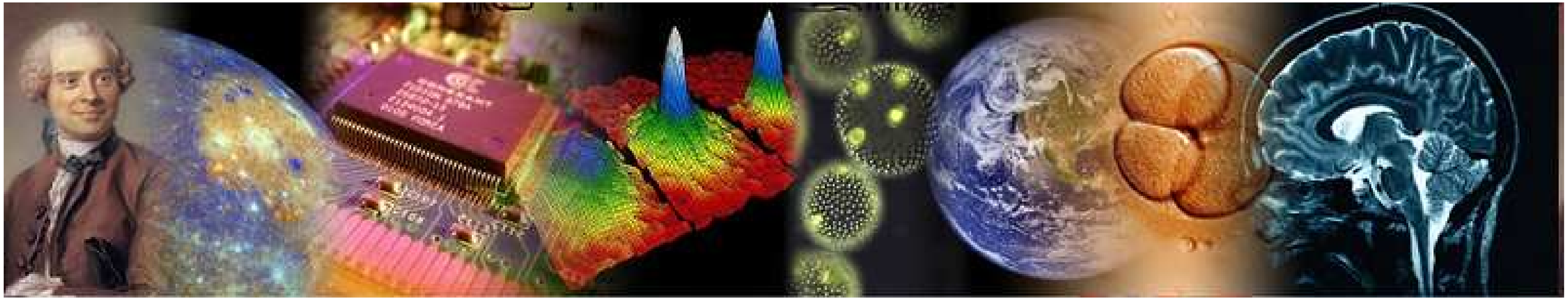
Crises en Physique



Transitions de phase
Instabilités, Chaos et Turbulence
Intermittence et Hétérogénéités

Olivier Dauchot, CEA-Saclay

D'Alembert, Orsay 24/11/2010

cea GIT

Sommaire

- Introduction : Phénomène critique, Catastrophes, Chaos, Turbulence, Avalanches

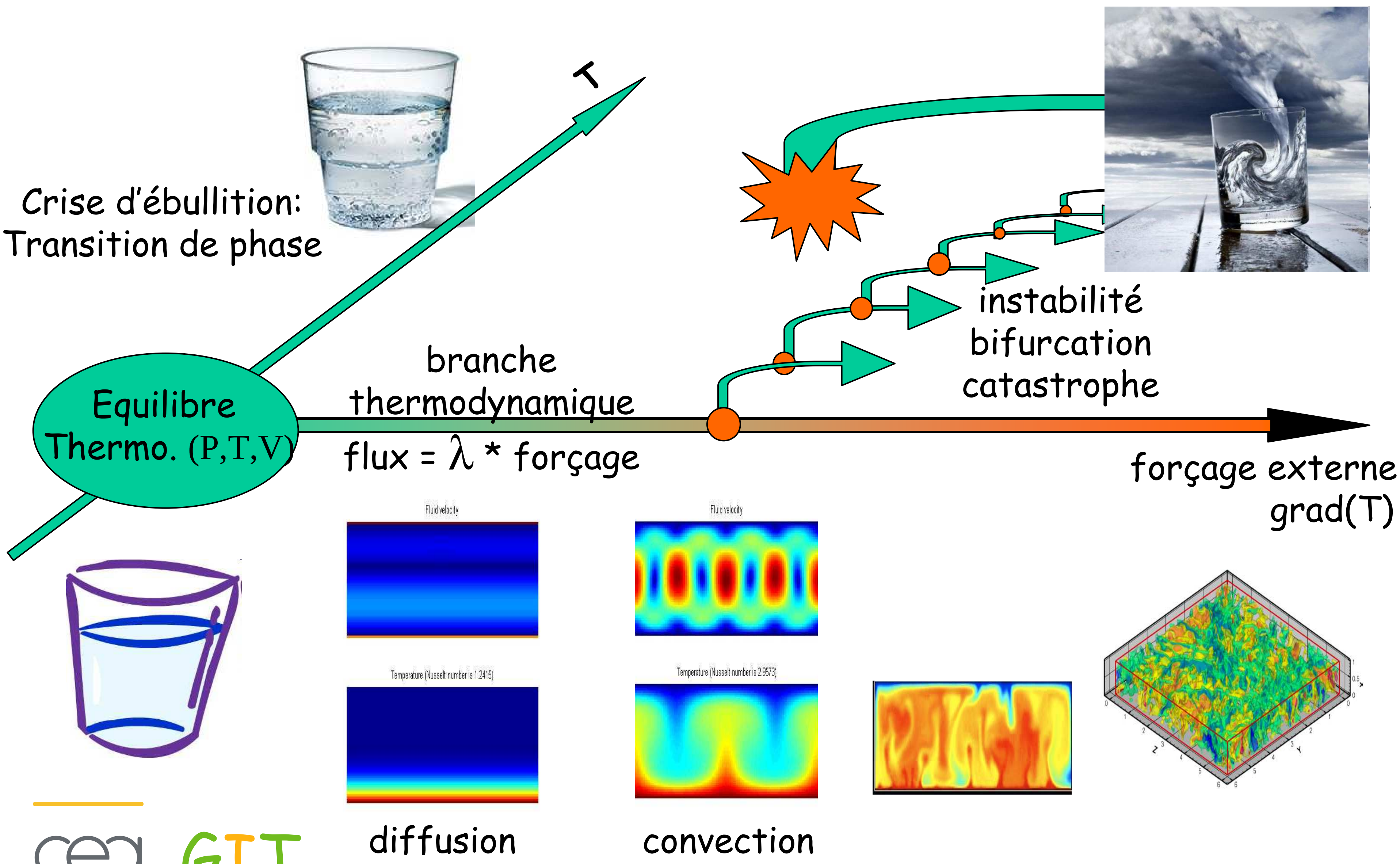
- Transition de phase à l'équilibre : l'ébullition
  - Opalescence critique : fluctuations à toutes les échelles

- Instabilité :
  - Diagramme de Bifurcation
  - Cascade de Feigenbaum, Chaos, Déterminisme et Prédictibilité

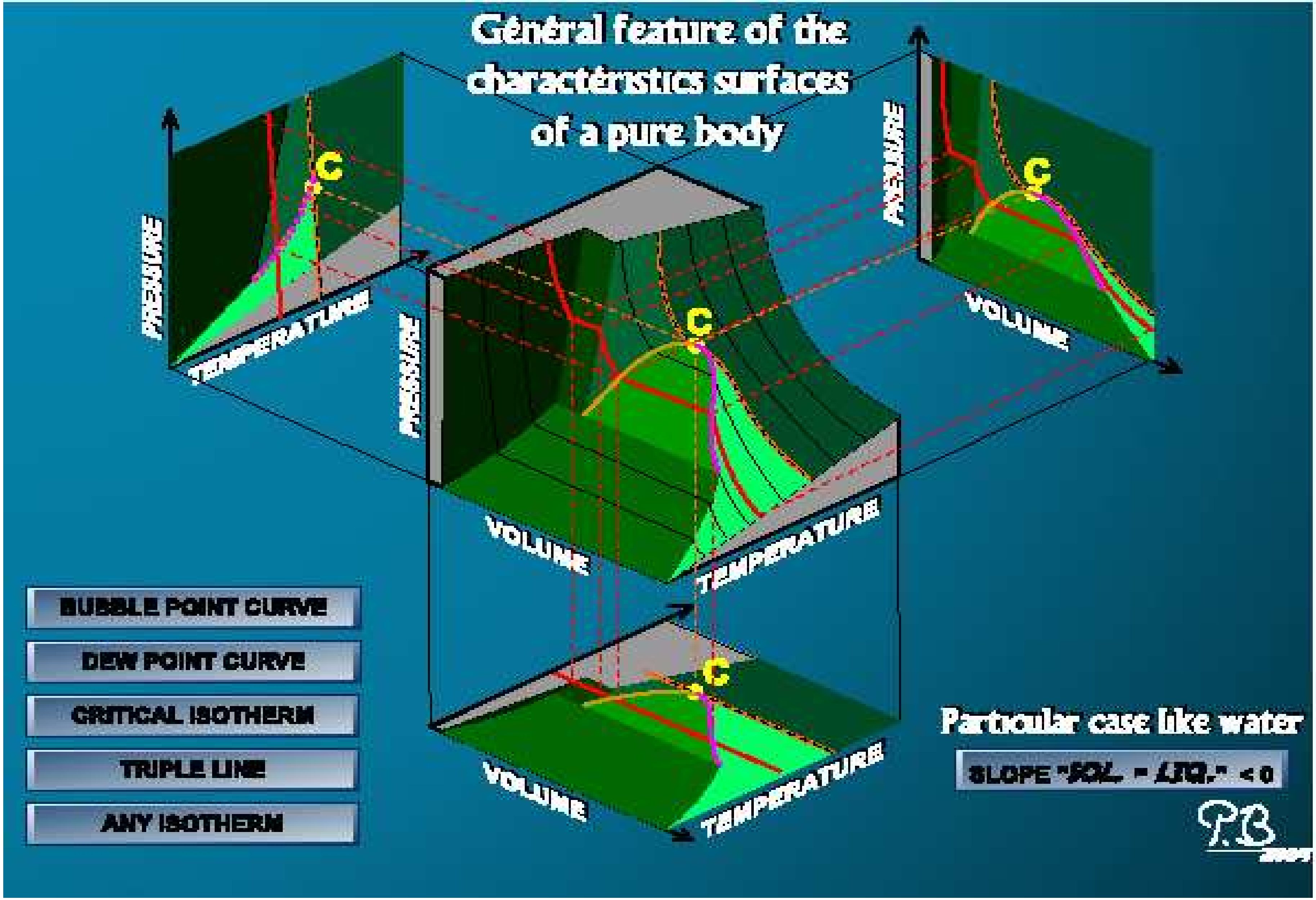
- Turbulence
  - A la Landau, cascade de Richardson et scaling de Kolmogorov
  - Intermittence : Bouffées turbulentes et filaments de vorticité
  - Turbulence sous-critique et coexistence laminaire turbulent

