

GAZ QUANTIQUE DANS UN POTENTIEL PÉRIODIQUE  
DÉPENDANT DU TEMPS : DE LA MODULATION PERTURBATIVE  
AUX RÉSONANCES DE L'EFFET TUNNEL ASSISTÉ PAR LE  
CHAOS

Maxime ARNAL

Directeur de thèse : David GUÉRY-ODELIN  
Co-directrice de thèse : Juliette BILLY

Équipe Atomes froids  
Laboratoire Collisions Agrégats Réactivité

Soutenance de thèse  
8 octobre 2020

# Les technologies quantiques

- Avancées technologiques majeures : laser, transistor, IRM, ...
- Exploitation d'effets de plus en plus subtils

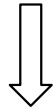
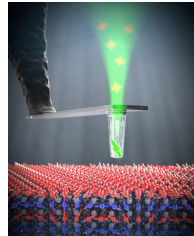
*Quantum manifesto (2016)*

## Communications quantiques



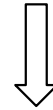
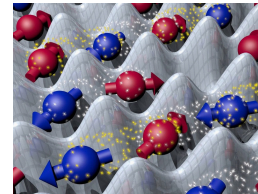
sécurité  
absolue des  
transmissions

## Capteurs quantiques



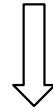
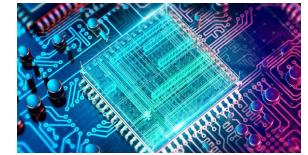
meilleures  
sensibilité &  
résolution

## Simulateurs quantiques



simulation de  
certains  
problèmes  
difficiles à  
traiter

## Ordinateur quantique



puissance de  
calcul inégalée

# Les technologies quantiques

- Avancées technologiques majeures : laser, transistor, IRM, ...
- Exploitation d'effets de plus en plus subtils

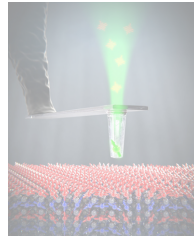
*Quantum manifesto (2016)*

## Communications quantiques



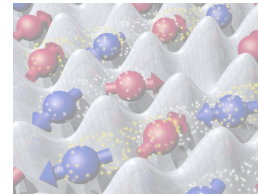
sécurité  
absolue des  
transmissions

## Capteurs quantiques



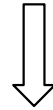
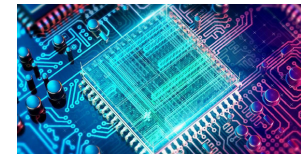
meilleures  
sensibilité &  
résolution

## Simulateurs quantiques



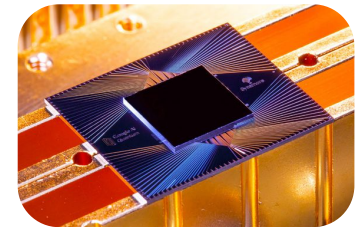
simulation de  
certains  
problèmes  
difficiles à  
traiter

## Ordinateur quantique



puissance de  
calcul inégalée

- 23 octobre 2019 : Sycamore, 53 qubits  
F. Arute *et al.*, Nature 574, 7779 (2019)
- 28 août 2020 : calcul Hartree-Fock  
Google AI Quantum, Science 369, 6507 (2020)



# Les technologies quantiques

- Avancées technologiques majeures : laser, transistor, IRM, ...
- Exploitation d'effets de plus en plus subtils

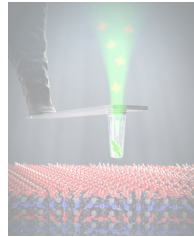
*Quantum manifesto (2016)*

## Communications quantiques



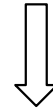
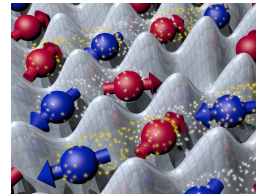
sécurité  
absolue des  
transmissions

## Capteurs quantiques



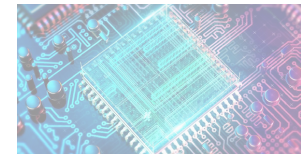
meilleures  
sensibilité &  
résolution

## Simulateurs quantiques



simulation de  
certains  
problèmes  
difficiles à  
traiter

## Ordinateur quantique



puissance de  
calcul inégalée

- Réalisation analogique d'un modèle quantique

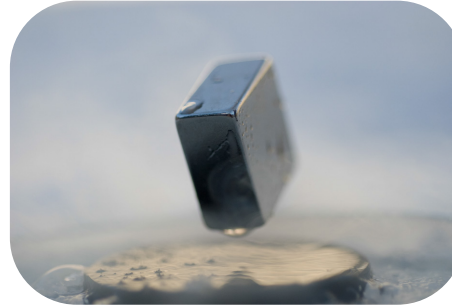
# Qu'est-ce qu'un simulateur quantique ?

Phénomène physique

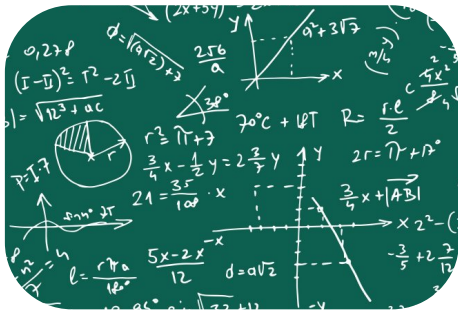


# Qu'est-ce qu'un simulateur quantique ?

Phénomène physique



Modèle

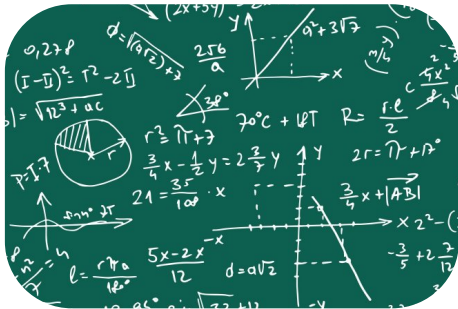


# Qu'est-ce qu'un simulateur quantique ?

Phénomène physique



Modèle



Simulation



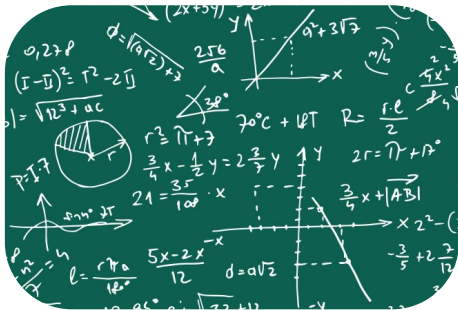
Extraction d'informations

# Qu'est-ce qu'un simulateur quantique ?

Phénomène physique



Modèle



Simulation



Extraction d'informations



# Qu'est-ce qu'un simulateur quantique ?

Phénomène physique

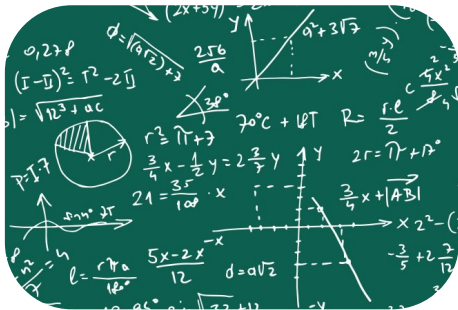


*"Nature isn't classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical"*

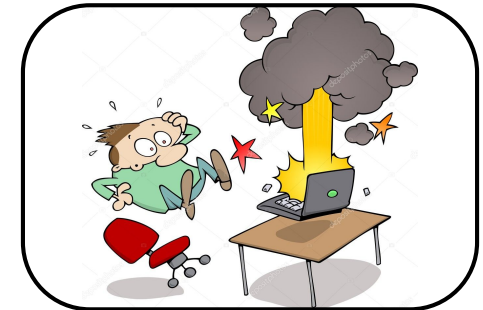


Int. J. Theor. Phys 21, 6-7 (1982)

Modèle



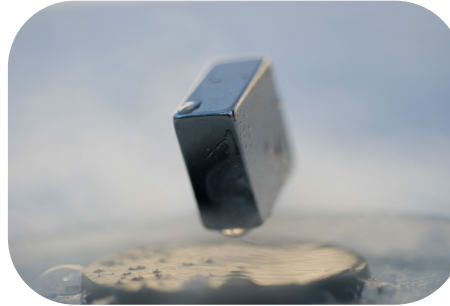
Simulation



Extraction d'informations

# Qu'est-ce qu'un simulateur quantique ?

Phénomène physique

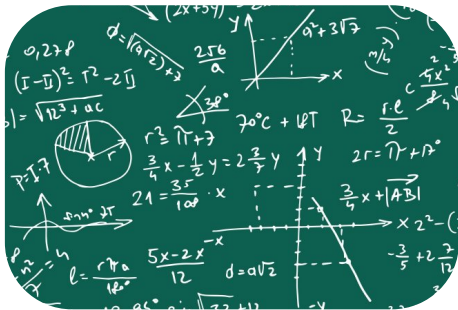


*"Nature isn't classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical"*

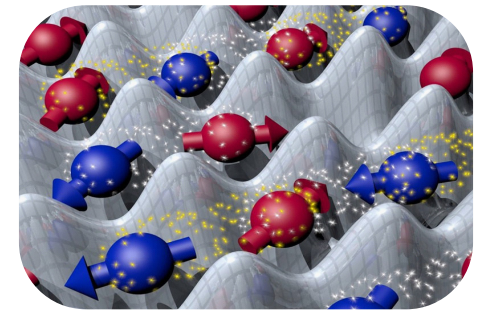


Int. J. Theor. Phys 21, 6-7 (1982)

Modèle



Simulation



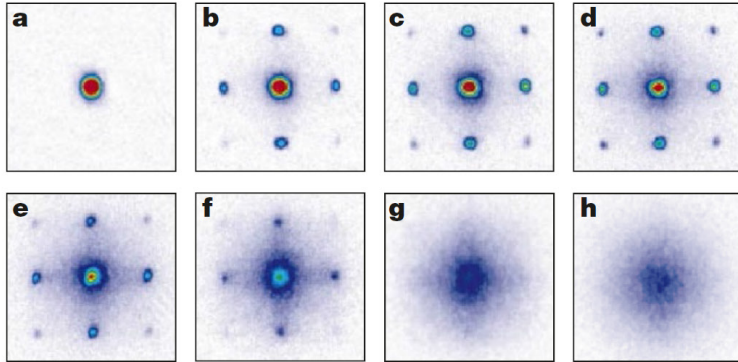
Extraction d'informations

- Plateformes possibles : **gaz quantiques**, ions piégés, circuits supraconducteurs, boîtes quantiques, centres NV ...

# Quelques réalisations des simulateurs quantiques

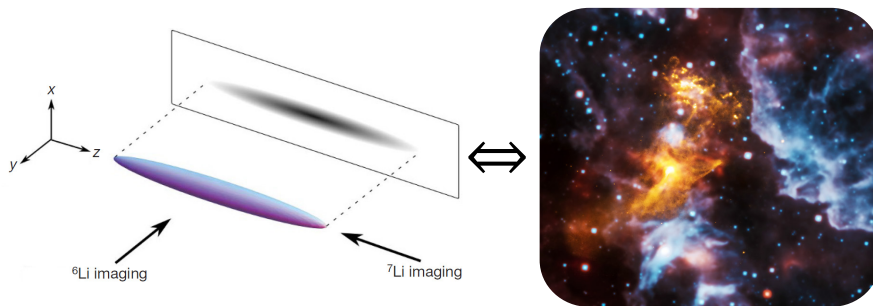
- Transition superfluide/isolant de Mott

M. Greiner *et al.*, Nature **415**, 6867 (2002)



- Équation d'état d'un gaz de fermions

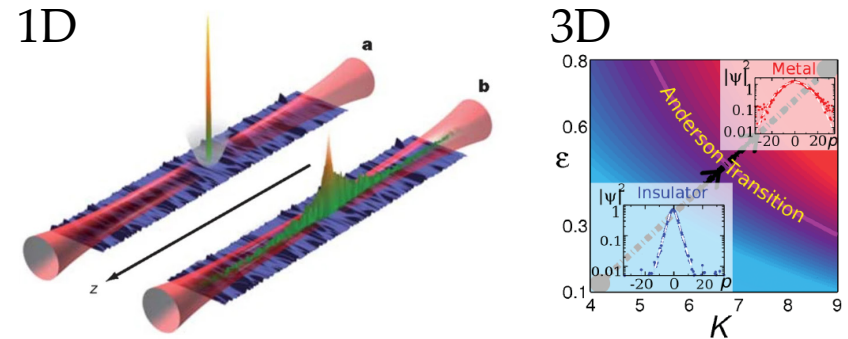
S. Nascimbène *et al.*, Nature **463**, 7284 (2010)



- Localisation d'Anderson

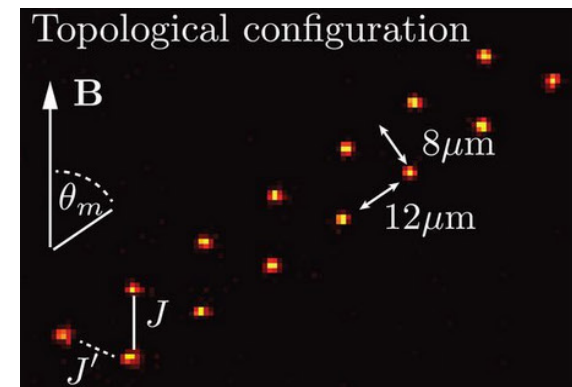
J. Billy *et al.*, Nature **453**, 7197 (2008)

J. Chabé *et al.*, PRL **101**, 25 (2008)



- Propriétés topologiques du modèle SSH

S. de Léséleuc *et al.*, Science **365**, 6455 (2019)



# Quelques réalisations des simulateurs quantiques

- Atomes froids/ultra-froids = systèmes "simples"
  - Pièges optiques = potentiels "parfaits"
    - Système **bien contrôlé**  
(préparation de l'état initial, dynamique, mesures, ...)

# Quelques réalisations des simulateurs quantiques

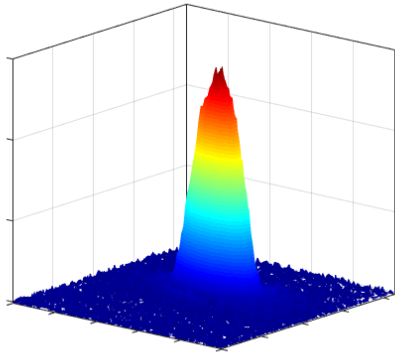
- Atomes froids/ultra-froids = systèmes "simples"
  - Pièges optiques = potentiels "parfaits"
  - Système **bien contrôlé**  
(préparation de l'état initial, dynamique, mesures, ...)

---

## Notre dispositif

---

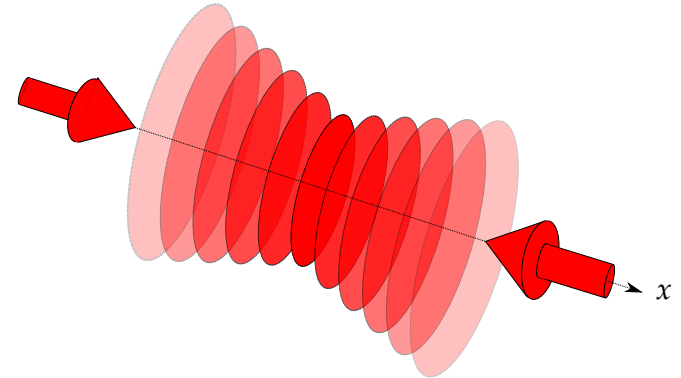
Condensat de Bose-Einstein de  $^{87}\text{Rb}$



Onde de matière **macroscopique**  
décrite par une fonction d'onde  $\psi$

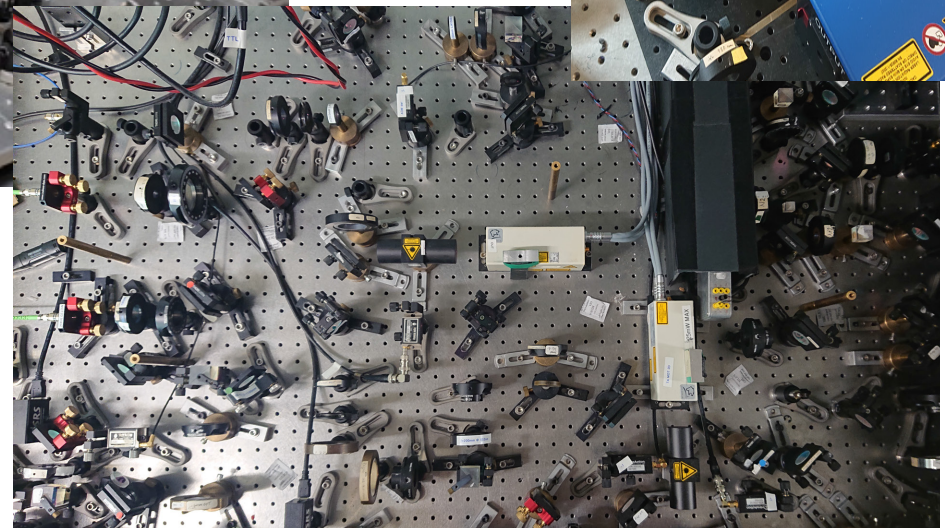
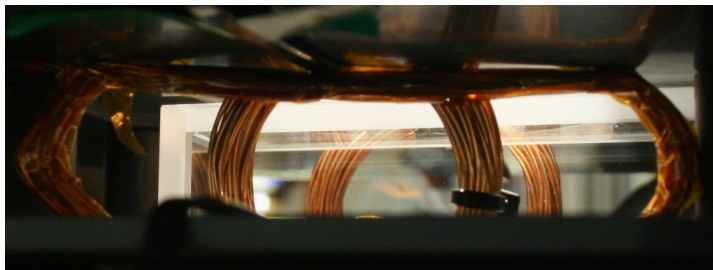
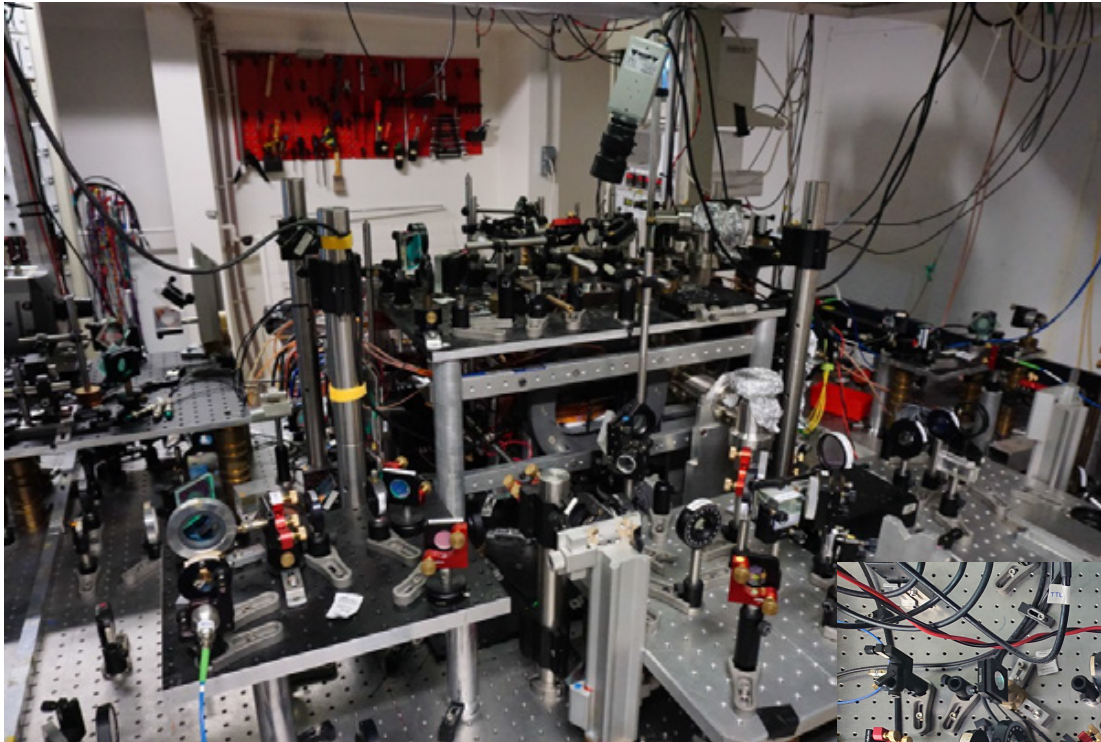
+

Réseau optique 1D



Potentiel périodique  
**dépendant du temps**

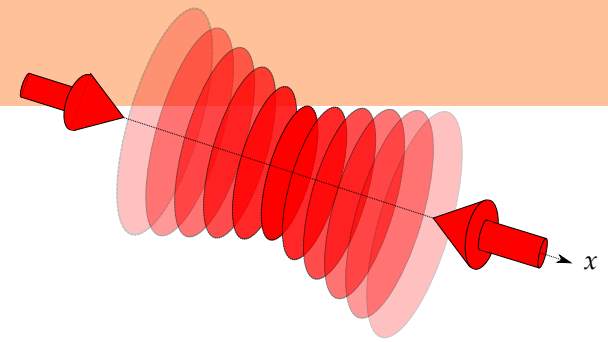
# Notre dispositif expérimental



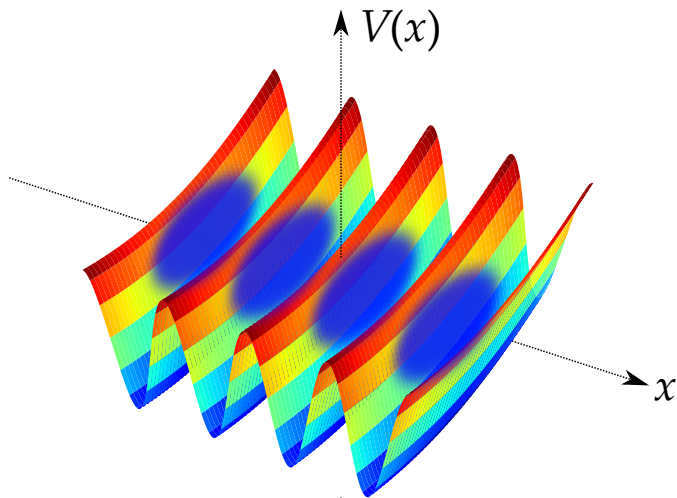
# Réseau optique

- Interférences de deux lasers contra-propageants
- Potentiel périodique, période spatiale  $d = 532$  nm

$$H = \frac{p^2}{2m} - \frac{s(t)E_L}{2} \cos(k_L x + \varphi(t))$$



$$k_L = \frac{2\pi}{d} \quad E_L = \frac{\hbar^2 k_L^2}{2m}$$

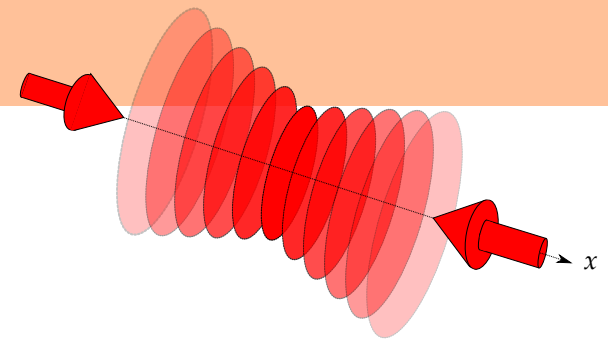
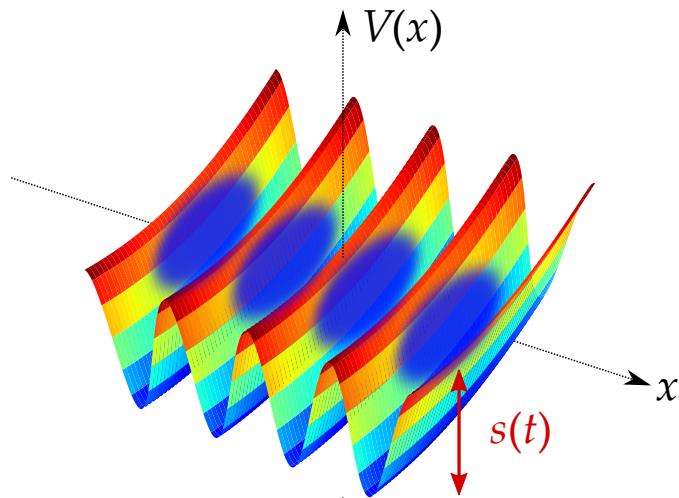


