

Du keV au GeV :  
La température à l'assaut de la  
matière

E. Suraud, Univ. P. Sabatier, Toulouse

# La température, source de « désordre » ou source « d'ordre » ?

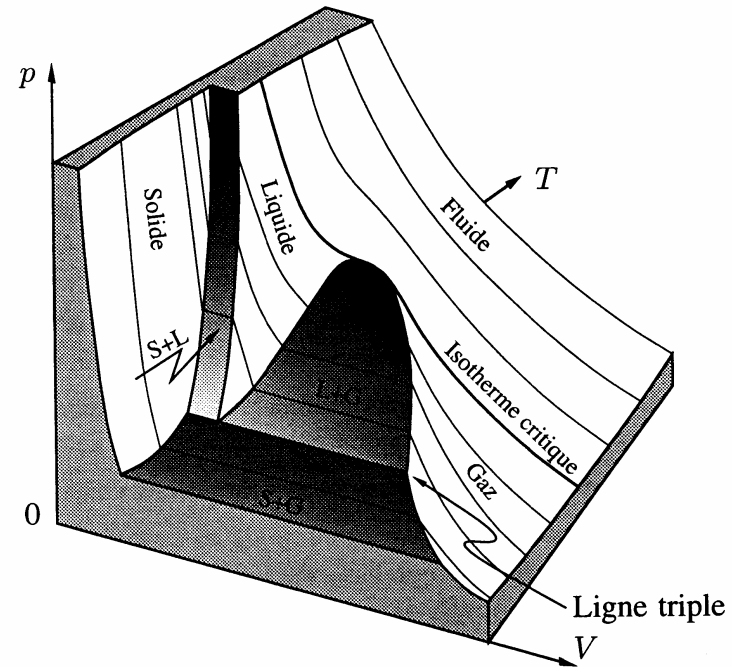
## Plan

- Température source de « désordre »
- Température source d' « ordre »
- Exemples : du keV au GeV... autour des noyaux (des atomes aux quarks)
- Dynamique, systèmes finis ... et conclusions

# La température, source de désordre

## Exemple

Diagramme de phase  
d'un corps pur réel



« Ordre »

Température

« Désordre »



Solide

Liquide

Gaz

# La température, source de désordre

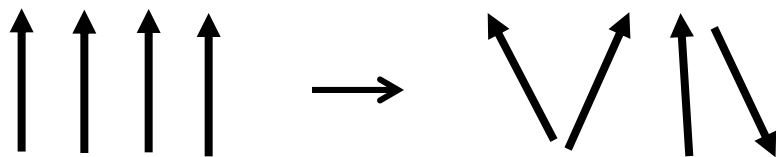
## Exemple

Transition de phase  
ferromagnétique

Cas du Nickel

Température critique (Curie)

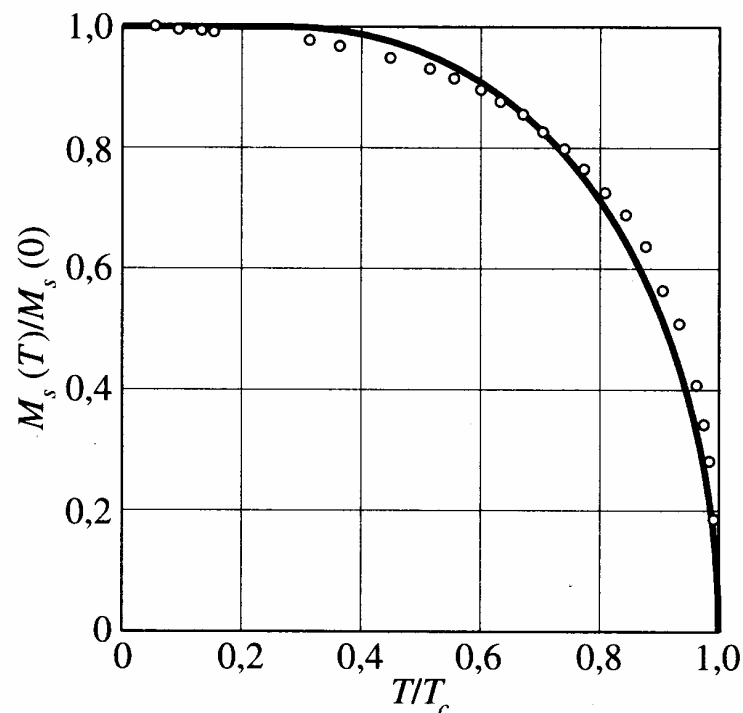
$$T_c = 627 \text{ K}$$



Ferromagnétisme

Paramagnétisme

## Aimantation du Nickel



Température →

# La température... entre ordre et désordre

Température  $\leftrightarrow$  Equilibre  
 $\Rightarrow$  Temps ... et ~~Temps~~

## Exemples

- collisions dans un gaz
  - $\Rightarrow$  distribution thermique (Maxwell)
  - $\Rightarrow$  état asymptotique de l'équation de Boltzmann
- Corps noir

Equilibre thermique/statistique ... « **simple** » espace de phase!  
Paradoxal ?

Exemple

Evaporation  
statistique

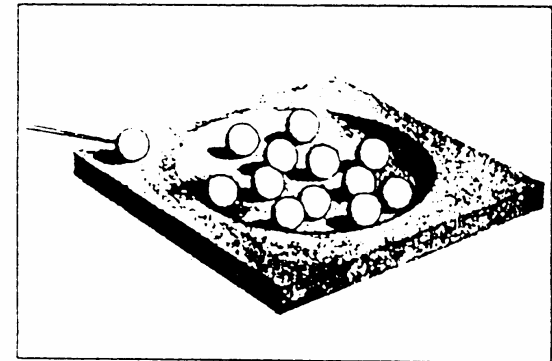


FIG. 1.

