

# *Dynamique non linéaire d'atomes froids dans des réseaux optiques dissipatifs*

---

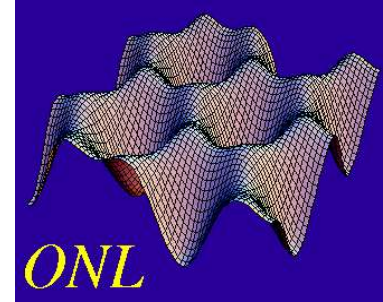
**Laurent Sanchez-Palencia**

*soutenance de thèse de doctorat*

*vendredi 19 septembre 2003*



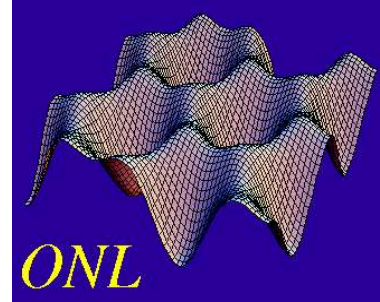
# *Des atomes froids à la physique statistique et non linéaire*



- **Refroidissement et piégeage des atomes**
  - *1980-1990 : techniques optiques / magnétiques*
  - *Maîtrise des techniques expérimentales*
    - *contrôle des paramètres, de l'état du système*
    - *diversité des situations (pièges)*
- **Des systèmes modèles**
  - *Transitions de phase*
    - *BEC's, BCS (?)*
    - *transition de Mott dans des réseaux optiques*
  - *Collisions ultrafroides*
  - *Chaos*
    - *billards atomiques*
    - *kicked rotor*

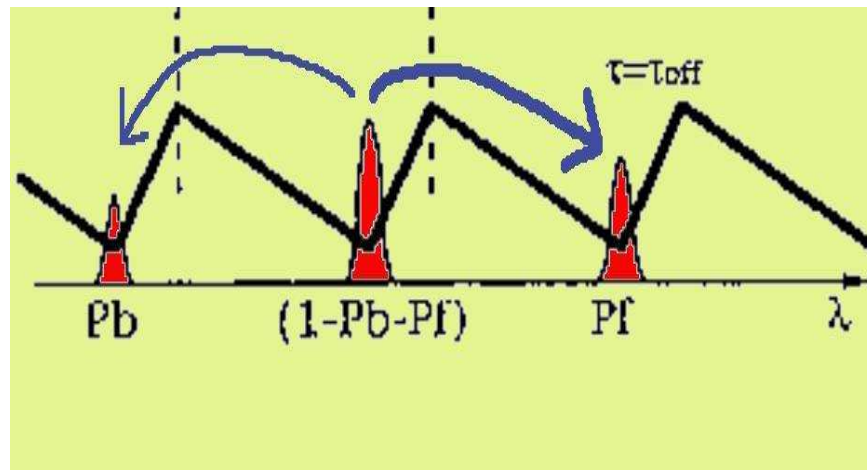


# Phénomènes de transport



## ● Transport dans des structures périodiques

- *Diffusion spatiale*
- *Transport collectif*
- *Moteurs browniens* → *modèles pour la biologie*