# Réseau optique

- Interférences de deux lasers contra-propageants
- Potentiel périodique, période spatiale  $d = 532$  nm

$$H = \frac{p^2}{2m} - \frac{s(t)E_L}{2} \cos(k_L x + \varphi(t))$$

Contrôle de  
la profondeur



$$k_L = \frac{2\pi}{d} \quad E_L = \frac{\hbar^2 k_L^2}{2m}$$

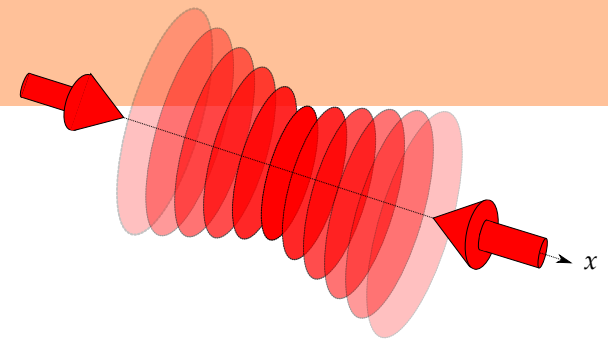


# Réseau optique

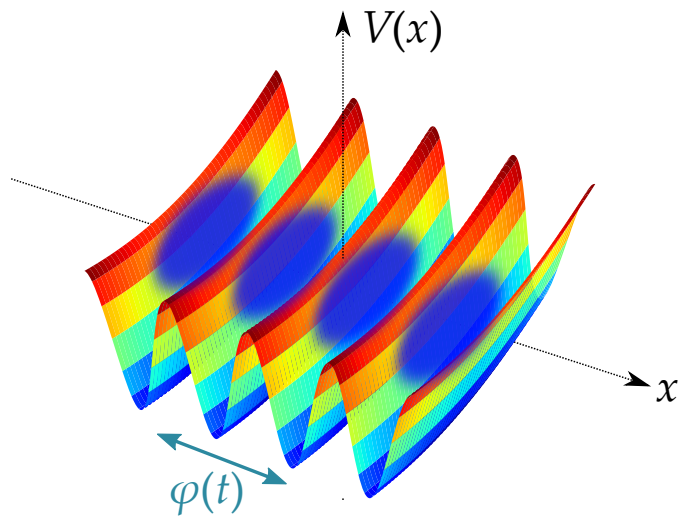
- Interférences de deux lasers contra-propageants
- Potentiel périodique, période spatiale  $d = 532$  nm

$$H = \frac{p^2}{2m} - \frac{s(t)E_L}{2} \cos(k_L x + \varphi(t))$$

Contrôle de la position



$$k_L = \frac{2\pi}{d} \quad E_L = \frac{\hbar^2 k_L^2}{2m}$$



# Réseau optique

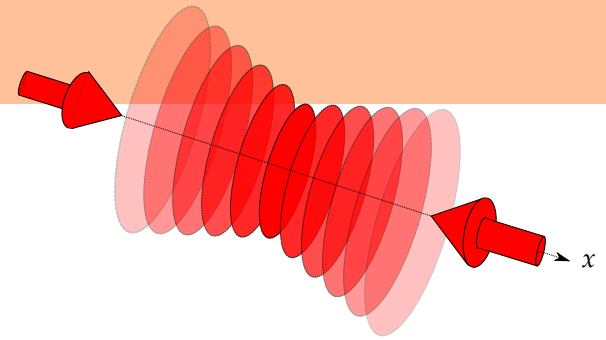
- Interférences de deux lasers contra-propageants
- Potentiel périodique, période spatiale  $d = 532 \text{ nm}$

$$H = \frac{p^2}{2m} - \frac{s(t)E_L}{2} \cos(k_L x + \varphi(t))$$

Contrôle de la profondeur

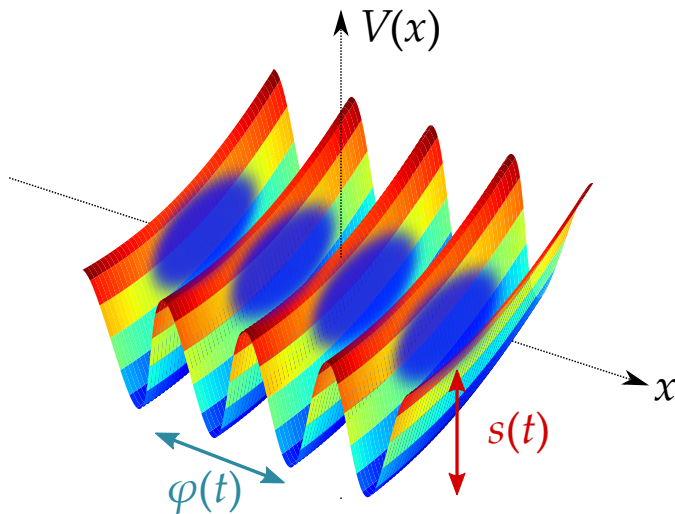
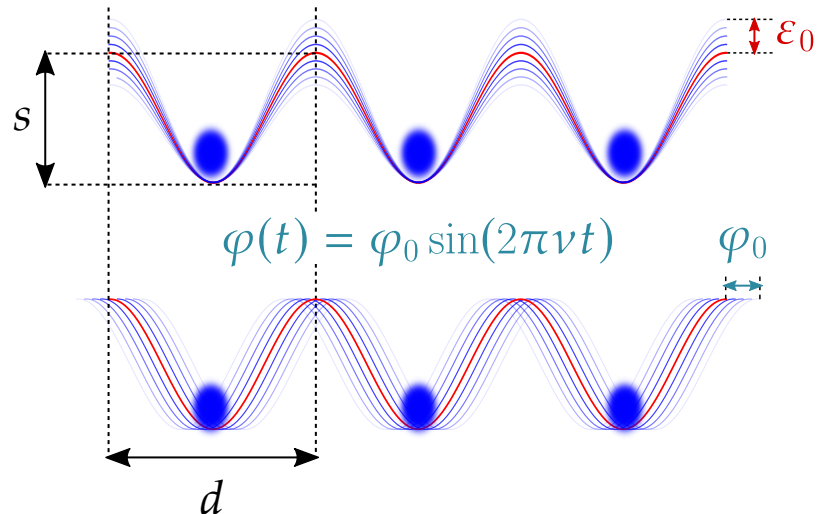
Contrôle de la position

$$k_L = \frac{2\pi}{d} \quad E_L = \frac{\hbar^2 k_L^2}{2m}$$

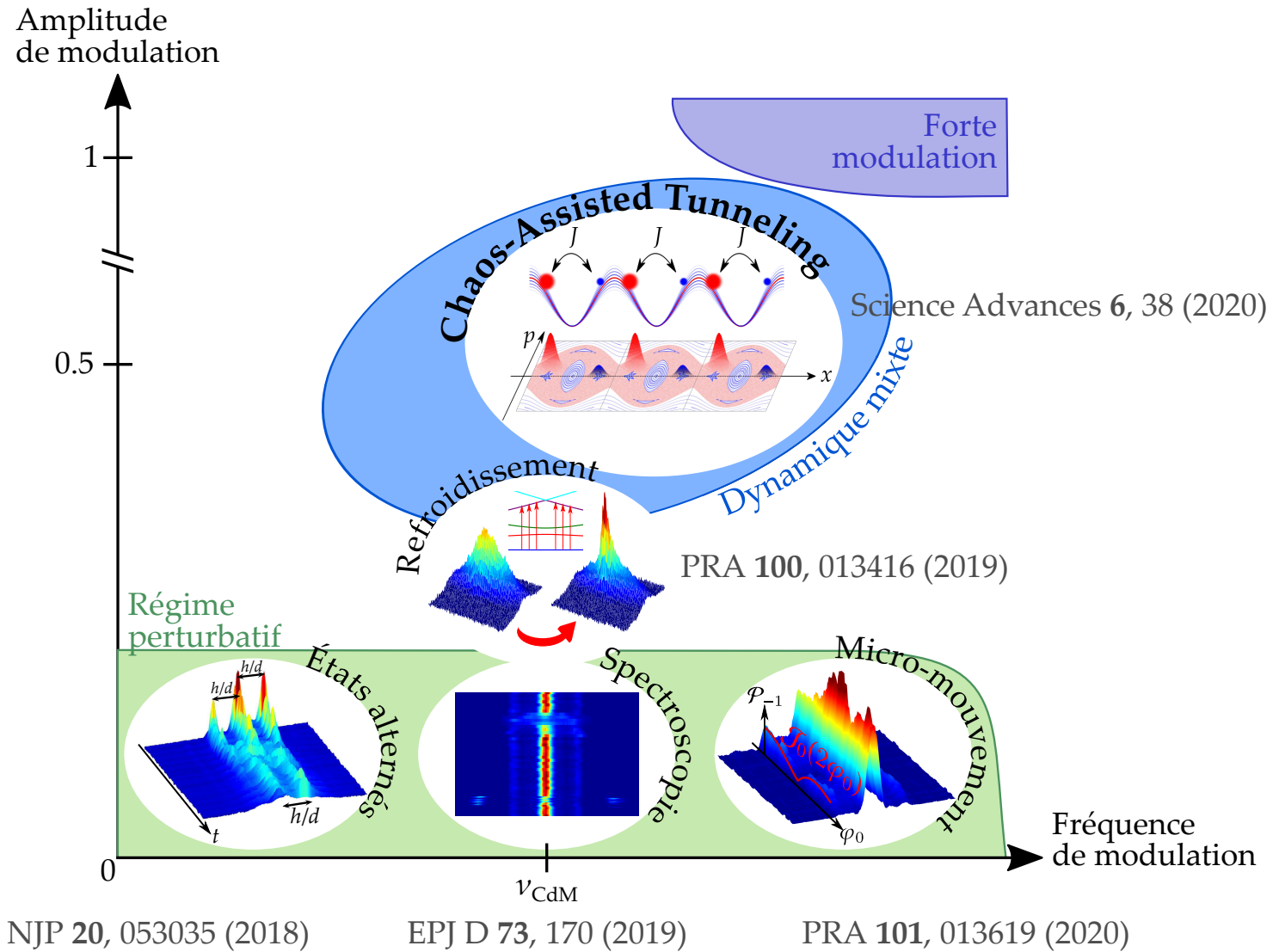


- Modulation périodique des paramètres du réseau :

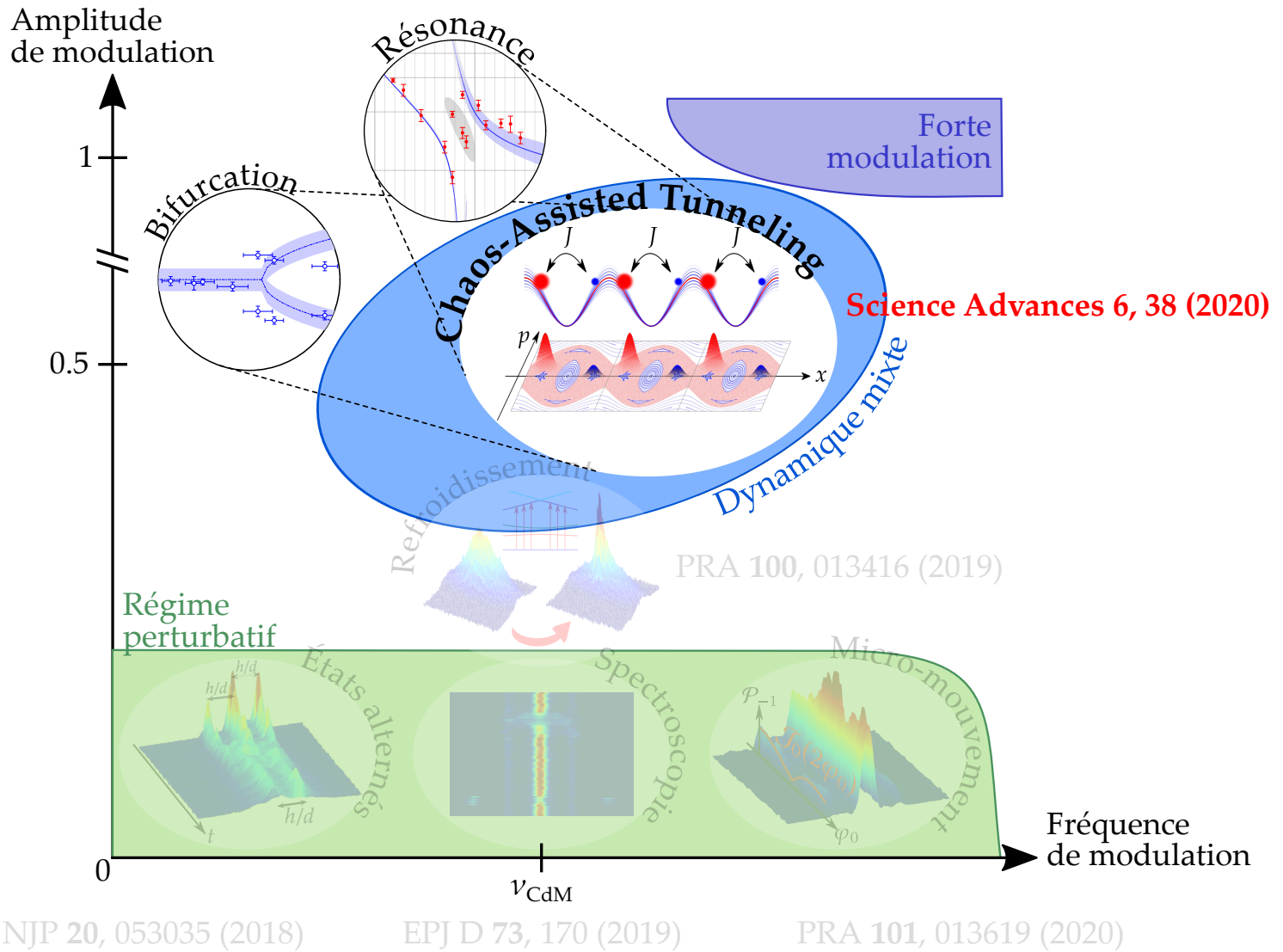
$$s(t) = s (1 + \varepsilon_0 \sin(2\pi\nu t))$$



# Une physique riche !



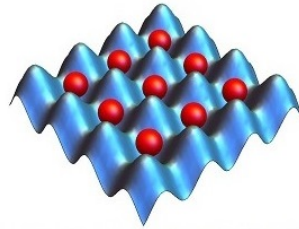
# Une physique riche !



# Chaos et simulation quantique

## Simulation quantique

- Système quantique hautement contrôlable



- Émulation d'autres systèmes par ingénierie d'Hamiltonien

## Théorie du chaos



- Faibles variations dans les paramètres du système conduisent à des résultats différents



- Chaos quantique : système dont l'équivalent classique est chaotique

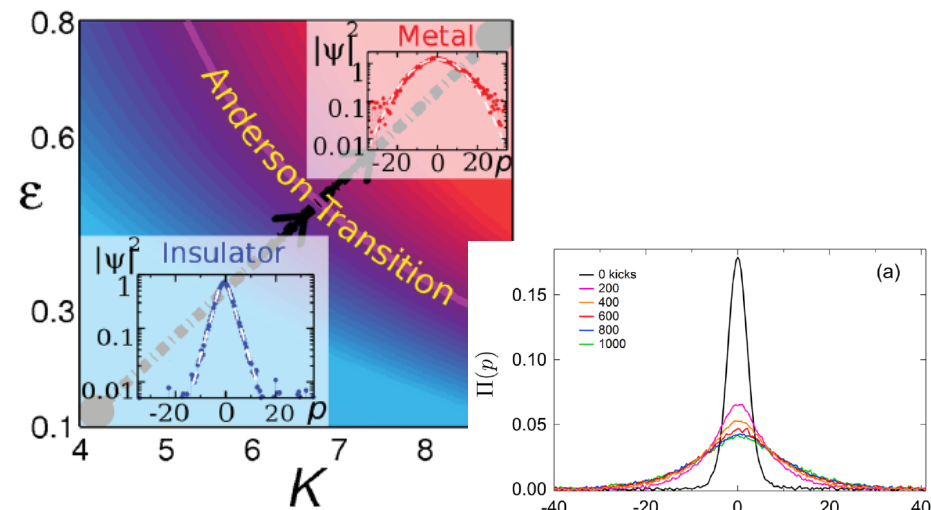
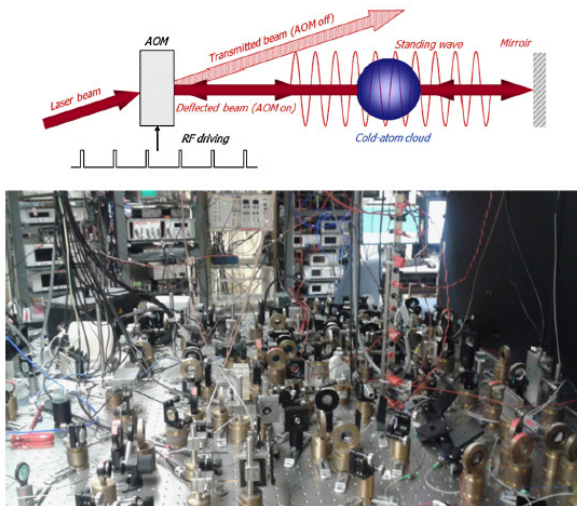
## Signatures du chaos classique dans le comportement du système quantique

Simulation de systèmes désordonnés

Contrôle par le chaos

# Chaos et désordre

- Rotateur frappé (*kicked rotor*)
  - Localisation dynamique : Moore *et al.* (1994), Ringot *et al.* (2000)
  - Localisation d'Anderson : Chabé *et al.* (2008), Manai *et al.* (2015)



Hamiltonien du  
rotateur frappé

correspondance  
 $\Leftrightarrow$

Hamiltonien de la  
transition Anderson

**Chaos joue le rôle de désordre**

# Chaos et contrôle

- Systèmes chaotiques : sensibilité exponentielle aux conditions initiales
- En contrepartie : système hautement versatile **Contrôle par le chaos**

E. Ott *et al.* (1990)

## **Controlling chaos in the brain**

**Steven J. Schiff<sup>\*</sup>, Kristin Jerger<sup>\*</sup>, Duc H. Duong<sup>\*</sup>, Taeun Chang<sup>\*</sup>,  
Mark L. Spano<sup>†</sup> & William L. Ditto<sup>‡</sup>**

## **Controlling Cardiac Chaos**

Alan Garfinkel, Mark L. Spano, William L. Ditto, James N. Weiss

# Chaos et contrôle

- Systèmes chaotiques : sensibilité exponentielle aux conditions initiales
- En contrepartie : système hautement versatile **Contrôle par le chaos**

E. Ott *et al.* (1990)

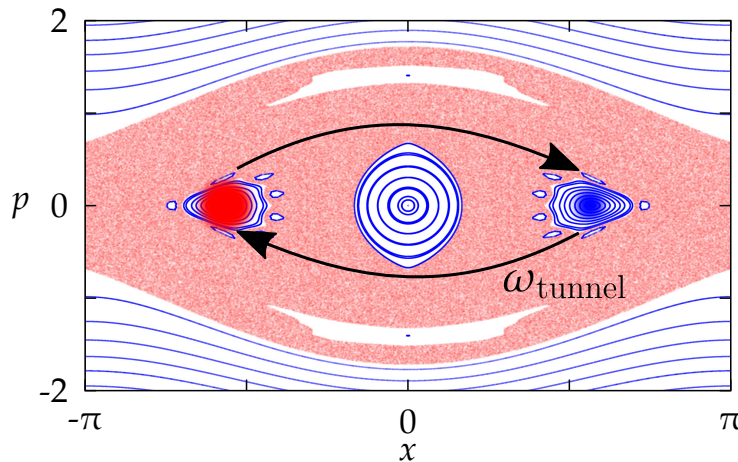
## Controlling chaos in the brain

Steven J. Schiff<sup>\*</sup>, Kristin Jerger<sup>\*</sup>, Duc H. Duong<sup>\*</sup>, Taeun Chang<sup>\*</sup>,  
Mark L. Spano<sup>†</sup> & William L. Ditto<sup>‡</sup>

## Controlling Cardiac Chaos

Alan Garfinkel, Mark L. Spano, William L. Ditto, James N. Weiss

- Cas du transport quantique en présence de chaos



- **Résonances dans l'effet tunnel**

S. Tomsovic et D. Ullmo (1994)

- **Exploiter une dynamique mixte pour contrôler le taux tunnel**

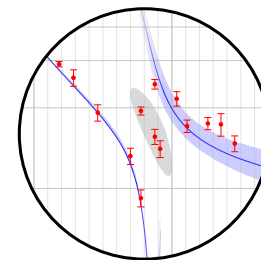
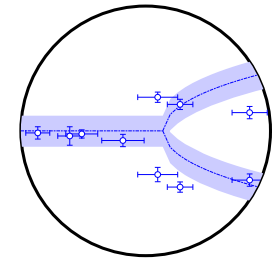
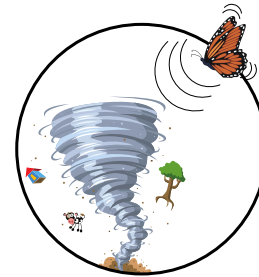
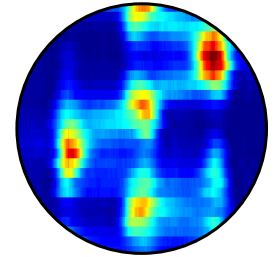
- Collaboration avec **LPT** (G. Lemarié, B. Georgeot et M. Martinez) et **LPTMS** (O. Giraud et D. Ullmo)

- **Défi expérimental !**



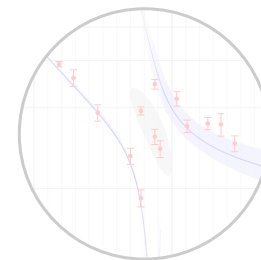
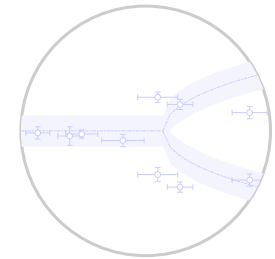
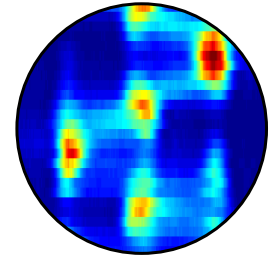
# Plan

- Introduction ✓
- Calibration de la profondeur du réseau optique
- Dynamique classique
  - ◆ Émergence de chaos
  - ◆ Étude des bifurcations
- Dynamique quantique : effet tunnel dynamique dans un espace des phases mixtes
  - ◆ Mécanisme à deux niveaux : cas régulier
  - ◆ Mécanisme à trois niveaux : effet tunnel assisté par le chaos (CAT)
- Conclusion



# Plan

- Introduction ✓
- Calibration de la profondeur du réseau optique
- Dynamique classique
  - ◆ Émergence de chaos
  - ◆ Étude des bifurcations
- Dynamique quantique : effet tunnel dynamique dans un espace des phases mixtes
  - ◆ Mécanisme à deux niveaux : cas régulier
  - ◆ Mécanisme à trois niveaux : effet tunnel assisté par le chaos (CAT)
- Conclusion

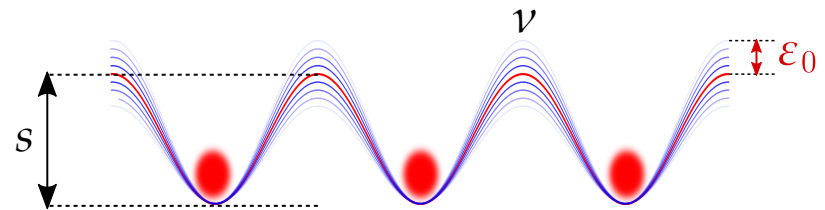


# Nécessité d'une calibration précise

- Dynamique chaotique : sensibilité aux paramètres expérimentaux

- Paramètres :

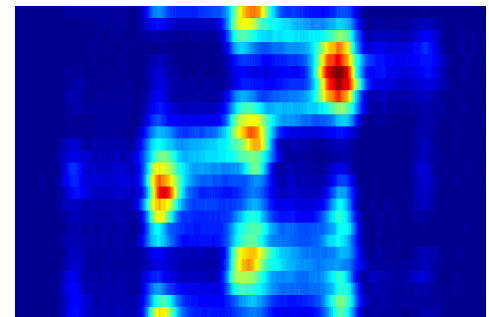
- fréquence de modulation
- amplitude de modulation
- **profondeur du réseau optique**



- Méthodes de calibration existantes : diffraction Kapitza-Dirac, expansion du nuage, ...

- **Nouvelle méthode reposant sur le contrôle de la phase du réseau**

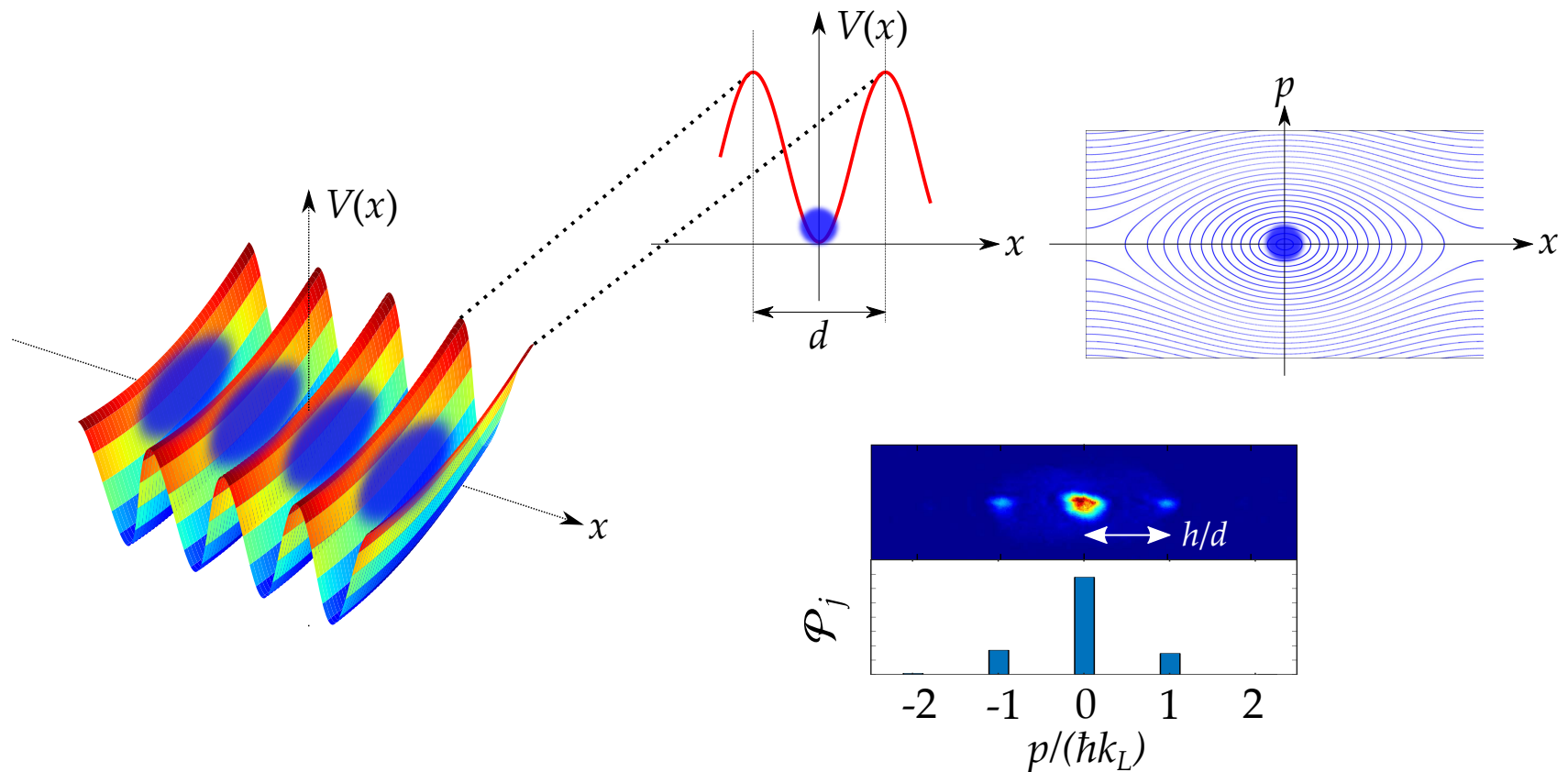
- Méthode robuste
- Valable sur une grande plage de profondeur
- Erreur de l'ordre de quelques pourcents



