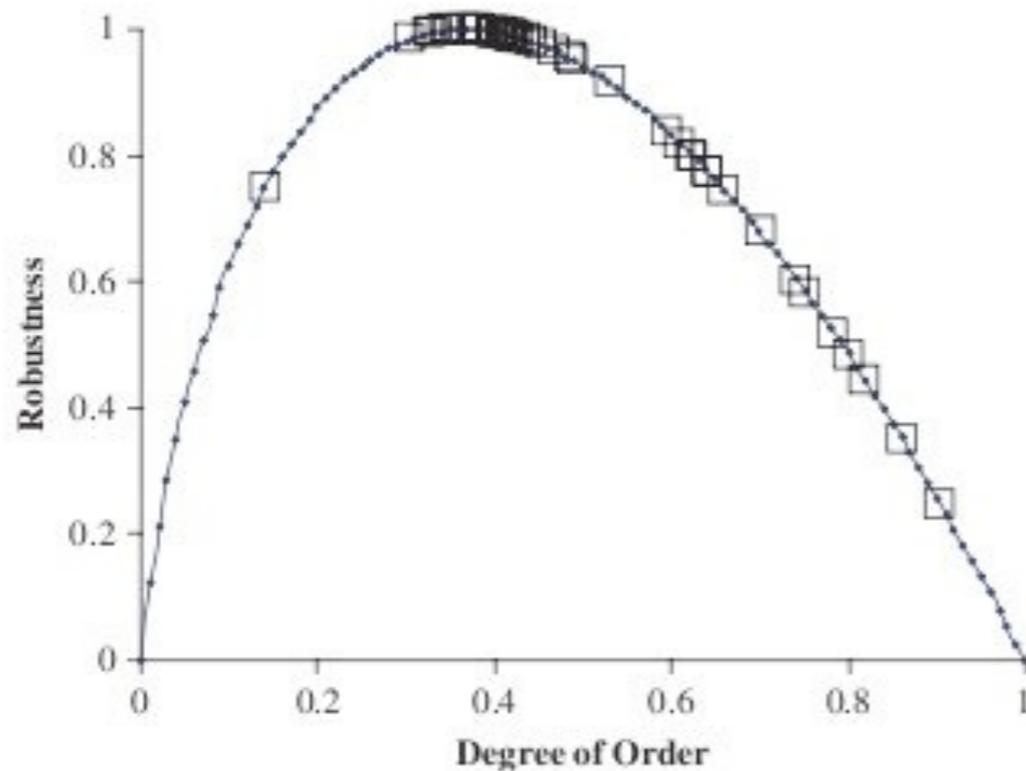
Le modèle d'Ulanowicz s'applique aux sociétés humaines: les échanges commerciaux jouent le rôle des échanges trophiques.

