

Énergie et Entropie : Moteur et Vecteur de la Transition

Vincent.Gerbaud@ensiacet.fr

Bibliographie sélectionnée

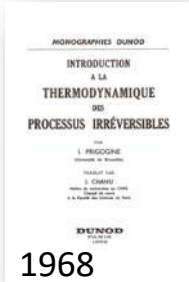
disciplinarité

interdisciplinarité

Pensée complexe



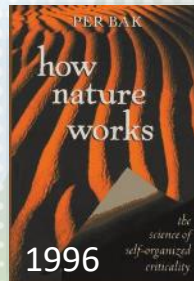
Ilya Prigogine



1968



Per Bak



1996



François Roddier



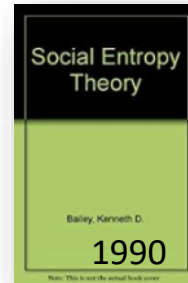
2012



2019



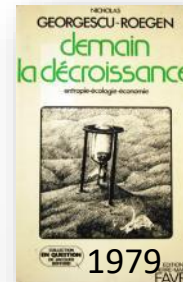
Kenneth D. Bailey



1990



Nicholas Georgescu-Roegen



1979



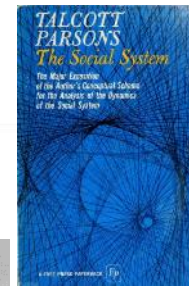
René Passet



1979



Talcott Parsons



Edgar Morin

Edgar Morin
La méthode
1. La Nature de la Nature



1977



1990



Jean Louis Le Moigne



1977



2012



Jean Yves Rossignol



2018

Ma démarche homologique

La question de l'analogie (R. Passet & L. von Bertalanffy)

- **Similitude superficielle**

- Ressemblance factuelle
- Analogie, Métaphore

- **Homologie** ←

- Réels distincts
- Lois formelles, mécanismes fondateurs identiques

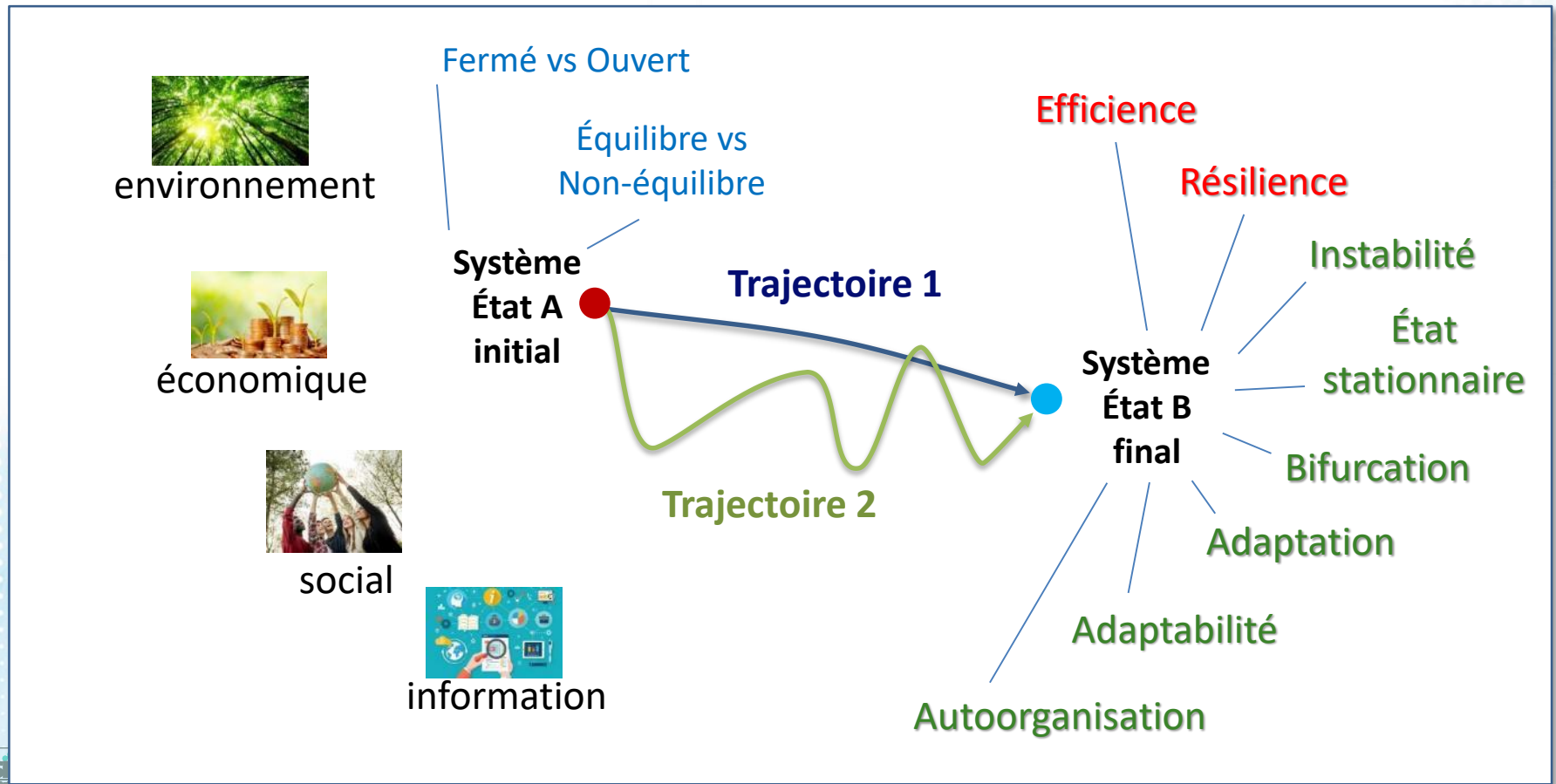
- **Isomorphisme**

- Similitude structurelle sur les plans réels et formels

→ Nécessité de dépasser le constat superficiel et de vouloir faire émerger une nouvelle compréhension mécanistique dans un autre domaine

Evolution des systèmes en transition

« Ce qui importe, ce n'est pas tant l'objectif mais c'est d'abord le processus » (E. Morin)



Définir un système

Variables d'état thermodynamiques

- **Additives (extensives)**

- Masse, **M**
- Volume, **V**
- Nombre de moles, **N**
- Énergie, **E**
 - Énergie cinétique, E_c
 - Énergie potentielle, E_p
 - Énergie interne, **U**
 - Énergie libre, **A**
- Enthalpie, **H** = $U + PV$
- Entropie, **S**
- Exergie, **Ex**