- Synthèse et Perspectives
  - Autres phénomènes de crises
  - Crises présentes et crises à venir…

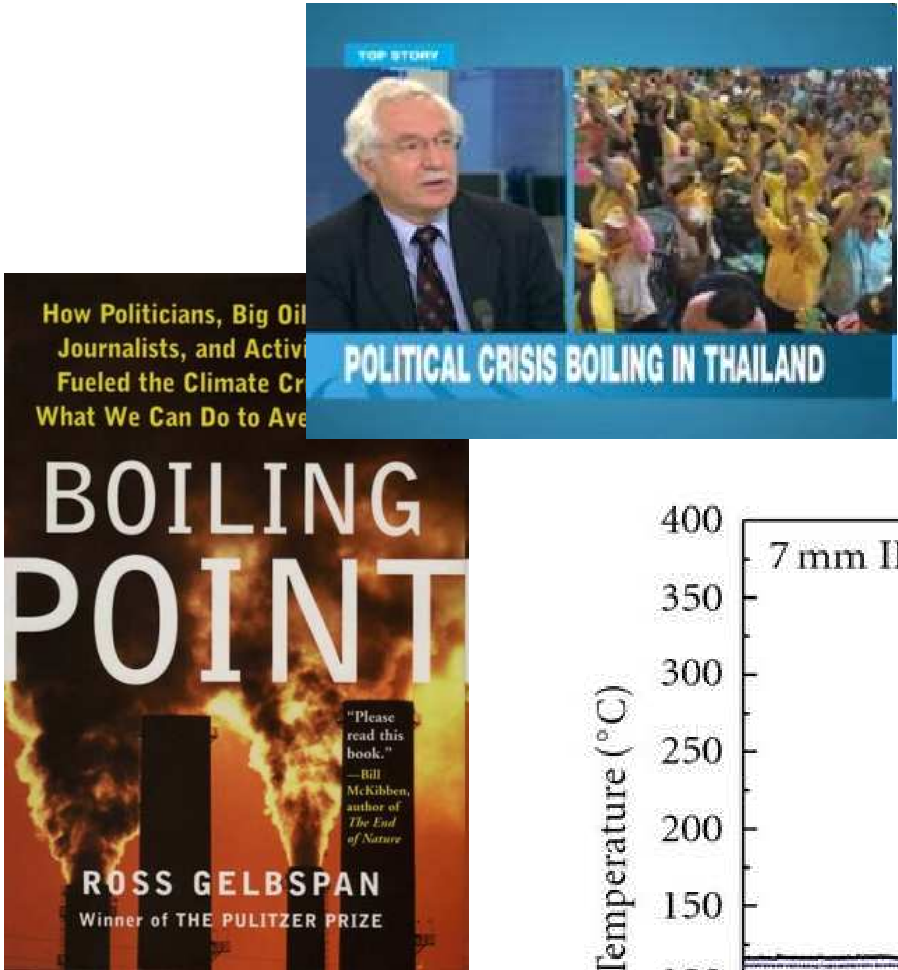
De l'équilibre à la turbulence : les crises en physique

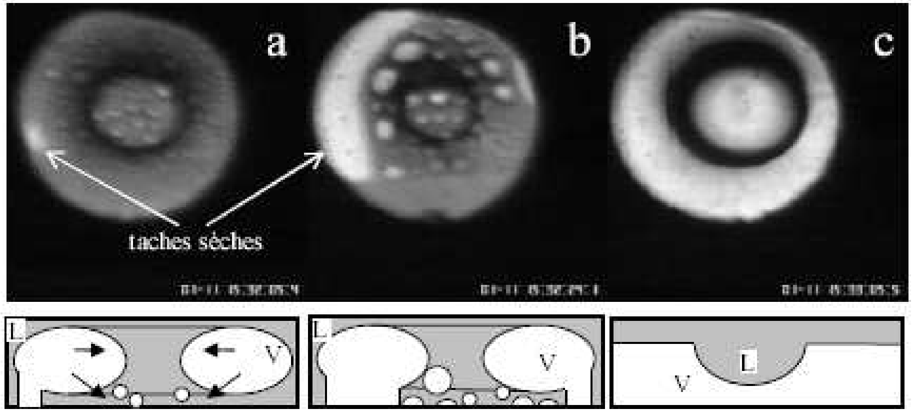


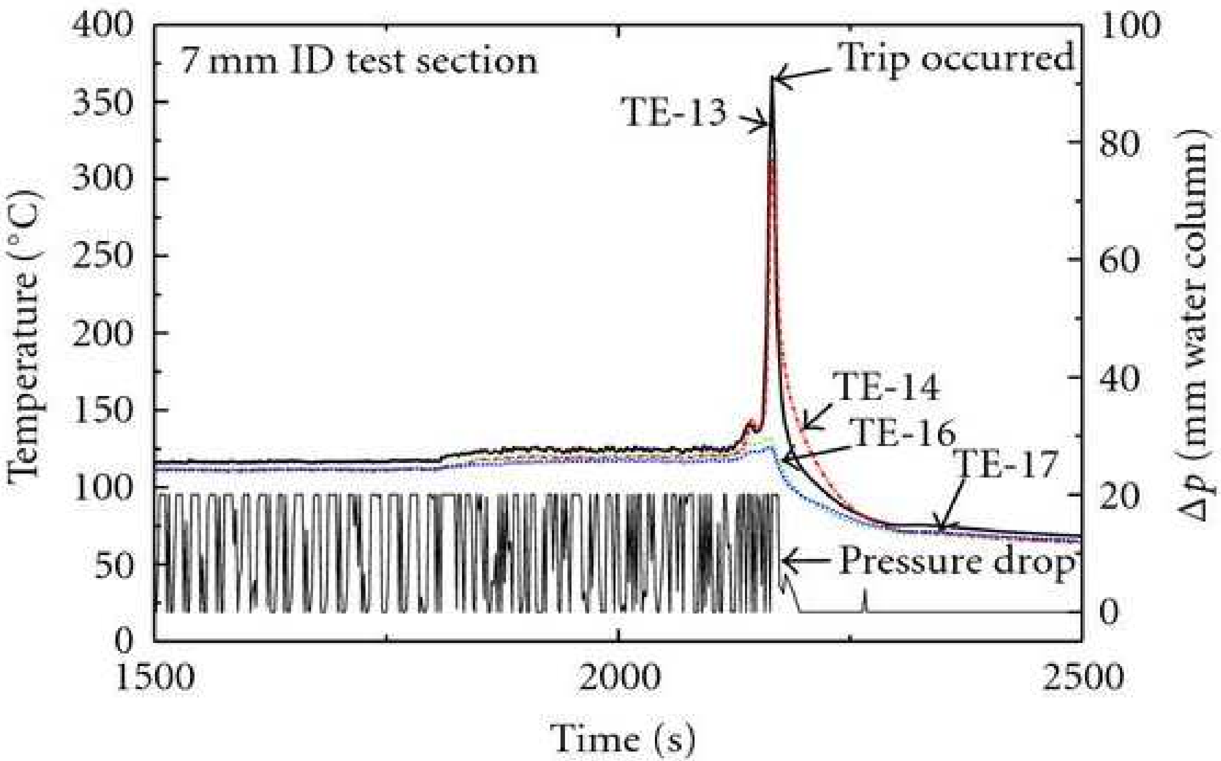
Transition de phase d'équilibre : l'ébullition



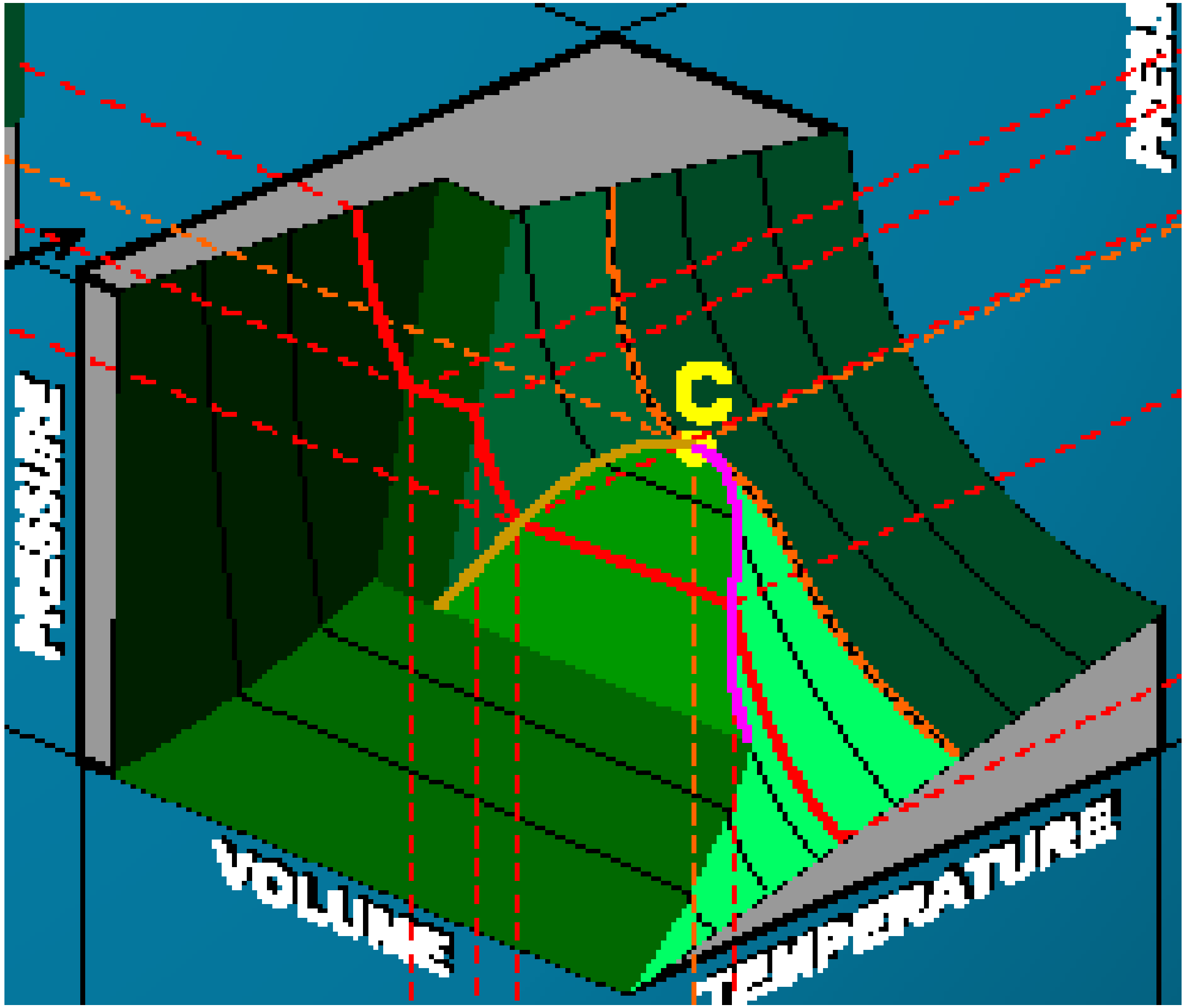
La crise d'ébullition : transition du premier ordre