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



Le modèle de Robert Ulanowicz

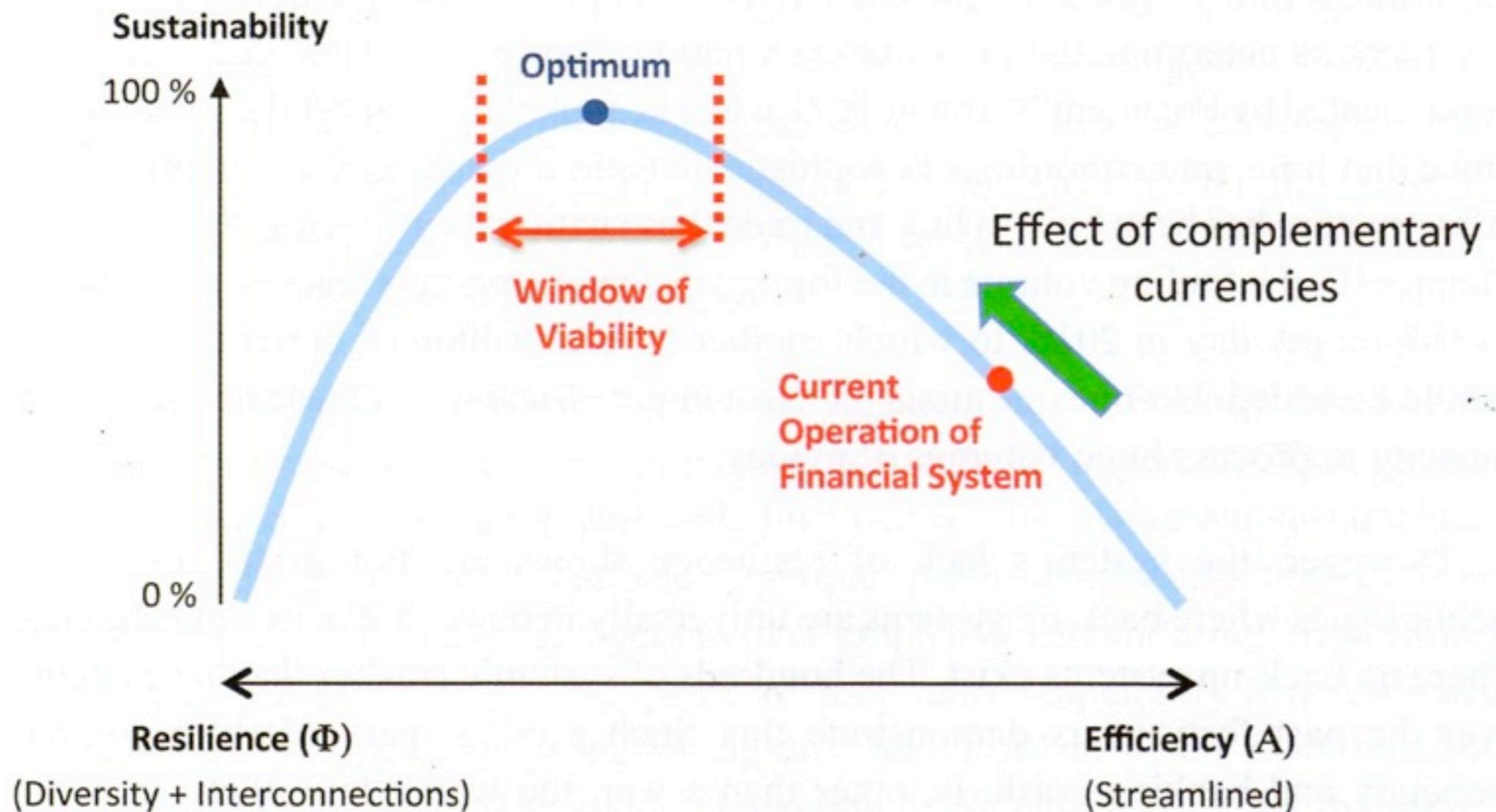
α = interconnectivité



Robert Ulanowicz

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

Application à l'économie



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

Analogie avec les écoulements fluides

Le paramètre α d'Ulanowicz s'apparente à la viscosité cinématique ν des écoulements:

ν = flux de d'énergie dissipée par viscosité/
stock d'énergie emmagasinée sous forme
inertielle.

α = flux de monnaie dépensée par an/stock de
monnaie capitalisée (capital). Voir diapo 48.

