

La thermodynamique des transitions économiques

François Roddier

Paris, le 12 mars 2015

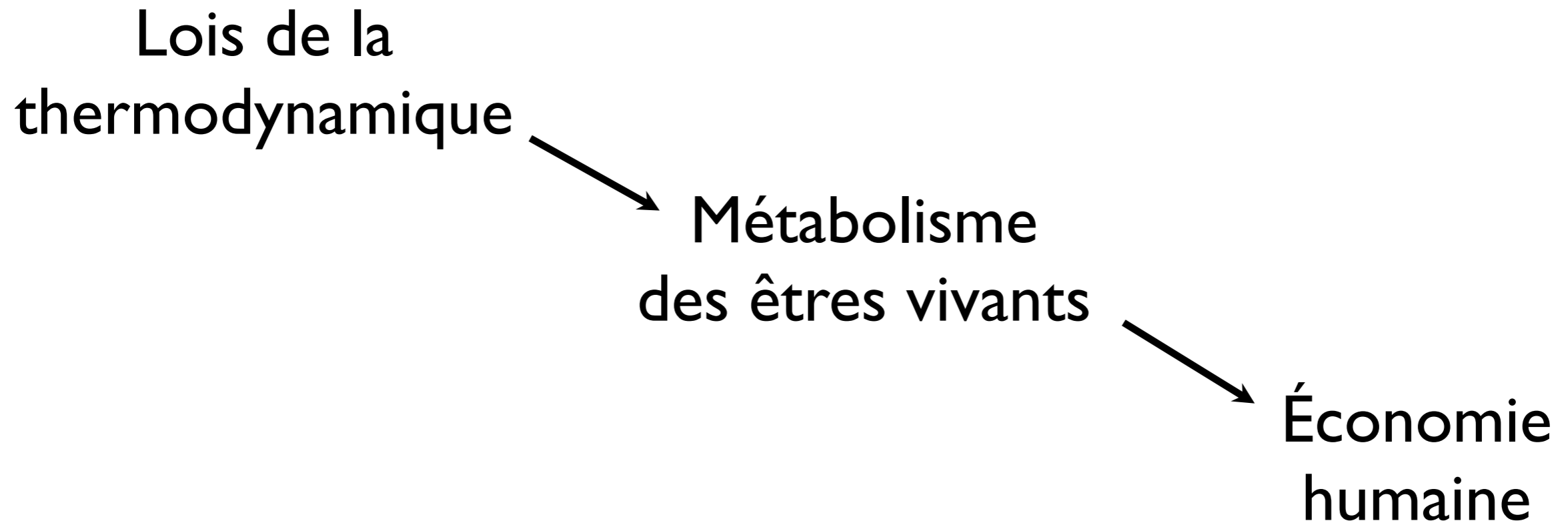
Nicholas Georgescu-Roegen

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.

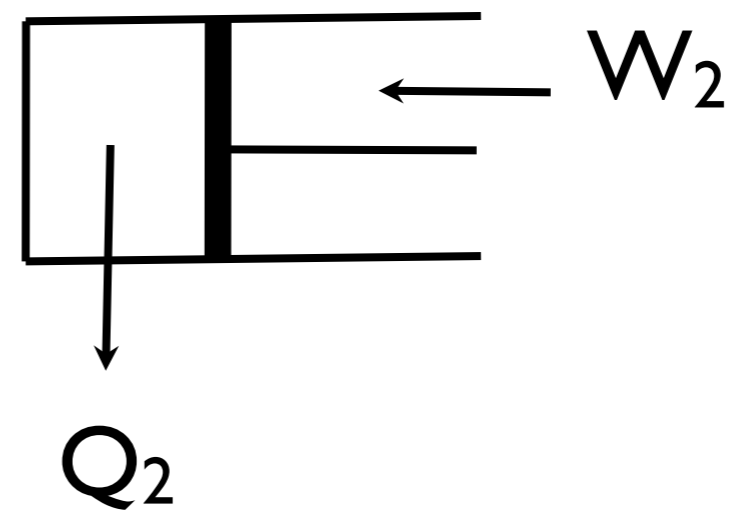
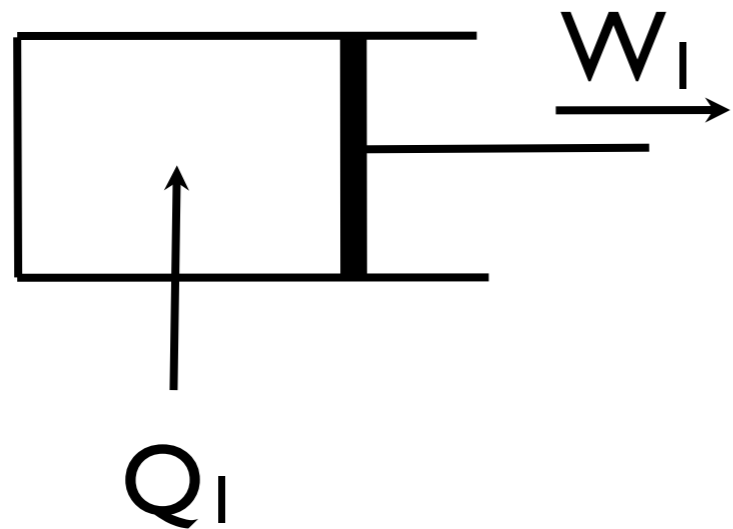


Denis Papin (1690)

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:

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

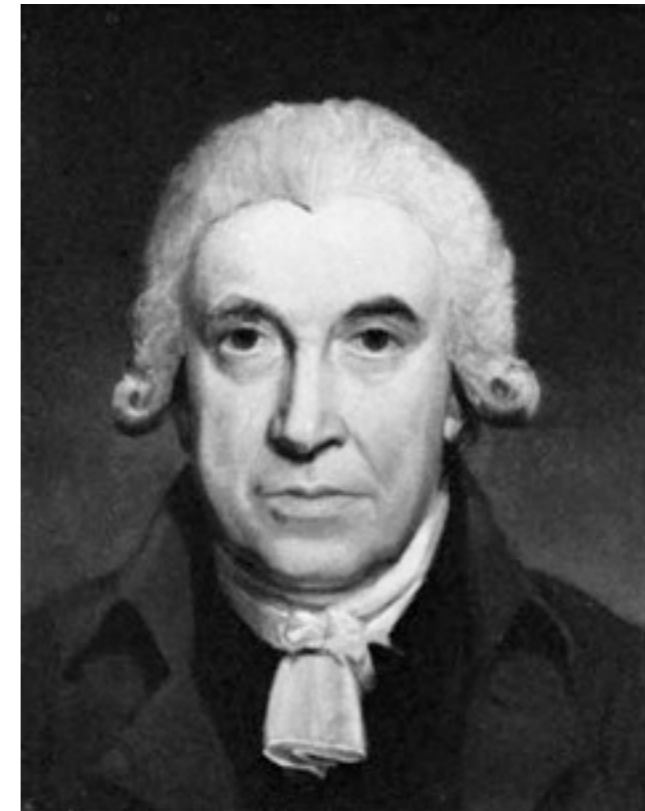
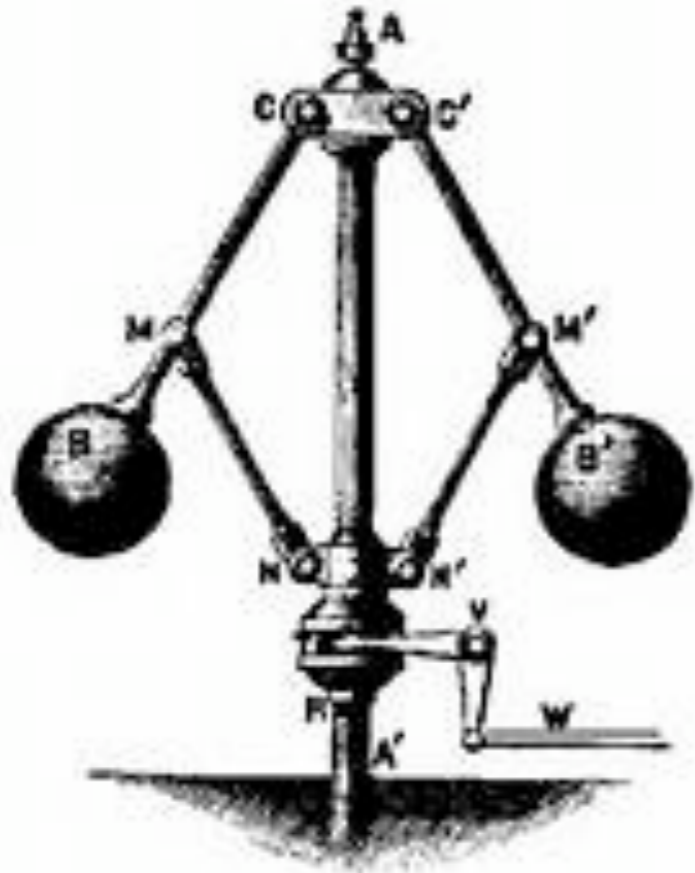
Difficulté fondamentale

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)

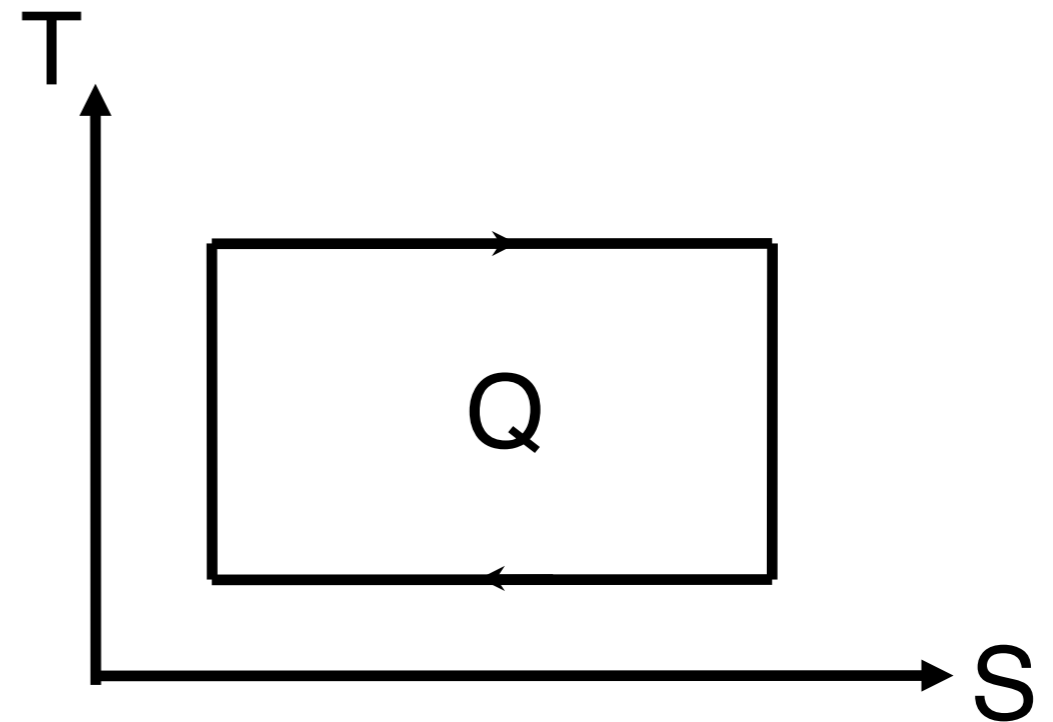
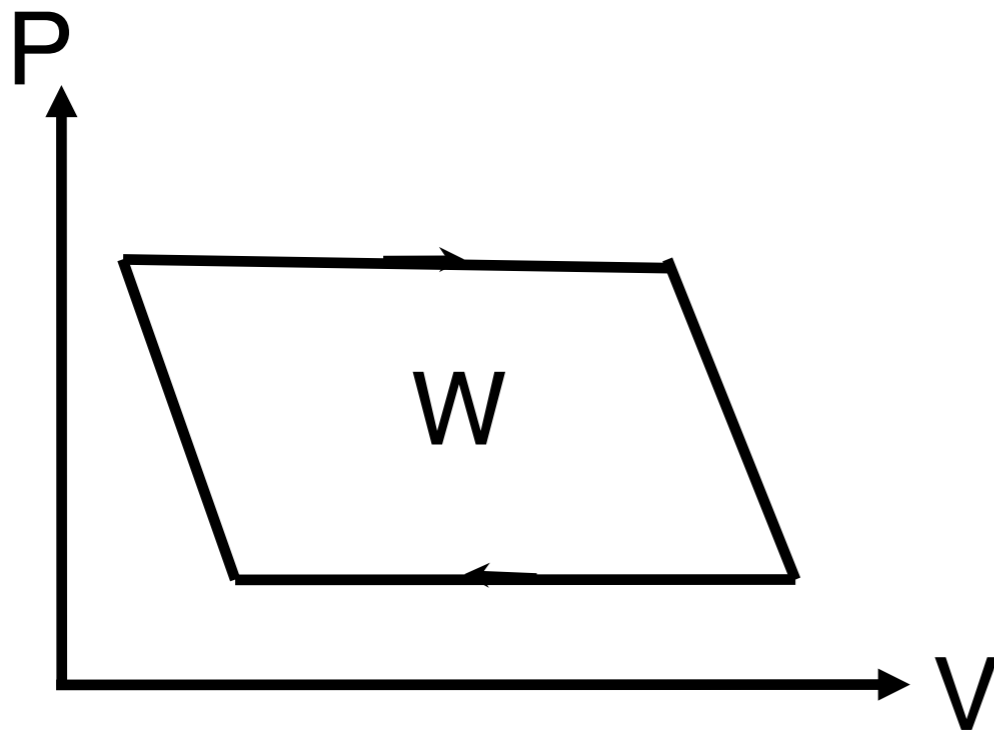
Cycles d'une machine de Carnot

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

Sur un cycle fermé:

$$dU = 0$$

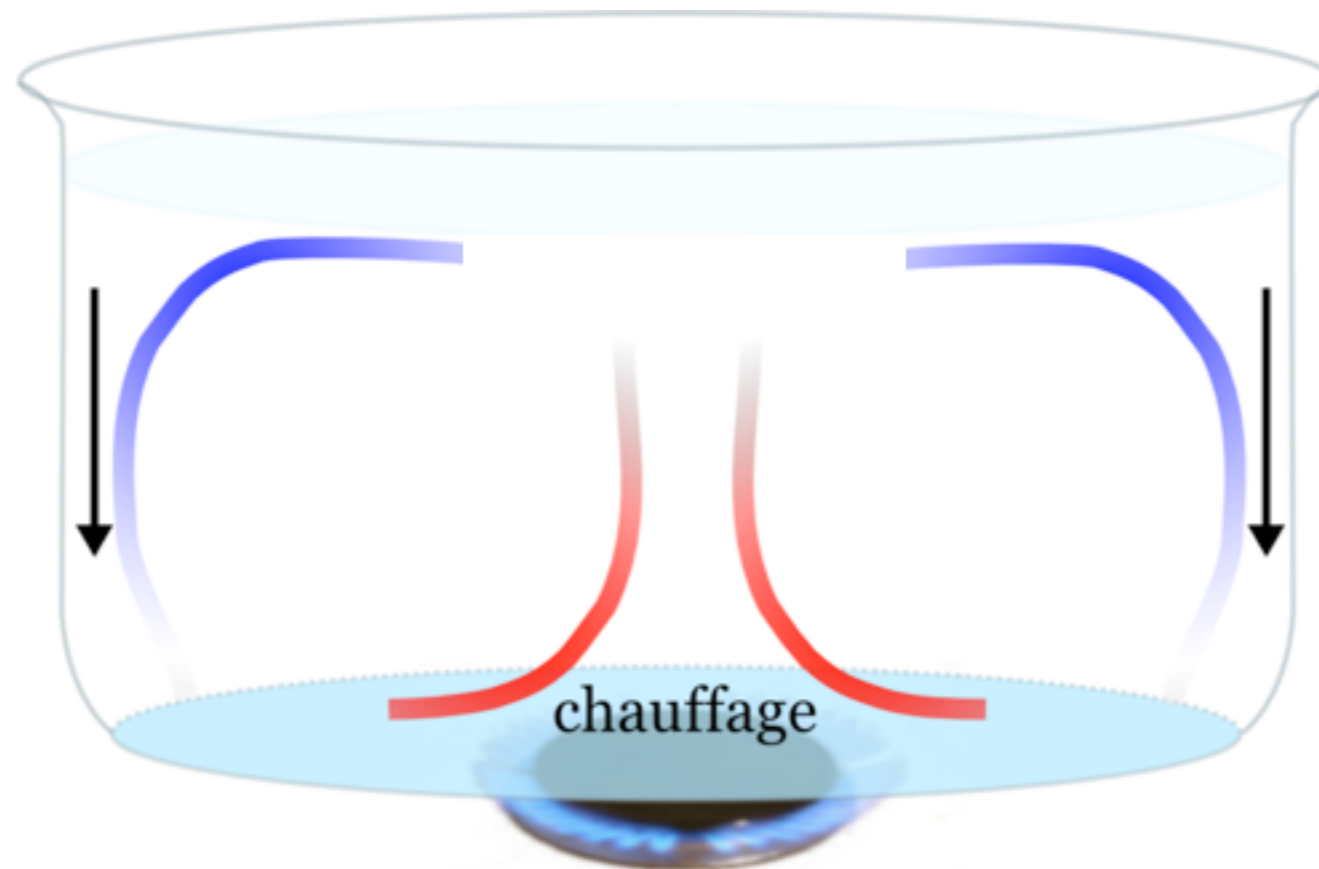
$$PdV = TdS$$



Les machines thermiques naturelles

Machines thermiques naturelles

Source froide

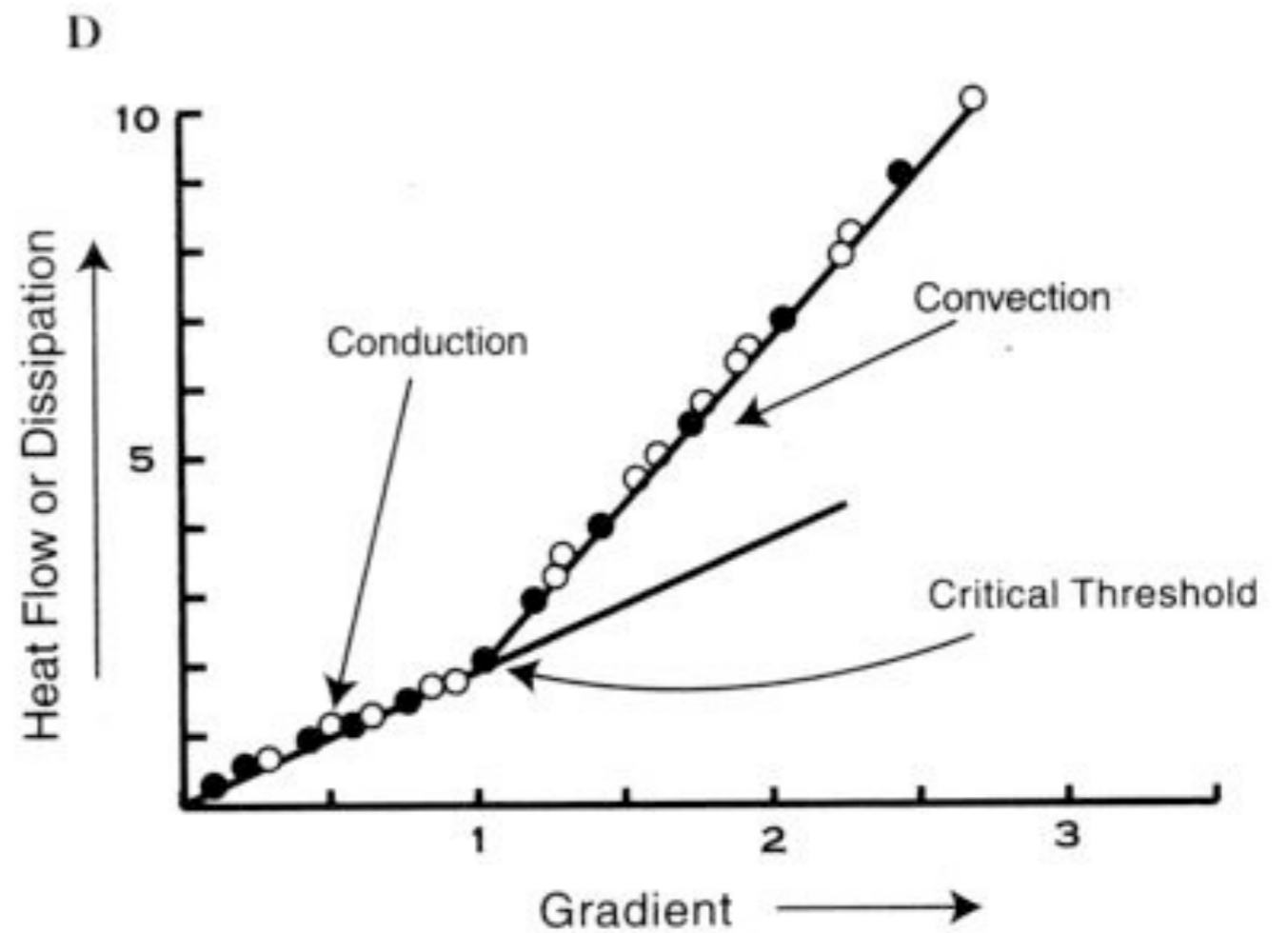


Source chaude

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

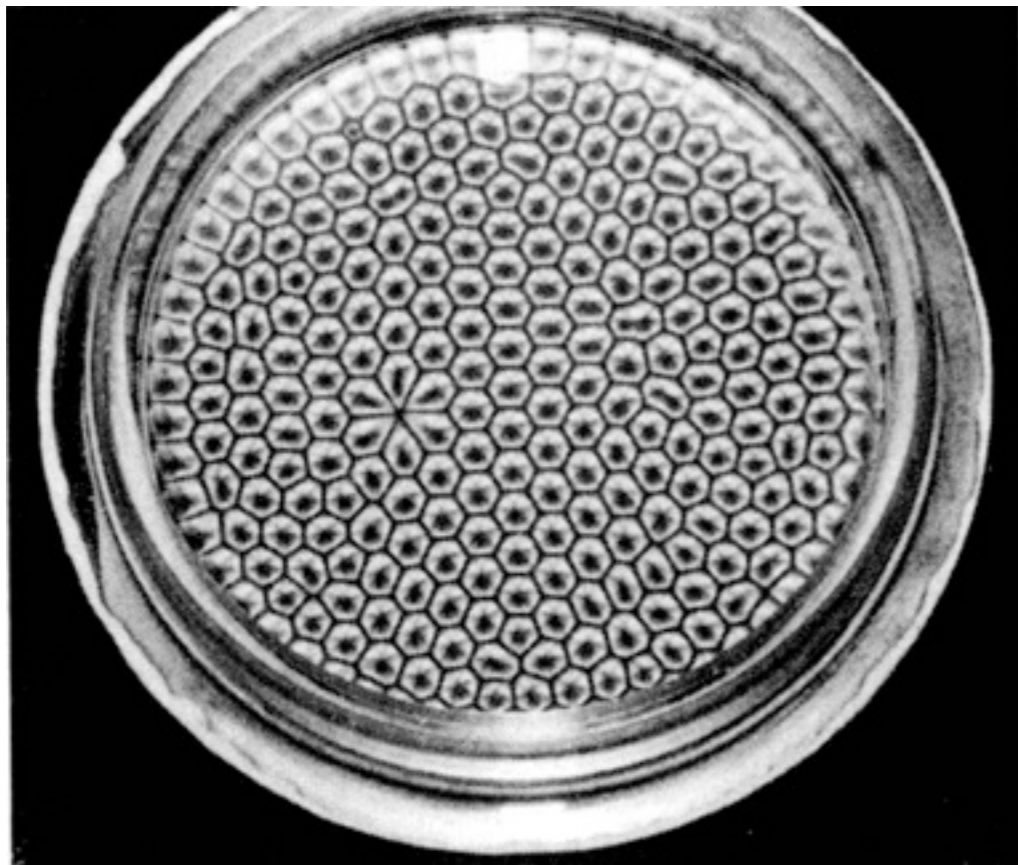
Machines thermiques naturelles

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



(Sélection naturelle)