Variables homologiques

- **M**, taille
- **V**, contour spatial
- **N**, nombres d'éléments
- **E**, ressources
 - E_c , dynamisme, créativité
 - E_p , rayonnement, charisme,
 - **U**, ressources propres
 - **A**, capacité d'action
- **H**, énergie transportée
- **S**..... !!! (à discuter)
- **Ex**, énergie utilisable

Définir un système

Variables d'état thermodynamiques

- **Non-additives (intensives)**

- Température, T
- Pression, P

- **Autres**

- Temps, t
- Échange de chaleur, Q
- Travail, W
- Puissance, $\mathcal{P} = W/t$

Variables homologiques

- T , capacité à interagir
- P , pression (sociale, économique)

- t , temps
- Q , échange, flux
- W , effort
- $\mathcal{P}$, activité réalisée

Premier et deuxième principe de la thermodynamique

Énergie, dissipation, efficacité, usages

système

Système fermé? Isolé? Ouvert?



rien

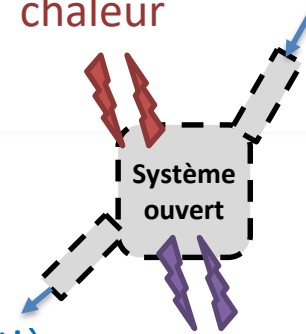
chaleur



travail

Échange immatériel

chaleur



travail

matière

Échange immatériel

Échange matériel

- Variation interne au système : $d_i S$
- Variation externe au système : $d_e S$

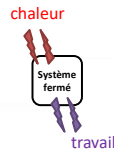
Évolution d'un système

Conservation de l'énergie

- **1^{er} principe : Conservation de l'énergie**

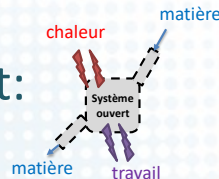
- Rien ne se perd
 - Transformation d'énergie en une autre

- Système fermé:



$$\Delta E_{cinet}^{syst} + \Delta E_{pot}^{syst} + \Delta U^{syst} = Q + W$$

- Système ouvert:



$$\Delta E_{cinet}^{syst} + \Delta E_{pot}^{syst} + \Delta U^{syst} = \Delta M^{mat}(H, cin, pot) + Q + W$$

@Goran Wall 1977. étude de la société suédoise

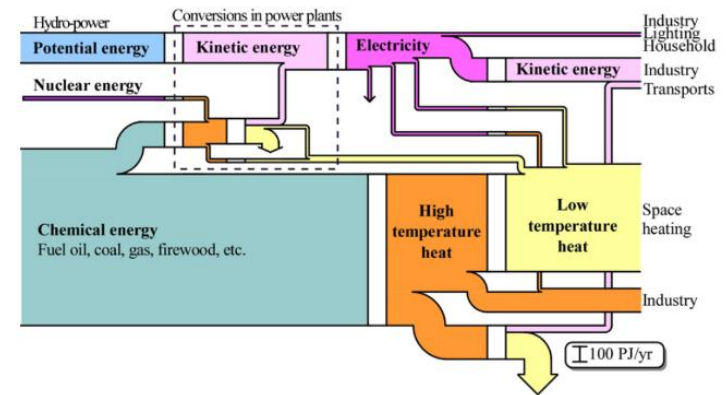


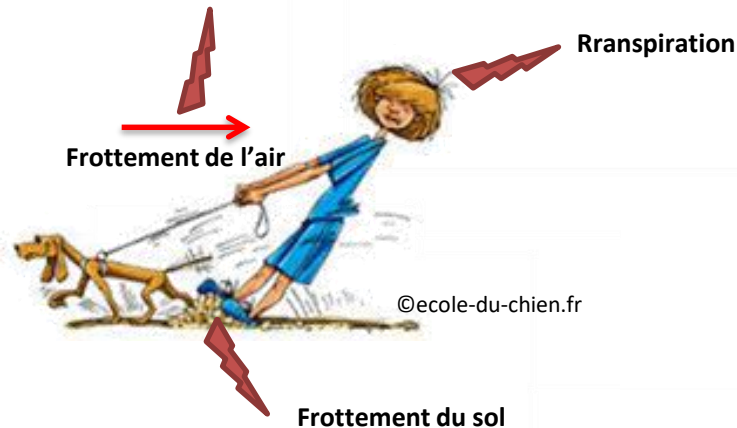
Figure 3.5 Conservation masse, énergie energy units.

Conservation masse, énergie
Quantité : énergie

Évolution d'un système

Dissipation de l'énergie

- 2^{ème} principe: dissipation d'énergie



- Production d'entropie

– Le long de la trajectoire d'évolution du système :

$$d_i S \geq 0$$

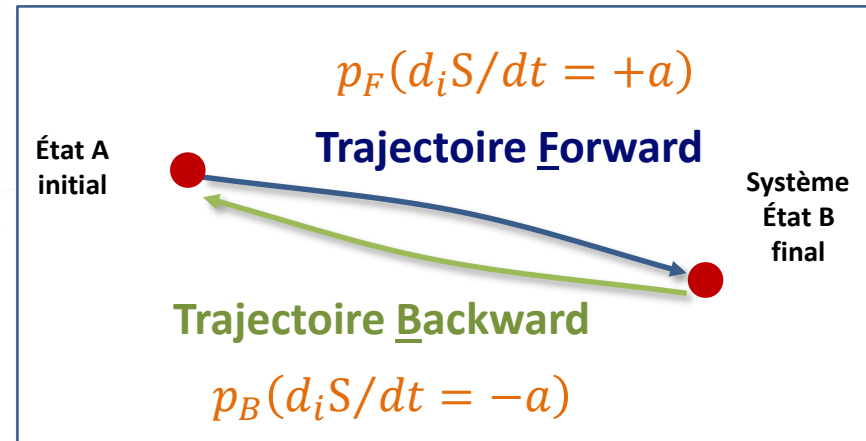
Réversible : $d_i S = 0$

Irréversible : $d_i S > 0$

Évolution d'un système

Transition entre deux états

- Théorème de fluctuation (Crooks)



$$\frac{p_F(+a)}{p_B(-a)} = e^{a t}$$

$$\frac{p_F(+a)}{p_B(-a)} = e^{a t + c} = e^{\text{effort} * \text{temps} + \text{connaissance}}$$