Robustesse maximale

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

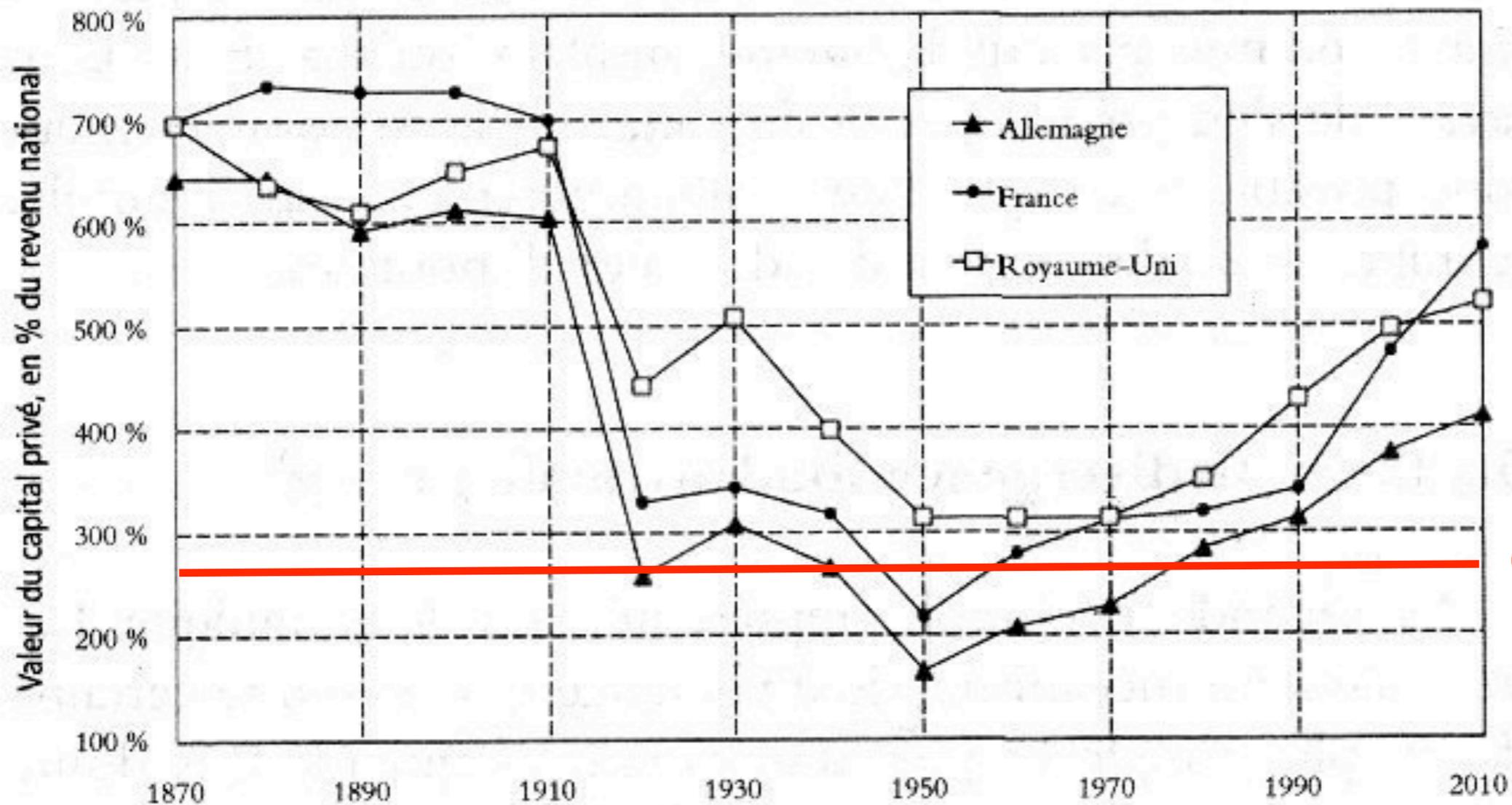
$1/\alpha$ = patrimoine exprimé en années de revenu

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.

Conjecture: un nombre de Reynolds pour l'économie

Les hydrodynamiciens prédisent le passage d'un écoulement laminaire à un écoulement turbulent par un nombre sans dimension:

$$\text{le nombre de Reynolds } R = L.u/v$$

De même la transition d'une économie vers le chaos pourrait être caractérisée par un nombre de "Reynolds"

$$R_e = N. U/r$$

où N = population partageant la même monnaie

U = inégalités (gradients) de richesses

r = robustesse d'Ulanowicz-Lietaer

Conjecture (suite)

