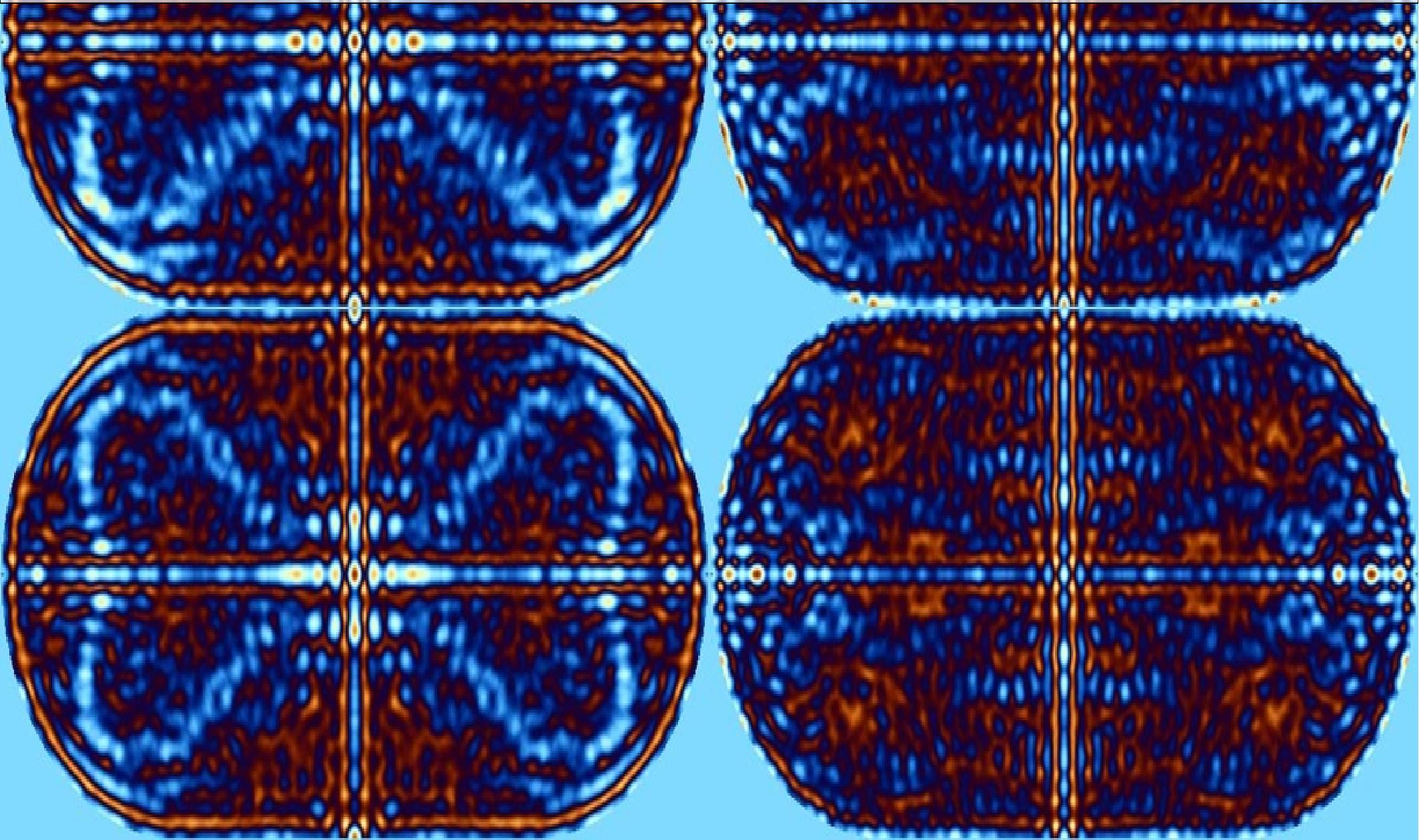
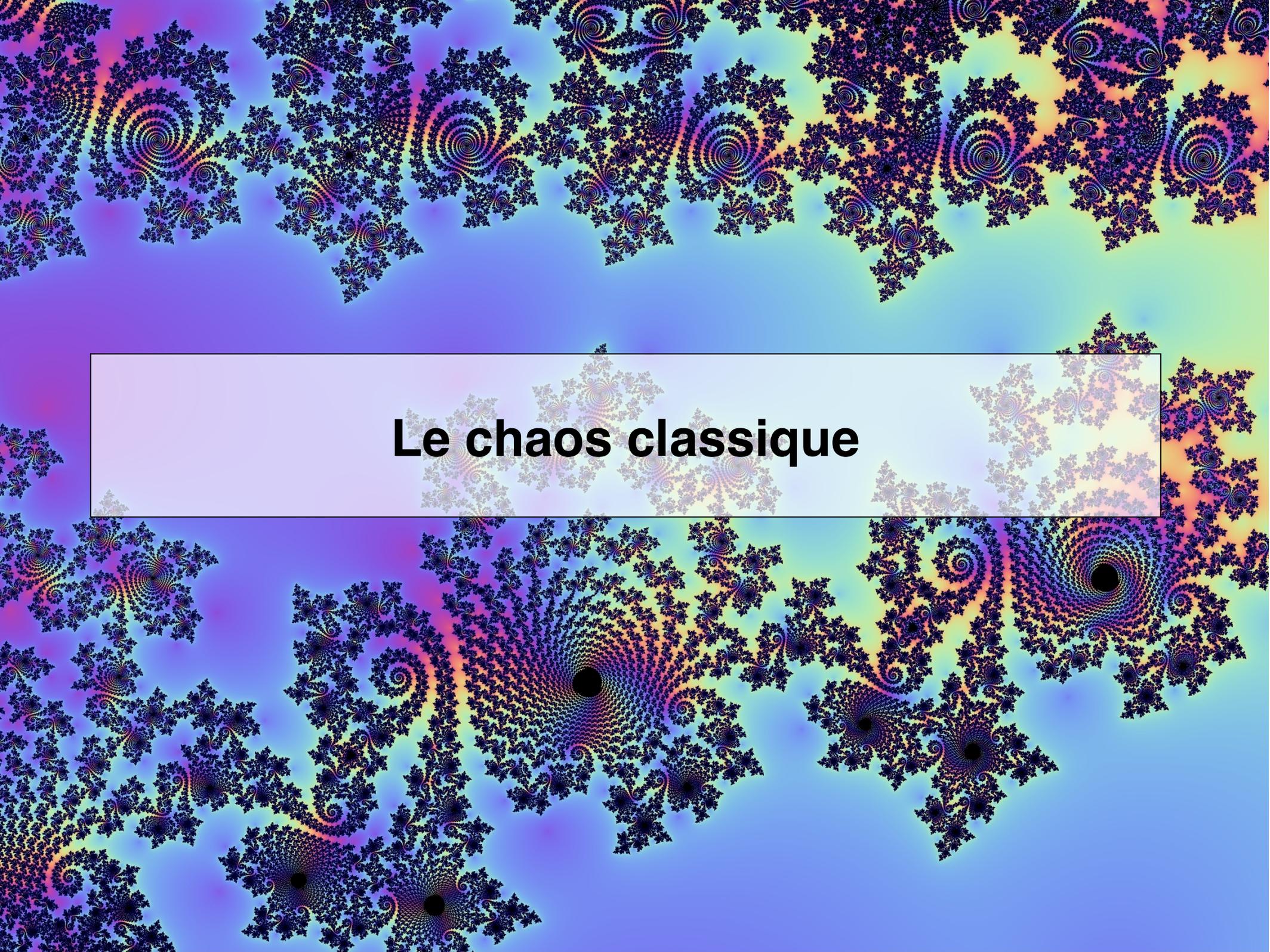


La théorie du chaos

VI- Le chaos quantique

David Viennot – Maître de Conférences en physique théorique
Observatoire de Besançon, Université Marie & Louis Pasteur





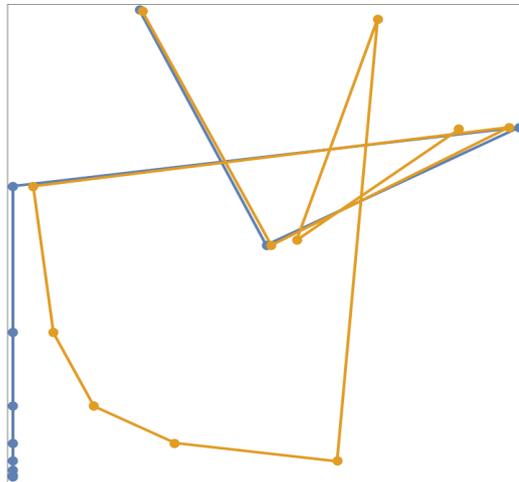
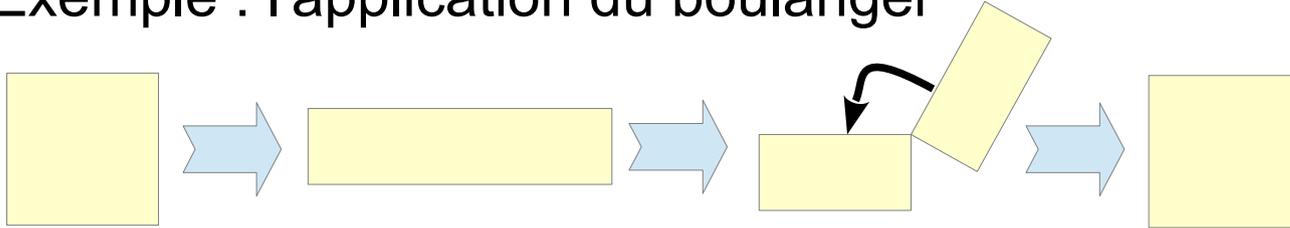
Le chaos classique

Définition du chaos

Un système dynamique est dit chaotique si :

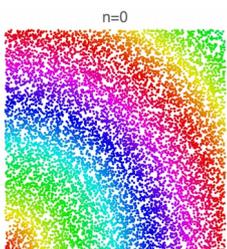
- il est sensible aux conditions initiales ;
- il est mélangeant.