# La température ... source d'ordre

## Exemple

Activation thermique  
d'une réaction chimique

Formule d'Arrhénius

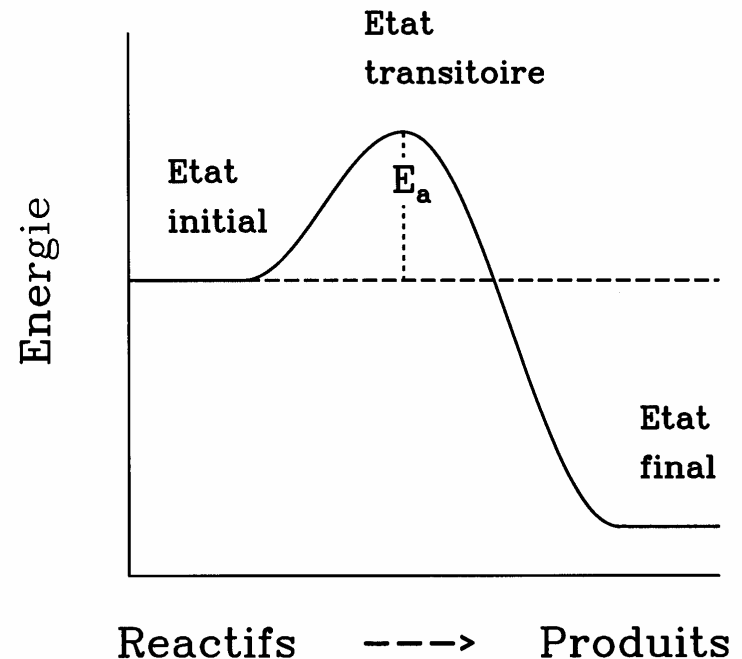
Taux réaction  $\propto \exp(-E_a/T)$

## Exemple

Mouvement Brownien

Agitation thermique  $\longleftrightarrow$  viscosité

**NB** : ... et effets quantiques



# Quelques ordres de grandeur

Rappel : 1 eV  $\sim 10^4$  K

Systeme	Energie	Température
Molécules, agrégats	eV	0.01 – 100 eV
Atomes	eV - keV	eV - keV
Noyaux	MeV	keV – 10 MeV
Quarks	GeV	100 MeV

# Les ions chauds ... de la fusion thermonucléaire

Plasma Deutérium ( $^2\text{H}$ , D), Tritium ( $^3\text{H}$ , T)



Température  $T \sim 10 \text{ keV}$

Exemple typique de traversée d'une barrière par  
activation thermique

**NB** : avec de la mécanique quantique sous jacente !

**NB** :  $T \sim 10 \text{ keV} \ll \text{MeV} \longrightarrow$  « noyaux » froids  
mais ... ions chauds



# La fusion... un problème compliqué

## Problèmes

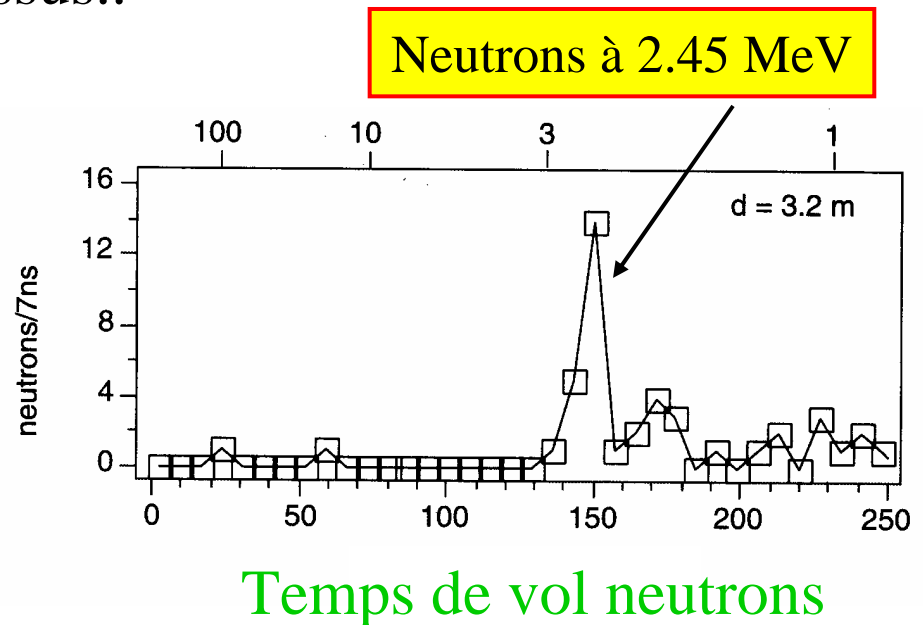
- ... du confinement (magnétique, inertiel...)
- ... des hautes températures / énergies cinétiques
- ... de la rentabilité du processus..

## Exemple

Fusion du Deutérium  
d'agrégats irradiés par  
laser



→ fusion, source neutrons...

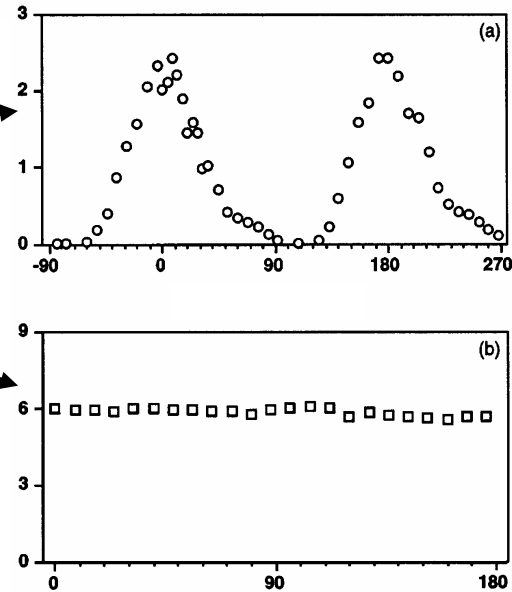
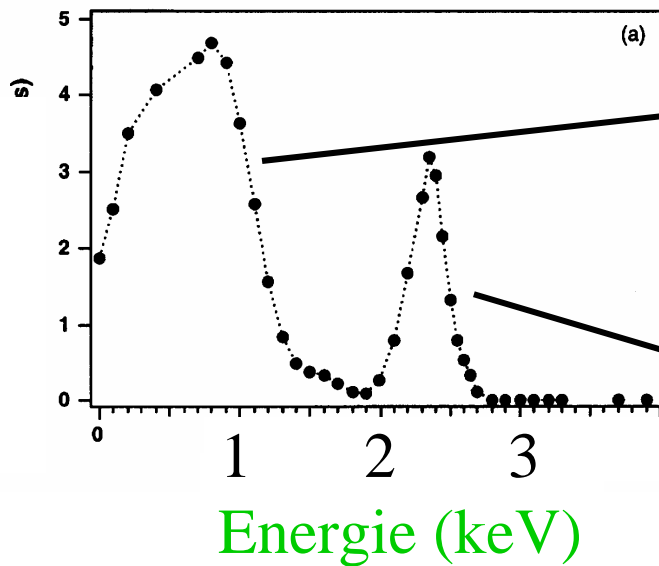