Nombre de Reynolds pour l'économie $R = N \cdot U/r$

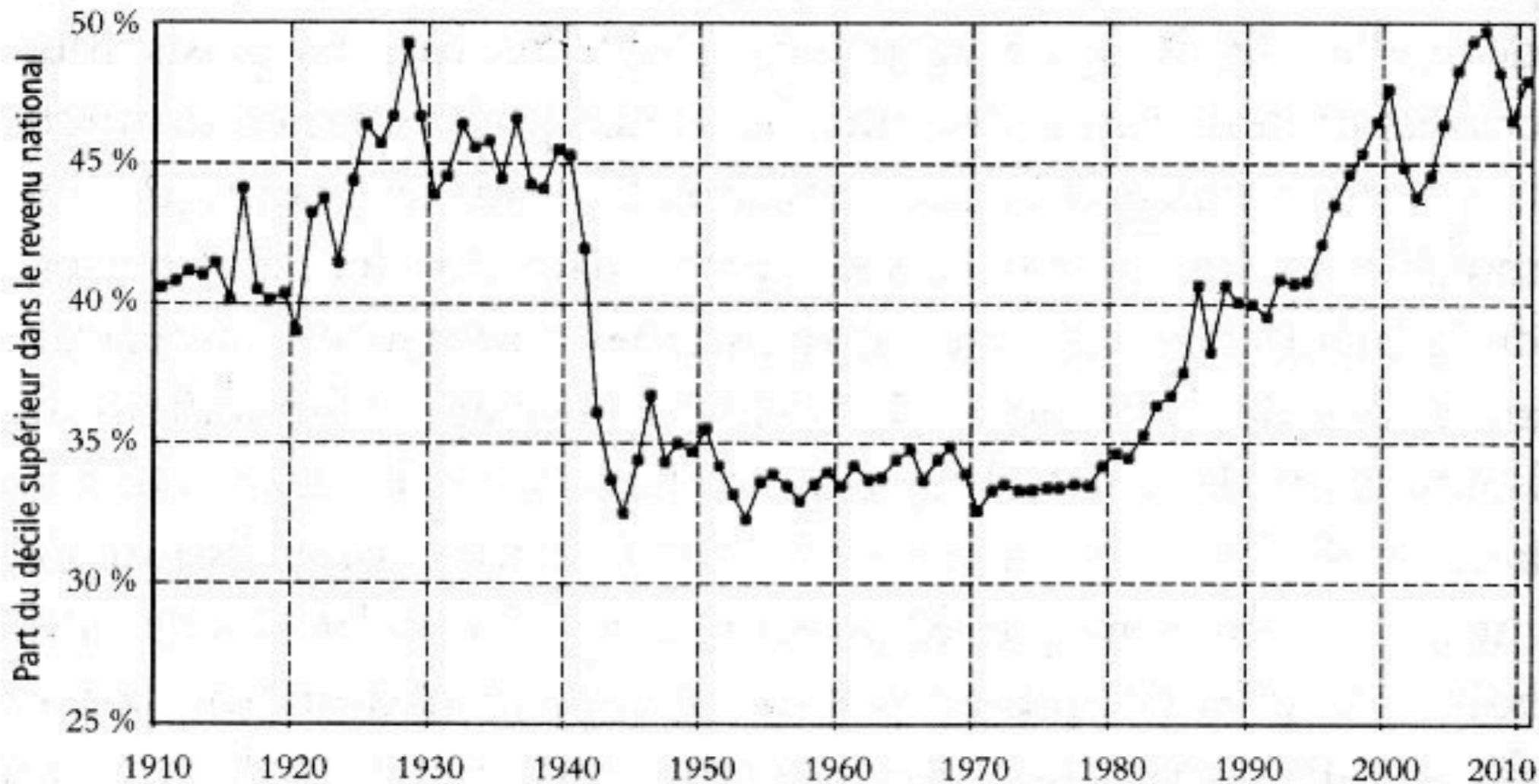
Une civilisation s'effondre lorsque
 $R_e \geq R_{ec}$ (nombre critique).

Inégalités de richesses au XXème siècle

Vers le chaos



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



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.

Évolution passée

Nombre de Reynolds pour l'économie $R = N \cdot U/r$

Une société s'effondre lorsque
 $R \geq R_c$ (nombre critique).