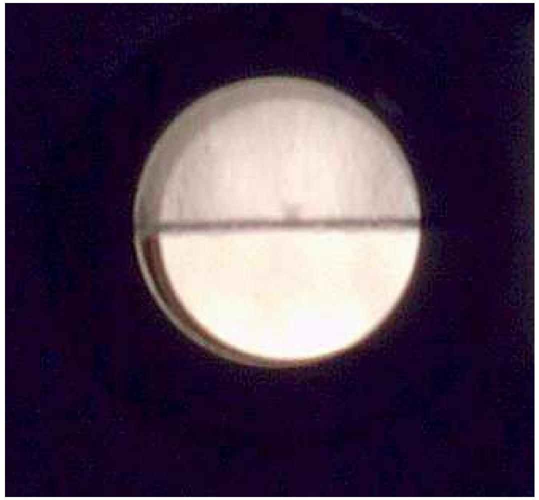


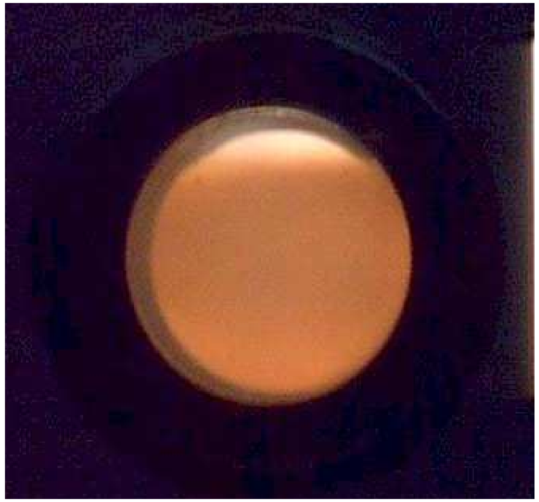




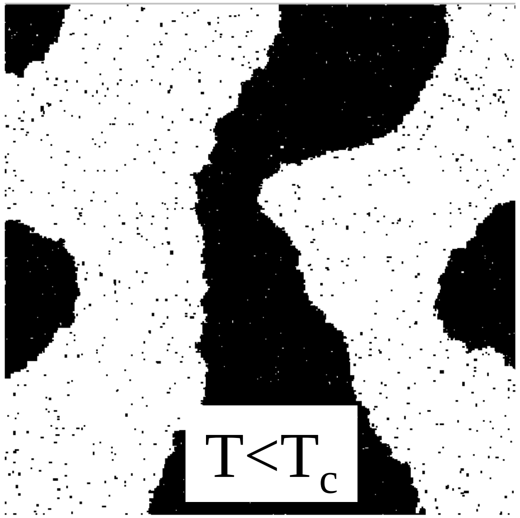
Opalescence critique : transition du second ordre