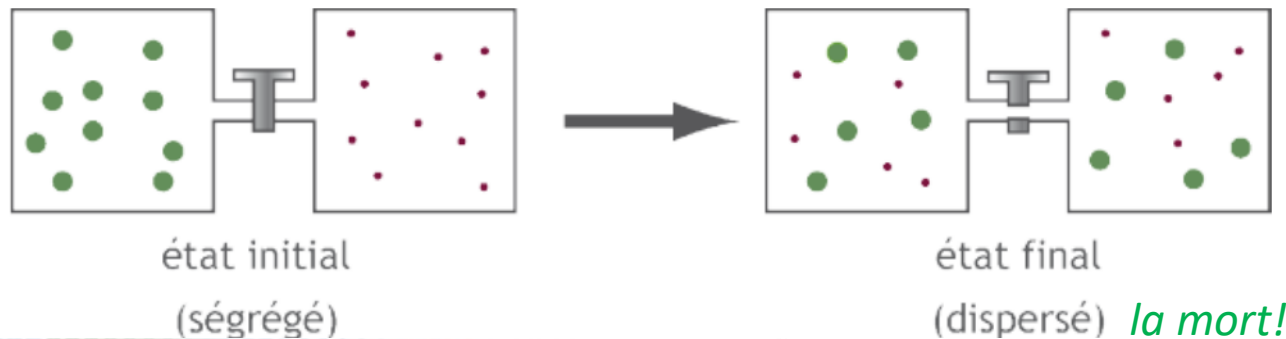
- Réversibilité microscopique et irréversibilité macroscopique
 - Petite taille, et tps fini : $e^{a t} \rightarrow 1$ donc réversibilité microscopique
 - Grande taille, et tps fini : $e^{a t} \gg 1$ donc irréversibilité macroscopique
- Pour atteindre B de façon réversible il faut un temps infini
 - $\frac{p_F(+a)}{p_B(-a)} = \text{const}$ pour $(a ; t) = (100 ; 1)$ ou $(1 ; 100)$ ou $(0,00001 ; 10000000)$

Évolution d'un système

Un système fermé et isolé évolue vers l'équilibre

- **2ème principe de la thermodynamique**

- « un système fermé et isolé (ni échange chaleur ni matière) va évoluer le long d'une trajectoire qui maximise son entropie pour atteindre l'état d'équilibre thermodynamique »



@J.Schwartzentrüber. Cours de thermo

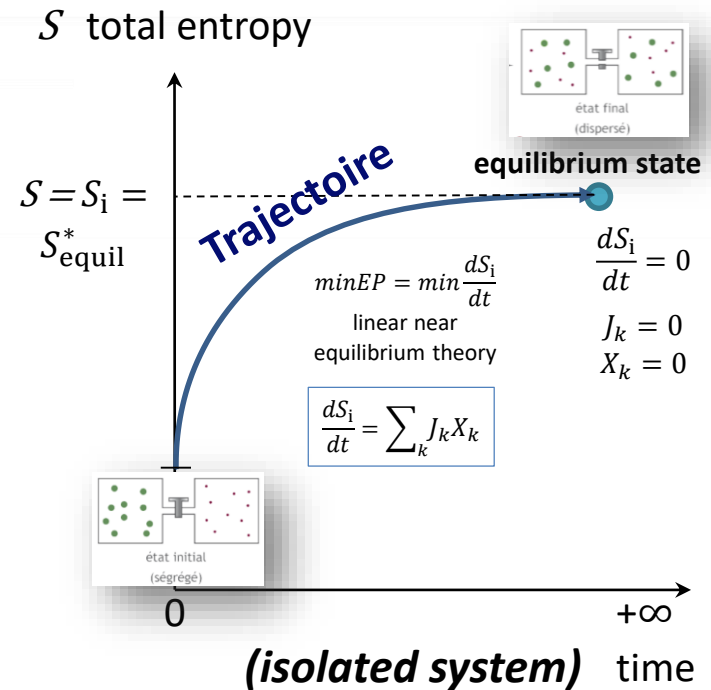
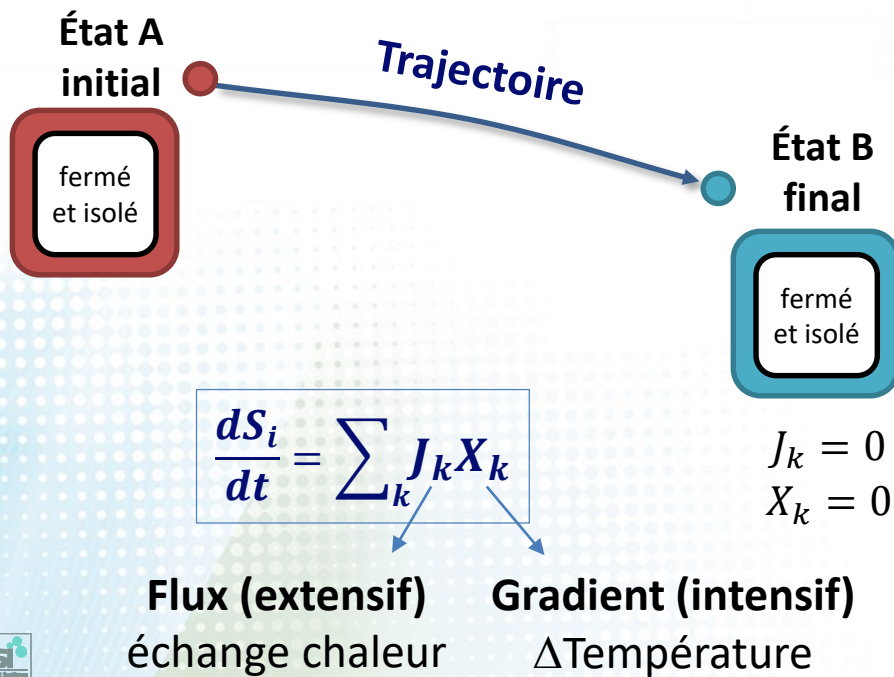
→ **L'entropie mesure le degré de dispersion de l'énergie ou de désorganisation spatiale et cinétique et interactionnelle**