R a été très élevé:

- sans doute en France à la révolution (N élevé, U élevé)
- en Europe à la veille de la première guerre mondiale (U élevé, r faible). (1ère figure de Piketty)
- en URSS en 1980 (N élevé, r faible)

R est élevé aujourd'hui aux États-Unis (U élevé, r faible)

Tendance mondiale actuelle

Au XXIème siècle:

N croît: mondialisation de l'économie

U croît: voir 2ème figure de Piketty

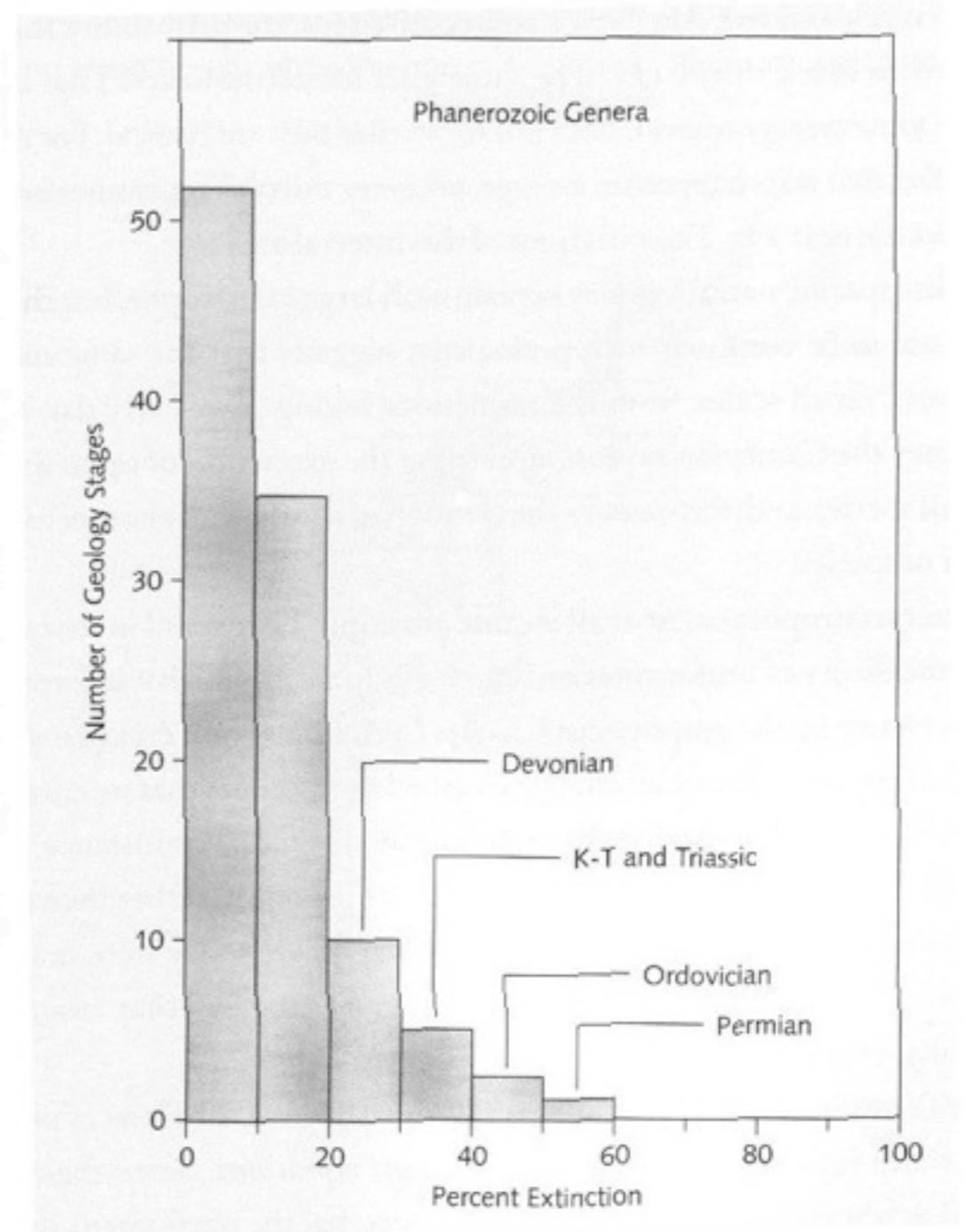
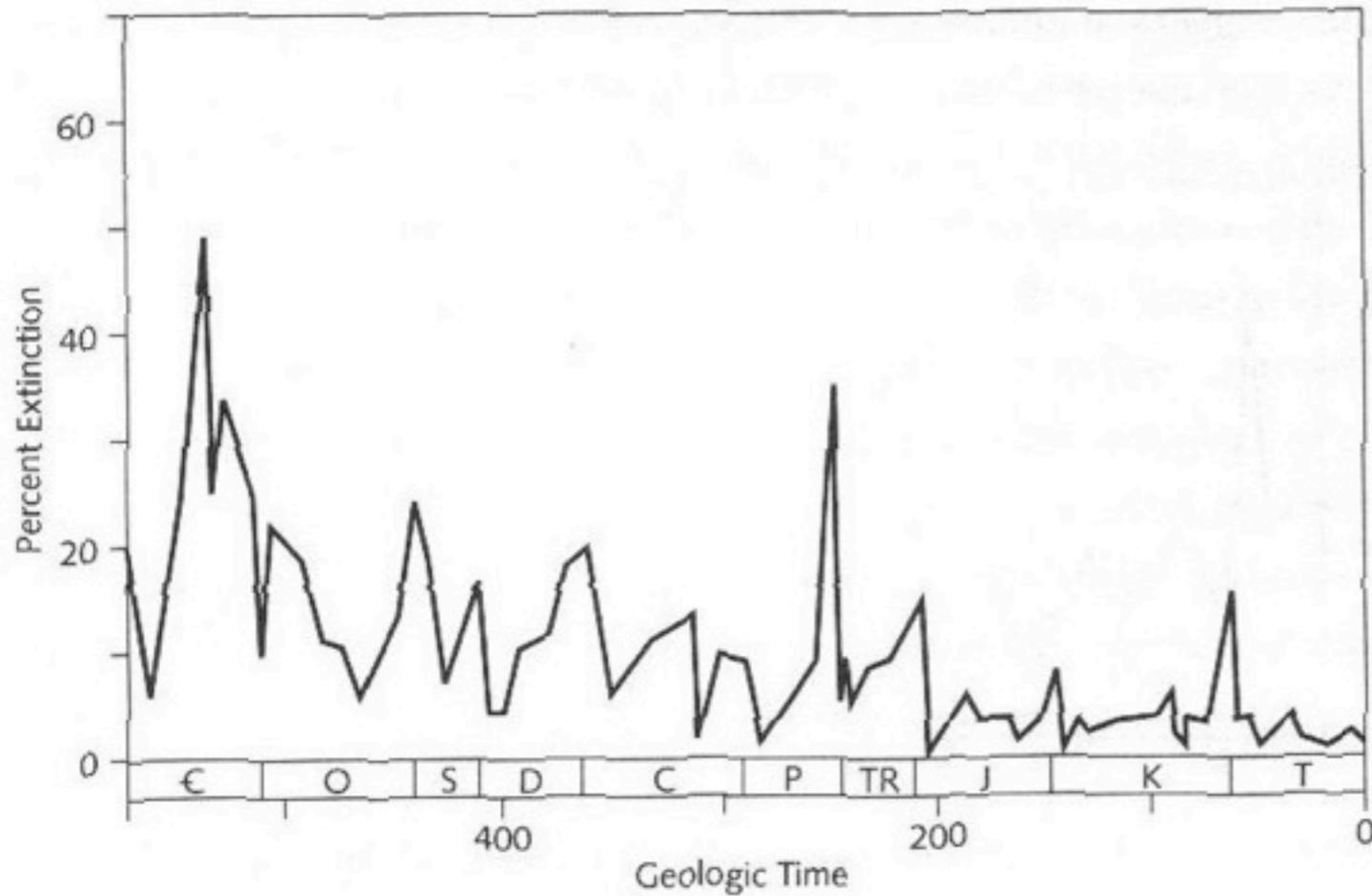
r décroît: voir 1ère figure de Piketty

donc $R = N \cdot U/r$ croît:

