

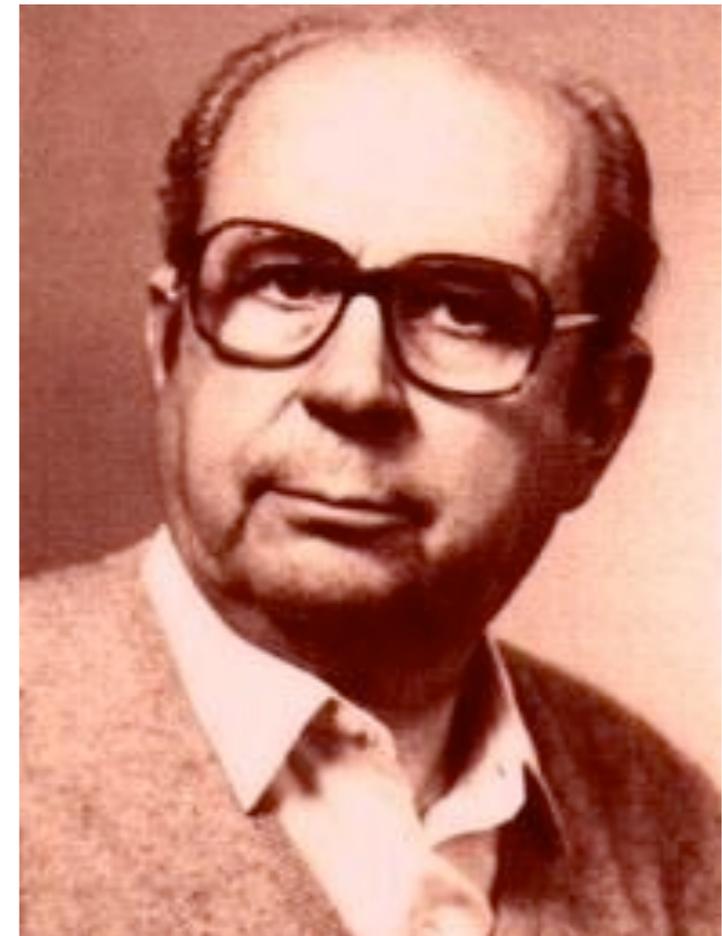
# **La thermodynamique des transitions économiques**

François Roddier

Paris, le 12 mars 2015

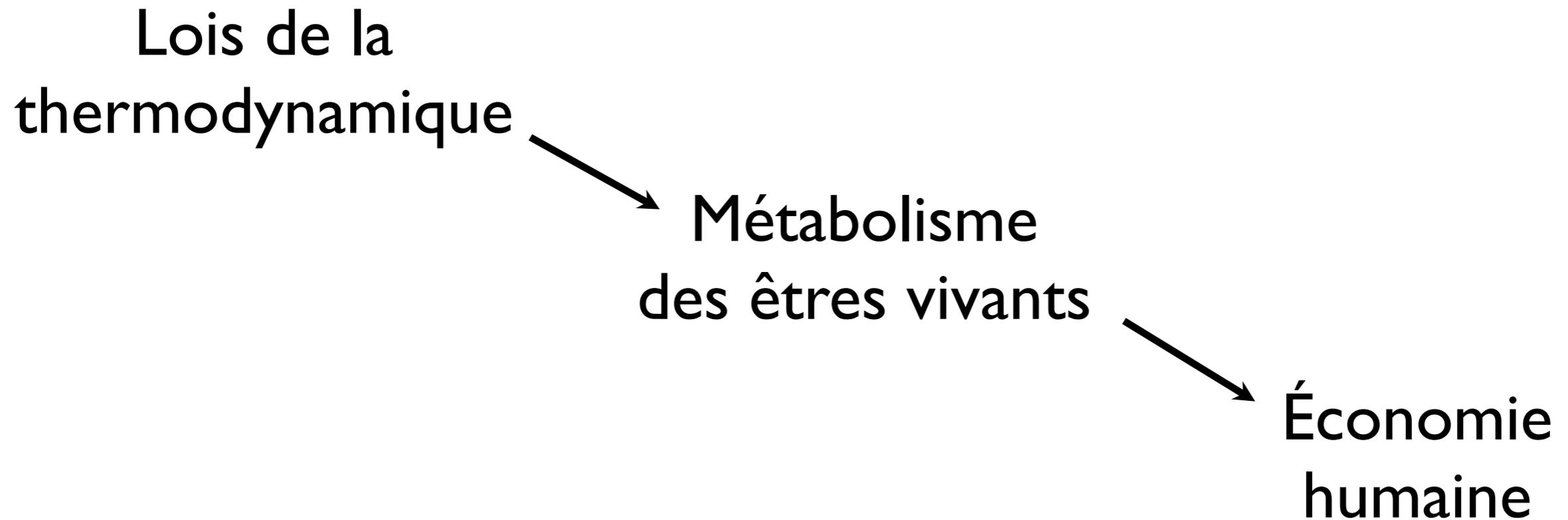
# Nicholas Georgescu-Roegen

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*

# I

# Notions de thermodynamique

# Les lois de la physique sont réversibles

Les lois de la physique (mécanique, électromagnétisme) sont indépendantes du sens du temps *sauf la dissipation d'énergie* qui est irréversible.

# **L'évolution de l'univers est irréversible**

Les êtres vivants naissent, vieillissent et meurent, comme les *civilisations*, les montagnes, les étoiles, et même l'univers observable. L'irréversibilité est due à la dissipation d'énergie.

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

Dissiper l'énergie, c'est transformer  
le travail mécanique en chaleur.  
Peut-on *inversement* transformer la  
chaleur en travail mécanique?

# Lecture recommandée



RÉFLEXIONS  
SUR LA  
PUISSANCE MOTRICE  
DU FEU

ET  
SUR LES MACHINES  
PROPRES A DÉVELOPPER CETTE PUISSANCE.

PAR S. CARNOT,  
ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE.



---

A PARIS,  
CHEZ BACHELIER, LIBRAIRE,  
QUAI DES AUGUSTINS, N° 55.

1824.

## 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.*

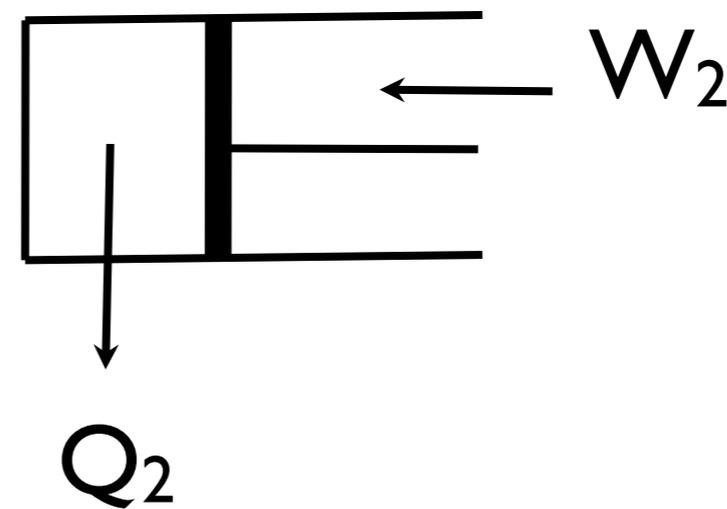
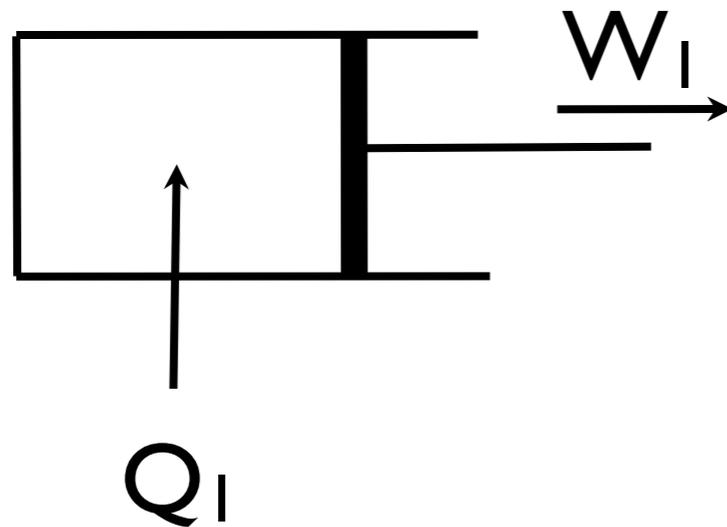


Denis Papin (1690)

# Rendement d'une machine thermique



Sadi Carnot (1824)



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

# Rendement d'une machine thermique

Pour des cycles réversibles:  $Q_1/T_1 = Q_2/T_2$   
d'où la nécessité d'une différence de température aussi élevée que possible.

## Rendement de Carnot:

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

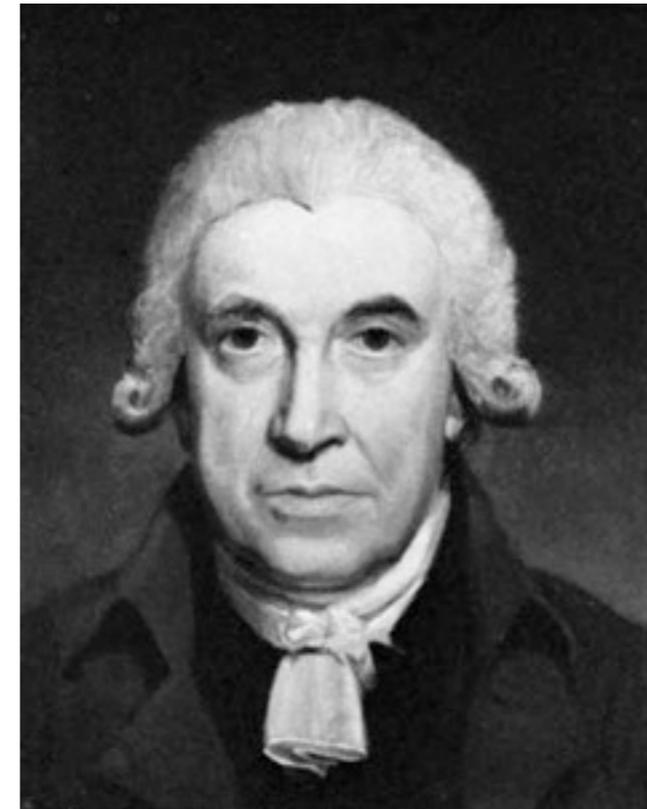
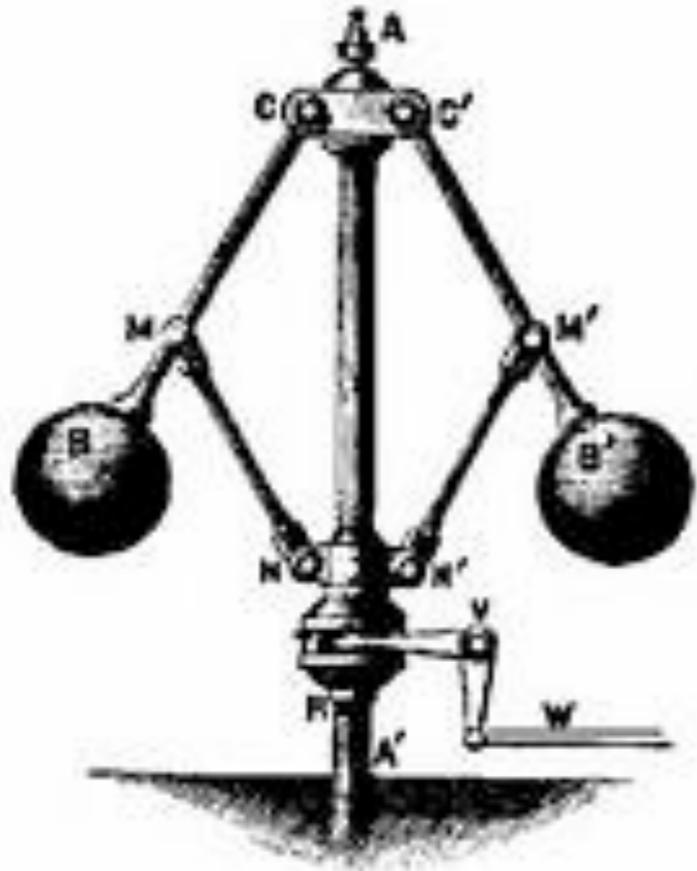
# Difficulté fondamentale

Pour repousser le piston, il faut *fournir* du travail et *rendre* une partie de la chaleur à une source froide, d'où la nécessité de *mettre en réserve* l'énergie nécessaire pour pouvoir repousser le piston.

- Pas assez d'énergie emmagasinée: *le moteur cale.*
- Trop d'énergie emmagasinée: *le moteur s'emballe.*

Un moteur thermique est fondamentalement instable

# Solution



James Watt (1736 - 1819)

Utilisation d'un régulateur à boules

*(Pour les mêmes raisons l'économie doit être régulée)*

# Rudolf Clausius (1865)

Clausius considère la quantité  $Q/T$  comme la variation d'une fonction d'état  $S$  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)

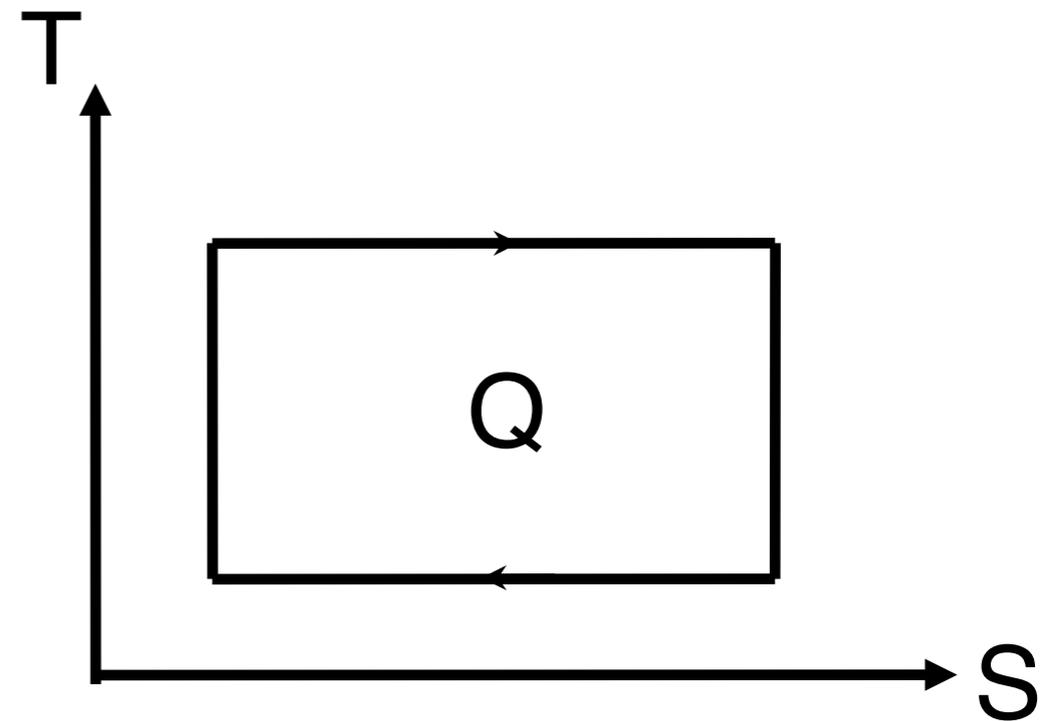
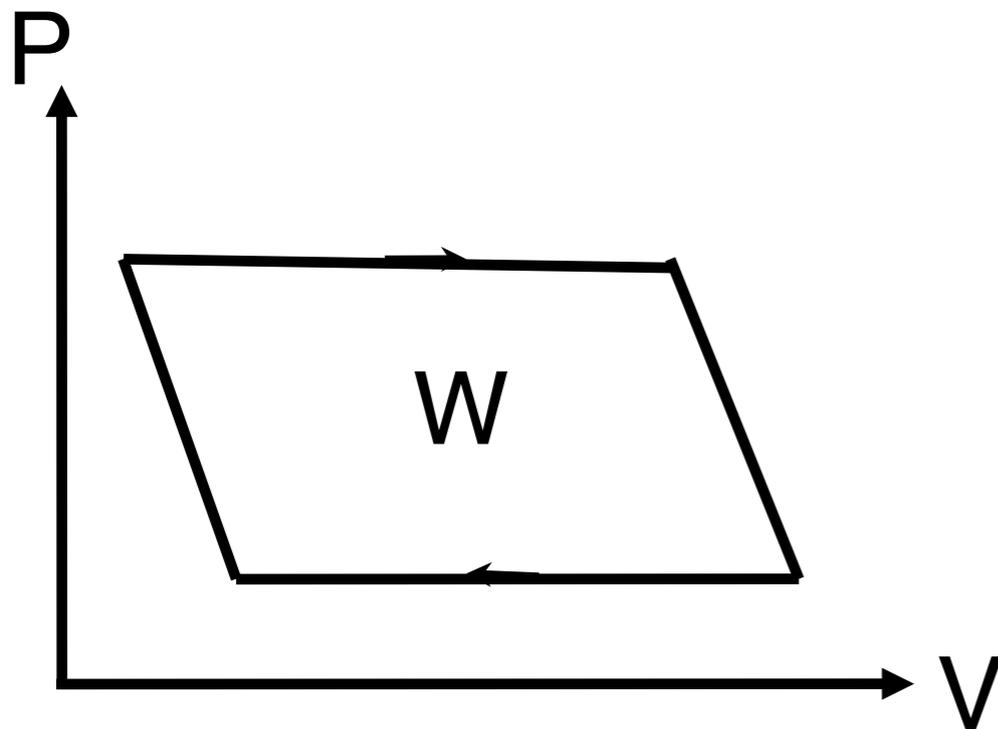
# Cycles d'une machine de Carnot

$$dU = dW + dQ = -PdV + TdS$$

Sur un cycle fermé:

$$dU = 0$$

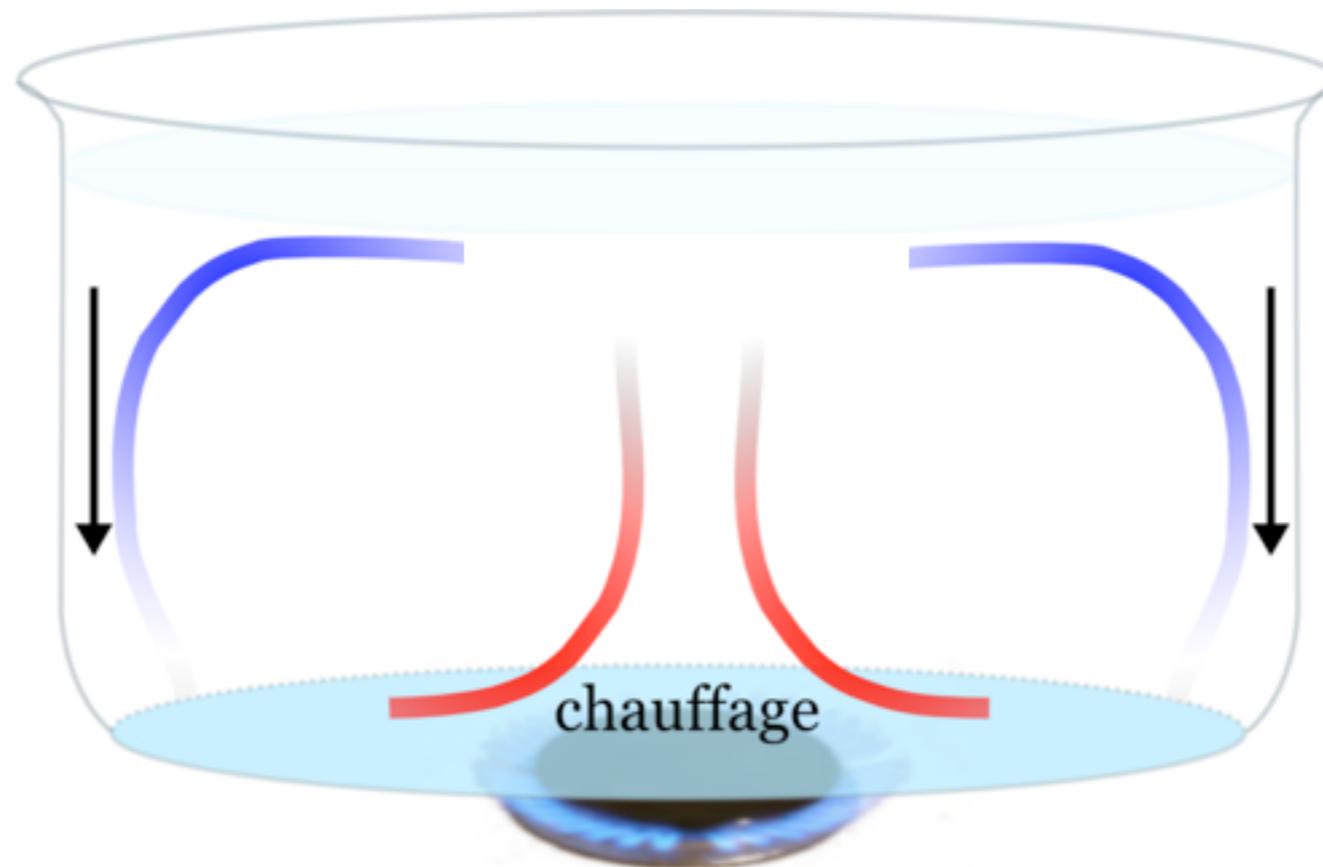
$$PdV = TdS$$



# Les machines thermiques naturelles

# Machines thermiques naturelles

Source froide

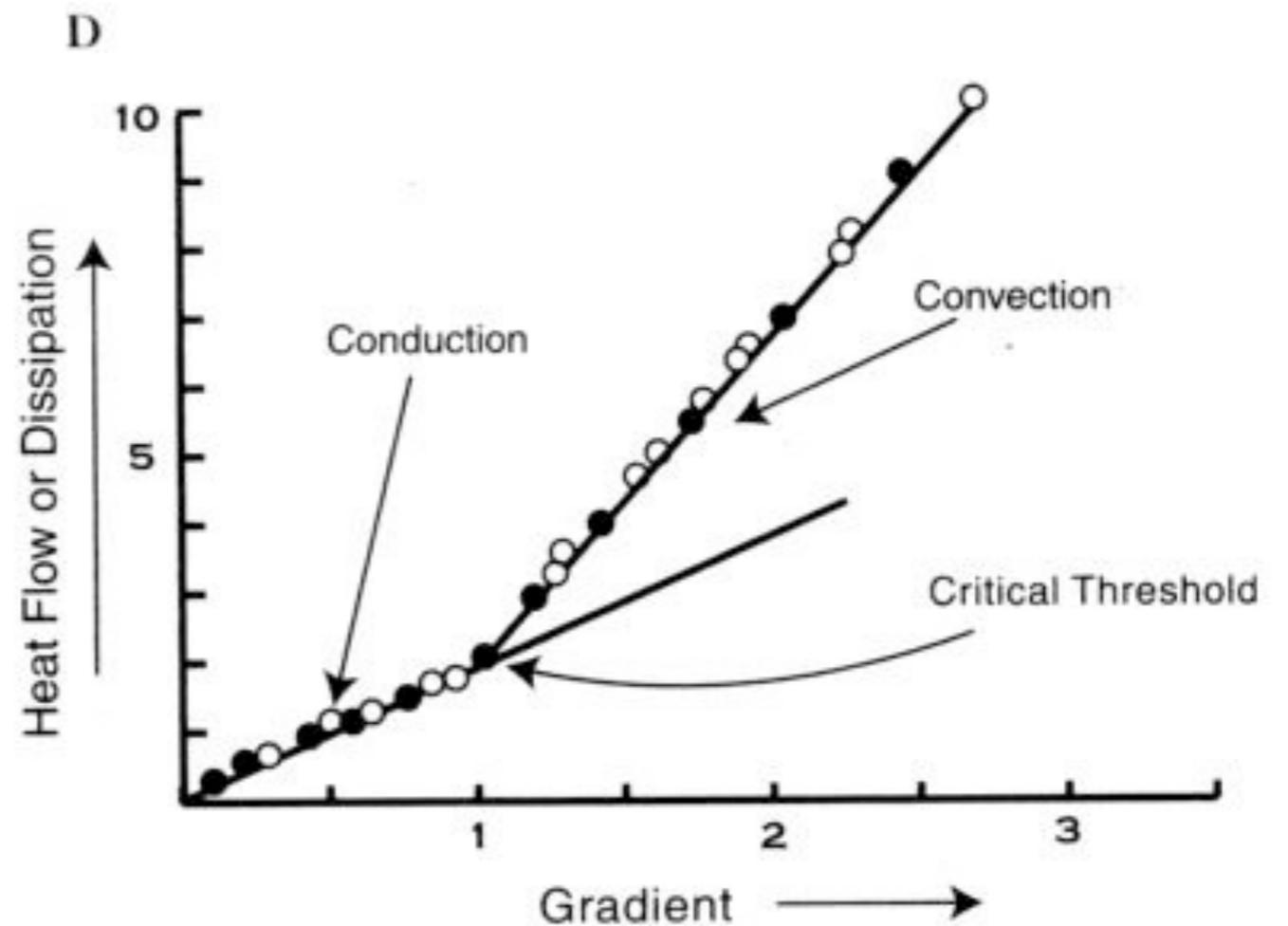


Source chaude

Elles produisent de l'énergie mécanique qu'elles dissipent.