Évolution d'un système

Variation d'entropie le long de la trajectoire d'évolution

- **Variation d'entropie interne**

- $diS / dt = \text{somme de [flux] x [force motrice/gradient]}$



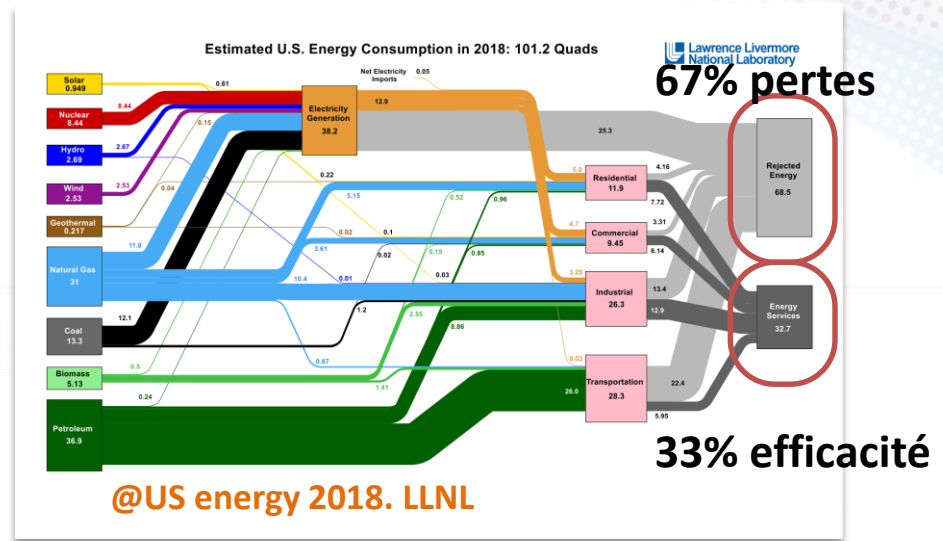
Efficacité énergétique

Exergie, irréversibilité incontournable, usages

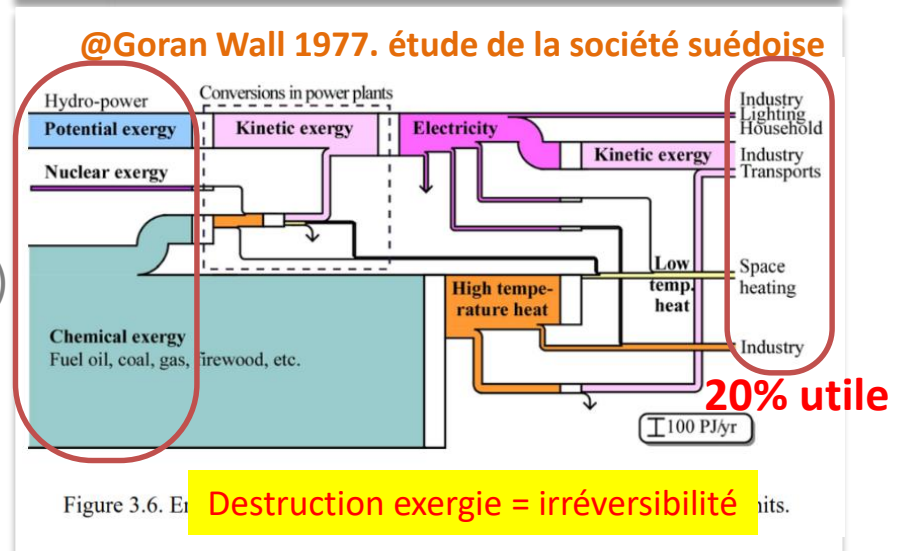
Exergie : l'énergie utile

Quantité et qualité de l'énergie

- **Quantité: 1^{er} principe**
 - Conservation de l'énergie



- **Qté et qualité: exergie**
 - Processus irréversible
 - Dissipation de l'énergie
 - Destruction d'exergie (énergie utile)
 - Syst. Fermé : $Ex = U - T_0 S$



Puissance, efficacité/rendement

Faut-il privilégier efficacité ou puissance ?

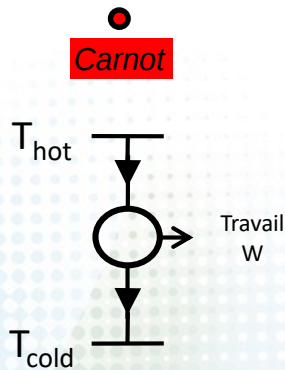


@C. Goupil (LIED)

- Machine thermique hypothétique

Réversible

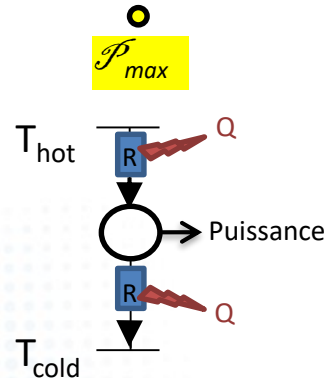
Dissipation nulle
Temps infini
Puissance nulle



$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{W}{Q_{\text{in}}} = 1 - \frac{T_{\text{cold}}}{T_{\text{hot}}}$$

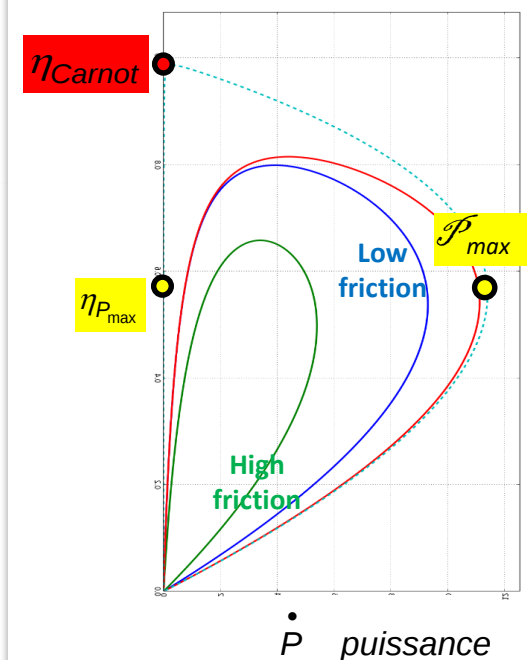
Endoréversible

Dissipation > 0
Temps fini
Puissance > 0



$$\eta_{\text{CurzonAlborn}} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_{\text{in}}} = 1 - \sqrt{\frac{T_{\text{cold}}}{T_{\text{hot}}}}$$