Exemple : l'application du boulanger

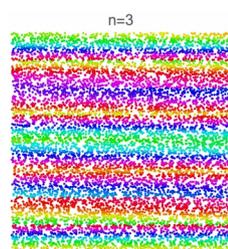


Sensibilité aux conditions initiales

mélange topologique



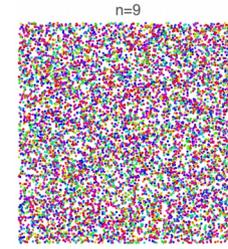
après 3
cycles de
pétrissage



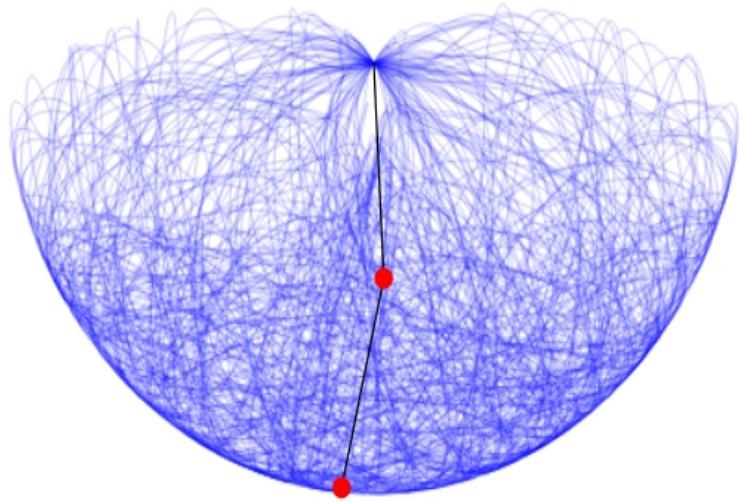
après 3
cycles de
pétrissage



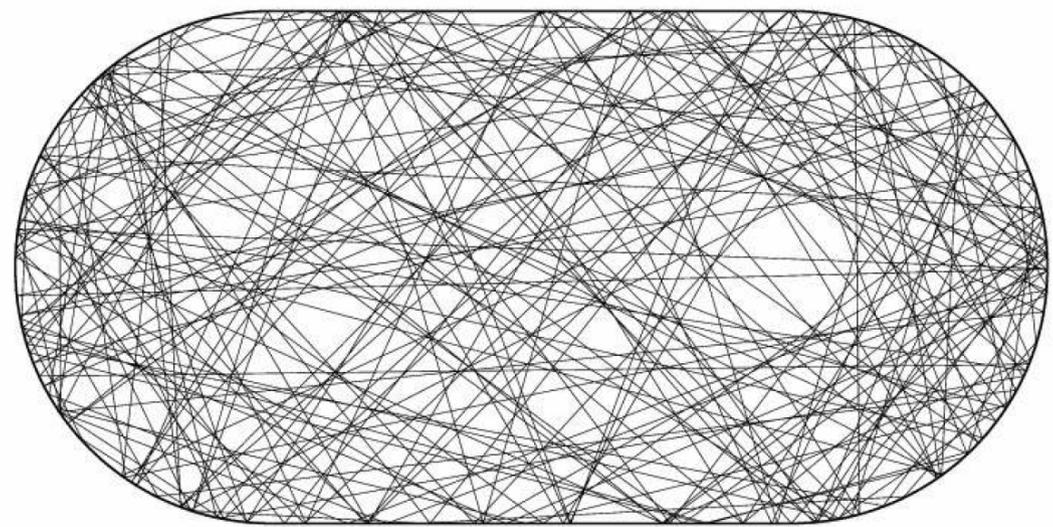
après 3
cycles de
pétrissage



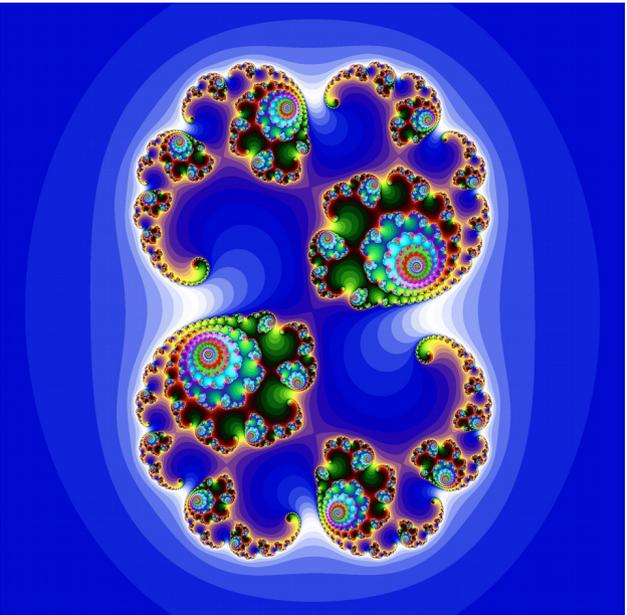
Trajectoires erratiques et fractales



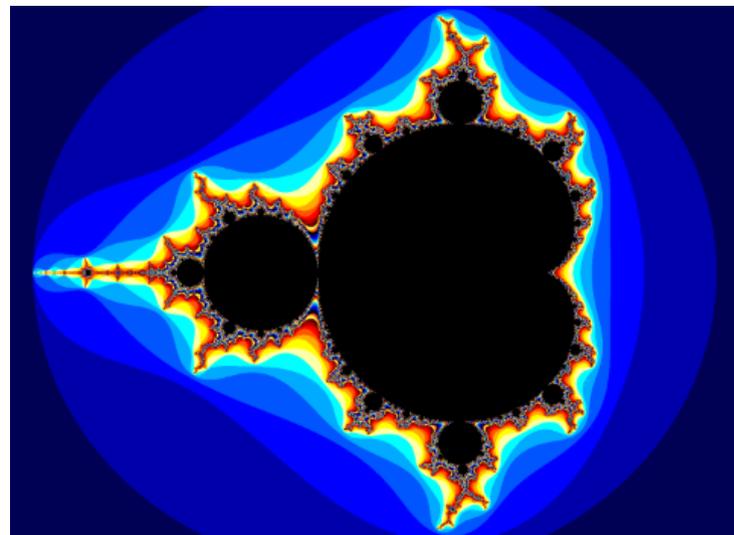
Pendule double



Billard du stade de Bunimovich



Ensemble de Julia



Ensemble de Mandelbrot

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} x^2 - y^2 + c_1 \\ 2xy + c_2 \end{pmatrix}$$

Hydrogen Electron Orbitals

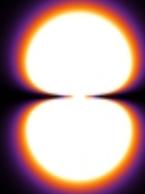
Probability Density

$$\psi_{nlm}(r, \vartheta, \varphi) = \sqrt{\left(\frac{\rho}{r}\right)^3 \frac{(n-l-1)!}{2n(n+l)!}} e^{-\rho/2} \rho^\ell L_{n-l-1}^{2\ell+1}(\rho) \cdot Y_\ell^m(\vartheta, \varphi)$$

$$\rho = 2r/na_0 \quad \text{darksilverflame.deviantart.com}$$



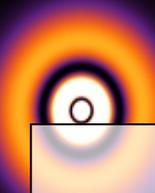
(2,0,0)



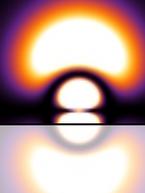
(2,1,0)



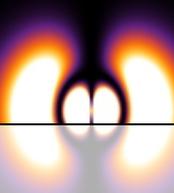
(2,1,1)



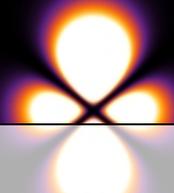
(3,0,0)



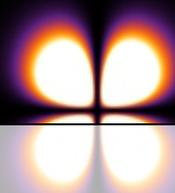
(3,1,0)



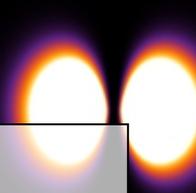
(3,1,1)



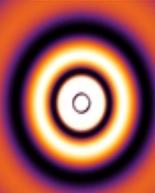
(3,2,1)



(3,2,2)



La mécanique quantique



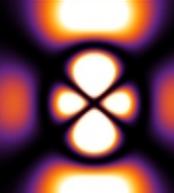
(4,0,0)