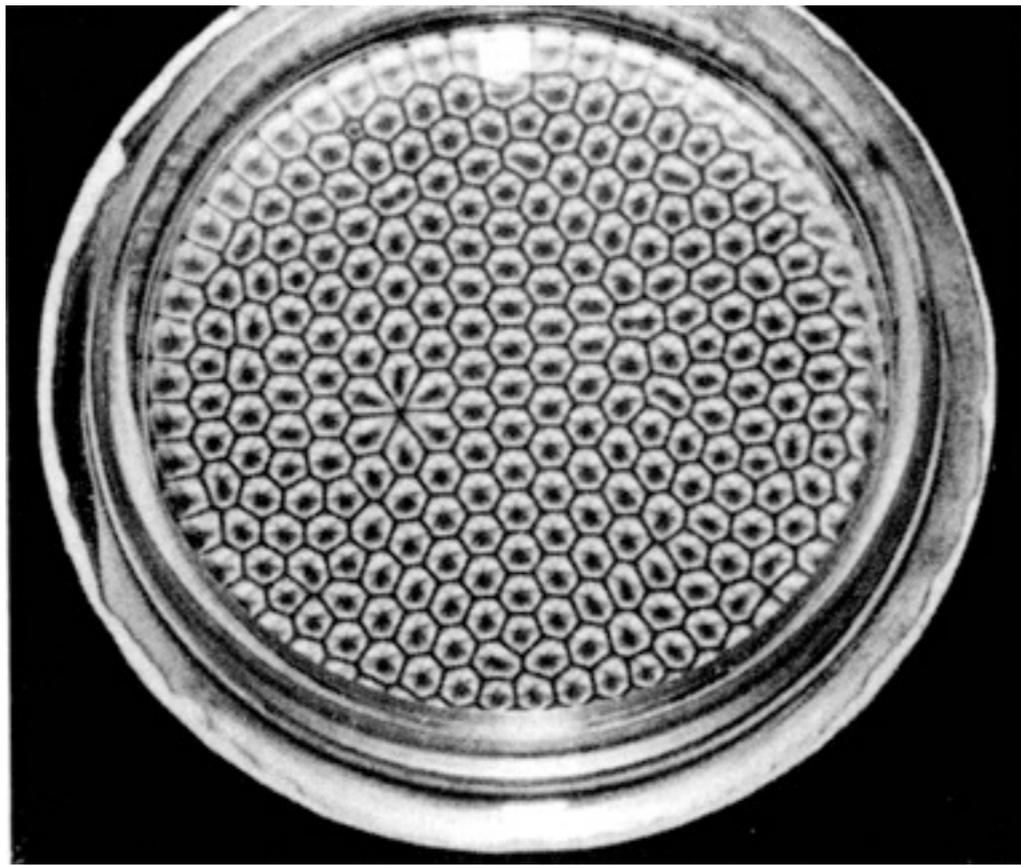
# Machines thermiques naturelles

Les machines thermiques naturelles apparaissent en présence d'un gradient de température critique.



(Sélection naturelle)

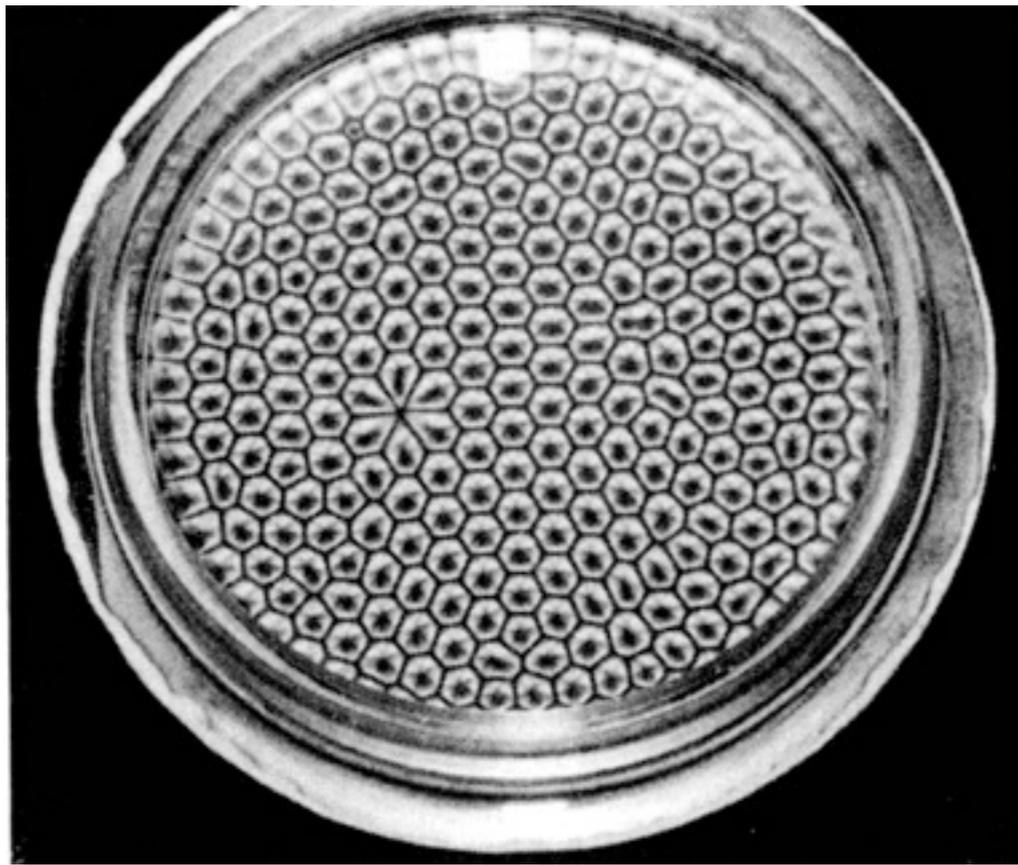
# Machines thermiques naturelles



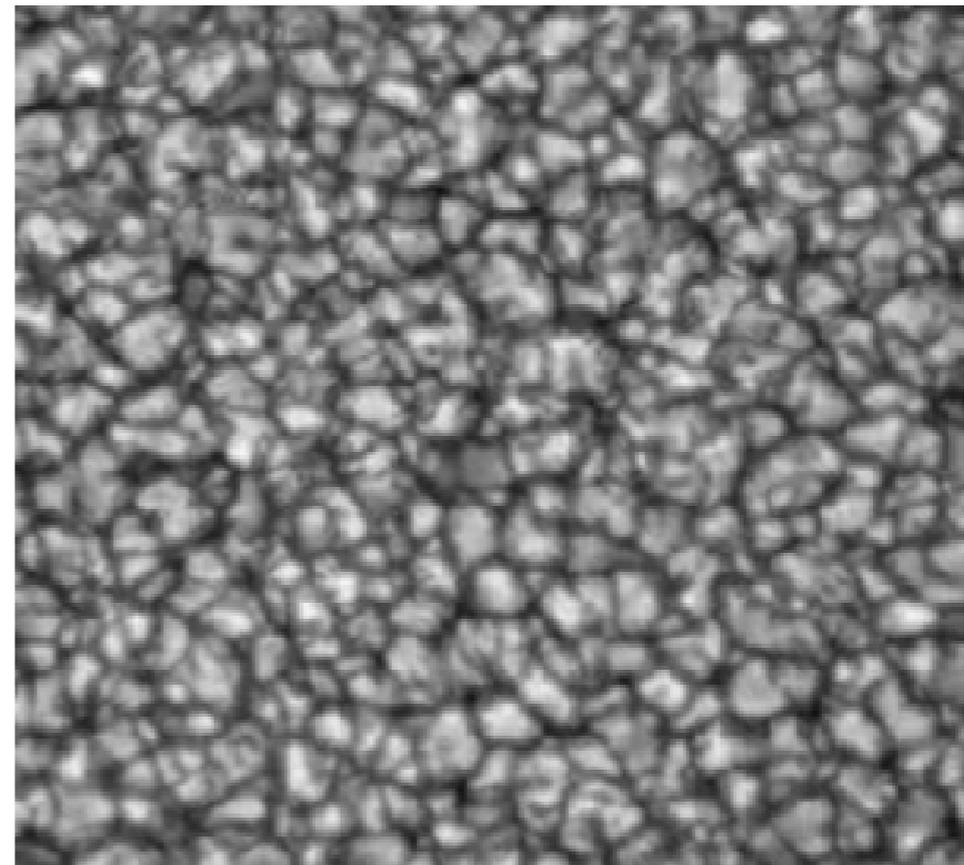
Cellules de Rayleigh-Bénard

Granulation solaire

# Machines thermiques naturelles



Cellules de Rayleigh-Bénard



Granulation solaire

# Machines thermiques naturelles

(Structures dissipatives)

Source froide



Source chaude

Tornade

# Les structures dissipatives

# Ilya Prigogine

Prix Nobel de Chimie (1977),  
introduit la notion de structure  
dissipative:

- Elles s'auto-organisent et suivent des cycles de transformations.
- Elles ne subsistent que traversées par un flux permanent d'énergie.
- Elles tendent à maximiser le flux d'énergie qui les traverse.



Ilya Prigogine  
(1917 - 2003)

# Exemples de structures dissipatives

Un cyclone

*L'atmosphère terrestre*

Un organisme vivant

*Une espèce animale ou végétale*

L'homme

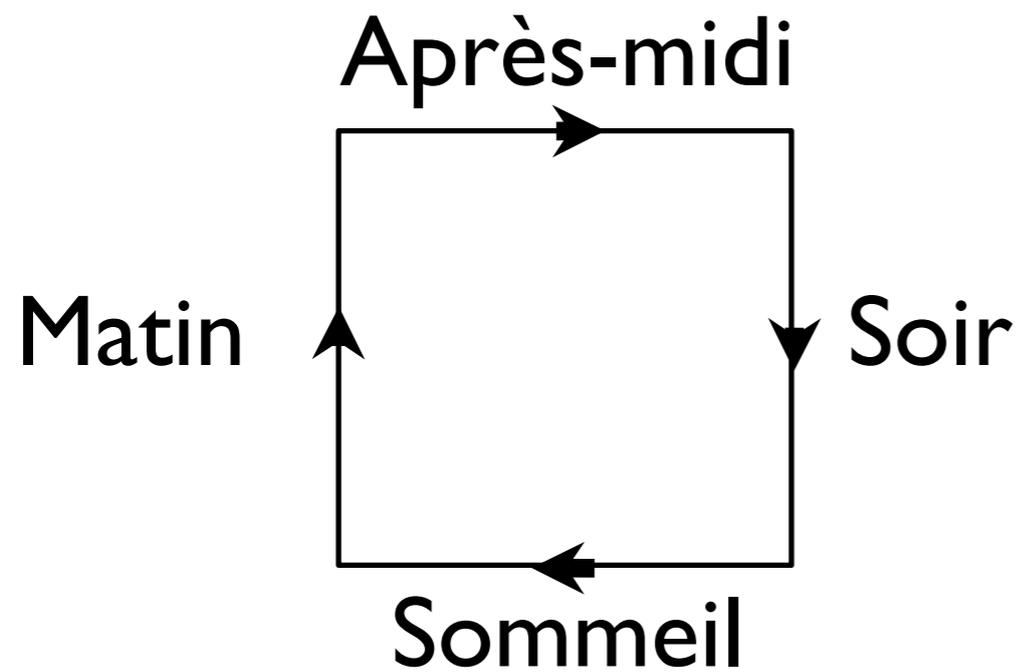
*Une société humaine*

Les structures dissipatives sont des phénomènes  
de *thermodynamique hors équilibre*.

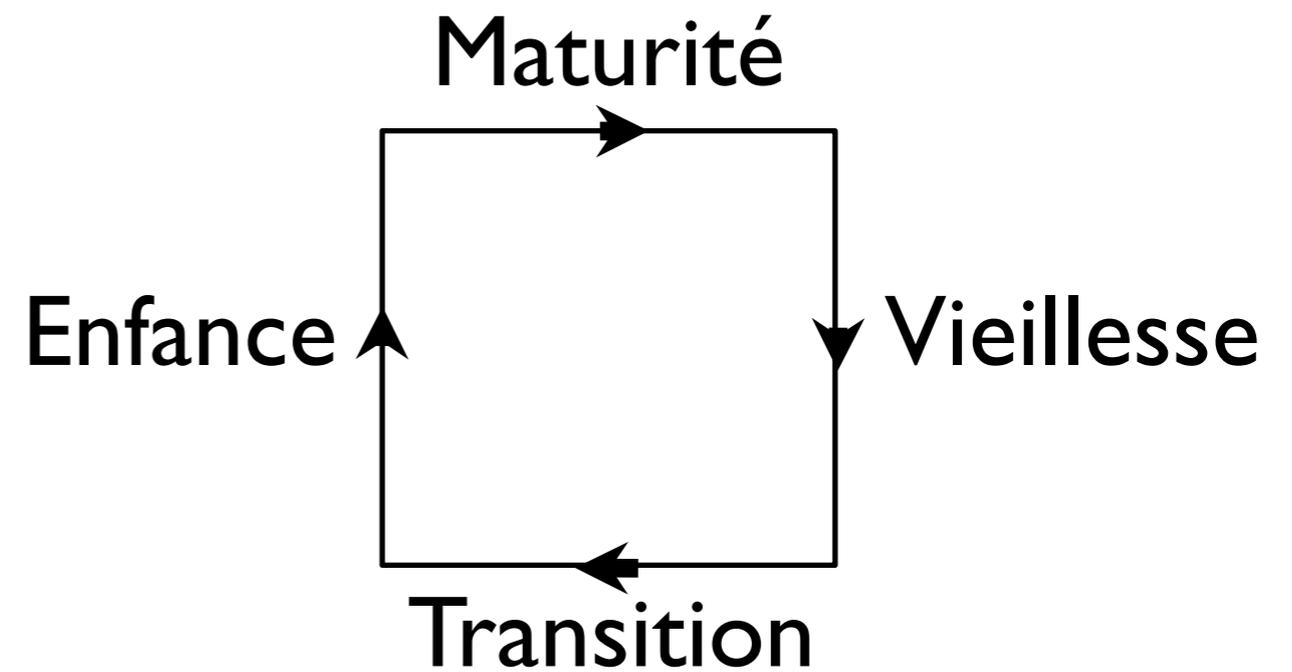
# **Les cycles naturels**

**Ce sont les cycles d'évolution associés aux structures dissipatives.**

# Exemples de cycles naturels en biologie

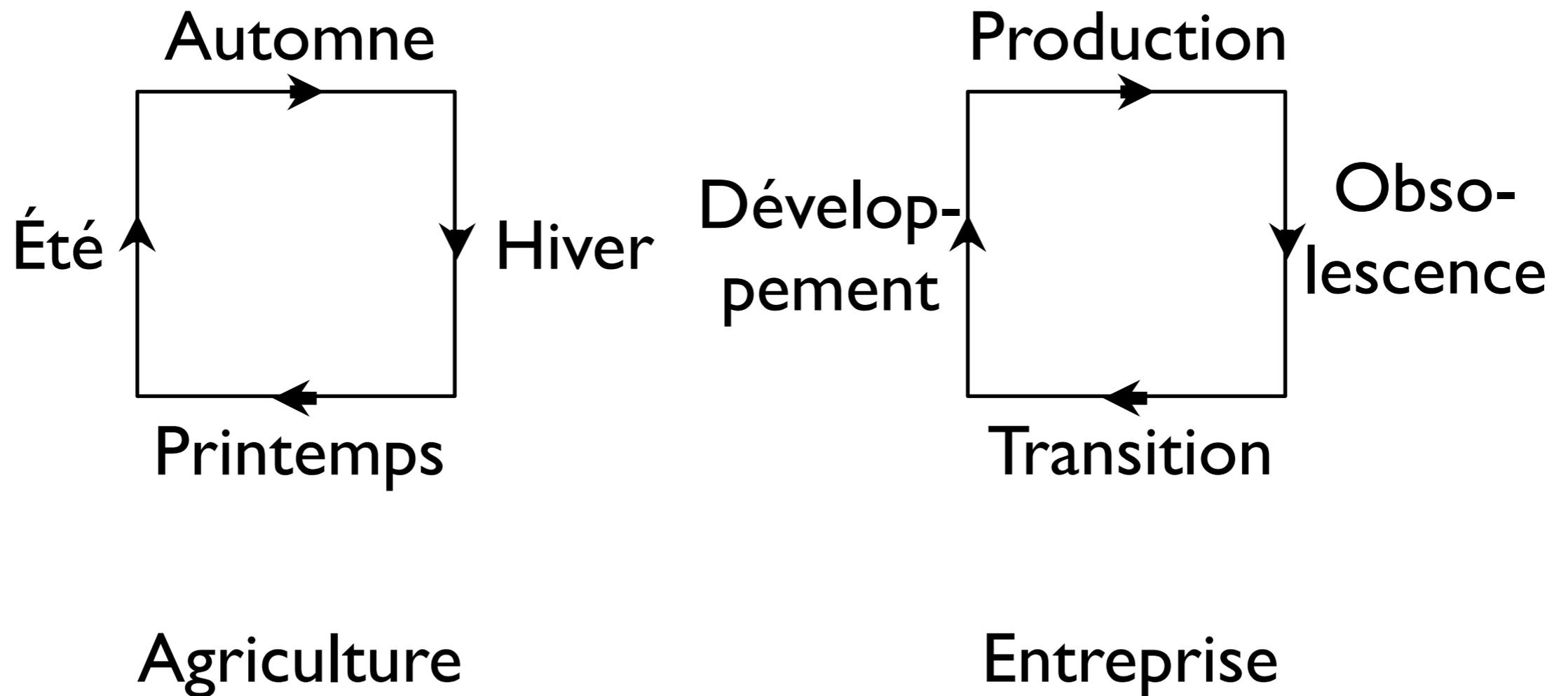


Cycle diurne



Cycle de reproduction

# Exemples de cycles naturels en économie



De même qu'une machine thermique a besoin de mettre en réserve l'énergie nécessaire pour repousser le piston, ou que l'agriculteur a besoin de *mettre du grain en réserve* dans son grenier pour l'hiver, de même l'homme a besoin de *mettre de l'argent de côté* pour s'assurer une retraite pendant ses vieux jours.

# Généralisation des notions de thermodynamique

# Énergie libre

F = énergie libre ou fonction de Helmholtz  
(toute forme d'énergie intégralement  
convertible en travail mécanique)

$$dU = dF + TdS$$

Exemple:  $dF = Vdq$

Potentiel

Charge

(Variable *intensive*)

(Variable *extensive*)

Exemple: thermocouple



H. von Helmholtz  
(1821-1894)

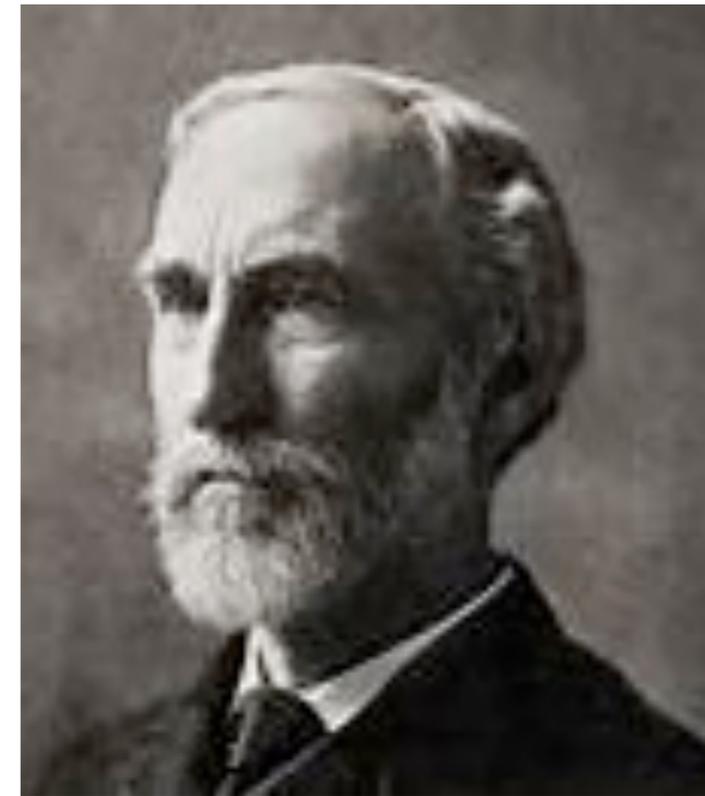
# Potentiels de Gibbs

Cas des échanges de matière  
(Willard Gibbs) et des réactions  
chimiques (Pierre Duhem):

$$dU = dF + TdS + \sum \mu_i dn_i$$

$$dG = \sum \mu_i dn_i$$

$\mu_i$  = Potentiels de Gibbs  
ou potentiels chimiques



Willard Gibbs  
(1839-1903)

# Évolution du concept d'entropie

1877: Ludwig Boltzmann donne une expression statistique pour l'*entropie* à l'équilibre. Willard Gibbs généralise cette expression au cas hors-équilibre:  $S = -\sum p_i \cdot \log p_i$

1948: Claude Shannon définit la quantité d'*information* et retrouve l'expression de Gibbs: toute production d'entropie correspond à une perte (irréversible) d'*information* sur l'état microscopique d'un système.

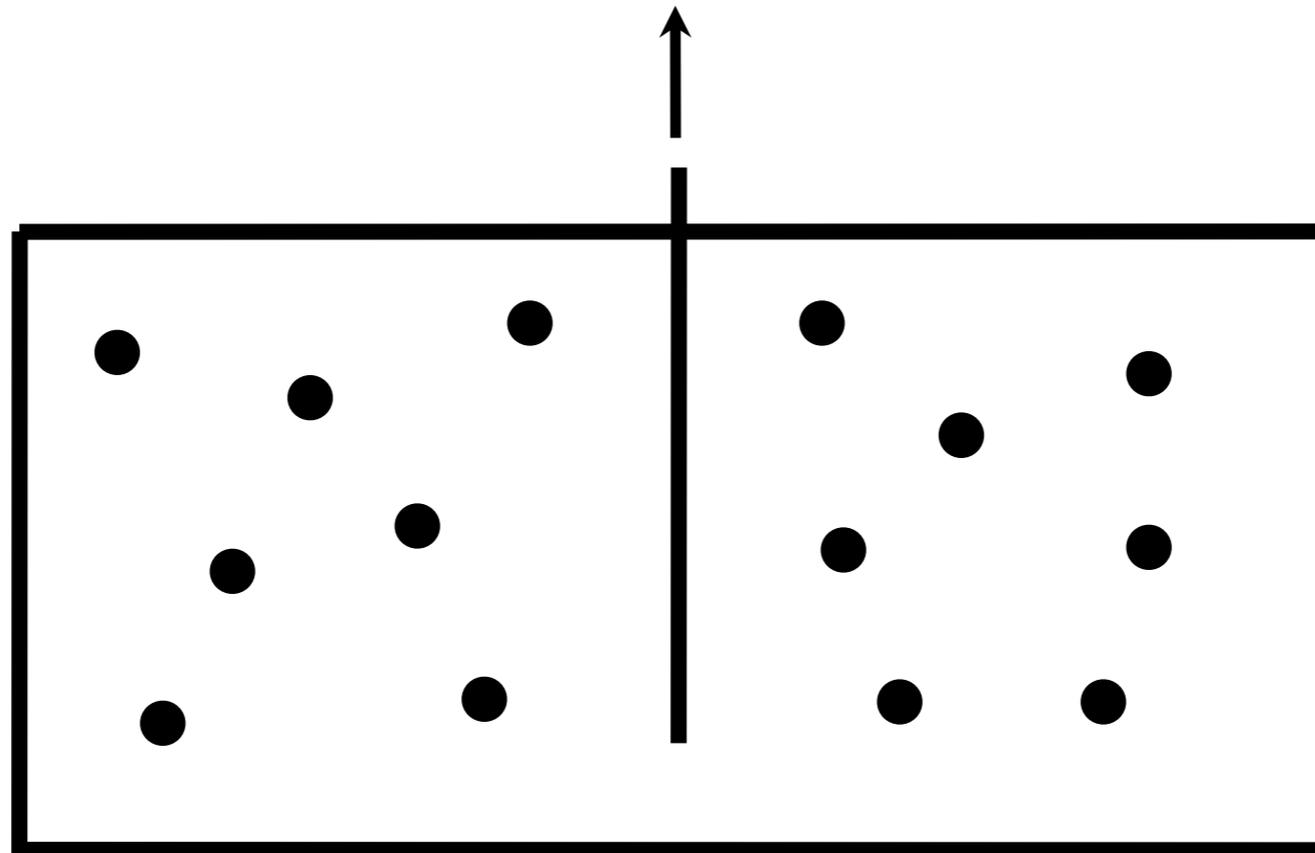
1961: Ralf Landauer montre que réciproquement toute perte d'*information* produit de la chaleur donc de l'entropie.

# États macroscopiques et microscopiques

Variables	macroscopiques	microscopiques
Énergie	travail mécanique	chaleur
Entropie	faible	élevée
Information	connue	inconnue

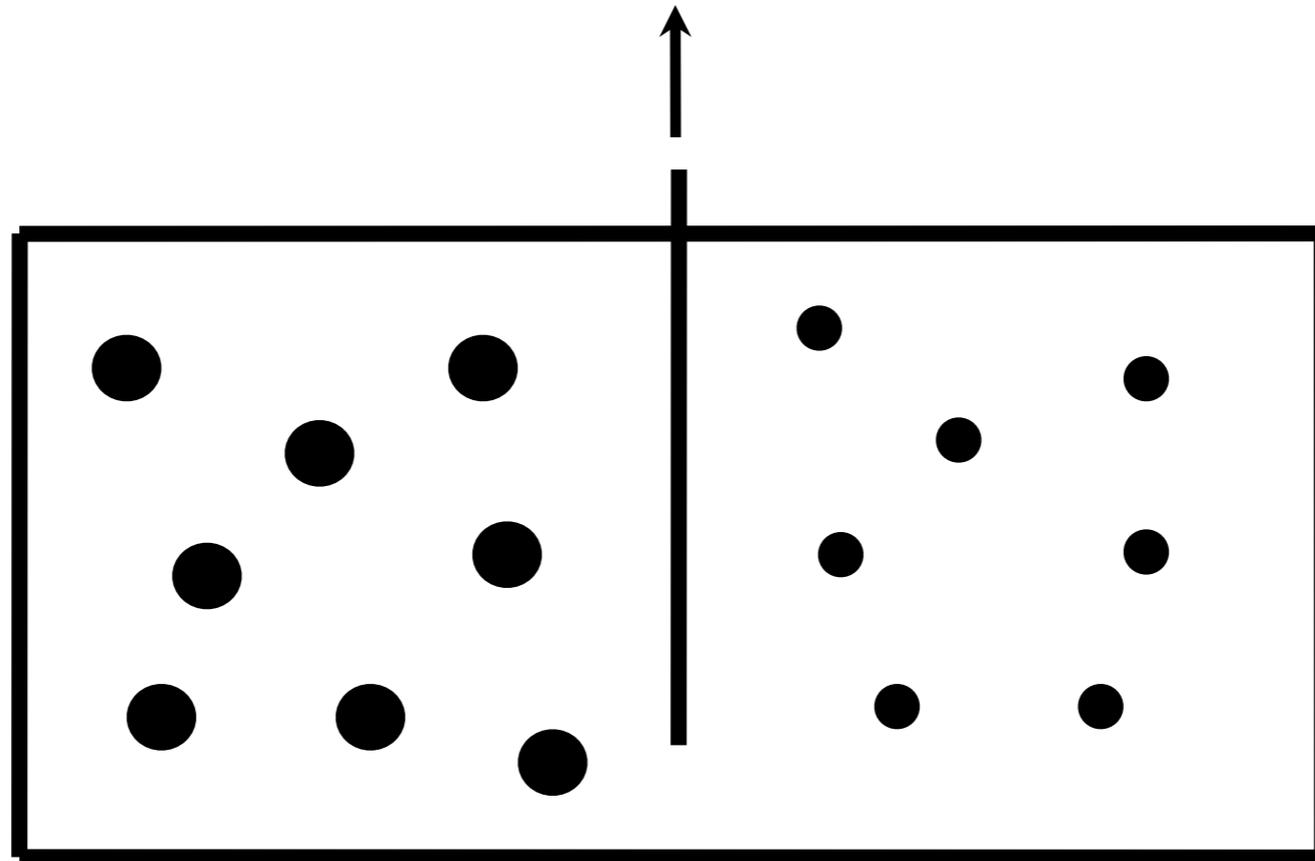
L'irréversibilité thermodynamique est due à une *perte d'information*.