# Agrégats en champ laser intense

Exemple Irradiation laser d'agrégats de Xenon

Electrons émis

Distribution angulaire



Anisotrope  
(laser)

Isotrope  
(thermique)

- > électrons au keV (thermiques)
- > ions au MeV
- > rayonnement X

# Des noyaux ... chauds

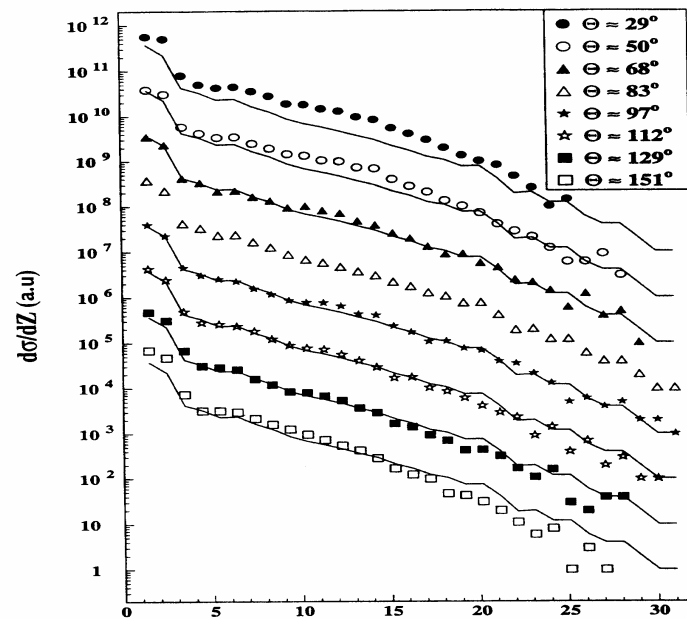
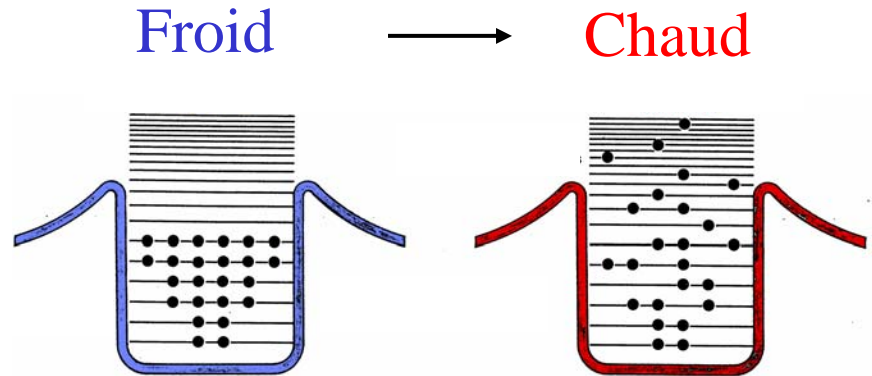
Dépôt d'énergie thermique dans un noyau (par neutron, par collision noyau-noyau ...)