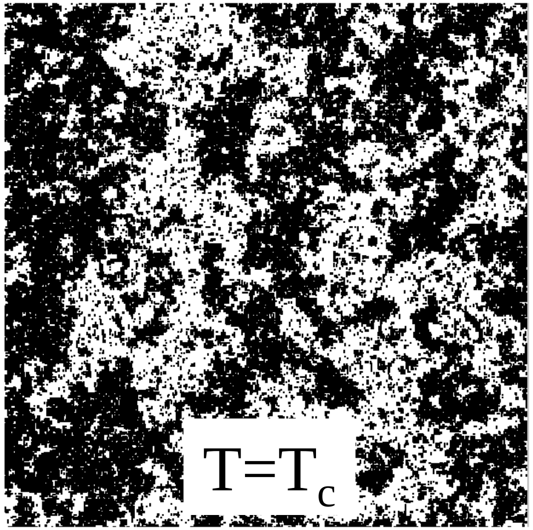


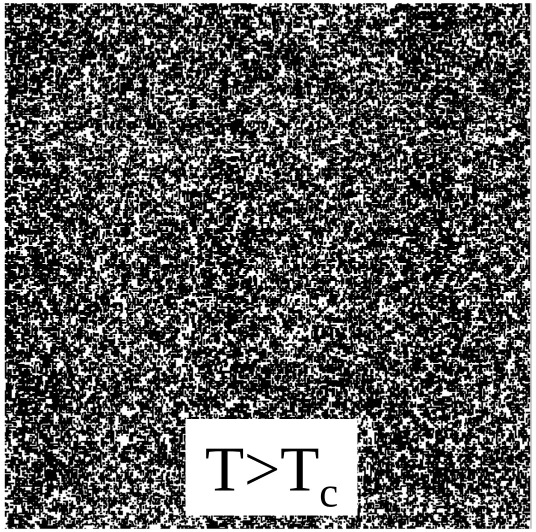


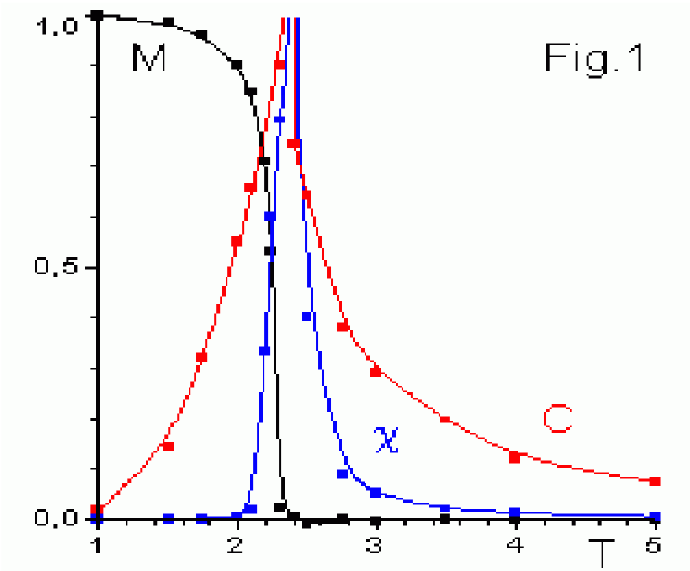


Fluctuations critiques , exemple du modèle d'Ising







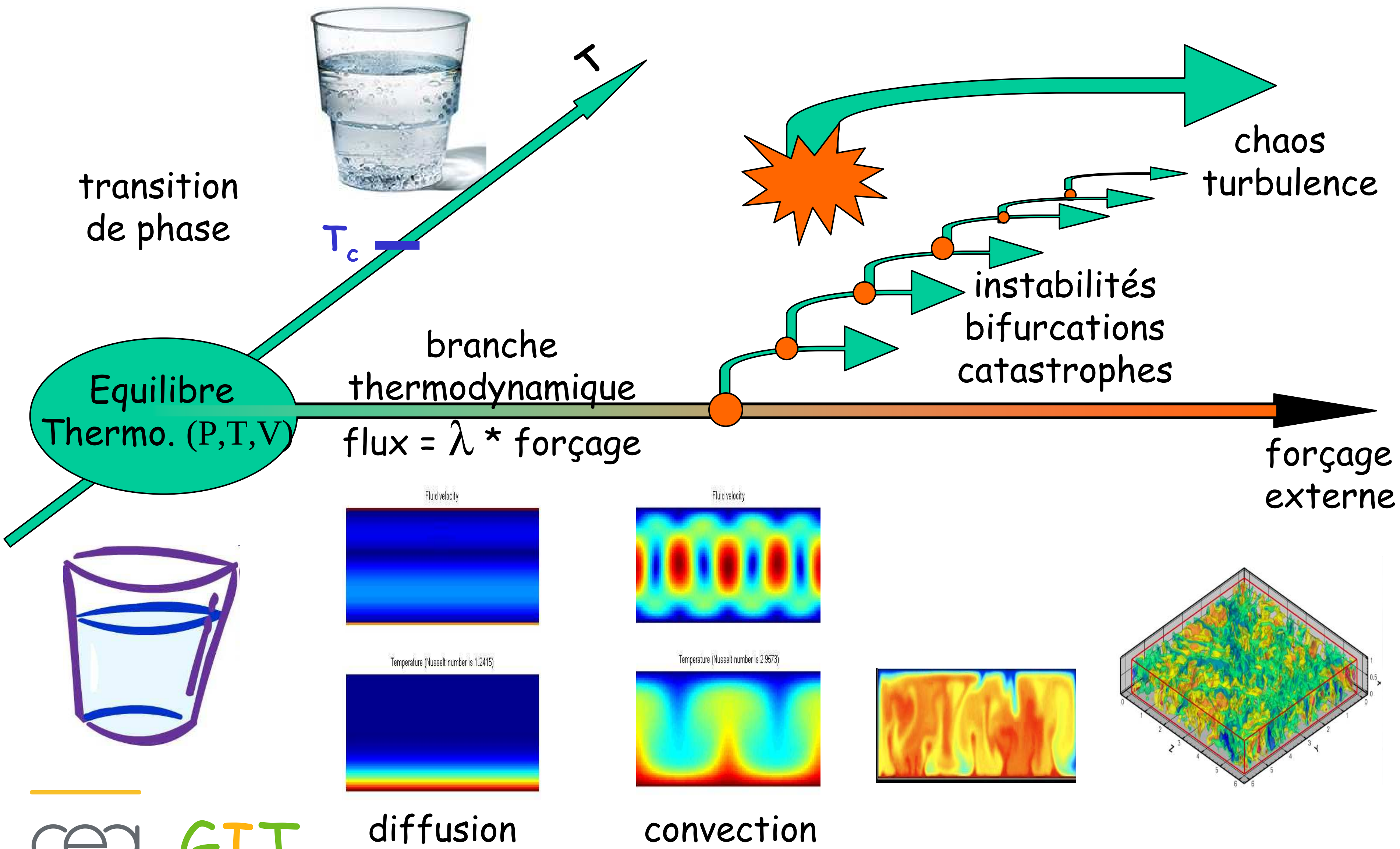


$$H = -J \Sigma s_i s_j$$

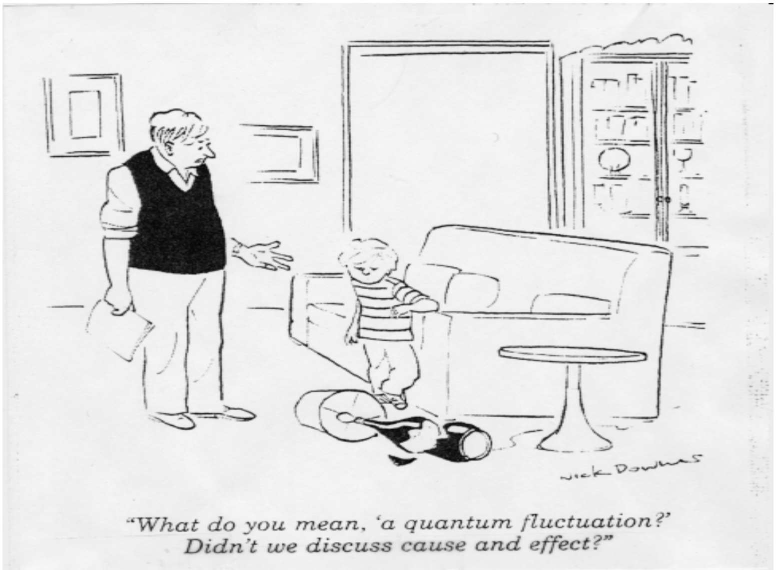
- Fluctuations à toutes les échelles
- Pas de taille caractéristique
- Divergence de la longueur de corrélation
  => Divergence de la susceptibilité

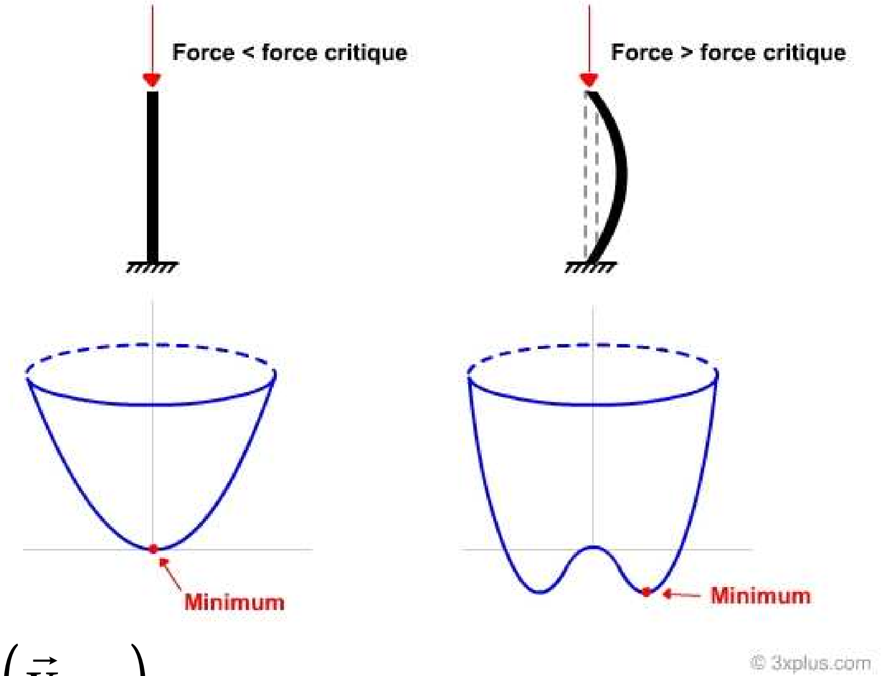
Crise = Transition de phase

De l'équilibre à la turbulence : les crises en physique



Instabilité d'un système macroscopique





- Equation d' évolution : $$\frac{d\vec{X}}{dt} = F\left(\vec{X}, \mu\right)$$
- Solution stationnaire : $$\frac{d\vec{X}}{dt} = 0 \;\Rightarrow\; \vec{X}_0(\mu)$$
- Stabilité ? = Réponse à une perturbation δX ?

Stabilité : Réponse à une perturbation δX

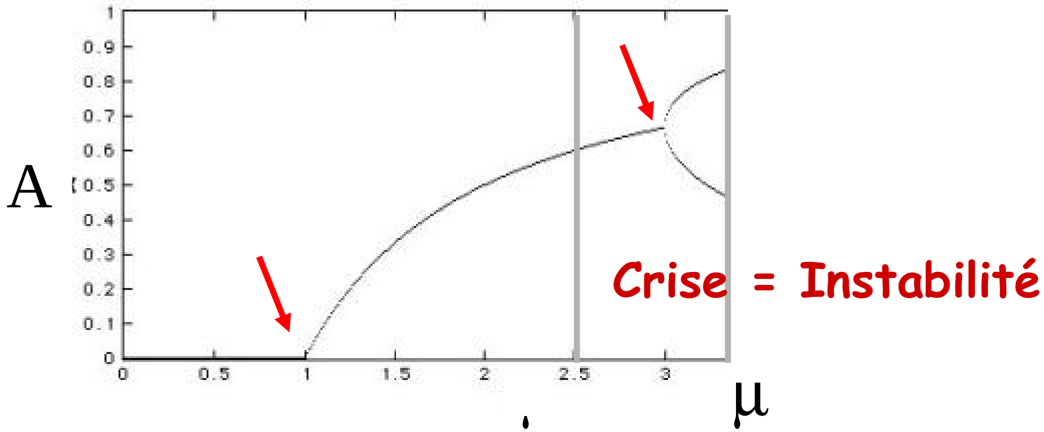
$$\frac{d(\vec{X}_0+\delta\vec{X})}{dt} = F\left(\vec{X}_0+\delta\vec{X},\mu\right) = F\left(\vec{X}_0,\mu\right) + \left.\frac{DF}{D\vec{X}}\right|_{\vec{X}_0}\delta\vec{X} + \left.\frac{D^2F}{D\vec{X}D\vec{X}}\right|_{\vec{X}_0}\delta\vec{X}\otimes\delta\vec{X} + \dots$$

$$\frac{d(\delta\vec{X})}{dt} = \boxed{\left.\frac{DF}{D\vec{X}}\right|_{\vec{X}_0}\delta\vec{X}} + \boxed{\left.\frac{D^2F}{D\vec{X}D\vec{X}}\right|_{\vec{X}_0}\delta\vec{X}\otimes\delta\vec{X}} + \dots$$