η efficacité



Conférence C. Goupil (2014): efficacité énergétique, sobriété et imaginaire social :
<https://www.youtube.com/watch?v=bjzUpZffPmY>

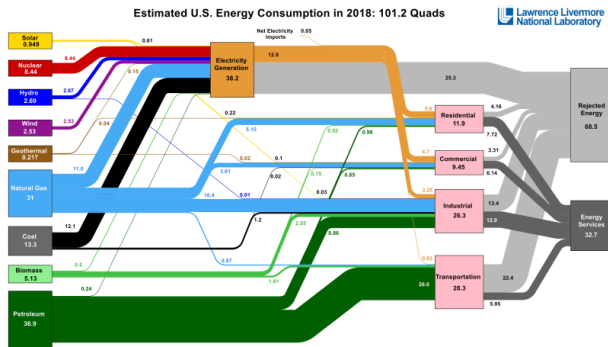
Puissance, efficacité/rendement

La nécessaire irréversibilité des processus



@C. Goupil (LIED)

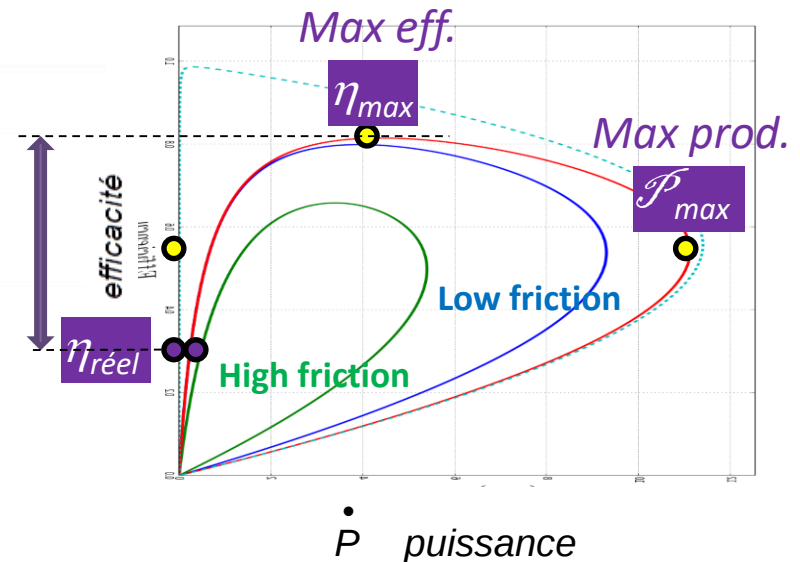
- Machine thermique réelle



67% pertes

33% efficacité

Gain
potentiel
maximum



- Le gain énergétique potentiel n'est pas d'atteindre une efficacité égale à $100\% \eta_{\text{carnot (réversible)}}$ mais une d'efficacité compatible avec un fonctionnement endoréversible

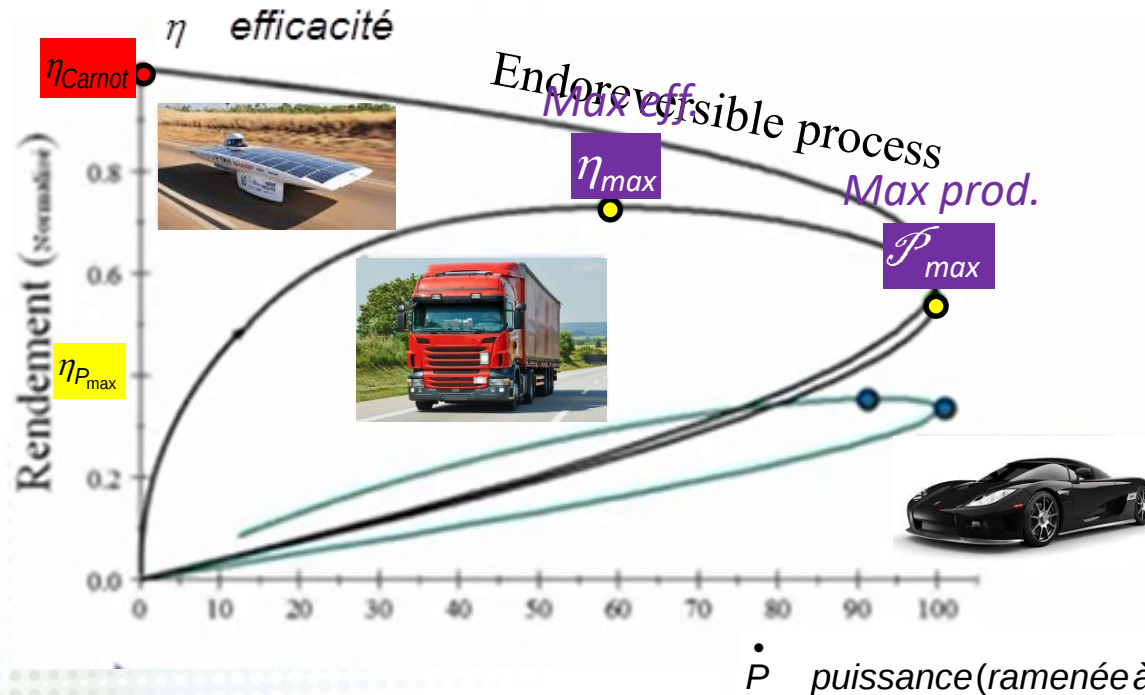
Conférence C. Goupil (2014): efficacité énergétique, sobriété et imaginaire social :
<https://www.youtube.com/watch?v=bjzUpZffPmY>

Puissance, rendement, usage

De la question des usages, décroissance et sobriété



@C. Goupil (LIED)



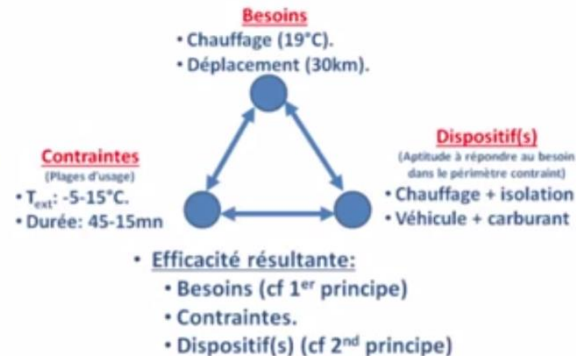
- Réduire les pertes ?
 - Syn. : $\nearrow$ Efficacité et donc $\searrow$ puissance, production (=décroissance)
- Mais pour quel **usage**?
 - $\nearrow$ Efficacité $\rightarrow$ $\nearrow$ contraintes, $\searrow$ flexibilité $\rightarrow$ chgt des pratiques

Efficacité énergétique et usages

Qualifier les pratiques pour la mise en place de solutions efficaces

- Adaptabilité d'un système selon ses besoins, contraintes et dispositifs

Approche globale



@C. Goupil (LIED)

Analogie biologique.