# Calibration - protocole expérimental

- Chargement dans le réseau

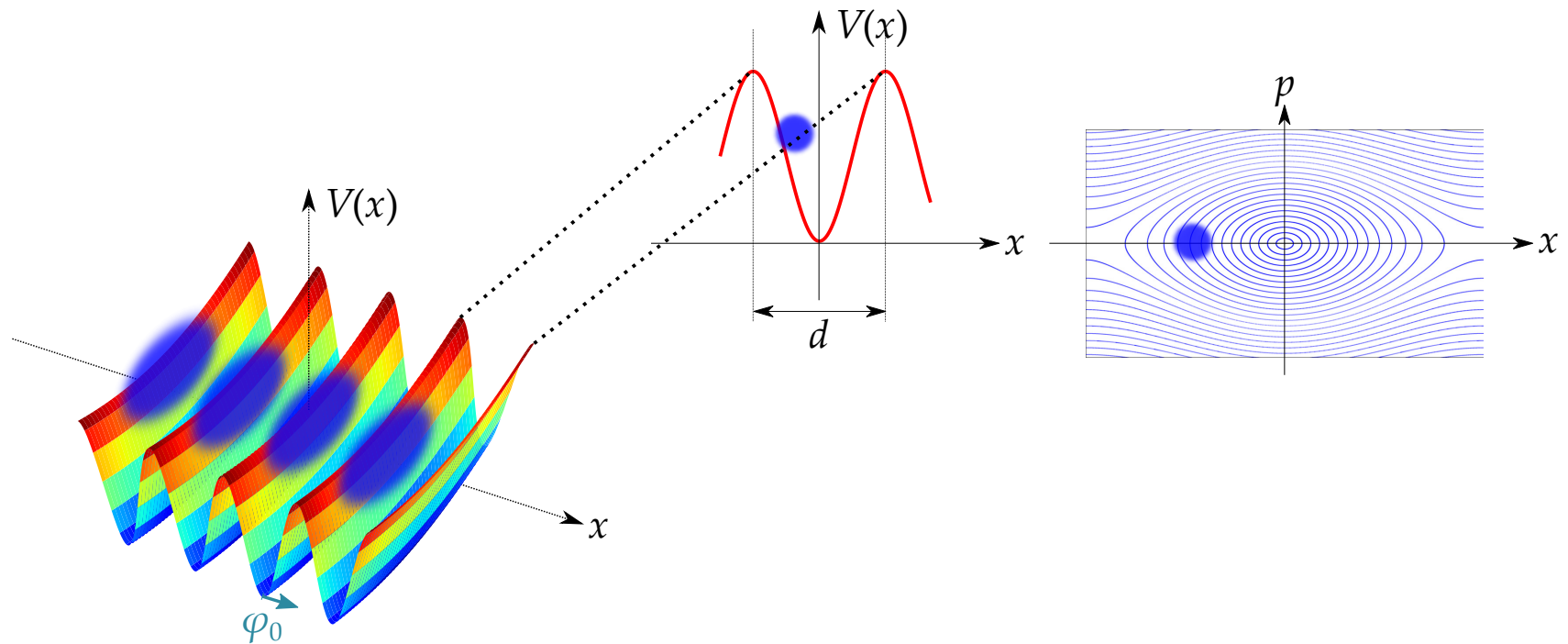
$$H = \frac{p^2}{2m} - \frac{sE_L}{2} \cos(k_L x)$$



# Calibration - protocole expérimental

- Chargement dans le réseau
- Déplacement soudain du réseau

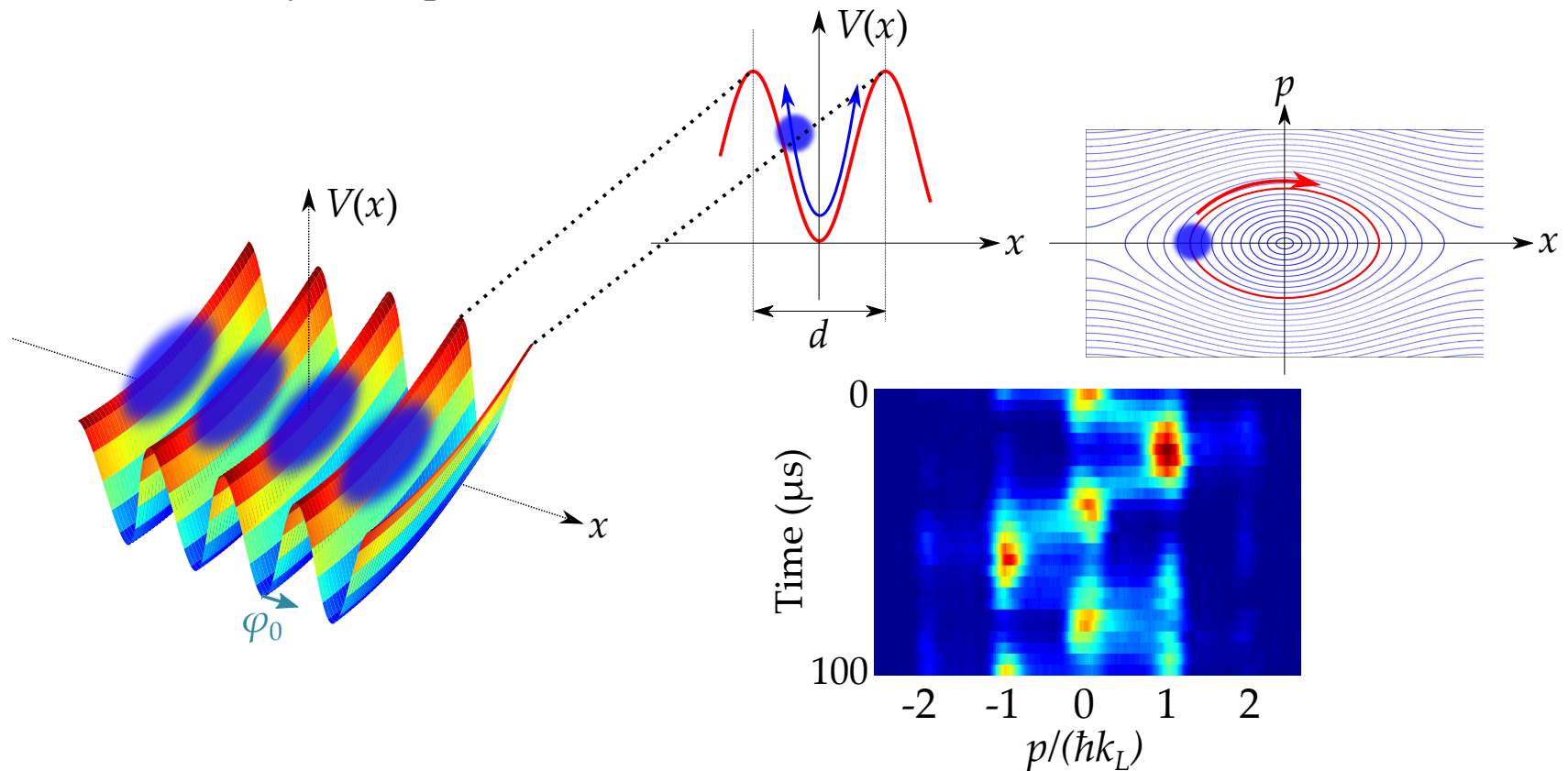
$$H = \frac{p^2}{2m} - \frac{sE_L}{2} \cos(k_L x + \varphi_0)$$



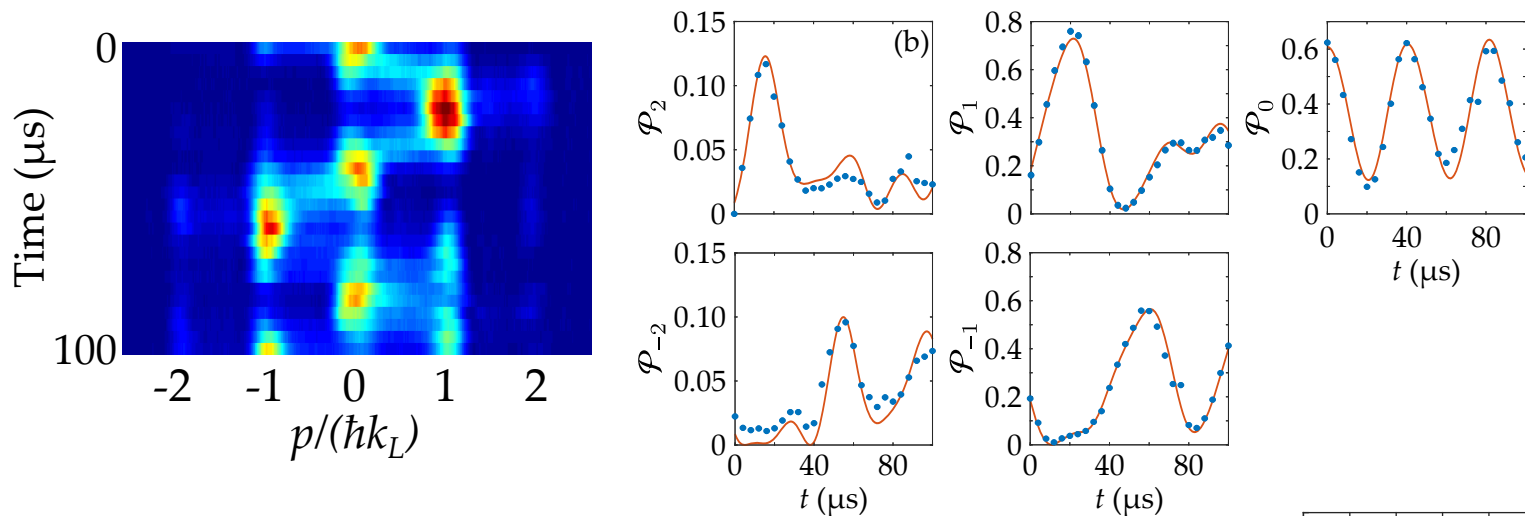
# Calibration - protocole expérimental

- Chargement dans le réseau
- Déplacement soudain du réseau
- On mesure la dynamique intrasite

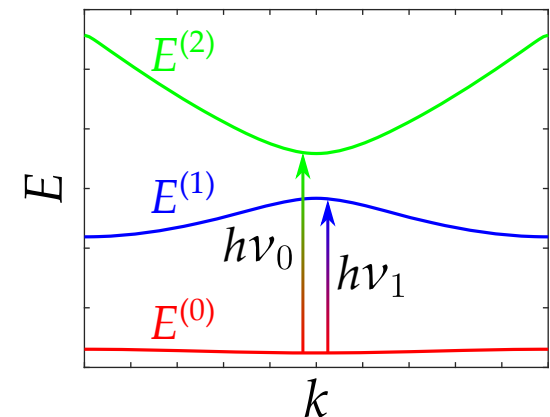
$$H = \frac{p^2}{2m} - \frac{sE_L}{2} \cos(k_L x + \varphi_0)$$



# Description en ondes de Bloch



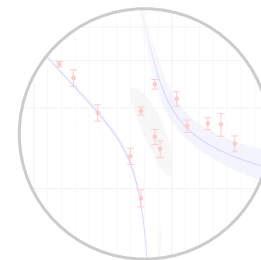
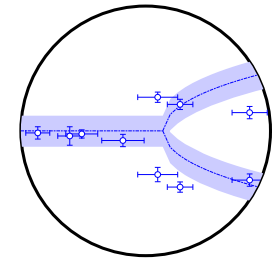
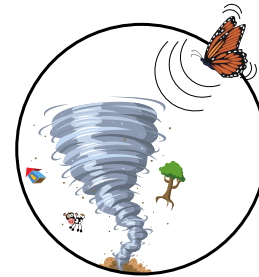
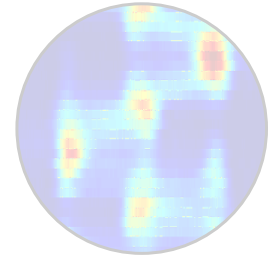
- Structure de bandes  $\Leftrightarrow$  profondeur
- Avantages de notre méthode :
  - indépendant des interactions interatomiques
  - indépendant du confinement extérieur
  - valide sur une grande gamme de profondeur ( $0 < s < 50$ )



**Mesure robuste et précise ( $\sim 2\%$ ) *in situ* de la profondeur du réseau optique**

# Plan

- Introduction ✓
- Calibration de la profondeur du réseau optique ✓
- Dynamique classique
  - ◆ Émergence de chaos
  - ◆ Étude des bifurcations
- Dynamique quantique : effet tunnel dynamique dans un espace des phases mixtes
  - ◆ Mécanisme à deux niveaux : cas régulier
  - ◆ Mécanisme à trois niveaux : effet tunnel assisté par le chaos (CAT)
- Conclusion

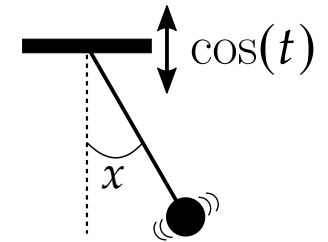




# Espace des phases mixte

- Réseau optique modulé en amplitude (adimensionné):

$$h_{\gamma, \varepsilon_0} = \frac{p^2}{2} - \gamma (1 + \varepsilon_0 \cos(t)) \cos(x)$$

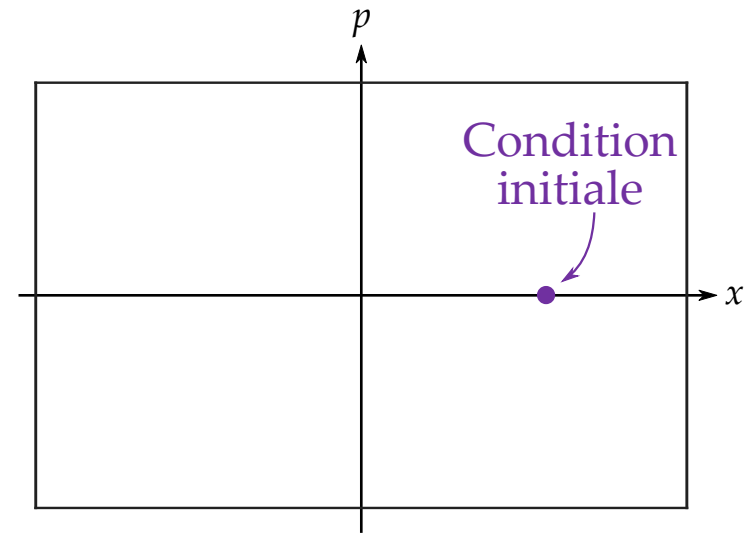
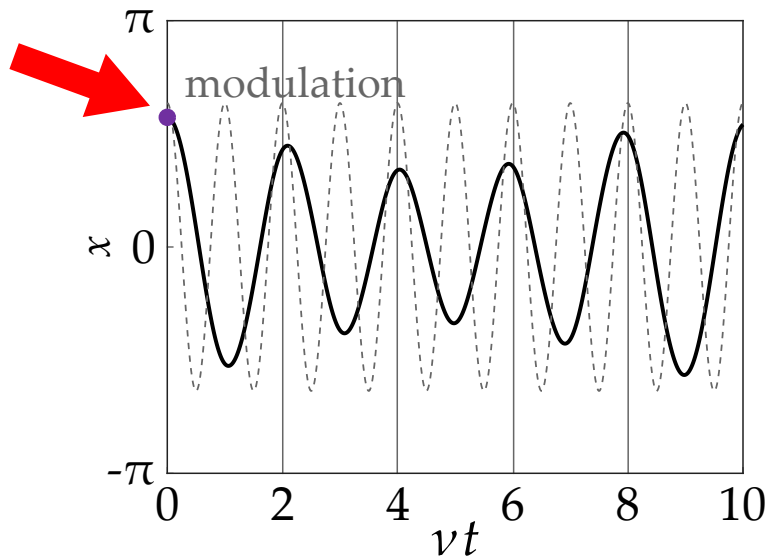


$$\gamma = s \left( \frac{v_L}{v} \right)^2$$

$$\varepsilon_0$$

$$v_L = \frac{E_L}{h}$$

- Pour un couple  $(\gamma, \varepsilon_0)$  deux types de trajectoires: régulière et chaotique



# Espace des phases mixte

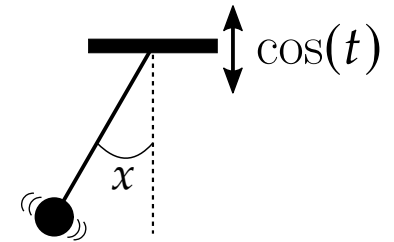
- Réseau optique modulé en amplitude (adimensionné):

$$h_{\gamma, \varepsilon_0} = \frac{p^2}{2} - \gamma (1 + \varepsilon_0 \cos(t)) \cos(x)$$

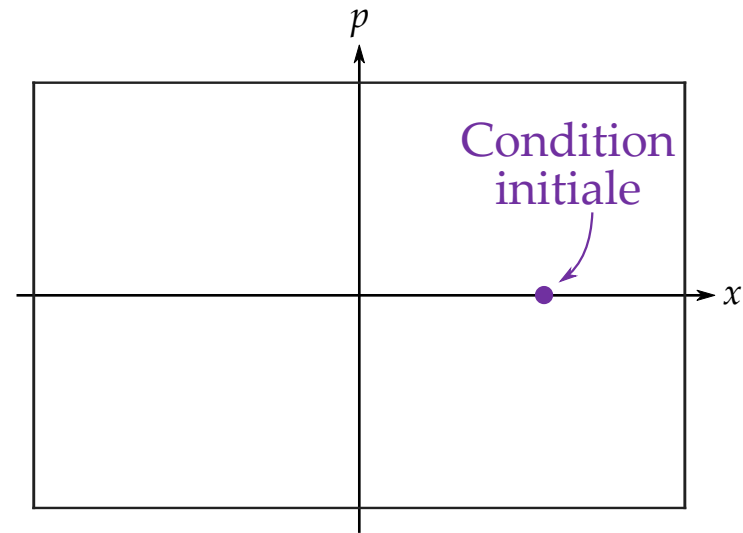
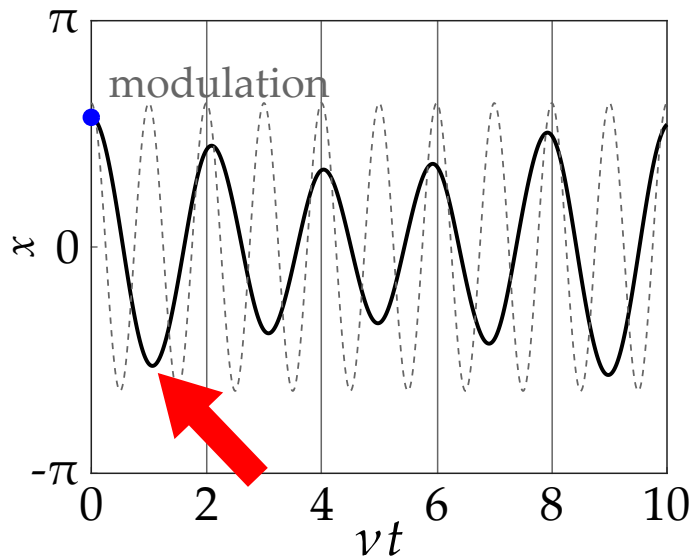
$$\gamma = s \left( \frac{v_L}{v} \right)^2$$

$$\varepsilon_0$$

$$v_L = \frac{E_L}{h}$$



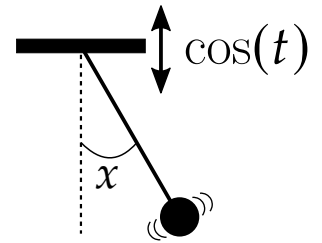
- Pour un couple  $(\gamma, \varepsilon_0)$  deux types de trajectoires: régulière et chaotique



# Espace des phases mixte

- Réseau optique modulé en amplitude (adimensionné):

$$h_{\gamma, \varepsilon_0} = \frac{p^2}{2} - \gamma (1 + \varepsilon_0 \cos(t)) \cos(x)$$

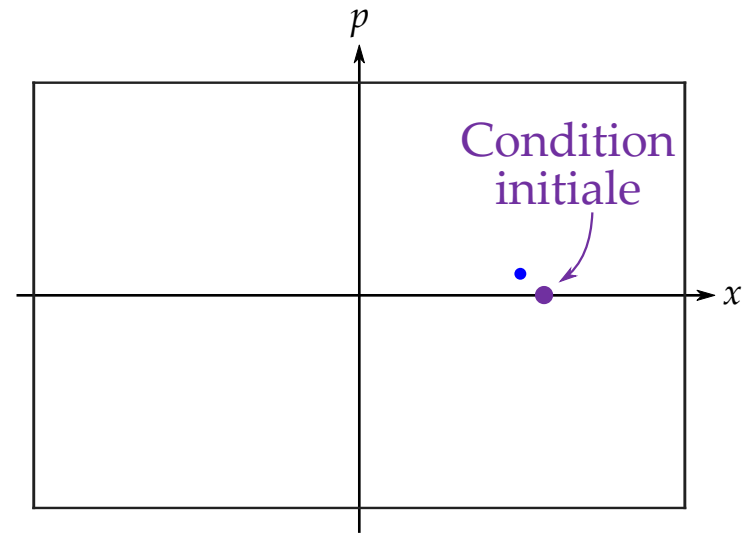
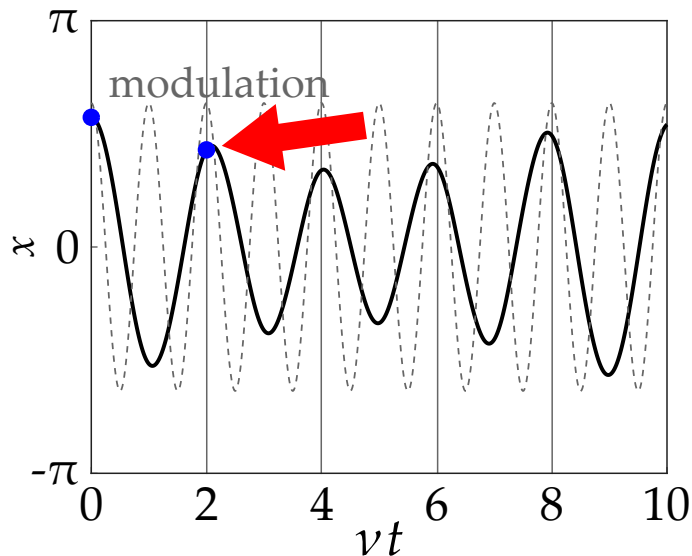


$$\gamma = s \left( \frac{v_L}{v} \right)^2$$

$$\varepsilon_0$$

$$v_L = \frac{E_L}{h}$$

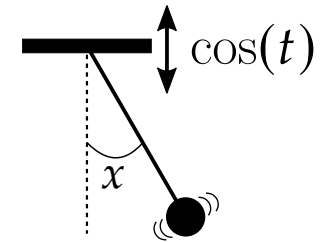
- Pour un couple  $(\gamma, \varepsilon_0)$  deux types de trajectoires: régulière et chaotique



# Espace des phases mixte

- Réseau optique modulé en amplitude (adimensionné):

$$h_{\gamma, \varepsilon_0} = \frac{p^2}{2} - \gamma (1 + \varepsilon_0 \cos(t)) \cos(x)$$

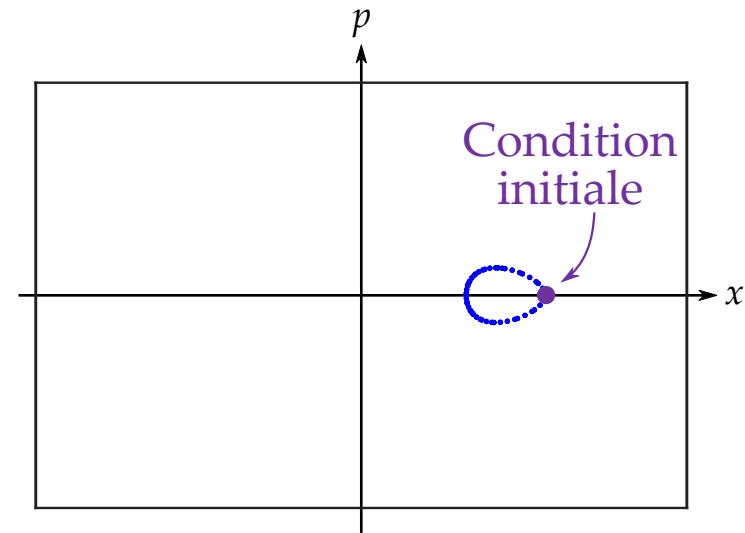
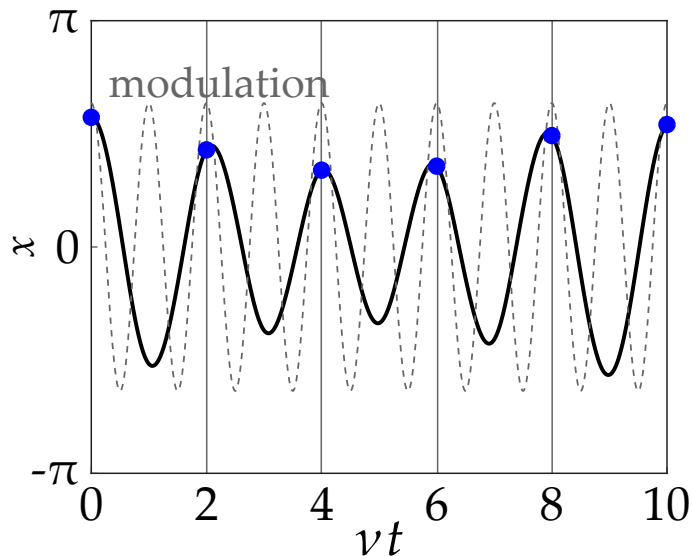


$$\gamma = s \left( \frac{v_L}{v} \right)^2$$

$$\varepsilon_0$$

$$v_L = \frac{E_L}{h}$$

- Pour un couple  $(\gamma, \varepsilon_0)$  deux types de trajectoires: régulière et chaotique



# Espace des phases mixte

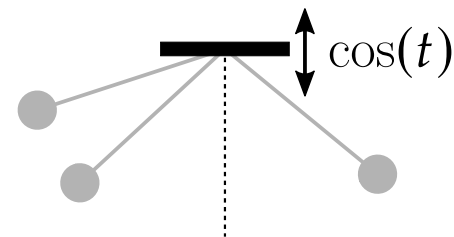
- Réseau optique modulé en amplitude (adimensionné):

$$h_{\gamma, \varepsilon_0} = \frac{p^2}{2} - \gamma (1 + \varepsilon_0 \cos(t)) \cos(x)$$