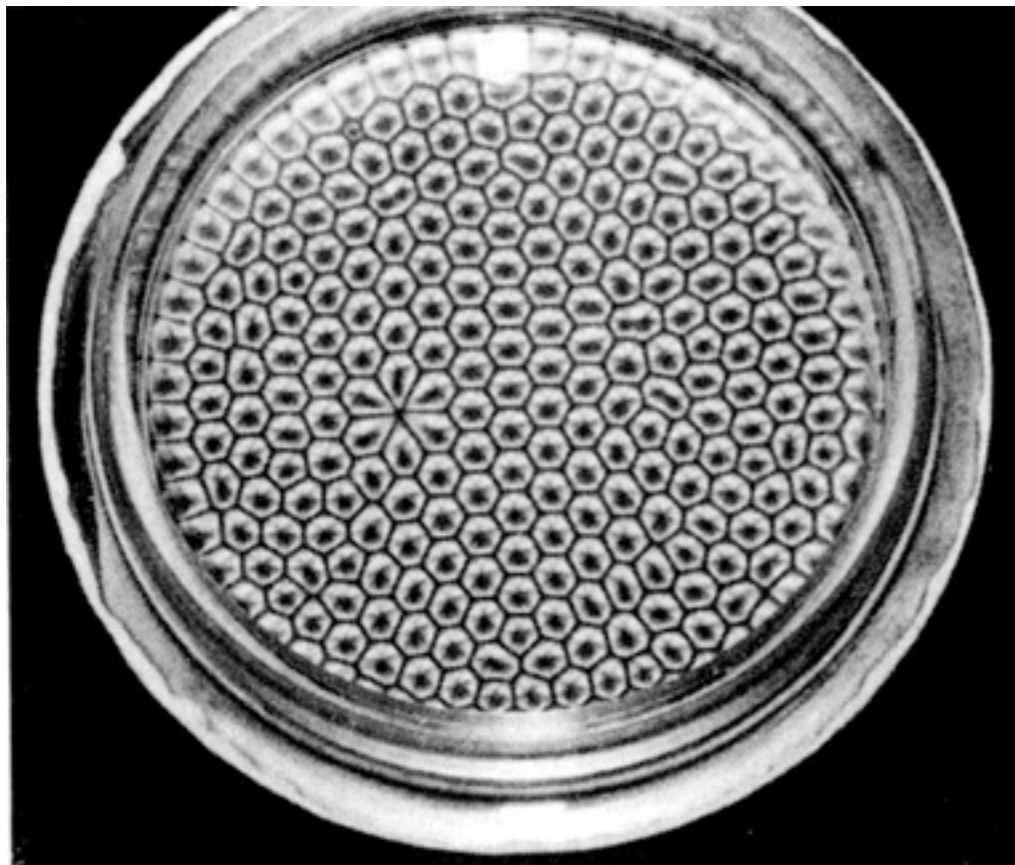
Machines thermiques naturelles



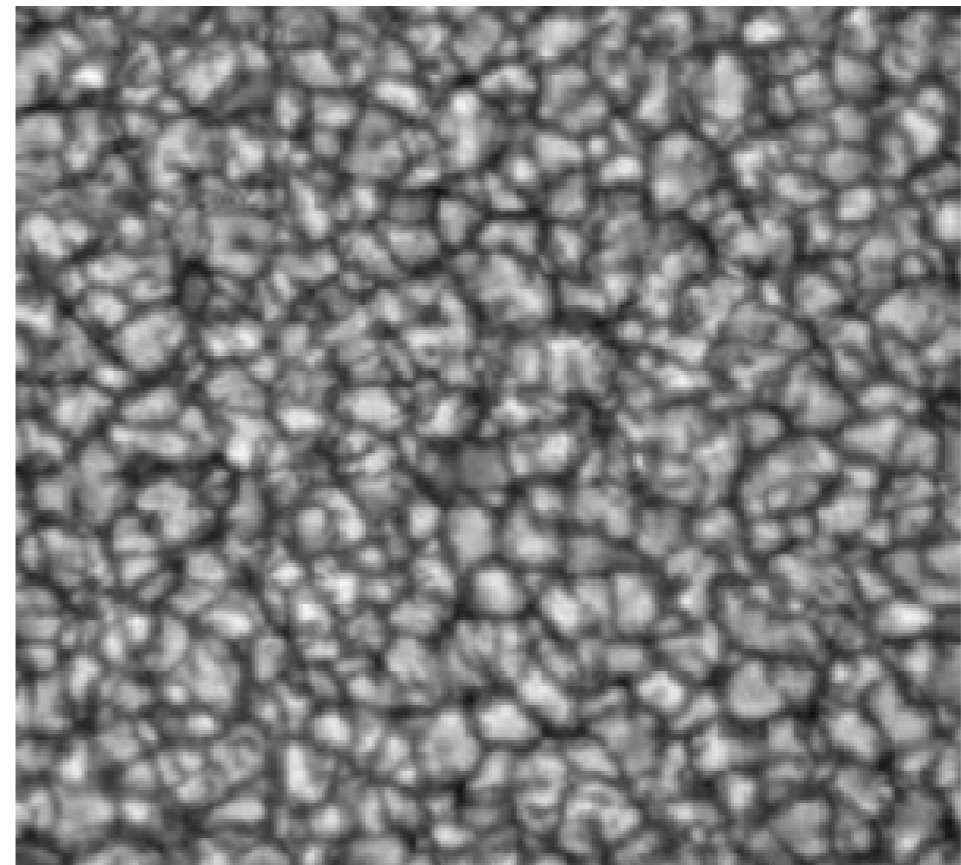
Cellules de Rayleigh-Bénard

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

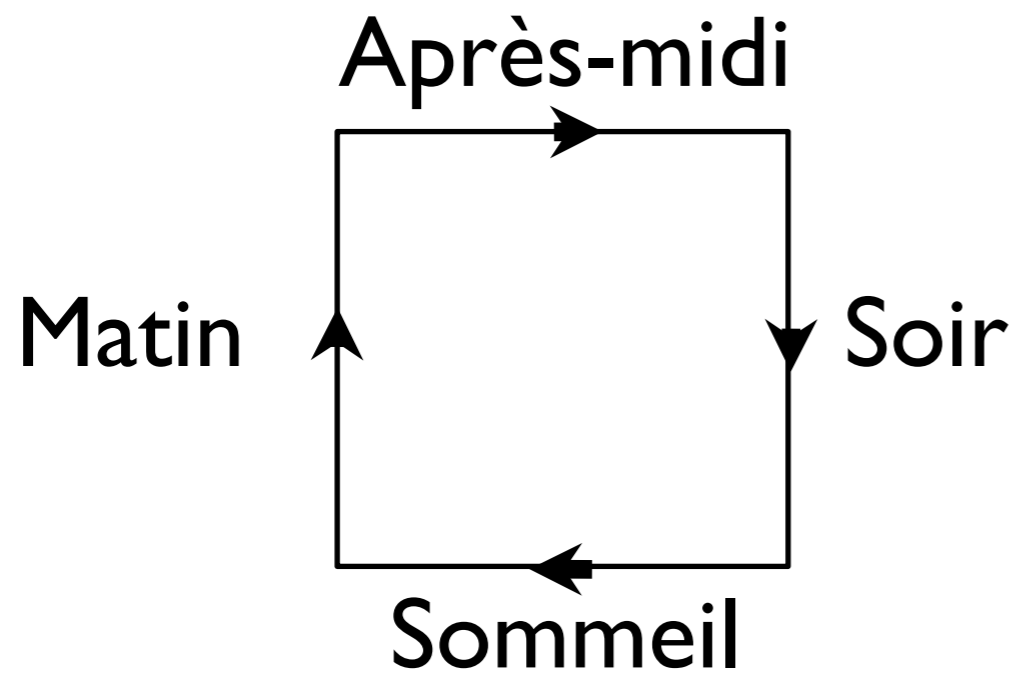
Une société humaine

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

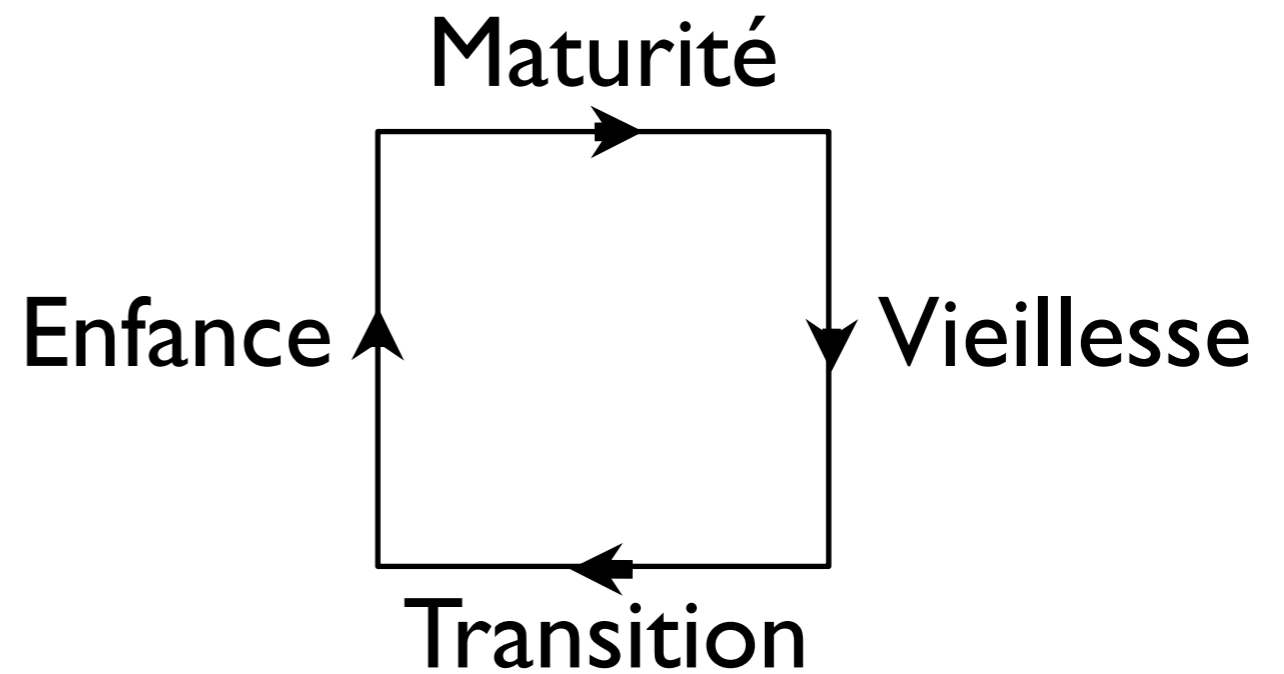
Les cycles naturels

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

Exemples de cycles naturels en biologie

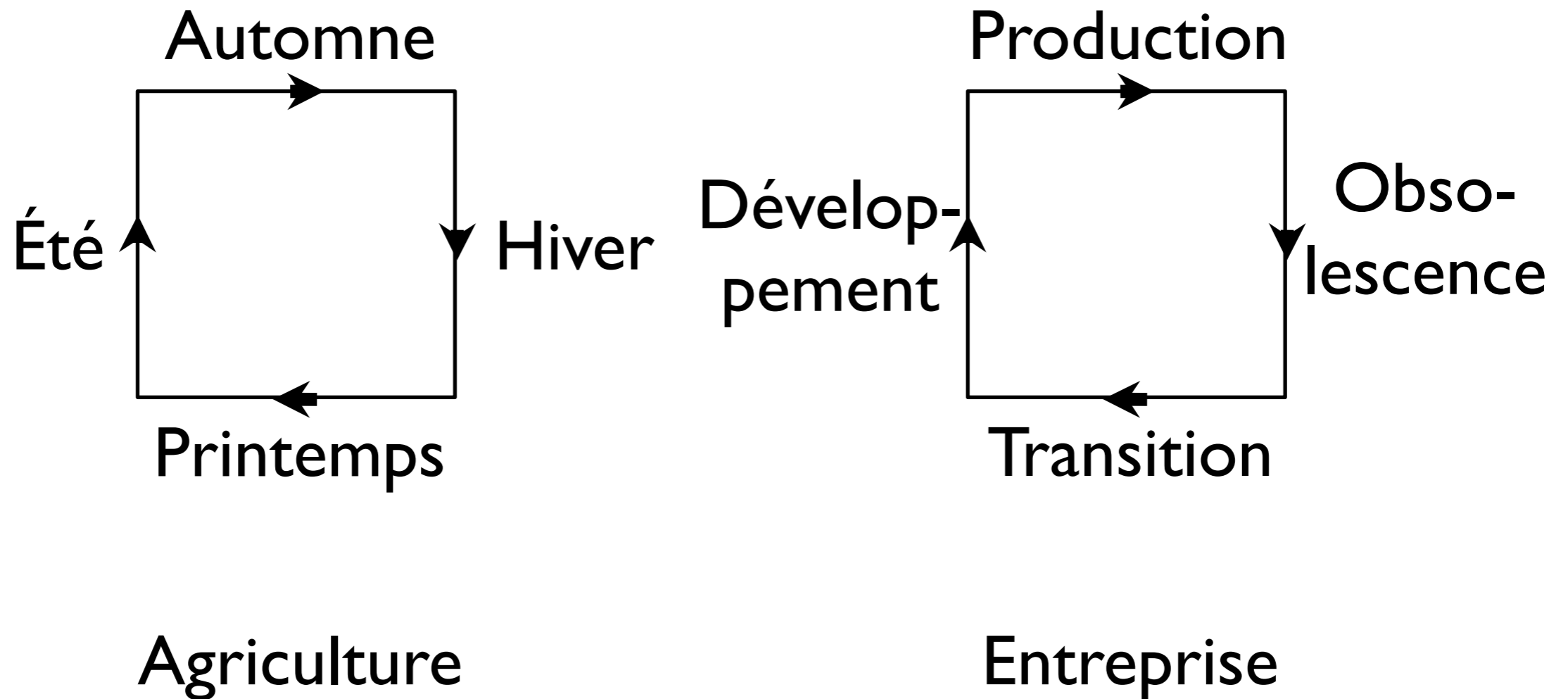


Cycle diurne



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):

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

$$dG = \sum \mu_i dn_i$$

μ_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.

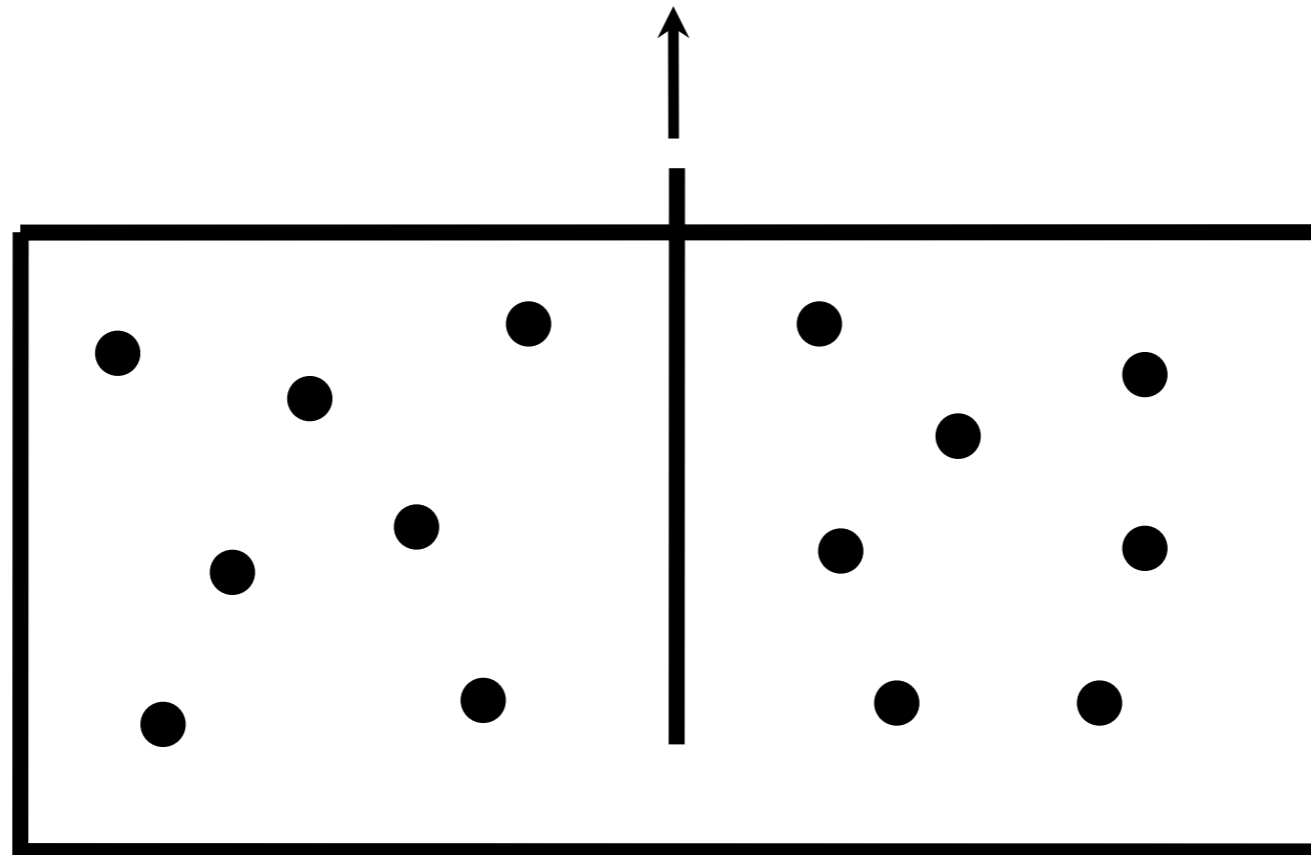
1961: Ralf Landauer montre que réciproquement toute perte d'*information* produit de la chaleur donc de l'entropie.

États macroscopiques et microscopiques

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

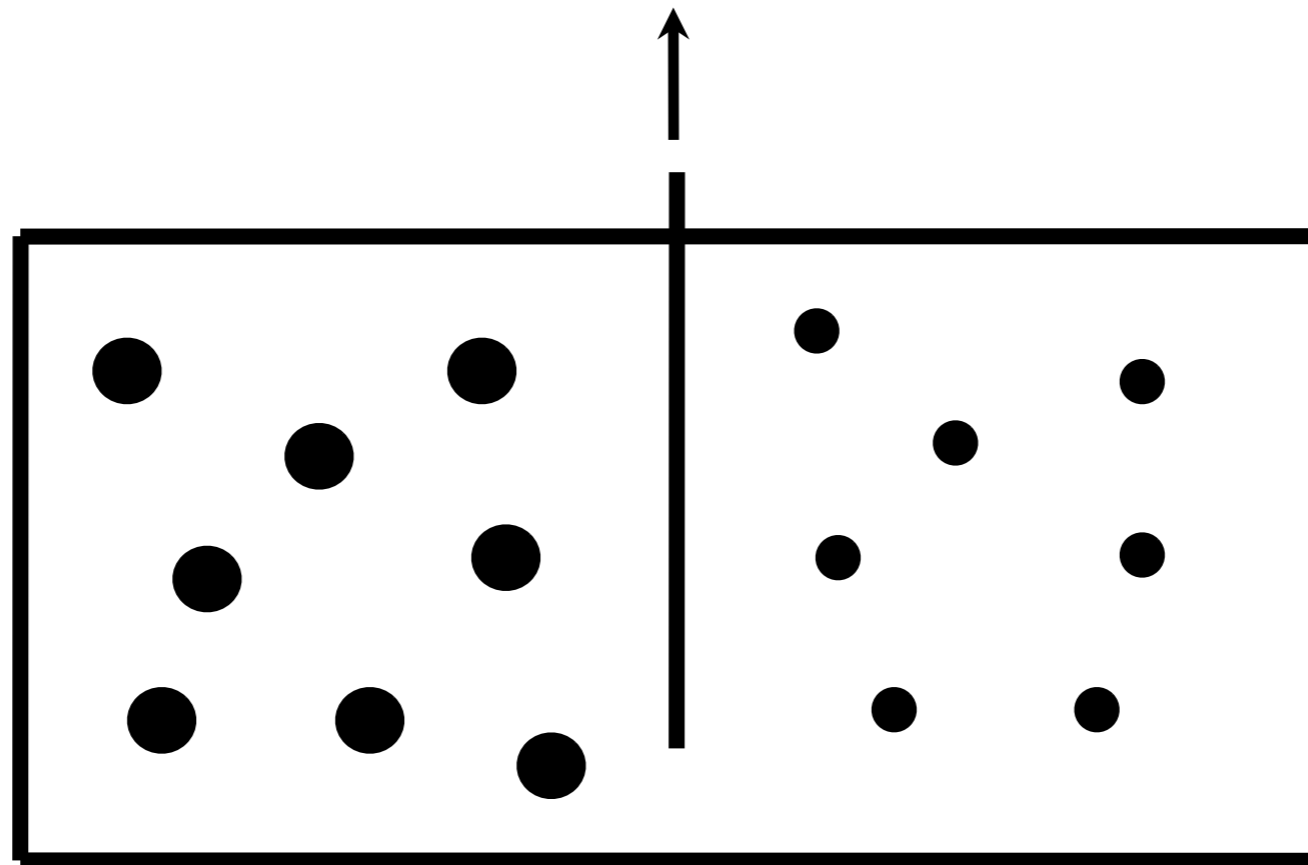
L'irréversibilité thermodynamique est due à une *perte d'information*.