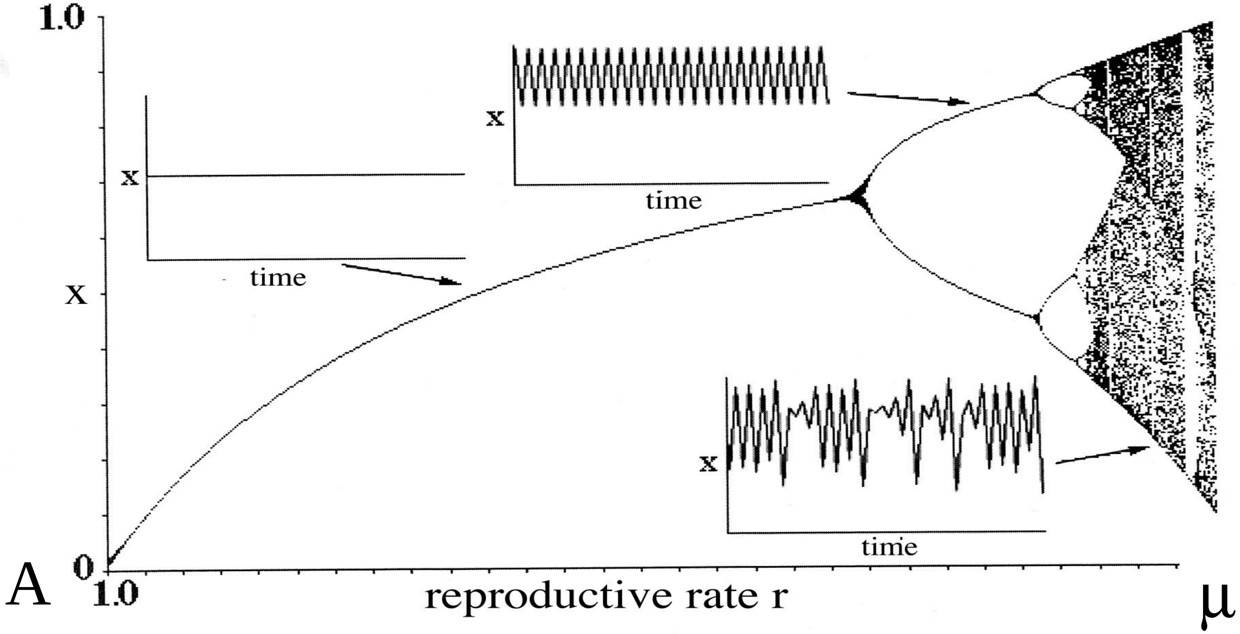
- Etude de **stabilité linéaire** => mode instable = une valeur propre de l'opérateur linéaire devient positive en passant par zéro $\lambda(\mu)=0$ => $\mu=\mu_c$

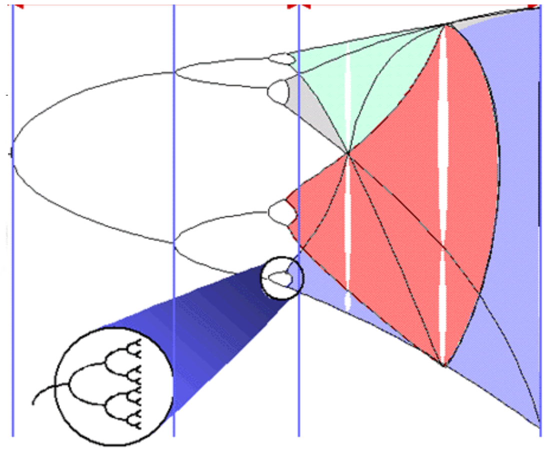
- **Saturation non-linéaire** => dépendance de l'amplitude A du mode instable au-delà du seuil d'instabilité (par ex pour des non linéarités quadratiques $A(\mu)=\mu^{1/2}$

- Diagramme de bifurcation :
  - $\mu<\mu_c$: $\delta\vec{X}(t)=\delta\vec{X}(0)e^{-|\lambda|t}$
  - $\mu>\mu_c$: $\delta\vec{X}(t)=\delta\vec{X}(0)\boxed{e^{+|\lambda|t}}$



Chaos et Cascade de Feigenbaum





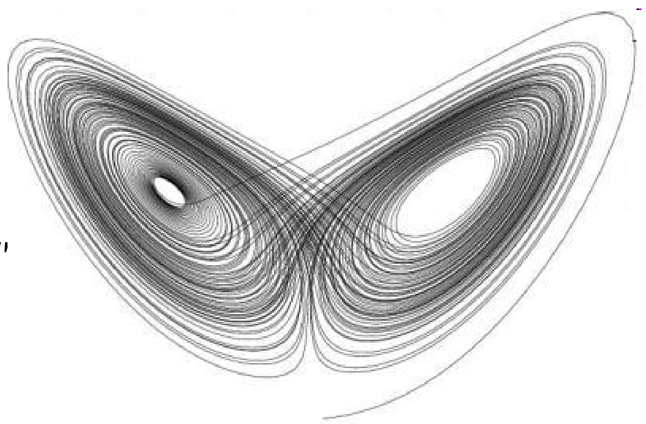
- Equilibre = Point fixe
- Bifurcation de Hopf => Cycle limite => Oscillations
- Bifurcations successives => Attracteurs étranges => Route vers le chaos

cea GIT

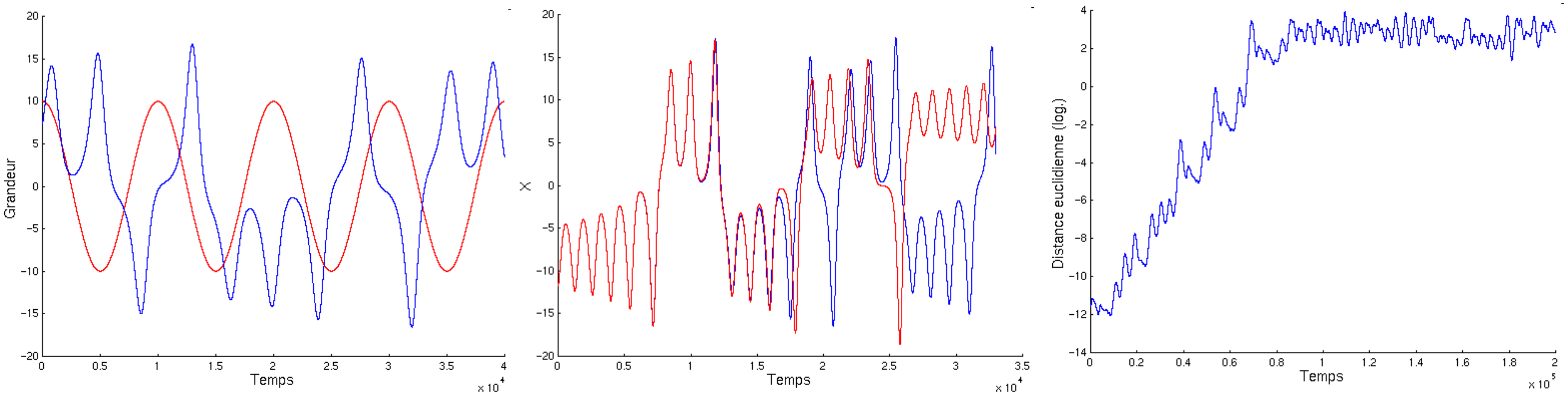
Chaos : déterministe mais imprédictible !

A few centuries ago, for want of a nail, an entire kingdom was lost!

"For want of a nail, the shoe was lost;
For want of a shoe, the horse was lost;
For want of a horse, the rider was lost;
For want of a rider, a message was lost;
For want of a message the battle was lost;
For want of a battle, the kingdom was lost!"

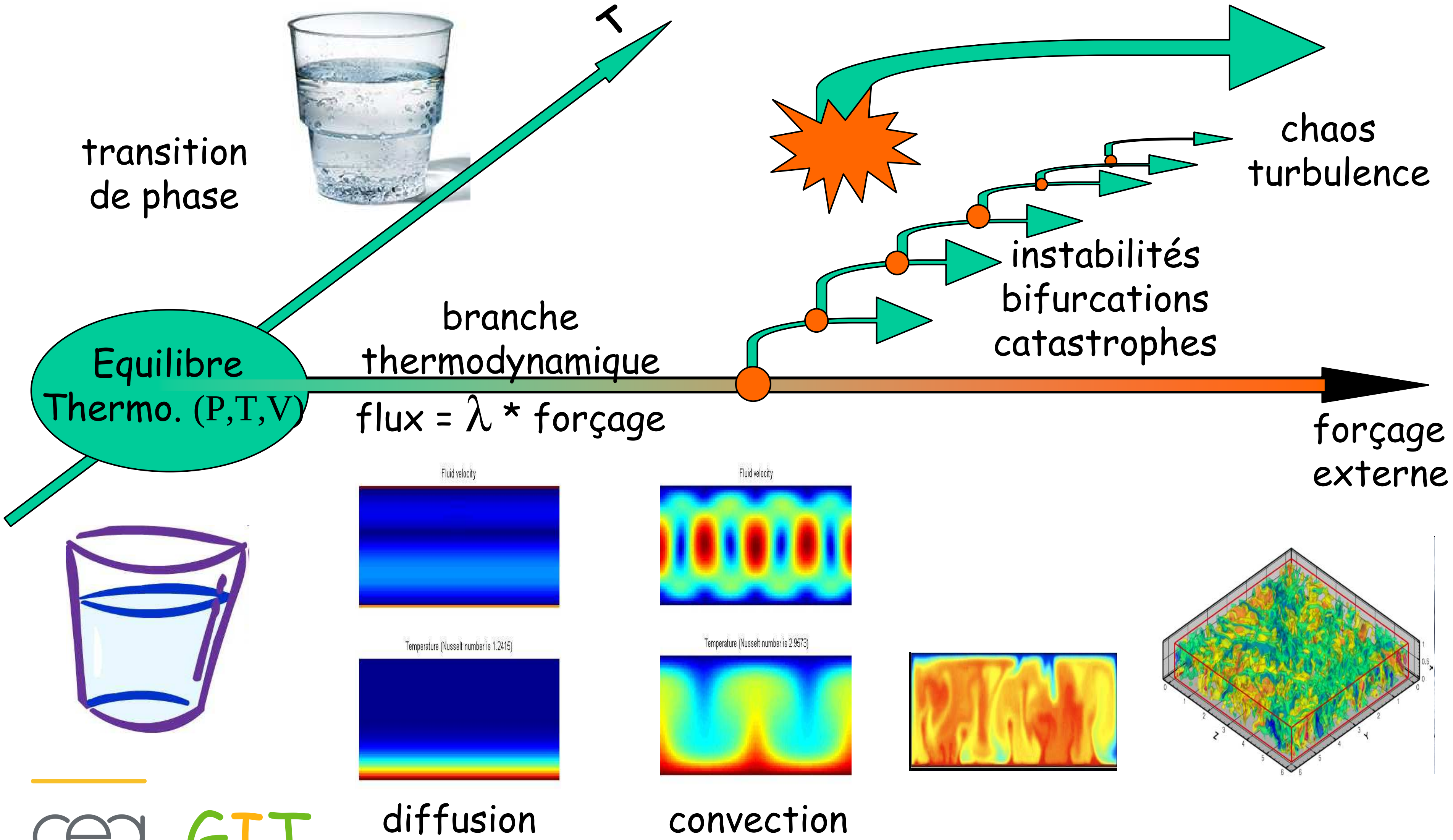


- Sensibilité aux conditions initiales :