# Le paradoxe de Gibbs



L'entropie n'augmente pas

# Le paradoxe de Gibbs

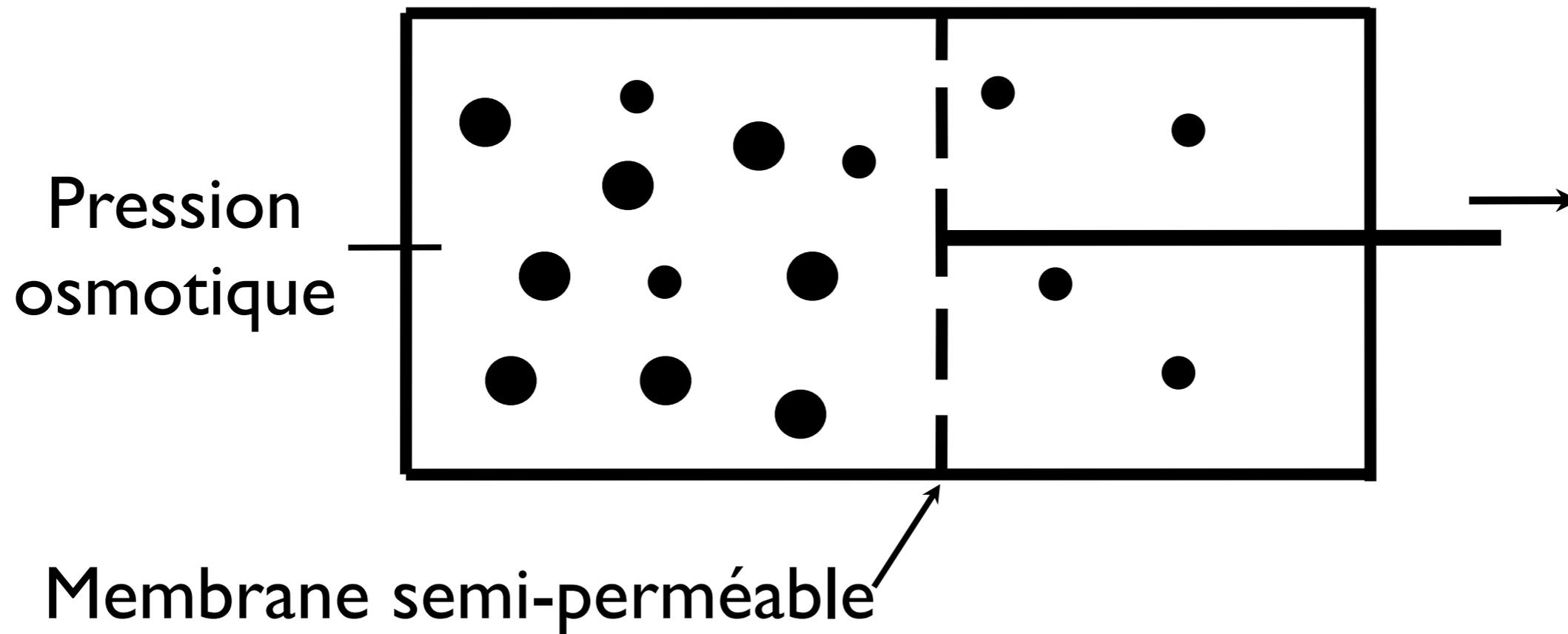


L'entropie augmente

# **Le paradoxe de Gibbs**

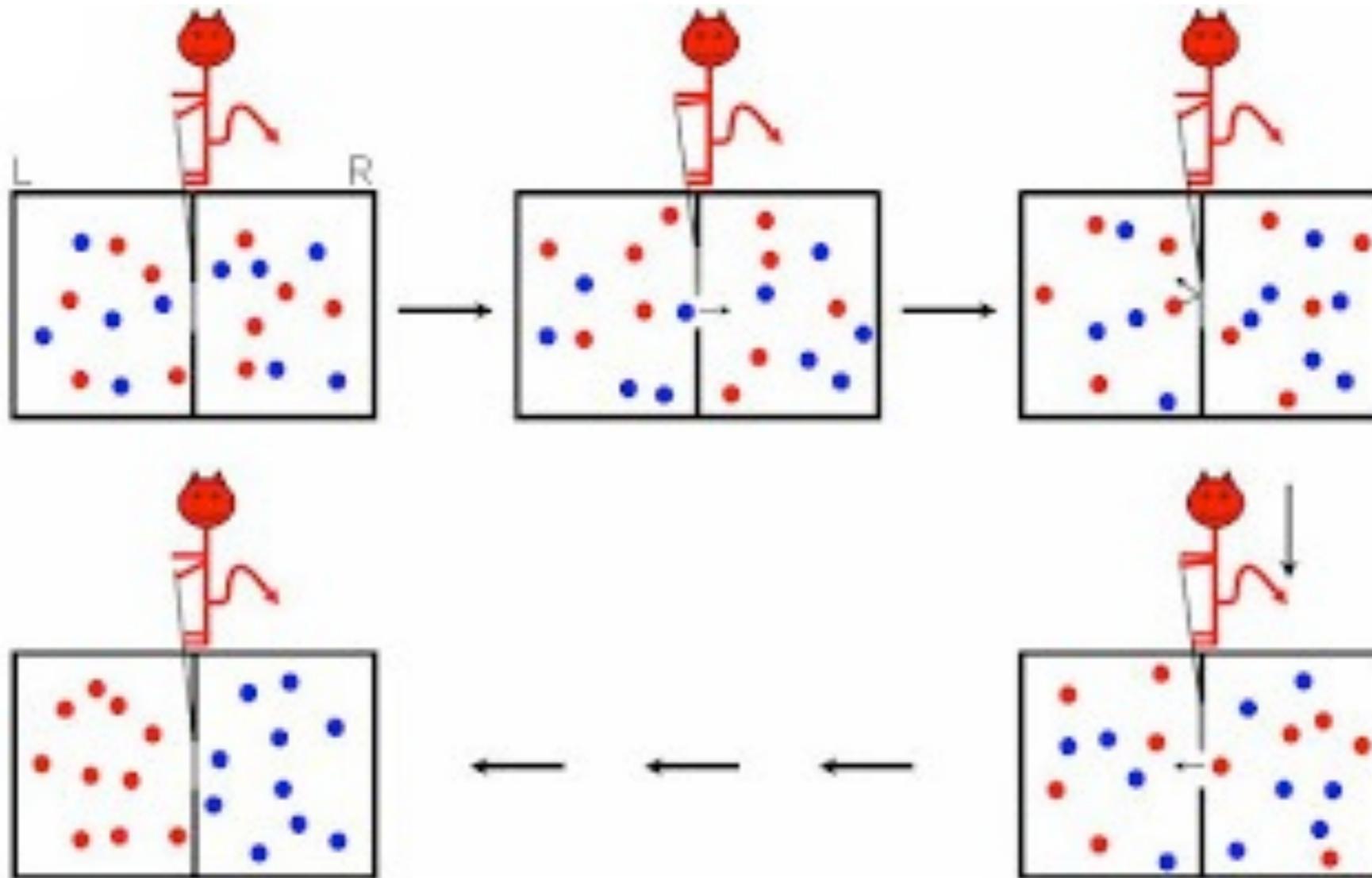
L'entropie d'un système  
dépend de notre  
connaissance du système

# Le paradoxe de Gibbs



On peut produire du travail mécanique

# Le démon de Maxwell



On peut produire du travail mécanique

# **II**

## **Application à la biochimie et à l'économie**

# Application à la biochimie

Les catalyseurs (enzymes) et les membranes semi-perméables permettent d'obtenir de l'information à l'échelle moléculaire donc de fournir de l'énergie libre.

En régime stationnaire:

$$dF + TdS + dG = 0$$

Chaleur dégagée

Travail musculaire

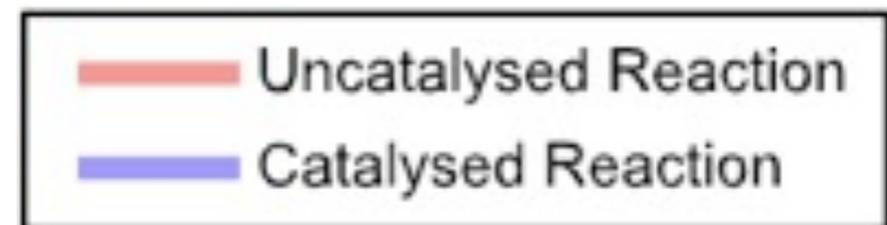
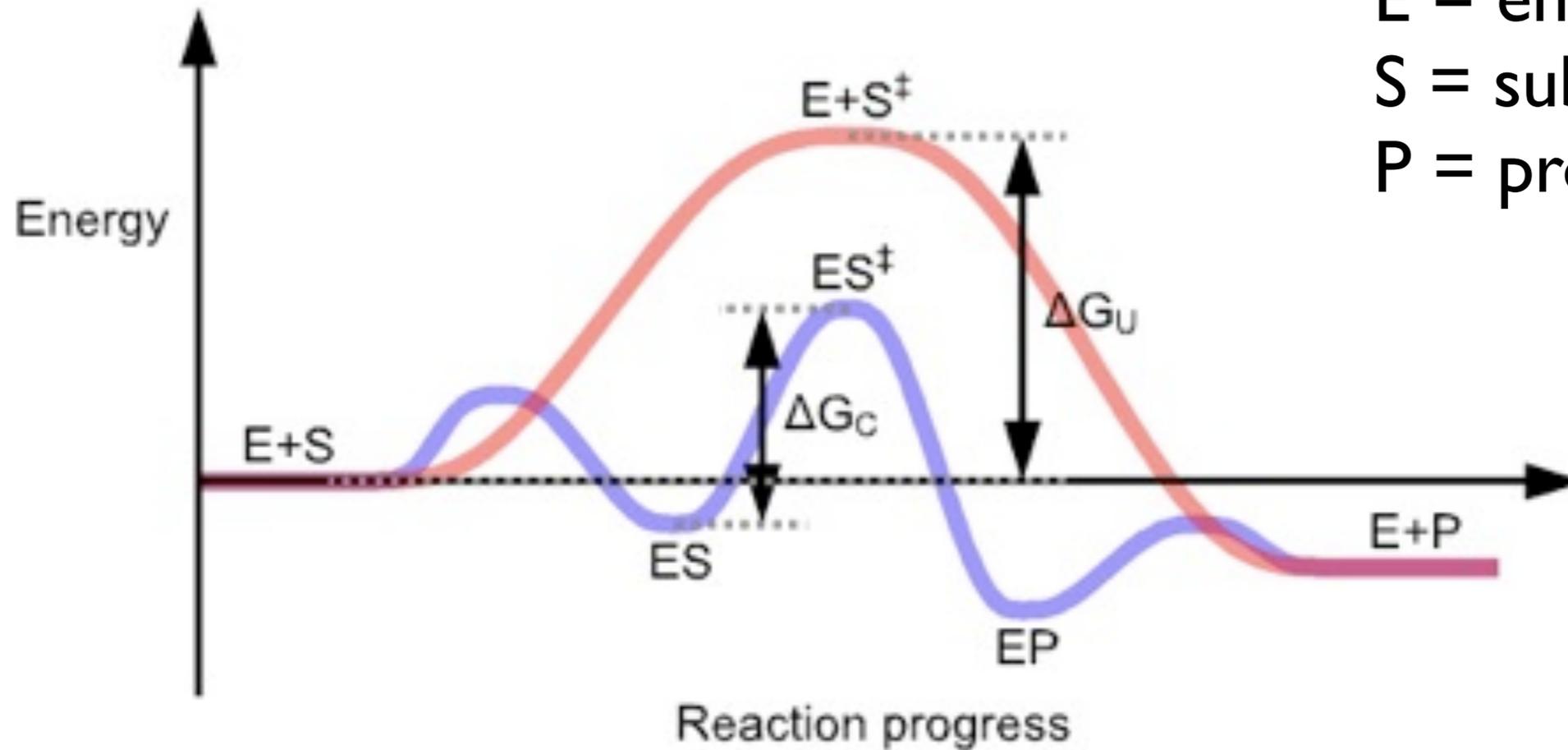
**CACAO FORTEMENT DÉGRAISSÉ SUCRÉ.**  
Ingrédients : Sucre, Cacao maigre (11% de beurre de cacao), Arôme. Cacao : 32% minimum.  
Peut contenir des traces de fruits à coque et de soja.



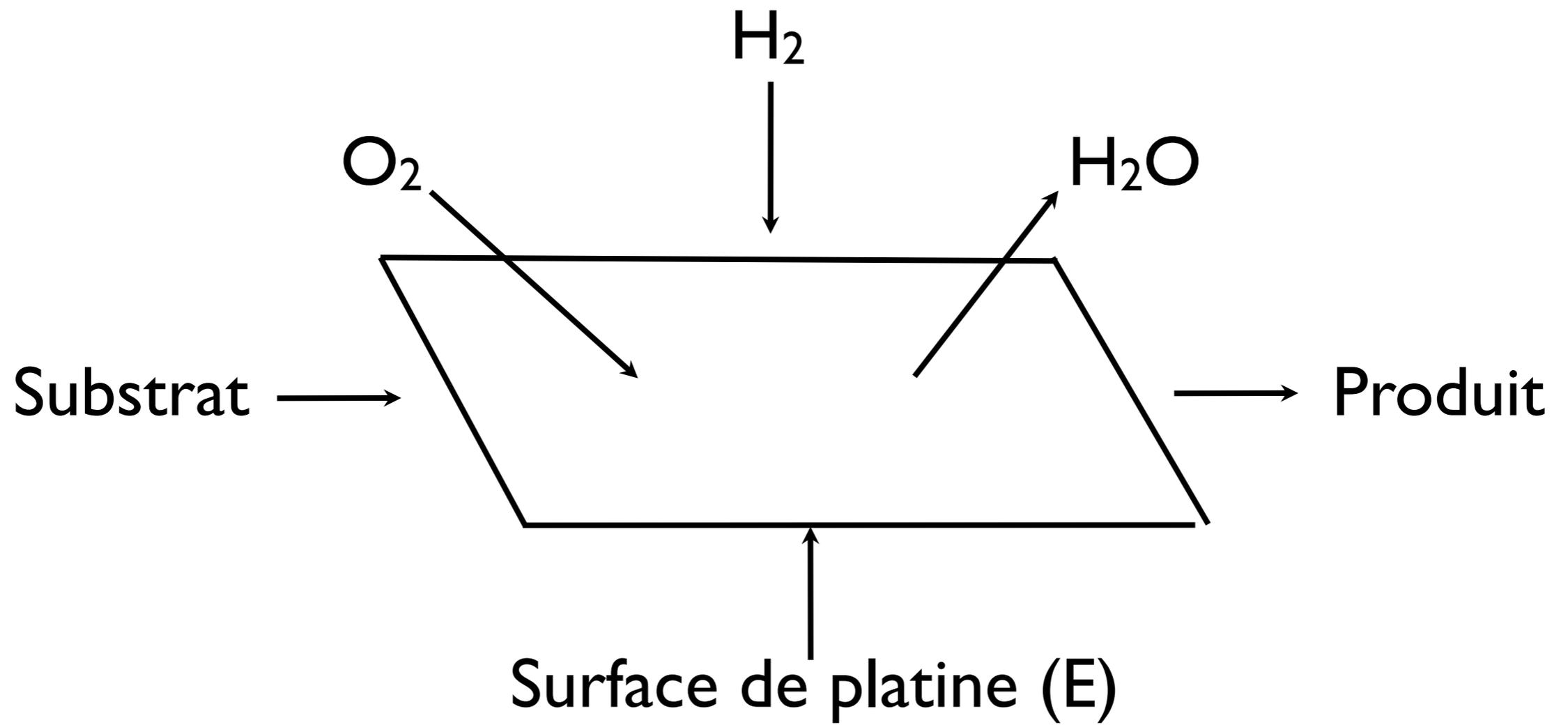
Informations Nutritionnelles	100 g de Grand Arôme	20 g de Grand Arôme et 20 cl de lait demi-écrémé
Valeur Énergétique	1495 kJ 355 kcal	675 kJ 160 kcal

# La catalyse

E = enzyme  
S = substrate  
P = product



# La catalyse



# La catalyse et l'économie

Une surface de platine se comporte comme un hall d'assemblage et d'expédition

Substrat →



→ Produit

# La catalyse et l'économie

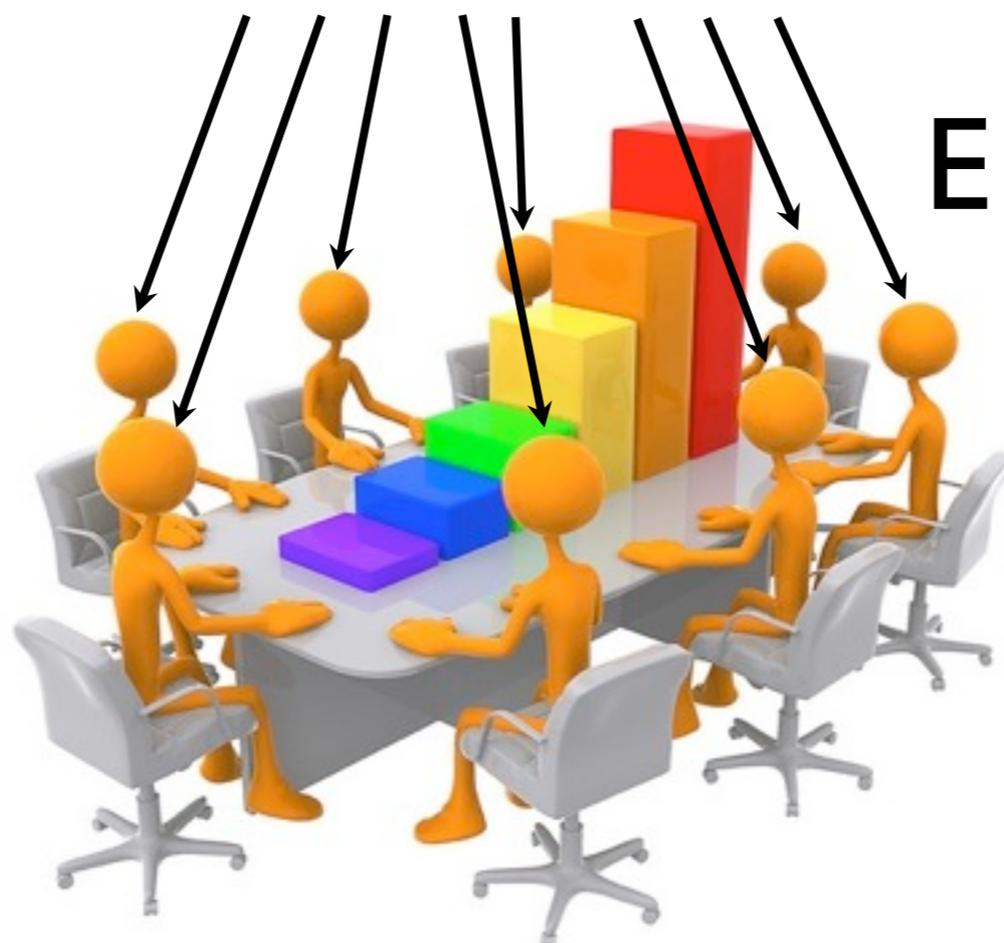


**S**  
(Substrat)

Offre Information Demande



Démons de Maxwell



**E S**

**E P**

Entreprise (enzyme) **E**

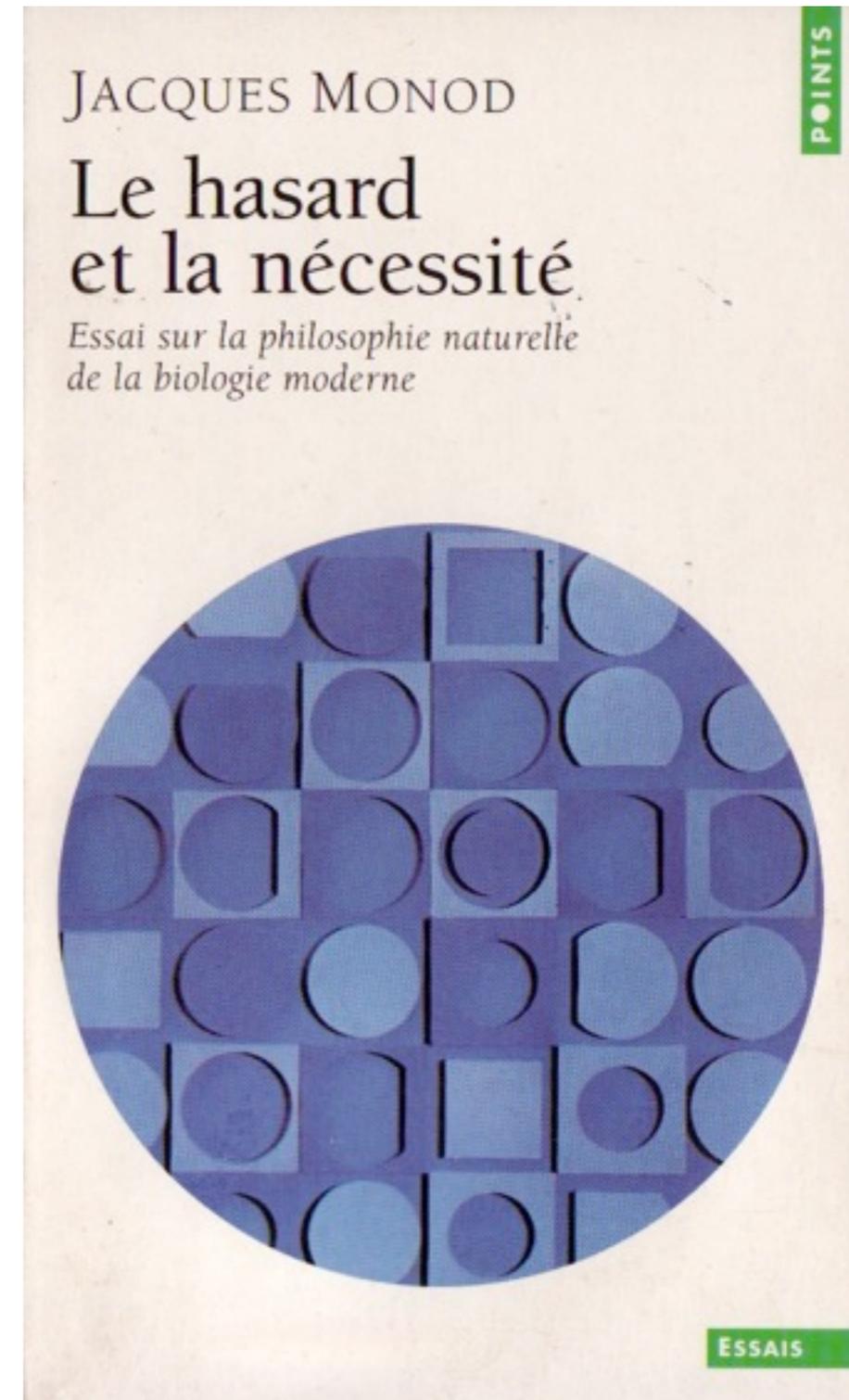
Matière



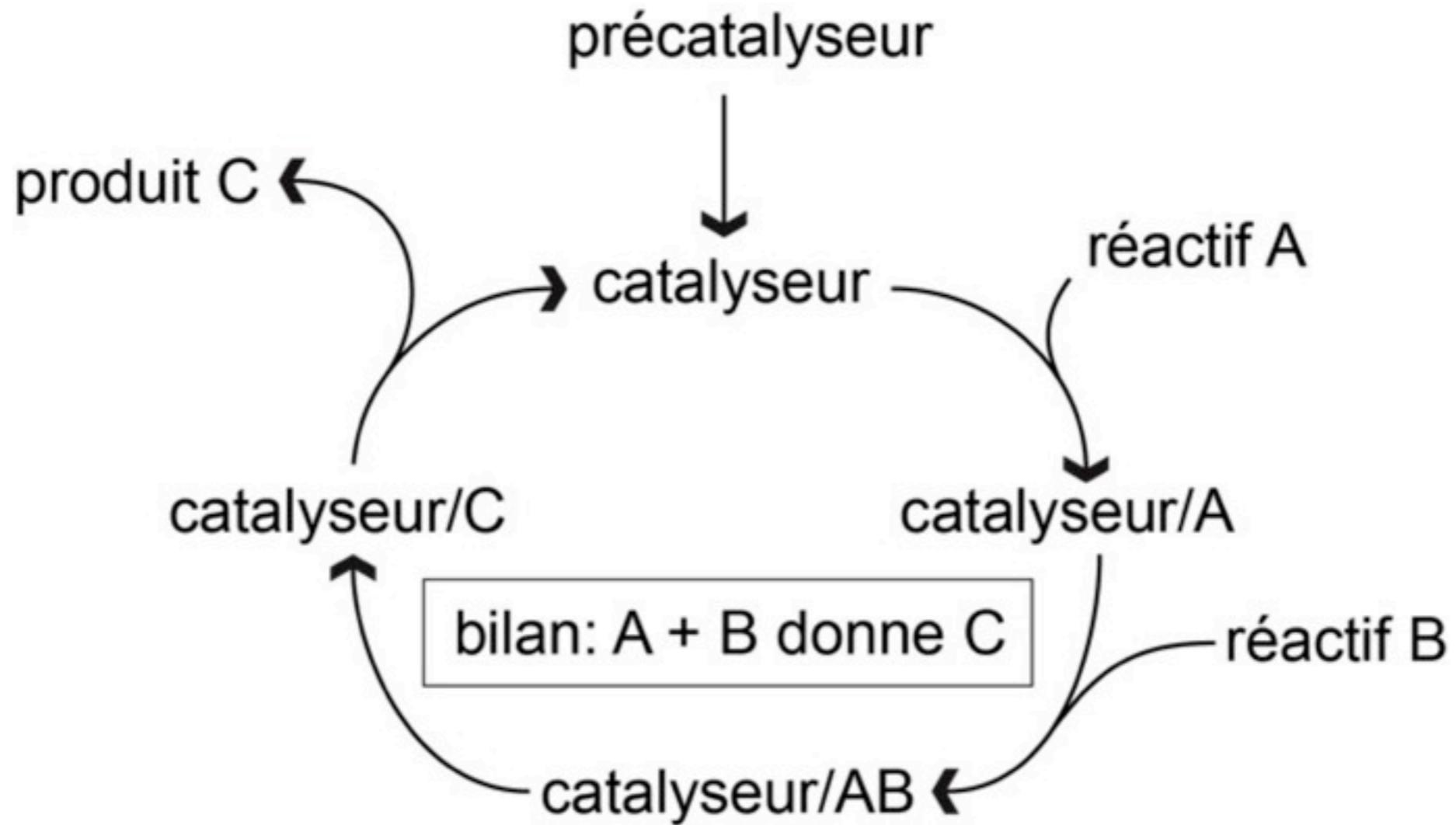
**P**  
(Production)