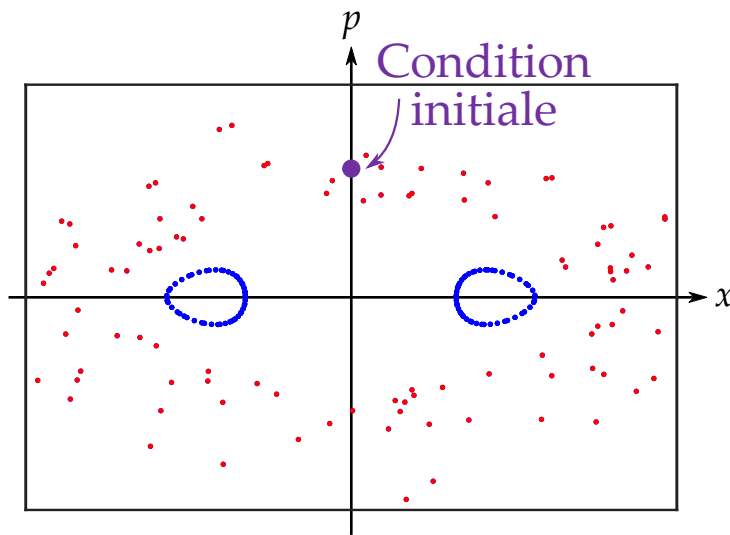
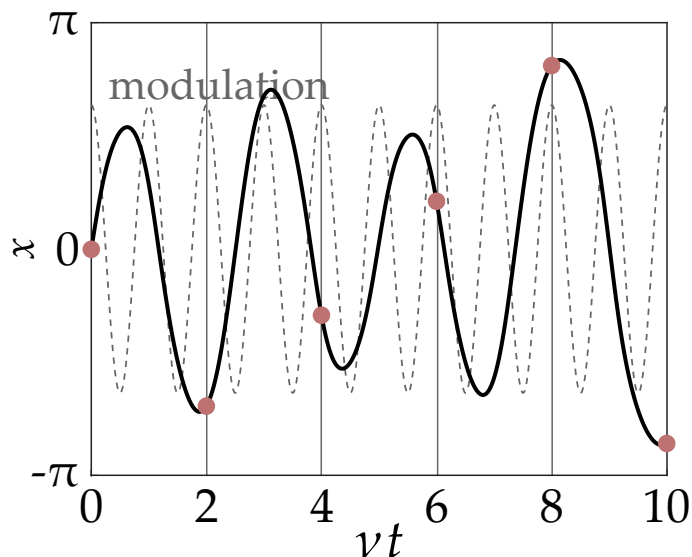
$$\gamma = s \left( \frac{v_L}{v} \right)^2$$

$$\varepsilon_0$$

$$v_L = \frac{E_L}{h}$$

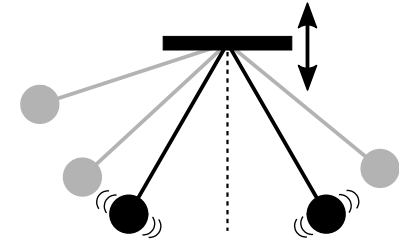
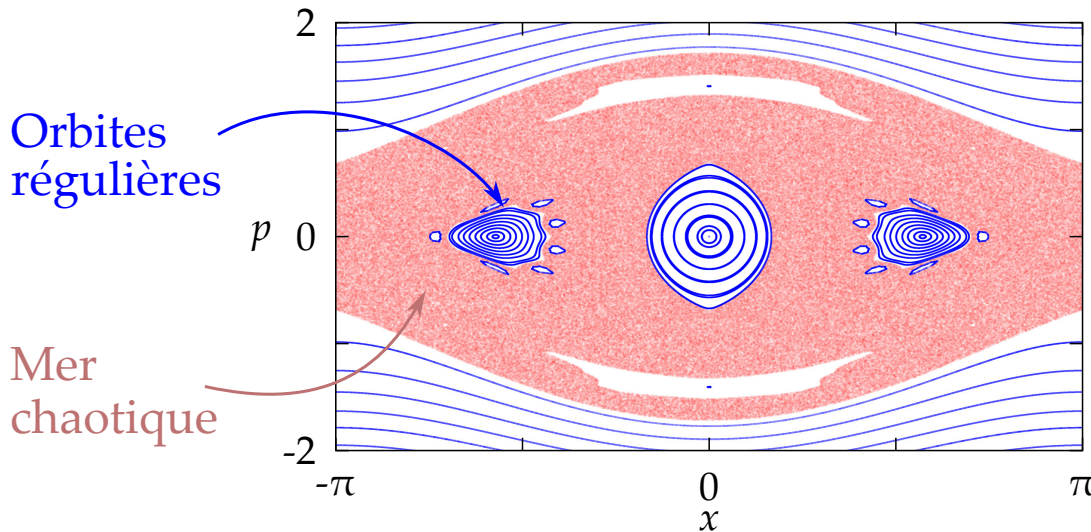


- Pour un couple  $(\gamma, \varepsilon_0)$  deux types de trajectoires: régulière et chaotique



# Espace des phases mixte

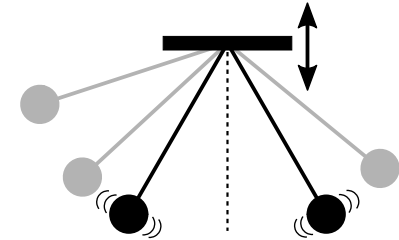
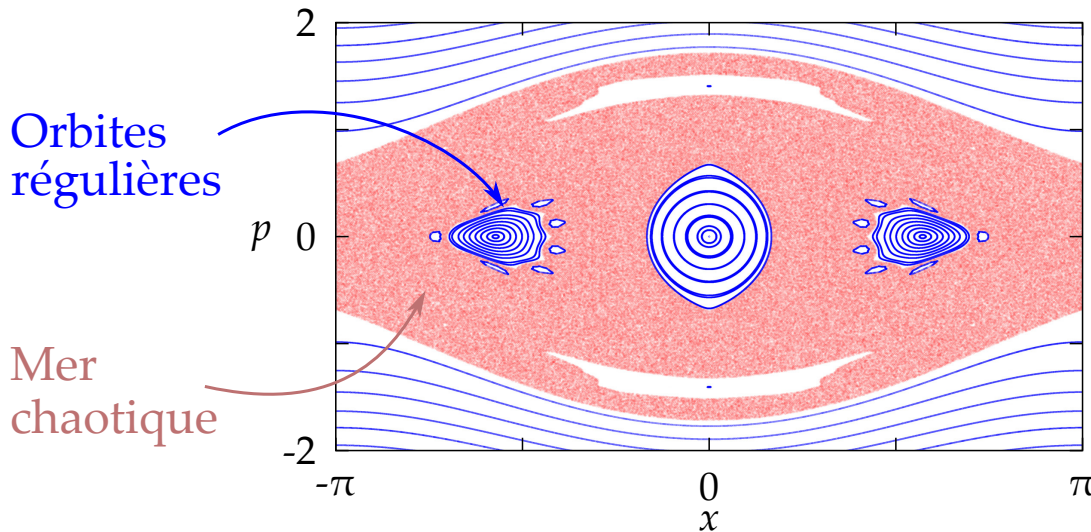
- Espace des phases stroboscopique : représentation de l'état du système tous les temps tels que  $\nu t = 2n$



Espace des phases mixte

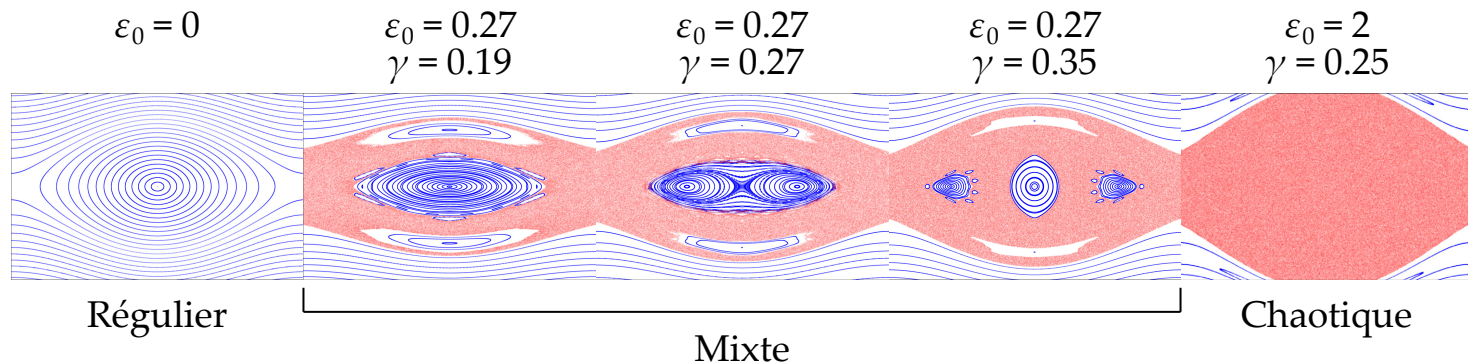
# Espace des phases mixte

- Espace des phases stroboscopique : représentation de l'état du système tous les temps tels que  $\nu t = 2n$



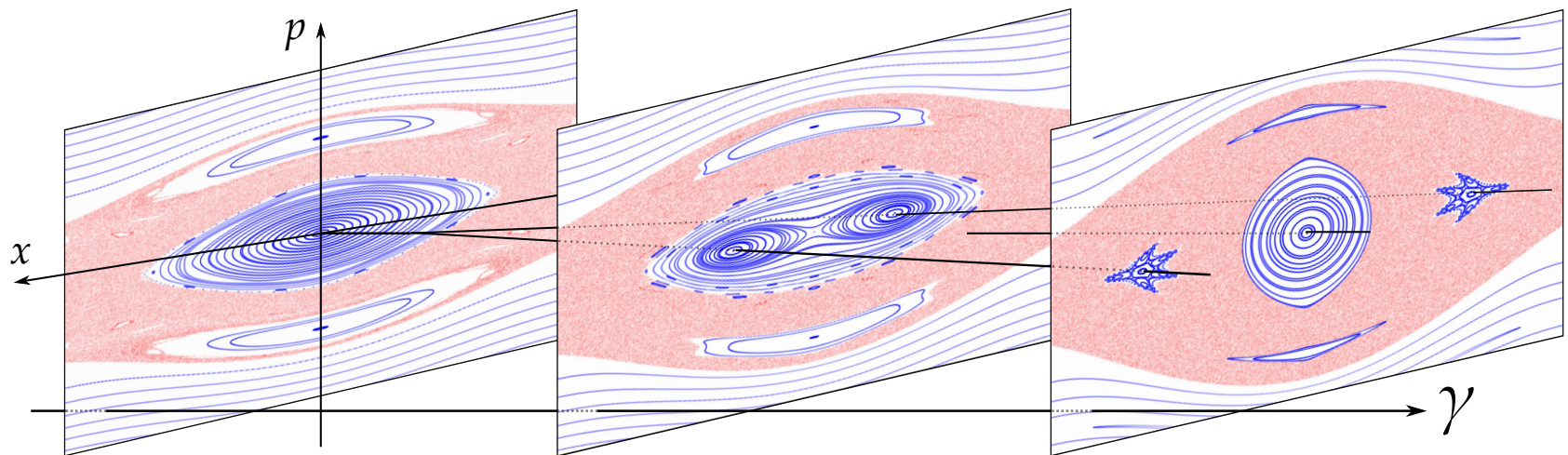
Espace des phases mixte

- Les paramètres  $(\gamma, \varepsilon_0)$  contrôlent le paysage de l'espace des phases stroboscopique



# Bifurcations

- Pour une valeur de  $\varepsilon_0$  fixée et en augmentant  $\gamma$ , nous observons des **bifurcations** :

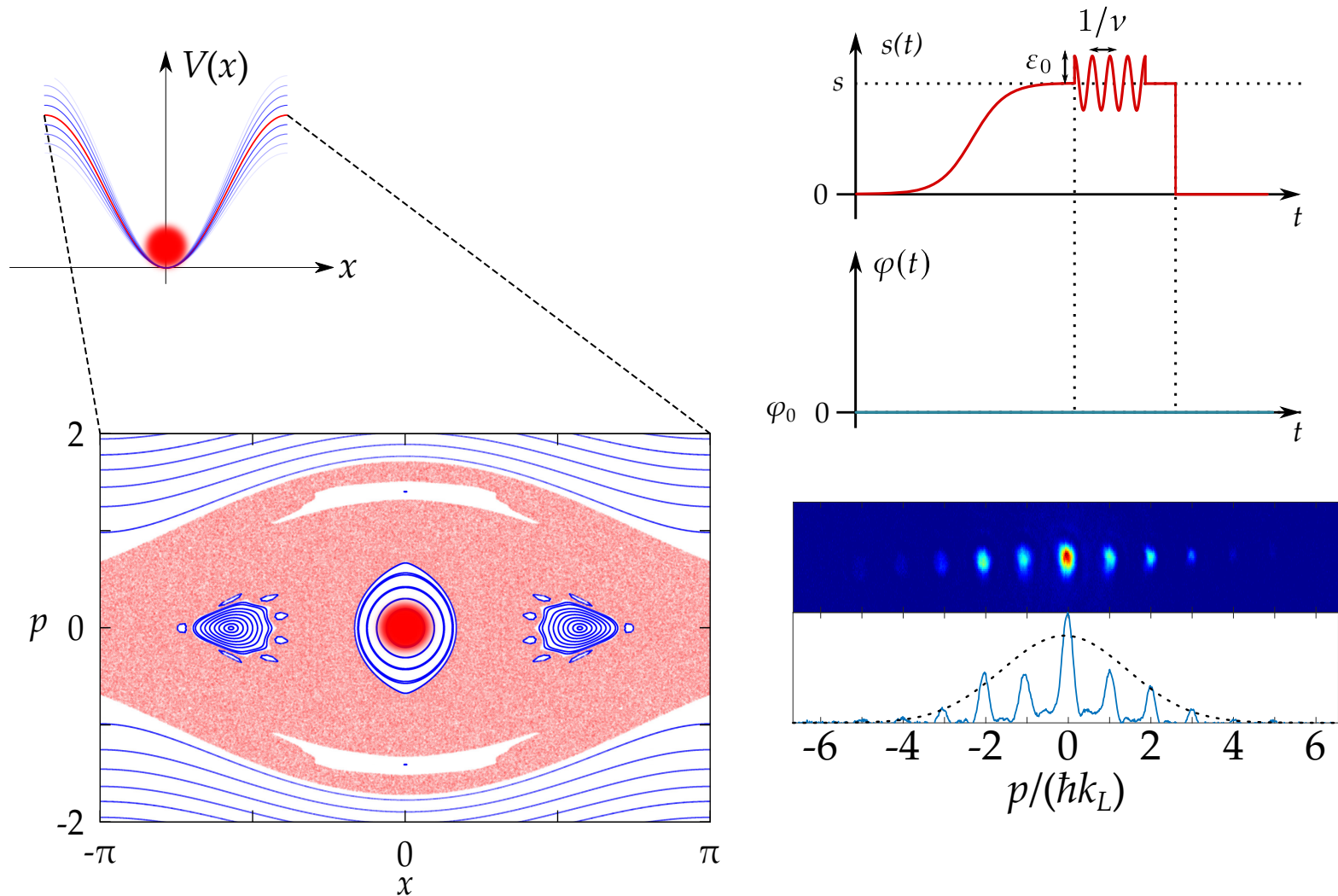


**Peut-on expérimentalement sonder un espace des phases stroboscopique et voir ces bifurcations ?**



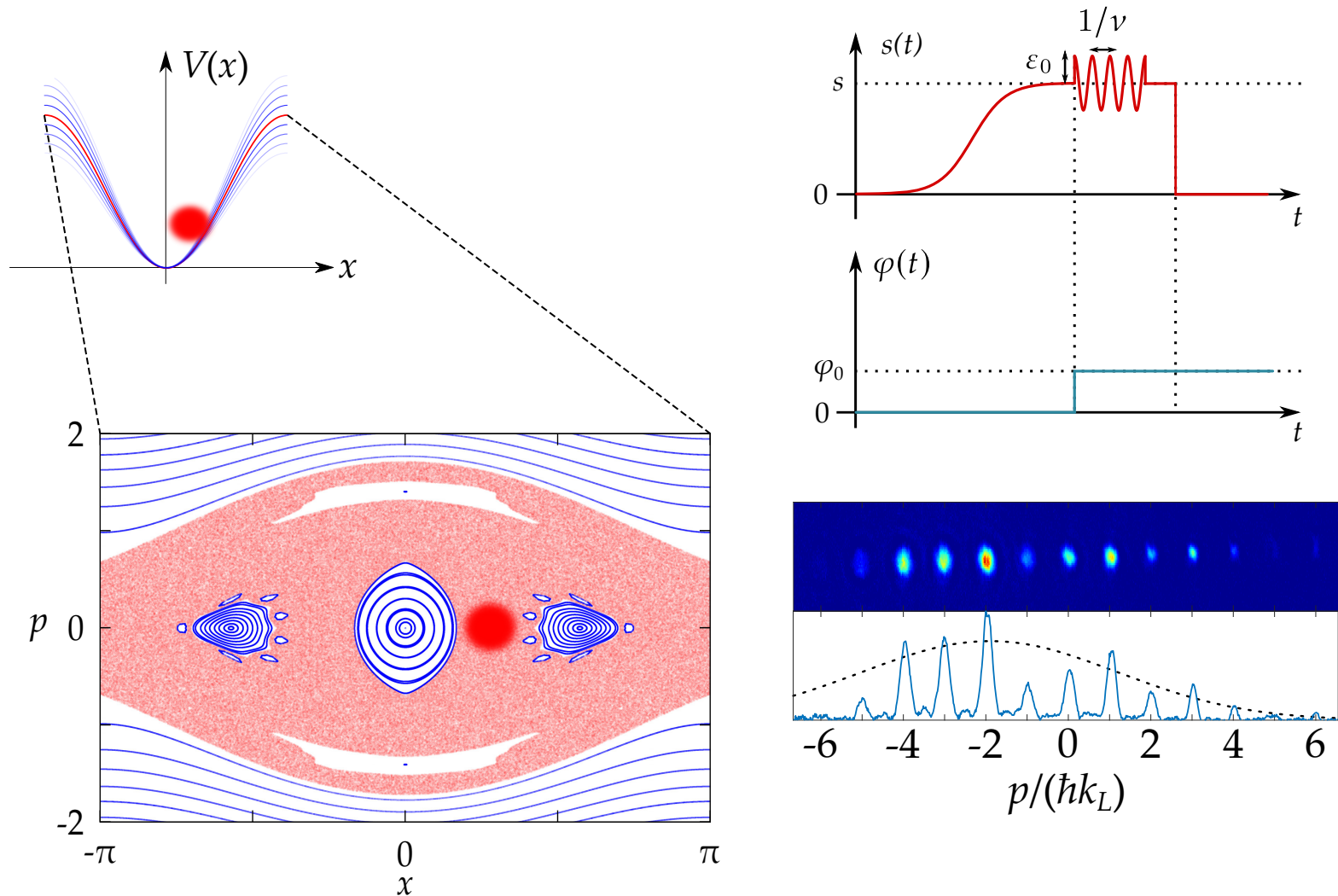
# Bifurcations - protocole expérimental

- Pour un temps de modulation court (et fixe), on varie la position initiale :



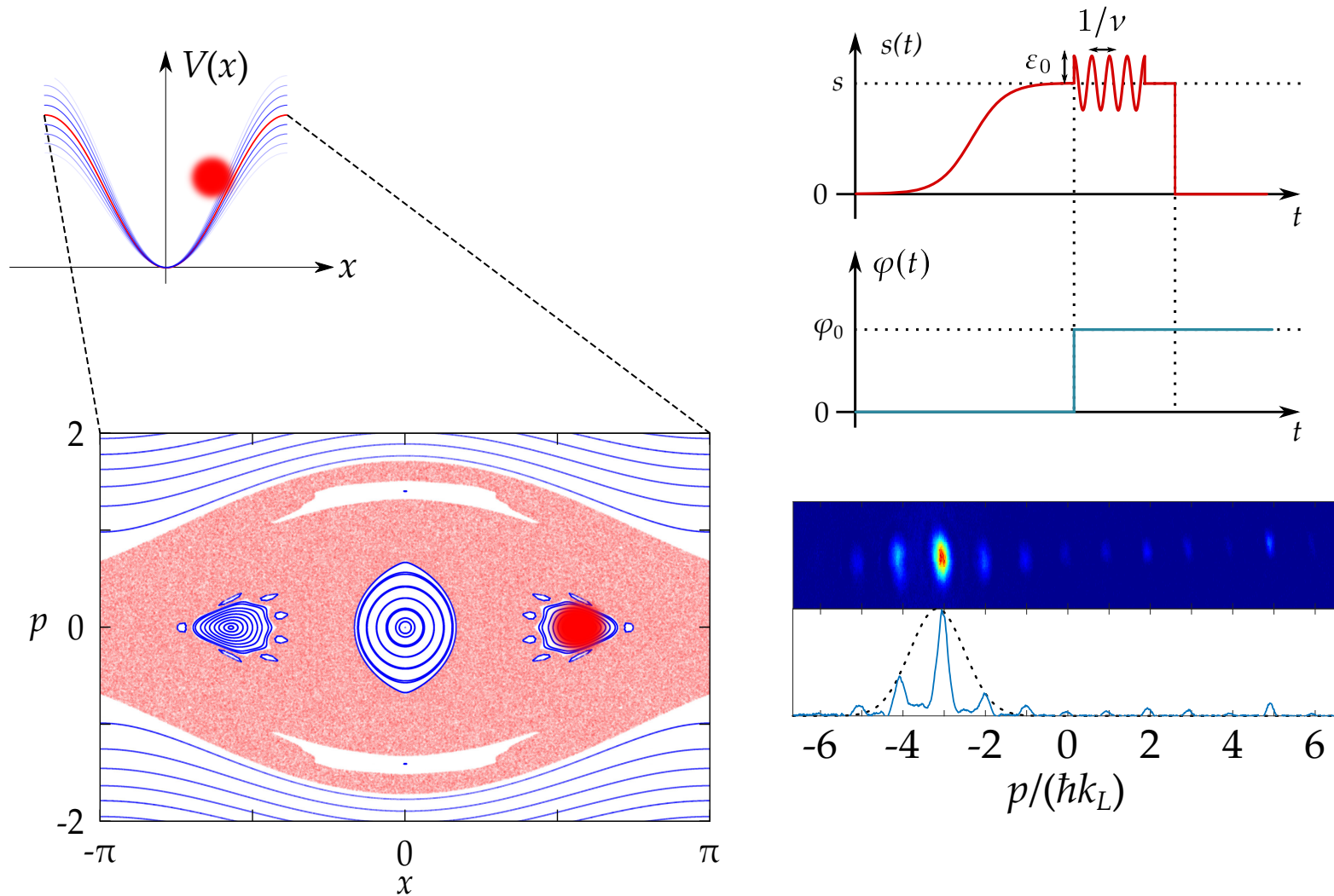
# Bifurcations - protocole expérimental

- Pour un temps de modulation court (et fixe), on varie la position initiale :



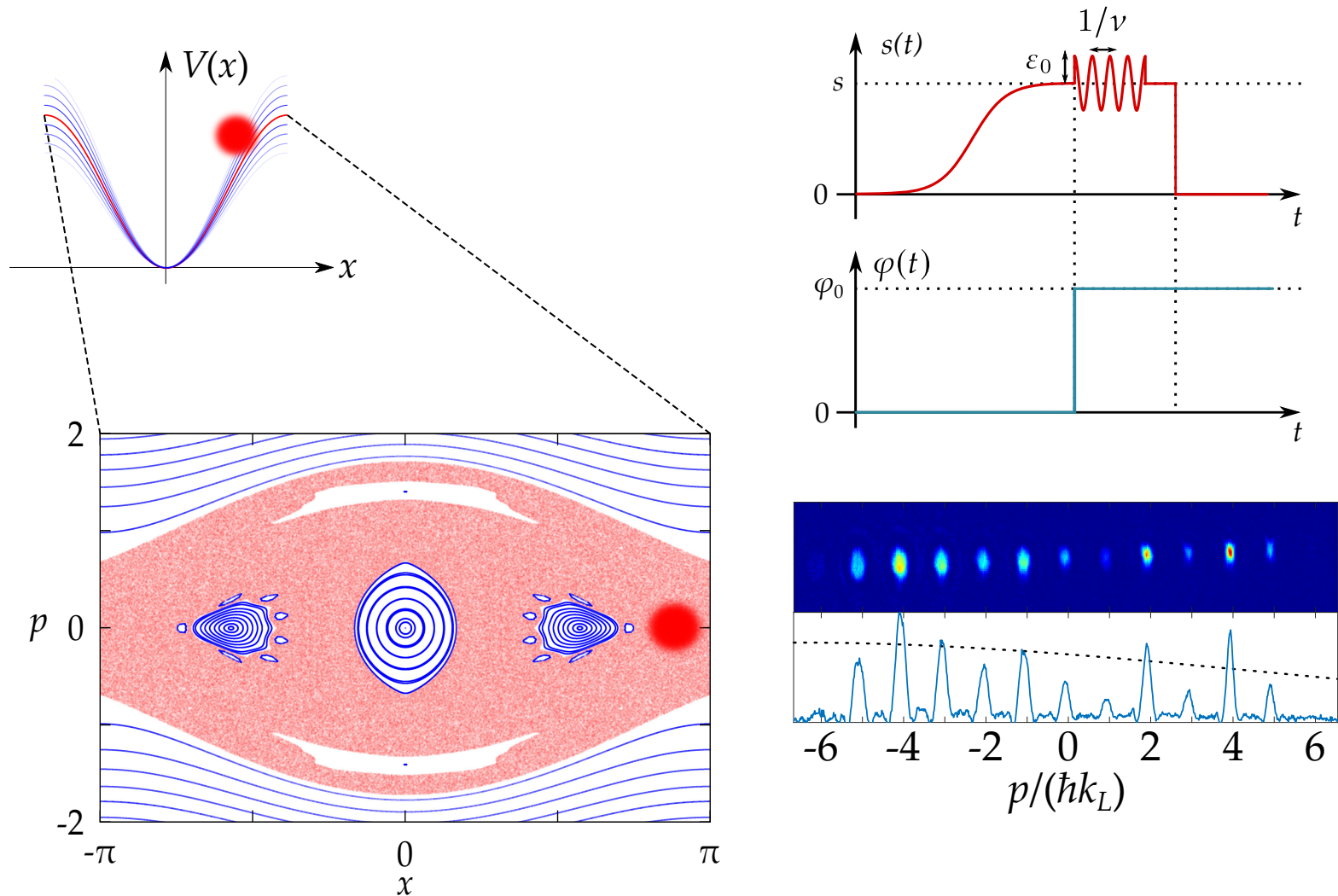
# Bifurcations - protocole expérimental

- Pour un temps de modulation court (et fixe), on varie la position initiale :



# Bifurcations - protocole expérimental

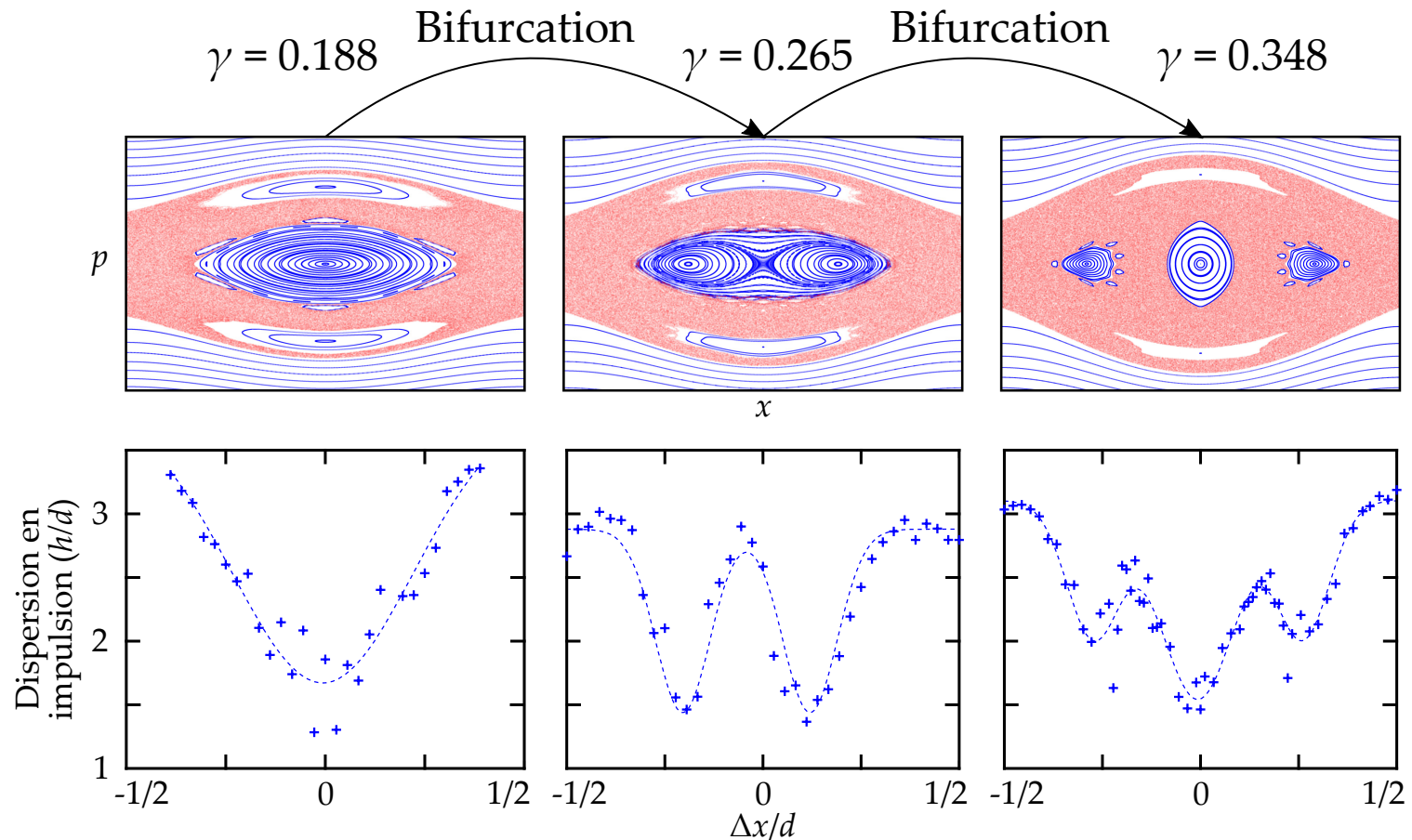
- Pour un temps de modulation court (et fixe), on varie la position initiale :