Le paradoxe de Gibbs



L'entropie n'augmente pas

Le paradoxe de Gibbs

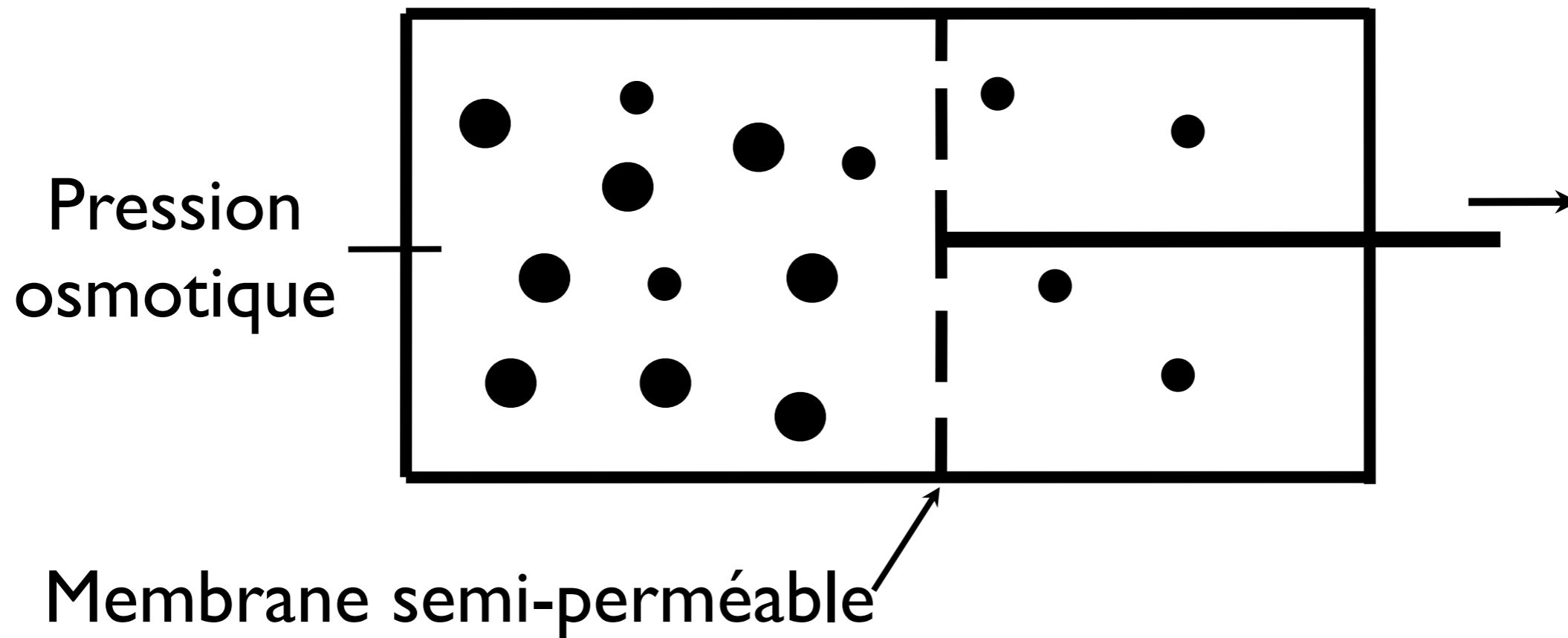


L'entropie augmente

Le paradoxe de Gibbs

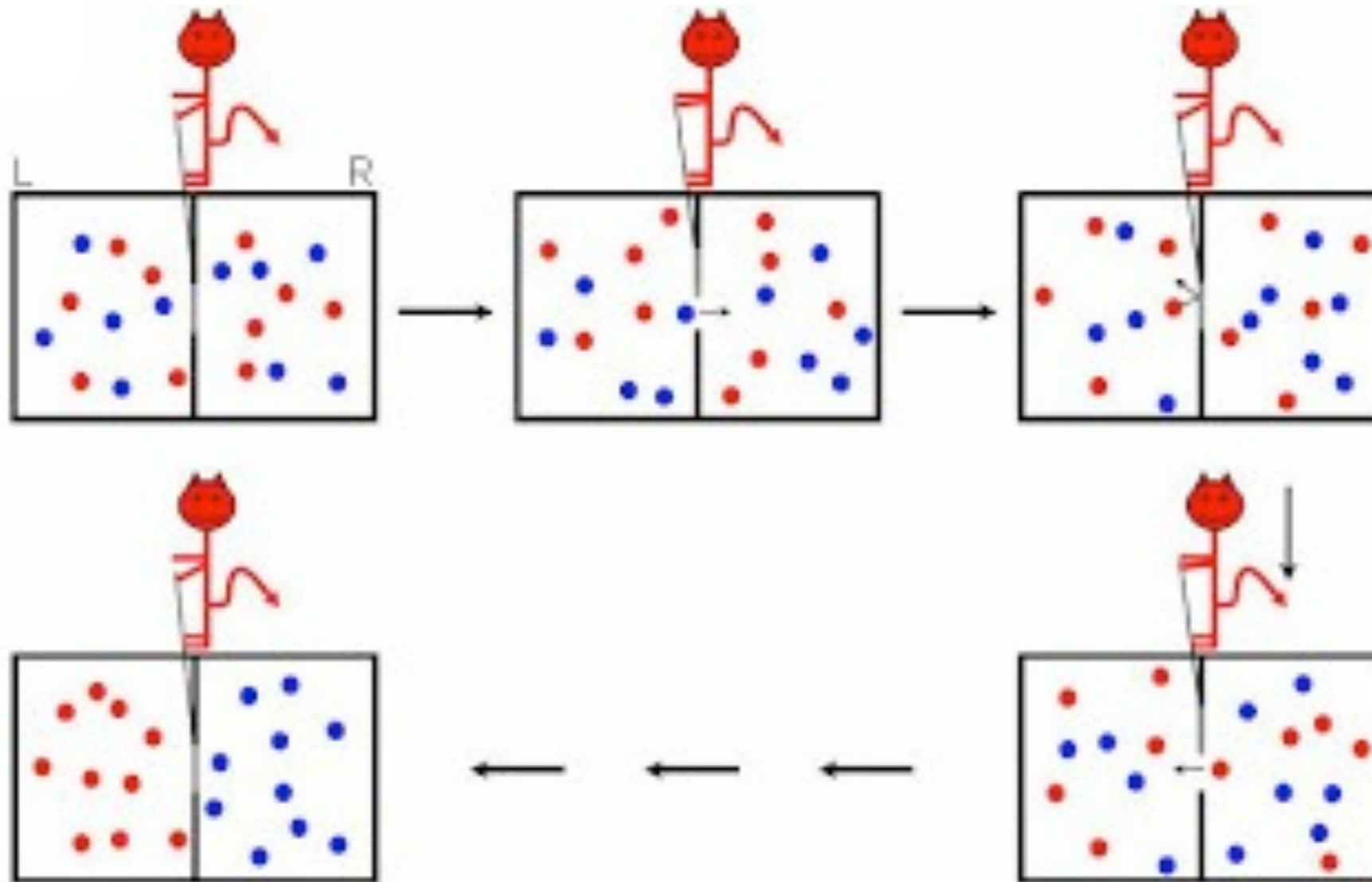
L'entropie d'un système
dépend de notre
connaissance du système

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

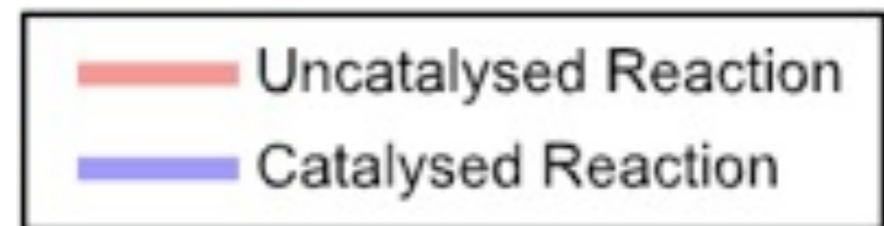
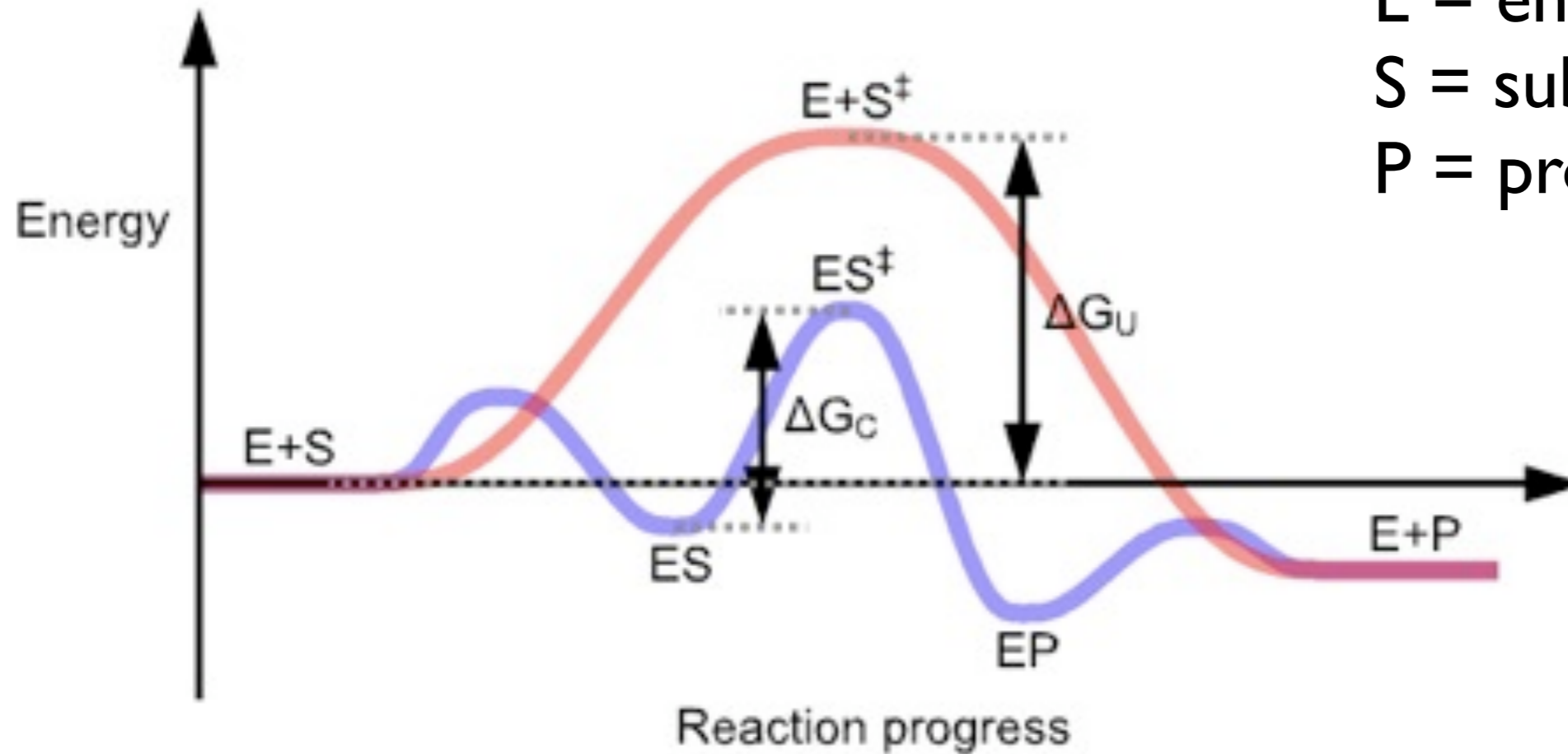
CACAO FORTEMENT DÉGRAISSÉ SUCRÉ.
Ingrédients : Sucre, Cacao maigre (11% de beurre de cacao), Arôme. Cacao : 32% minimum.
Peut contenir des traces de fruits à coque et de soja.



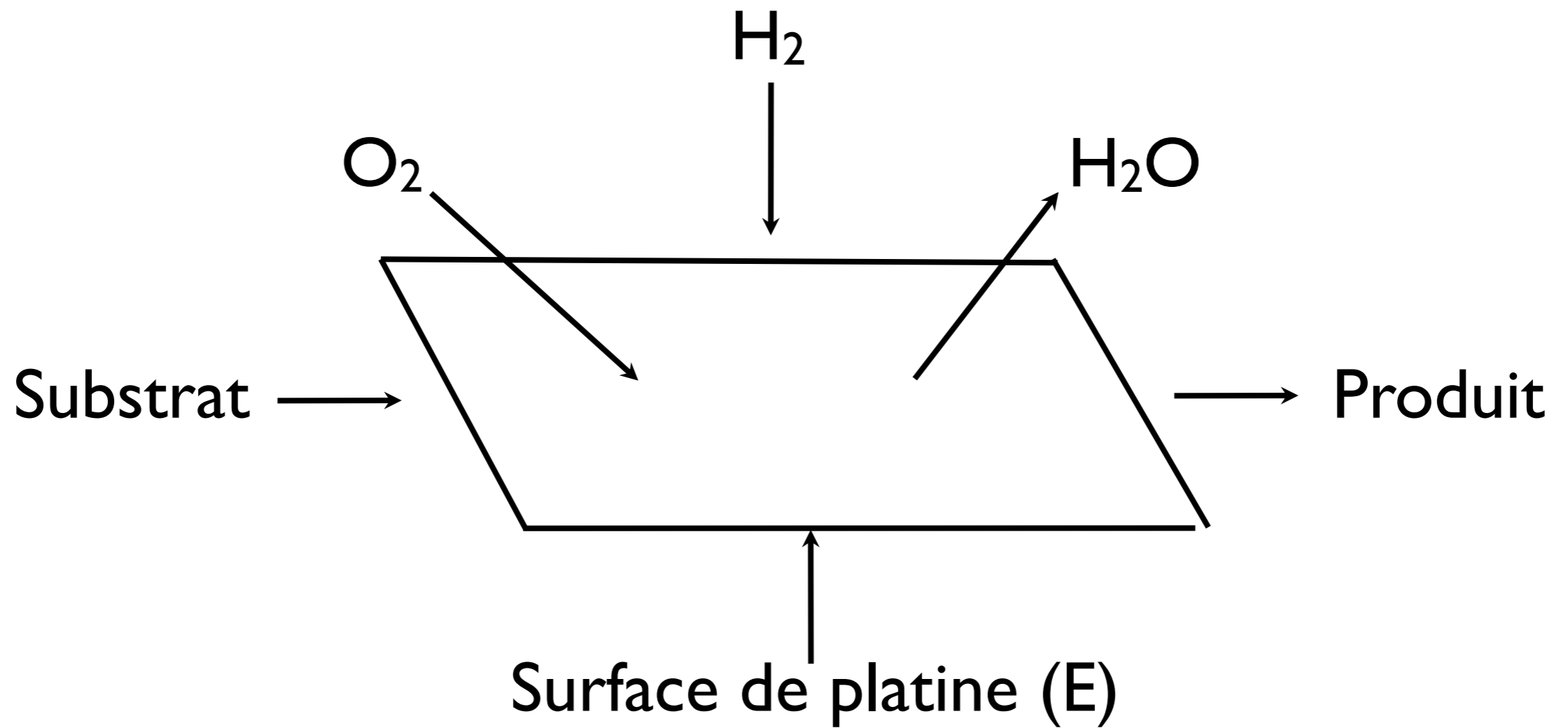
Informations Nutritionnelles	100 g de Grand Arôme	20 g de Grand Arôme et 20 cl de lait demi-écrémé
Valeur Énergétique	1495 kJ 355 kcal	675 kJ 160 kcal

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

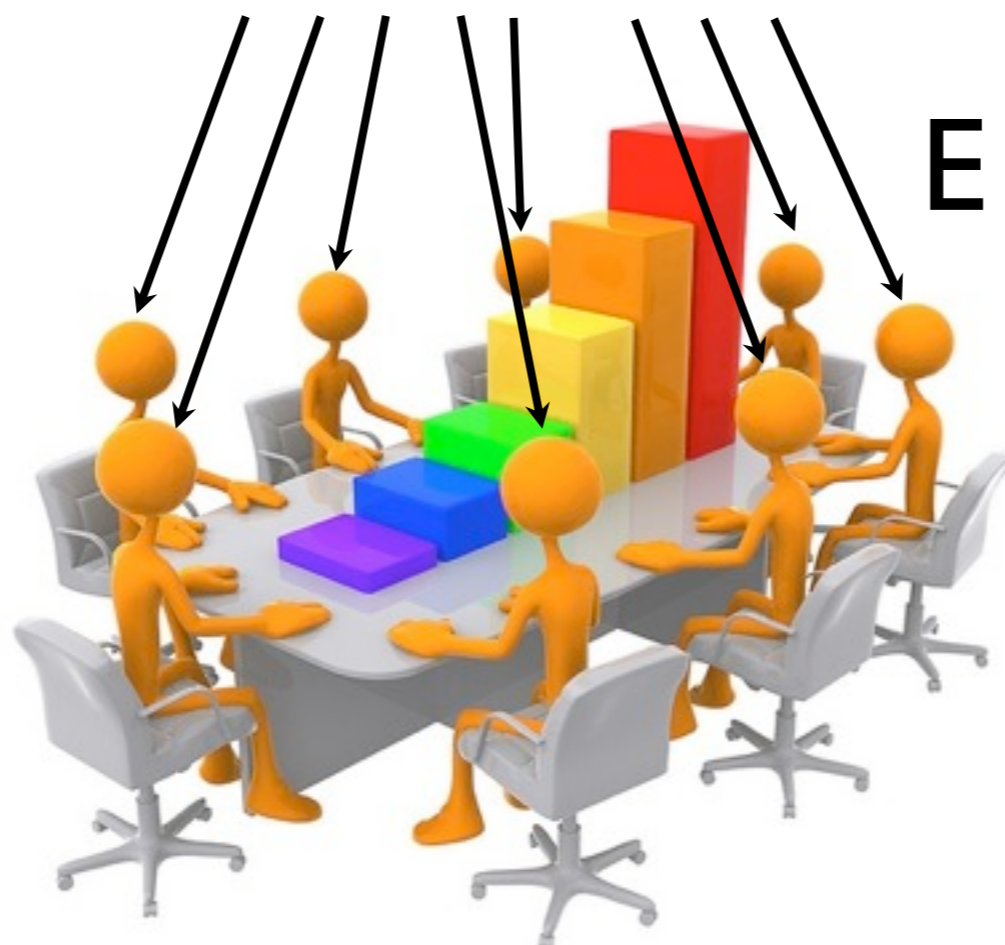


S
(Substrat)