# Lecture recommandée

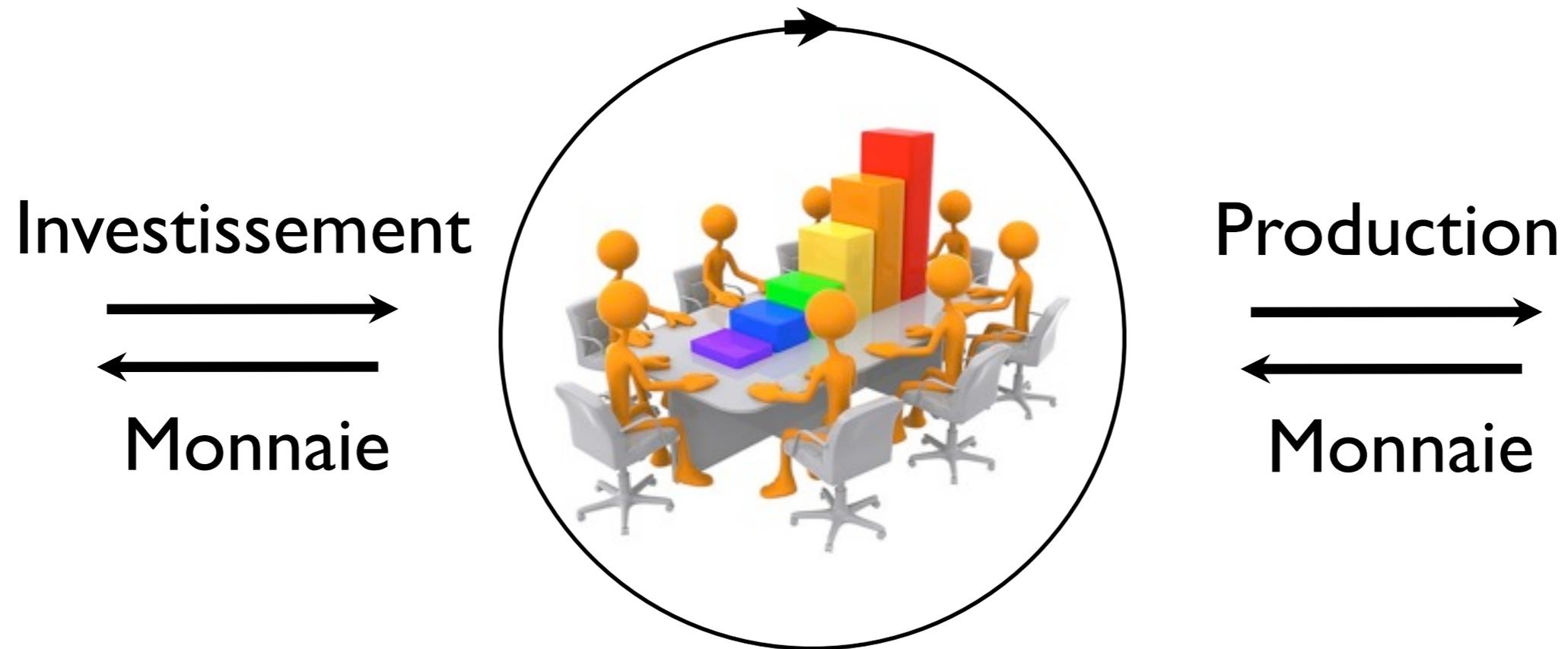
## Chapitre 3 Les démons de Maxwell



# Les cycles en biochimie



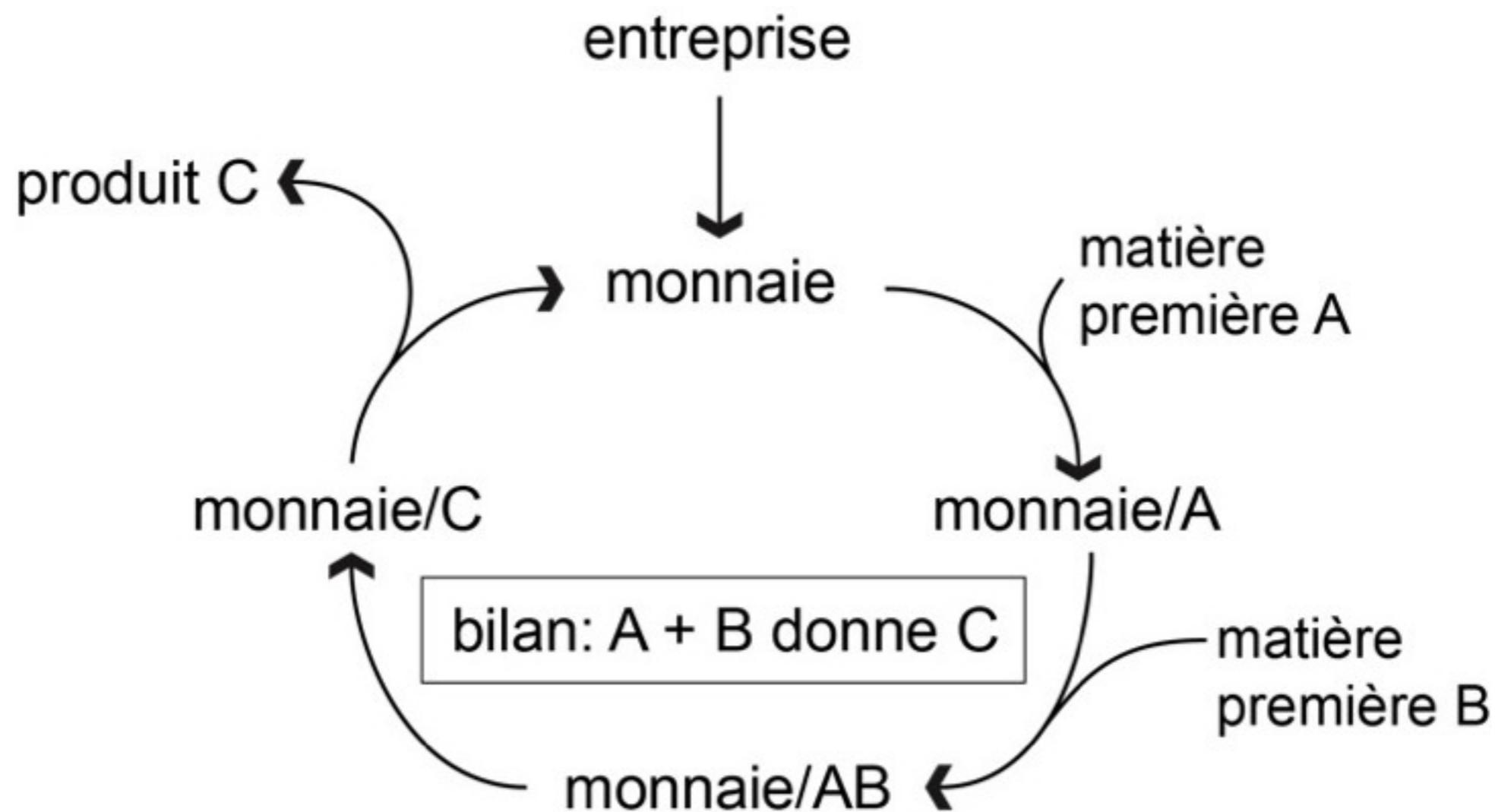
# Les cycles en économie



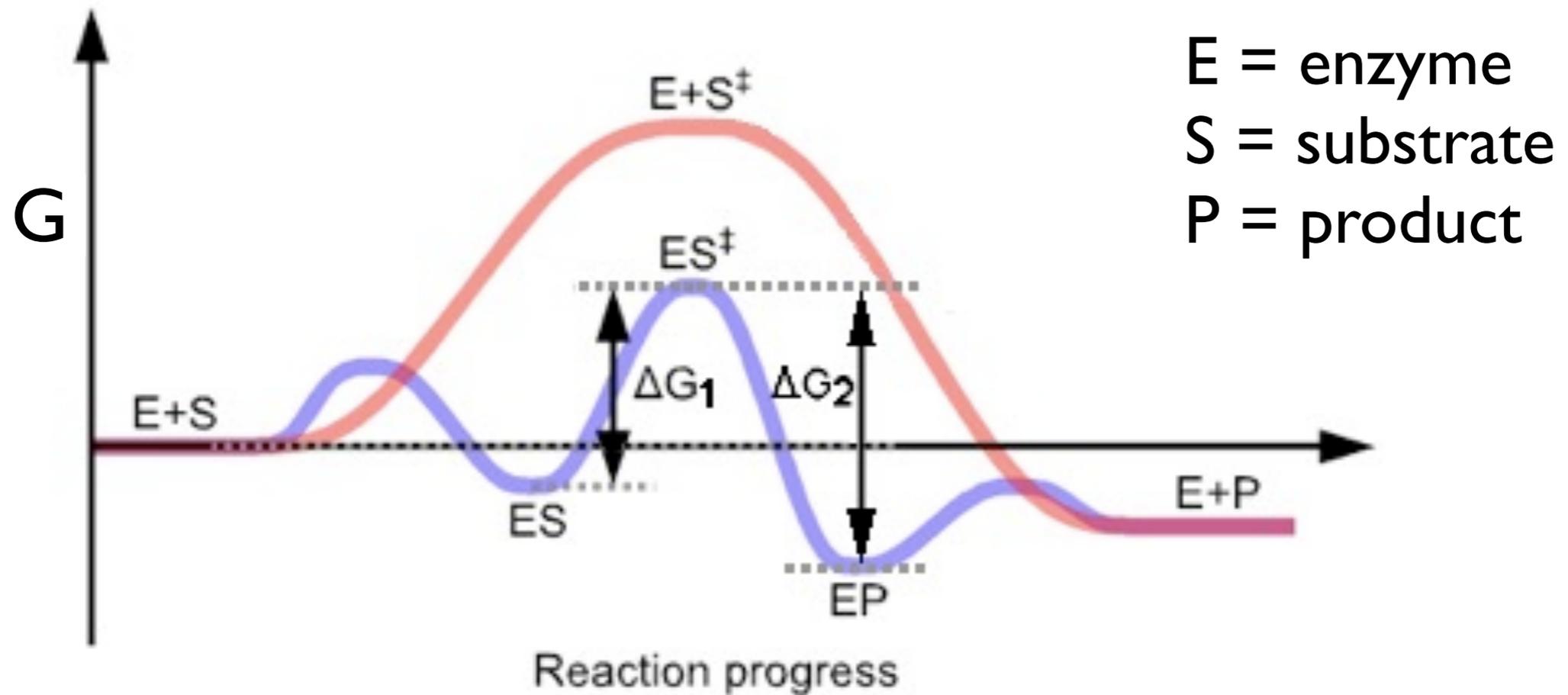
Cycle de production ou importation/distribution

*La monnaie joue le rôle du catalyseur*

# Les cycles en économie



# La catalyse en biochimie



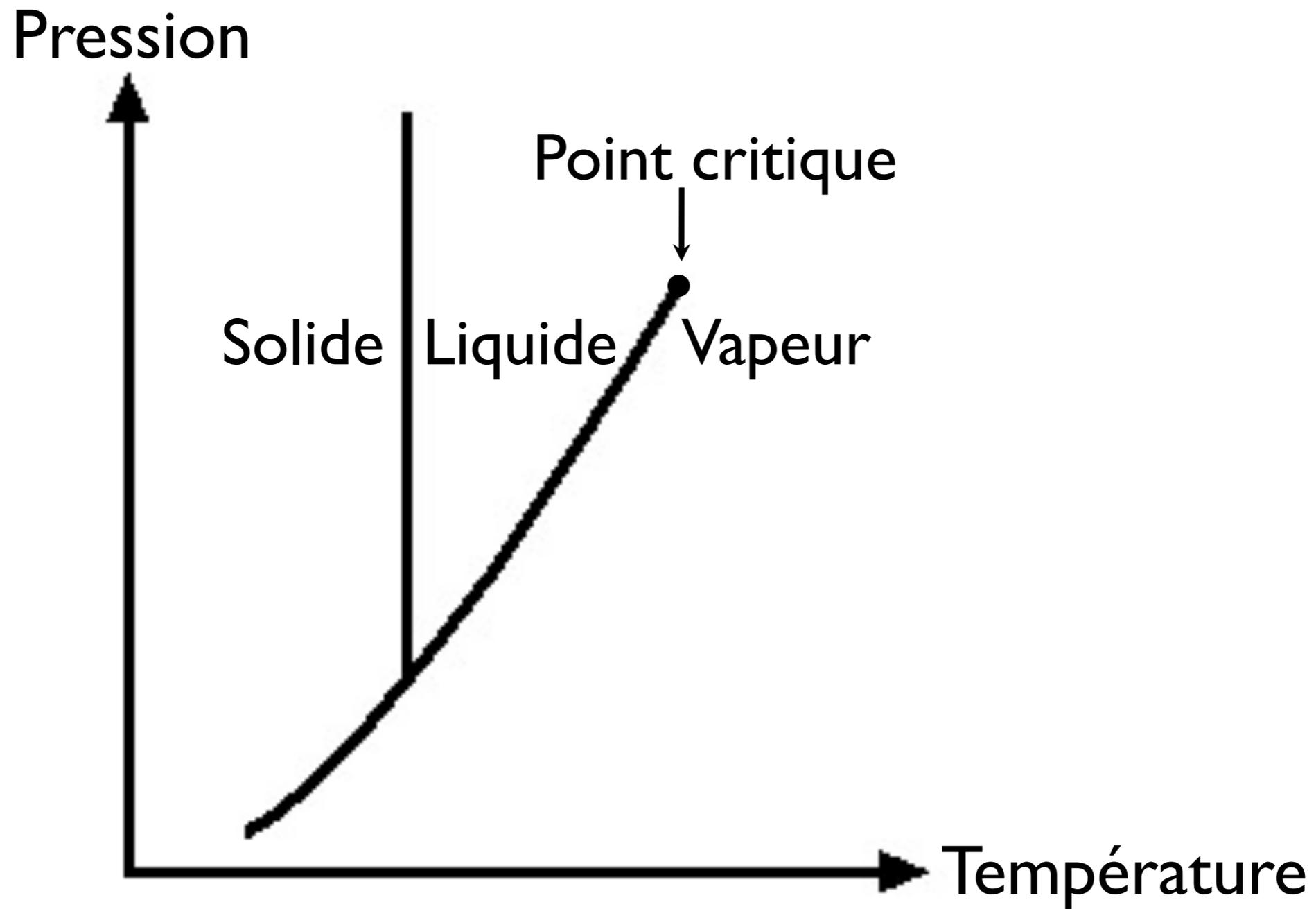
Les cycles catalytiques sont des cycles de Carnot fonctionnant entre deux température *fictives*

$$T_1 \text{ et } T_2 \text{ telles } T_1 / T_2 = \Delta G_1 / \Delta G_2.$$

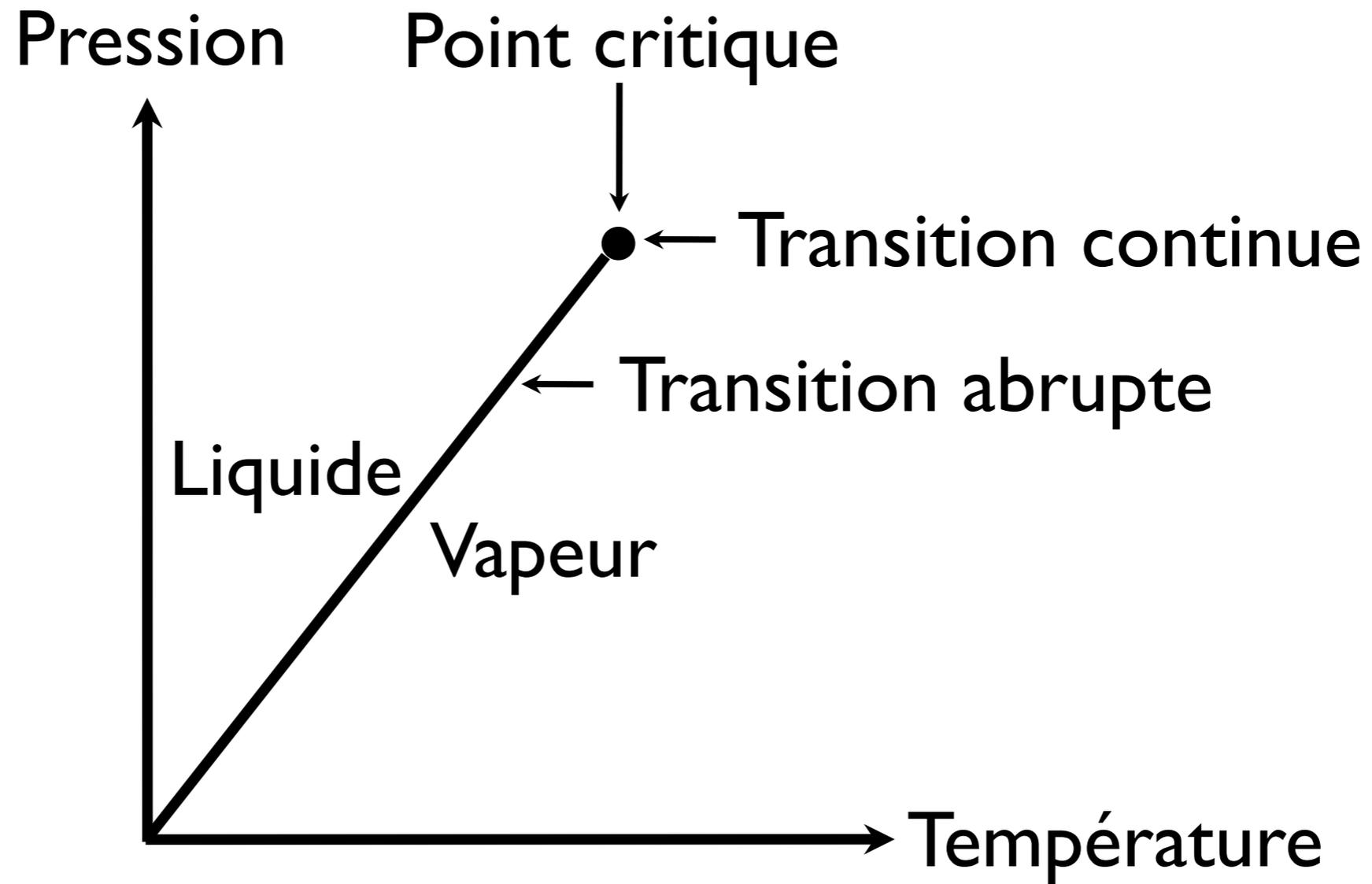
# III

## Les transitions de phase

# Les états condensés des corps purs



# Les transitions de phase d'un corps pur condensé



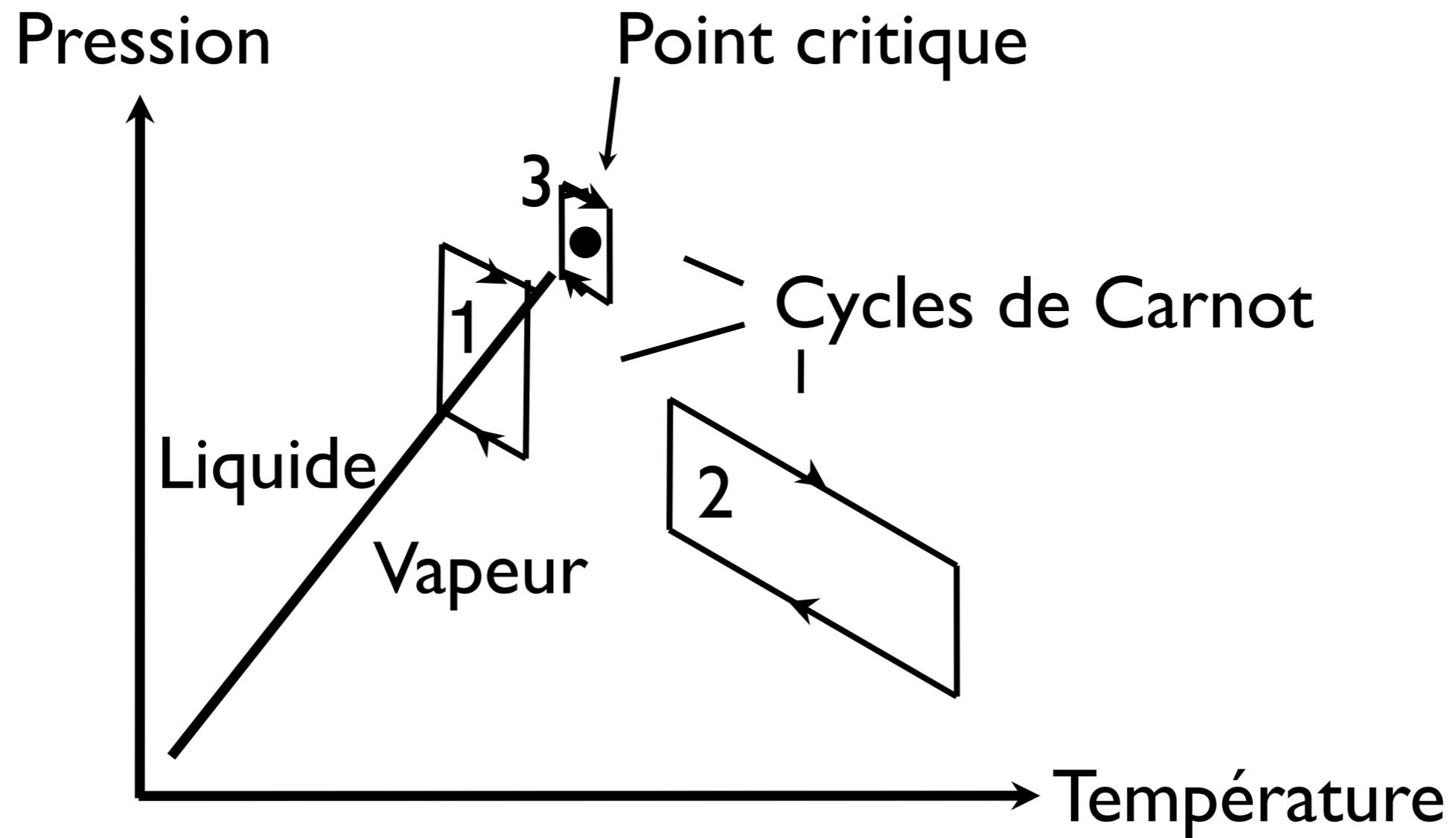
# Les transitions de phase d'un corps pur condensé

$L$  = chaleur latente de transition

Transitions continues	$L = T. \Delta S = 0$	Pas de germe
Transitions abruptes	$L = T. \Delta S \neq 0$	germe

$\Delta S \neq 0$  = apport d'information (germe)  
= évacuation d'entropie (chaleur)

# Les transitions de phase d'un corps pur condensé



# Cycles de Carnot d'un corps pur

(1) Cycle de Carnot autour d'une transition abrupte  
(Machine à vapeur).

*Avantage* : large variation de volume.

*Inconvénient* : faible rendement de Carnot.

(2) Cycle de Carnot en dehors des transitions  
(Moteur automobile).

*Avantage* : bon rendement de Carnot.

*Inconvénient* : températures très élevées.

(3) Cycle de Carnot autour du point critique.

*Avantage* : Très larges variations de volume.

*Inconvénient* : rendement de Carnot très faible.

# La criticalité auto-organisée

*Per Bak, Chao Tang, Kurt Wiesenfeld (1987)*  
introduisent le concept de  
criticalité auto-organisée.



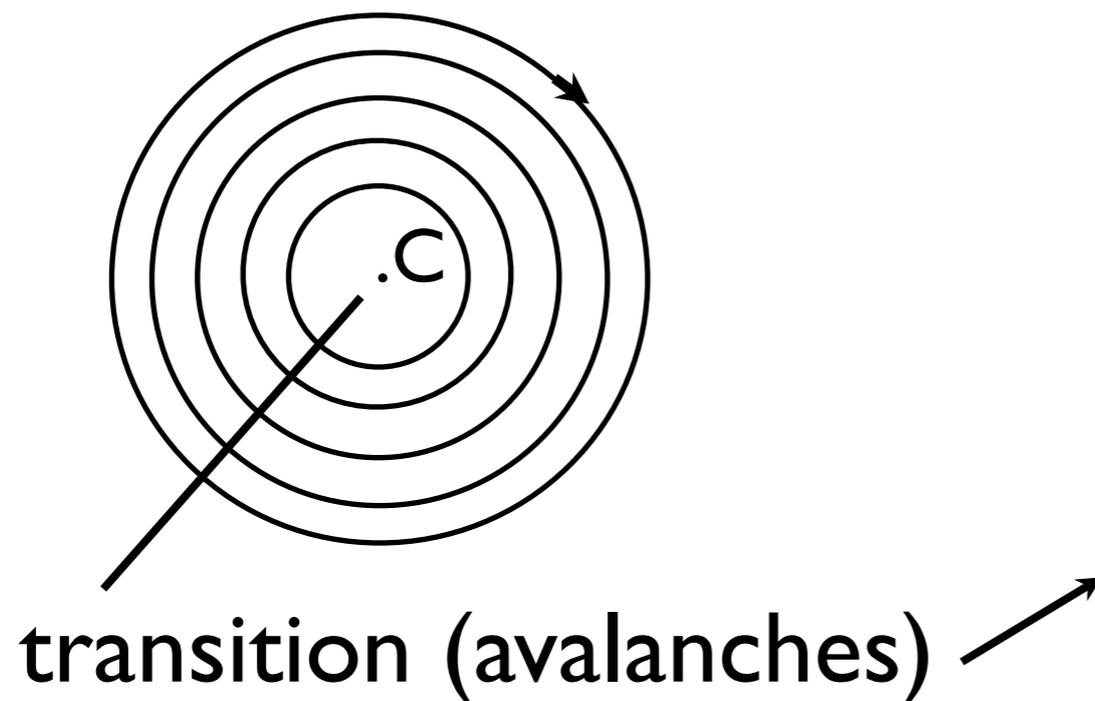
Per Bak (1948-2002)

# La criticalité auto-organisée

Lorsqu'il est suffisamment élevé un gradient de température (ou autre) dit *pente critique* peut déclencher une *avalanche de "bifurcations"* (analogie du tas de sable)

Ce gradient se comporte alors comme un *point critique* autour duquel des cycles naturels s'auto-organisent.