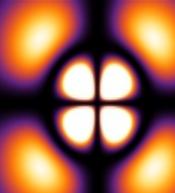
(4,1,0)



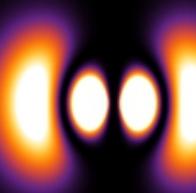
(4,1,1)



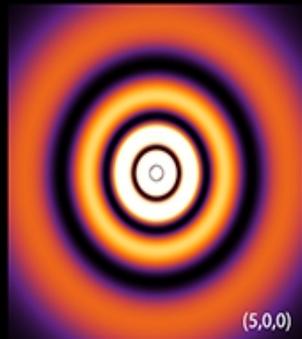
(4,2,0)



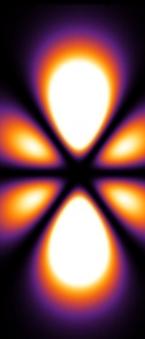
(4,2,1)



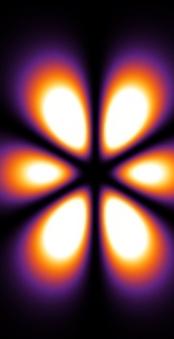
(4,2,2)



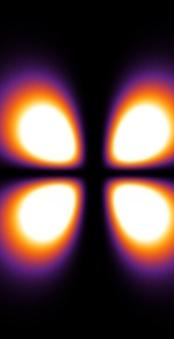
(5,0,0)



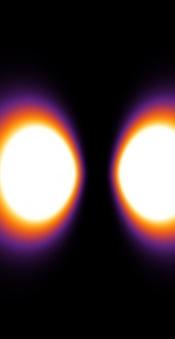
(4,3,0)



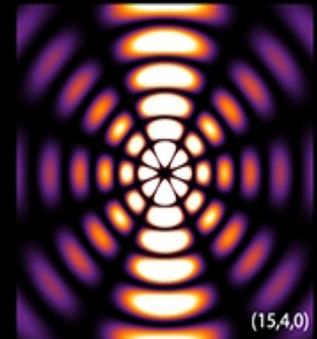
(4,3,1)



(4,3,2)

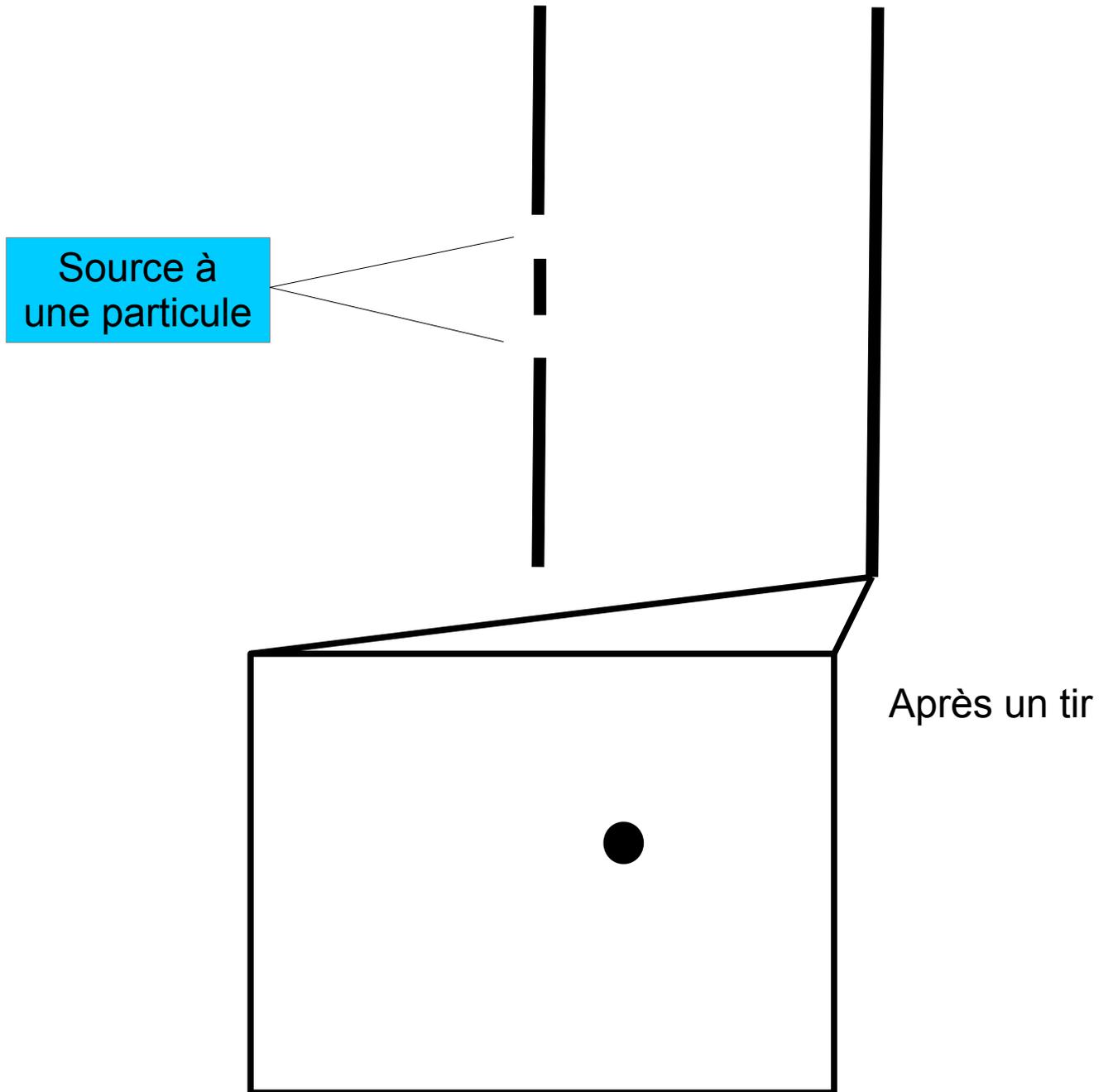


(4,3,3)



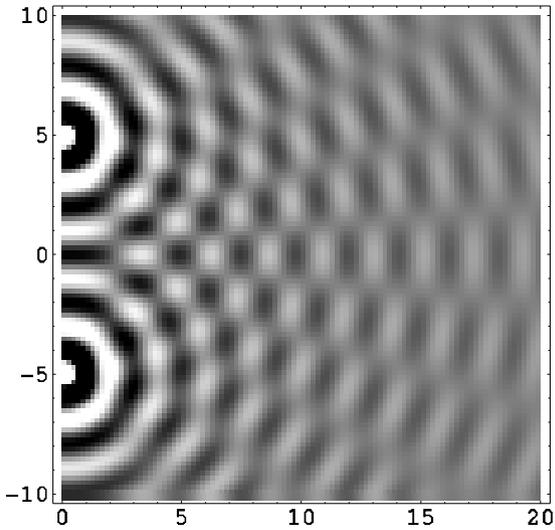
(15,4,0)