Offre Information Demande



Démon de Maxwell



E S

E P

Entreprise (enzyme) E

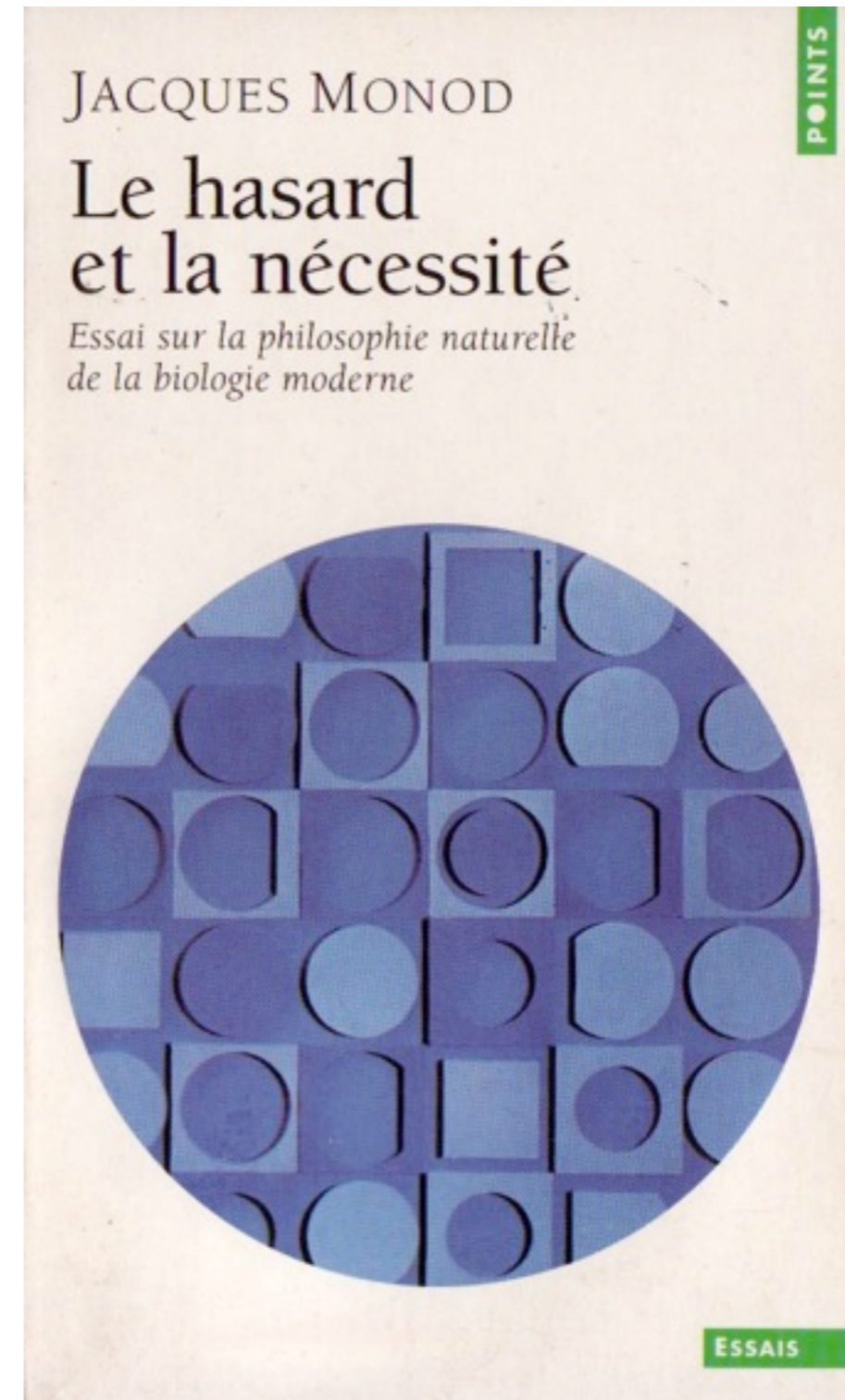
Matière



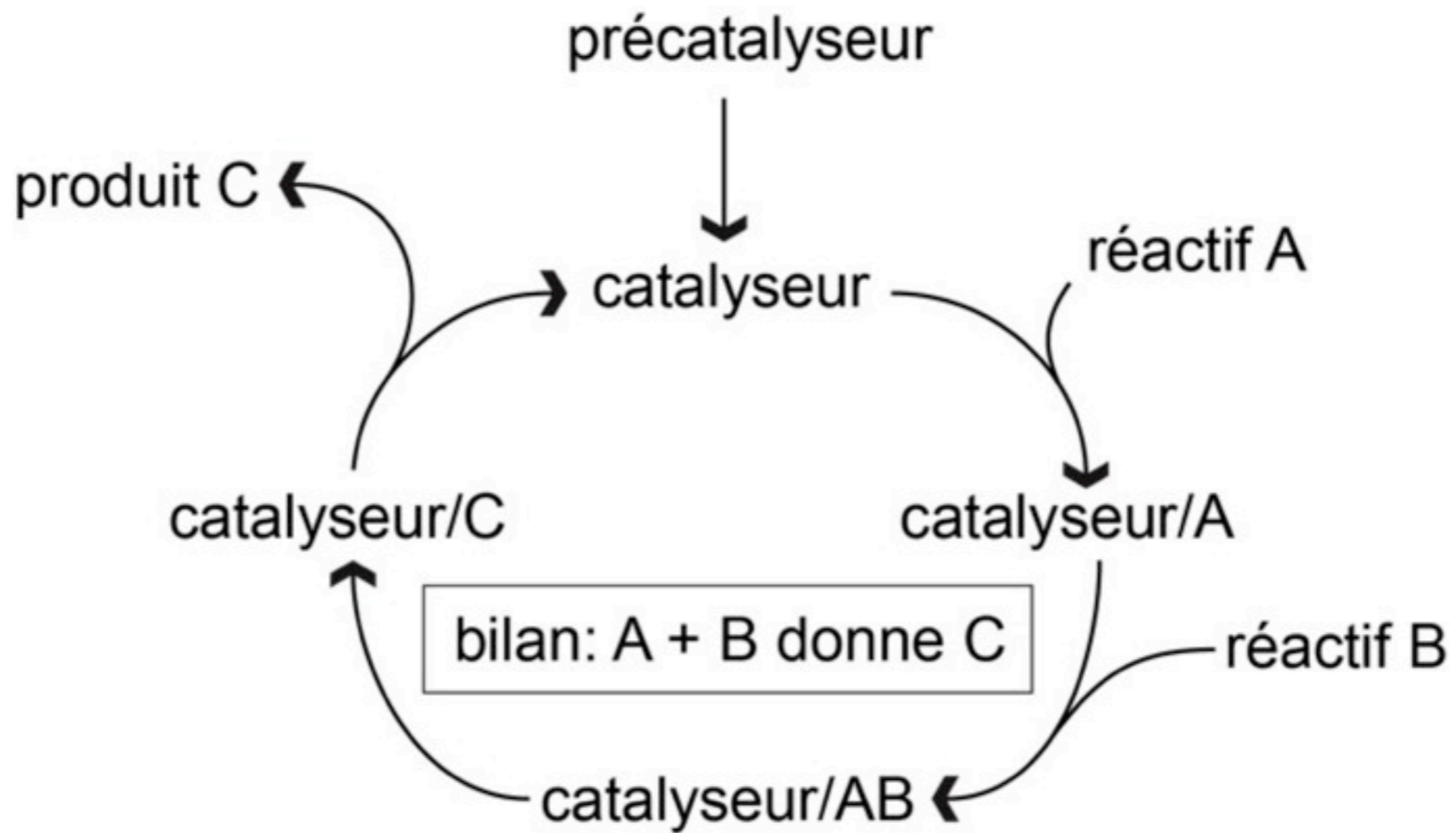
P
(Production)

Lecture recommandée

Chapitre 3 Les démons de Maxwell



Les cycles en biochimie



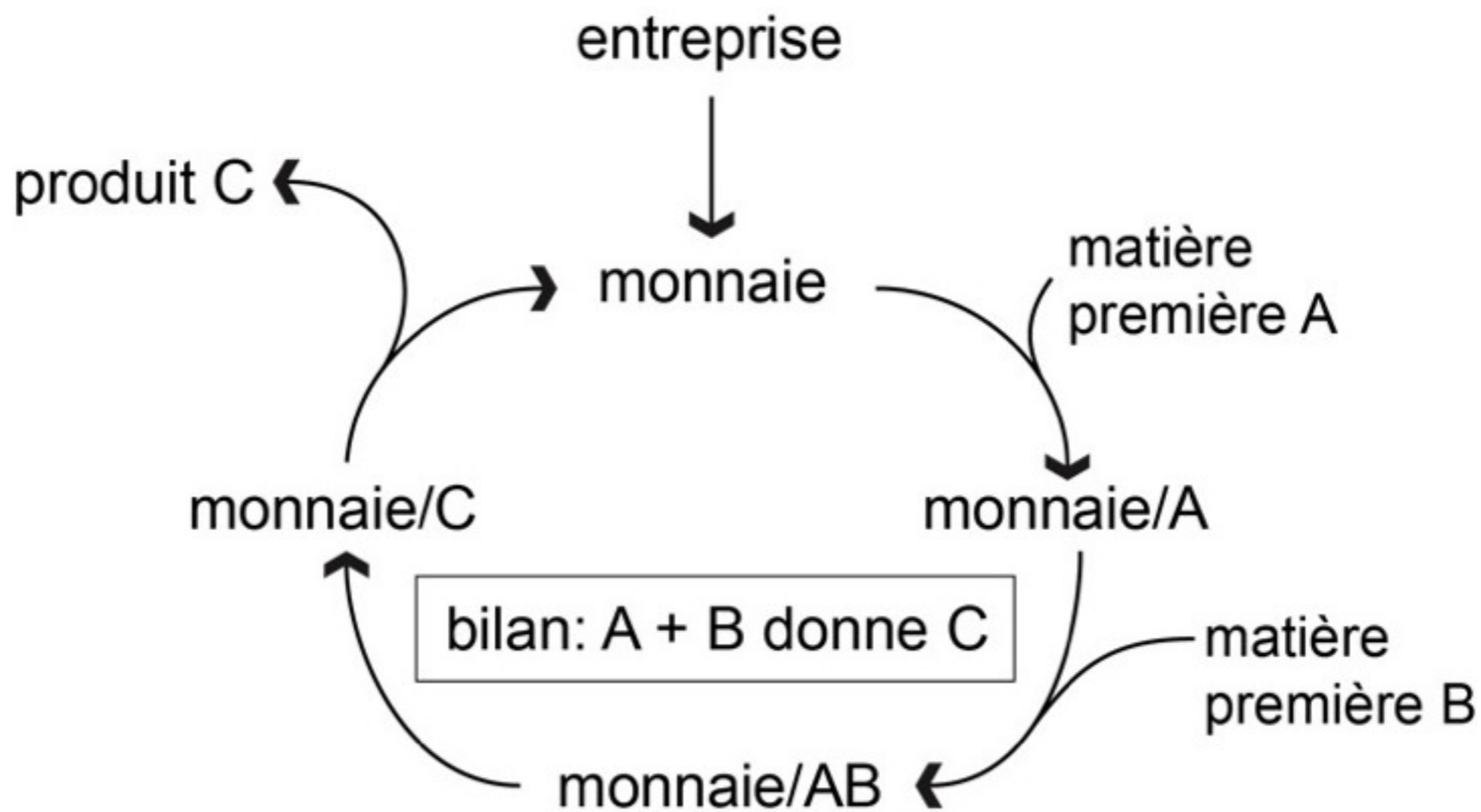
Les cycles en économie



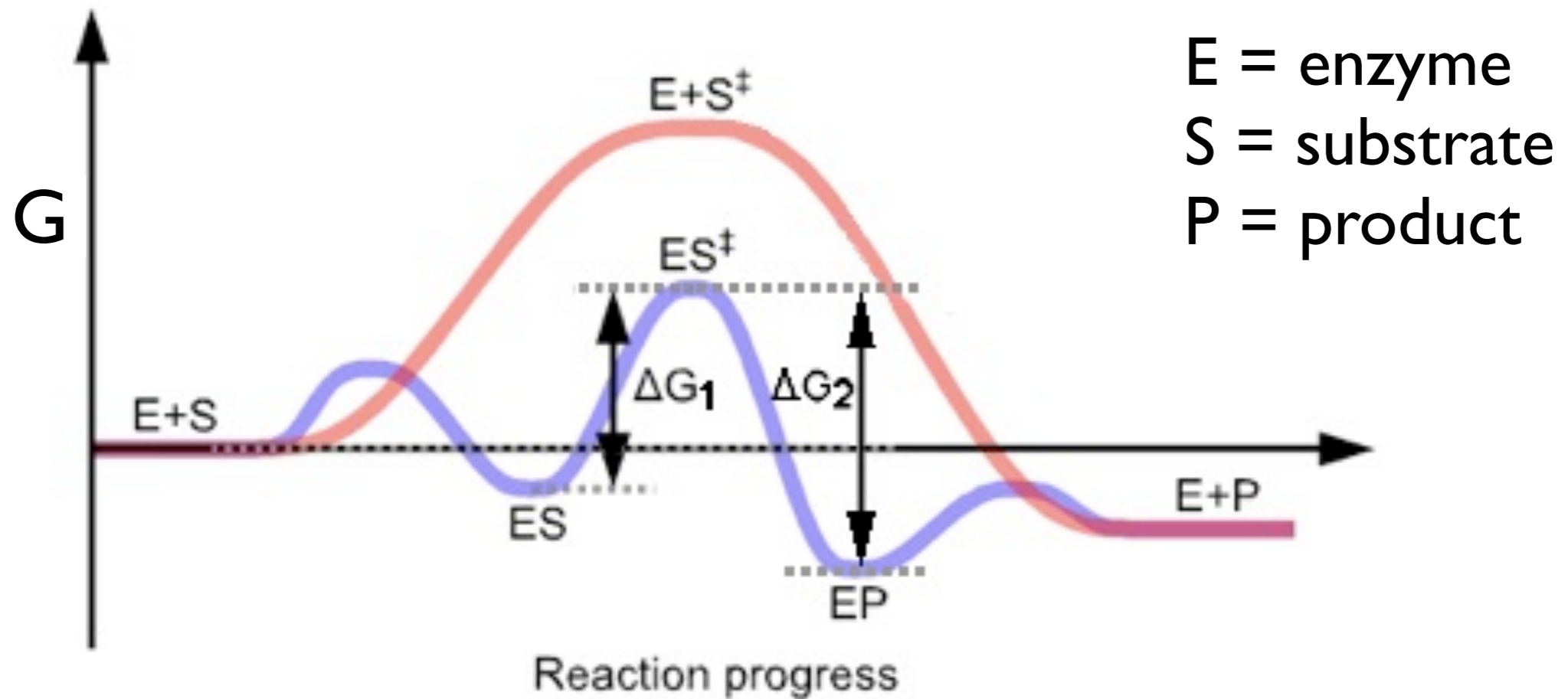
Cycle de production ou importation/distribution

La monnaie joue le rôle du catalyseur

Les cycles en économie



La catalyse en biochimie



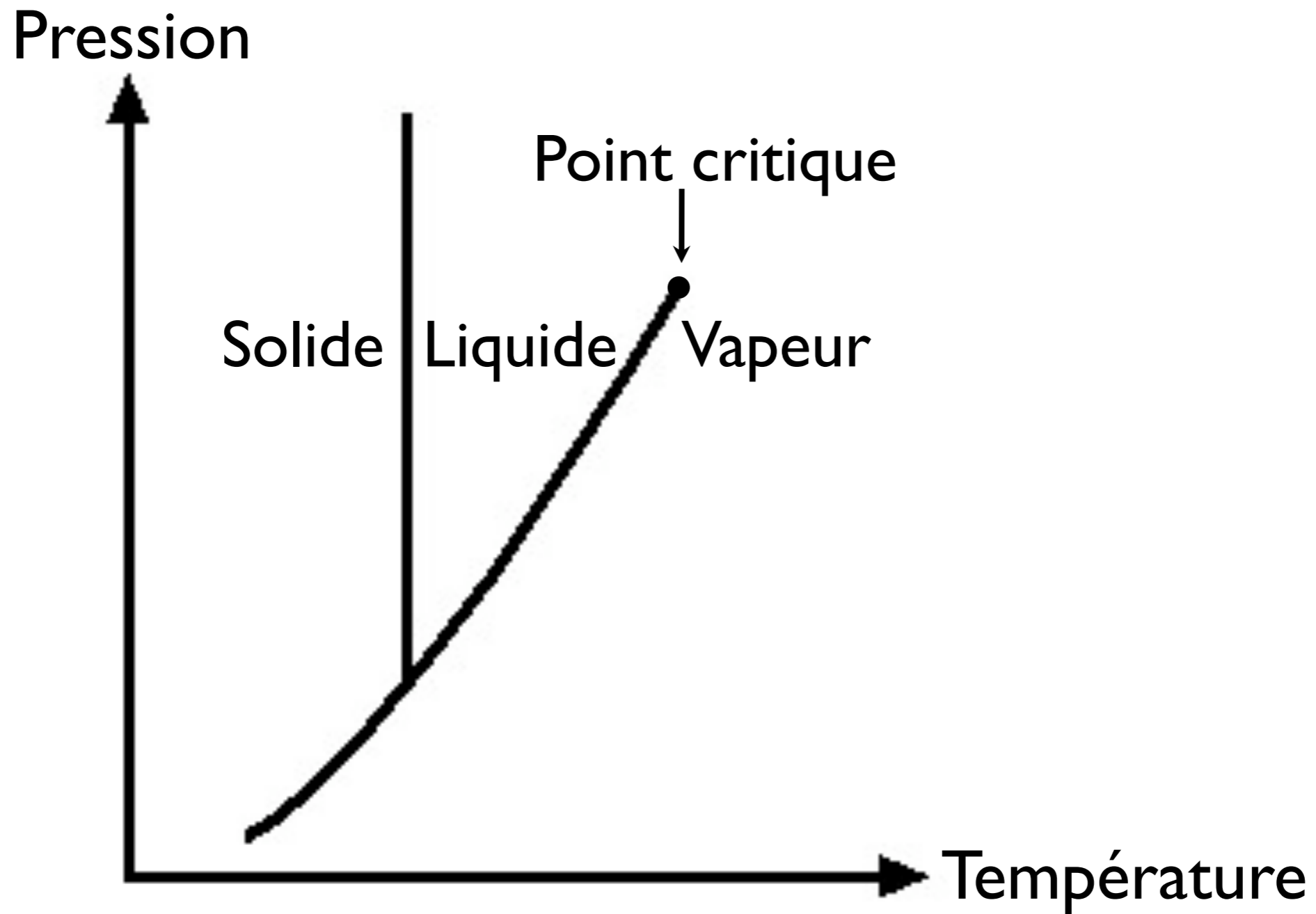
Les cycles catalytiques sont des cycles de Carnot fonctionnant entre deux température *fictives*

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

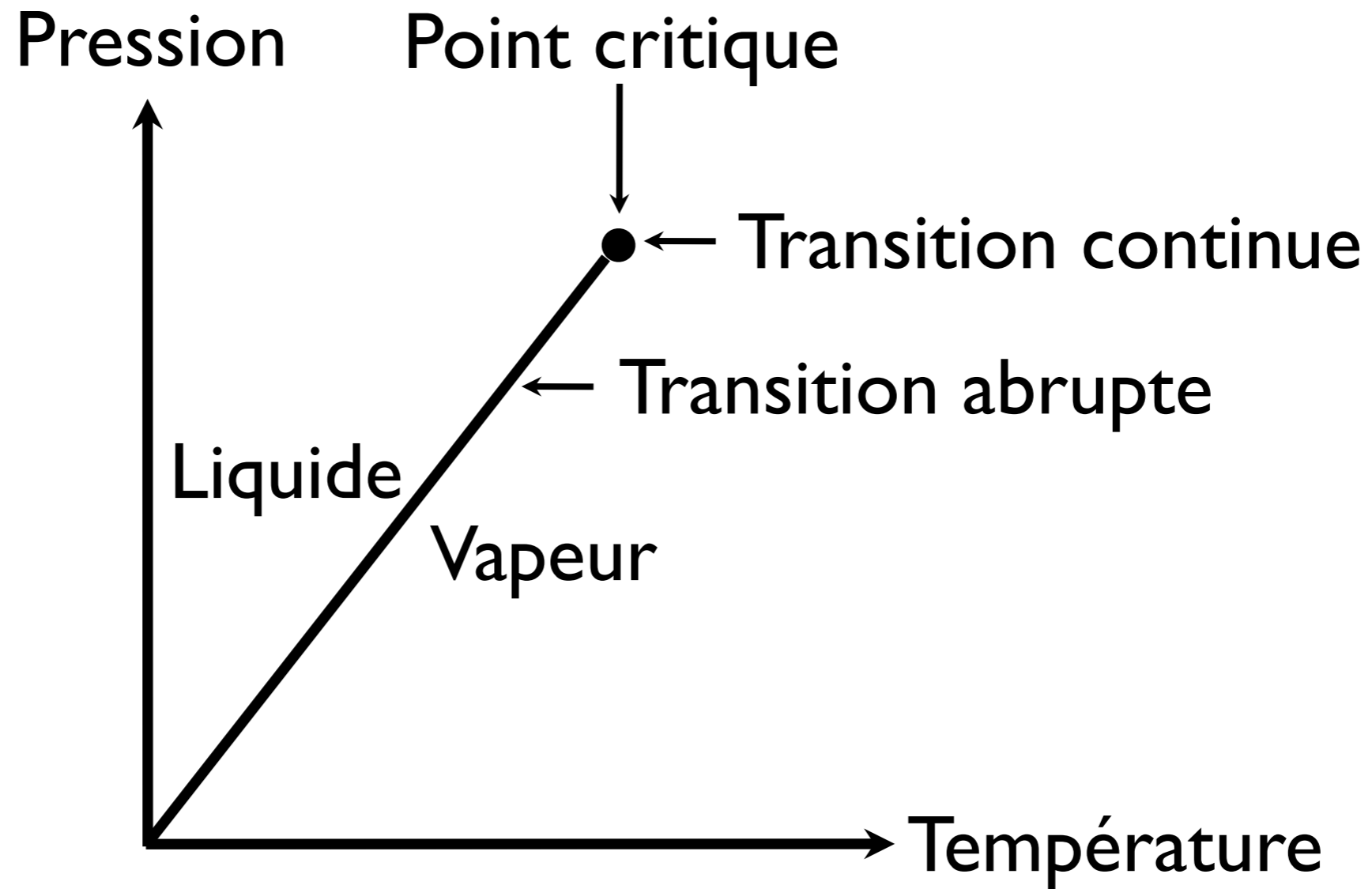
III

Les transitions de phase

Les états condensés des corps purs



Les transitions de phase d'un corps pur condensé



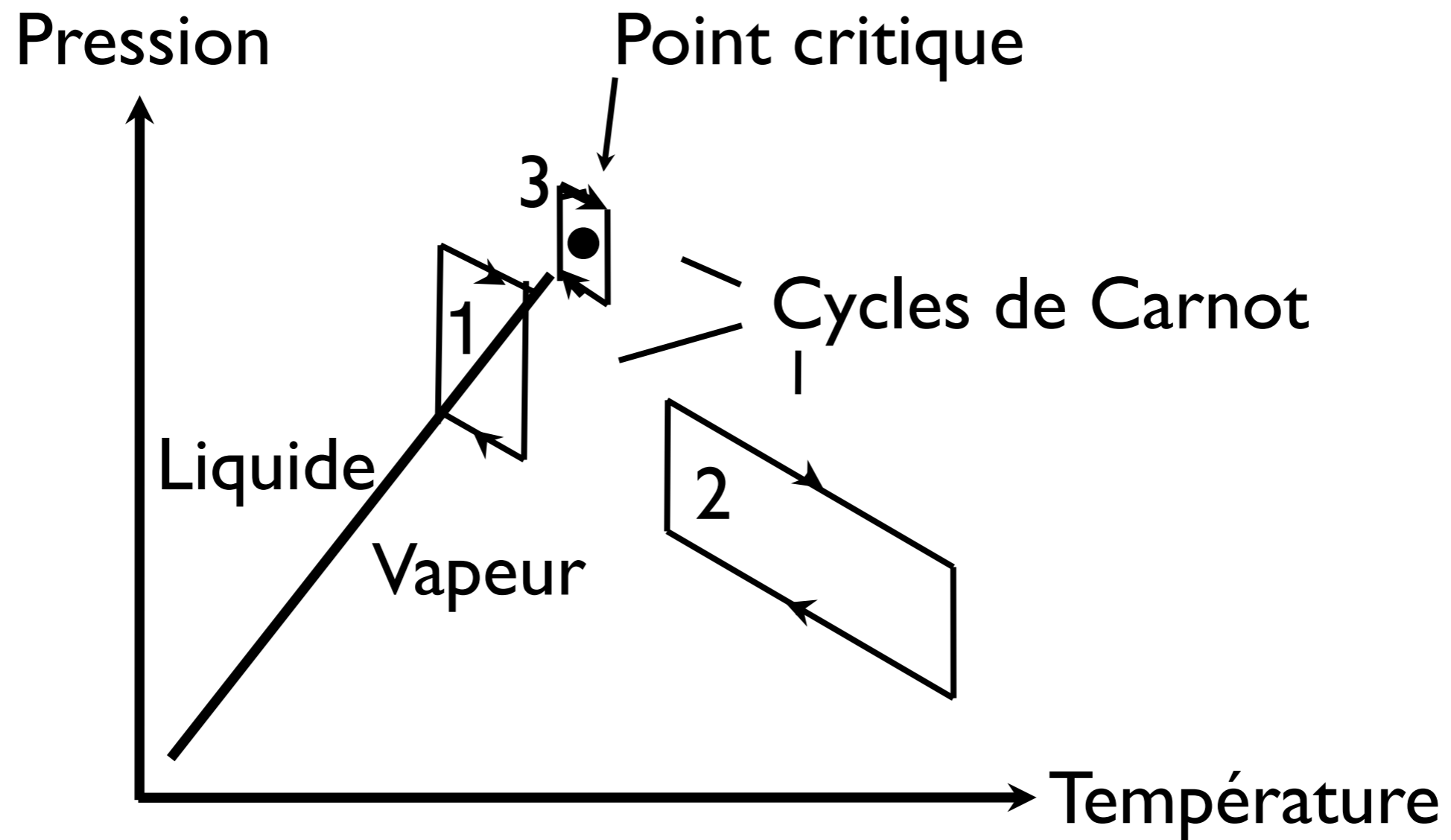
Les transitions de phase d'un corps pur condensé

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.