# La criticalité auto-organisée



Plus on s'éloigne de C plus les avalanches sont importantes  
mais moins elles sont fréquentes ( bruit en  $1/f$  ).

# **La criticalité auto-organisée et les cycles naturels**

- Ces avalanches permettent aux cycles naturels de s'auto-organiser.
- Le mécanisme est semblable à celui des transitions de phase au voisinage du point critique.

# **IV**

# **Éléments de thermo-économie**

**Peut-on transposer ces  
notions  
en économie?**

# Les potentiels de Gibbs en économie

Une société humaine est définie par ses frontières. Elle est traversée à la fois par un flux d'énergie et par un flux de matière. Sa variation d'énergie interne peut s'écrire:

$$dU = dF + TdS + dG$$

où  $G$  est son potentiel économique.

# Les potentiels de Gibbs en économie

On peut mettre  $dG$  sous la forme:

$$dG = \sum \mu_i dn_i = 0$$

$\mu_i$  = potentiel économique de l'objet  $i$

$dn_i$  = nombre d'objets  $i$

# Valeur d'usage et valeur d'échange

$$dG = \sum \mu_i dn_i + \sum \mu_j dn_j$$

$\mu_i$  = valeur d'usage de l'objet i

$\mu_j$  = valeur d'échange de l'objet j

$dn_i$  = nombre d'objets i

$dn_j$  = nombre d'objets j

Objets spécialisés pour leur  
valeur d'échange: *la monnaie.*

# Valeur d'usage et valeur d'échange

Posons:  $\sum \mu_i dn_i = -P.dV$  et  $\sum \mu_j dn_j = T.dM$

$$dG = -P.dV + T.dM$$

$P = -\sum \mu_i dn_i / \sum dn_i =$  potentiel ou pouvoir de vente  
(utilité) de la production

$dV = \sum dn_i =$  accroissement de la production

$T = \sum \mu_j dn_j / \sum dn_j =$  potentiel ou pouvoir d'achat  
(température) de la monnaie.

$dM = \sum dn_j =$  accroissement de la monnaie (gain)

# Signification de P et T

En comparant :

$$dG = (\partial G/\partial V).dV + (\partial G/\partial M).dM$$

avec:  $dG = - P.dV + T.dM$

On a:  $P = - (\partial G/\partial V)_M$      $T = (\partial G/\partial M)_V$

P = pouvoir de vente = énergie dissipable  
par unité de volume de la production

T = pouvoir d'achat = énergie dissipable  
par unité monétaire

# Signification de P et T

Comme les potentiels de Gibbs, pouvoir de vente (utilité) P et pouvoir d'achat (richesse) mesurent la *capacité à dissiper de l'énergie*

biochimie

**CACAO FORTEMENT DÉGRAISSÉ SUCRÉ.**  
Ingrédients : Sucre, Cacao maigre (11% de beurre de cacao), Arôme. Cacao : 32% minimum.  
Peut contenir des traces de fruits à coque et de soja.



Informations Nutritionnelles	100 g de Grand Arôme	20 g de Grand Arôme et 20 cl de lait demi-écrémé
Valeur Energétique	1495 kJ 355 kcal	675 kJ 160 kcal

économie



# Ludwig Boltzmann (1905)

La lutte pour la vie est une  
lutte pour dissiper de  
l'énergie.

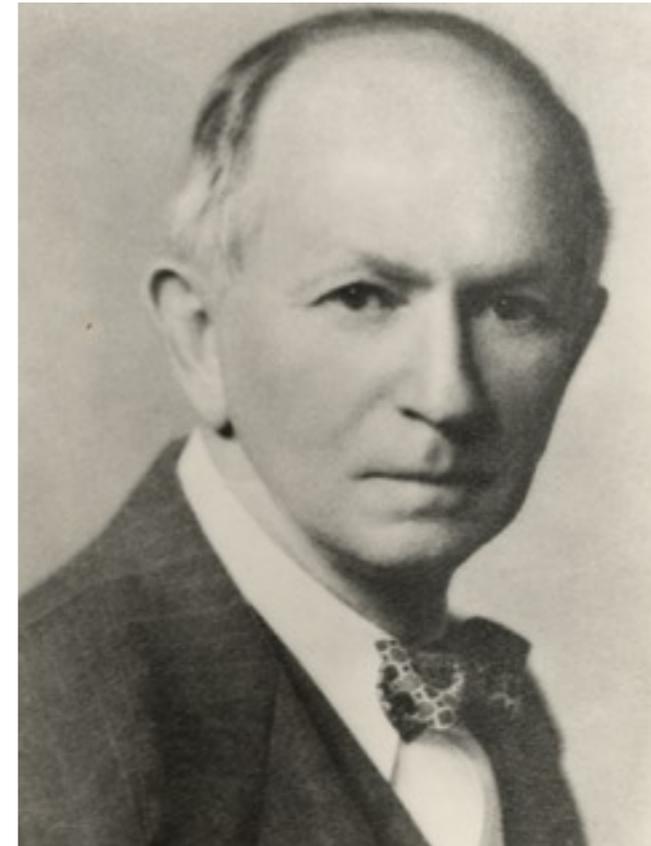


Ludwig Boltzmann  
(1844-1906)

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

# Alfred Lotka (1922)

La sélection naturelle favorise l'organisme qui dissipe le plus vite l'énergie.



Alfred Lotka  
(1880-1949)

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

## Frederick Soddy (1926)

Le bien-être des individus 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.*

# Relation de Gibbs-Duhem pour l'économie

À l'équilibre (état stationnaire)  $dG = 0$

$$\boxed{P.dV = T.dM}$$

Offre                      Demande

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

# Jean-Baptiste Say (1767-1832)

De même que le gradient  
de température crée la  
convection, la demande  
crée l'offre et non pas le  
contraire!



**V**

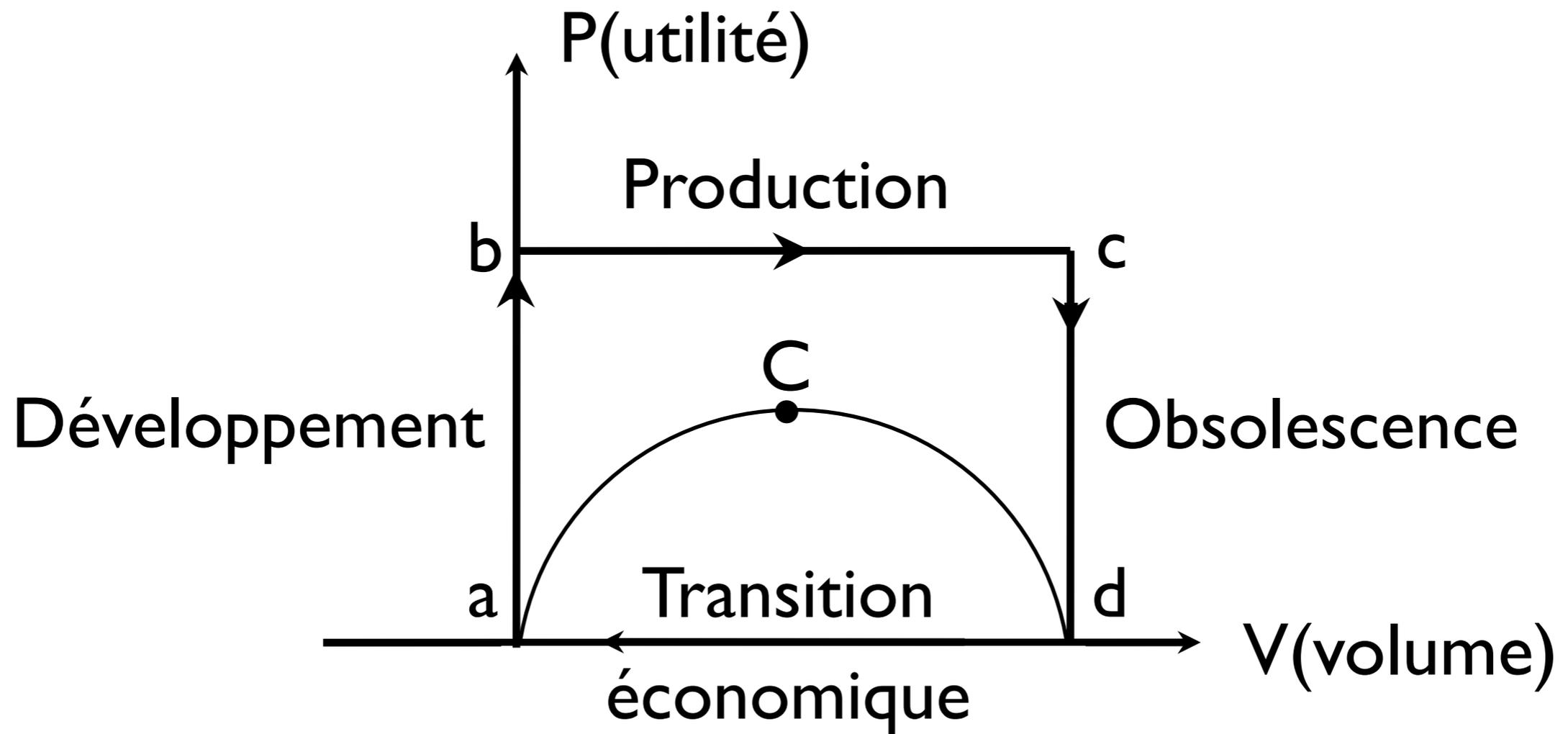
# **Les transitions économiques**

# **Cas des cycles économiques**

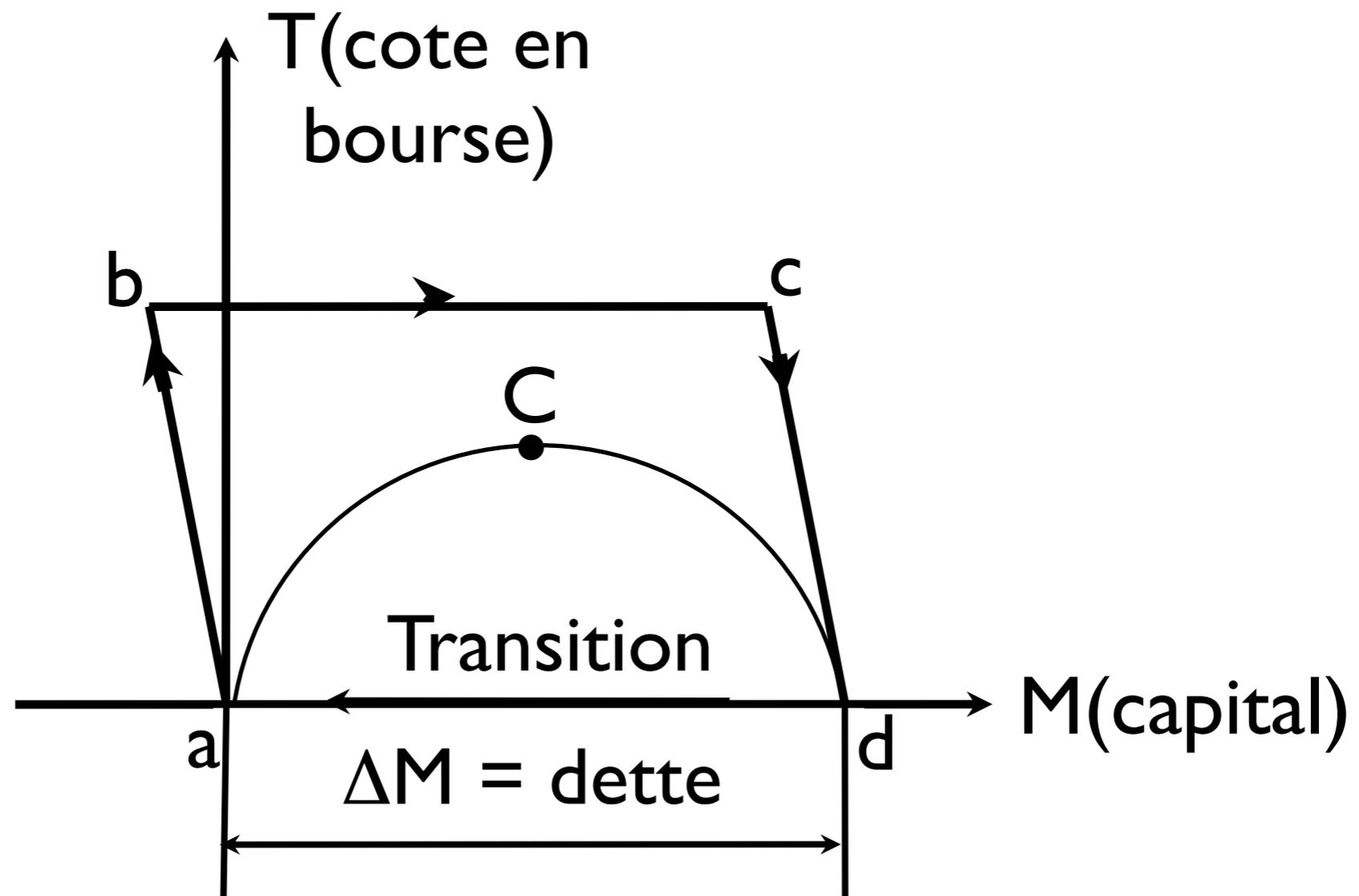
L'analogie avec le comportement thermodynamique des fluides incite à penser qu'en présence d'un flux d'énergie, des inégalités (gradients) de richesses apparaissent

Lorsque le gradient de richesses atteint une valeur critique des cycles économiques s'auto-organisent.

# Cycles de production (entreprise industrielle)



# Cycles de production (grosses entreprises)



# Cycles de production

(suite)

Le problème est qu'arrivé au point d, il faut rembourser l'investissement. Le cycle de Carnot implique un retour à l'état *initial*. Mais est-ce le cas?

# Cycles de production

(suite)

On tient en général compte du vieillissement du matériel. Mais a-t-on tenu correctement compte de celui du personnel (charges dites sociales):

*Sécurité sociale, assurance maladie, retraite, éducation des enfants sont en général laissés à la société.*

Sont aussi laissés à la société les modifications de l'environnement:

*Épuisement des ressources naturelles, pollution*

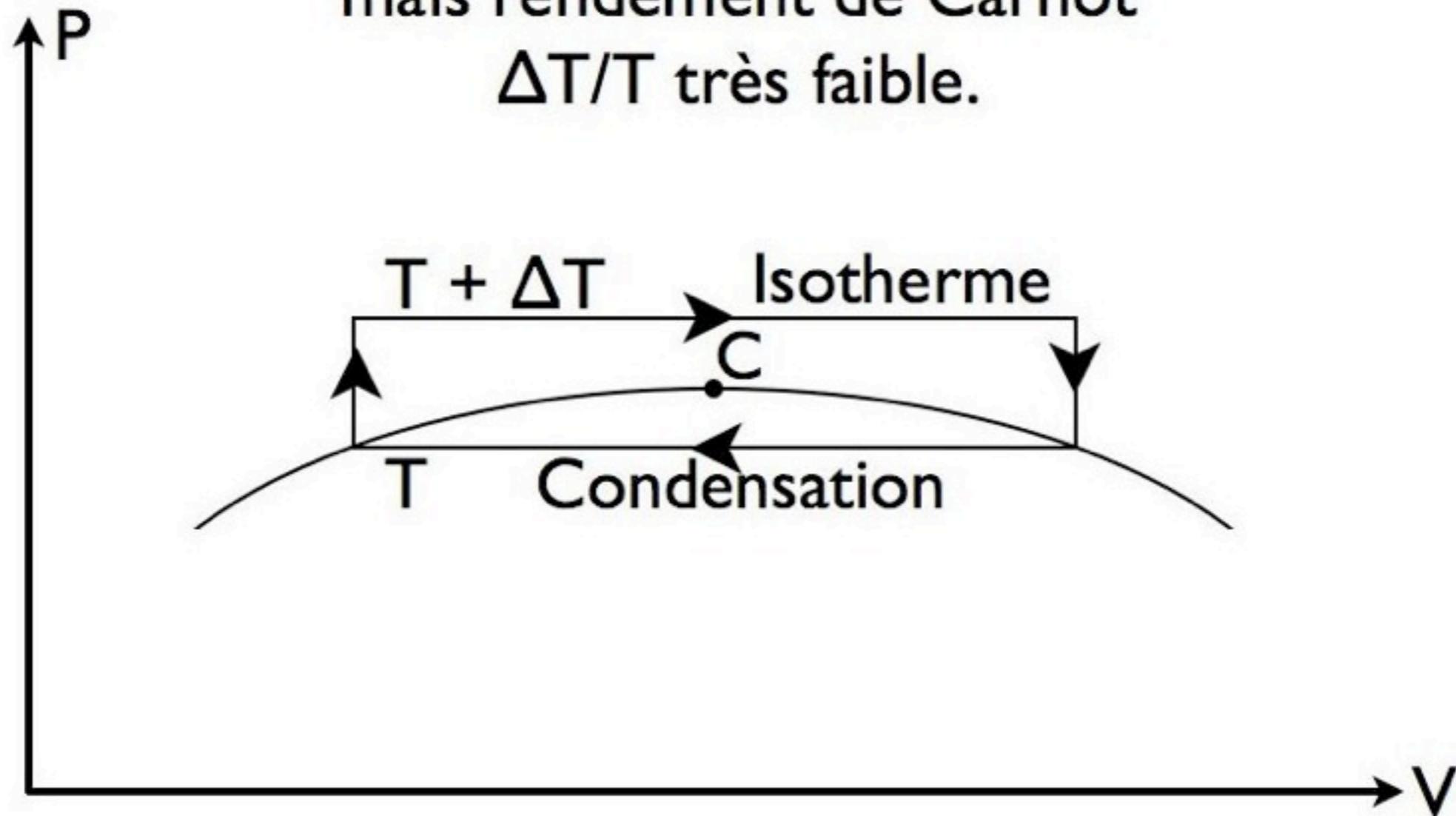
# **Cycles de production**

(suite)

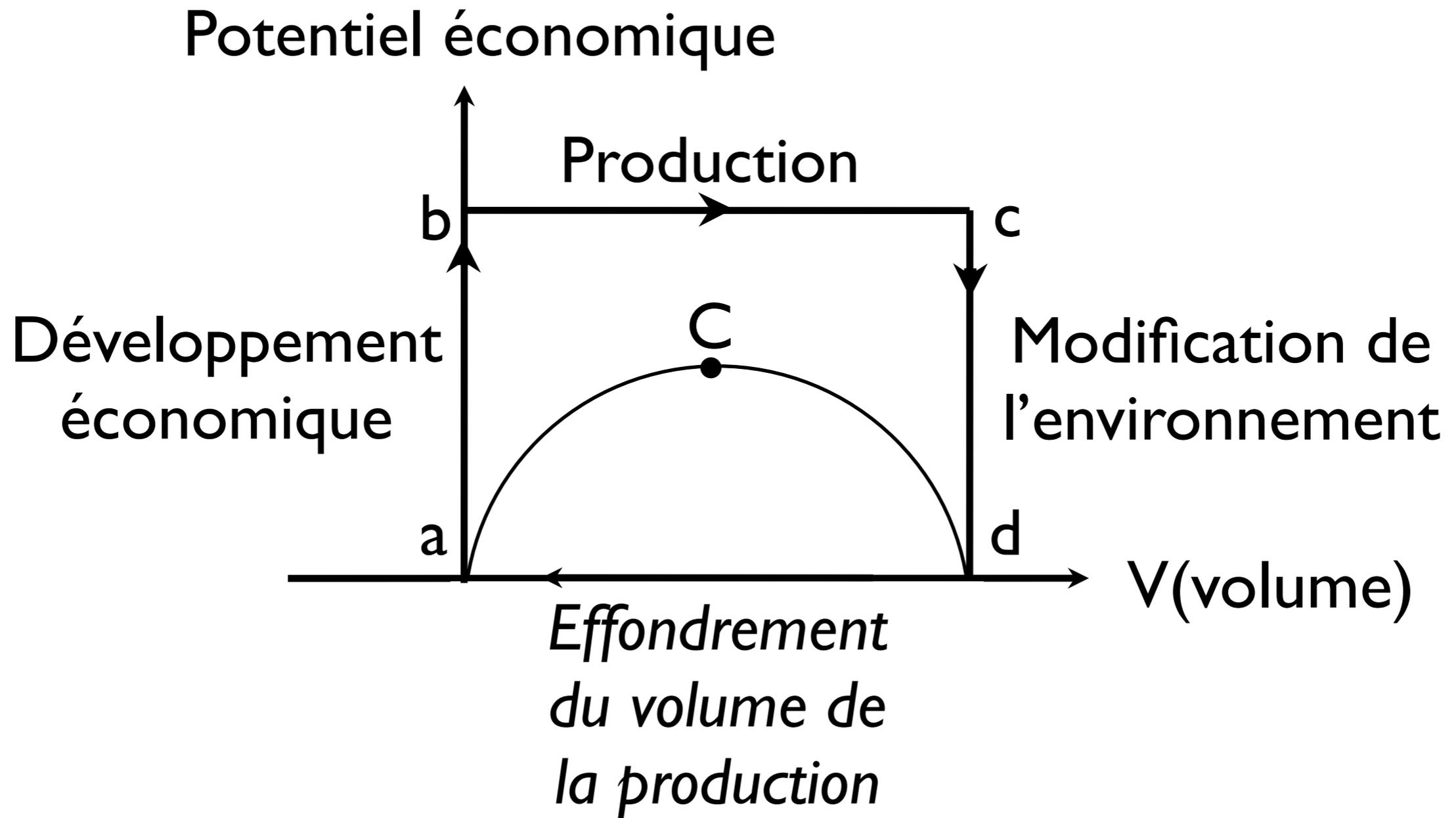
Les impayés s'accumulent menant tôt ou tard à un effondrement de la société.  
Celui-ci se caractérise par un *effondrement de la production.*

# Cas des fluides

Énormes variations de volume  
mais rendement de Carnot  
 $\Delta T/T$  très faible.



# Cycles longs de la société (à l'échelle d'un pays)



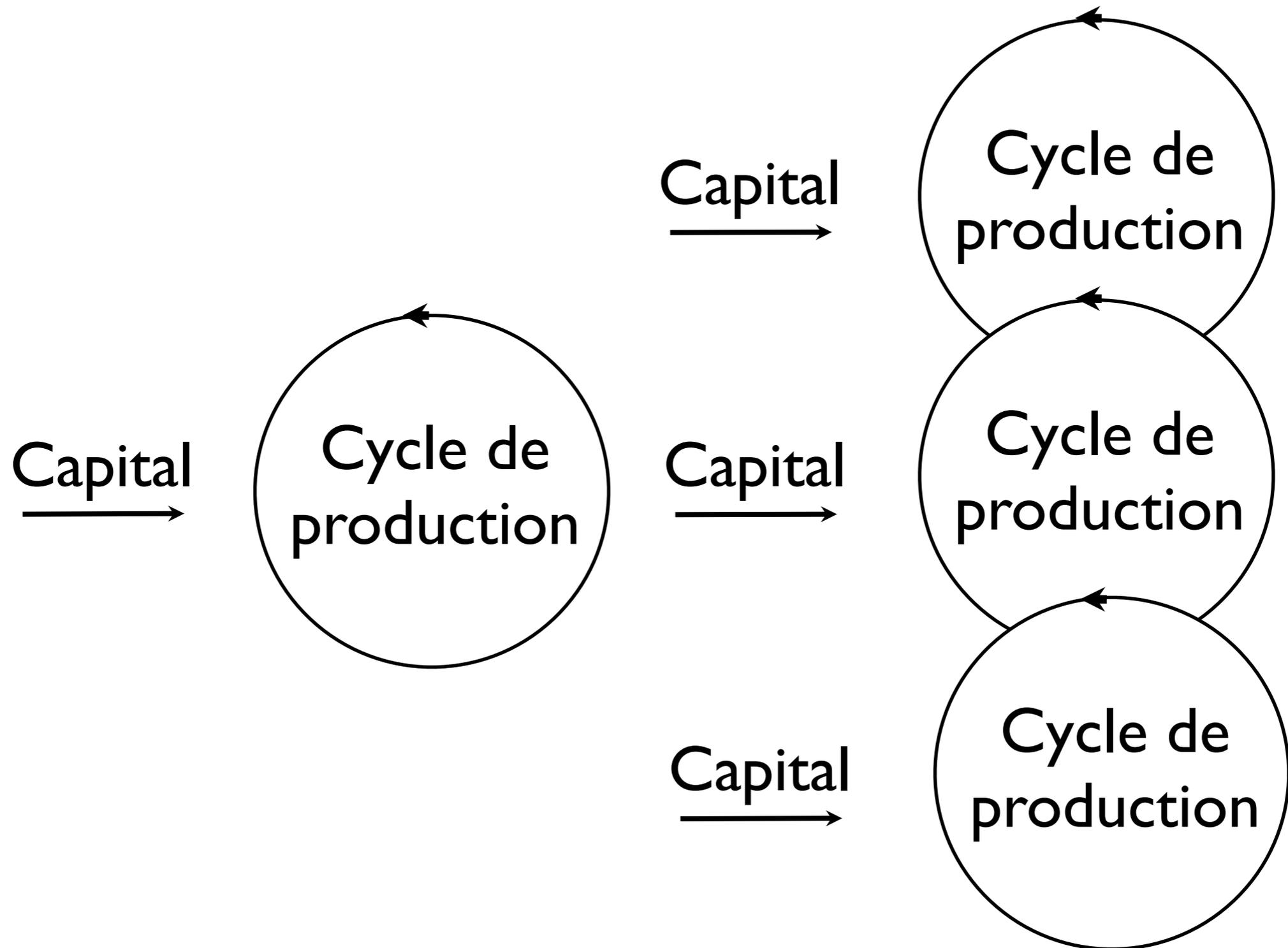
# Cycles de production

Effondrement du volume  $V$  de la production



Queue devant une boulangerie (Paris, 1947)

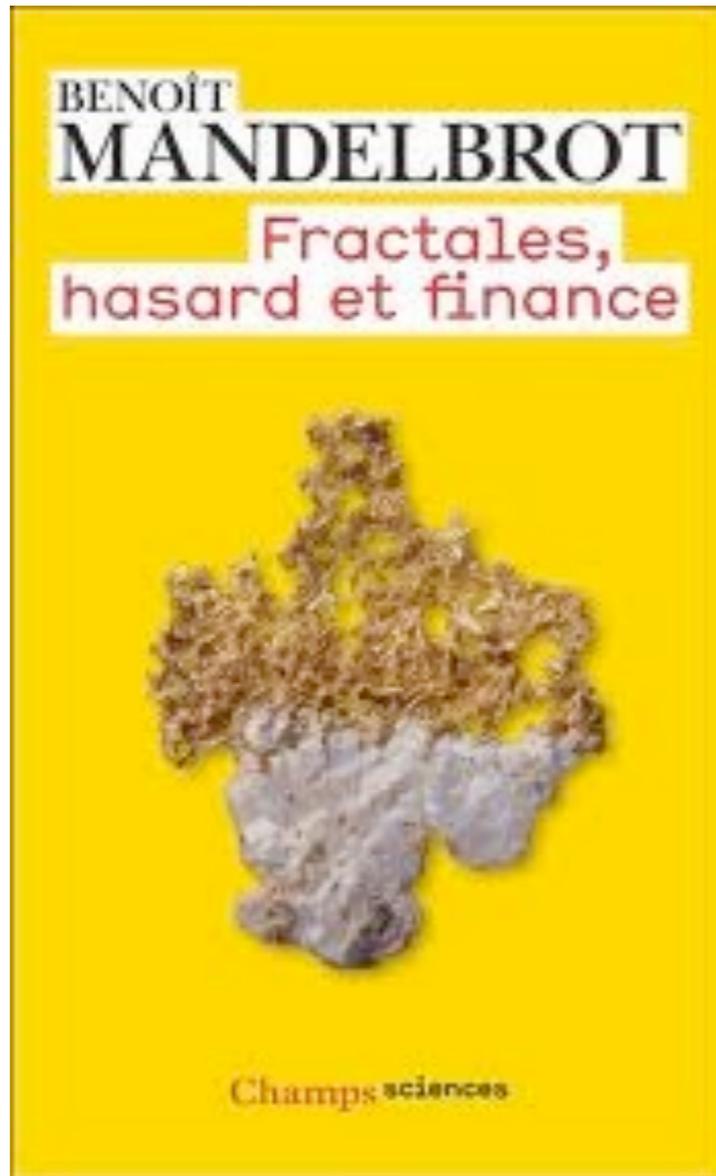
# Cycles autocatalytiques



# Cycles autocatalytiques

Dès qu'on arrive en dessous du point critique les failles se multiplient et les avalanches cessent. C'est le *chômage*.