# Cartographie de l'espace des phases stroboscopique

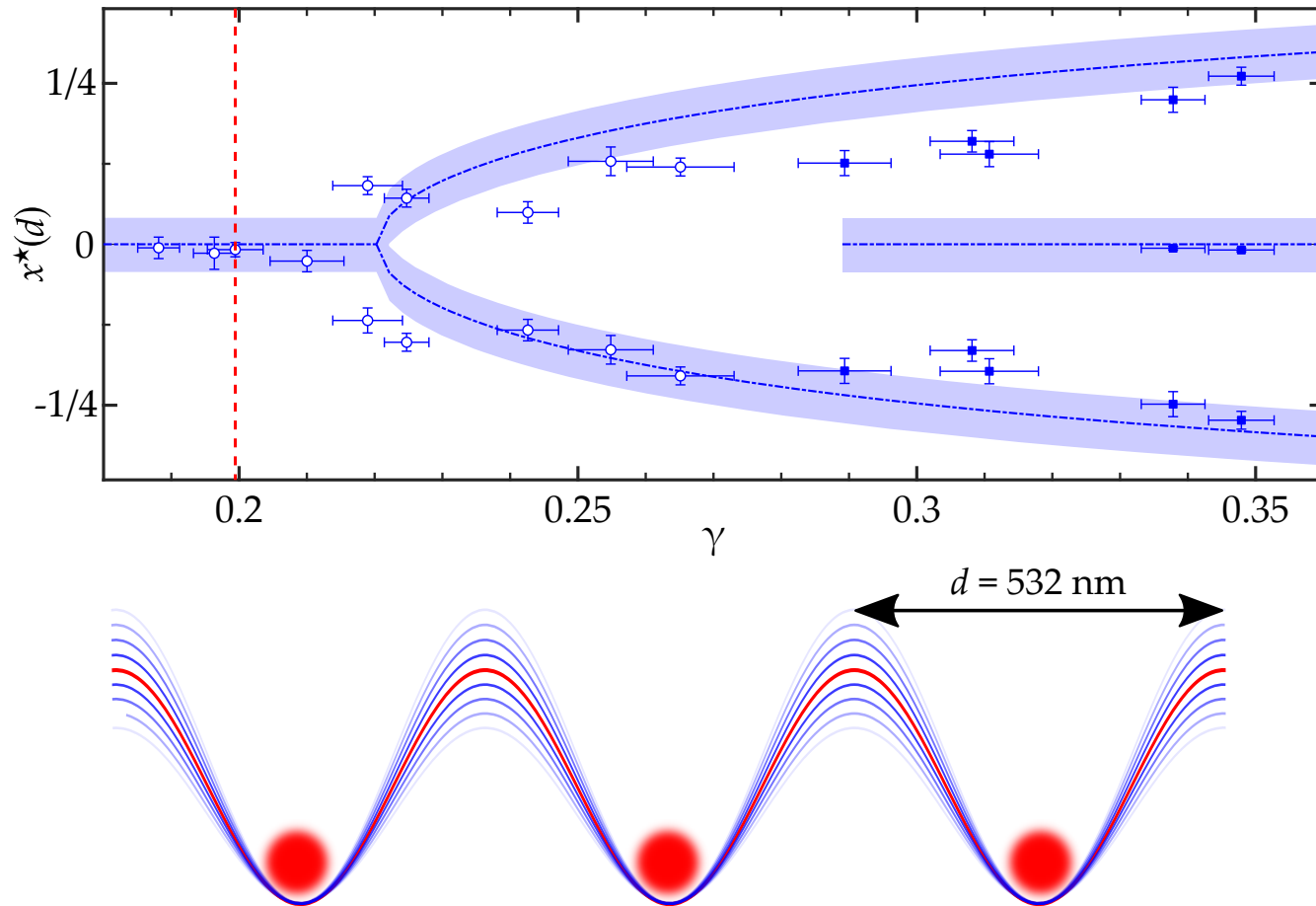
- La dispersion en impulsion nous permet de retrouver la nature de la trajectoire :

$$\varepsilon_0 = 0.27$$



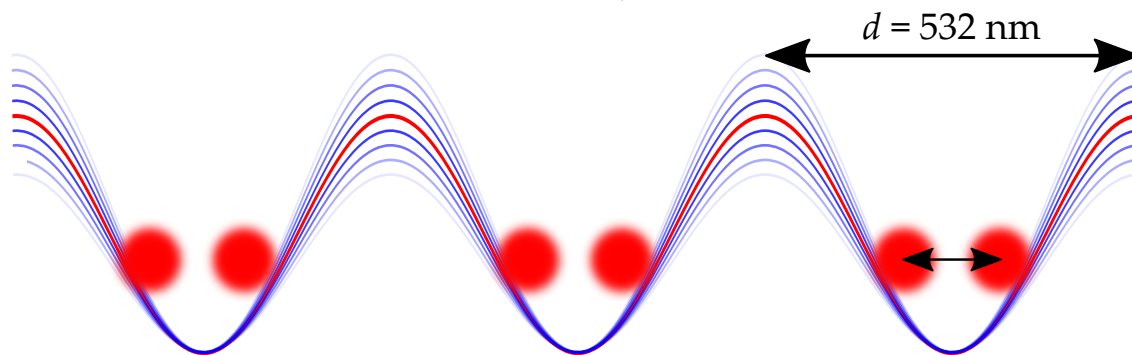
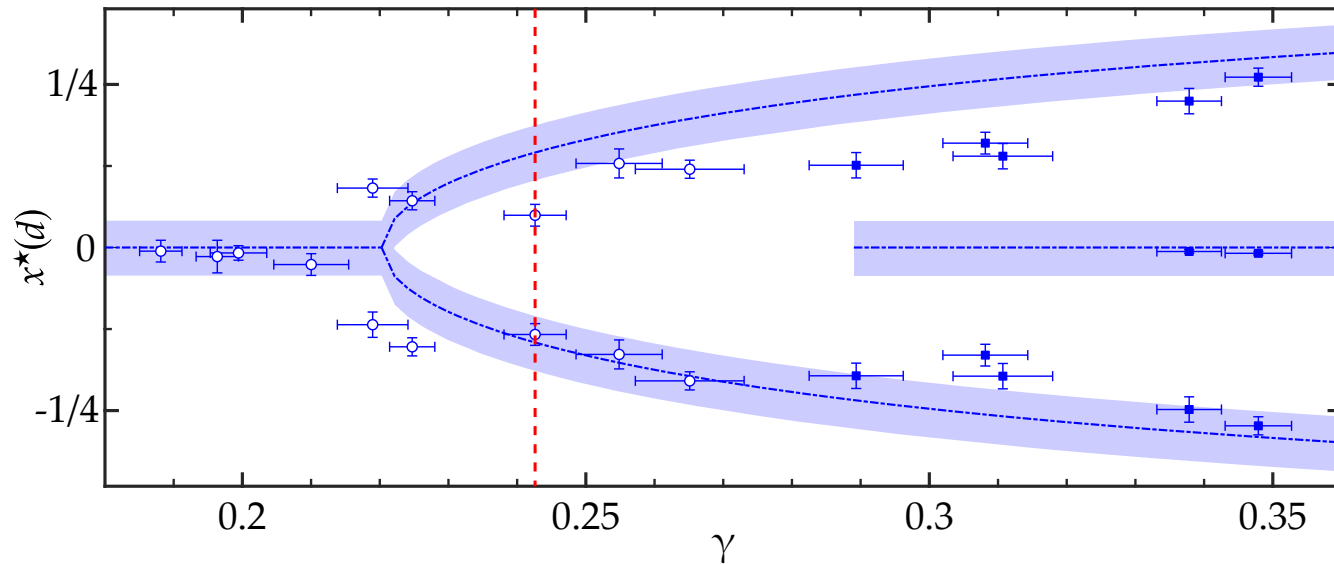
# Cartographie de l'espace des phases stroboscopique

- La dispersion en impulsion nous permet de retrouver la nature de la trajectoire :



# Cartographie de l'espace des phases stroboscopique

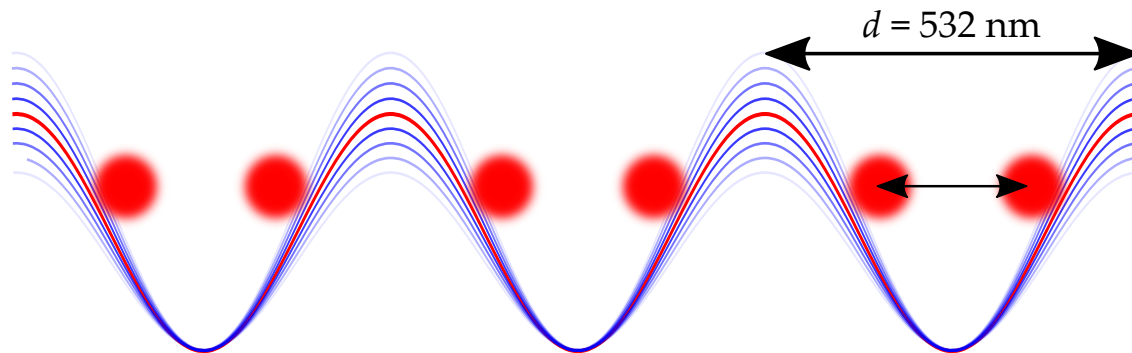
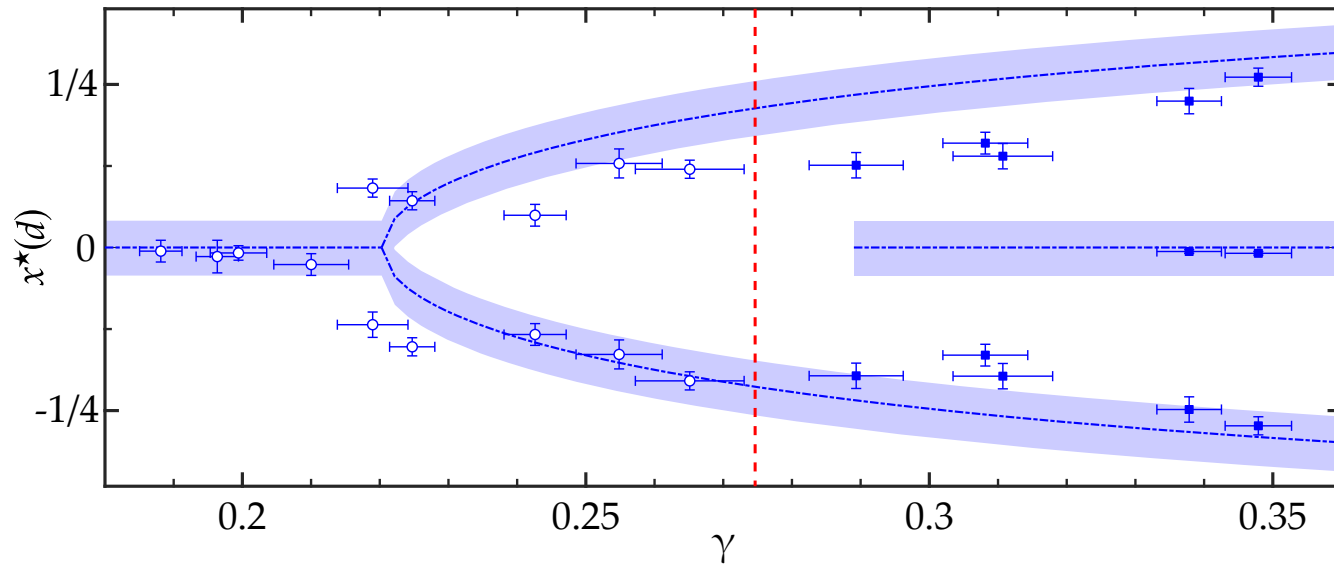
- La dispersion en impulsion nous permet de retrouver la nature de la trajectoire :



Réalisation d'un **super-réseau effectif ajustable**

# Cartographie de l'espace des phases stroboscopique

- La dispersion en impulsion nous permet de retrouver la nature de la trajectoire :

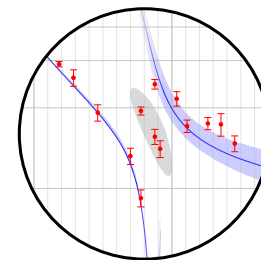
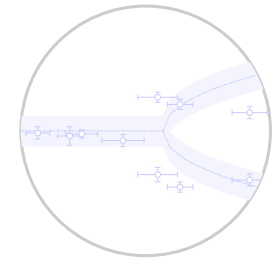
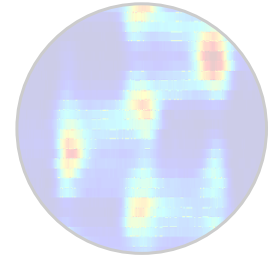


Réalisation d'un **super-réseau effectif ajustable**



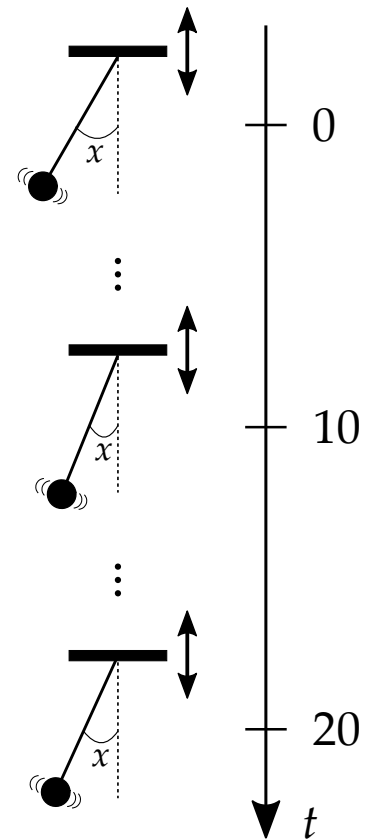
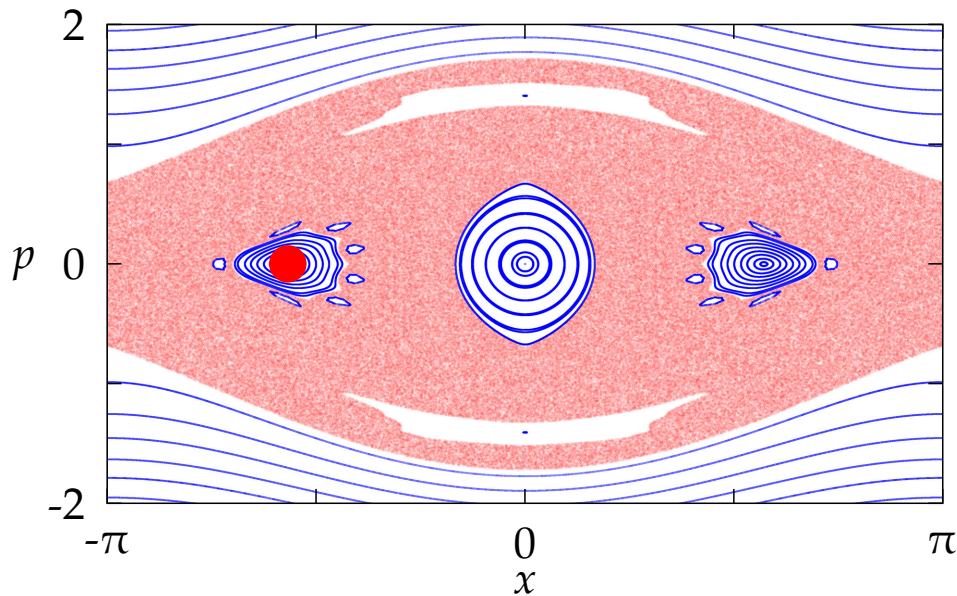
# Plan

- Introduction ✓
- Calibration de la profondeur du réseau optique ✓
- Dynamique classique ✓
  - ◆ Émergence de chaos ✓
  - ◆ Étude des bifurcations ✓
- Dynamique quantique : effet tunnel dynamique dans un espace des phases mixtes
  - ◆ Mécanisme à deux niveaux : cas régulier
  - ◆ Mécanisme à trois niveaux : effet tunnel assisté par le chaos (CAT)
- Conclusion



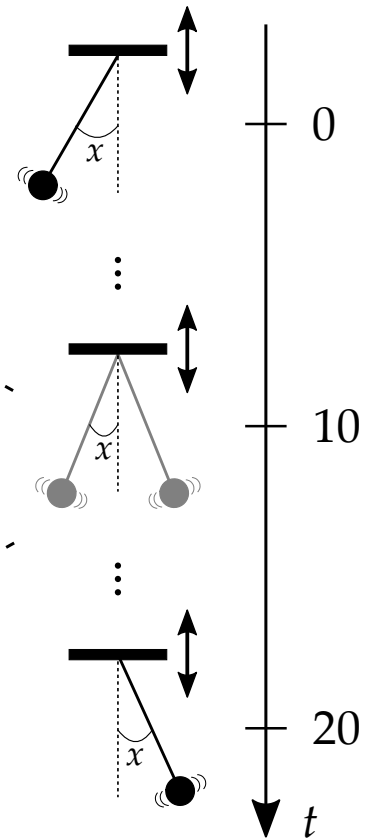
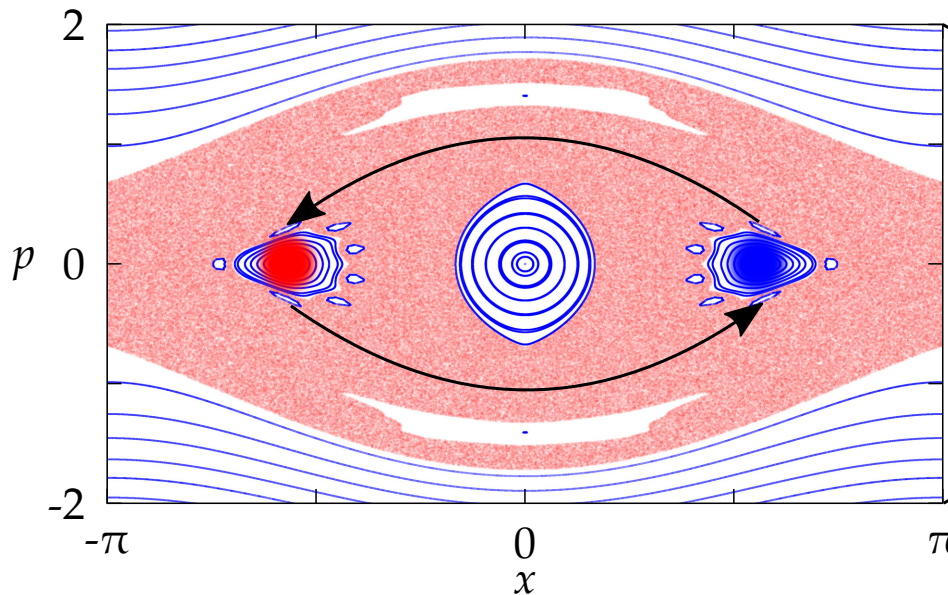
# Espace des phases mixte et effet tunnel

- Particule classique **toutes les deux périodes de modulation**
- Reste dans l'îlot de gauche



# Espace des phases mixte et effet tunnel

- Particule classique **toutes les deux périodes de modulation**
- Reste dans l'îlot de gauche



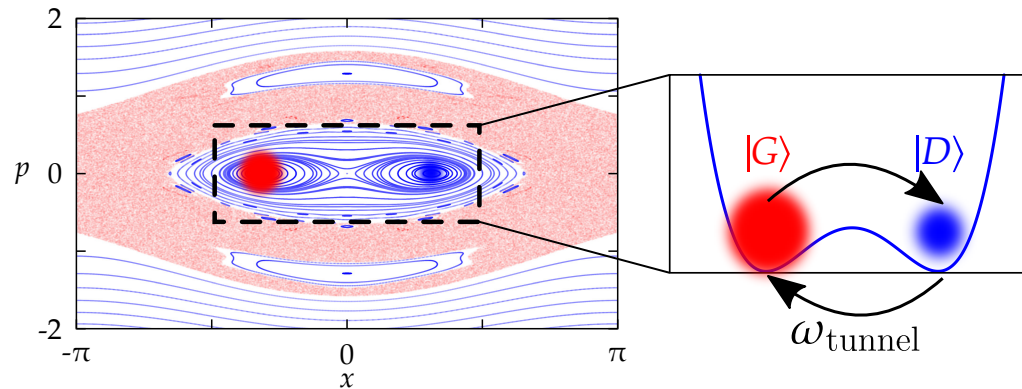
- Fonction d'onde  $\Rightarrow$  transport par effet tunnel
- Trajectoires classiques fermées  $\Leftrightarrow$  barrière d'énergie

**Effet tunnel dynamique**

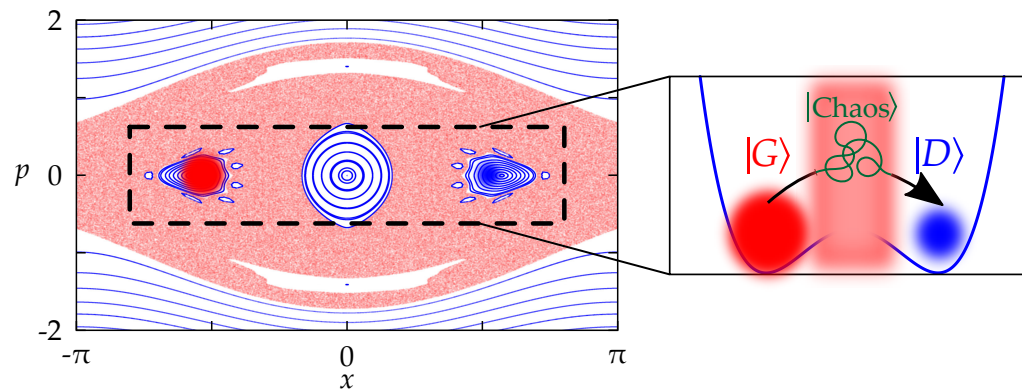
M. J Davis et E. J. Heller (1981)

# Les deux types d'effet tunnel dynamique

- Effet tunnel "régulier" : mécanisme à deux niveaux



- **Effet tunnel assisté par le chaos** : mécanisme à trois niveaux



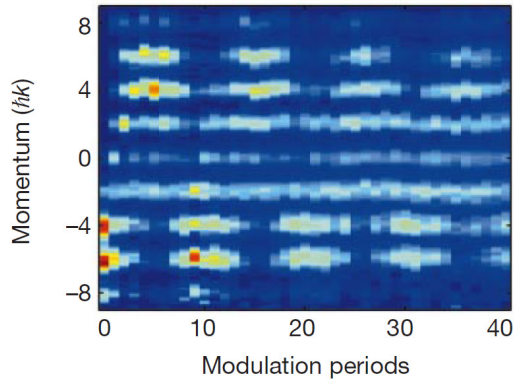
Le chaos peut **faciliter** ou **supprimer** le transport quantique grâce à des résonances

- Façonnage du taux tunnel par **ingénierie de l'espace des phases**
- Résonances **jamais observées**

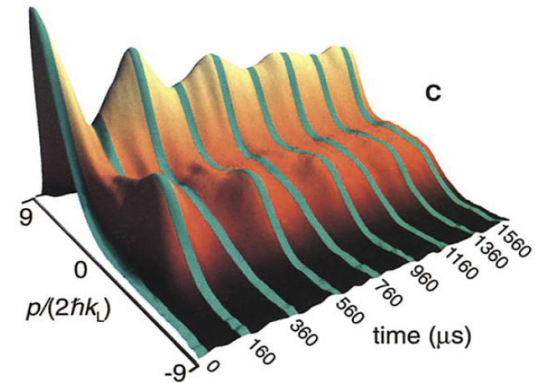
# Les expériences de 2001

- Expériences pionnières par W. D. Phillips (NIST, USA) et M. G. Raizen (U. Texas, USA) : observation d'oscillations tunnel

Hensinger *et al.*, Nature **412**, 6842 (2001)



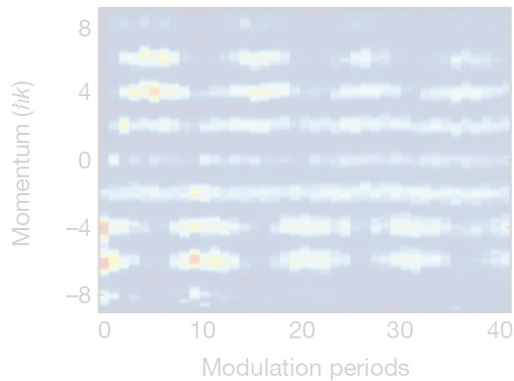
Steck *et al.*, Science **293**, 5528 (2001)



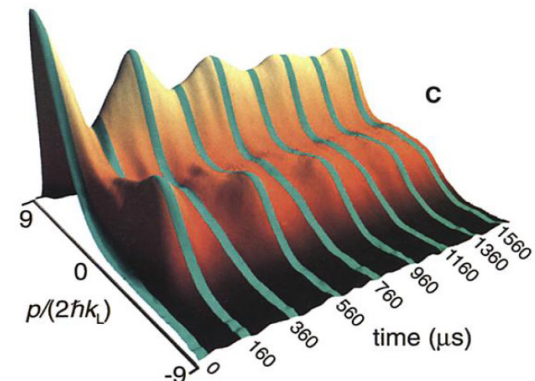
# Les expériences de 2001

- Expériences pionnières par W. D. Phillips (NIST, USA) et M. G. Raizen (U. Texas, USA) : observation d'oscillations tunnel

Hensinger *et al.*, Nature **412**, 6842 (2001)