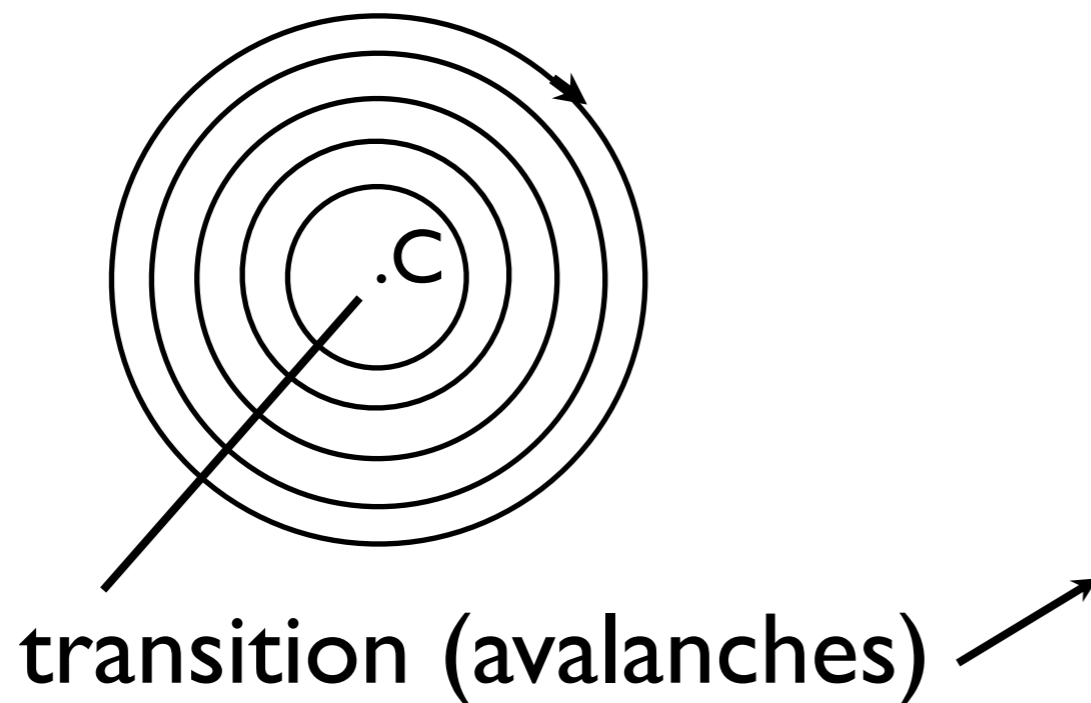
Per Bak (1948-2002)

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:

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

μ_i = potentiel économique de l'objet i

dn_i = nombre d'objets i

Valeur d'usage et valeur d'échange

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

μ_i = valeur d'usage de l'objet i

μ_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) $dG = 0$

$P.dV = T.dM$

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

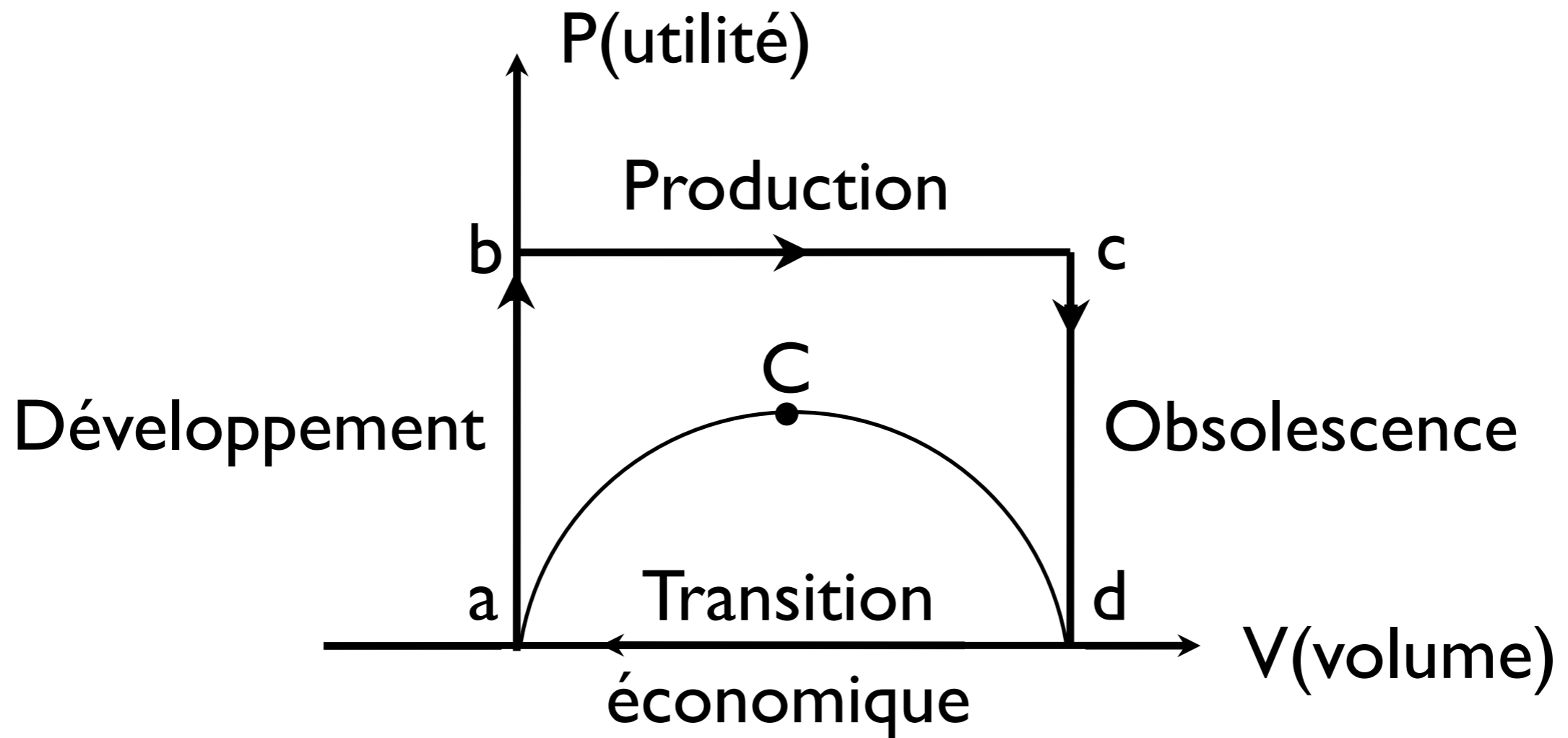
Les transitions économiques

Cas des cycles économiques

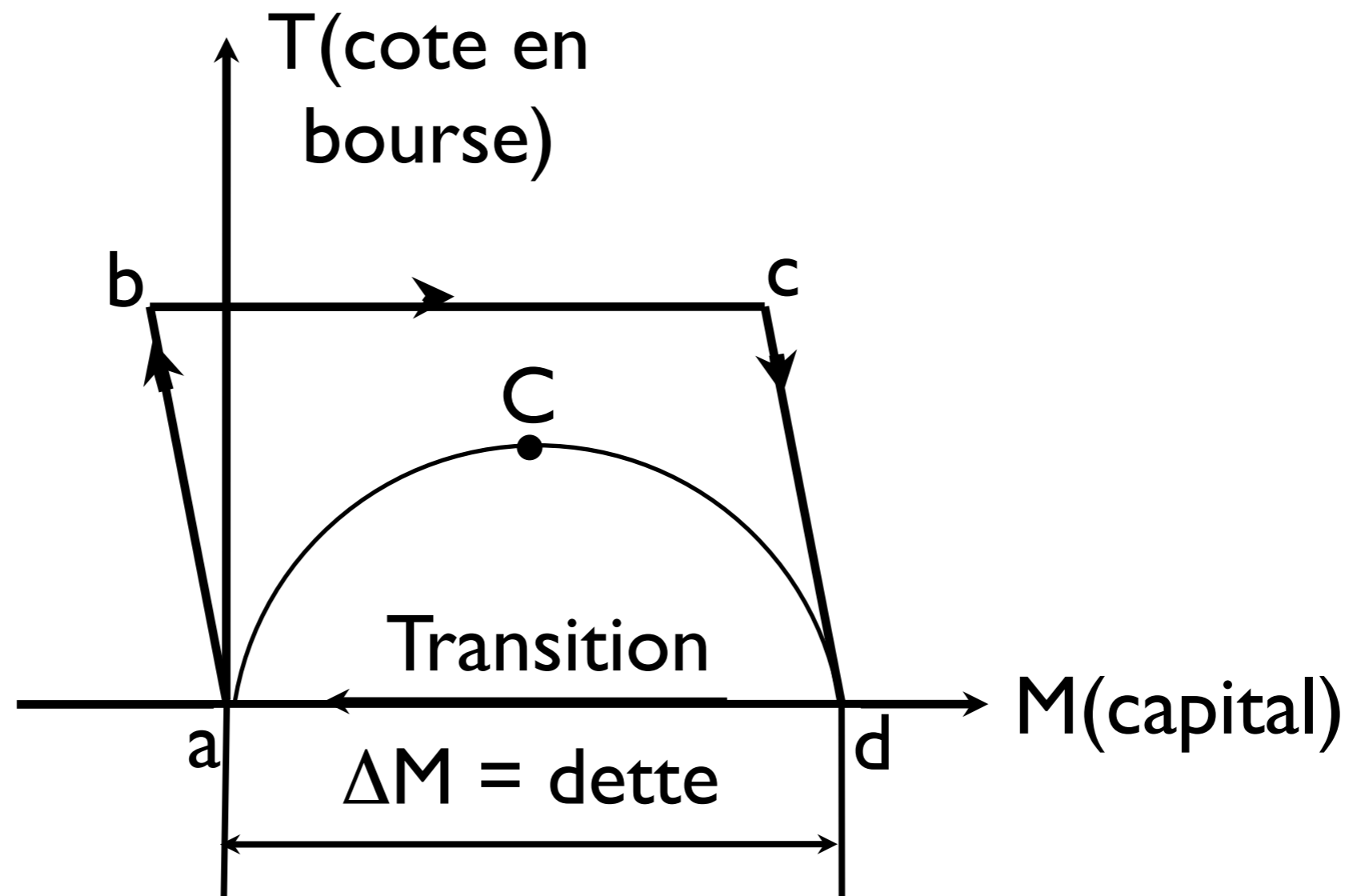
L'analogie avec le comportement thermodynamique des fluides incite à penser qu'en présence d'un flux d'énergie, des inégalités (gradients) de richesses apparaissent

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

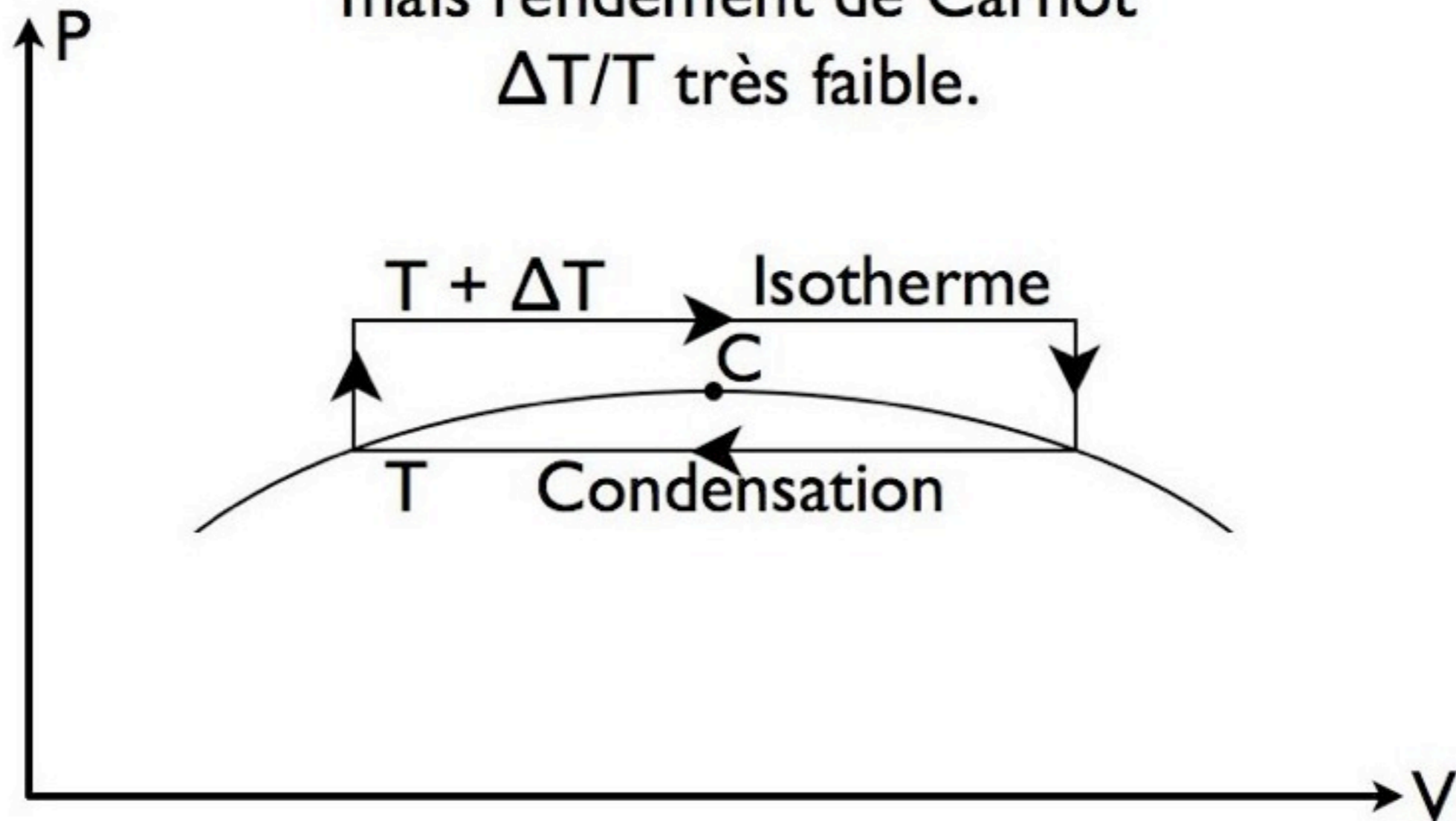
Cycles de production

(suite)

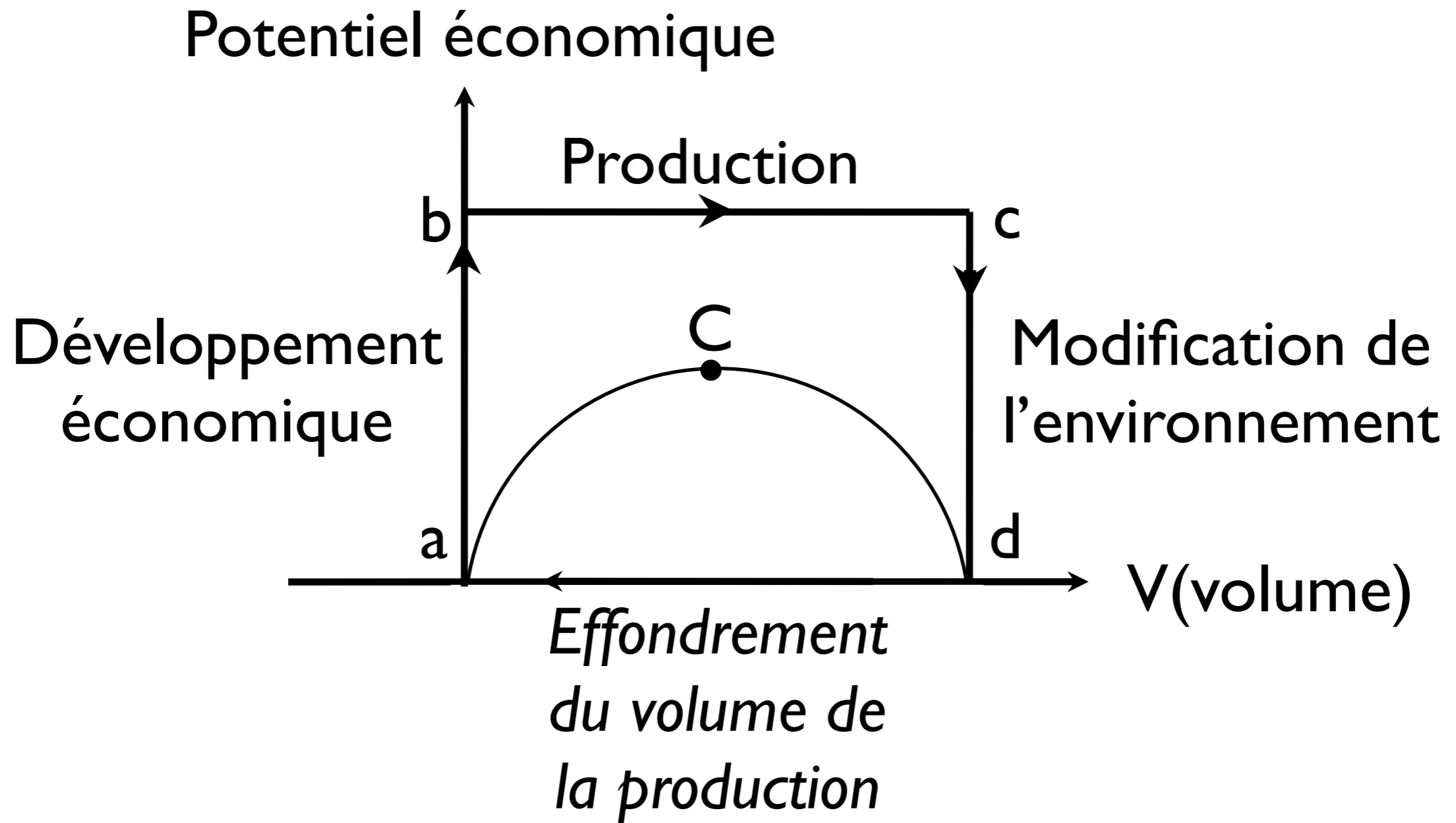
Les impayés s'accumulent menant tôt ou tard à un effondrement de la société.
Celui-ci se caractérise par un *effondrement de la production.*

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)



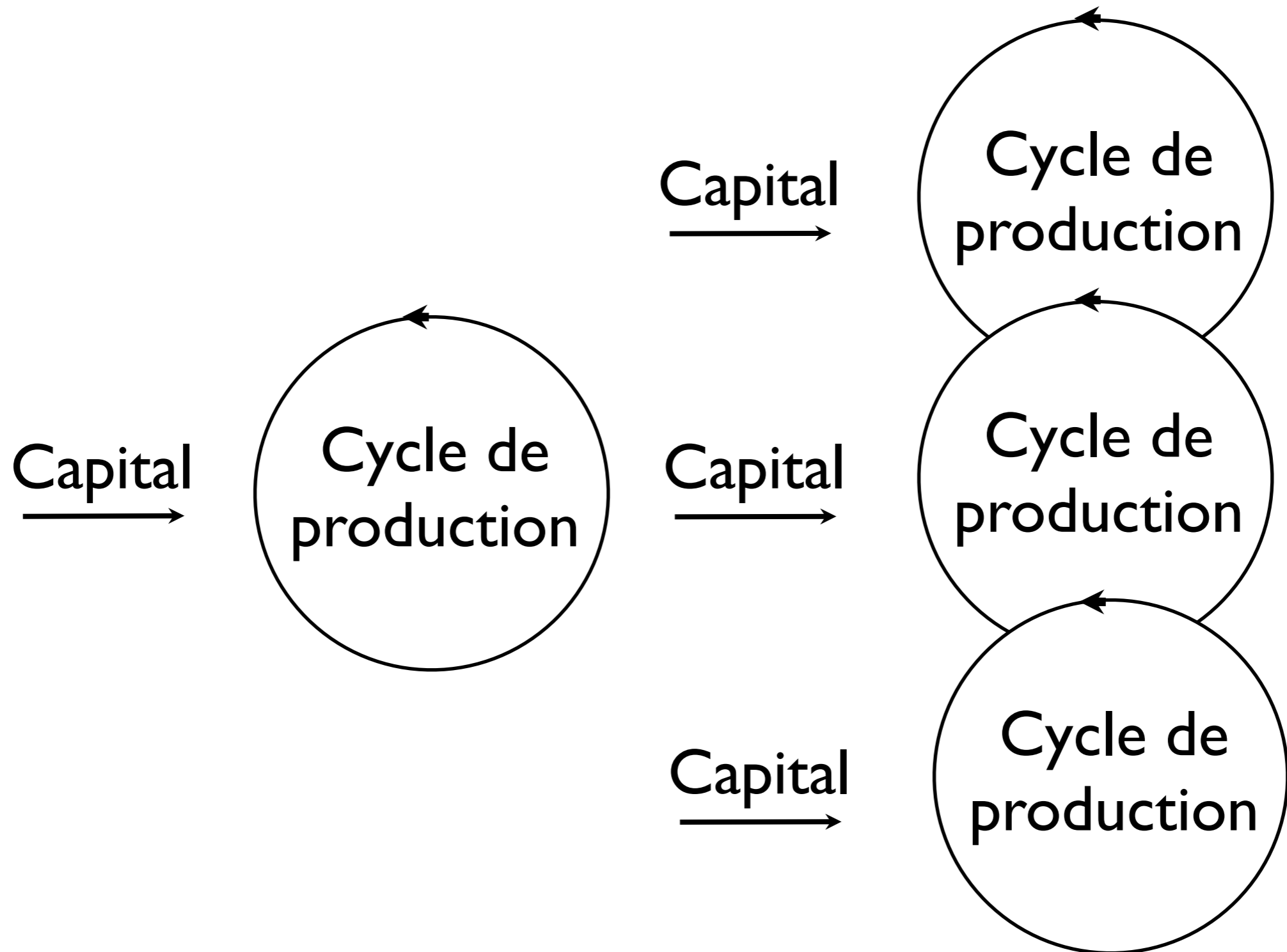
Cycles de production

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)

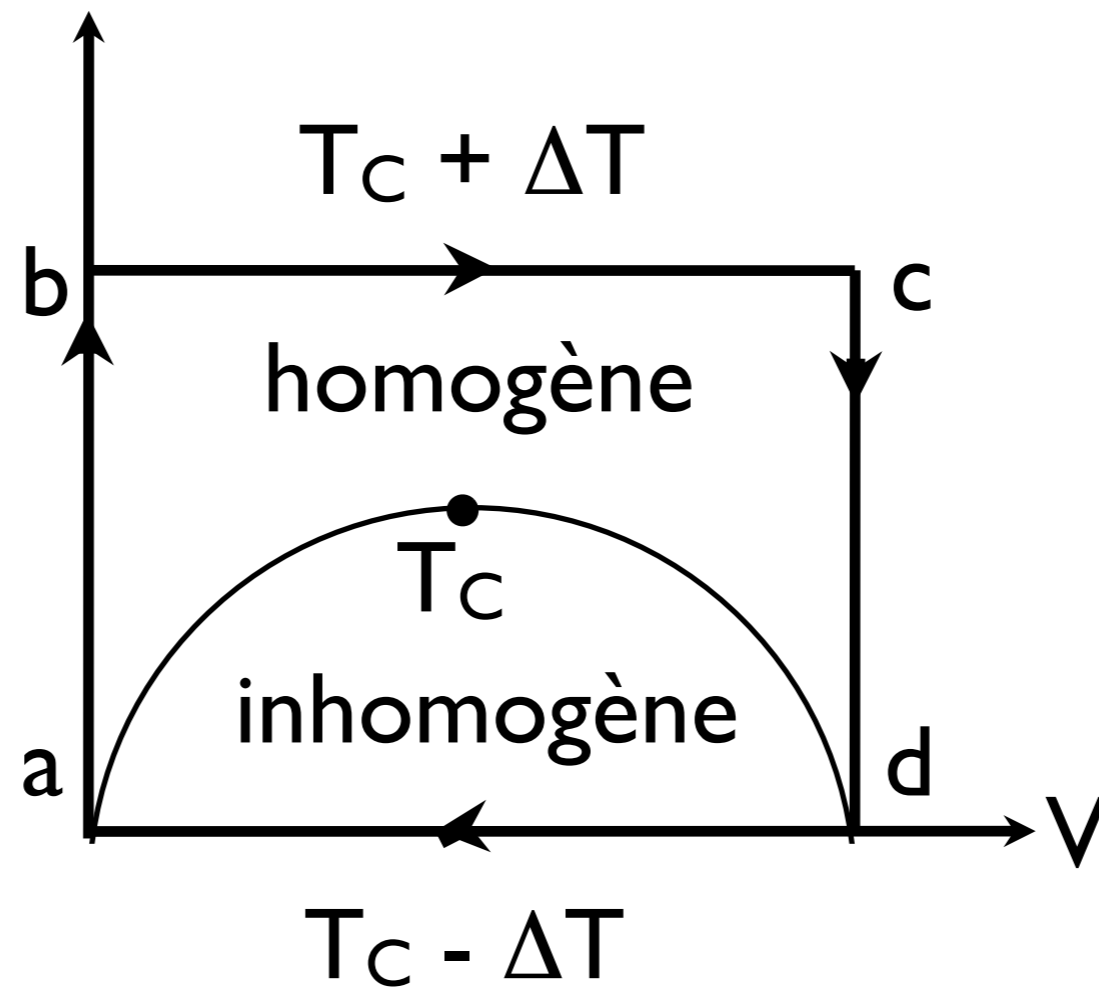
La distribution des richesses suit une loi de puissance (invariance par changement d'échelle de l'opalescence critique).