# Benoit Mandelbrot (1924-2010)



Benoît Mandelbrot

1959: Les fluctuations d'amplitude du marché suivent une statistique en loi de puissance de variance infinie.

# Vilfredo Pareto (1848-1923)

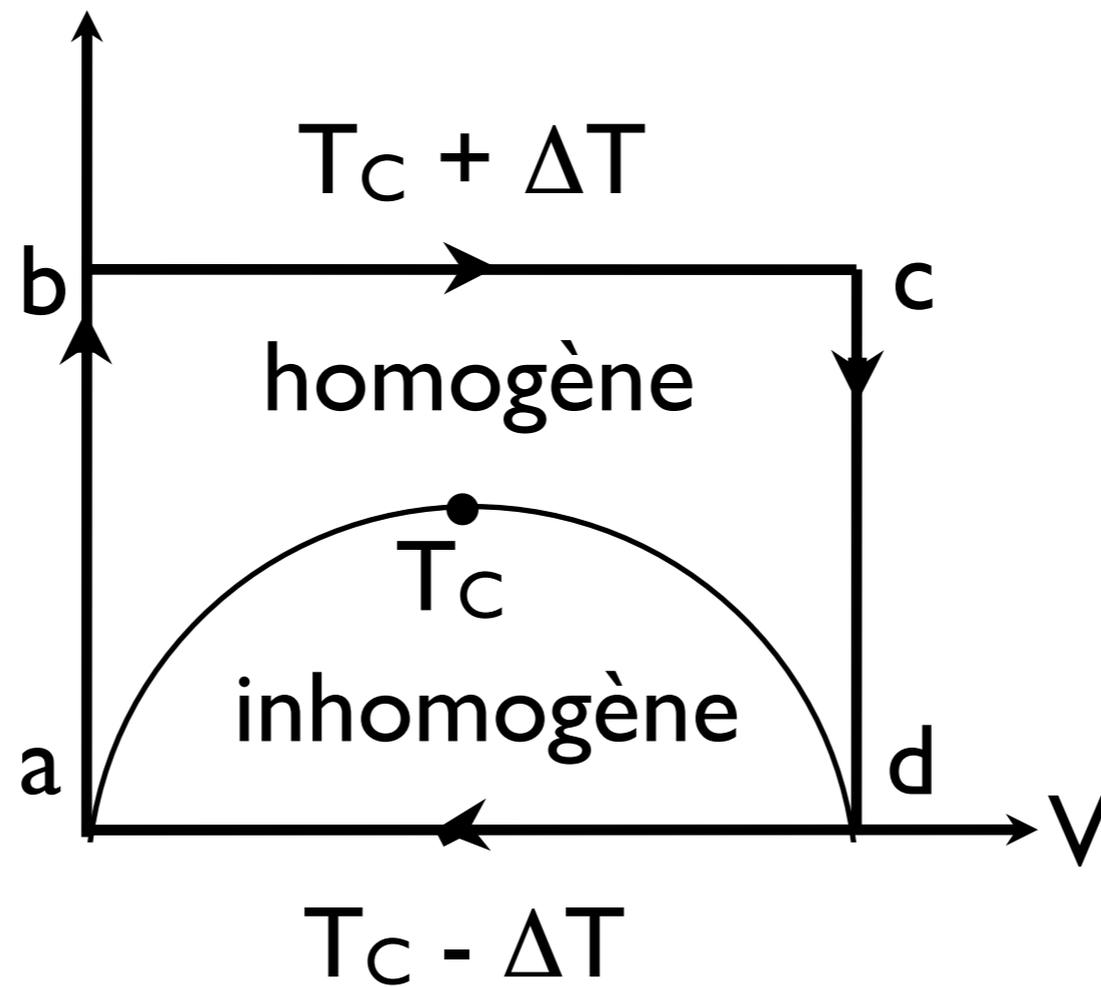
La distribution des richesses suit une loi de puissance (invariance par changement d'échelle de l'opalescence critique).

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



Vilfredo Pareto

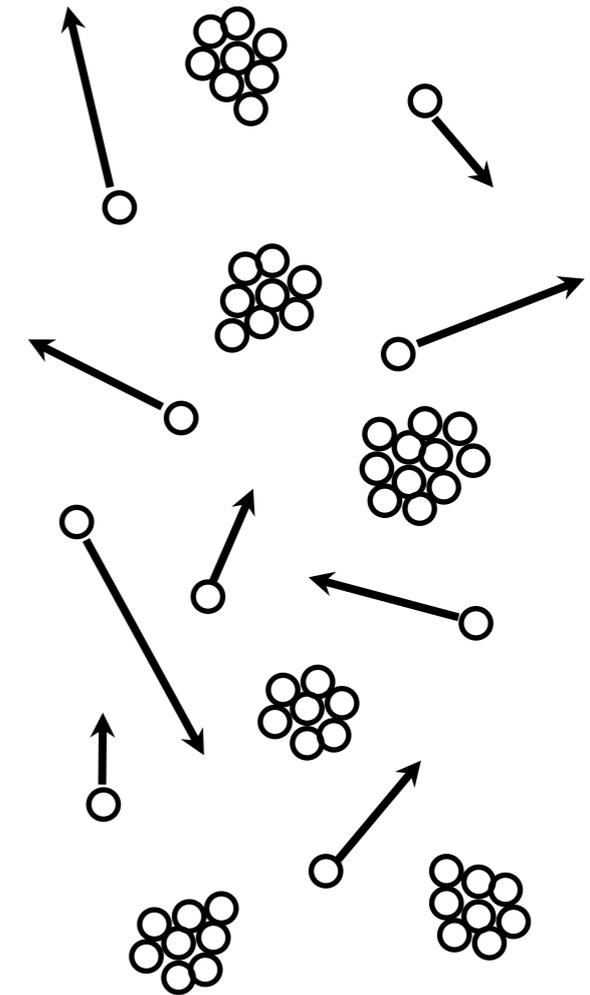
# Condensation au point critique



# La condensation des richesses

Lorsqu'on arrive en dessous de la température critique, 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.



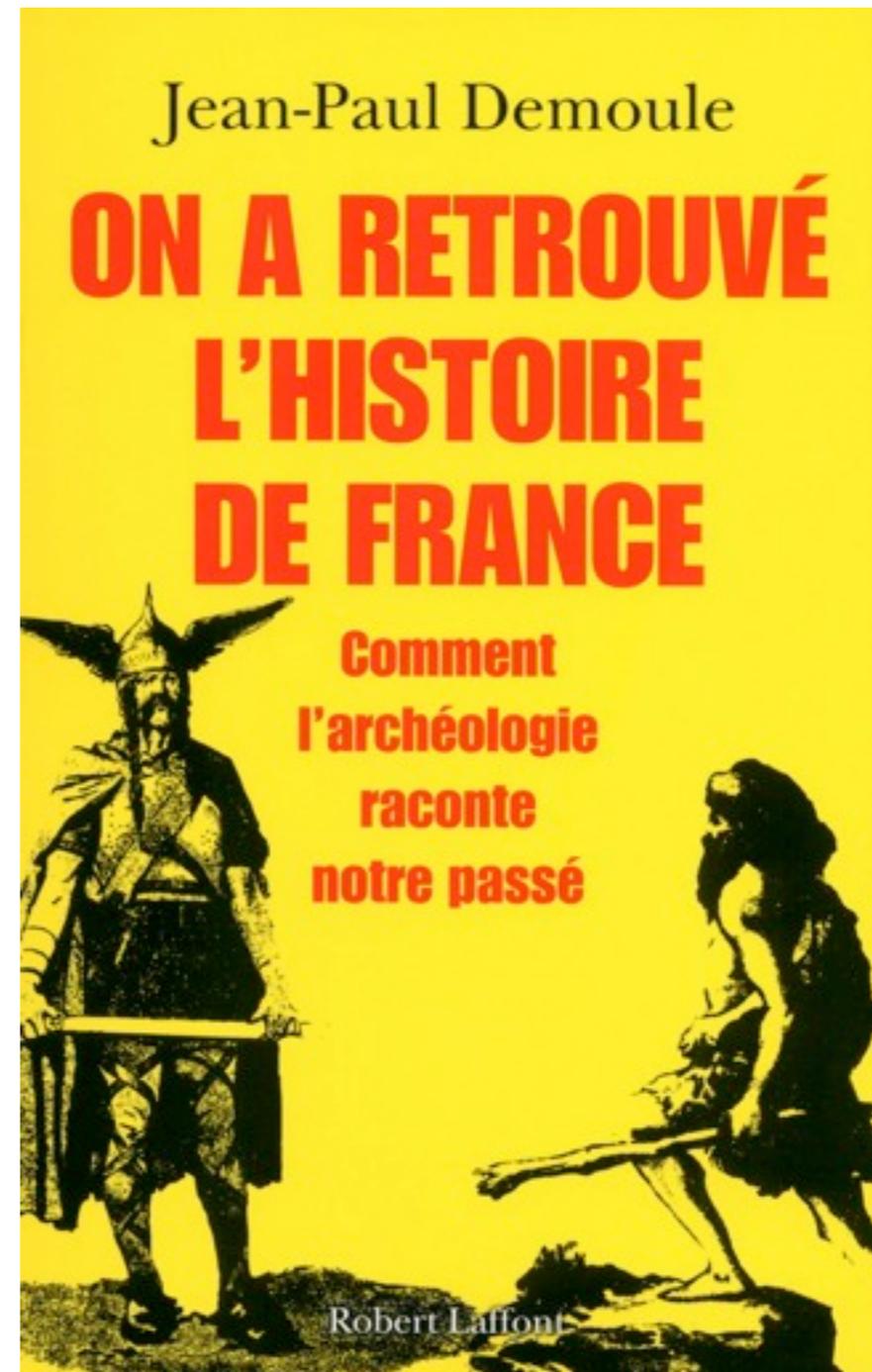
*La classe moyenne d'effondre.*

**VI**

# **Exemples historiques**

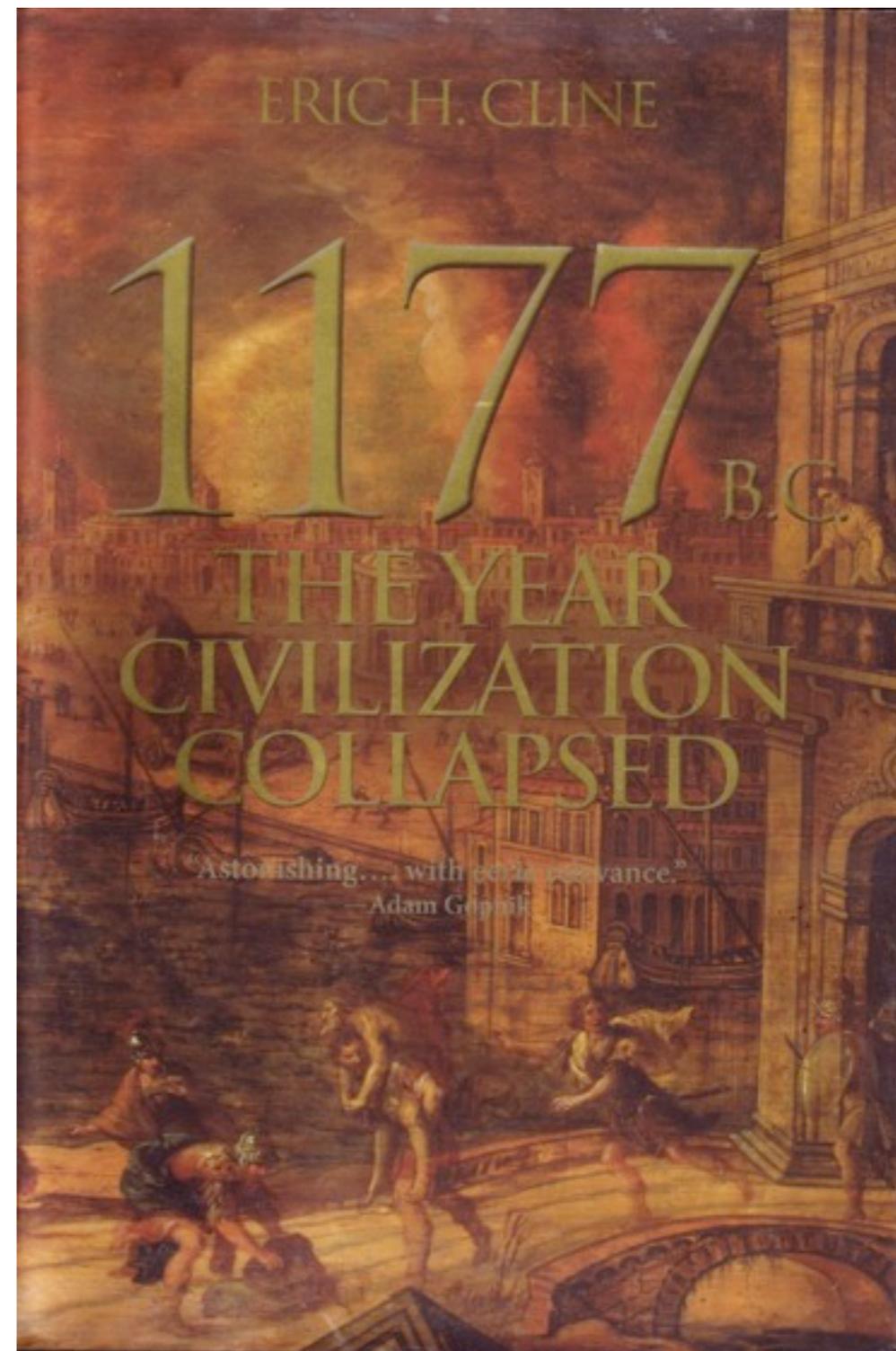
## Jean-Paul Demoule (2012)

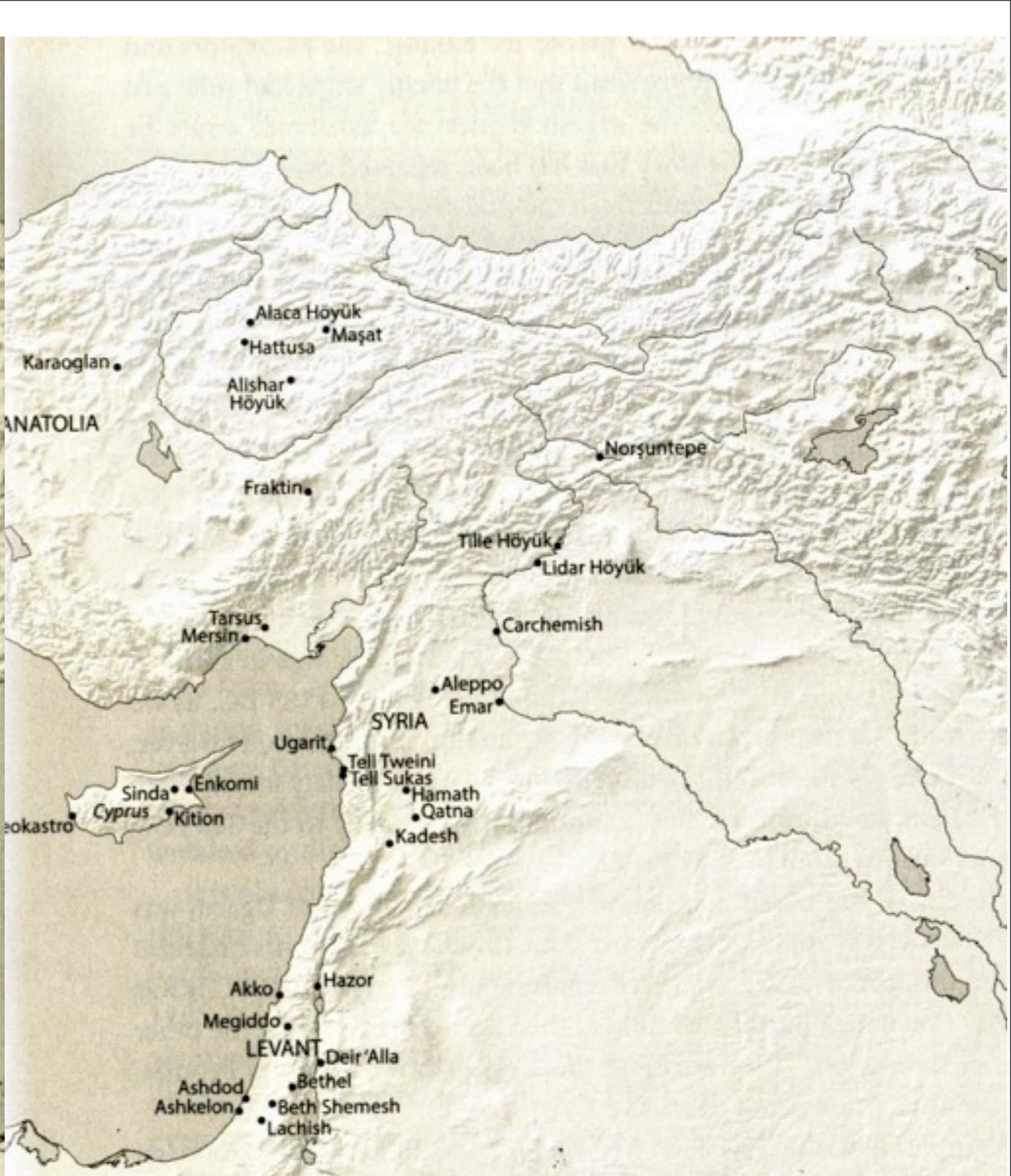
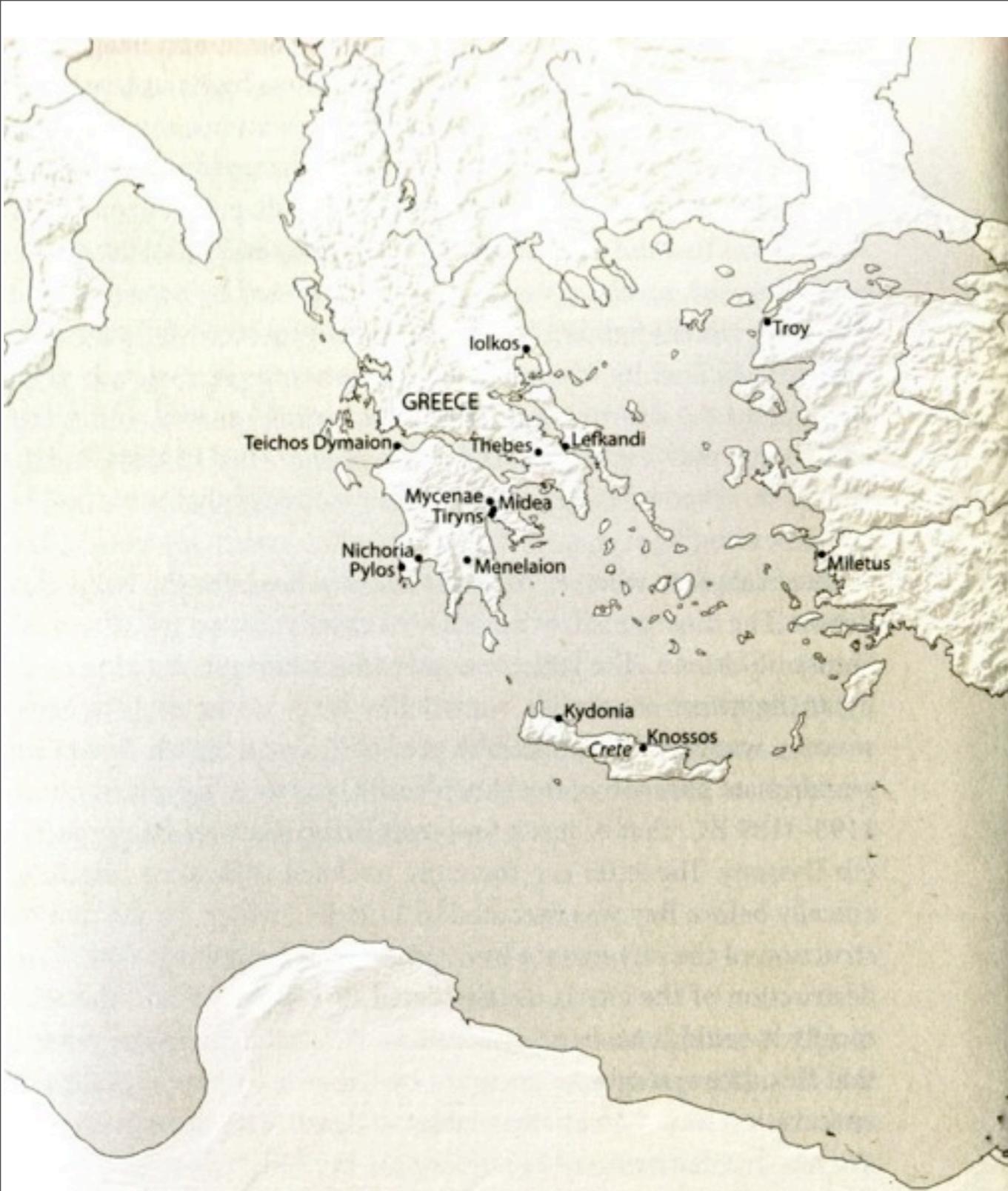
« L'histoire s'accélère [...] la population ne cesse de croître. [On assiste à] une montée en *dents de scie* des inégalités sociales [...] à une alternance, selon les régions, de sociétés fortement inégalitaires et de sociétés qui le sont moins. [...] Cette alternance [...] concerne toute l'Europe »



## Eric H. Cline (2014)

1177 B.C.  
The Year  
civilization  
collapsed





1177 B.C.

# 1177 avant J.C.

Un parfait exemple de transition économique:

*La fin de l'âge de bronze.*

Transition abrupte liée à l'usage d'une monnaie unique: l'or.

1177 b.c., 476 a.c., 20?? a.c. ?

Cycle de 1600 ans?