Crise = « Effet papillon »

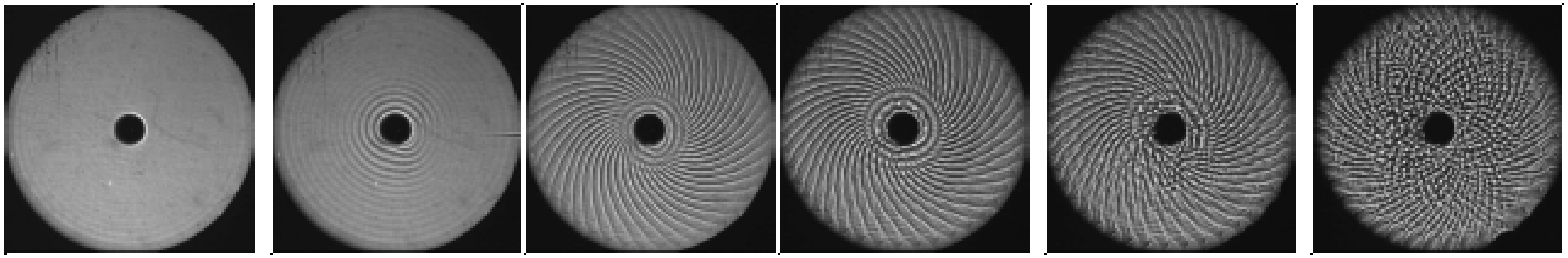
De l'équilibre à la turbulence : les crises en physique



GIT

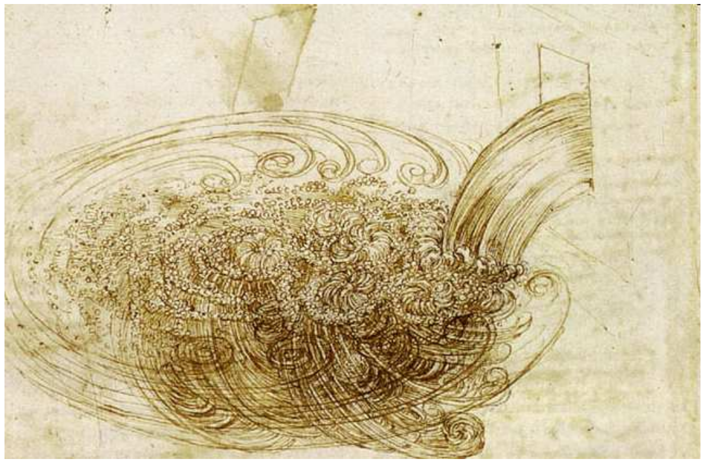
Chaos spatio-temporel et Turbulence

- Vision de Landau =
  Généralisation des idées précédentes à des champs continus, $u(x,t)$:
  - mode instable => pattern spatial stationnaire ou propagatif (onde)
  - Rôle des non linéarités : $\cos(kx)*\cos(kx) \rightarrow \cos(2kx)$
    => cascade dans les échelles

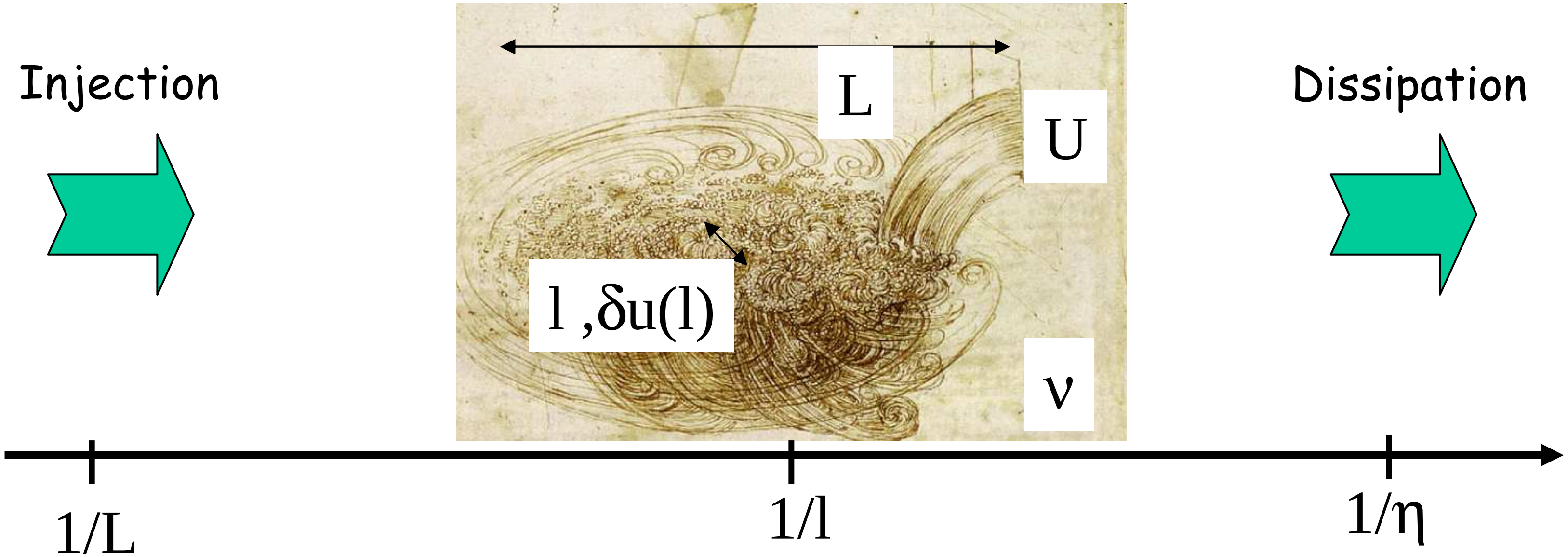


Big whirls have little whirls,
Wich feed on their velocity;
And little whirls have lesser whirls,
And so on to viscosity.

Lewis Fry Richardson 1922



Turbulence :



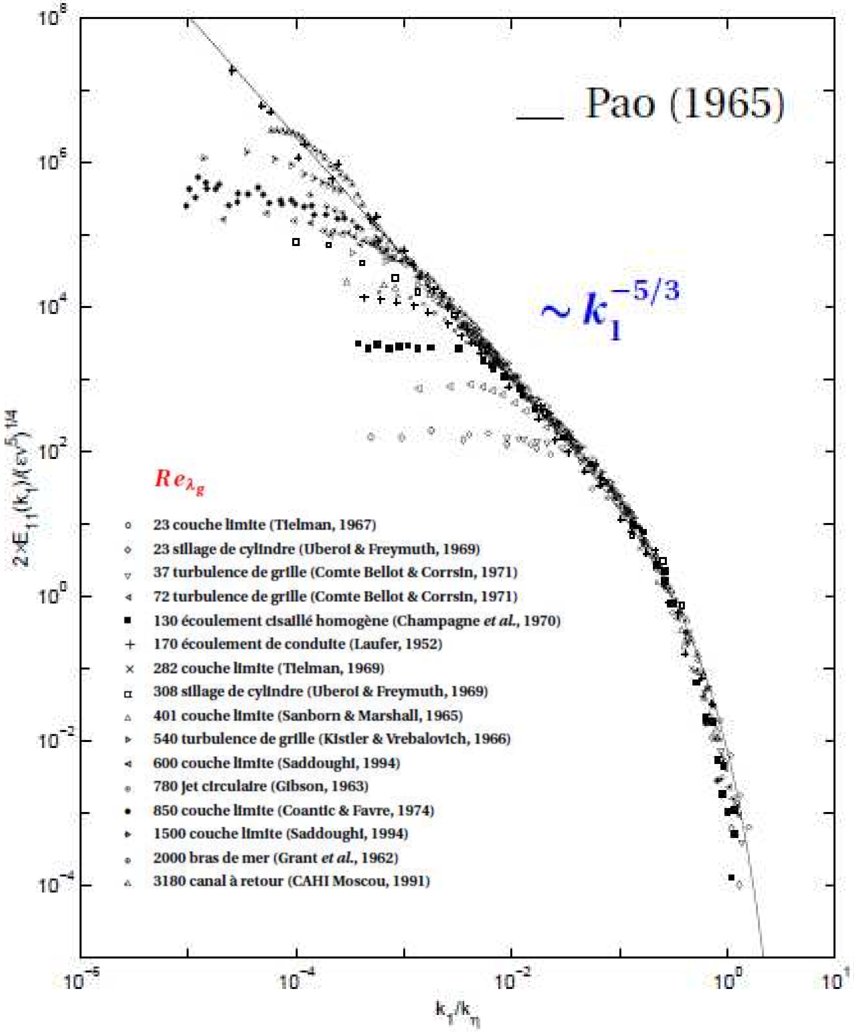
- Nombre de Reynolds à l'éch. l = temps visqueux/temps advection : $Re(l) = \delta u . l / \nu$
- Flux d'énergie constant au travers des échelles :