- > température
- > peuplement statistique des niveaux
- > émission isotrope

Rôle du niveau de Fermi  $\varepsilon_F$

$T \leftrightarrow \varepsilon_F (\sim 40 \text{ MeV})$

$T \sim 1 - 8 \text{ MeV}$



↑ Section efficace

Taille  $Z$  →

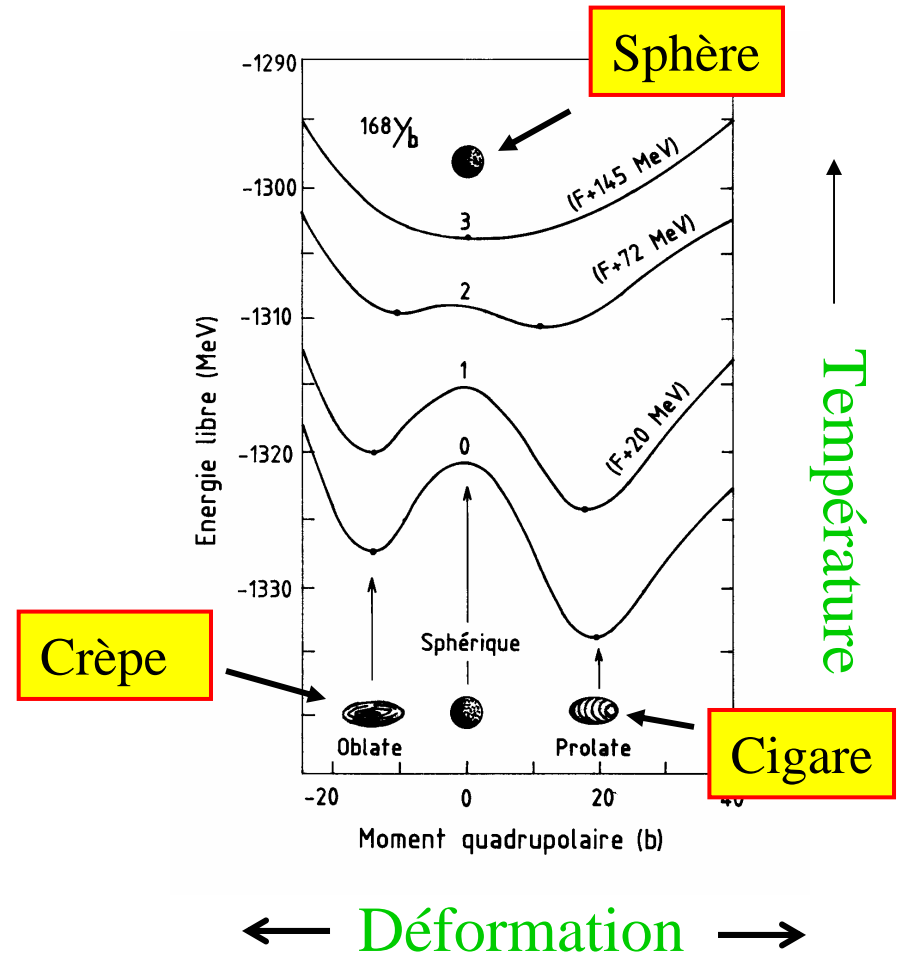
# Température et formes nucléaires

Elévation de température :

- i) exploration des minima (saut d'un puits à l'autre)
- ii) modification du potentiel

Haute température :

~> forme **sphérique**  
(disparition des effets de couches quantiques)



# Un diagramme de phase des formes nucléaires

Exemple

$^{166}\text{Er}$

Deux paramètres :

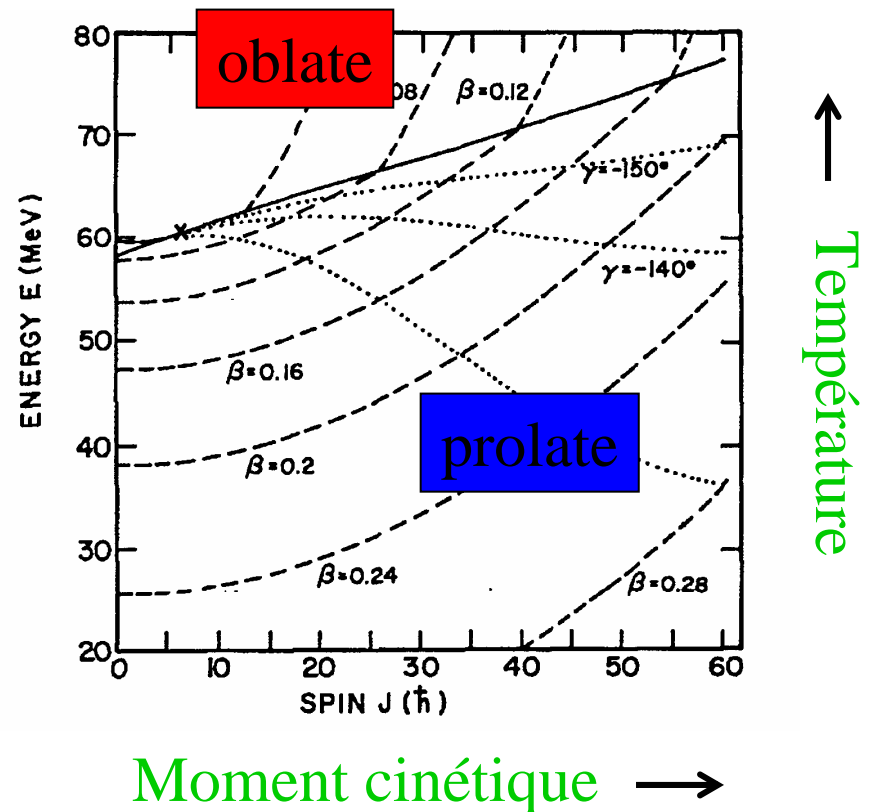
- Energie/température
- Moment cinétique

Transition :

~ prolate ~> oblate

**NB** : phénomène générique  
(transition de phase)

Mesures par résonance  
dipolaire géante



# Une horloge thermique

Evaporation statistique  
des neutrons  
d'un noyau chaud

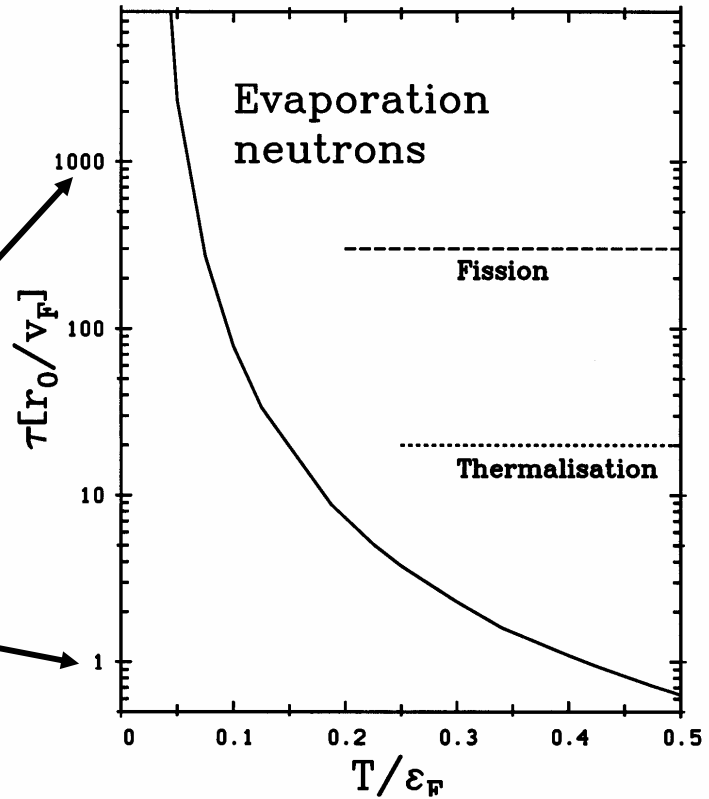
$$\tau \sim 1/T^2 \exp(-\mu_n/T)$$

Grande dynamique des temps

$$r_0 \sim 1. \text{ fm}, v_F \sim c/3$$
$$\varepsilon_F \sim 40 \text{ MeV}$$

→ Mesure de temps nucléaires

Temps



Température →

# Comment mesurer les temps nucléaires avec une horloge thermique ?

## Exemple

Mesure

- i) du **nombre** de neutrons émis
- ii) de la **distribution angulaire**

1 noyau : « isotrope »