# **VII**

## **Que faire?**

# Le modèle de la biochimie

Les lois de la biochimie s'appliquent  
à l'économie

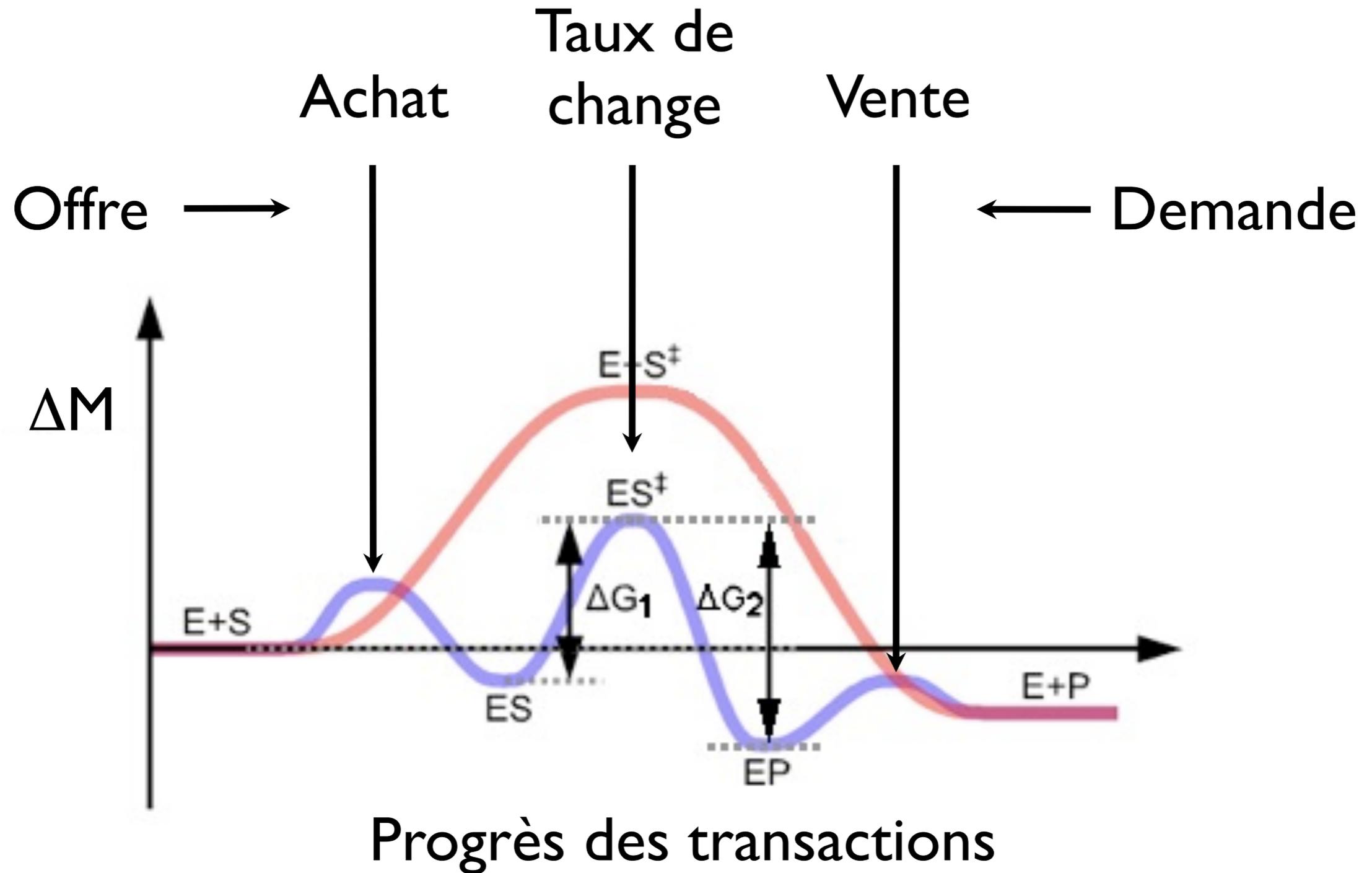
Espérance de gain:  $\Delta M = -\sum p_i \cdot \log p_i$

$p_i$  = probabilité de transaction

(Thermodynamique de l'évolution p. 177)

On retrouve la formule de Gibbs pour l'entropie  
et de Shannon pour l'information

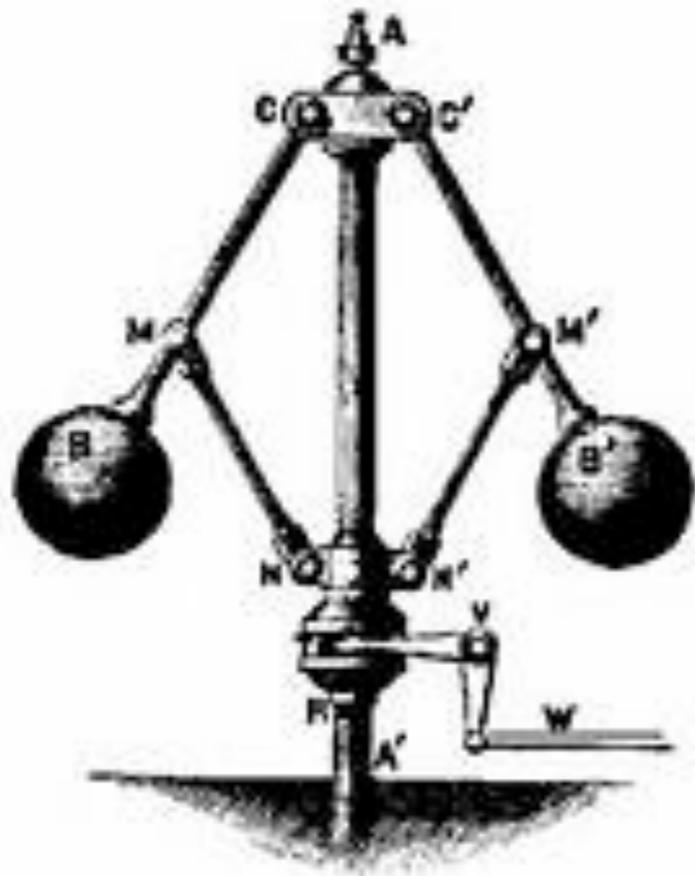
# Le modèle de la biochimie



# **Application à l'économie**

L'utilisation de deux monnaies permet d'ajuster les barrières de potentiel grâce aux taux de change.

# Le modèle thermodynamique



L'usage de deux monnaies permet d'ajuster constamment l'économie au flux d'énergie disponible.

# Principes de l'économie

On peut généraliser les principes de la thermodynamique à l'économie.

# Principes de l'économie

## **Premier principe:**

Une économie ne peut pas fonctionner sans un flux permanent d'énergie qui la traverse.

## **Second principe:**

Une économie ne peut pas fonctionner *durablement* sans l'usage d'au moins deux monnaies différentes.

# Les échanges commerciaux

- diminuent les inégalités entre deux pays utilisant des monnaies différentes (*commerce extérieur*).
- augmentent les inégalités à l'intérieur d'un pays ou ensemble de pays utilisant la même monnaie (*commerce intérieur*).

# Les échanges commerciaux

Une seule monnaie =

- une seule température
- pas de cycle de Carnot
- l'énergie ne se dissipe pas
- la monnaie stagne (réflexe du “bas de laine,” placements bancaires ou immobiliers).

*Résultat:* les inégalités de richesse ne cessent d'augmenter. L'économie ne fonctionne plus.

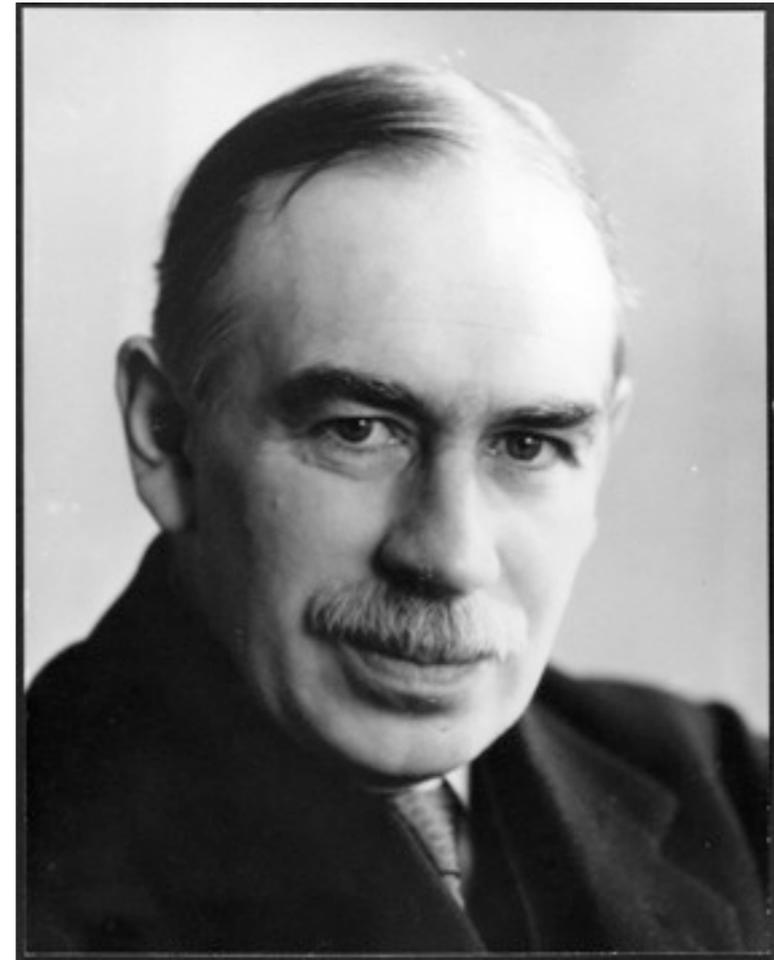
# **Un pays, deux monnaies**

Il devrait être possible de réguler l'économie d'un même pays ou ensemble de pays grâce à l'emploi de deux monnaies différentes.

*Cela permettrait de diminuer le chômage et les inégalités sociales en Europe.*

# John Maynard Keynes (1883-1946)

Keynes a montré qu'une politique d'investissement gouvernemental pouvait relancer l'économie, mais n'a pas explicité qu'il s'agissait de deux monnaies, ni explicité leurs rôles.



John Maynard Keynes

## **Le modèle de la biochimie\***

Les organismes vivants se sont développés à partir de deux types de chaînes moléculaires, d'abord les *polypeptides*, secondés ensuite par les *polynucléotides*.

De nos jours, les organismes vivants utilisent des *enzymes* différents pour des *voies métaboliques* différentes.

De même il faut utiliser des monnaies différentes pour des flux de matière ou d'énergie différents.

*(\*)Biomimétisme: s'inspirer du vivant pour les activités humaines.*

# Proposition

On utilise une monnaie différente pour les énergies fossiles et les énergies renouvelables.

À mesure que les énergies fossiles s'épuisent, la température des économies qui leurs sont associées diminue, tandis que celle des économies associées aux énergies renouvelables augmente.

*On a remplacé une transition abrupte par une transition continue*

# Proposition

La banque centrale européenne prend à son compte les dettes nationales et les réinvestit sous forme d'une nouvelle devise (initialement à parités égales).

La monnaie jouant le rôle de catalyseur, je propose d'appeler cette nouvelle devise:  
« *enzyme* ».

# Proposition

Séparer l'économie de service de l'économie industrielle:

- Conserver l'*euro* pour l'industrie.
- Utiliser l'*enzyme* pour les services.

# Proposition

Économie en euros	<i>Ressources matérielles et/ou non renouvelables: matières premières, charbon, pétrole, non-vivant.</i>
Économie en enzymes	<i>Ressources immatérielles et/ou renouvelables: salaires, services, nourriture, vivant.</i>

Comparée à l'économie en euros, l'économie en enzymes peut être assujettie à des statuts différents (taxes, impositions, etc ...).

# Intérêt pour l'écologie

## *Économie de fonctionnalité:*

- La production de biens matériels relève de l'euro.
- L'économie de fonctionnalité relève de l'enzyme.

## *Économie circulaire:*

Regroupement d'unités productrices relevant de l'euro pour former un ensemble industriel relevant de l'enzyme (à l'intérieur duquel toute matière première est recyclée).

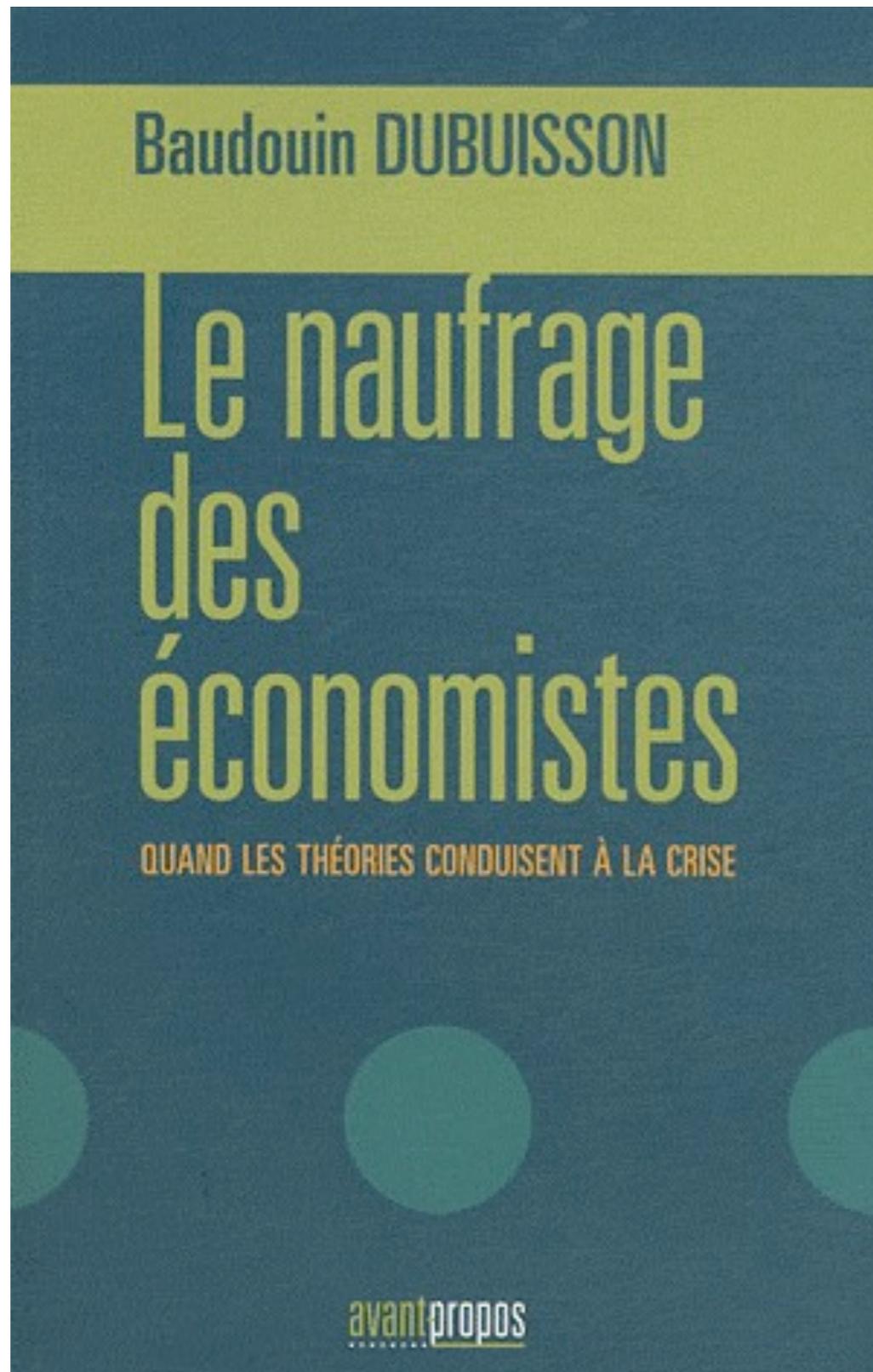
## Point de vue des économistes

« *Les économistes doivent changer leurs croyances. La théorie économique est devenue un monde autosuffisant, une fausse représentation de la réalité* ».



Joseph Stiglitz

*(Interview de Joseph Stiglitz, Alternatives économiques, avril 2010)*



**Baudouin Dubuisson  
(2011)**

# Ma réponse aux économistes

Lorsque vous parlez de « surchauffe » économique, vous présentez déjà qu'il s'agit d'un problème de machine à vapeur:

Suivez les conseils de Georgescu Roegen: étudiez la *thermodynamique* (mécanique statistique) et la *biologie* (moléculaire).

Vous êtes arrêté par la terminologie?  
Voici un dictionnaire:

# Dictionnaire à l'usage des économistes

Probabilité de transition	Probabilité de transaction
Transition de phase	Transition économique
Transition abrupte	Effondrement économique
Pression	Potentiel économique
Volume	Volume de la production
Température	1/coût de l'énergie
Production d'entropie	Perte de valeur monétaire

# À long terme, le seul développement durable possible:

Source chaude: le soleil ( $6000^{\circ}\text{K}$ )



Source froide: le ciel nocturne ( $3^{\circ}\text{K}$ )

L'humanité est indiscociable  
de la machine thermique  
“Terre” (Gaïa)  
Elle ne peut qu'évoluer de  
concert avec elle.

**Fin**

## Lecture recommandée

*“Into the cool. Energy flows, thermodynamics and life”*

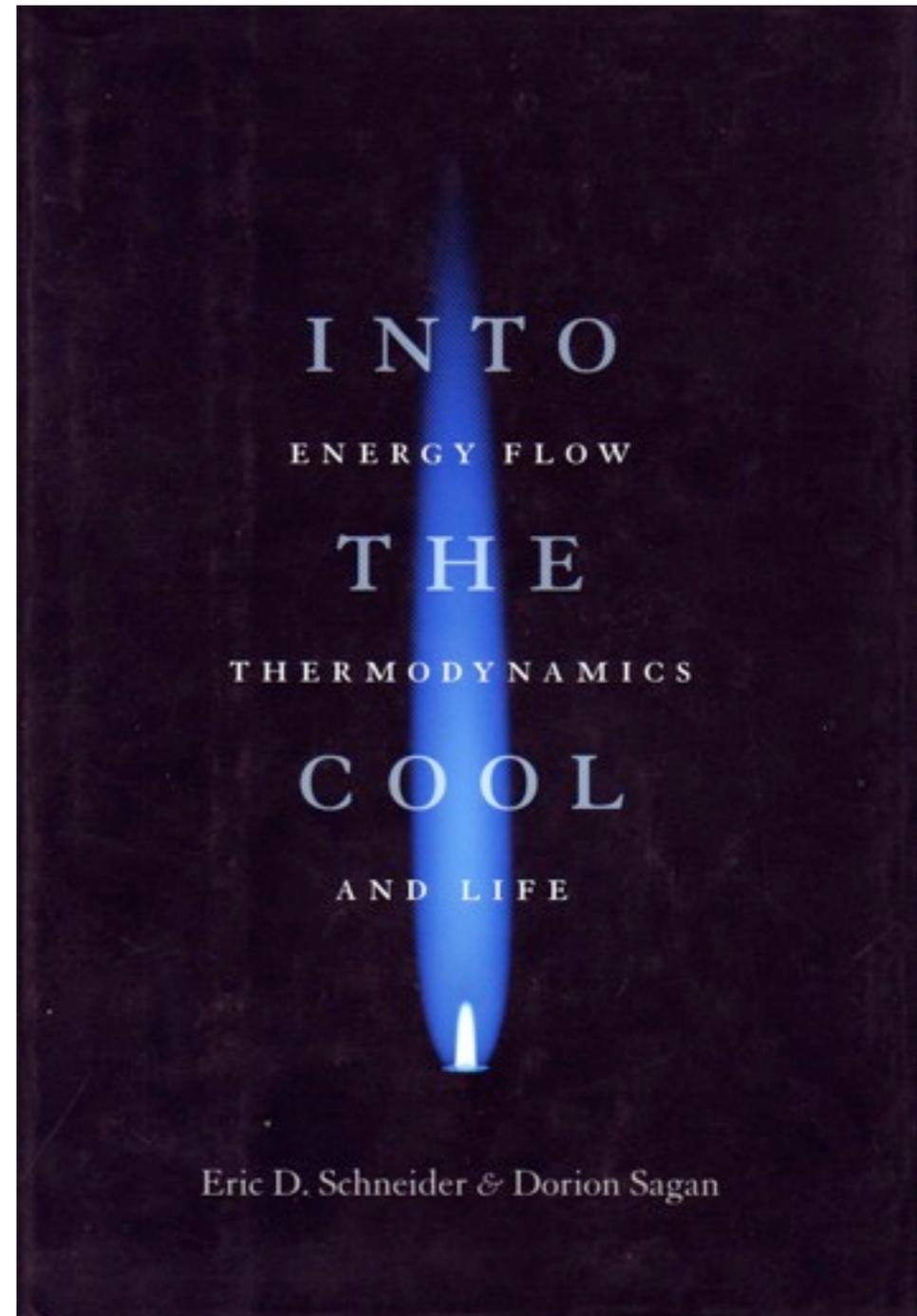
Eric D. Schneider et  
Dorion Sagan (2005)

I. The energetics

II. The complex

III. The living

IV. The human

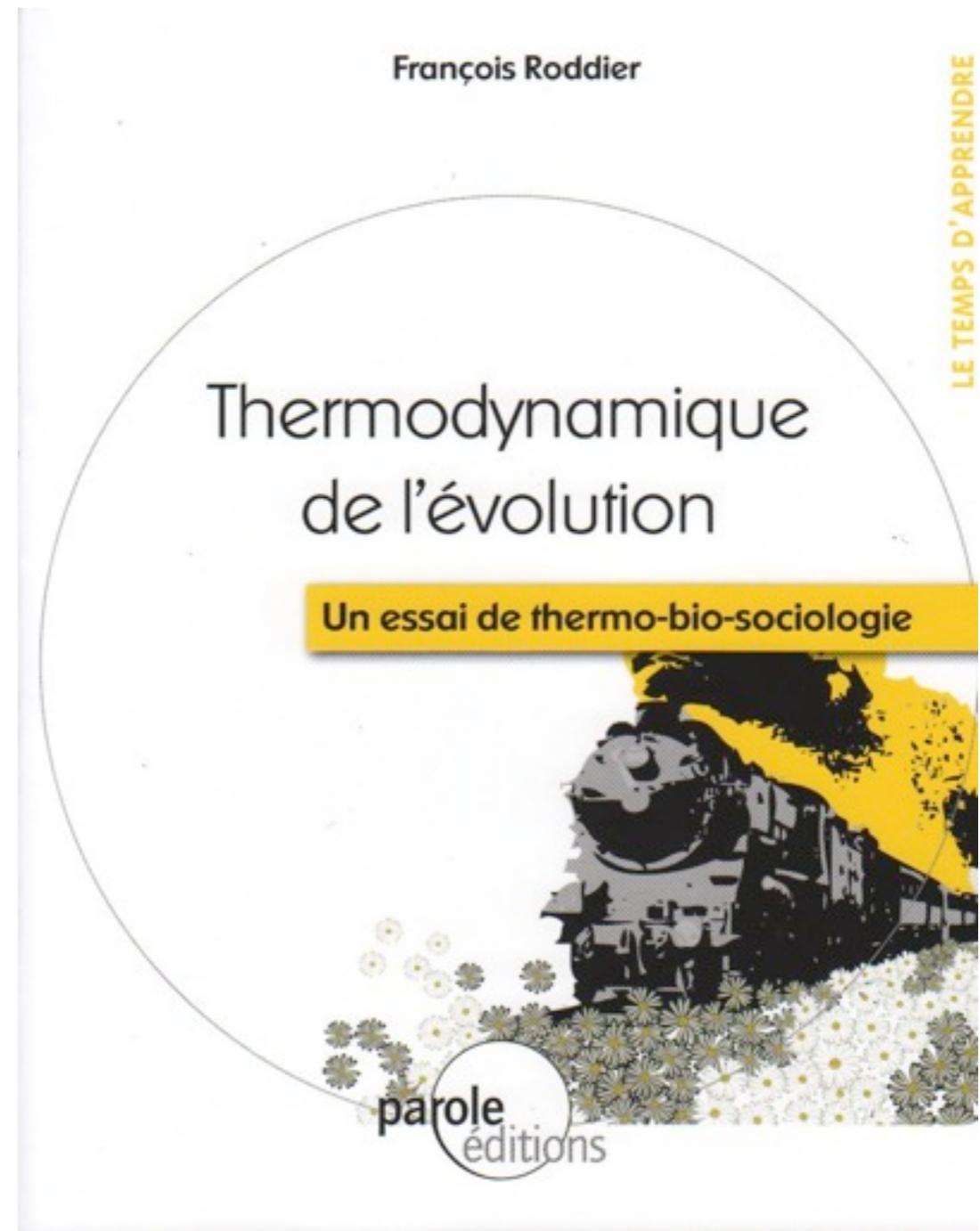


# Lecture recommandée

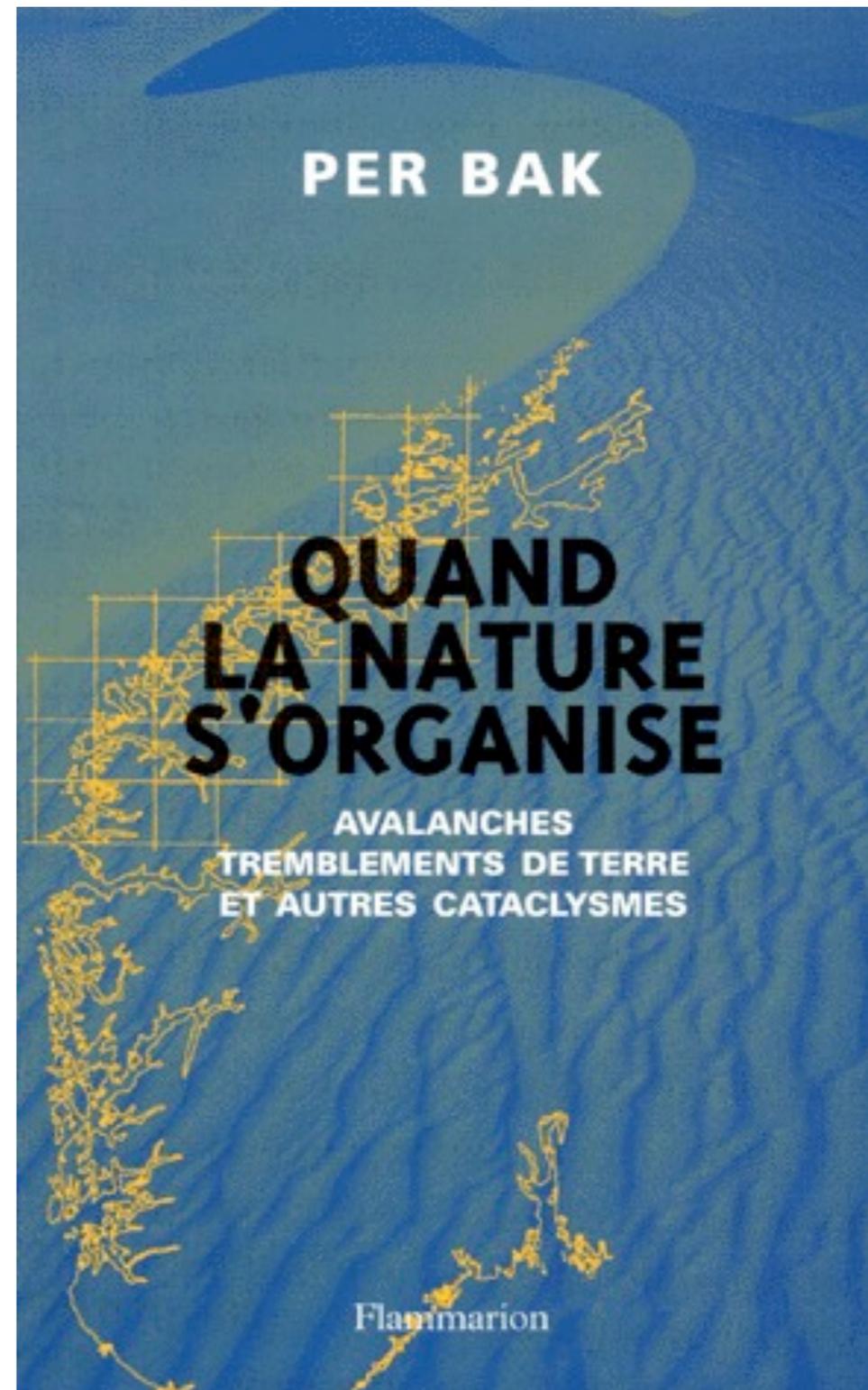
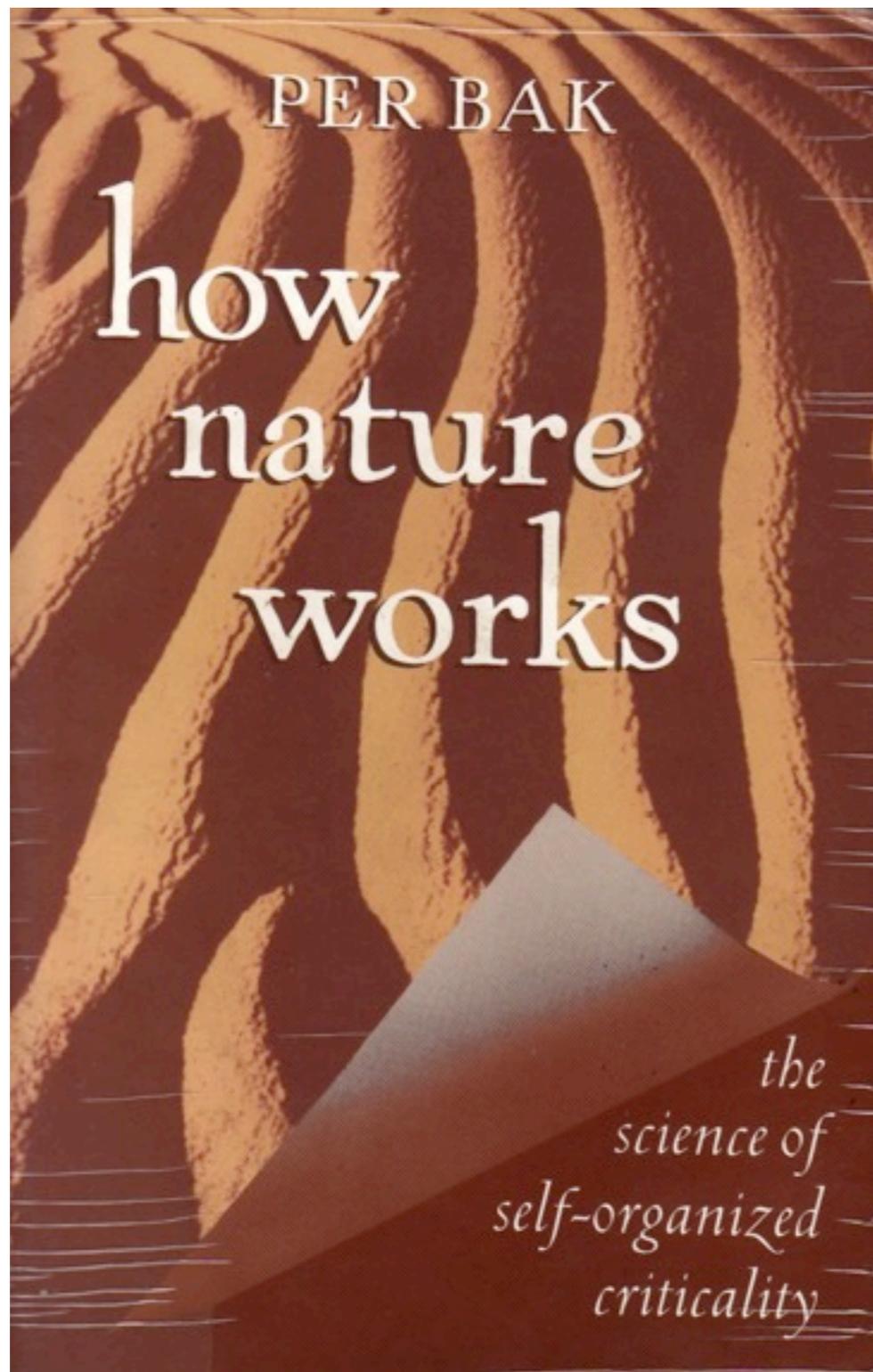
*“Thermodynamique de l'évolution”*