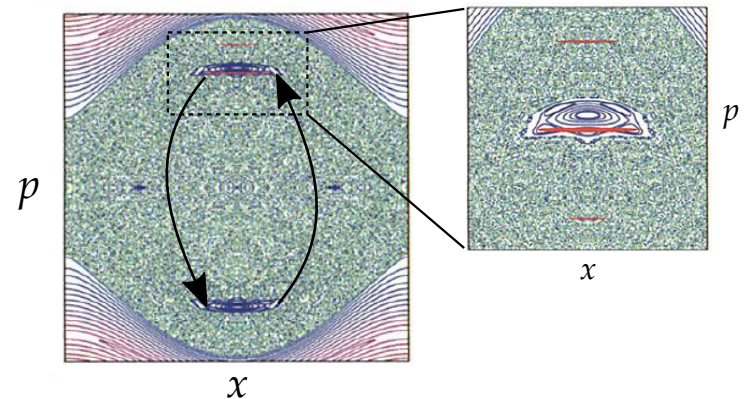


Steck *et al.*, Science **293**, 5528 (2001)



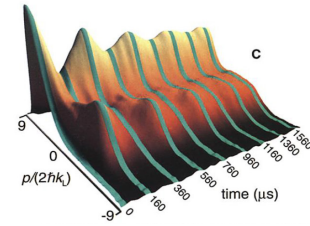
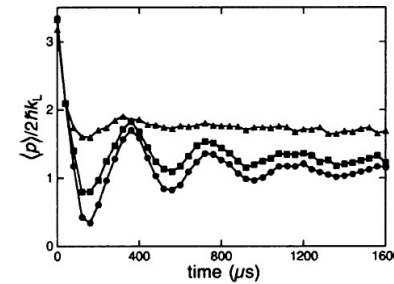
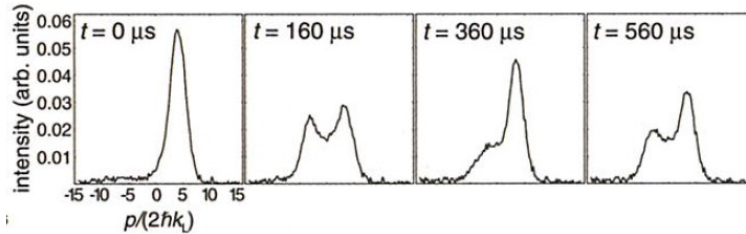
- Oscillations entre des états d'impulsion opposée dans un réseau périodiquement modulé

**Les atomes font demi-tour  
par effet tunnel !**



# Comment nous revisitons ces expériences

- Les atomes font périodiquement demi-tour :

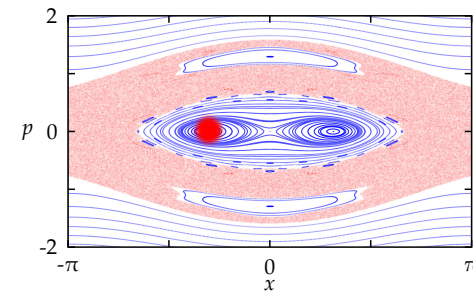


- Faible contraste, peu d'oscillations

**Faible variation de la fréquence d'oscillation tunnel**

- **Notre proposition :**

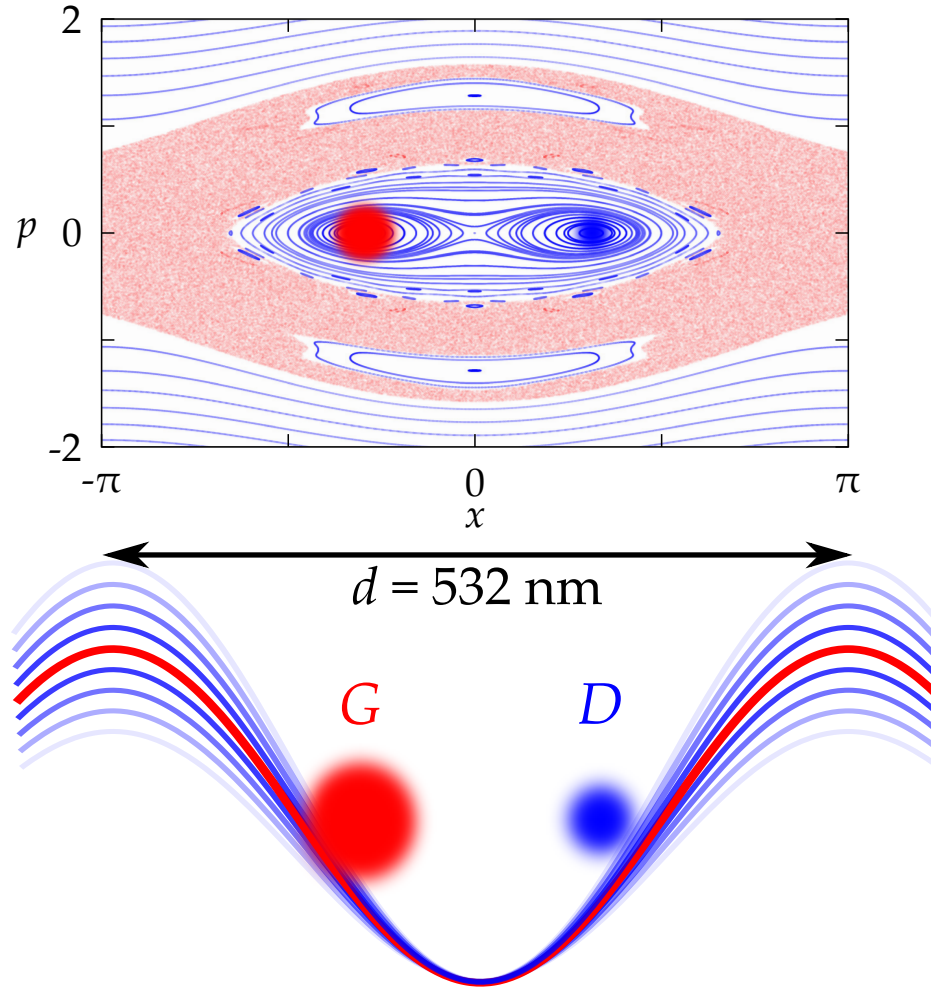
- Condensat de Bose-Einstein
- Faible nombre d'atomes (diminuer l'effet des interactions)
- Paramètres expérimentaux  $\Rightarrow$  régime semi-classique
- Réseau optique loin de résonance
- Gravité compensée par un piège optique horizontal
- Îlots en  $x$  : plus robuste (chargement + dynamique)



PRA 94, 043621 (2016)

# Rotation dans l'espace des phases

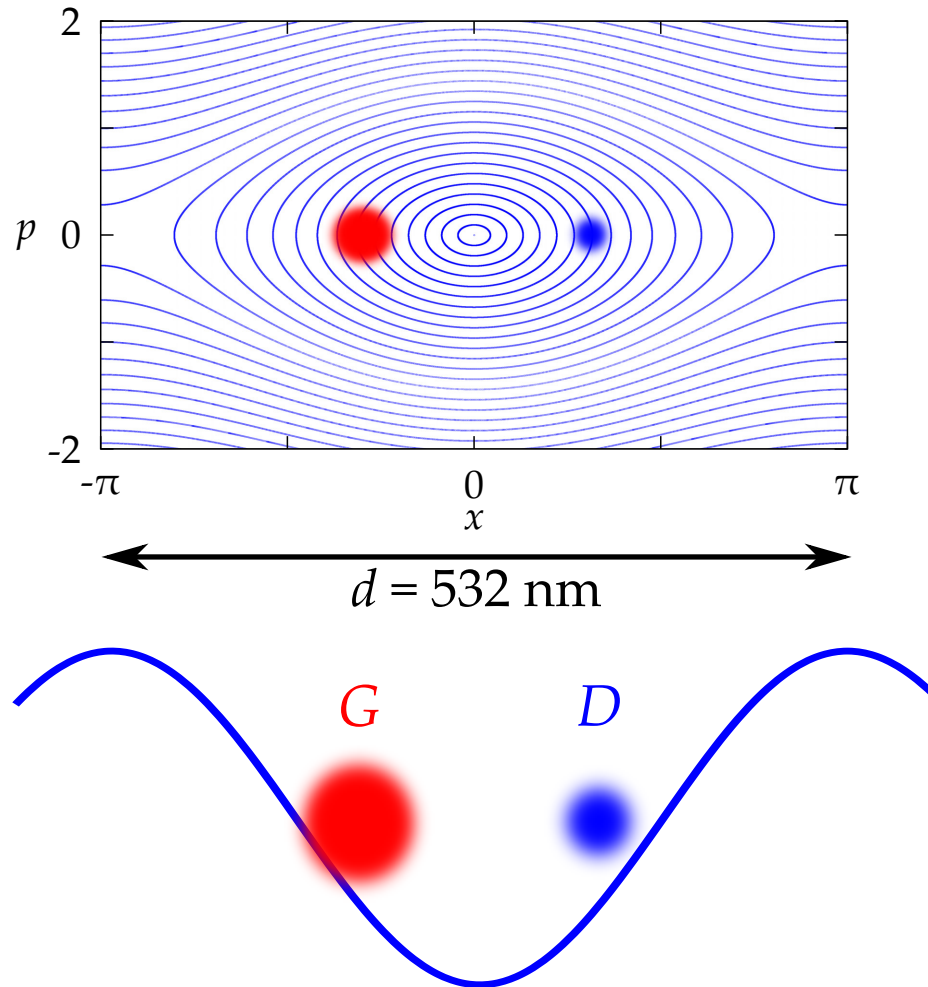
- Comment mesurer les populations dans les îlots réguliers ? (dynamique sub-longueur d'onde)





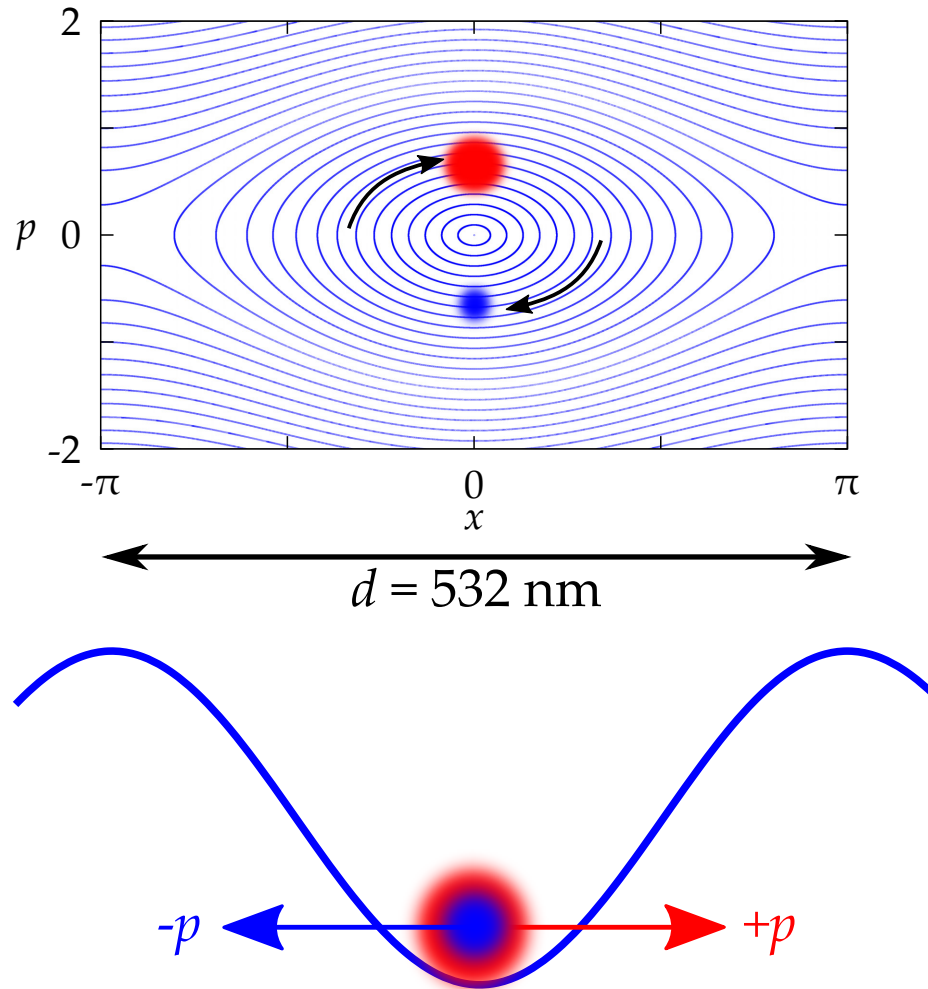
# Rotation dans l'espace des phases

- Comment mesurer les populations dans les îlots réguliers ? (dynamique sub-longueur d'onde)



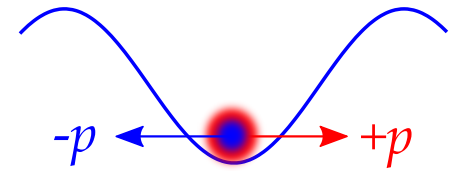
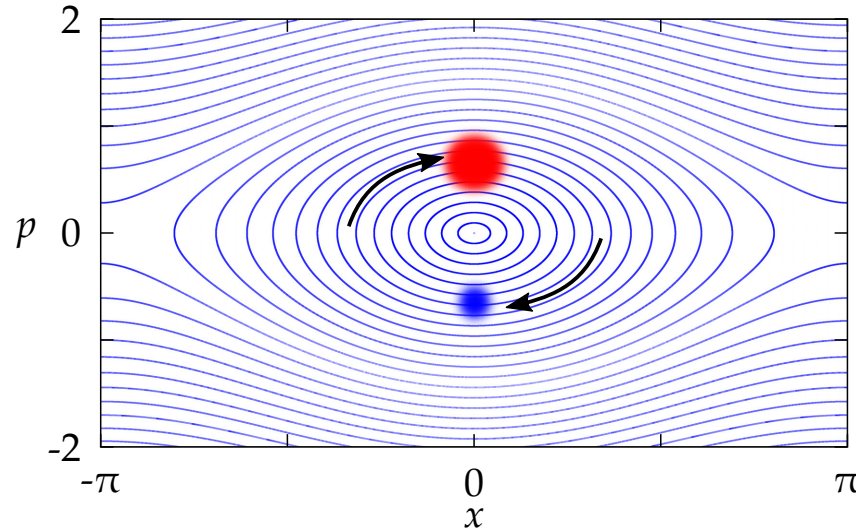
# Rotation dans l'espace des phases

- Comment mesurer les populations dans les îlots réguliers ? (dynamique sub-longueur d'onde)

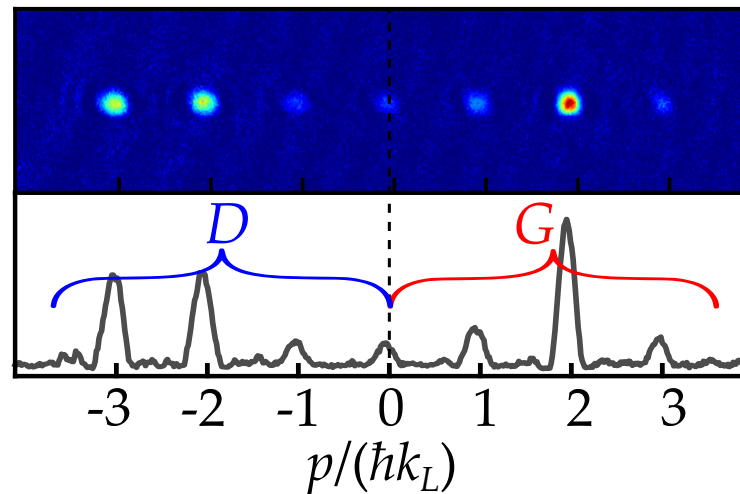


# Rotation dans l'espace des phases

- Comment mesurer les populations dans les îlots réguliers ? (dynamique sub-longueur d'onde)



- Après temps de vol (ToF) :



# Ensemble des paramètres expérimentaux

- Nouveau paramètre expérimental :  $[x, p] = i\hbar_{\text{eff}}$

$$\gamma = s \left( \frac{\nu_L}{\nu} \right)^2$$

$$\varepsilon_0$$

$$\hbar_{\text{eff}} = 2 \left( \frac{\nu_L}{\nu} \right)$$

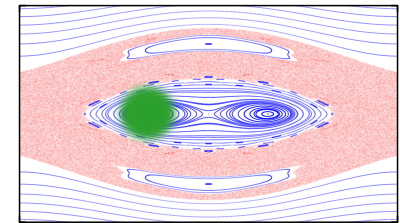
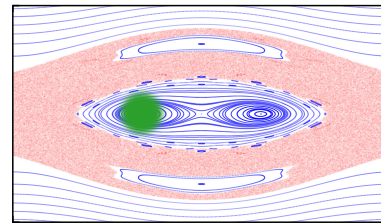
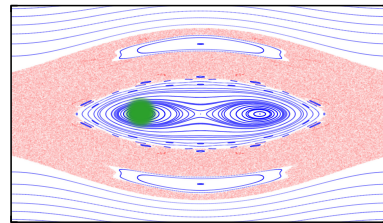
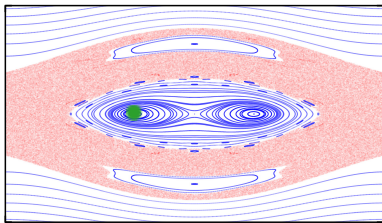
$s$  : profondeur adimensionnée

$\nu$  : fréquence de modulation

$\varepsilon_0$  : amplitude de modulation

$$\nu_L = \frac{h}{2md^2}$$

- $\hbar_{\text{eff}}$  contrôle la **surface** des fonctions d'onde dans l'espace des phases (Heisenberg) :



Toulouse :

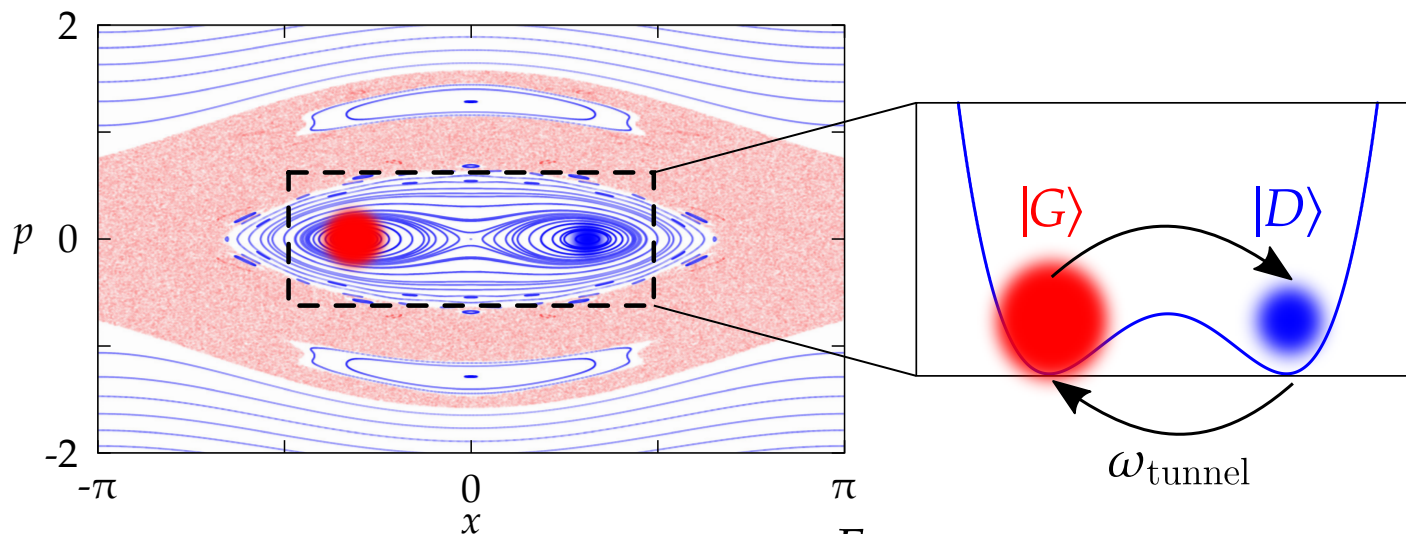
$$\hbar_{\text{eff}} = 0.2 - 0.4$$

Austin :

$$\hbar_{\text{eff}} = 1 - 2$$

$\hbar_{\text{eff}}$

# Effet tunnel régulier - Mécanisme à deux niveaux



- Deux états propres réguliers :

$|\phi^-\rangle$  état AS

$|\phi^+\rangle$  état S

The diagram shows energy  $E$  on the vertical axis. Two energy levels,  $\epsilon^-$  and  $\epsilon^+$ , are shown. The energy difference is  $\delta = |\epsilon^+ - \epsilon^-|$ . The states  $|\phi^-\rangle$  and  $|\phi^+\rangle$  are shown as superpositions of  $|G\rangle$  and  $|D\rangle$ .

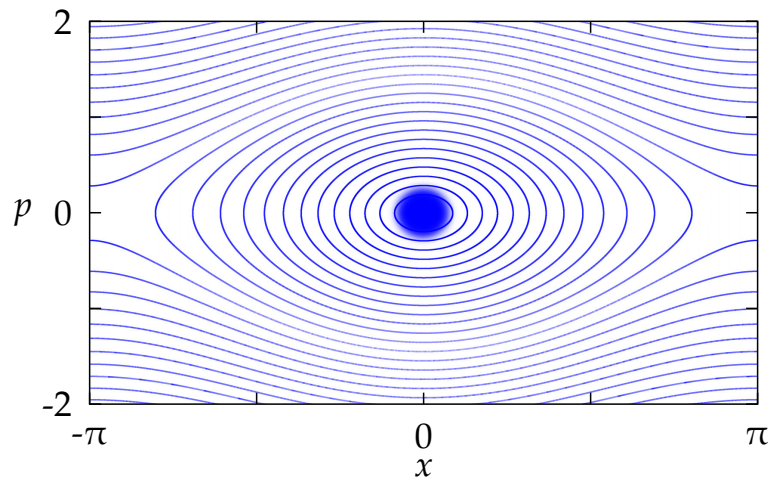
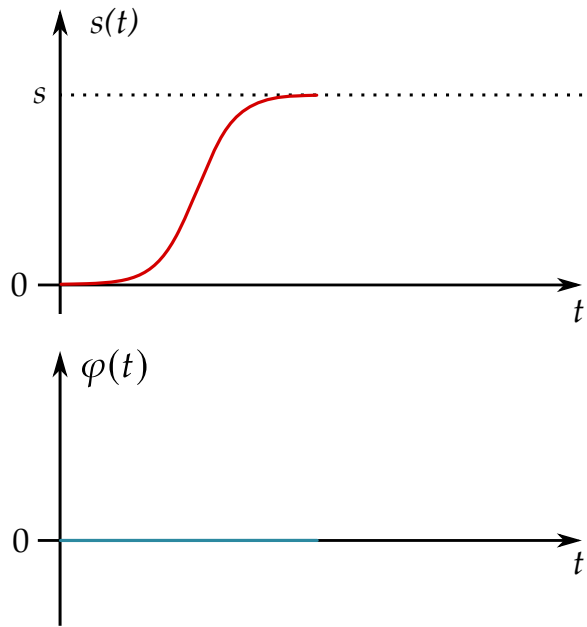
$$|\phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|G\rangle - |D\rangle)$$

$$|\phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|G\rangle + |D\rangle)$$

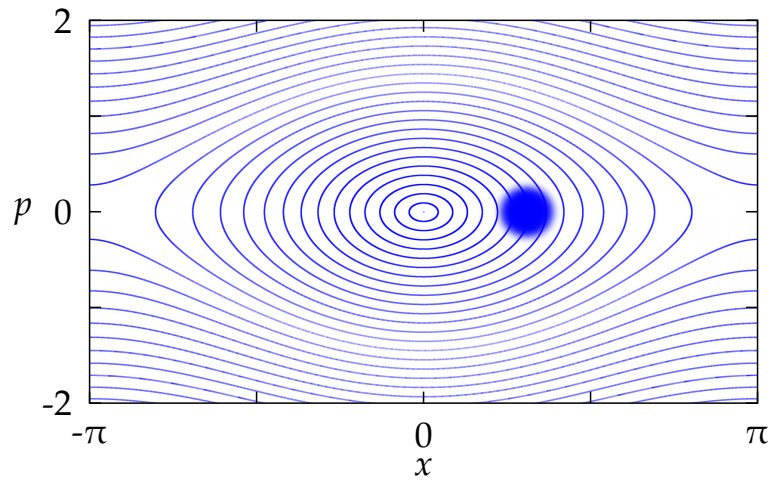
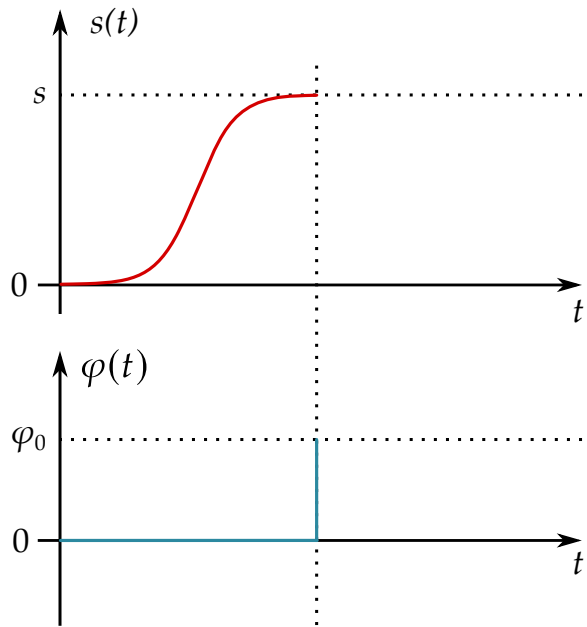
- Effet tunnel dynamique :

$$\delta \propto \hbar_{\text{eff}} \omega_{\text{tunnel}} \propto \hbar_{\text{eff}} e^{-S/\hbar_{\text{eff}}}$$