**On approche du nombre critique R_c
pour l'économie mondiale ...**

Fin

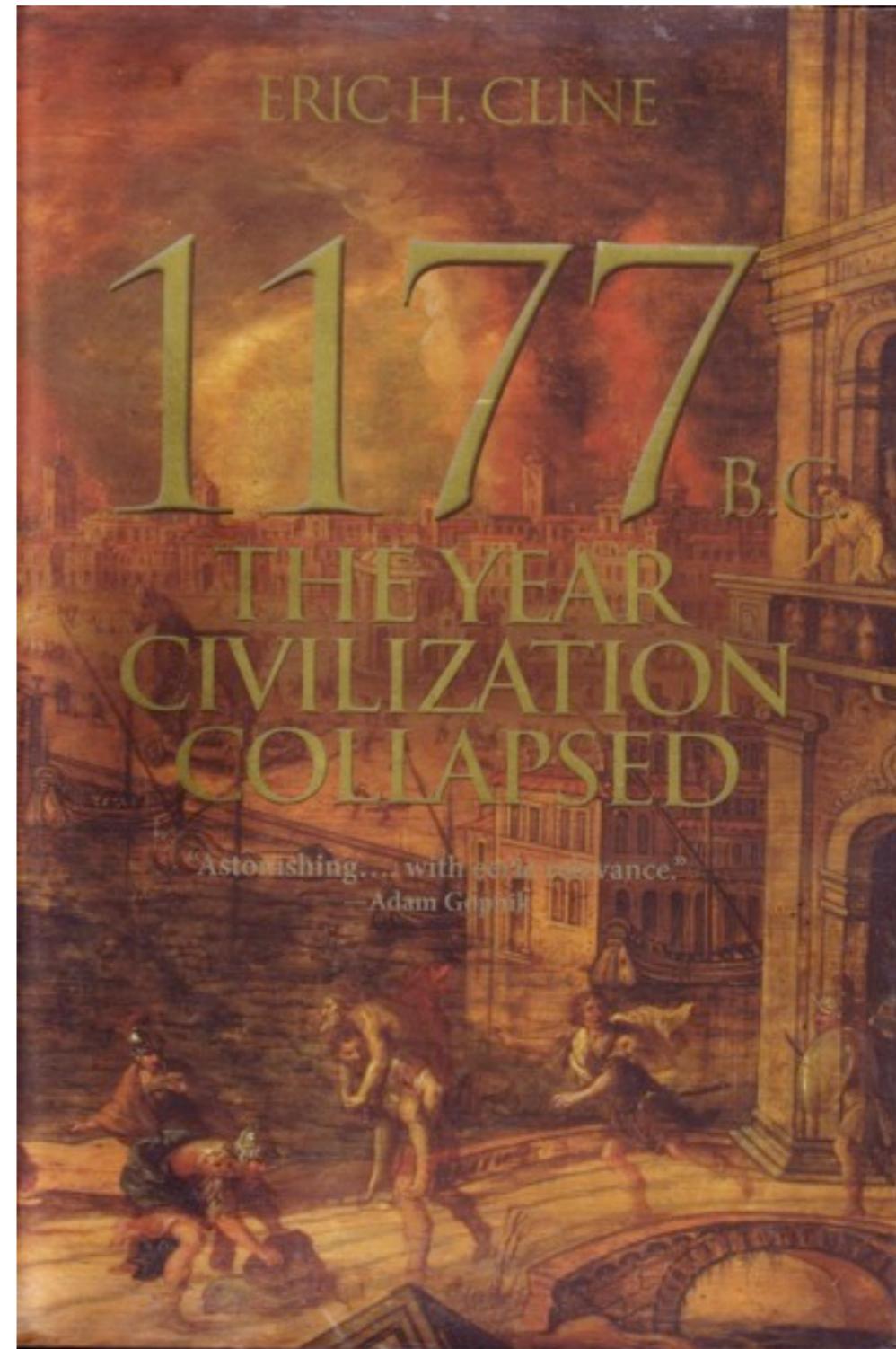
Les extinctions d'espèces sont en 1/f

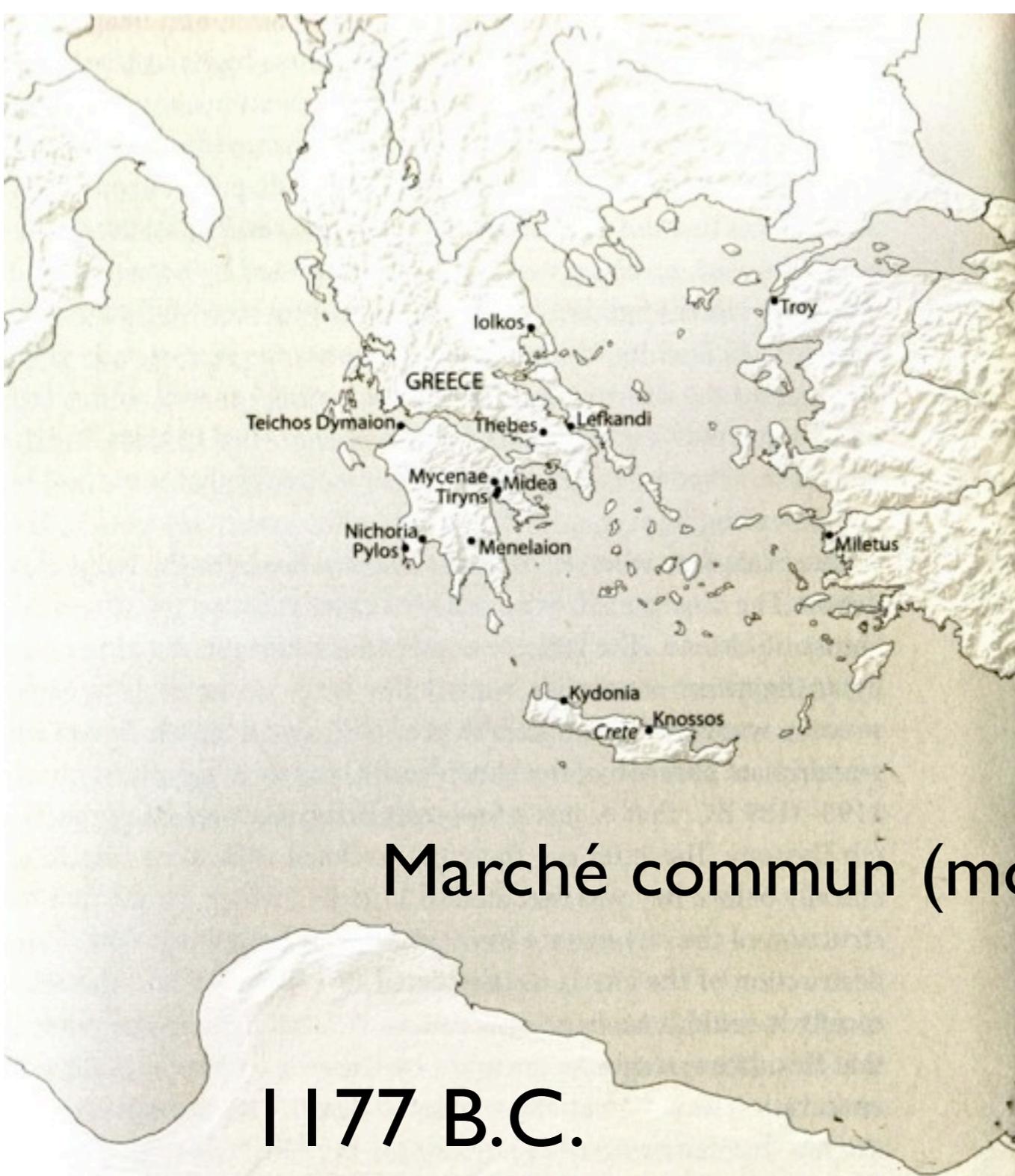


Per Bak et Kim Sneppen (1993)

Eric H. Cline (2014)

1177 B.C.
The Year
civilization
collapsed





Marché commun (monnaie: or)

1177 B.C.

Égypte: monnaie nationale: blé