François Roddier (2012)

- I. Les lois de la thermodynamique
  - II. L'évolution génétique
  - III. Des gènes à la culture
  - IV. L'évolution culturelle
- Compléments



## Lecture recommandée

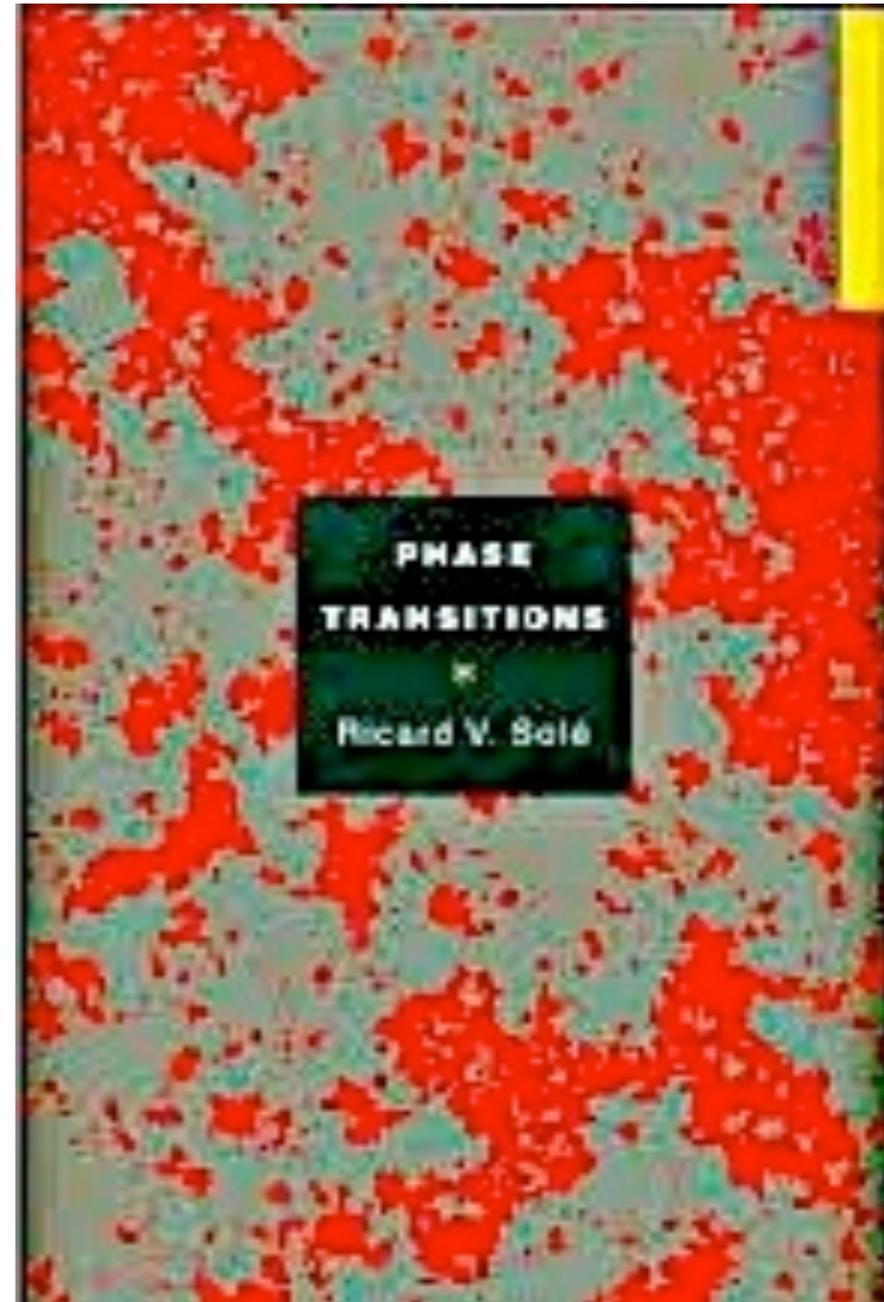


# Lecture recommandée

*“Phase transitions”*

Ricard V. Solé (2011)

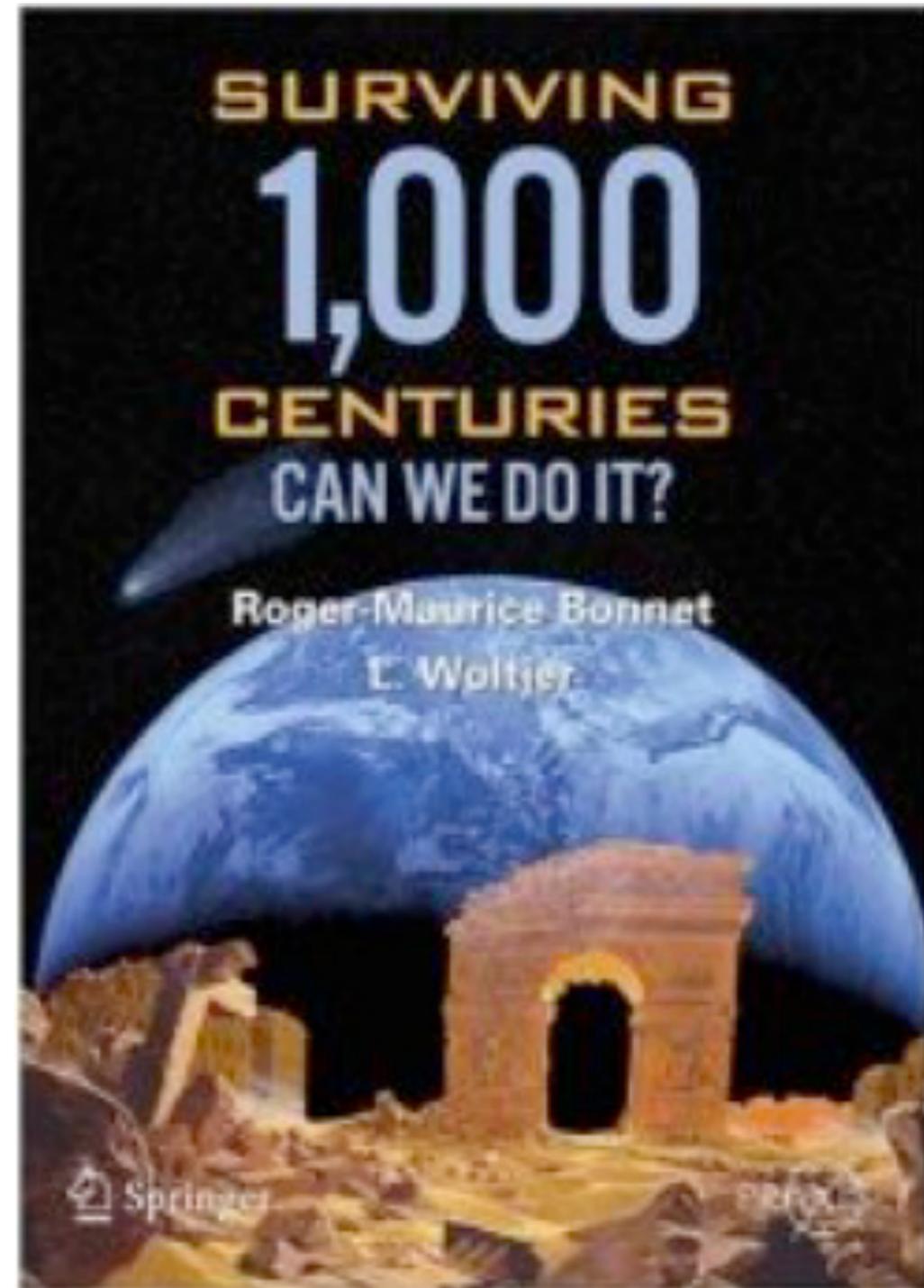
- 1. Phase change
- 6. Life origins
- 7. Virus dynamics
- 10. Gene networks
- 12. Ecological shifts
- 14. Collective intelligence
- 16. Social collapse*



# Les effondrements économiques

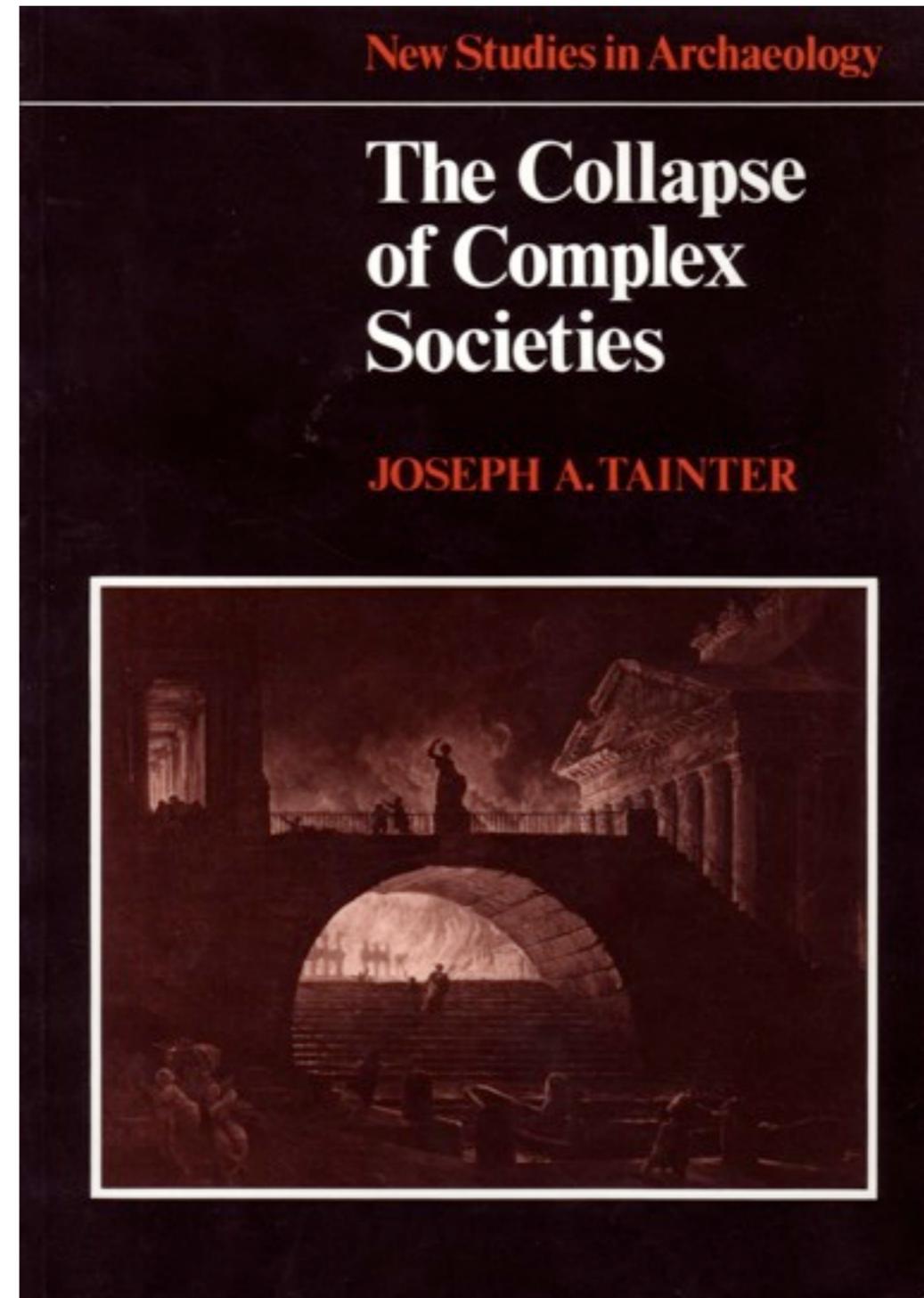
# Roger-Maurice Bonnet et L. Woltjer (2014)

Les causes possibles  
des effondrements:  
l'état des ressources  
terrestres



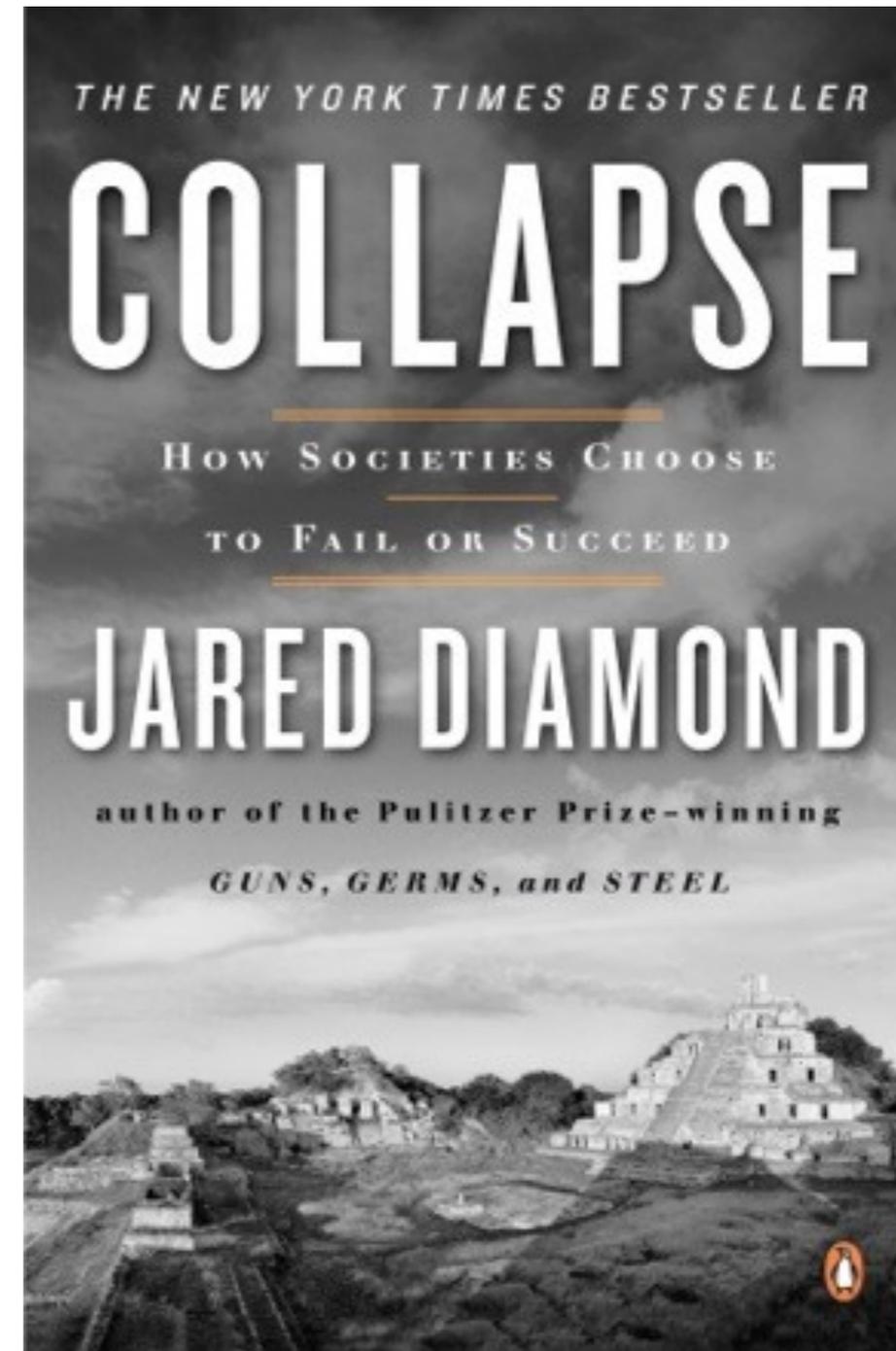
# Joseph A. Tainter (1988)

## The Collapse of Complex Societies



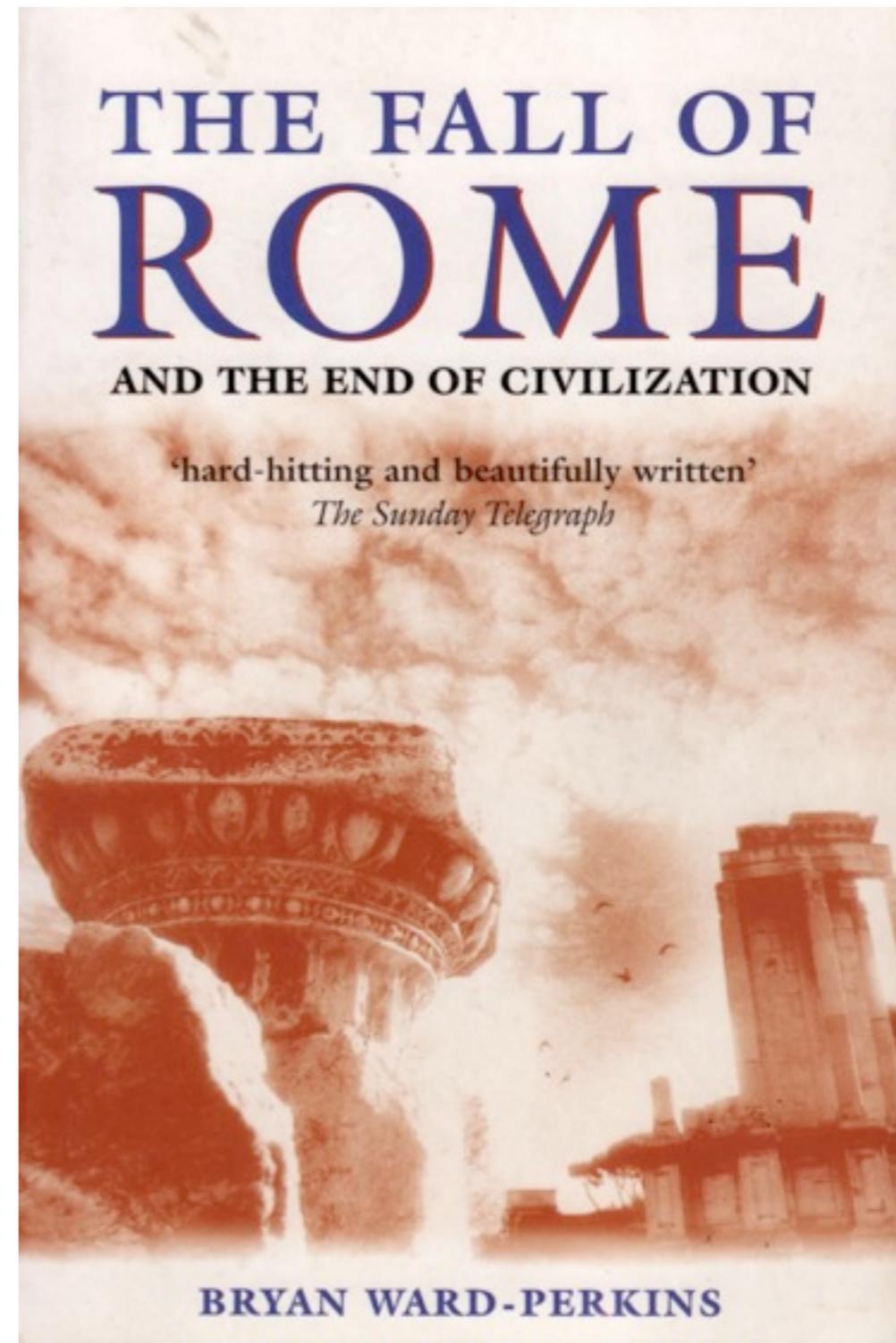
# Jared Diamond (2005)

**Effondrement:**  
Comment les sociétés  
décident de leur disparition  
ou de leur survie



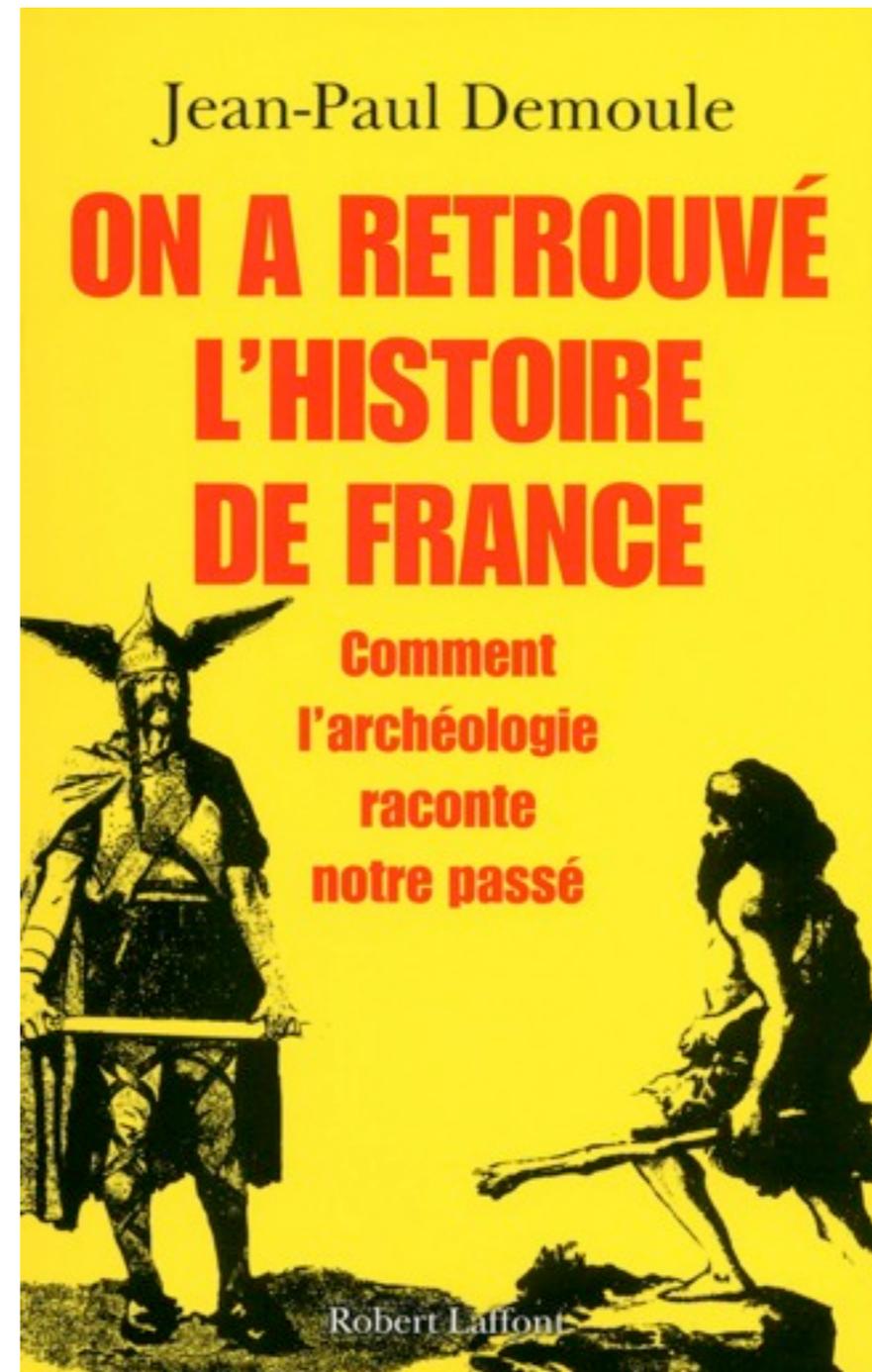
## Bryan Ward-Perkins (2005)

The Fall of Rome  
and the end of  
civilization



## Jean-Paul Demoule (2012)

« 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 »



# Eric H. Cline (2014)

1177 B.C.  
The Year  
civilization  
collapsed