Besoins

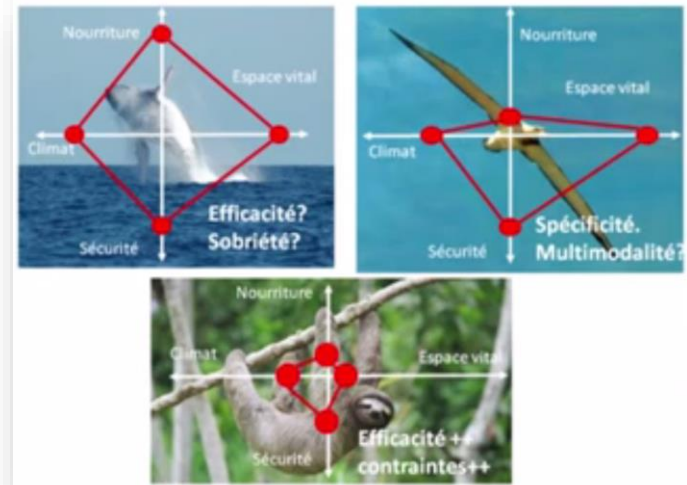
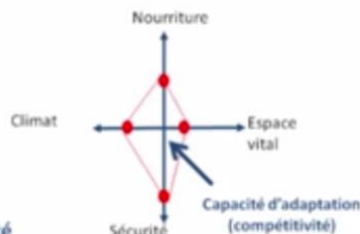
1. Se nourrir
2. Se reproduire
3. Se protéger
4. Rester actif

Contraintes (Biotope)

- Climat : Stabilité-Variabilité
- Nourriture : Abondance-Carence
- Sécurité : Absence-présence de prédateurs
- Espace vital : Explorable-non explorable (multimodalité)

Dispositif(s): animal

Multimodalité, régulation thermique, régime alimentaire...

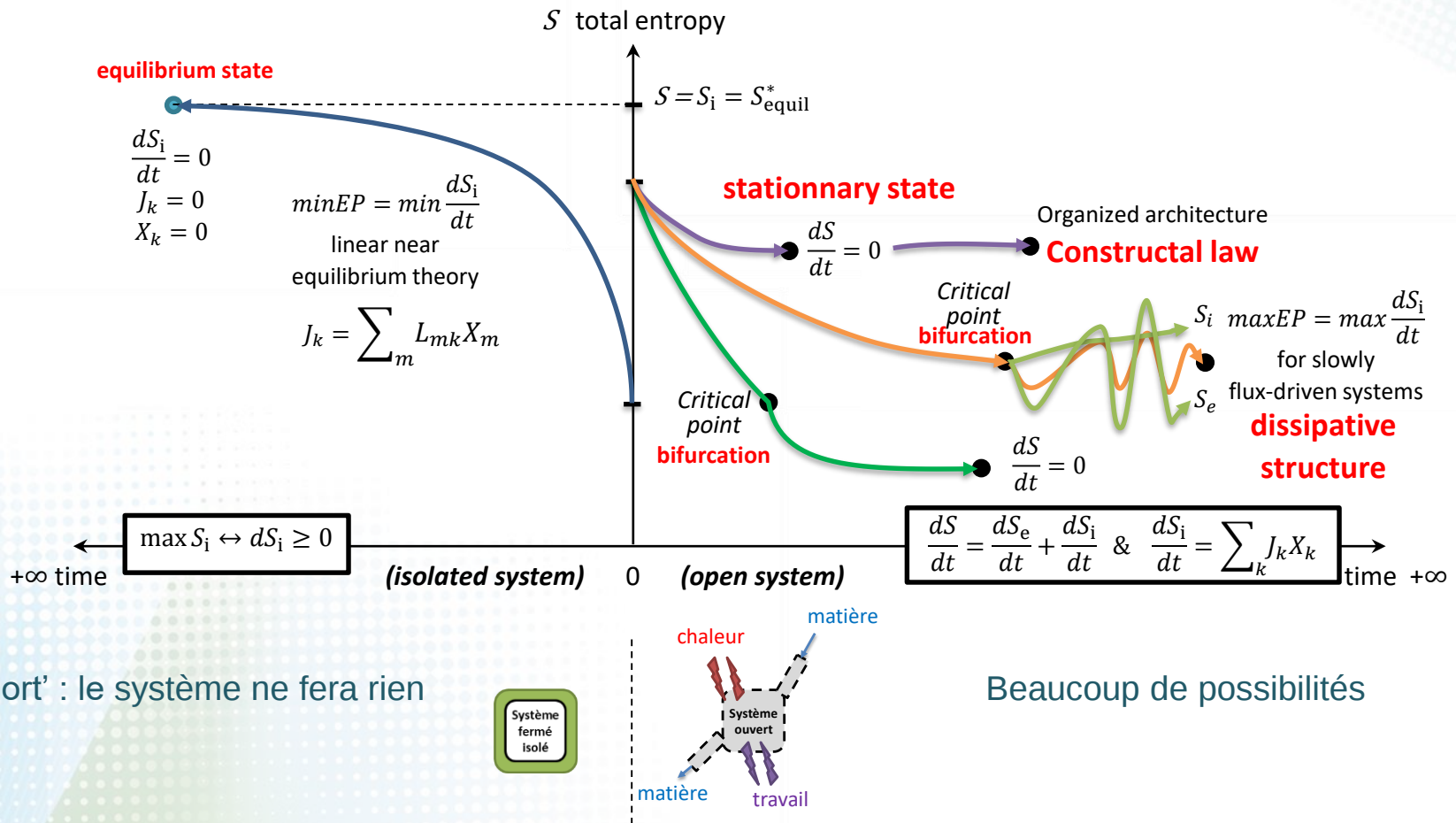


Évolution et résilience

Système critique auto-organisé

Évolution d'un système ouvert

Les systèmes réels sont des systèmes ouverts

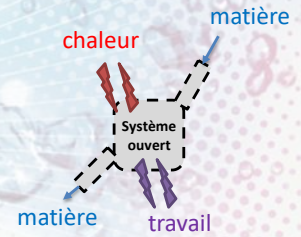


‘Mort’ : le système ne fera rien

Beaucoup de possibilités

Évolution d'un système ouvert

États stationnaires

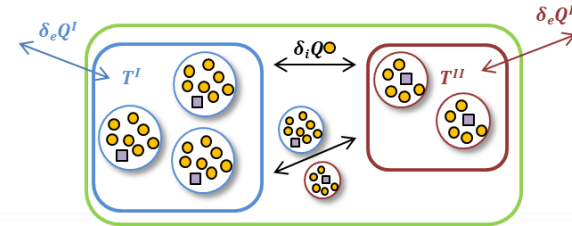


- **Production d'entropie interne : Relation flux – force**

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d_i S}{dt} + \frac{d_e S}{dt}$$