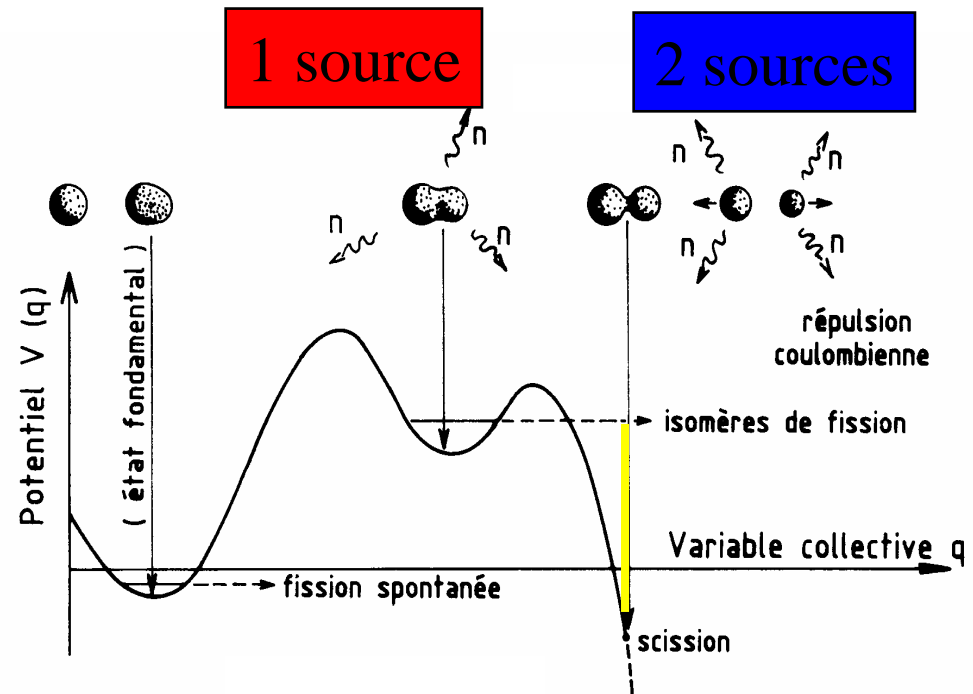
2 noyaux : « anisotrope »

Accès :

i) au temps de fission  $\tau \sim 10^{-20}$  s

ii) à la **viscosité** nucléaire

## Fission d'un noyau chaud



Déformation →

# Des noyaux chauds ... dans les étoiles

Fin d'évolution des étoiles massives  $\sim$  **supernova** (SN2)

Effondrement  $\longrightarrow$  Matière nucléaire  $\longrightarrow$  Explosion  
(cœur de Fer) (peu compressible) (onde de choc)

Problème exotique et compliqué  
(neutrons, protons, noyaux, électrons, photons, neutrinos)

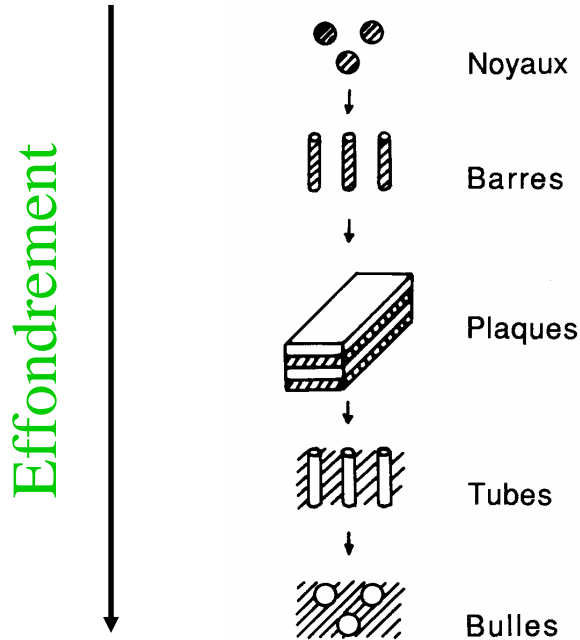
Fin effondrement cruciale pour condition initiale explosion  
Equation d'état :

$$P \sim k \rho^\gamma$$
$$\gamma \longleftrightarrow \gamma_c \sim 4/3 \quad (\text{Chandrasekhar})$$



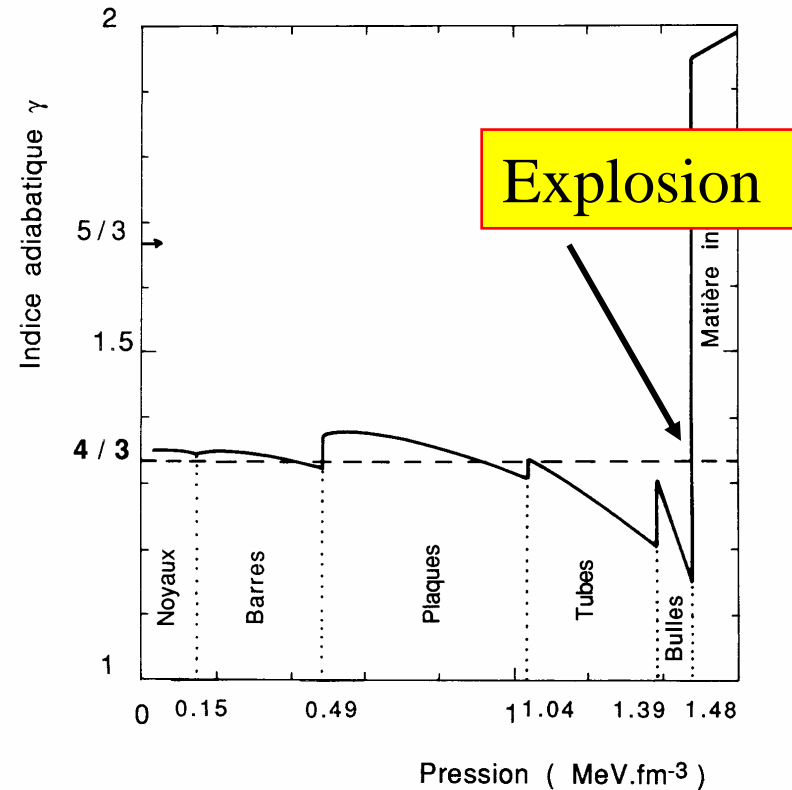
# Phases nucléaires exotiques dans les supernovae