L'expérience des trous d'Young

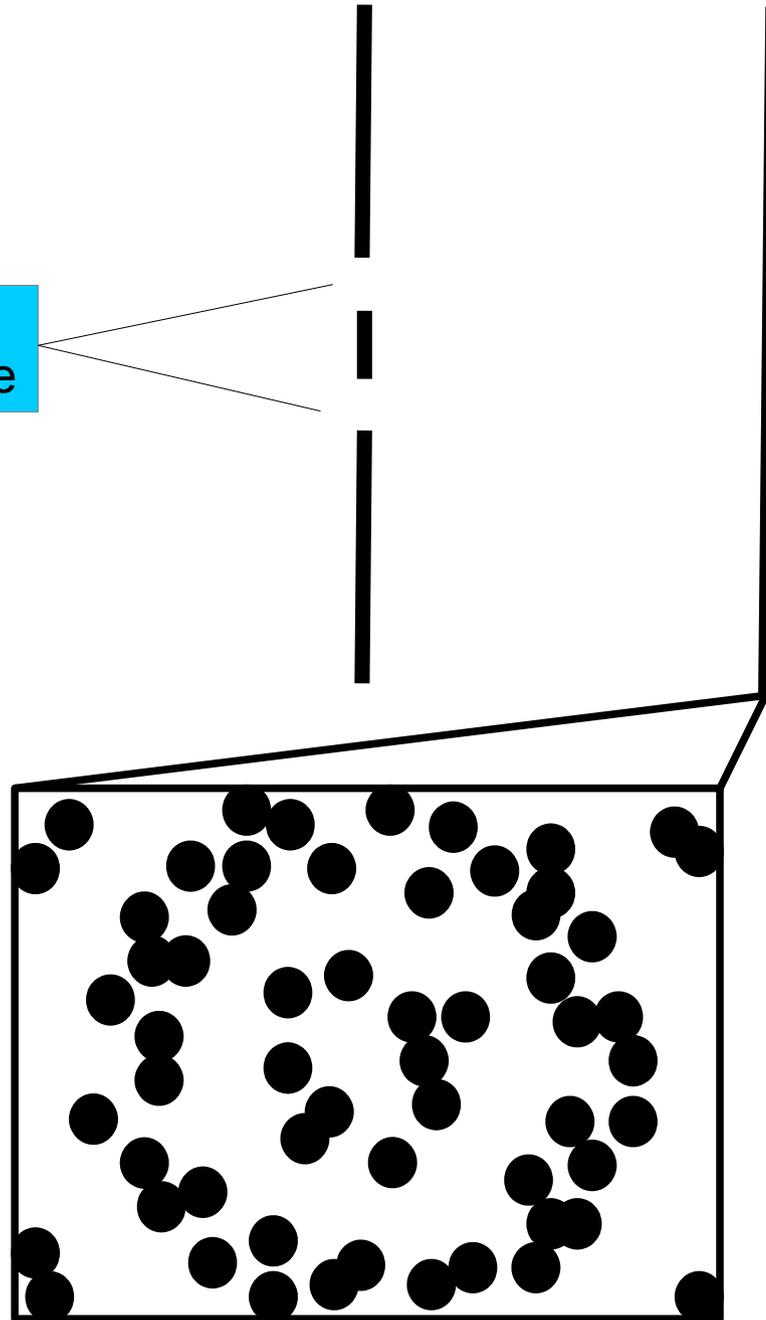


L'expérience des trous d'Young

Les interférences sont typiques des phénomènes ondulatoires



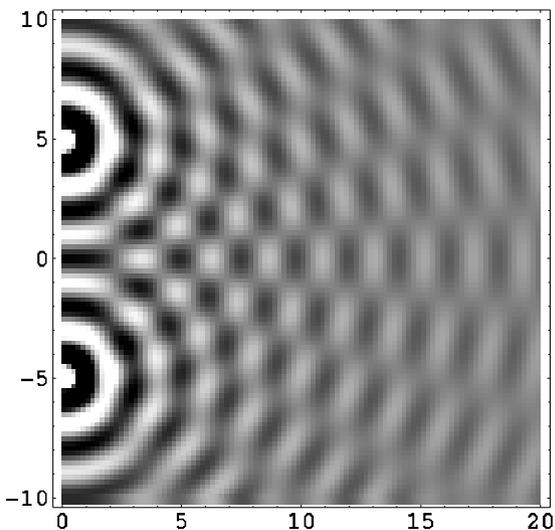
Source à une particule



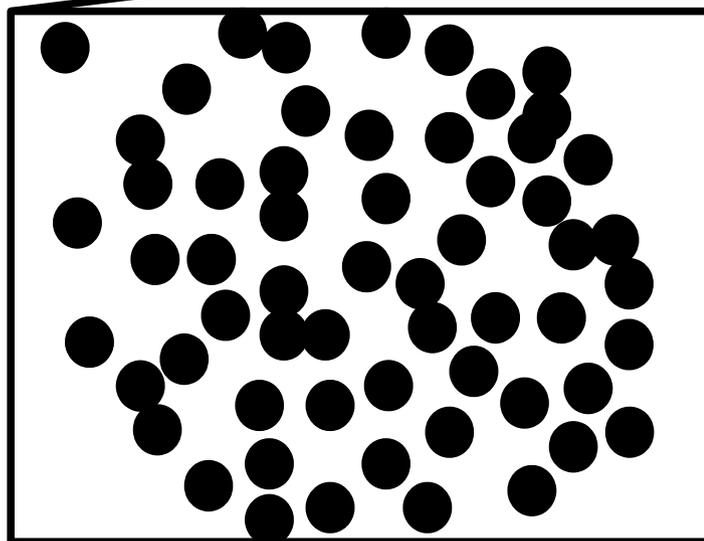
Après de nombreux tirs

L'expérience des trous d'Young avec détecteur

Les interférences sont typiques des phénomènes ondulatoires



Source à une particule

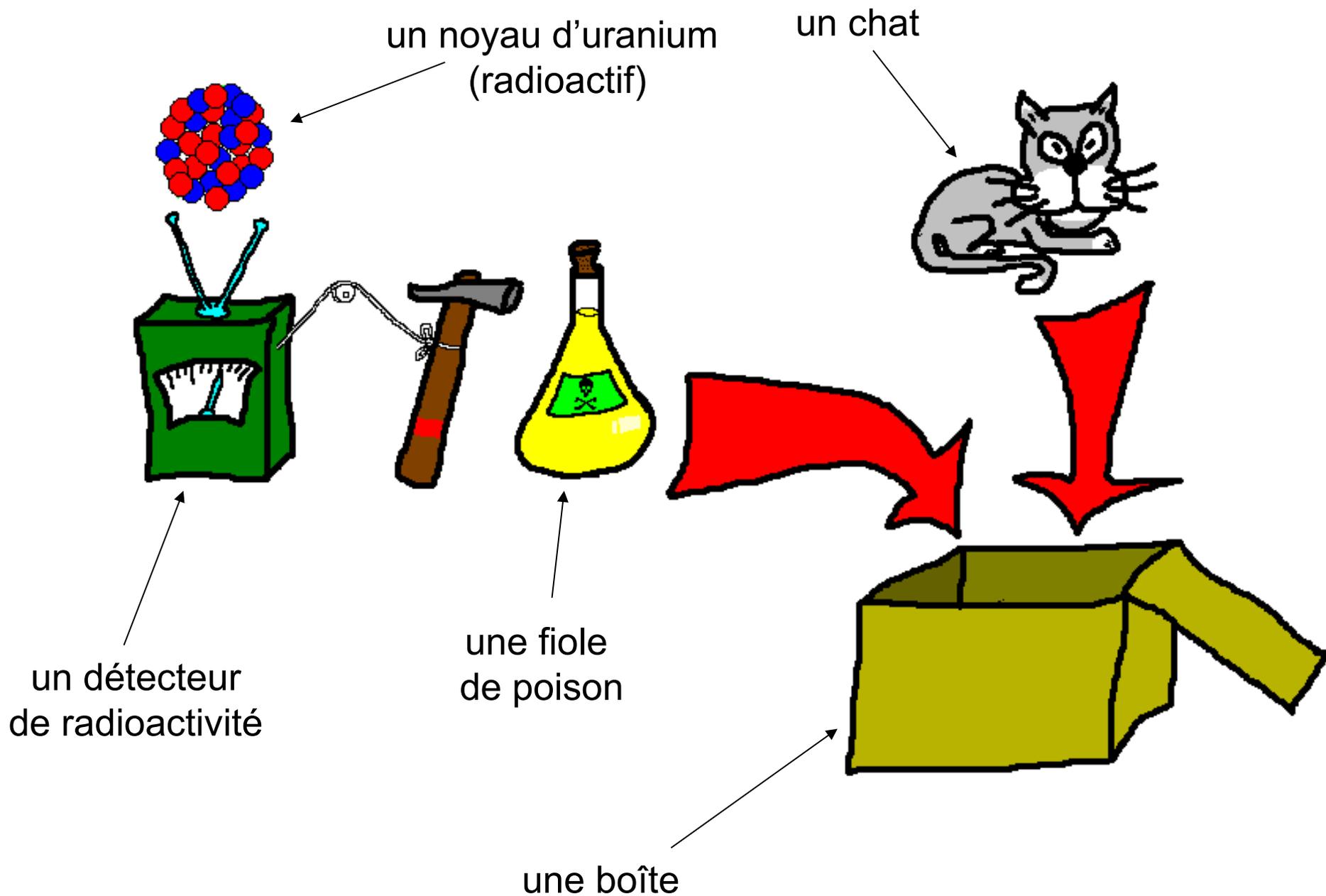


Après de nombreux tirs

L'expérience des trous d'Young : conclusion

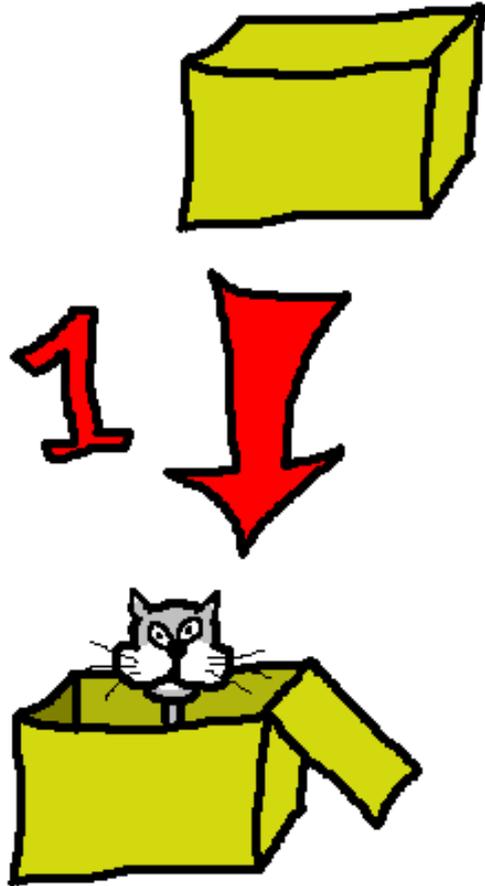
- Particule = « à la fois » un corpuscule (impacts ponctuels sur l'écran) et une onde (figure d'interférences) → dualité onde-corpuscule de de Broglie.
- Onde de de Broglie \sim loi de probabilité (impacts aléatoires, choix aléatoire du trou de passage en présence du détecteur) → indéterminisme de la physique quantique.
- Les ondes issues des deux trous sont superposées (figure d'interférences) en l'absence de détecteur → principe de superposition (pas de principe du tiers exclu).
- Mesurer/Observer supprime la superposition → principe de projection de Born.