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



Vilfredo Pareto

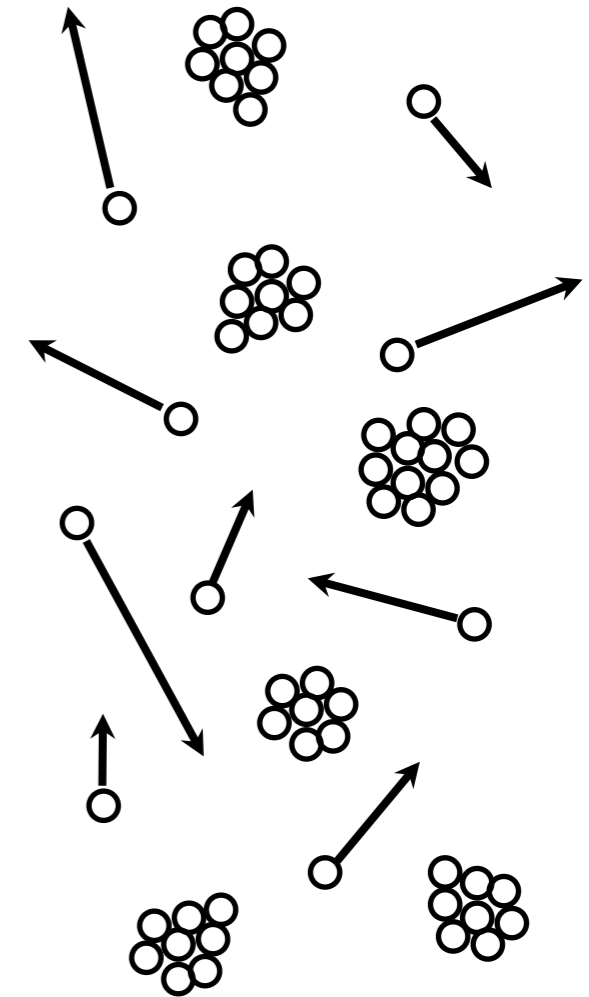
Condensation au point critique



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.



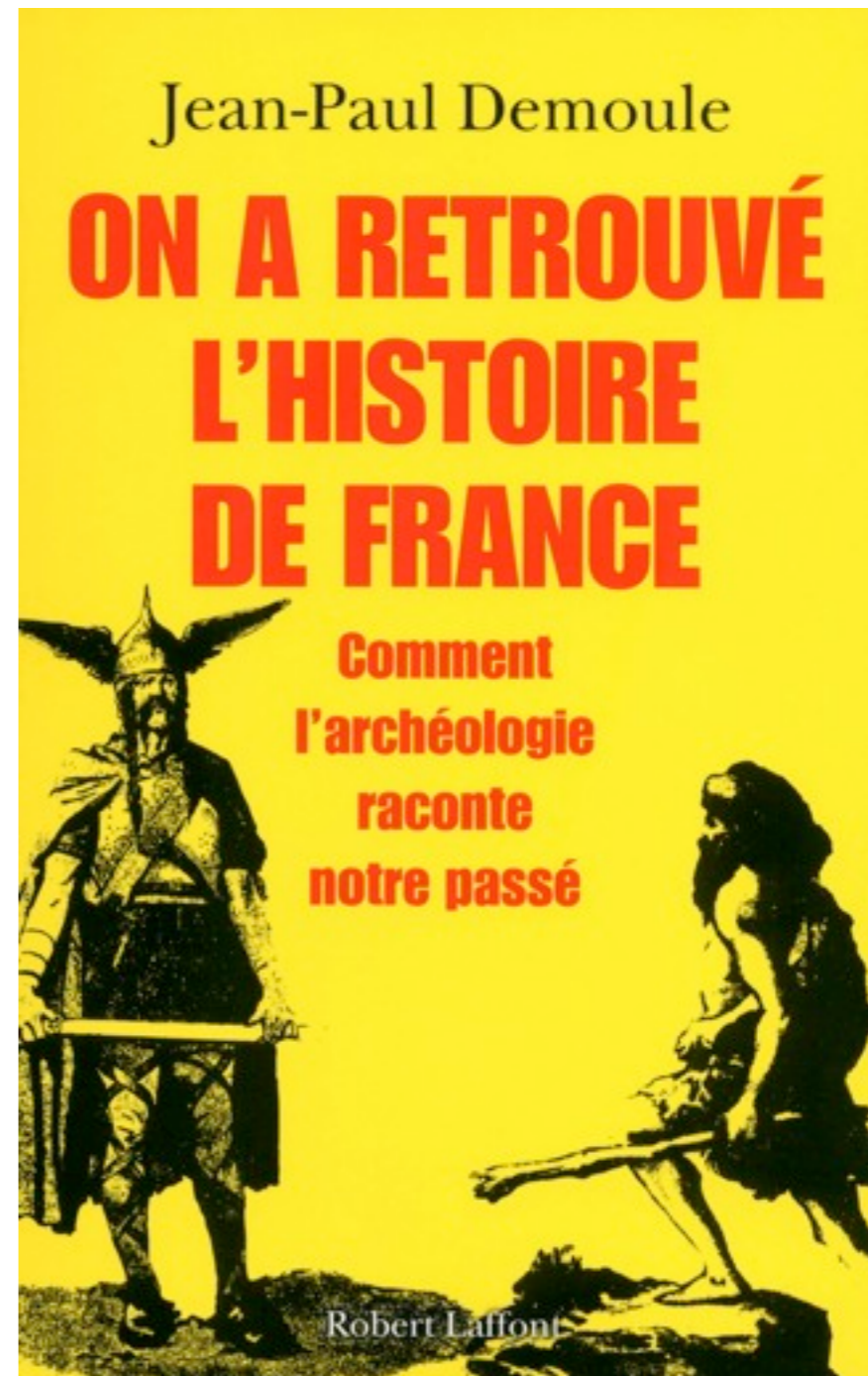
La classe moyenne d'effondre.

VI

Exemples historiques

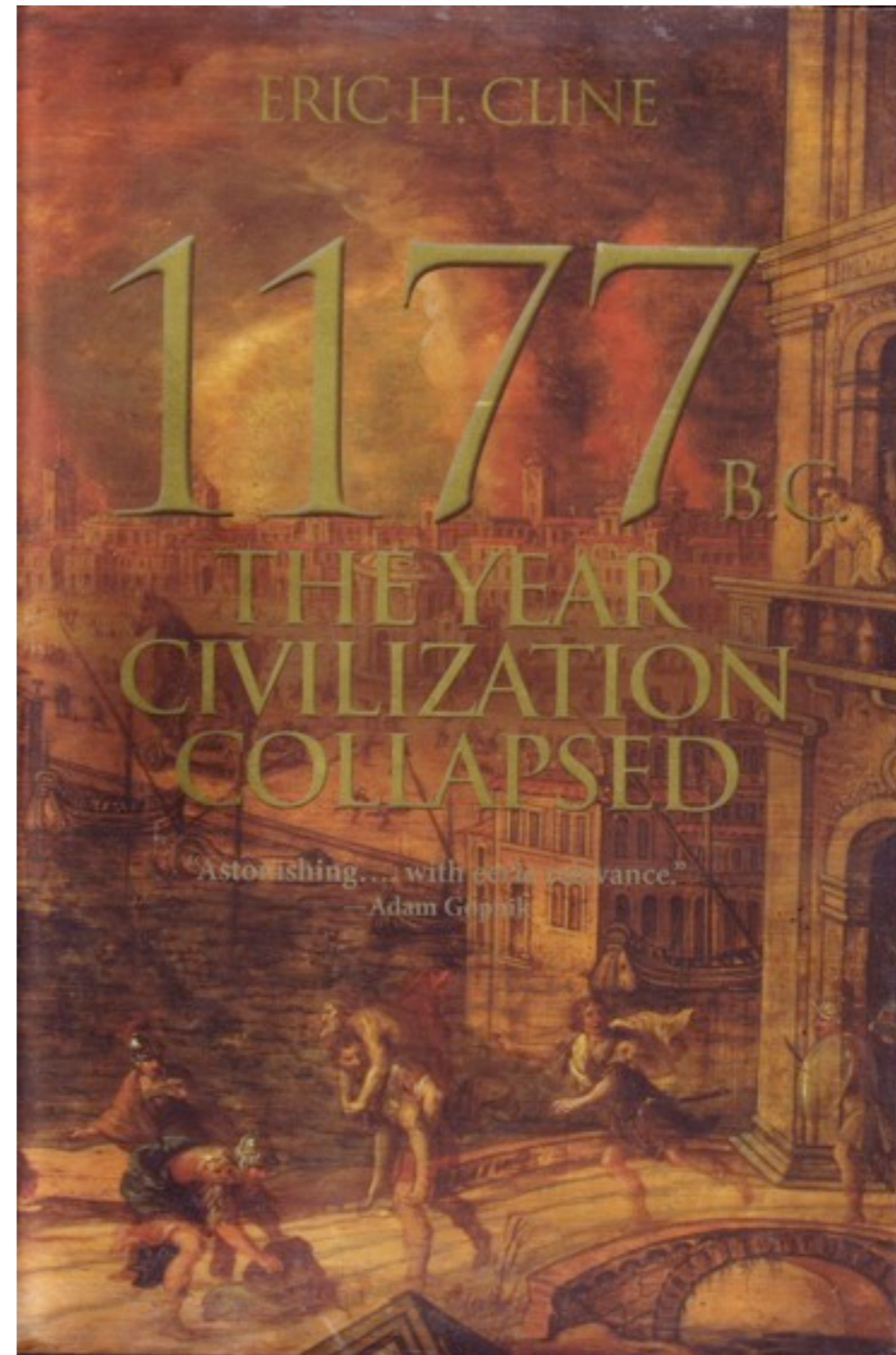
Jean-Paul Demoule (2012)

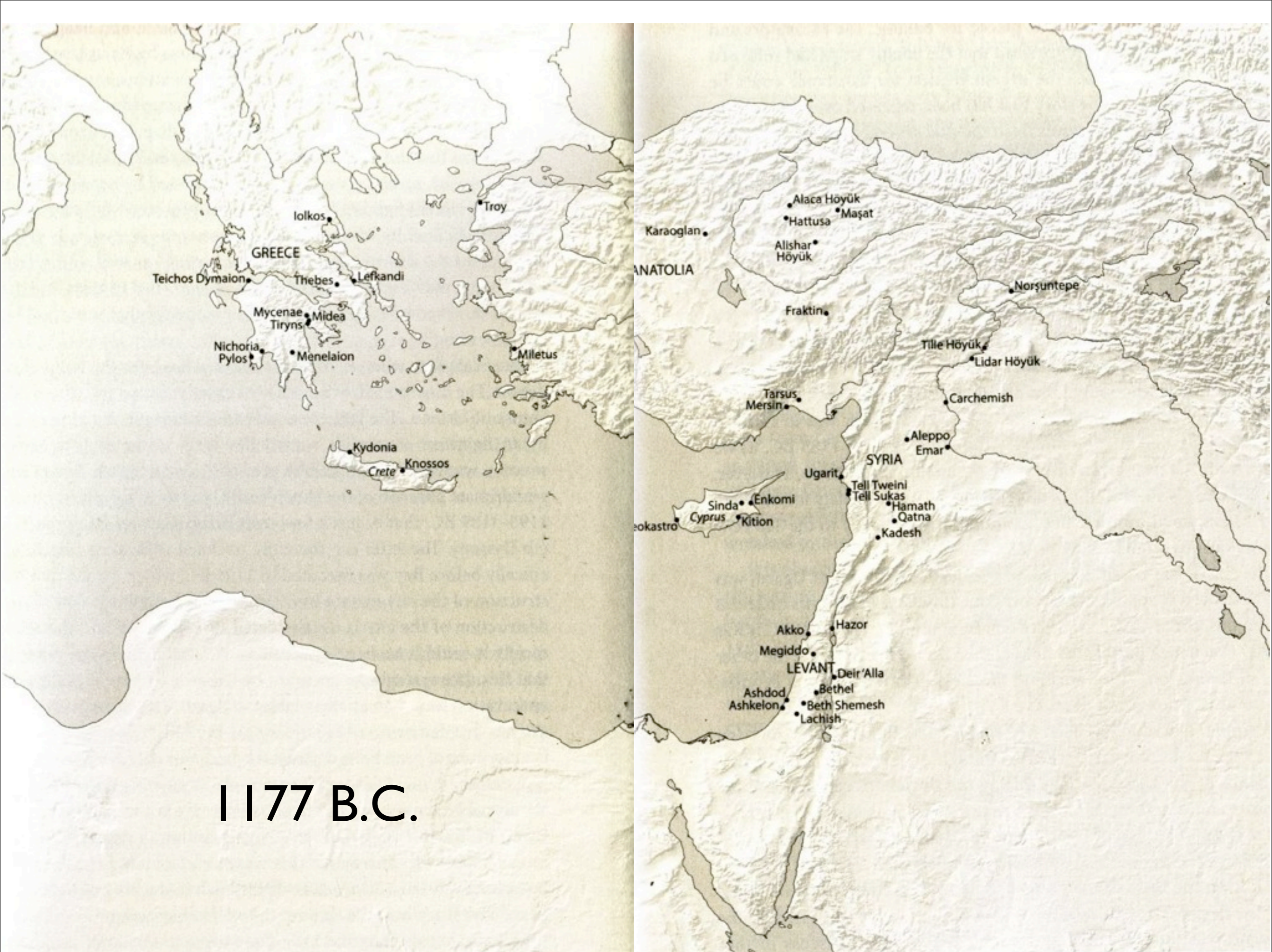
« L'histoire s'accélère [...] la population ne cesse de croître. [On assiste à] une montée en *dents de scie* des inégalités sociales [...] à une alternance, selon les régions, de sociétés fortement inégalitaires et de sociétés qui le sont moins. [...] Cette alternance [...] concerne toute l'Europe »



Eric H. Cline (2014)

1177 B.C.
The Year
civilization
collapsed





GREECE

Iolkos

Troy

Teichos Dymaion

Thebes

Lefkandi

Mycenae

Tiryns

Midea

Nichoria

Pylos

Menelaion

Miletus

Kydonia

Crete

Knossos

ANATOLIA

Karaoglan

Alaca Höyük

Hattusa

Maşat

Alishar Höyük

Fraktin

Norşuntepe

Tarsus

Mersin

Tille Höyük

Lidar Höyük

Carchemish

SYRIA

Aleppo

Emar

Ugarit

Tell Tweini

Tell Sukas

Hamath

Qatna

Kadesh

LEVANT

Akko

Hazor

Megiddo

Deir 'Alla

Ashdod

Ashkelon

Bethel

Beth Shemesh

Lachish

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

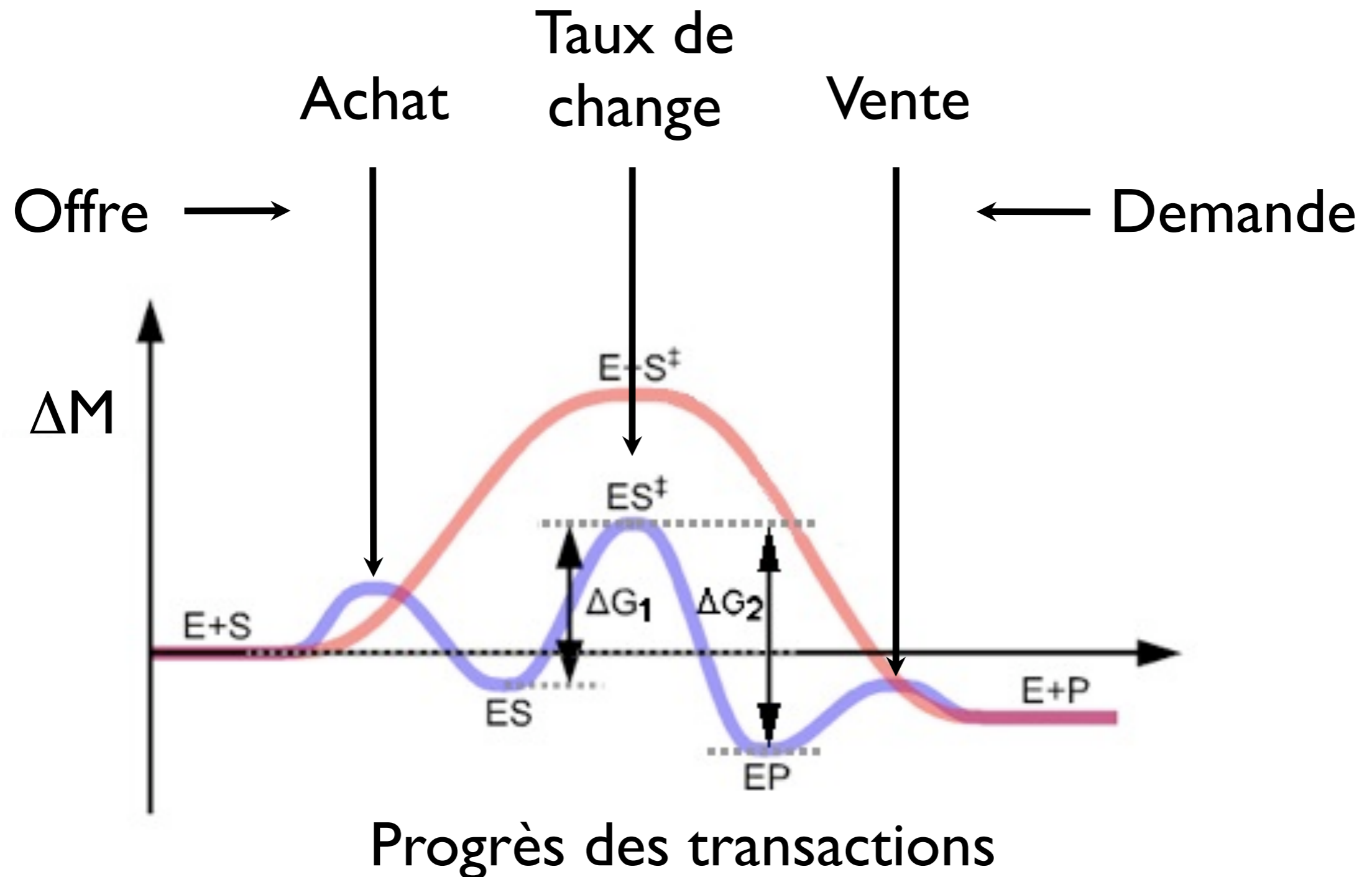
Espérance de gain: $\Delta M = -\sum p_i \cdot \log p_i$

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

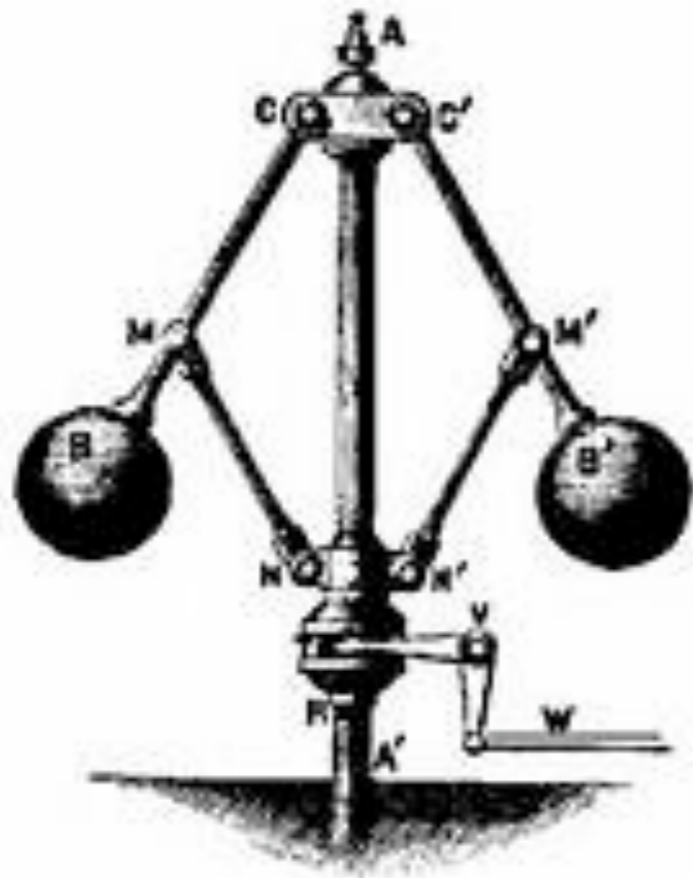
Le modèle de la biochimie



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.