$\varepsilon(l)=\delta u^2/(l/\delta u)= \delta u^3/l \Rightarrow \delta u(l)=\varepsilon^{1/3} l^{1/3}$ avec $\varepsilon = U^3/L$ fixé par l'échelle d'injection

- Echelle visqueuse : $Re(\eta)=1 \Rightarrow \boxed{\eta/L = Re(L)^{-3/4}}$
- Régime inertiel : $L \gg l \gg \eta$: la densité spect d'énergie $\boxed{E(k)=\delta u^2(k)/k= \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}}$

cea GIT

Turbulence



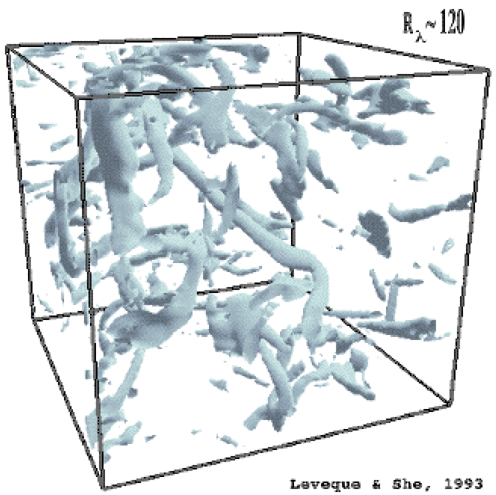
- Rappel :
  A l'équilibre l'énergie par degré de liberté est donnée par l'équipartition et correspond à l'absence de flux
- Ici :
  La séparation des échelles et le principe d'un flux constant pourrait garantir une répartition universelle de l'énergie au travers des échelles.
- Mais,
  l'invariance d'échelle des fluctuations n'est pas vérifiée expérimentalement:

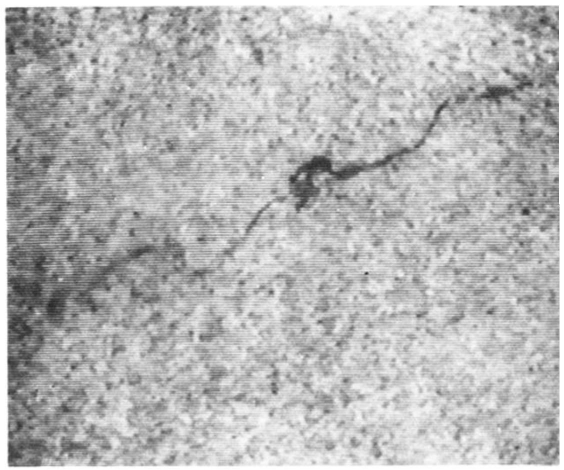
$$\langle \delta u^n \rangle \neq \langle \delta u^2 \rangle^{n/2} = \varepsilon^{n/3}\, l^{n/3}$$

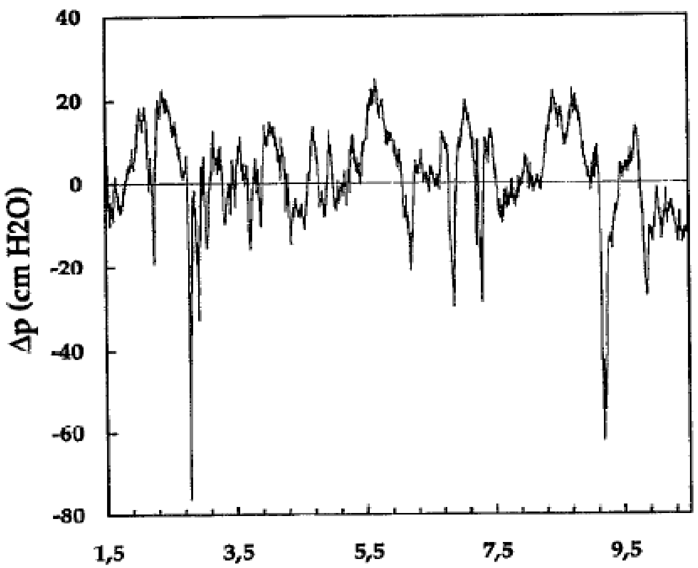
= signature d'intermittence

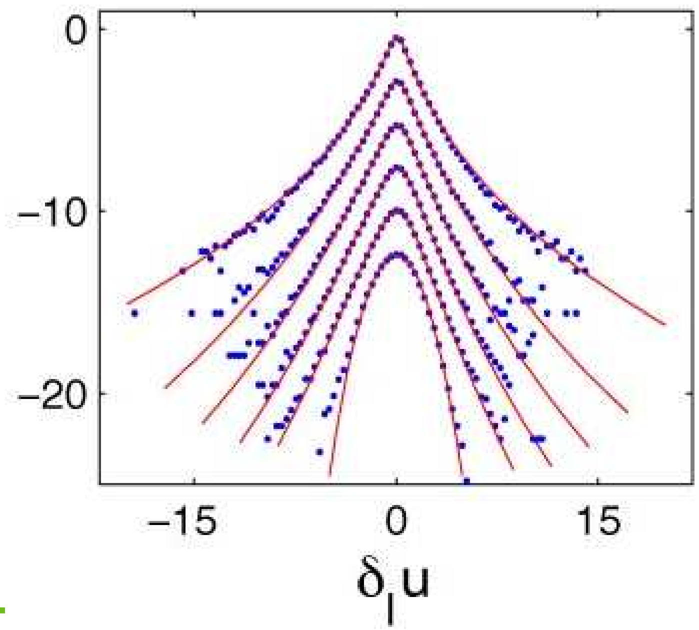
Intermittence et conséquences sur les fluctuations

- Observation de turbulence 3D
  - Filaments de vorticité intermittents
  - Fluctuation de pression et de vitesse très non gaussiennes, et non invariantes d'échelle



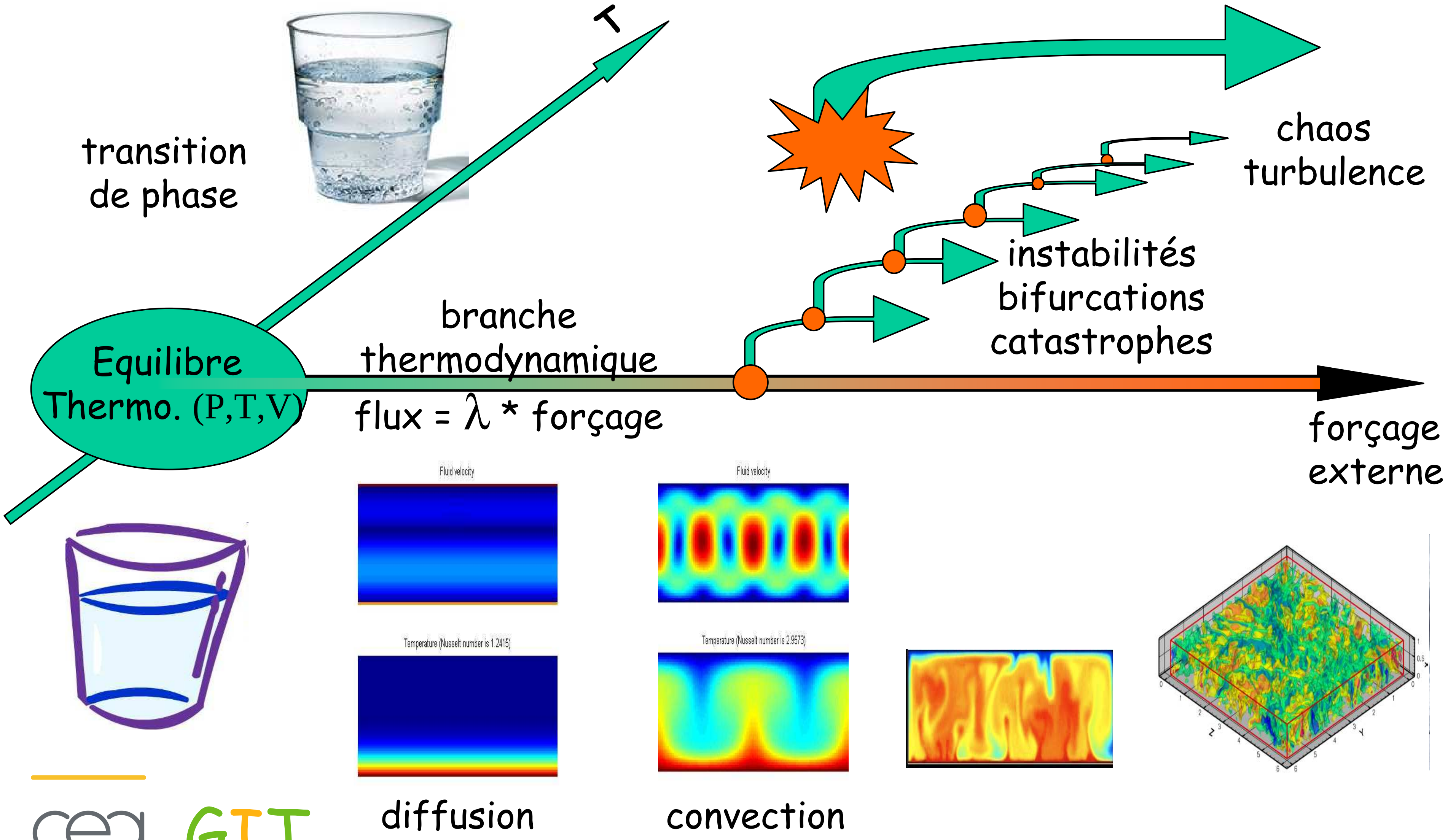






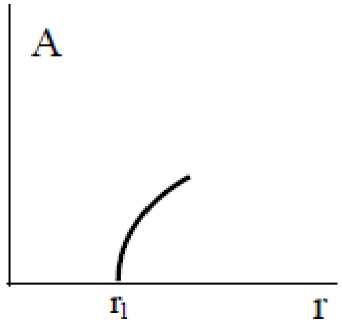
Crise = Intermittence

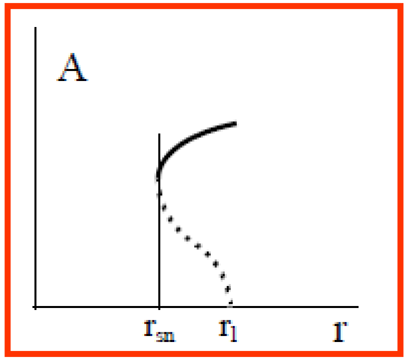
De l'équilibre à la turbulence : les crises en physique