La parabole du chat de Schrödinger



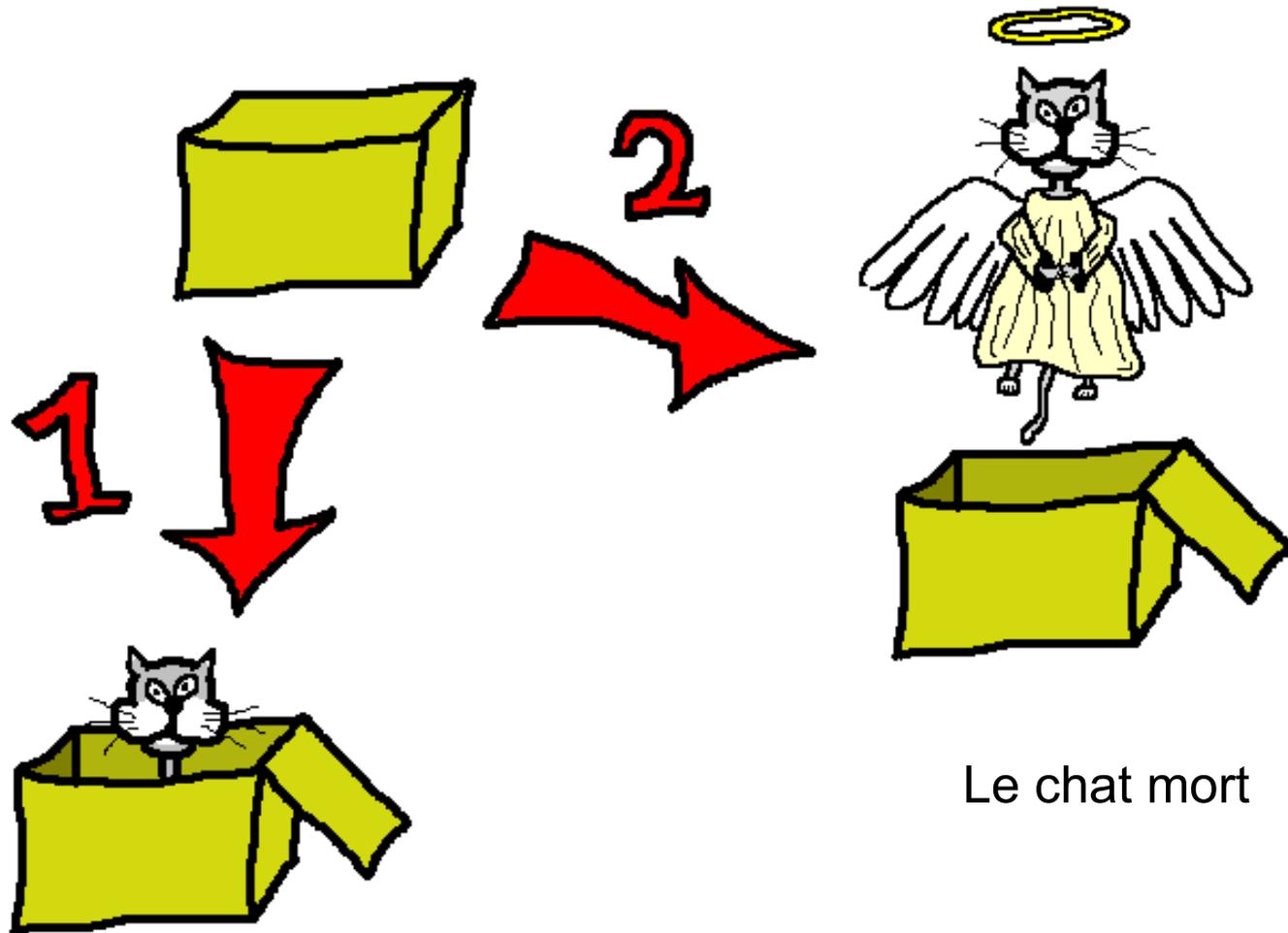
La parabole du chat de Schrödinger

A l'ouverture de la boîte : 2 possibilités pour l'état du chat



Le chat vivant

A l'ouverture de la boîte : 2 possibilités pour l'état du chat



Le chat vivant

Le chat mort

La parabole du chat de Schrödinger

Quel est l'état du chat lorsque la boîte est encore fermée ?



La parabole du chat de Schrödinger

Quel est l'état du chat lorsque la boîte est encore fermée ?



Réponse classique : le chat est soit vivant soit mort, avec 1 chance sur 2*. L'information est cachée.

* : si la probabilité pour que l'uranium se désintègre est de $\frac{1}{2}$ pendant la durée de l'expérience

La parabole du chat de Schrödinger

Quel est l'état du chat lorsque la boîte est encore fermée ?



~~Réponse classique : le chat est soit vivant soit mort, avec 1 chance sur 2*. L'information est cachée.~~

Violation des inégalités de Bell

Expériences d'Aspect (Institut d'Optique d'Orsay – 1980, 1982).

* : si la probabilité pour que l'uranium se désintègre est de $\frac{1}{2}$ pendant la durée de l'expérience

La parabole du chat de Schrödinger

Quel est l'état du chat lorsque la boîte est encore fermée ?



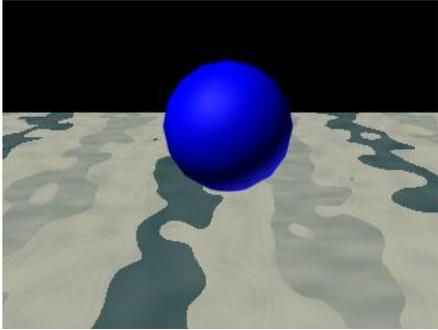
Réponse de la mécanique quantique :

1) il n'y a pas d'information cachée dans la boîte.
(en accord avec les inégalités de Bell)

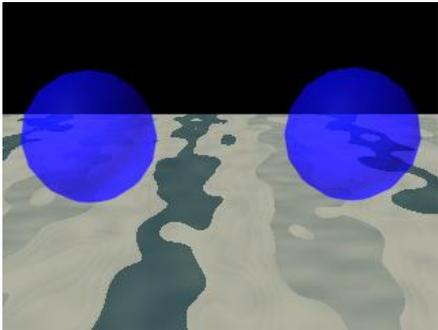
2) Tant que le chat est dans la boîte fermée, il est à la fois mort et vivant.

La non-localité

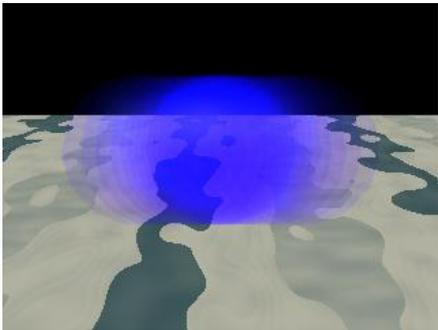
De la même façon que le chat peut être à la fois vivant et mort, une particule quantique peut se trouver en plusieurs lieux.



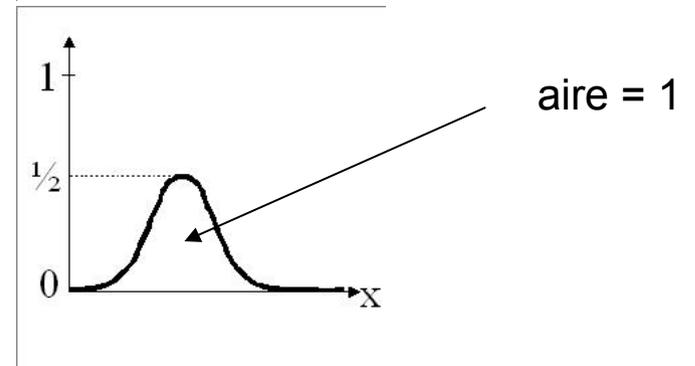
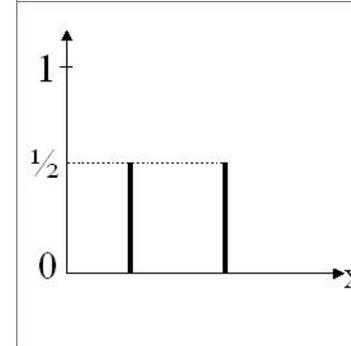
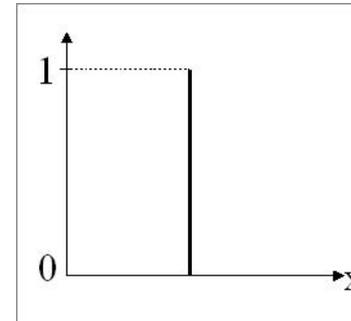
particule localisée
(mécanique classique)