Phase de matière



Explosion

Température  
Plasma ... Cristal ... Plasma

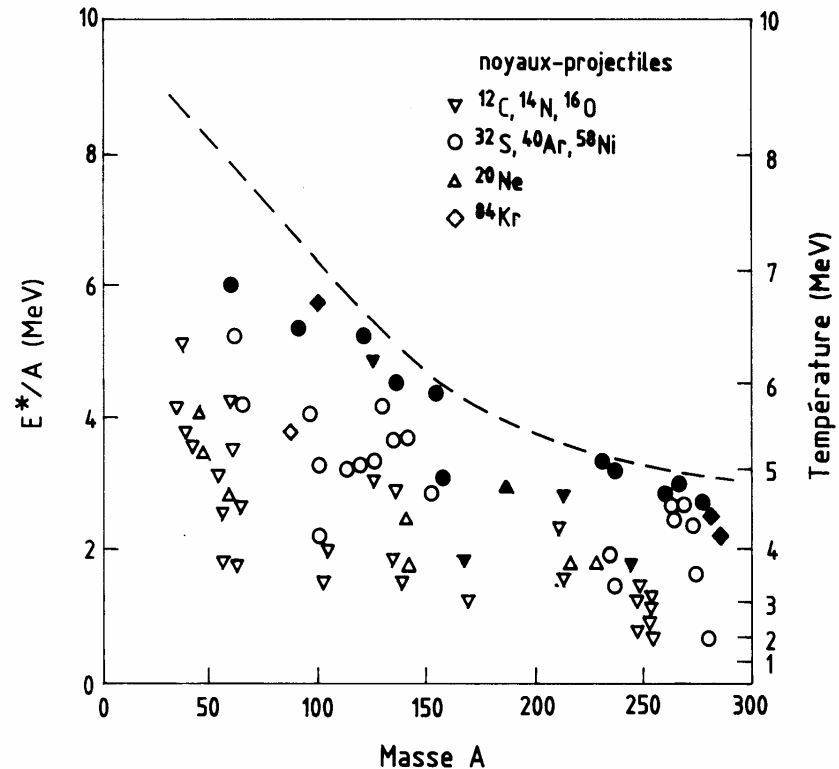


# Des noyaux ... très chauds

Observation  
du maximum

d'énergie d'excitation  
 $E^*/A \sim T^2$

déposée  
(collisions noyau-noyau)



Température

Taille noyau →

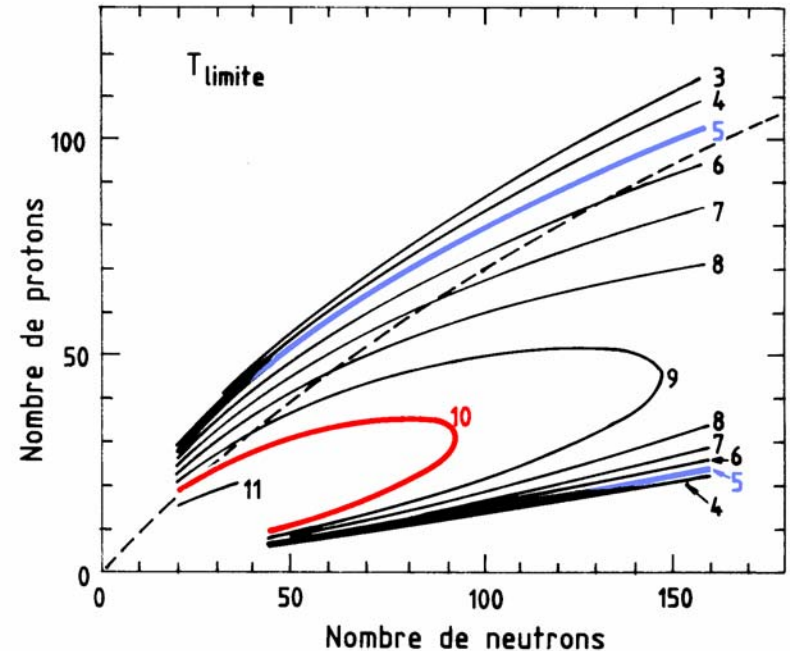
# La température limite des noyaux

Stabilité noyau ~ compétition  
« Surface » / « Coulomb » \*

Evolution avec température  
Surface ↘ et Coulomb ↘

~> Instabilité Coulombienne  
~> Température limite

\*... et effets quantiques



# Casser les « gros » noyaux ... en « petits » noyaux

Production de fragments massifs

Température ?

Collisions noyau-noyau

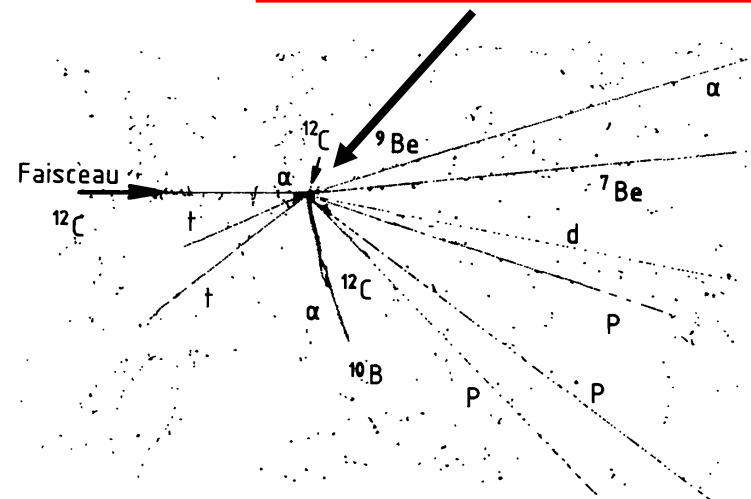
—> viscosité

—> énergie thermique

—> température

Est-ce thermique?