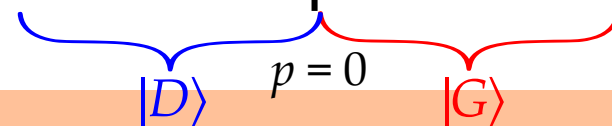
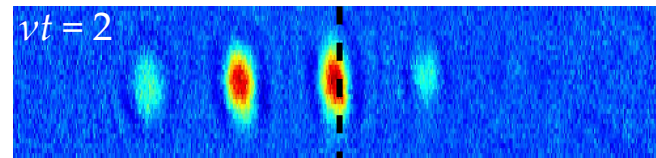
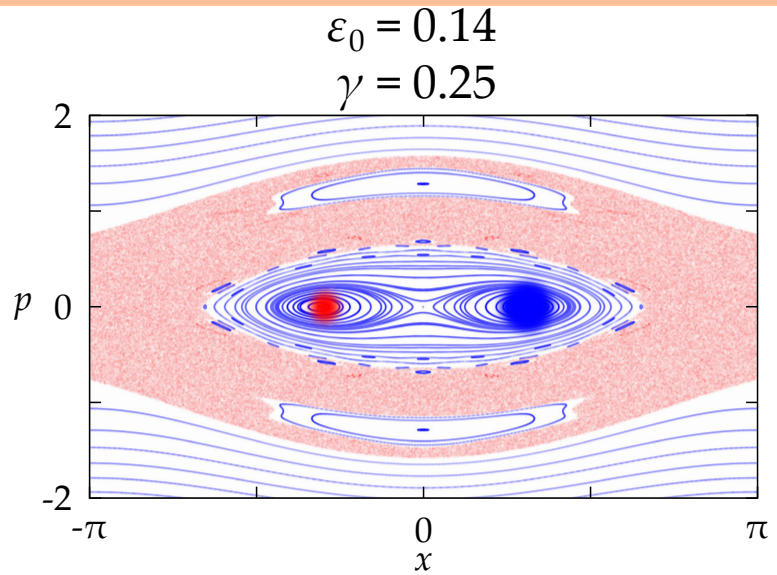
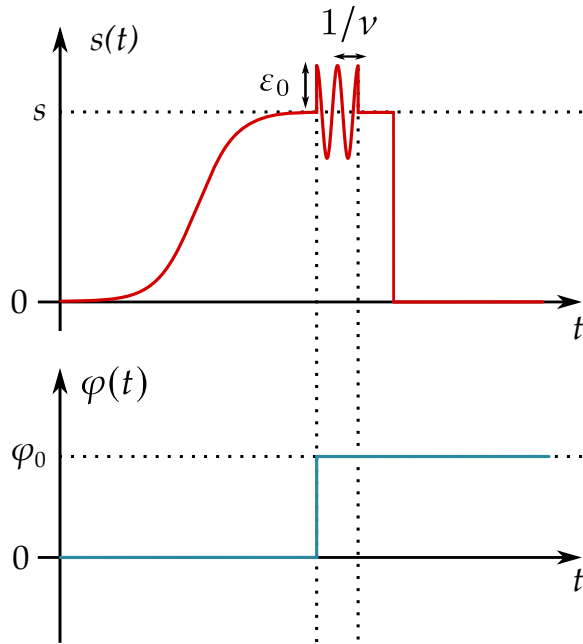
# Effet tunnel régulier - Protocole expérimental



# Effet tunnel régulier - Protocole expérimental

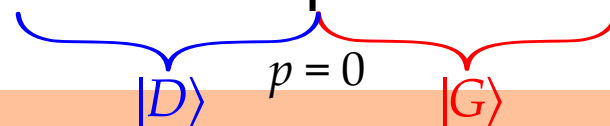
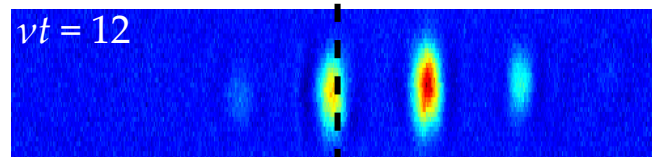
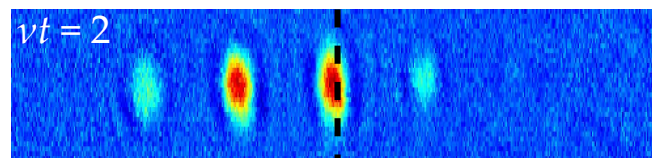
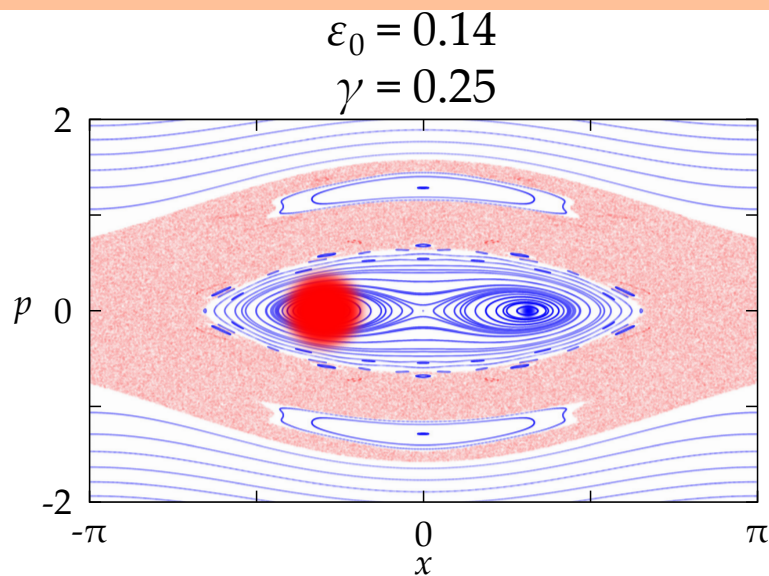
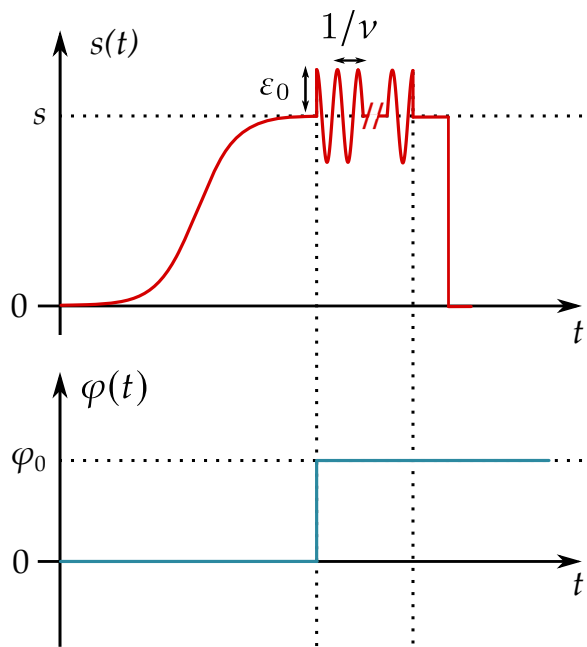


# Effet tunnel régulier - Protocole expérimental

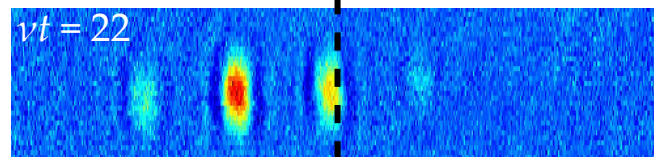
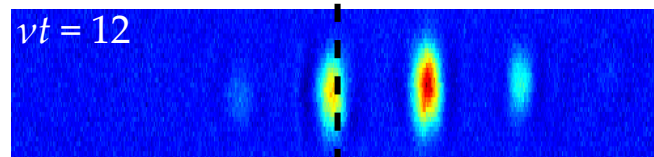
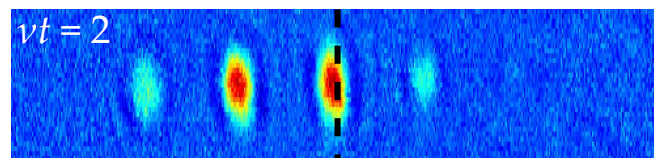
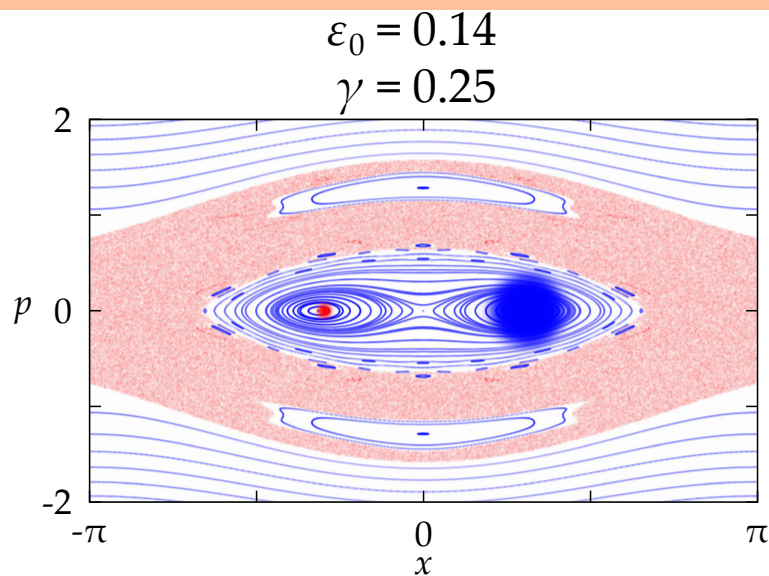
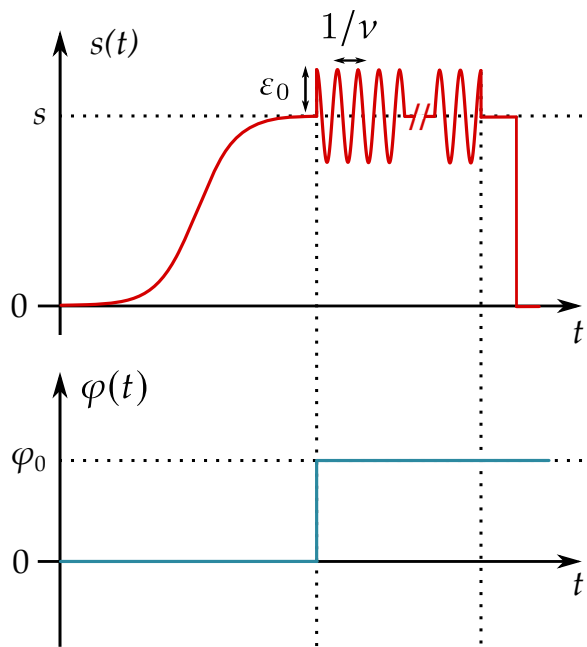




# Effet tunnel régulier - Protocole expérimental

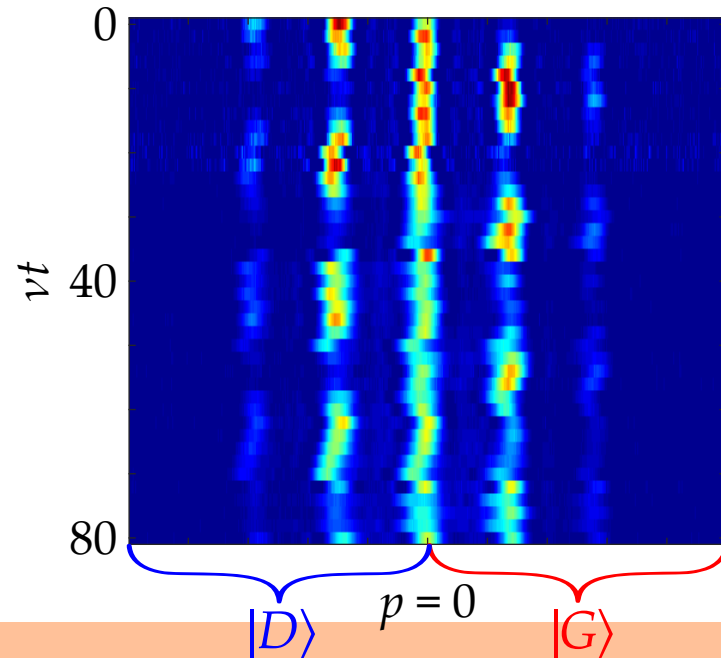
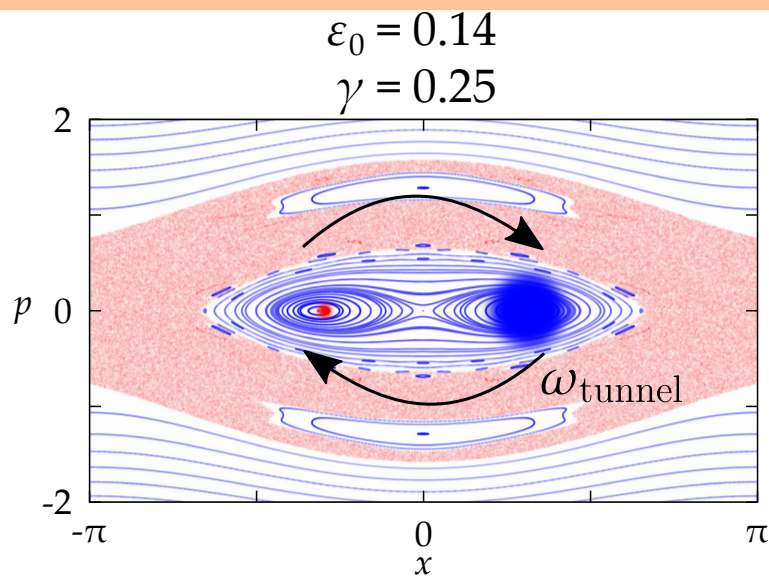
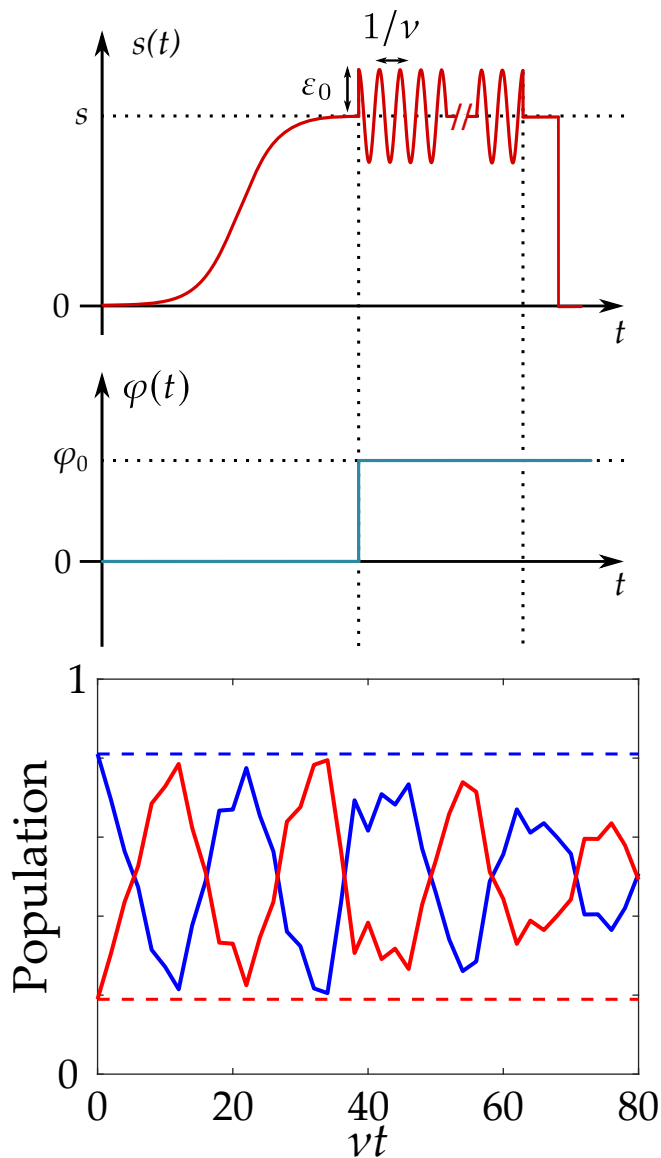


# Effet tunnel régulier - Protocole expérimental



$|D\rangle$   $p = 0$   $|G\rangle$

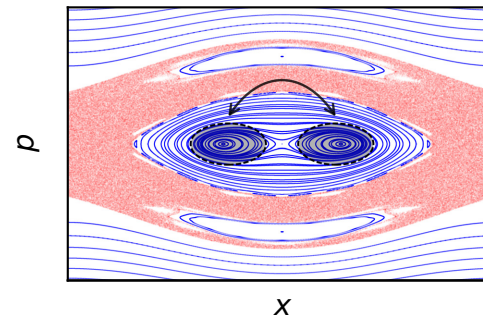
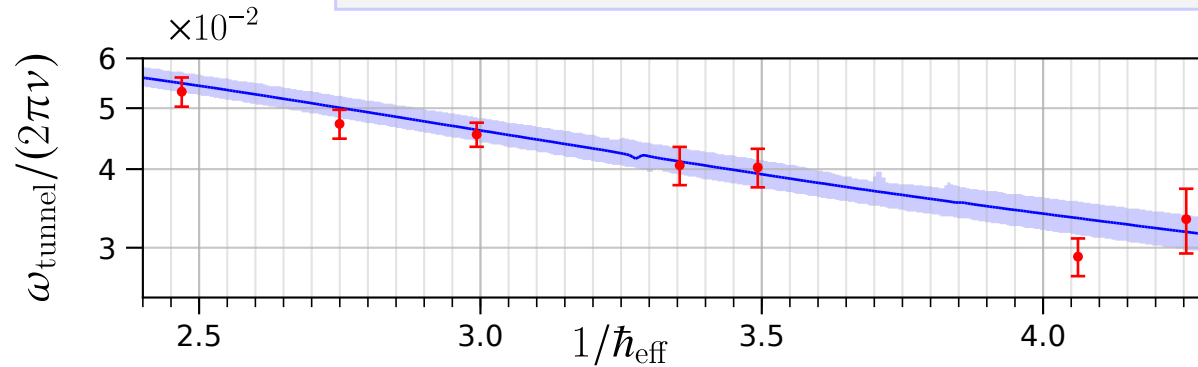
# Effet tunnel régulier - Protocole expérimental



# Effet tunnel régulier - Bilan

- Cas régulier obtenu avec ( $\gamma = 0.25$ ,  $\varepsilon_0 = 0.14$ ):

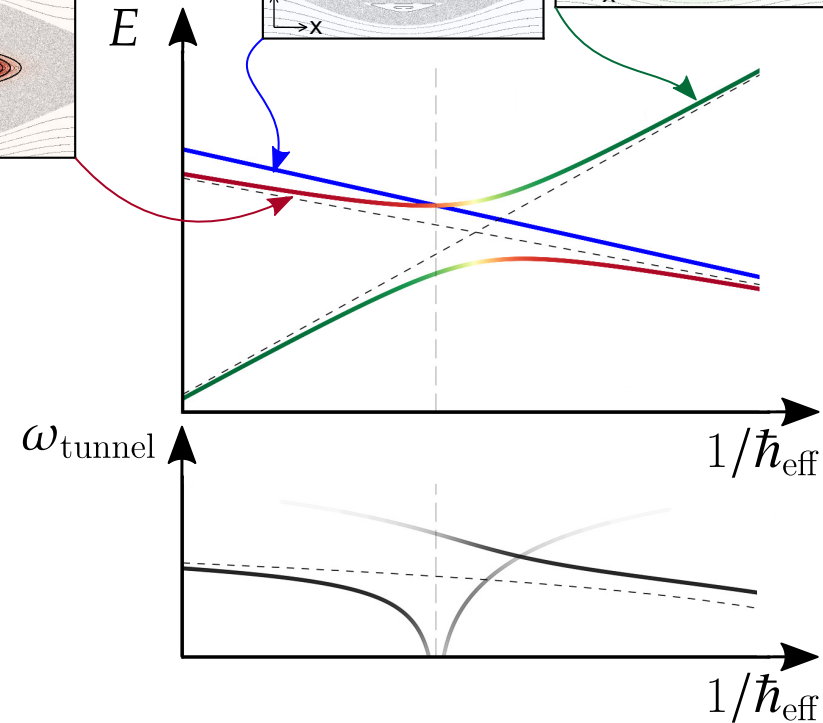
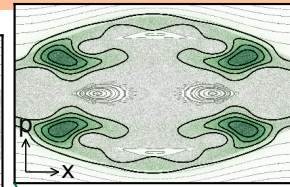
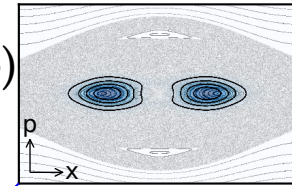
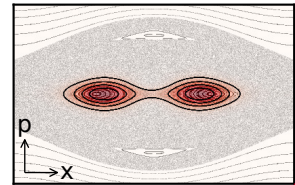
$$\omega_{\text{tunnel}} \propto e^{-S/\hbar_{\text{eff}}} \Rightarrow \ln(\omega_{\text{tunnel}}) \propto 1/\hbar_{\text{eff}}$$



# CAT - Mécanisme à trois niveaux

- Deux états réguliers (**S** et **AS**) + un état **chaotique** (e.g. **S**)

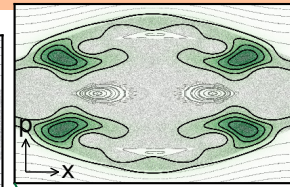
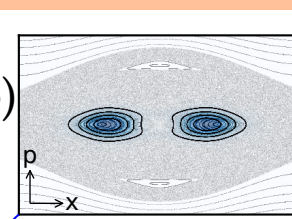
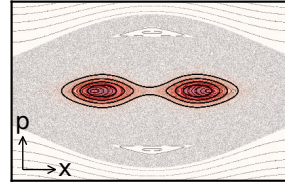
$$H = \begin{pmatrix} \epsilon^- & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon^+ & \beta \\ 0 & \beta & \epsilon_c \end{pmatrix}$$



# CAT - Mécanisme à trois niveaux

- Deux états réguliers (**S** et **AS**) + un état **chaotique** (e.g. **S**)

$$H = \begin{pmatrix} \epsilon^- & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon^+ & \beta \\ 0 & \beta & \epsilon_c \end{pmatrix}$$



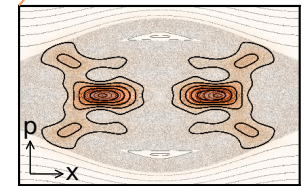
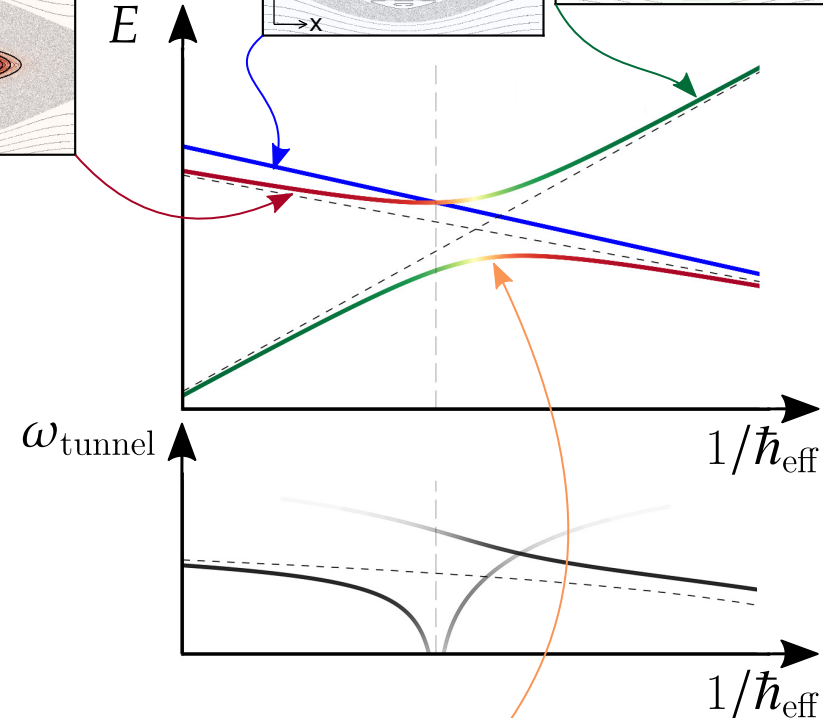
- Dans le sous-espace des états S, deux échelles d'énergie :  $\Delta = \frac{\epsilon^+ - \epsilon_c}{2}$  et  $\beta$

$$\beta \ll |\Delta|$$

$$\beta \gg |\Delta|$$

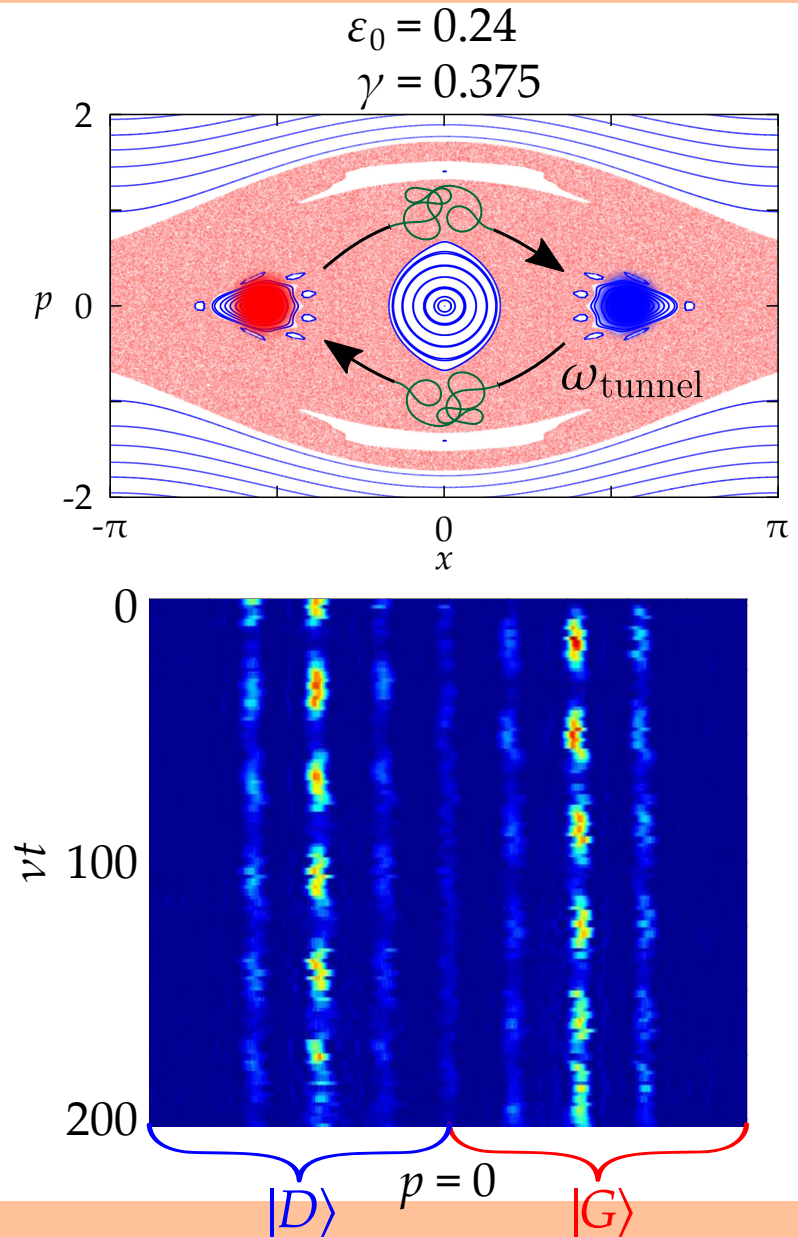
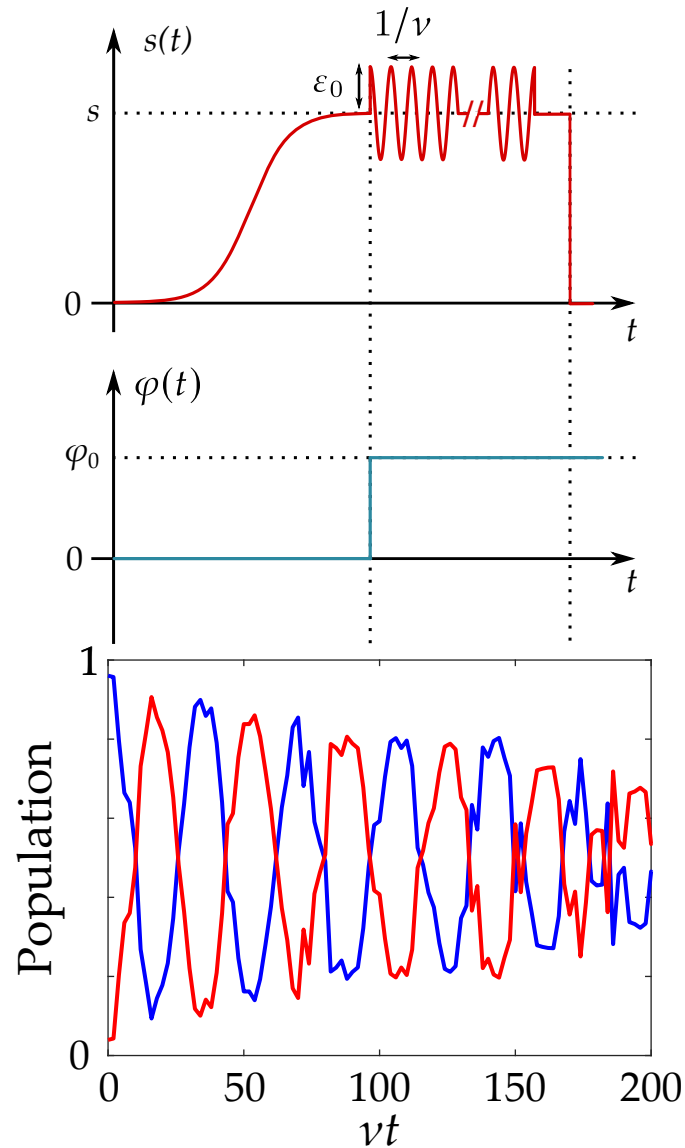
- Faible mélange : l'état chaotique participe peu au transport
- Les états se repoussent