particule 'localisée'
en deux sites avec une
superposition
à 50%-50%

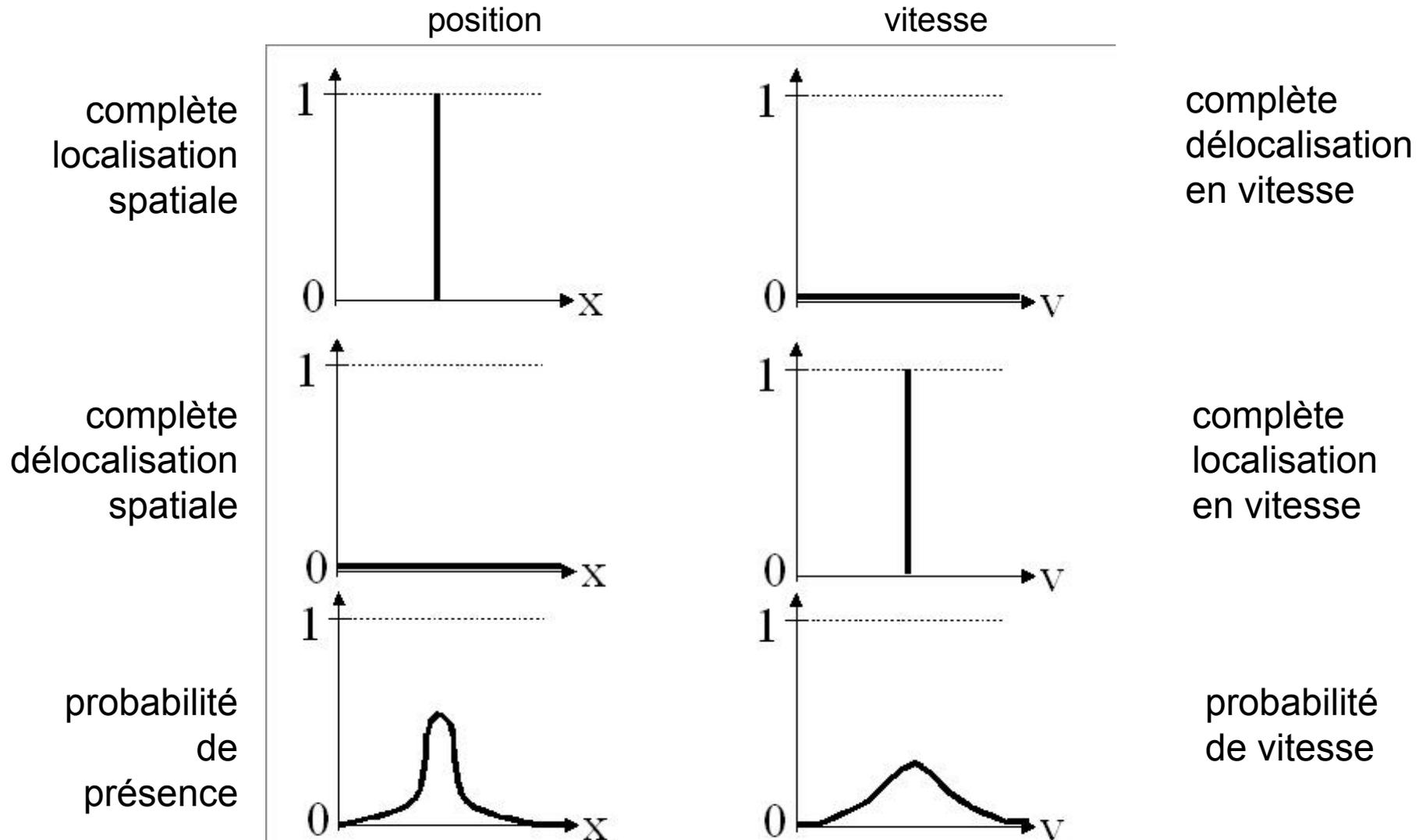


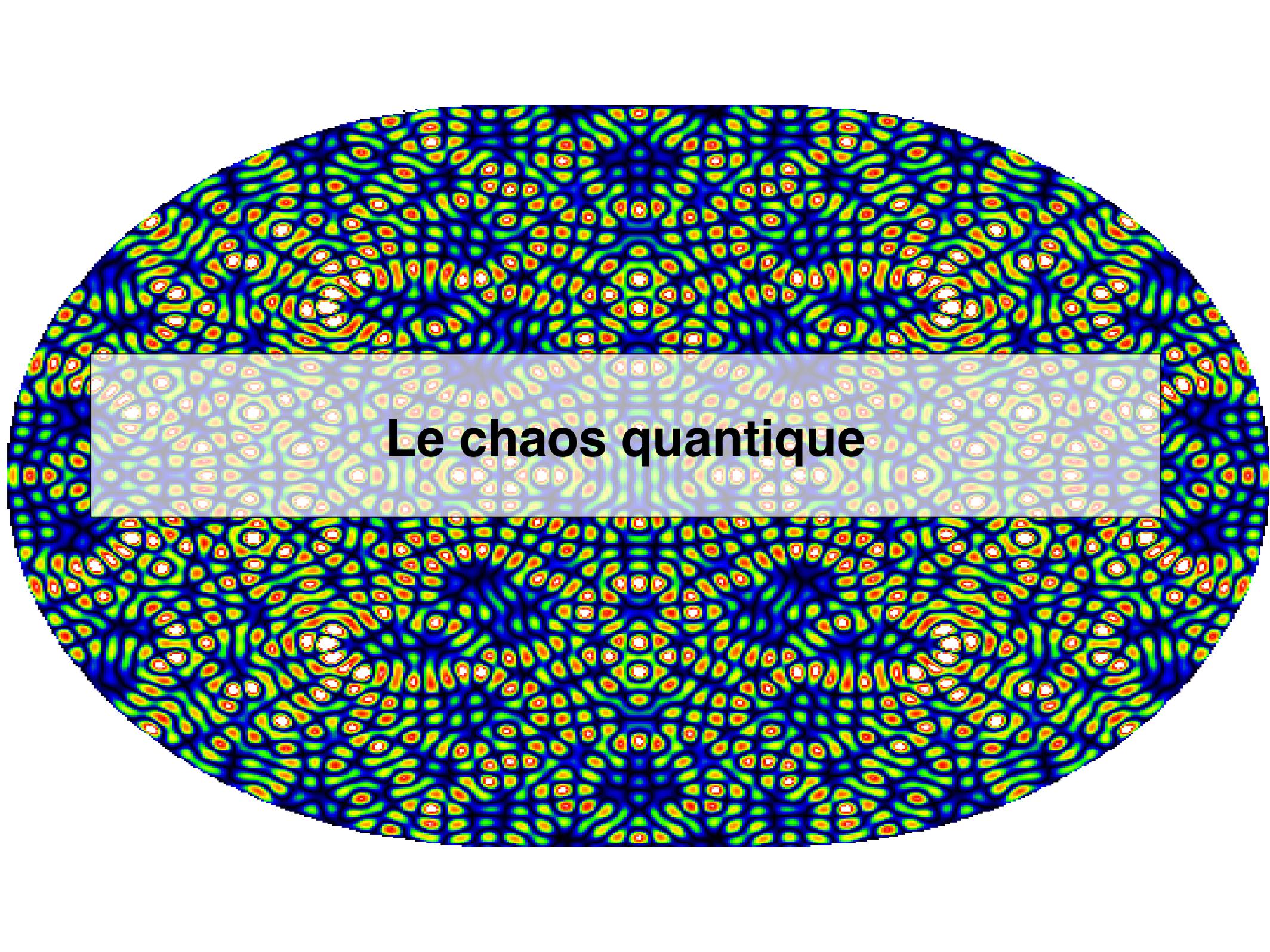
particule quantique
qui se trouve 'partout
à la fois'



Le principe d'incertitude de Heisenberg

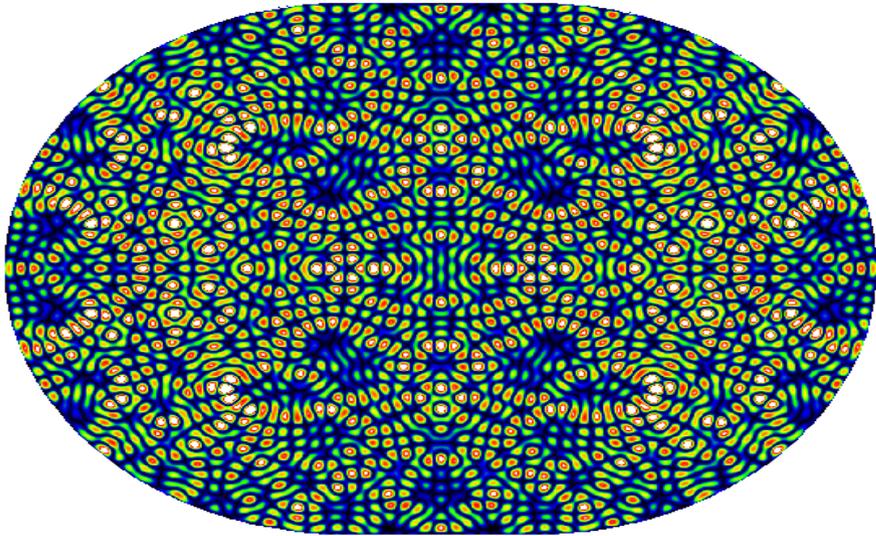
Principe d'incertitude de Heisenberg : on ne peut pas mesurer simultanément à la fois la position et la vitesse d'une particule avec une précision infinie.