$$\frac{d_i S}{dt} \geq 0 \quad \text{et} \quad \frac{d_i S}{dt} = \sum_k \underset{\text{Flux extensif}}{\text{flux}} \cdot \underset{\text{Gradient intensif (force motrice)}}{\text{affinity}} = \sum_k J_k X_k$$



- **Condition de stationnarité**

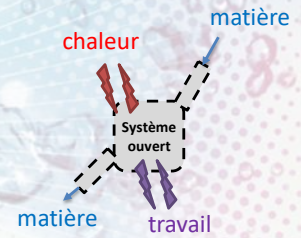
$$\frac{dS}{dt} = 0 = \frac{d_i S}{dt} + \frac{d_e S}{dt} \Leftrightarrow \frac{d_i S}{dt} \geq 0 \quad \text{et} \quad \frac{d_e S}{dt} < 0$$

– Le point stationnaire n'existe que si le système est ouvert

- Nécessaire échange avec l'extérieur

Évolution d'un système ouvert

Système dissipatif (prigogine)

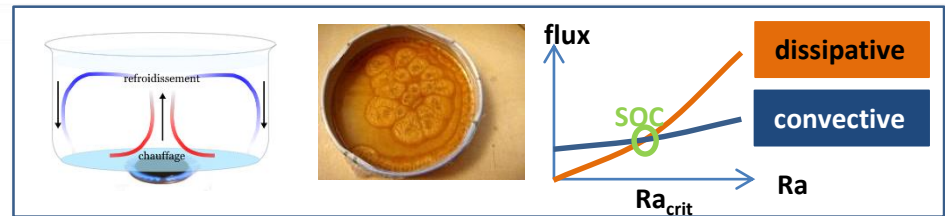


- Au delà d'un seuil critique, le système s'auto-organise pour maximiser la dissipation du flux entrant.

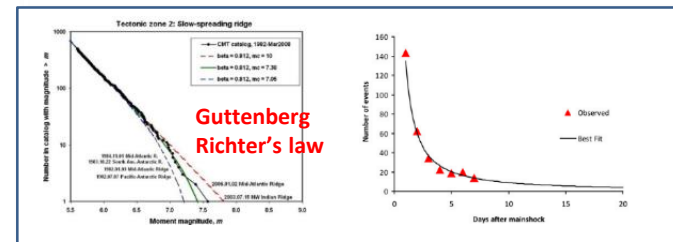
– Organisation spatiale / temporelle

- Cellules de Bénard

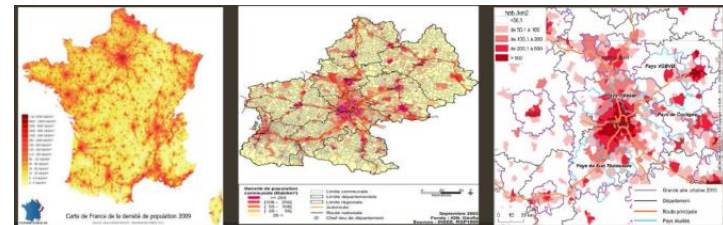
flux_{thermique} → convection



- flux_{thermique} → tremblements de terre et répliques



- Flux de population → Densité de population, taille habitat

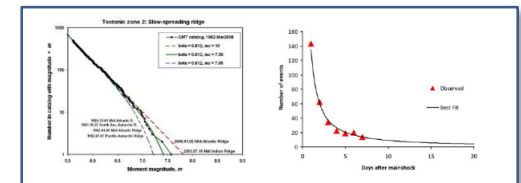
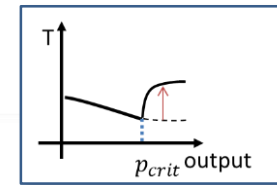


SOC : 4 propriétés (Per Bak)

Émergence d'un article scientifique vs taux de publication par auteur

• Propriétés

1. Amplification de fluctuations issues d'une étincelle
 - Au delà d'un seuil critique,
2. Brisure de symétrie au seuil critique/ bifurcation
 - Émergence (organization spatiale, mvt, ...)
3. Apparition de connaissance sur le système / structure car $S_{i|SOC} < S_{i|equil}$.
 - L'environnement extérieur identifie une organisation
 - L'énergie libre /capacité d'action $A = U - TS$ augmente.
4. Invariance par changement d'échelle = $1/(\text{fréquence})^\alpha$



• Limitations du postulat d'un SOC

- Il faut identifier les phénomènes sous-jacents (prop 1-2-3) dont une conséquence sera la manifestation d'une loi puissance (prop 4)... et pas l'inverse !

[homologie] Capacité d'action

À propos de la néguentropie

- **2nd principe thermodynamique**

- Dissipation = Destruction d'exergie (énergie utile)

- Syst. Fermé : $Ex = U - T_0 S$

- **Application aux systèmes sociaux**

- Raisonnement inverse par homologie :

- augmenter sa capacité d'action en organisant le système

- État initial : équilibre ($S_i|_{equil} = \max S_i$)

- État final : organisé ($S_i|_{soc} < S_i|_{equil}$)

$$\Delta A = \left(A_{final}^{syst} - A_{initial}^{syst} \right) = \Delta U^{syst} + T(-\Delta_i S^{syst})$$

↓
Énergie libre
Capacité d'action

↓
Chgt ressources
internes

↓
Degré d'organisation

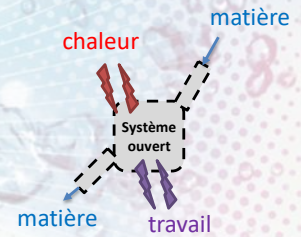
Capacité de mobilité
Faible si contrainte forte

$$\text{neguentropie} = (-\Delta_i S^{syst}) = -\left(S_{final} - S_{initial}^* \right) > 0$$