Au-delà de la vision de Landau : turbulence sous-critique

- Instabilité super-critique … et …. sous-critique :



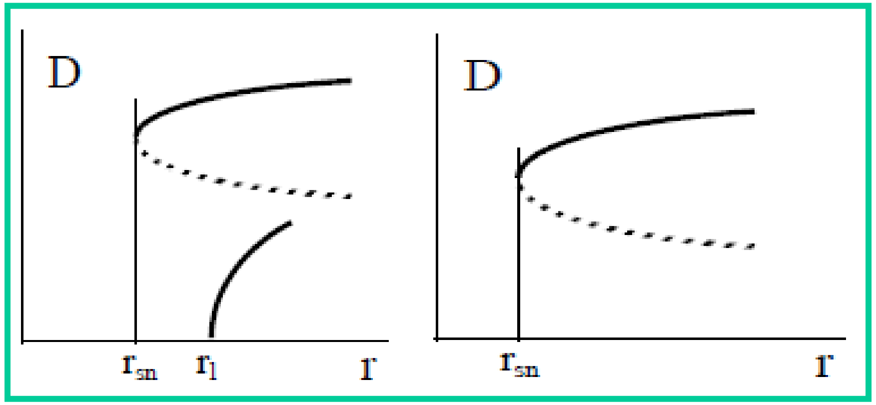


= > Coexistence de deux solutions pour une même valeur de r

=> Phénomène d'hystérésis

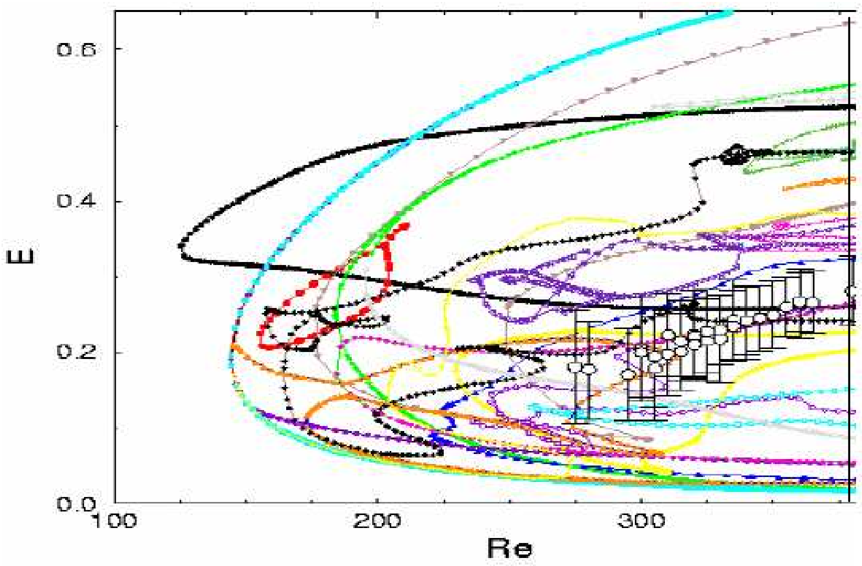
=> Transition d'amplitude finie

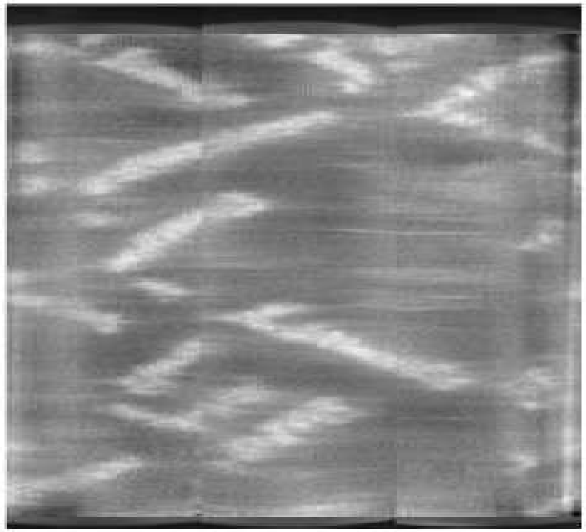
- Cas extrême :
  Les écoulements cisaillés :
  solutions d'amplitude finie
  déconnectées de l'état laminaire



GIT

Ecoulements de Couette plan et de Couette cylindrique



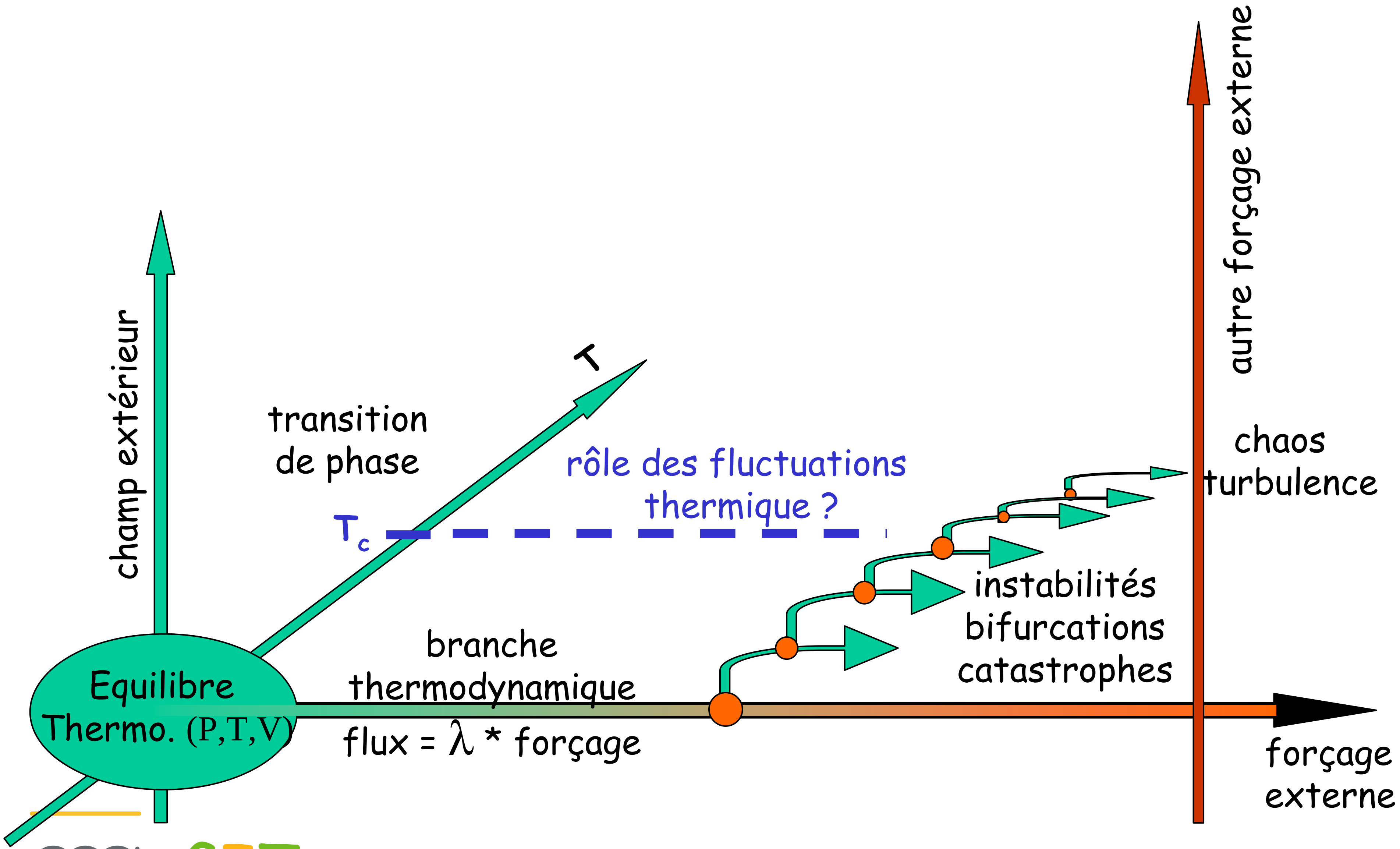


- Coexistence de solutions instables dans l'espace des phases :
  => Coexistence spatiale de l'écoulement laminaire et de la turbulence
  => Dynamique intermittente et hétérogène

Crise en physique = extrême sensibilité à …

- A l'équilibre = divergence de la susceptibilité : sensibilité à un petit champ ext
- Instabilité = sensibilité à la valeur du paramètre de contrôle
- Chaos = sensibilité aux conditions initiales
- Intermittence et Hétérogénéités = sensibilité aux valeurs locales du champ
  « sensibilité endogène à la dynamique »
- Autres exemples de dynamique intermittentes et hétérogènes :
  - Déstabilisation d'un empilement granulaire et Avalanches
  - Fracture
  - Crises financières …

Crises existantes et nouvelles crises en perspectives…



De nouvelles crises en perspectives…