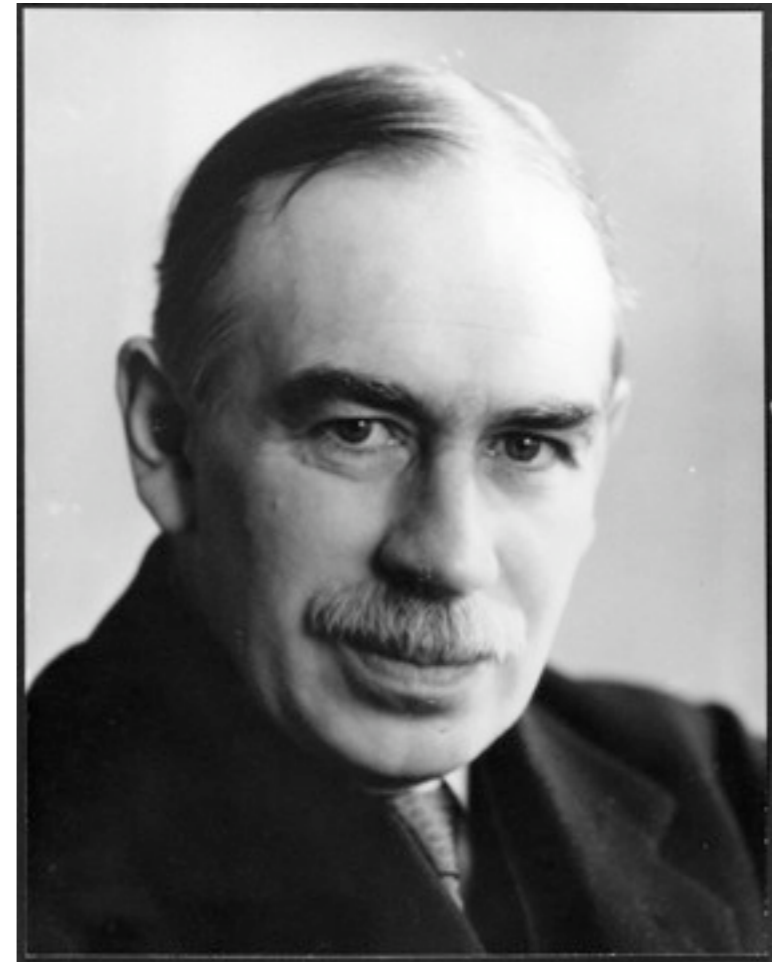
Un pays, deux monnaies

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).

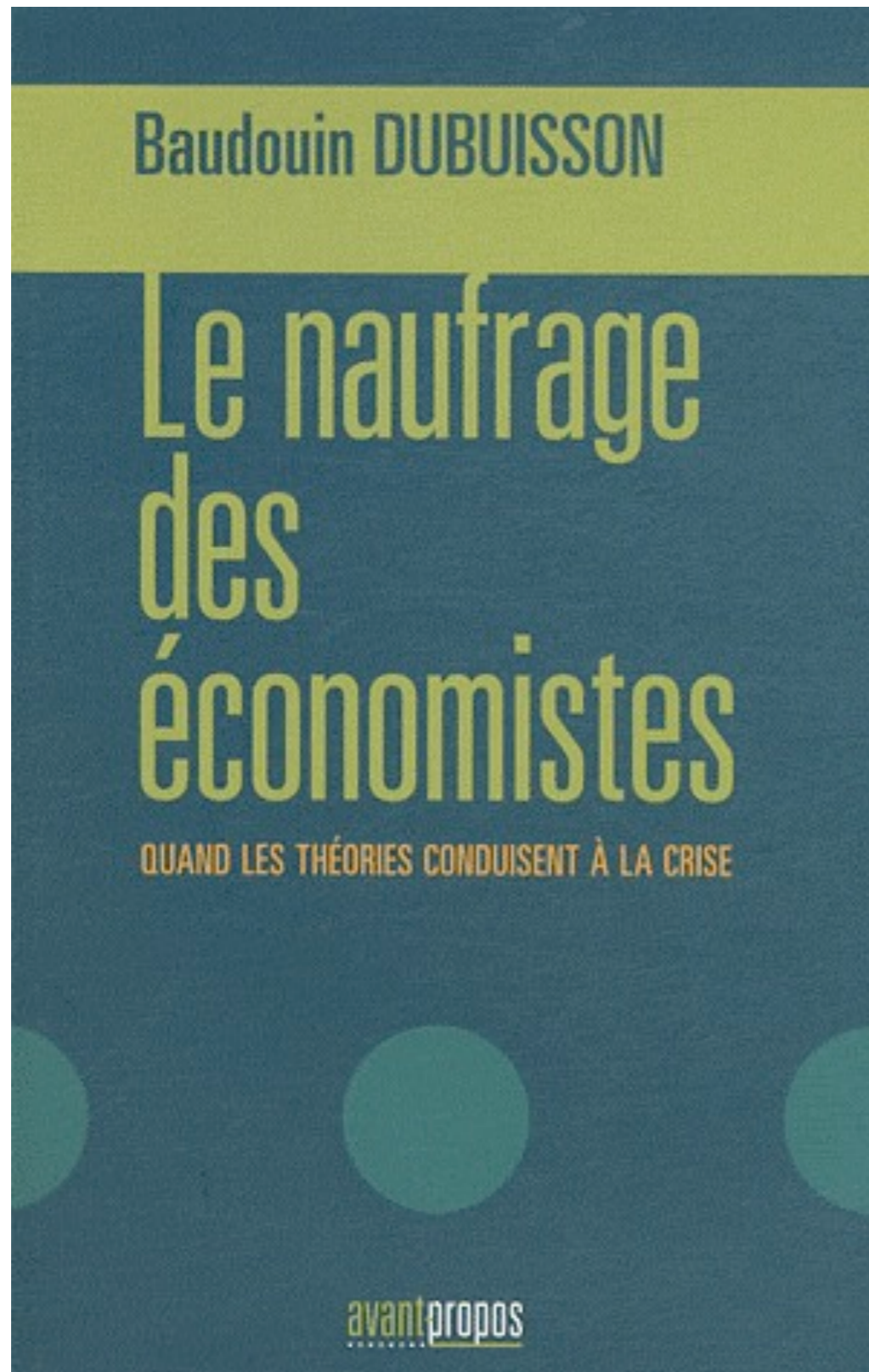
Point de vue des économistes

« *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°K)



Source froide: le ciel nocturne (3°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”

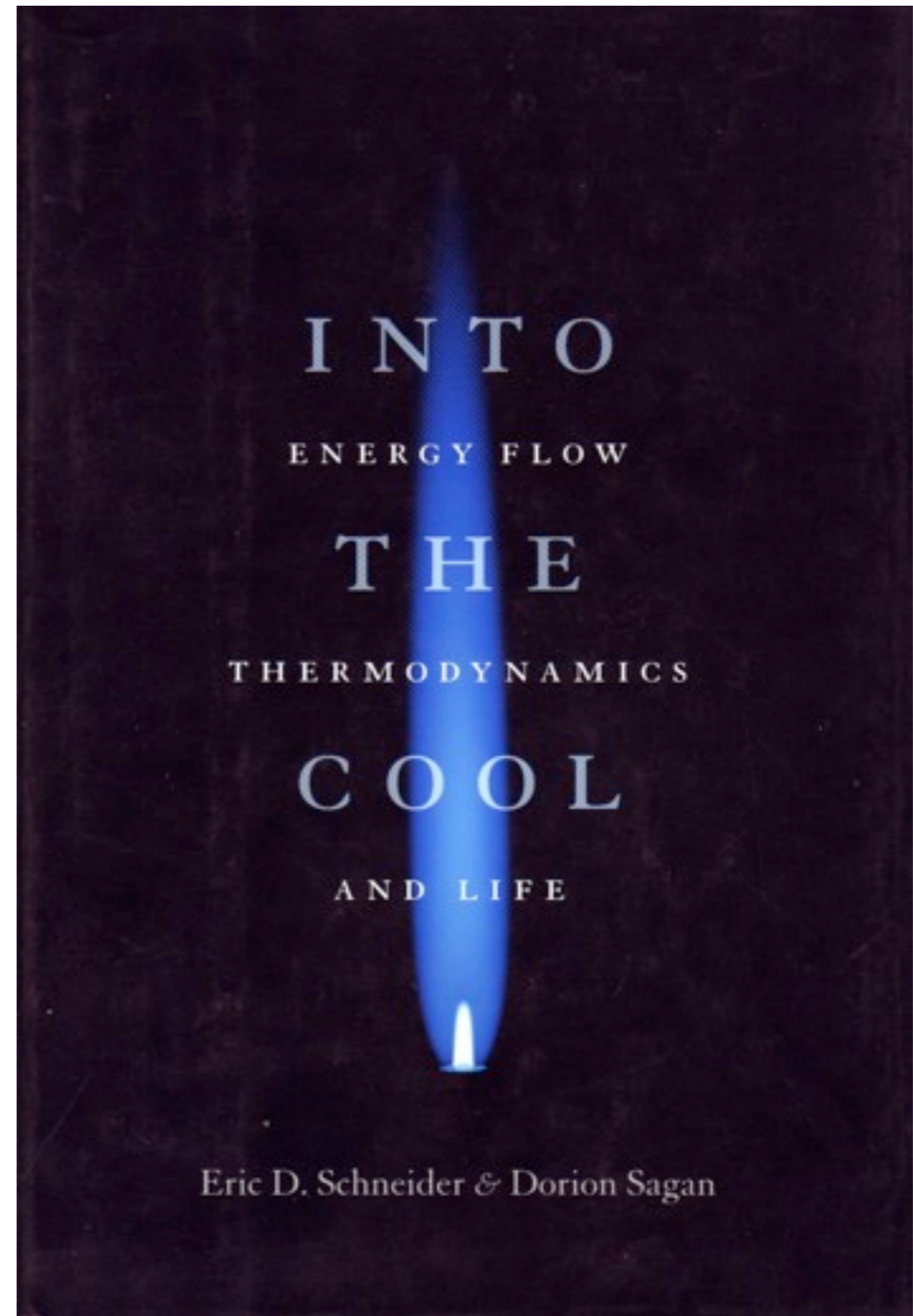
Eric D. Schneider et
Dorion Sagan (2005)

I. The energetics

II. The complex

III. The living

IV. The human

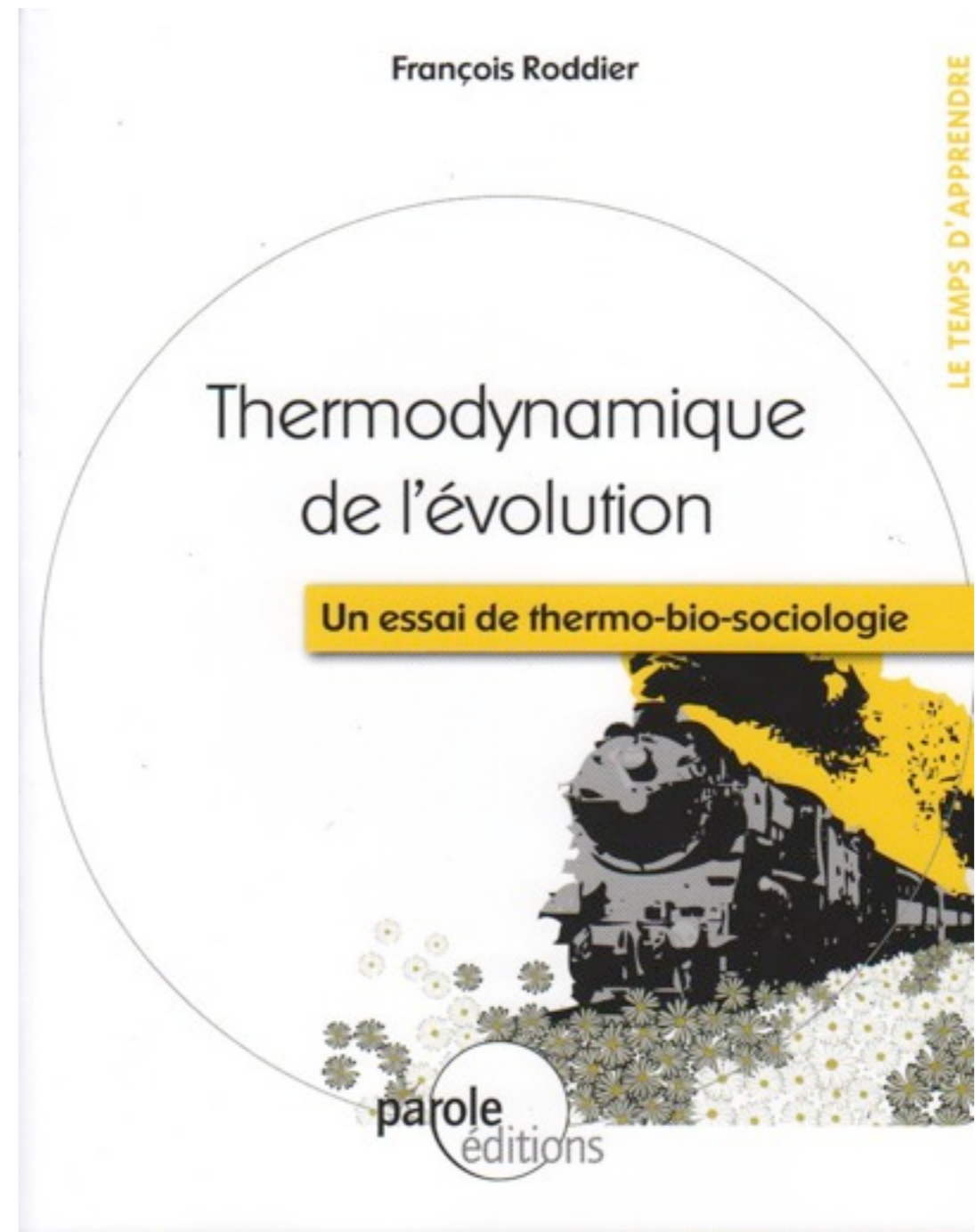


Lecture recommandée

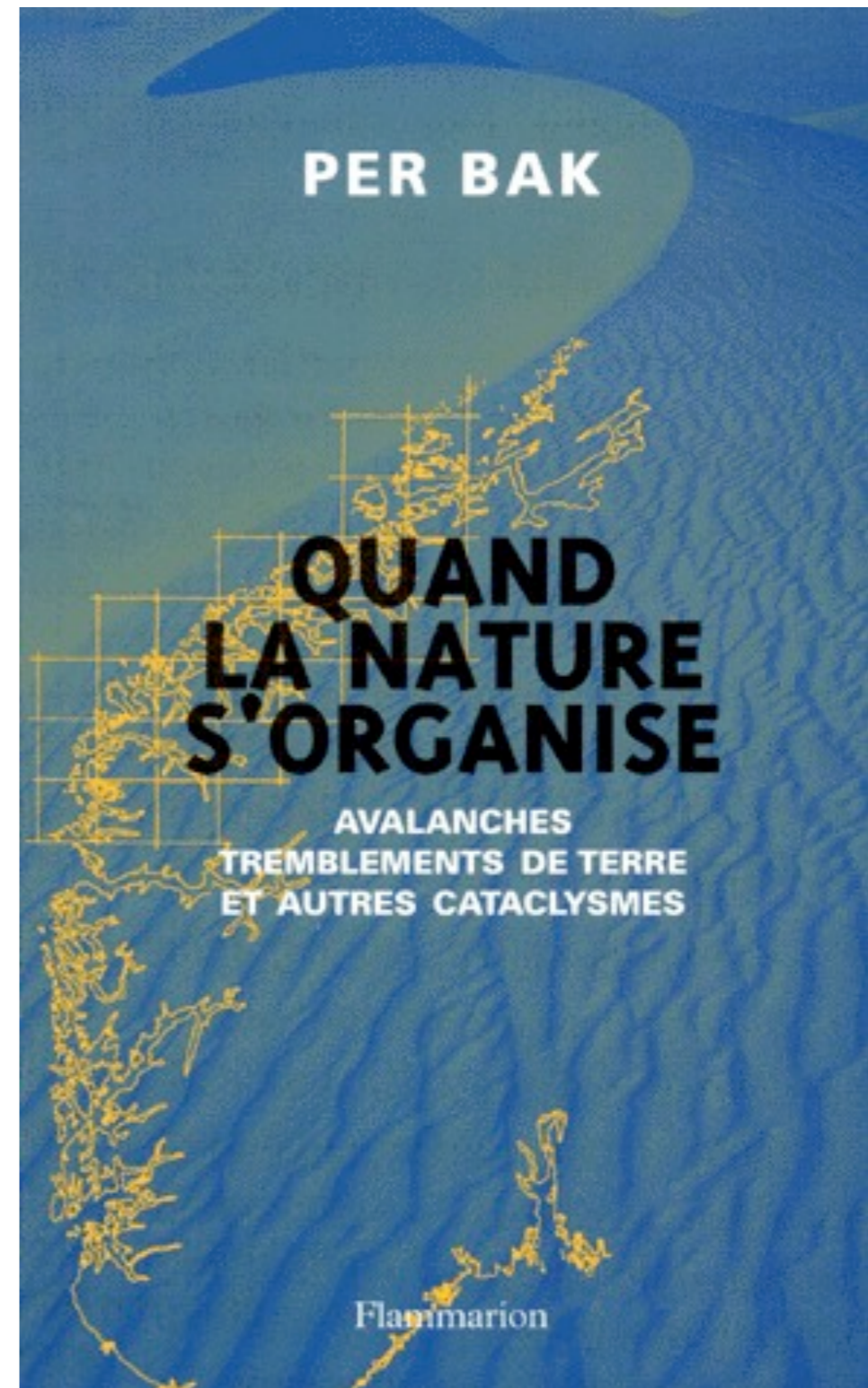
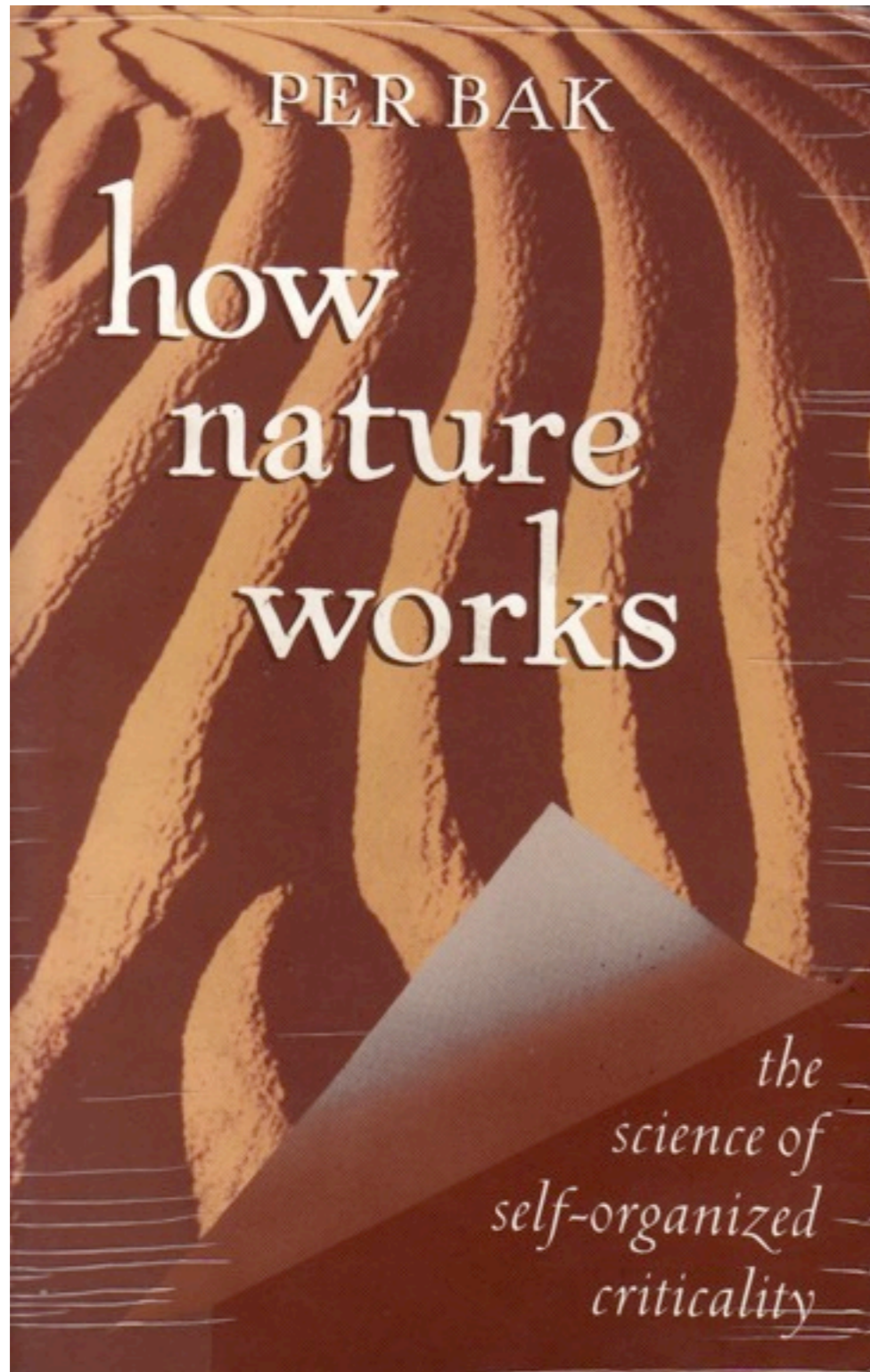
“Thermodynamique de l'évolution”