@E. Schrödinger 1944 'What is life'

Évolution d'un système ouvert

Évolution d'un SOC

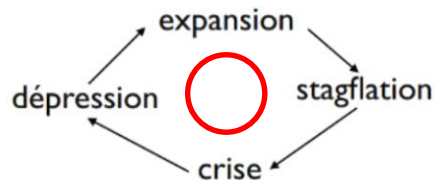


P. Bak

• Évolution cyclique imprédictible

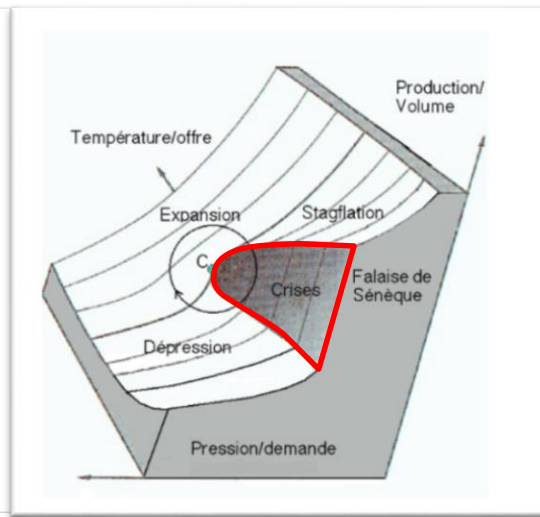
F. Roddier

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

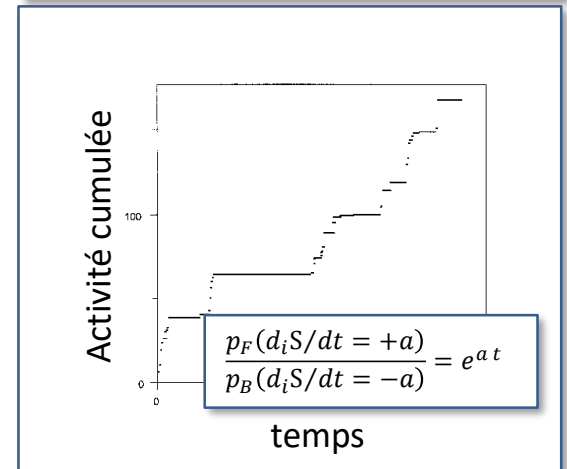
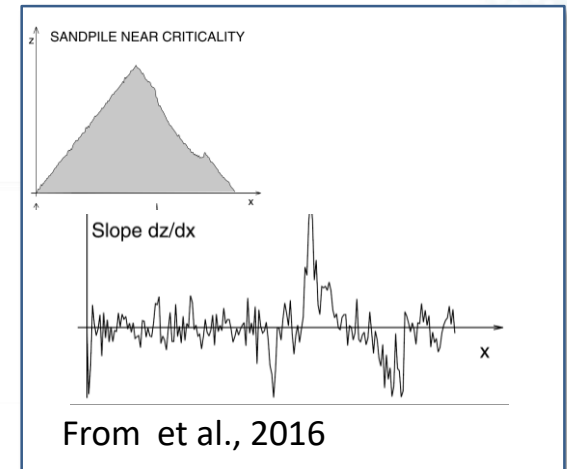


Période des cycles

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

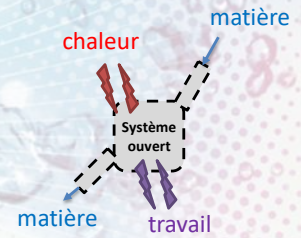


Théorie des équilibres ponctuels



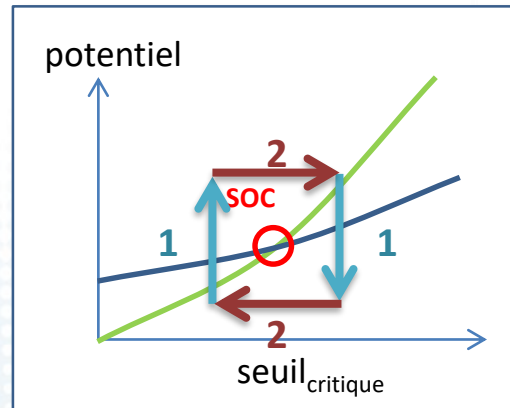
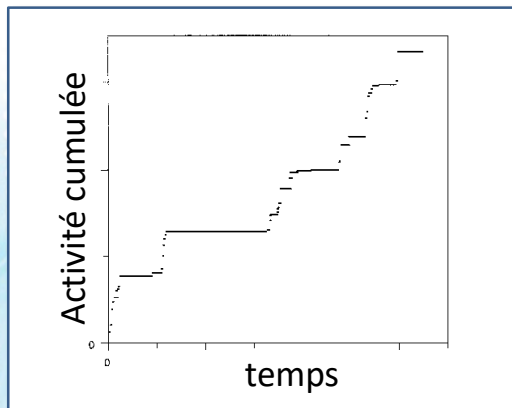
Évolution d'un système ouvert

Résilience d'un SOC



• Évolution cyclique imprédictible

Local	Rapide	Individu	$\max (d_i S/dt)$
Global	Lent	Collectif	$\min (d_i S/dt)$



Un labo comme SOC ?



1. Environnement Stable (faiblement perturbé) : adaptation du collectif

- Financement distribué
- Coopération et développement en symbiose des travaux d'équipes
- Discours interdisciplinaire
- Assignation des tâches sur le volontariat



2. Environnement fortement perturbé : adaptabilité des individus les plus affutés

- Financement par projet
- Compétition favorisant les petites unités/individus réactifs
- Discours de l'excellence
- Pression externe: taches administratives, gestion de la pénurie de moyens

Limites de la thermodynamique actuelle

Application aux systèmes sociaux

- **As-t-on le droit de séparer des échelles ?**

- Les interrelations entre les échelles prive la thermodynamique de son postulat qu'à une échelle plus grande les comportements sous-jacents sont indiscernables (moyennés)



- **Effet mémoire**

- La relation de Gibbs, postule des événements indépendants $S = -k \sum_i p_i \ln p_i$
- Chaîne de Markov
- Instantanéité des échanges

Merci de votre attention