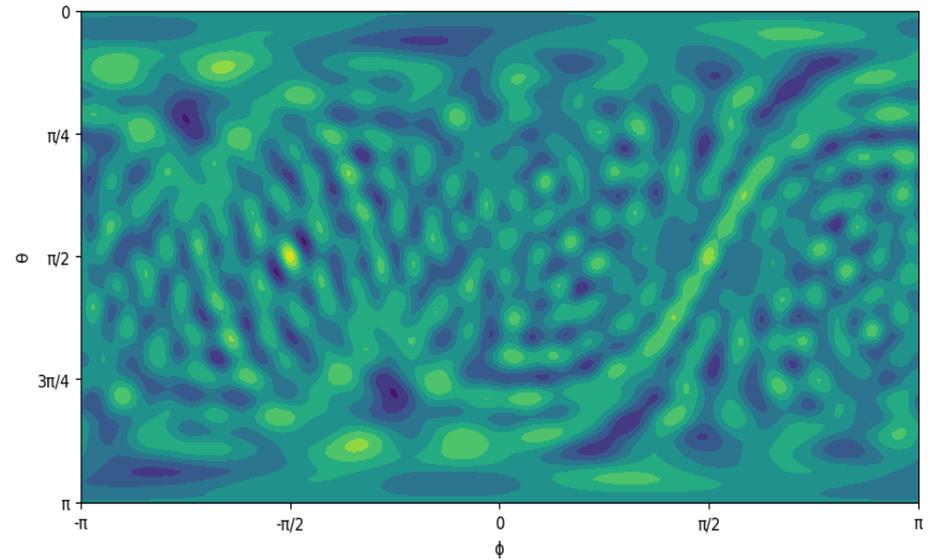
The image features a circular, colorful pattern with a complex, fractal-like structure. The pattern consists of numerous small, interconnected loops and swirls, creating a dense, intricate texture. The colors are primarily blue, green, and yellow, with some red and white highlights. A semi-transparent white rectangular box is centered horizontally across the middle of the circle, containing the text "Le chaos quantique" in a bold, black, sans-serif font.

Le chaos quantique

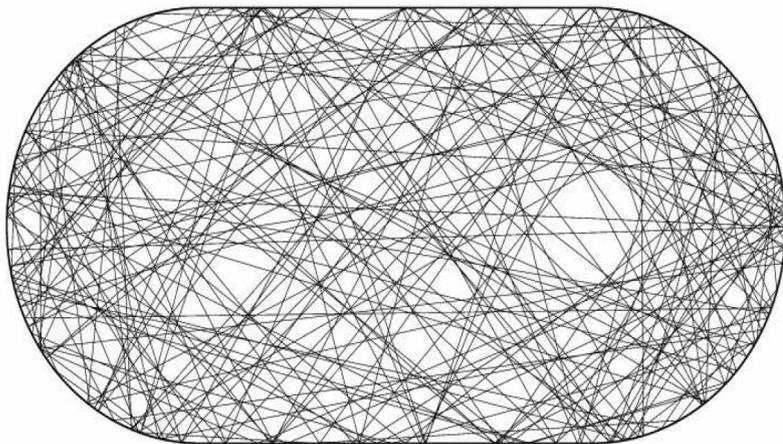
Évidences du chaos quantique



Ondes quantiques d'une particule piégée dans un stade de Bunimovich



Ondes quantiques d'un rotateur frappé quantique



Trajectoire d'une boule de billard dans un stade de Bunimovich

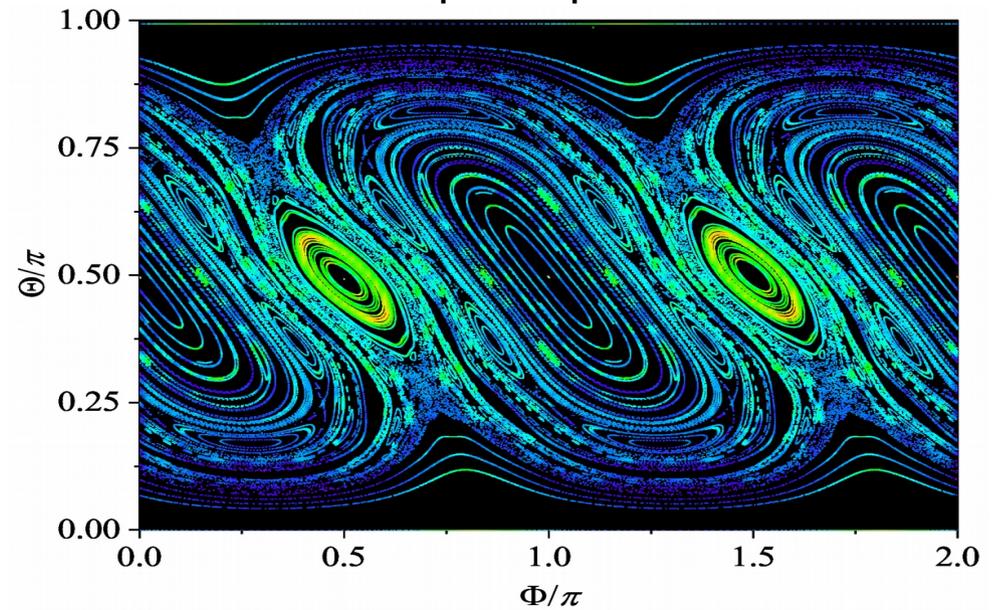
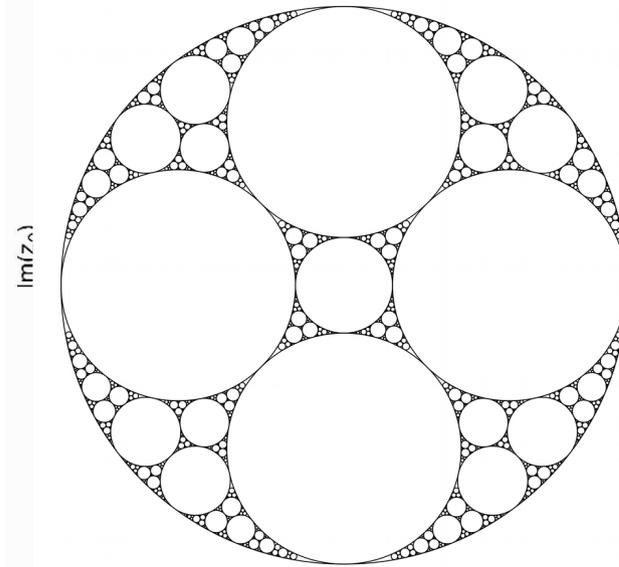
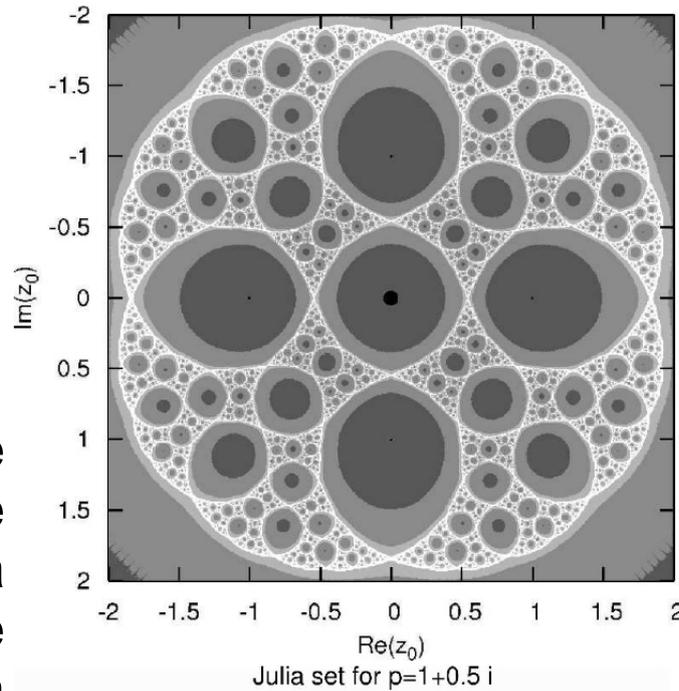