Multifragmentation



$^{12}\text{C}$  (85 MeV par nucléon)  
sur Ag/Br

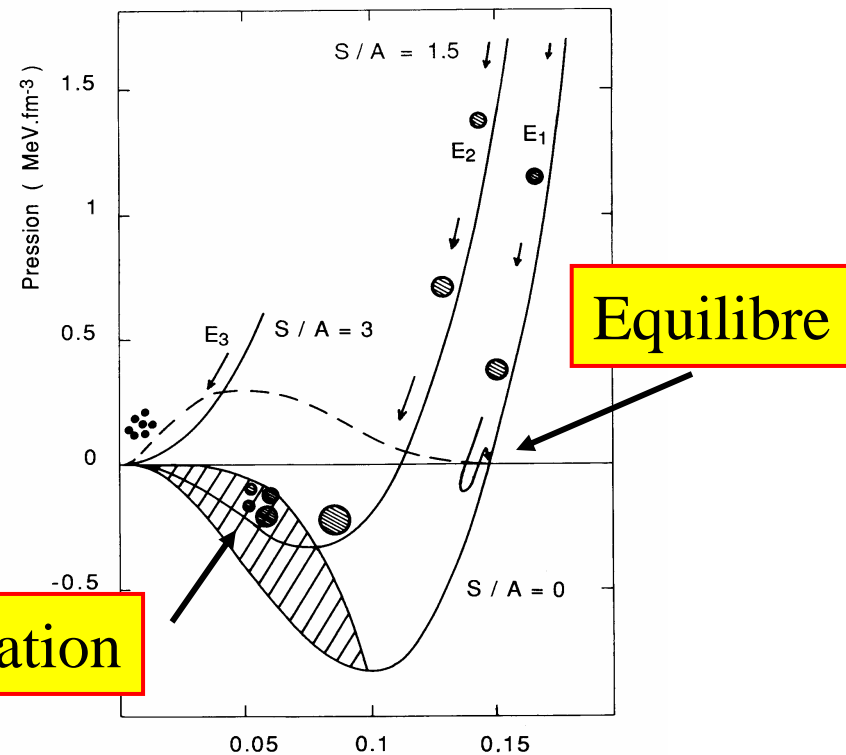
# La multifragmentation... une affaire (d'équation) d'état ?

Lien avec une transition de phase  
liquide-gaz ?

Attention:

- systèmes finis
- effets dynamiques

Pression



Multifragmentation

Densité (fm<sup>-3</sup>) →

# Vers le plasma de quarks et gluons

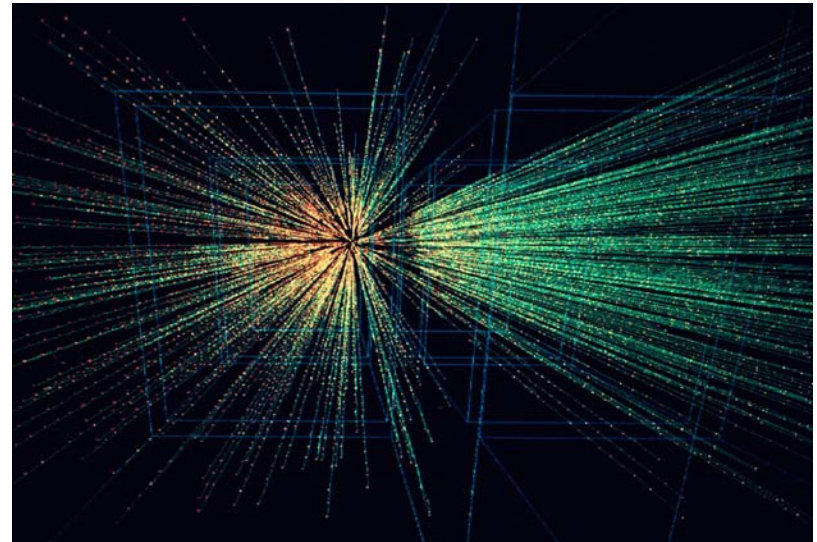
Collisions d'ions lourds ultra-relativistes

**Exemple** Collision  $\text{Pb} + \text{Pb}$  à  $160 \text{ GeV}$  par nucléon (CERN)

Formation temporaire  
d'un plasma de  
quarks et gluons ?  
(déconfinement des quarks)