- Fort mélange : deux états mixtes
- Dynamique à trois états : deux fréquences d'oscillation



**L'état chaotique modifie drastiquement la différence d'énergie des états**

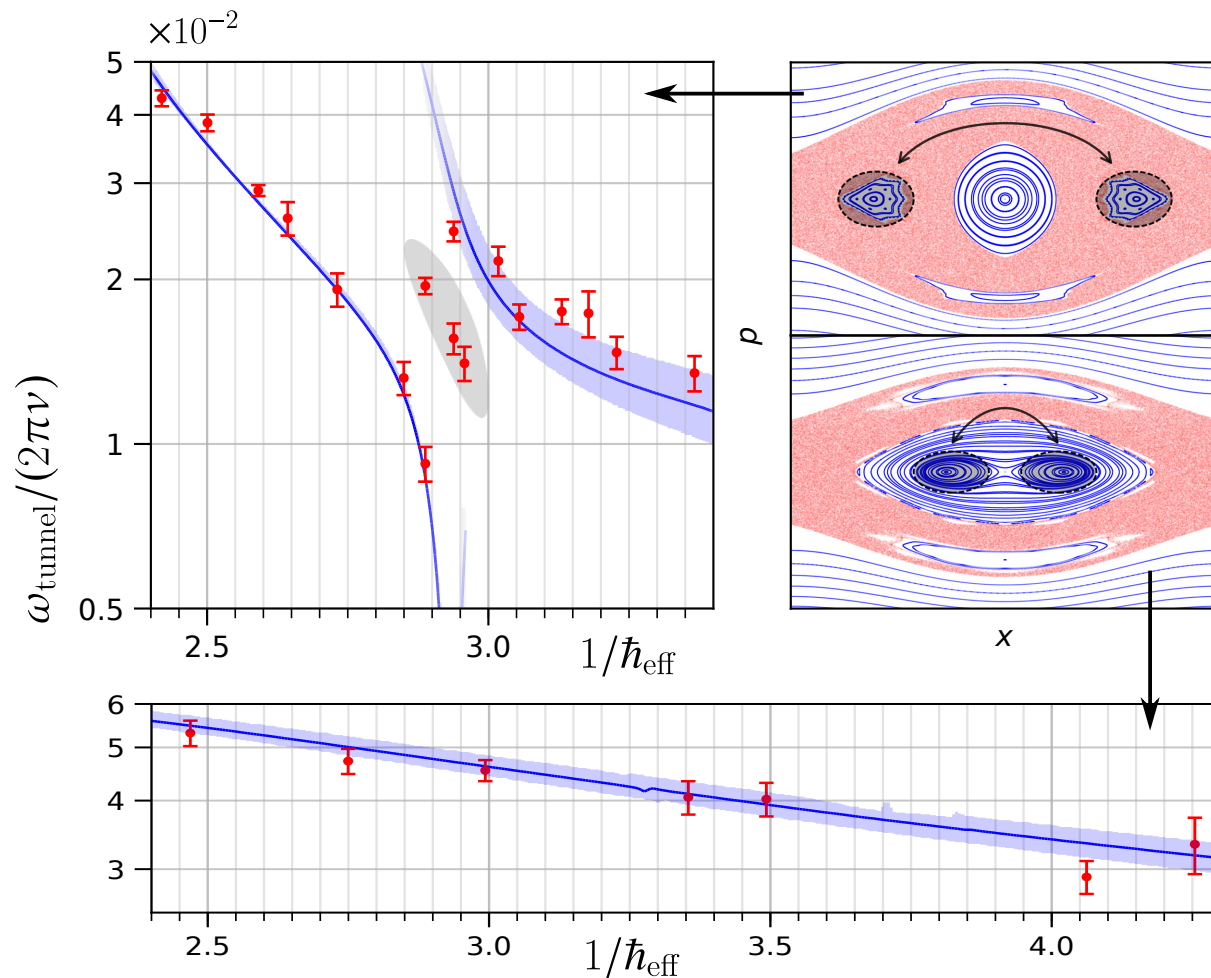
# CAT - Protocole expérimental



# Comparaison et bilan

- Cas régulier obtenu avec ( $\gamma = 0.25, \varepsilon_0 = 0.14$ )
- Cas chaotique obtenu avec ( $\gamma = 0.375, \varepsilon_0 = 0.24$ )

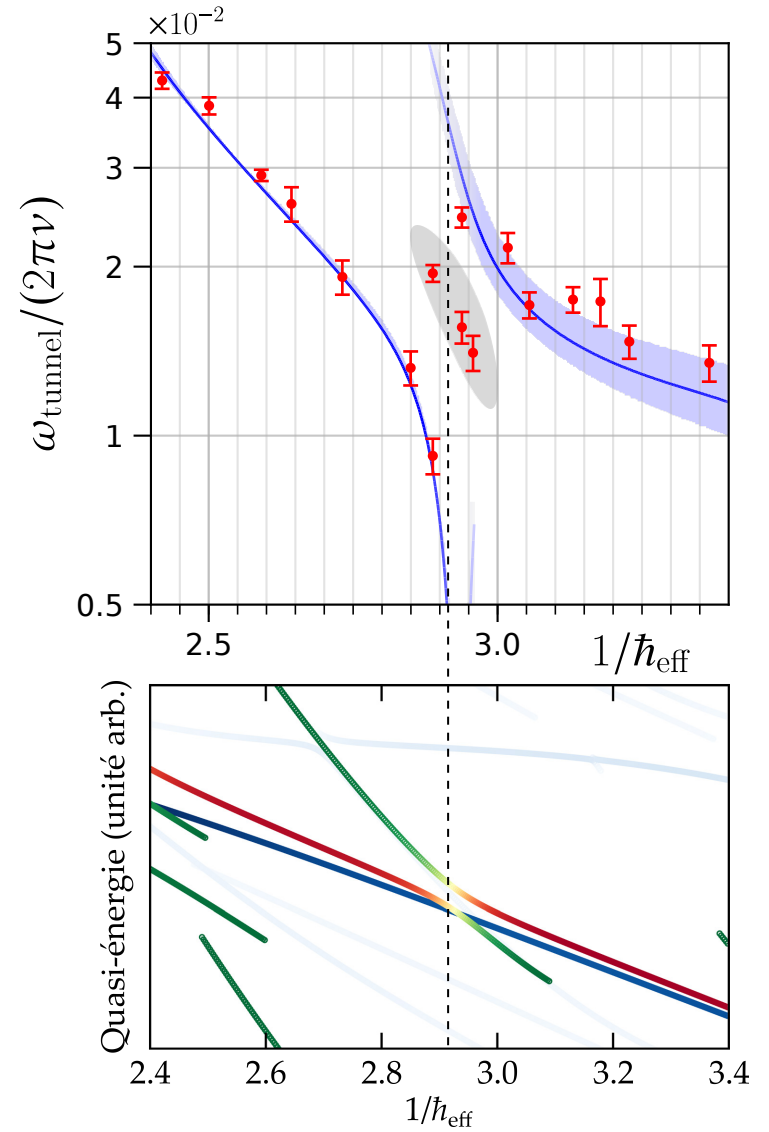
Mêmes échelles !





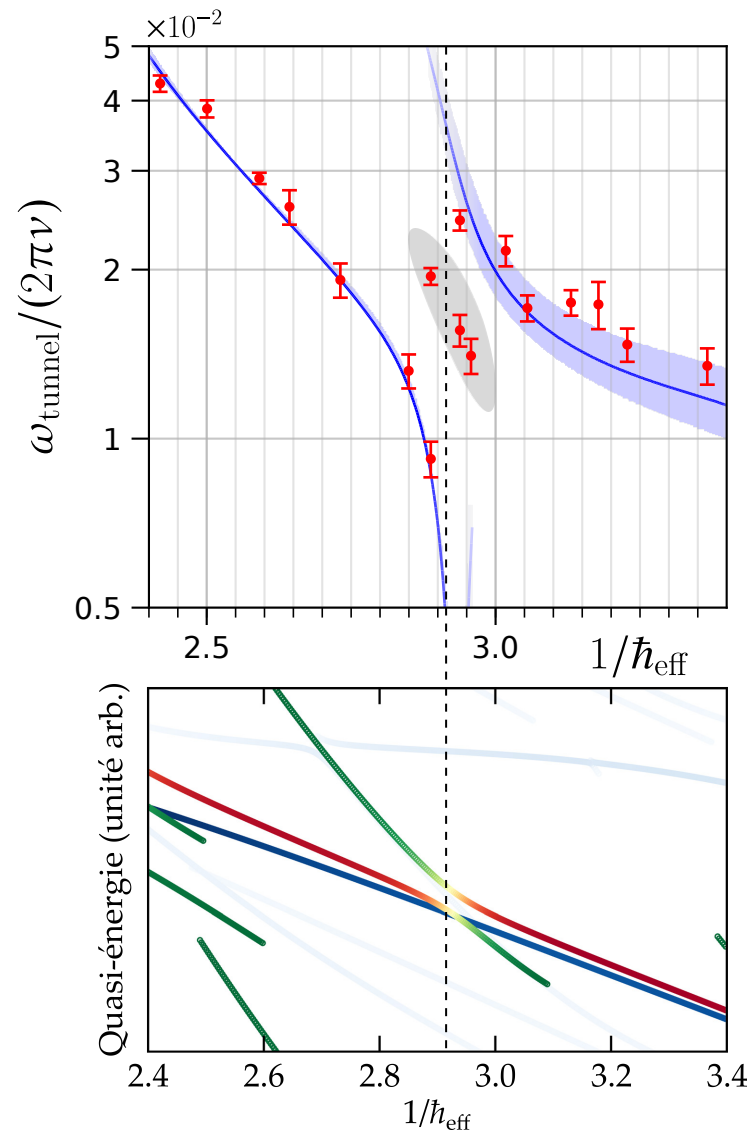
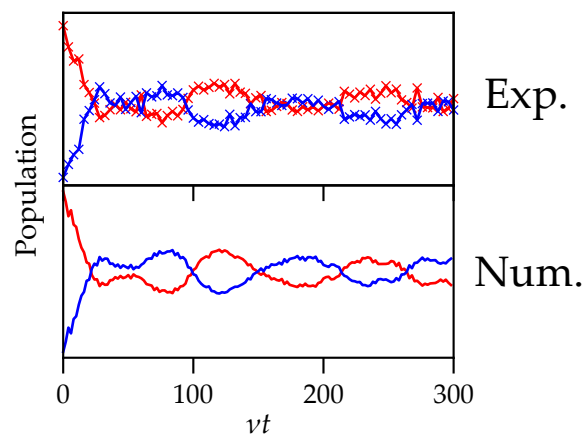
# Comparaison et bilan

- **Variation non monotone du taux tunnel**



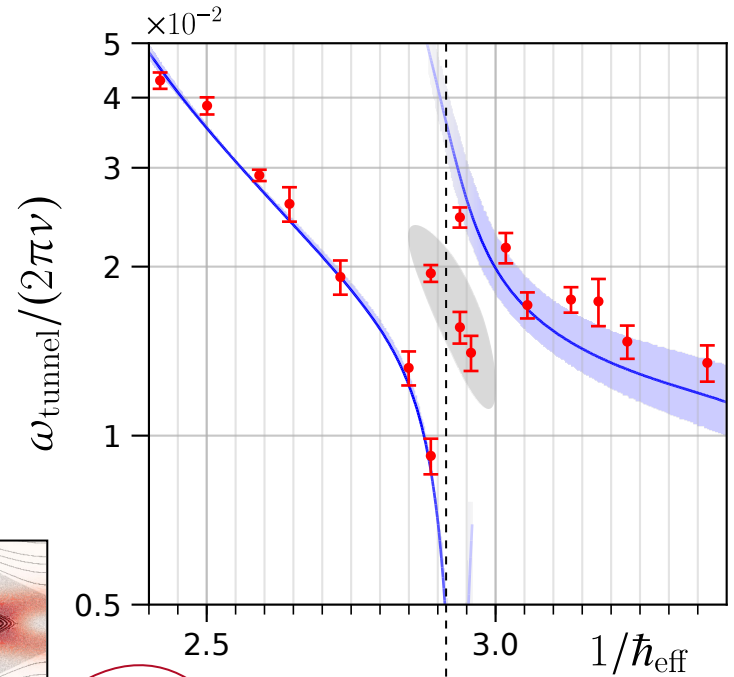
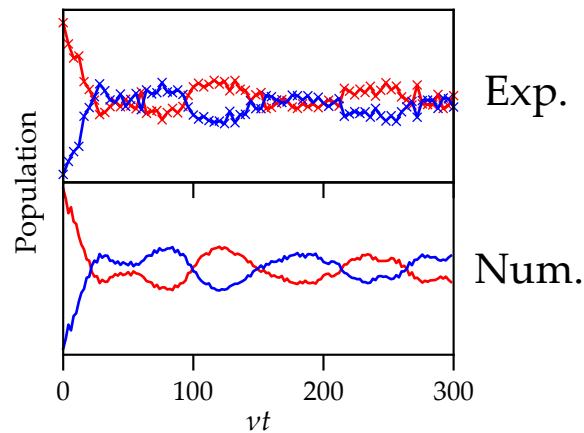
# Comparaison et bilan

- **Variation non monotone du taux tunnel**
- Deux types de simulations numériques :
  - $N = \infty$
  - $N = 13$

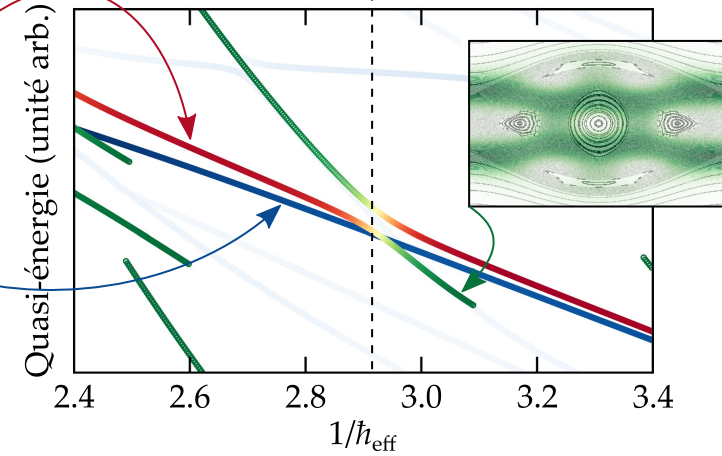
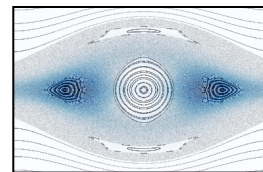
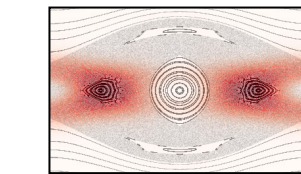


# Comparaison et bilan

- **Variation non monotone du taux tunnel**
- Deux types de simulations numériques :
  - $N = \infty$
  - $N = 13$



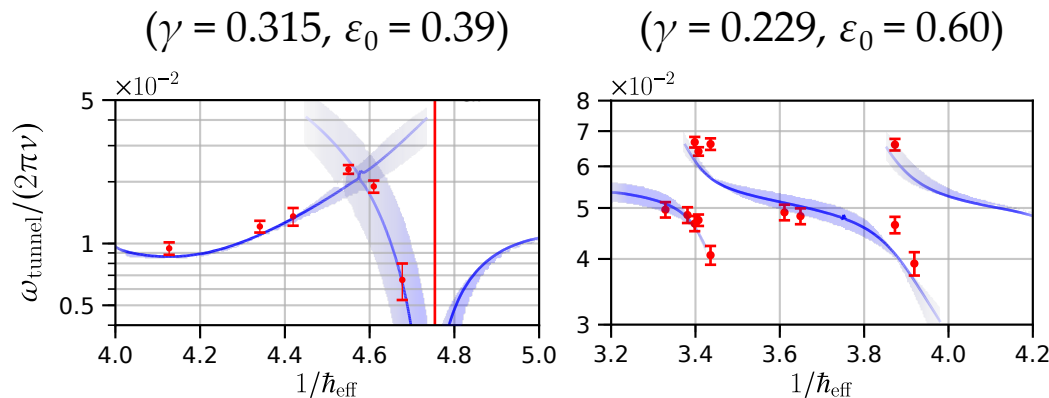
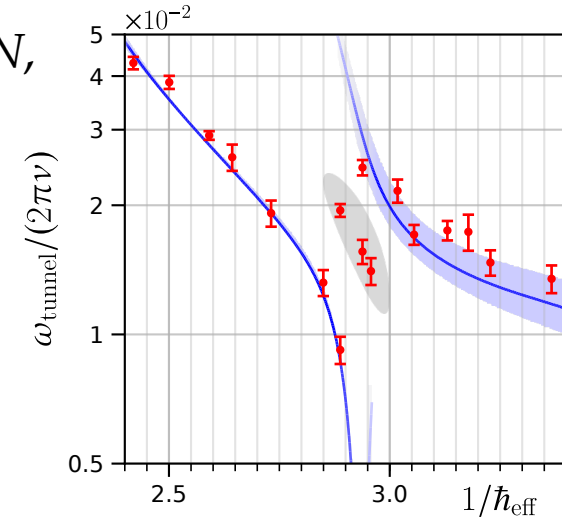
- États impliqués bien identifiés



**Une telle resonance = signature emblématique d'une dynamique mixte**

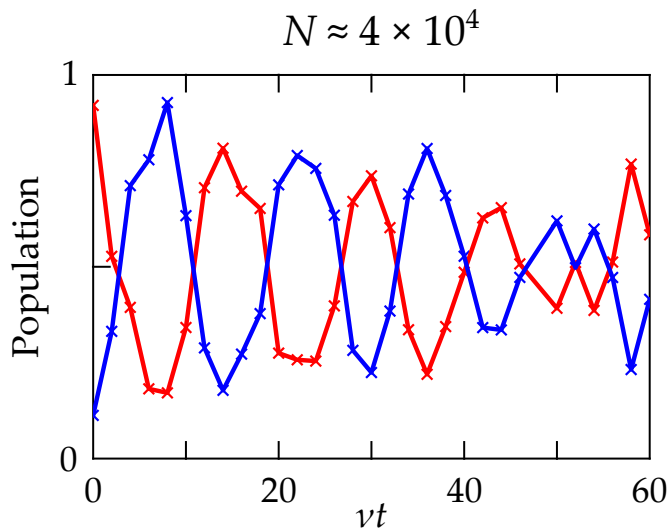
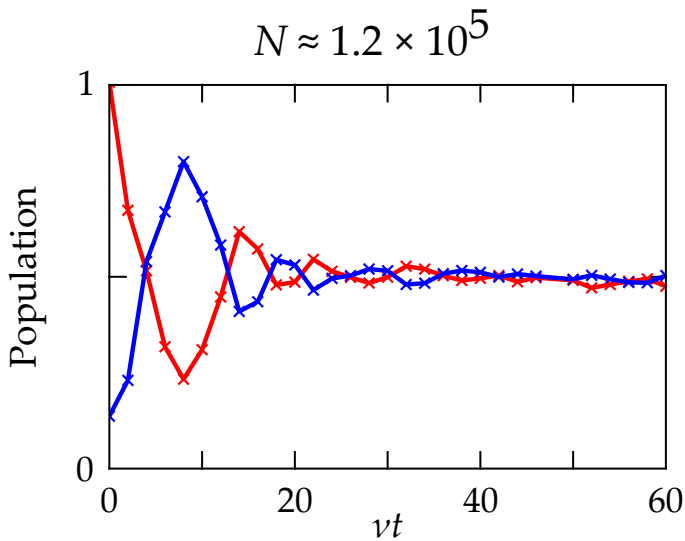
# Conclusion

- Réseau 1D périodiquement modulé = système non-intégrable
- Très grand contrôle des paramètres de l'expérience ( $s$ ,  $N$ , position, ...)
  - Bifurcations d'orbites régulières
  - Effet tunnel dynamique "régulier"
  - **Première mesure d'une résonance de l'effet tunnel assisté par le chaos**
- Autres résonances de l'effet tunnel :



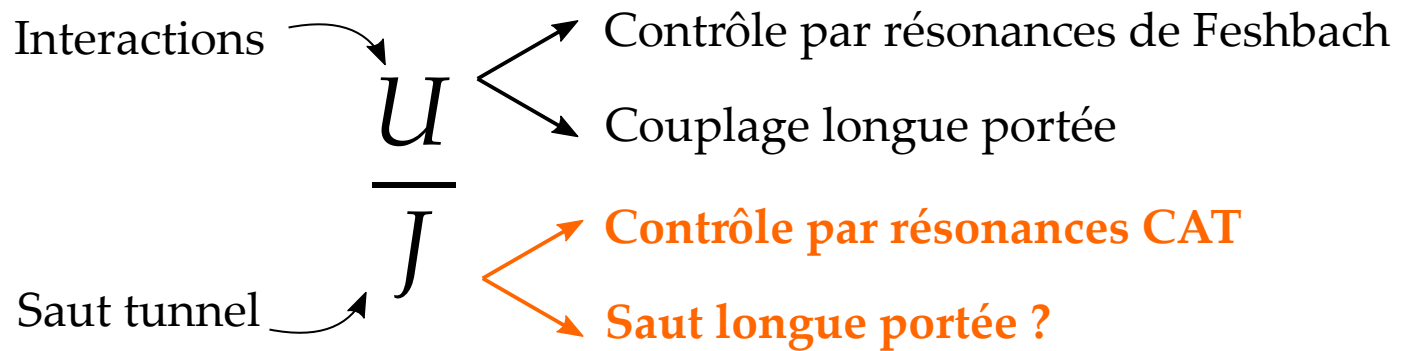
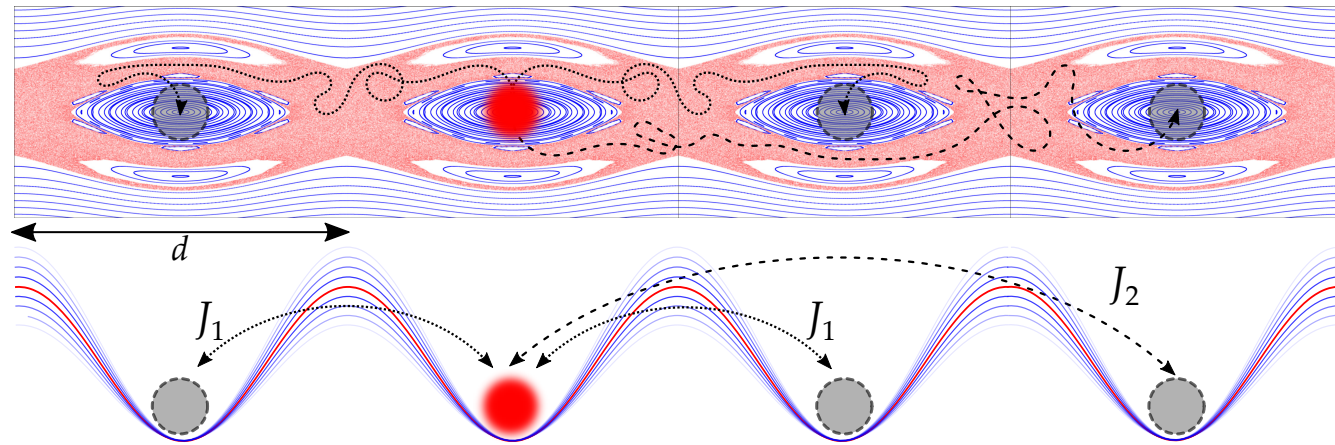
# Perspectives

- Premiers résultats pour du transport quantique médié par des **états de Floquet délocalisés**
  - Indépendant de l'espèce atomique
  - Nouveau type de contrôle de l'effet tunnel
- Effet des interactions interatomiques ?



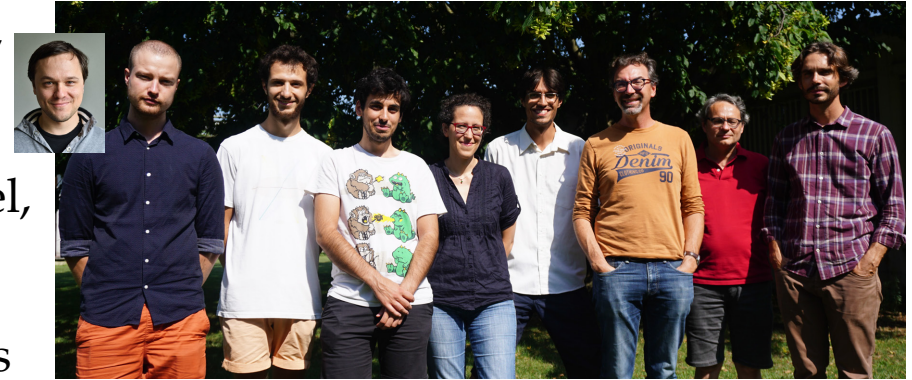
# Perspectives

- **Transport à longue portée intrinsèque** ; signature expérimentale ?



# Remerciements

- Équipe atomes froids : David, Juliette, Bruno, Gabriel, Nathan



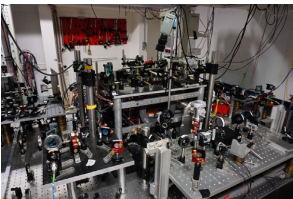
- Collaborateurs LPT : Bertrand, Gabriel, Maxime

- Collaborateurs LPTMS : Olivier, Denis

- LCAR : ▸ Direction : Jean-Marc L'Hermite

- Secrétariat : Carole Lecinana, Christine Soucasse, Anna Soler

- Services techniques : Stéphane Faure, Jean-Philippe Loisel, Laurent Polizzi, Éric Panader, William Volondat, Philippe Paquier, Emmanuelle Kierbel



- Financements :



- et bien d'autres...