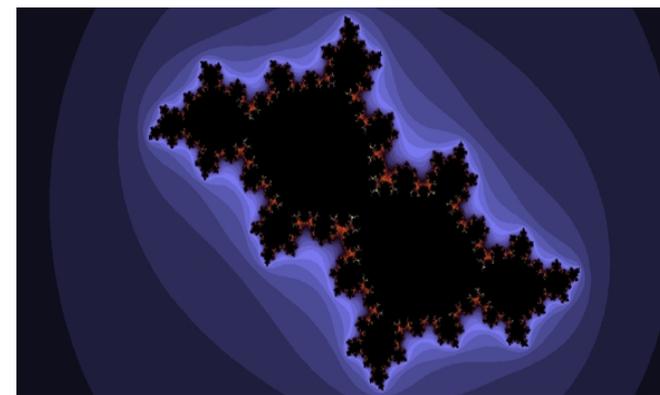
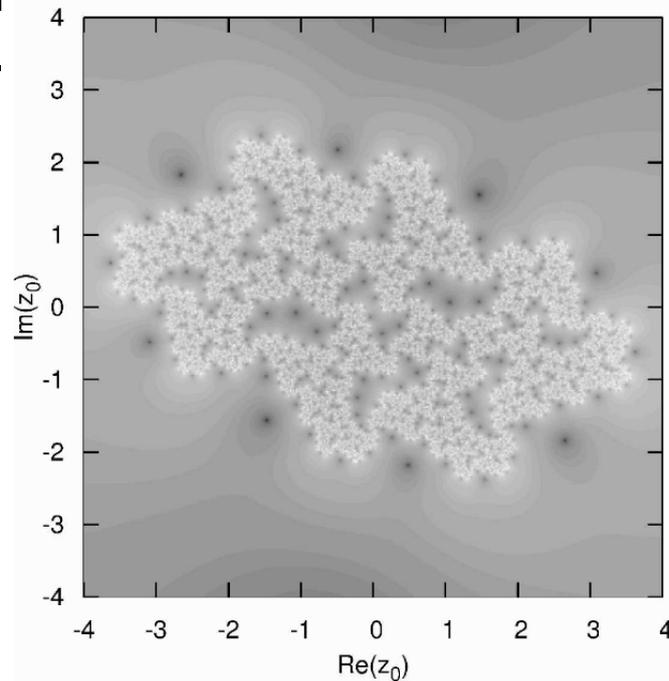
Diagramme de phase d'un rotateur frappé classique

Évidences du chaos quantique

Fractales de type ensemble de Julia pour la dynamique de purification d'un bit quantique.



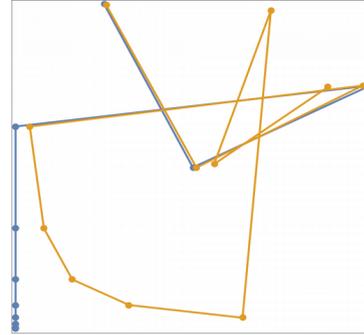
cercles d'Apollonius



ensemble de Julia classique

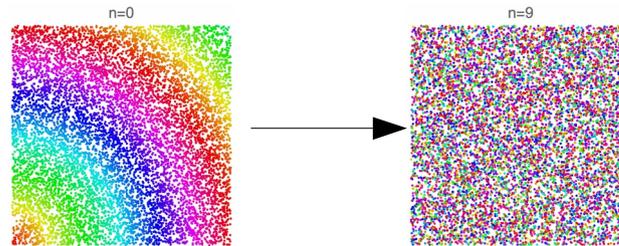
Pas de définition claire du chaos quantique

- Sensibilité aux conditions initiales : *les petites incertitudes initiales croissent avec le temps.*



Mais en physique quantique, si Δx_0 est petit, Δv_0 est grand.
→ Impossible de définir la sensibilité aux conditions initiales.

- Mélange topologique

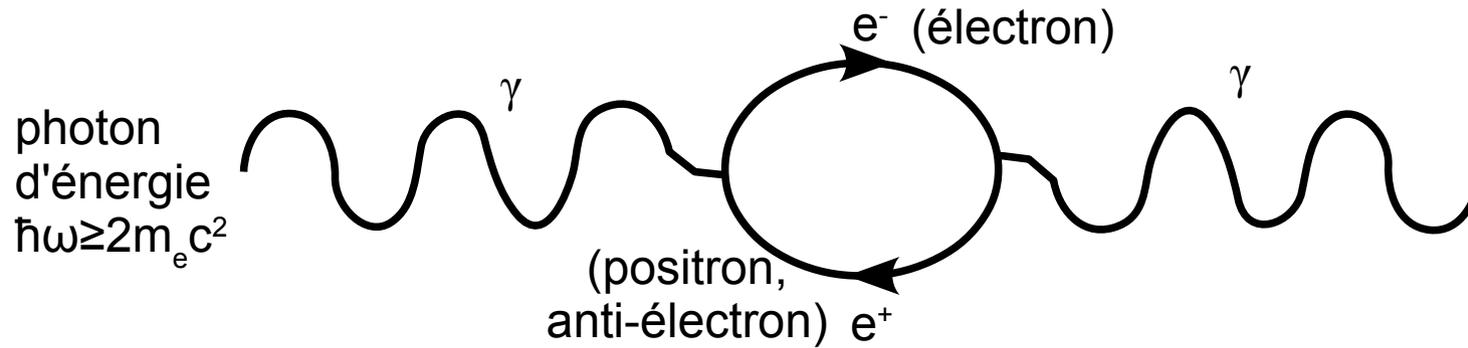


Mais en physique quantique, les particules sont délocalisées, ce sont aussi des ondes. Donc à plusieurs particules, les ondes sont dès l'origine déjà mélangées.
→ Impossible de caractériser le mélange au cours du temps.

Les fluctuations du vide quantique

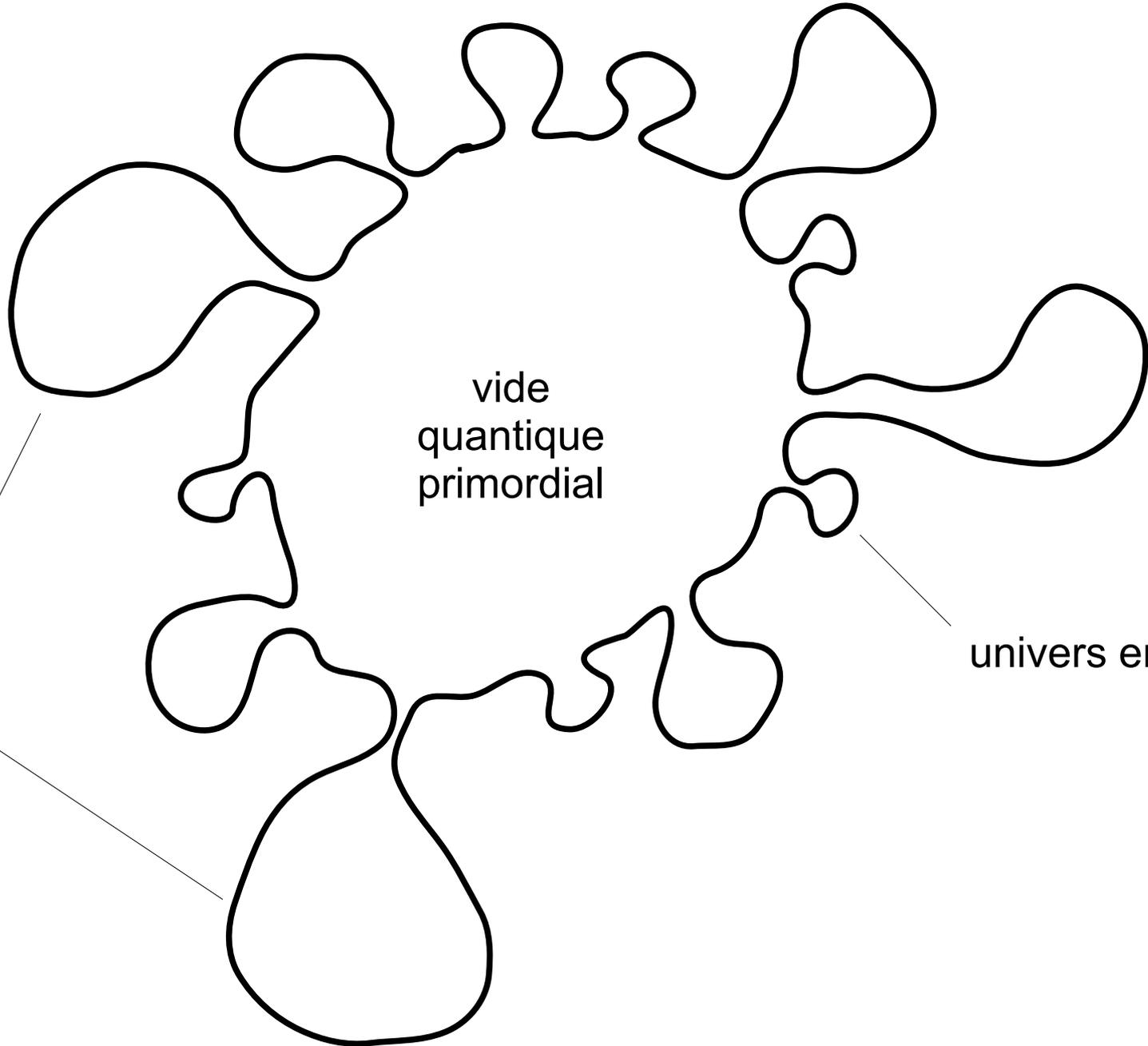
Échelle subatomique

10^{-18} m à 10^{-10} m



Les fluctuations du champ électromagnétique sont alors similaires à un processus chaotique.

Cosmologie quantique



vide
quantique
primordial

univers post-
inflation

univers en inflation