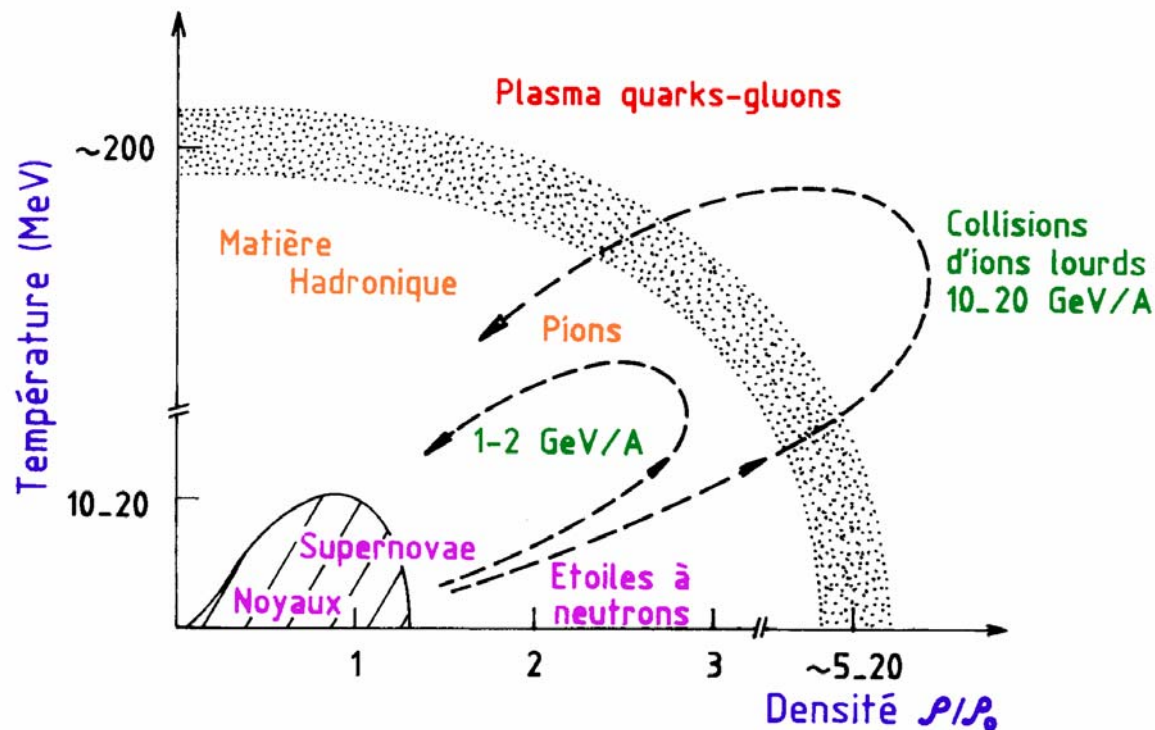
Dynamique  
Thermodynamique

— complexe



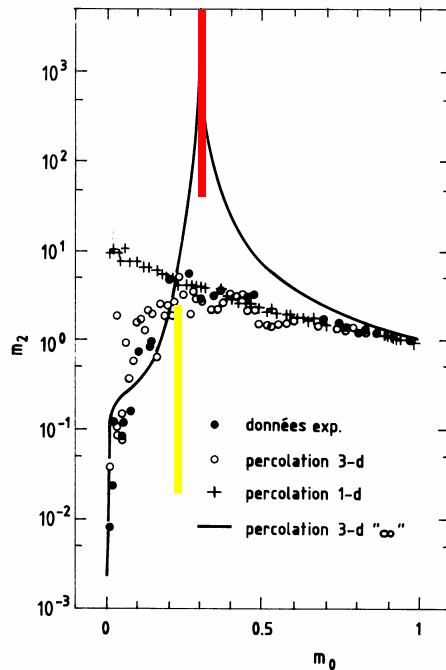
# Diagramme de phase de la matière nucléaire

Equation d'état de la matière nucléaire « dense et chaude »

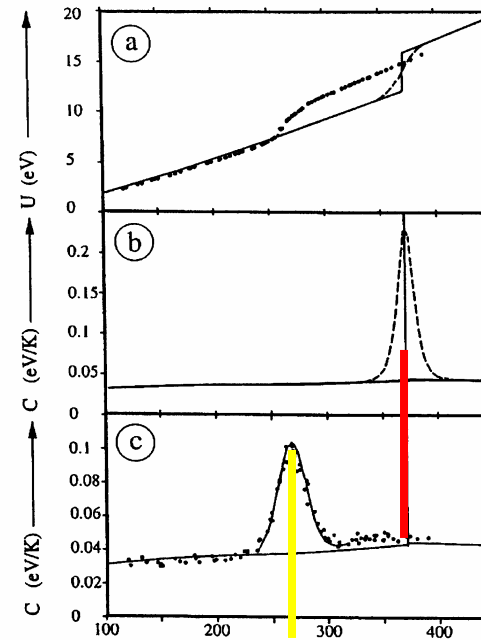


# Température... et systèmes finis

## Multifragmentation nucléaire



## Capacité calorifique d'un agrégat



Solide

Agrégat

Température →

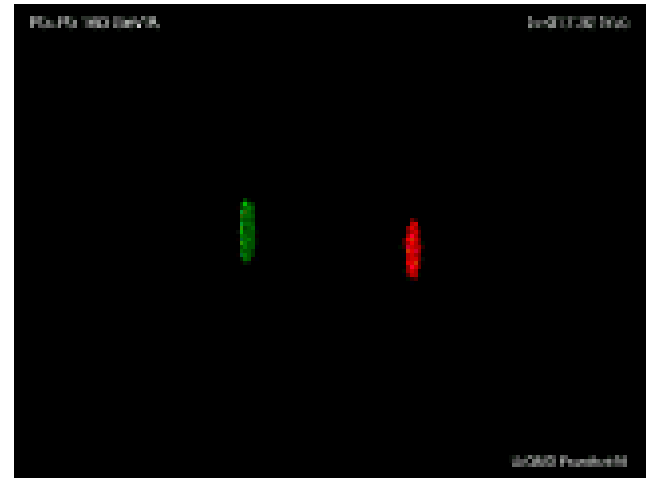
→ **Effets de taille finie !** (définition température, fluctuations, élargissement des transitions...)



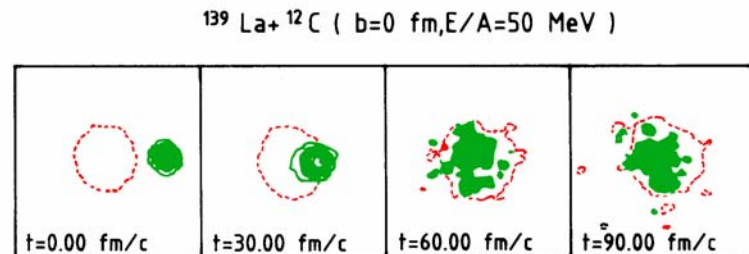
# Température ... et dynamique

La dynamique permet-elle la thermalisation dans les collisions noyau-noyau ?

A haute énergie...  
Pb + Pb (160 GeV)



Et ... à basse énergie



# Pour conclure ...

La température... du keV au GeV

Ordre ET Désordre

- changer de forme, de phase ...
- « casser » ...
- « coller » ...

Et tout cela

- dans des systèmes finis
- parfois avec une dynamique complexe