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

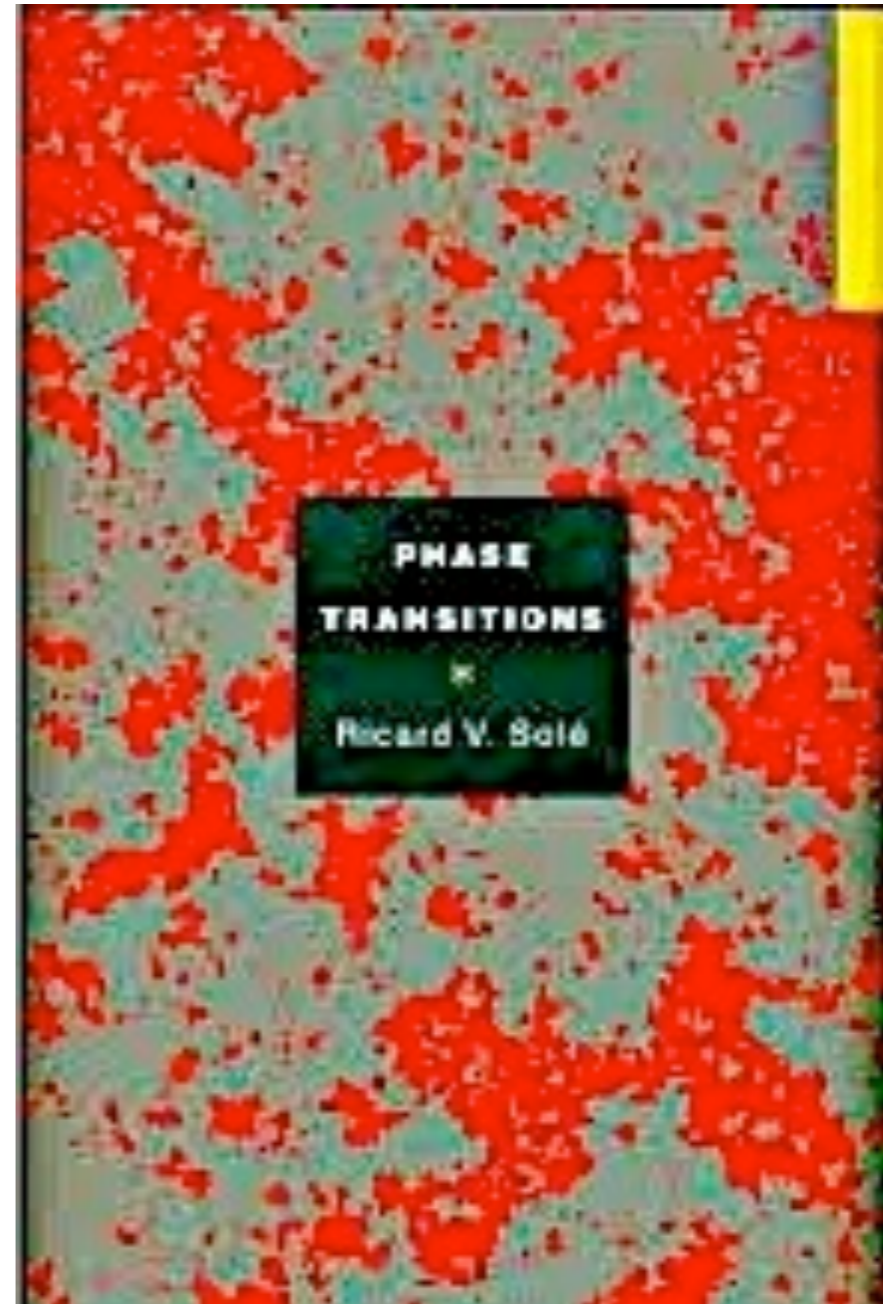


Lecture recommandée

“Phase transitions”

Ricard V. Solé (2011)

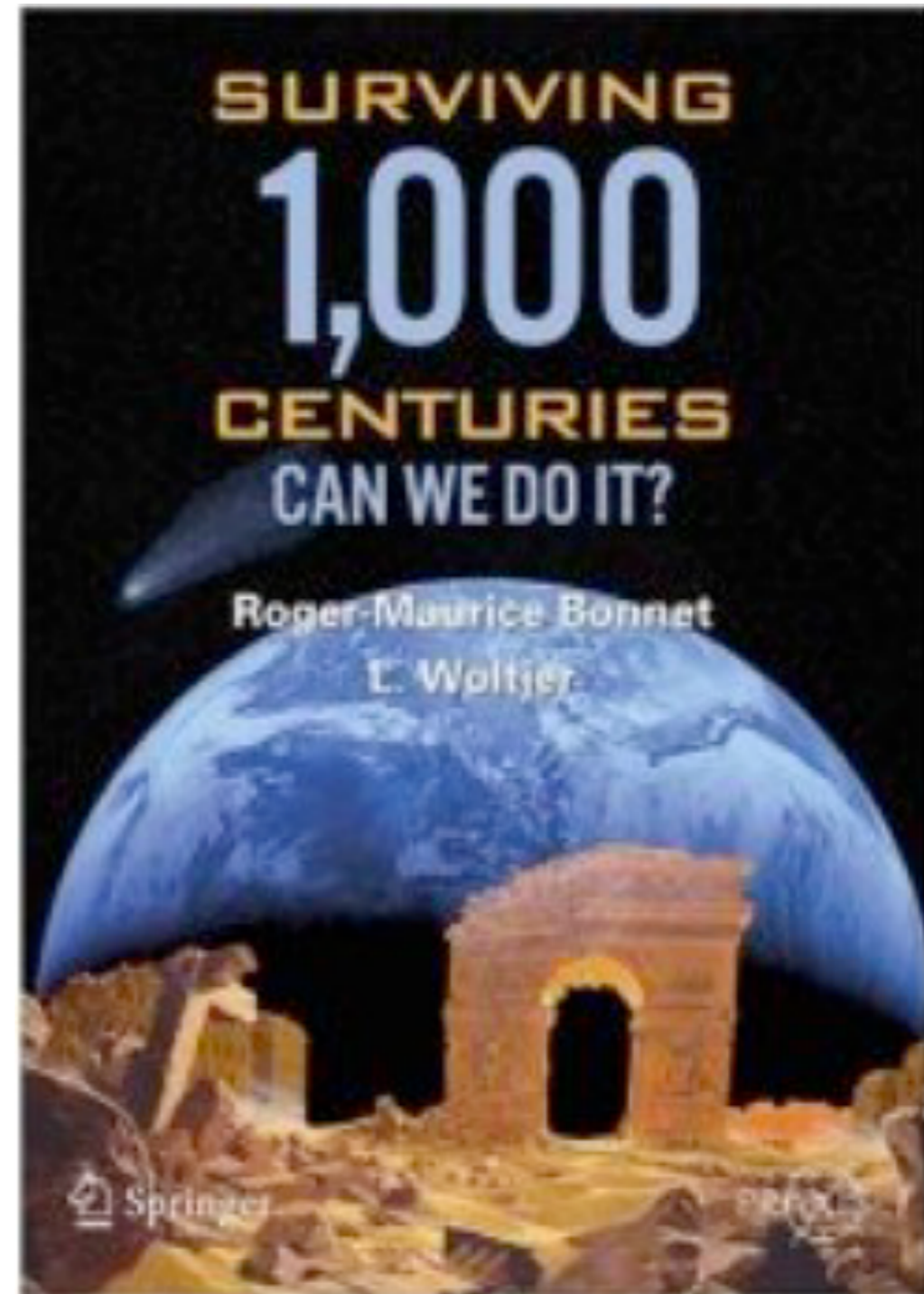
- 1. Phase change
- 6. Life origins
- 7. Virus dynamics
- 10. Gene networks
- 12. Ecological shifts
- 14. Collective intelligence
- 16. Social collapse*



Les effondrements économiques

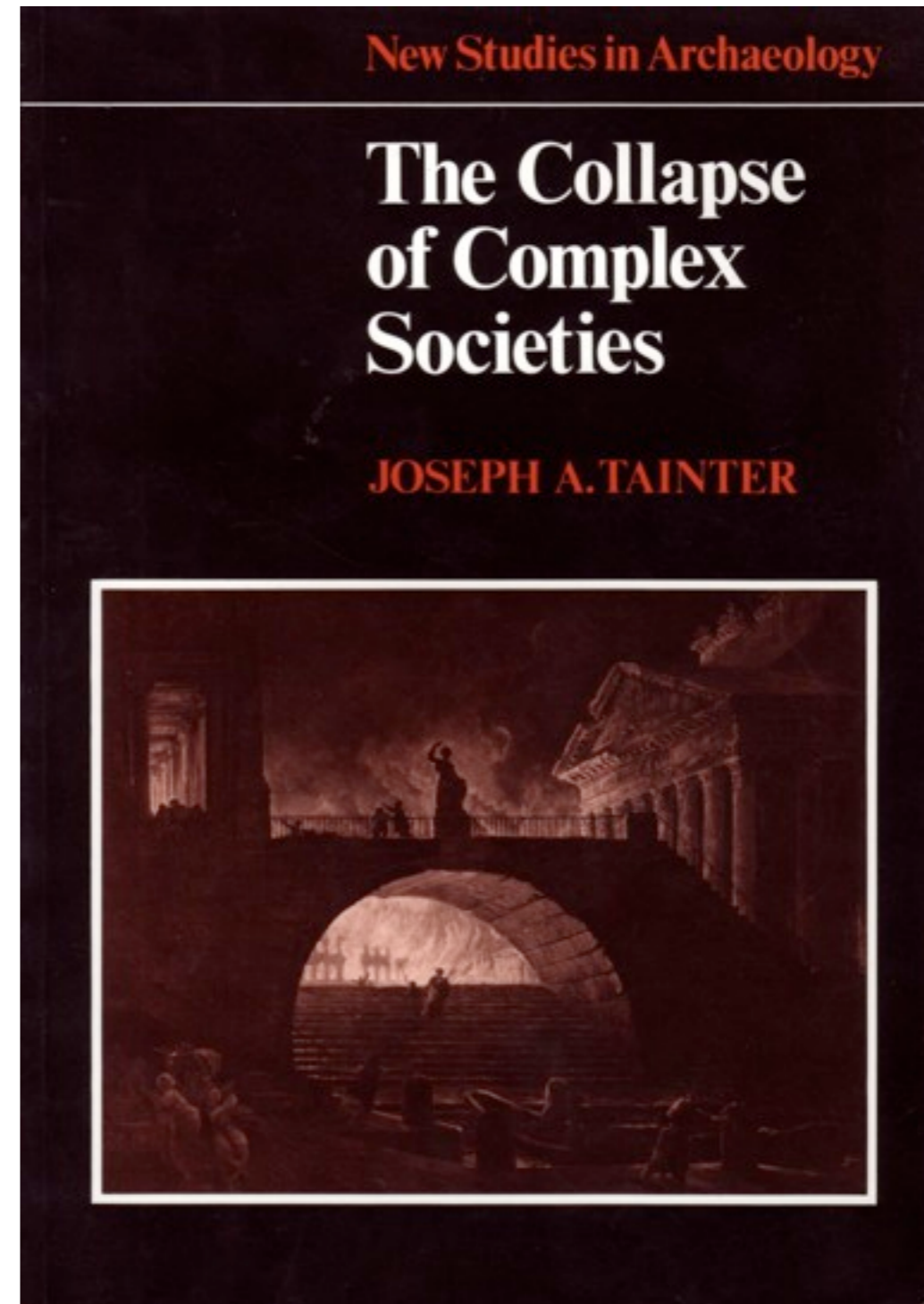
Roger-Maurice Bonnet et L. Woltjer (2014)

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



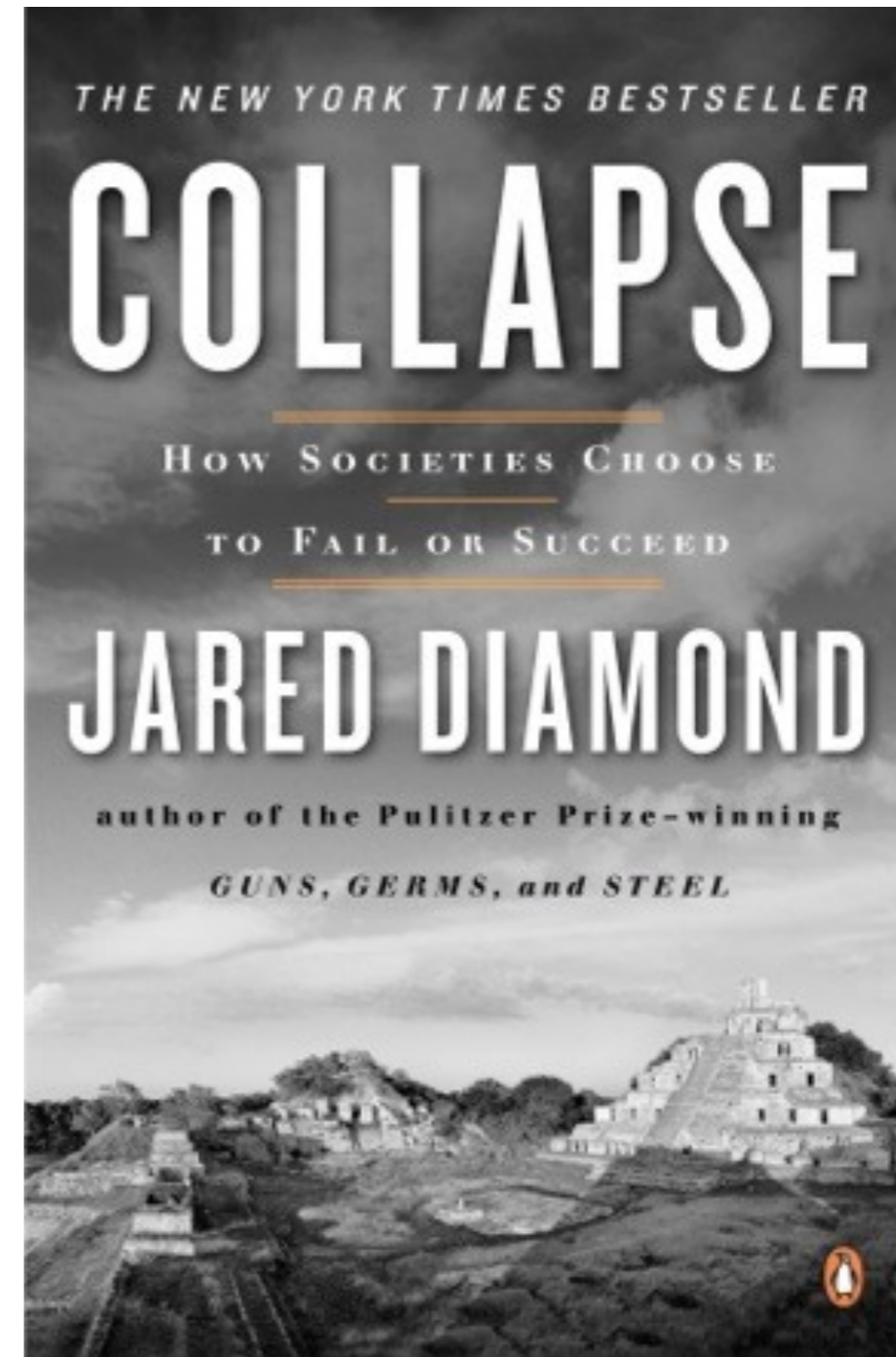
Joseph A. Tainter (1988)

The Collapse of Complex Societies



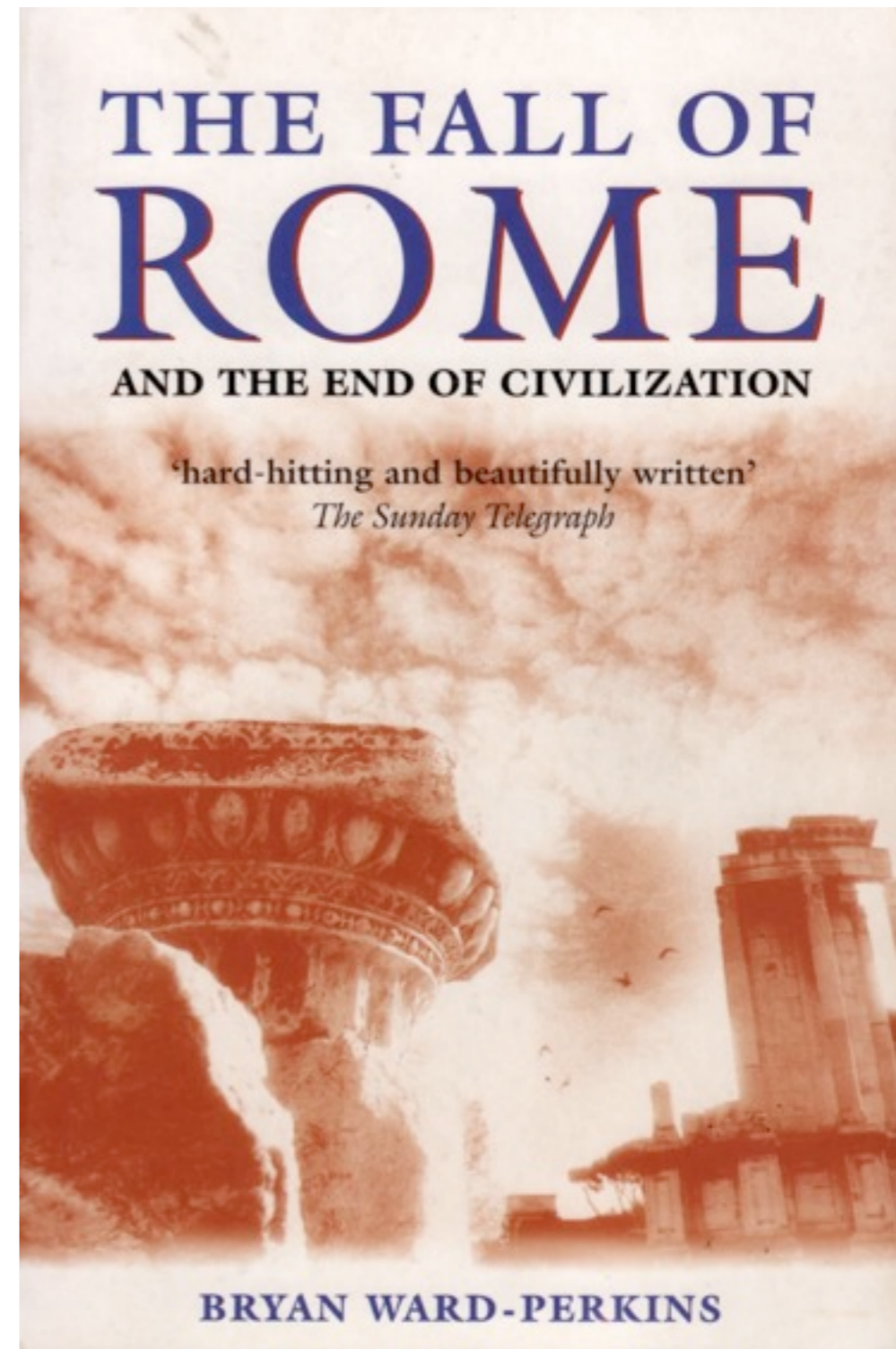
Jared Diamond (2005)

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



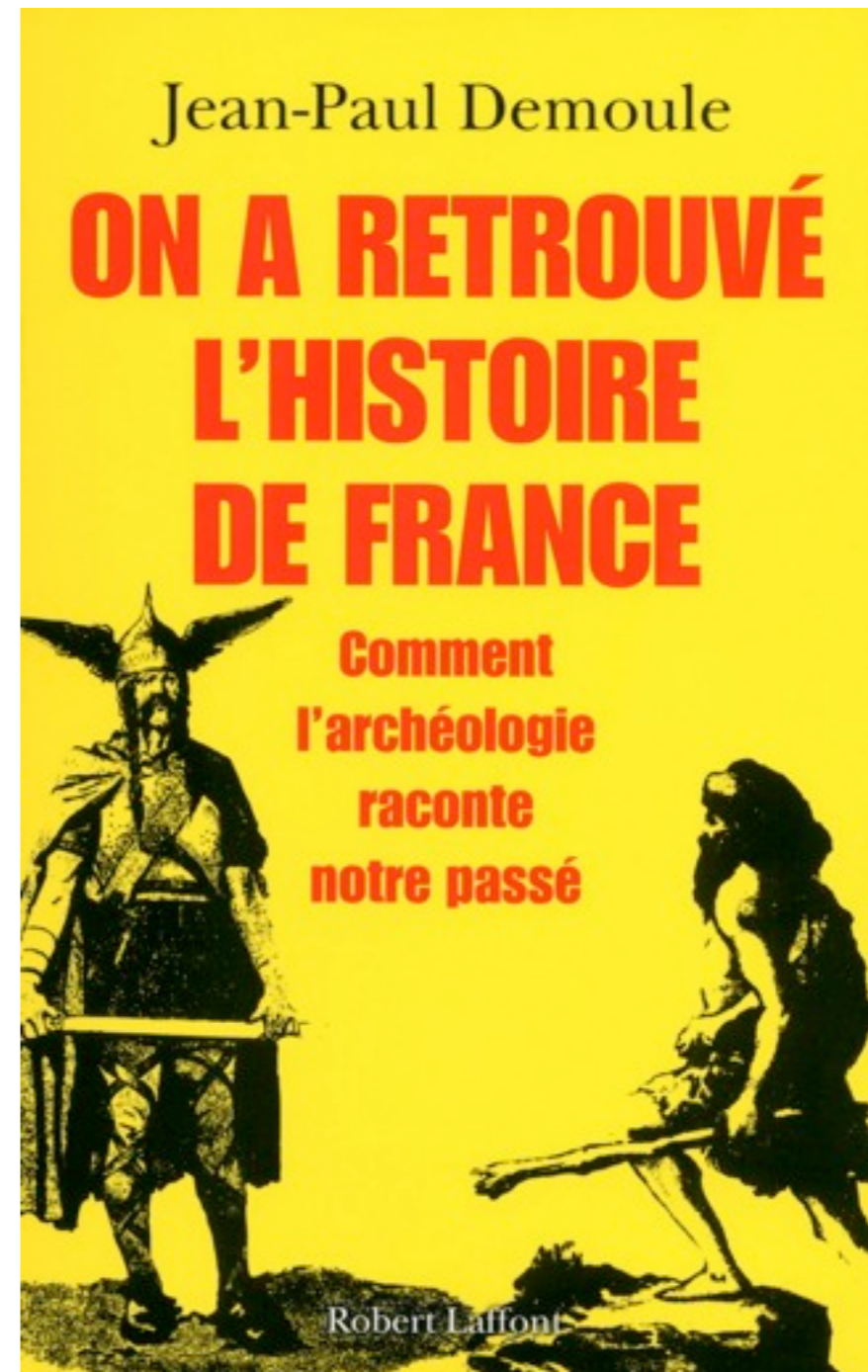
Bryan Ward-Perkins (2005)

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