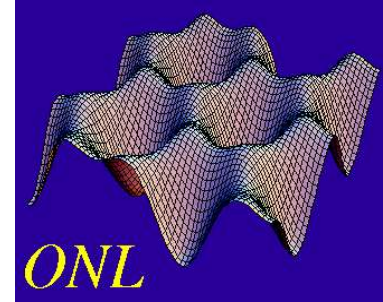


## ● Rôle du bruit

- *Une nuisance ?*
- *Riche dynamique non linéaire*



# Résonance stochastique : un modèle générique



## Particule brownienne dans un potentiel bistable

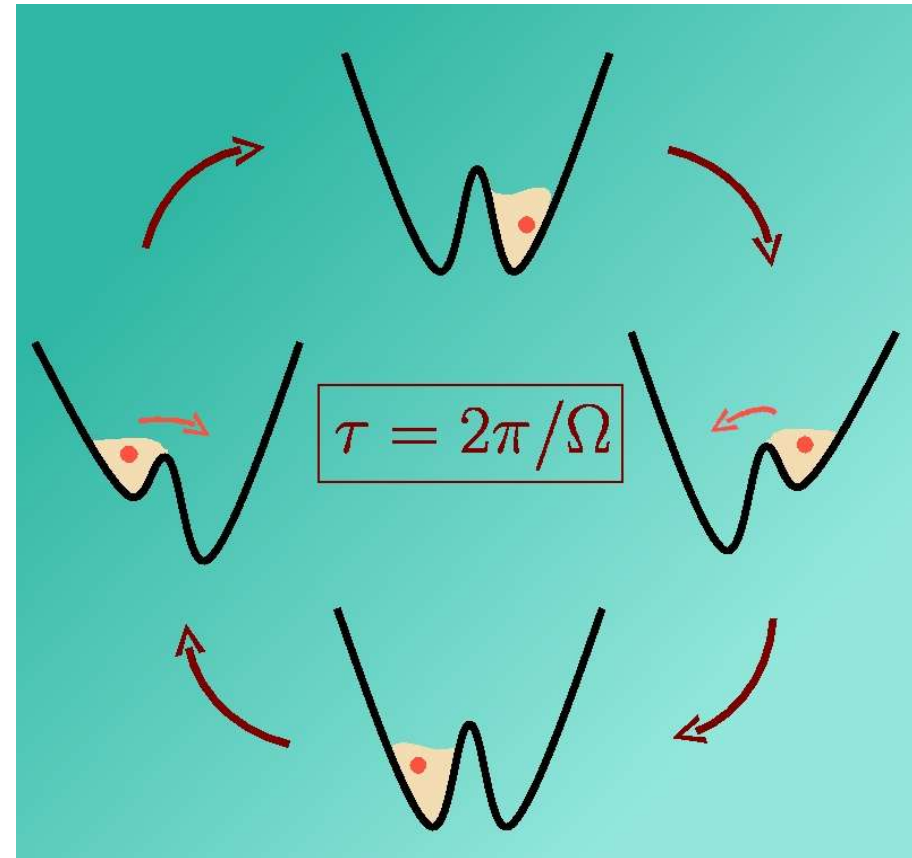
*piégeage dans l'un des puits*

- **Faible modulation asymétrique  
et périodique du potentiel**

*facilite les transitions de la particule à  
la fréquence  $\Omega$*

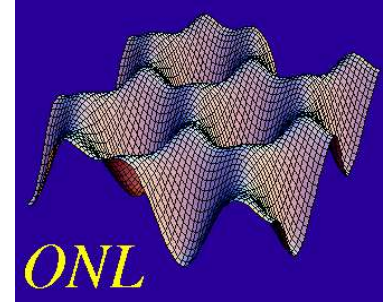
- **Bruit**

*les fluctuations thermiques induisent des transitions aléatoires de la  
particule au taux  $r_K$*



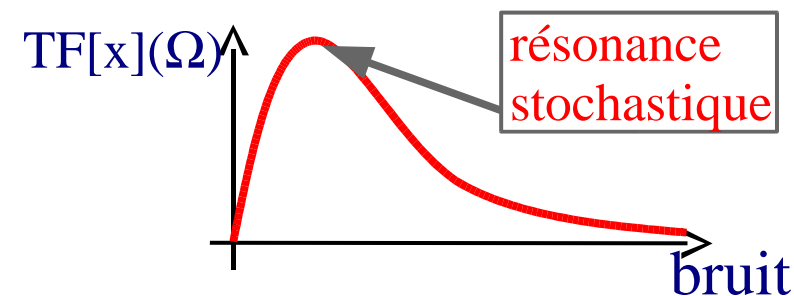
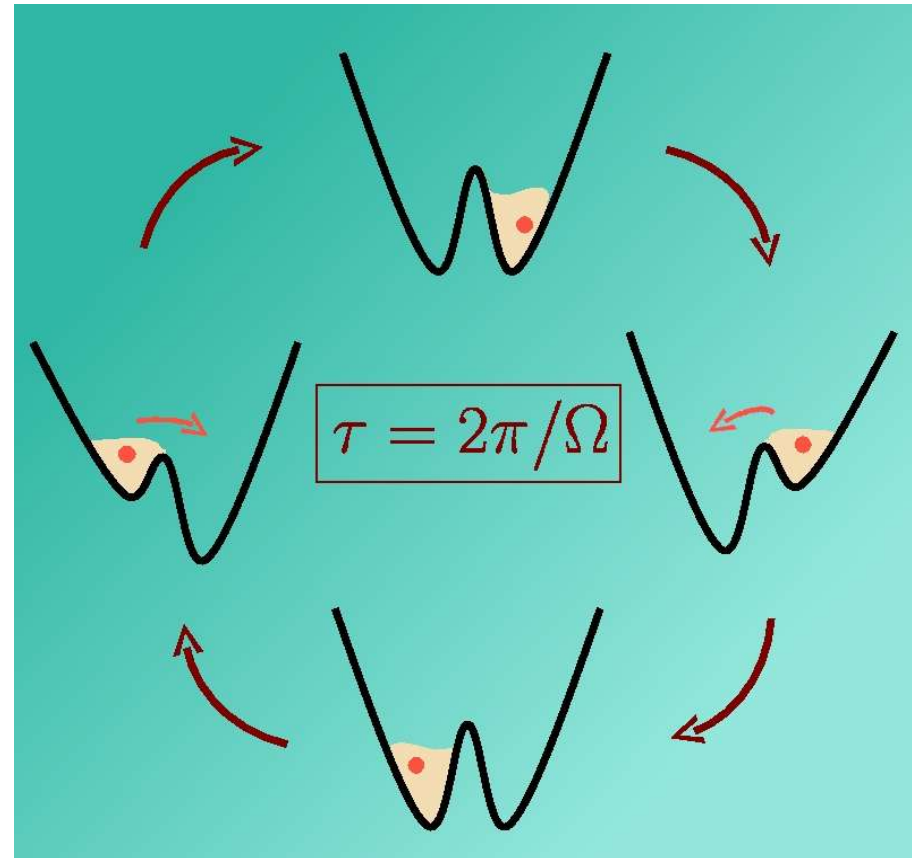


# Résonance stochastique : un modèle générique



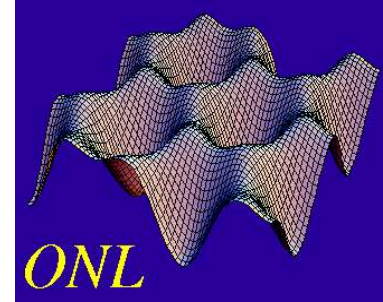
- **Réponse du système à l'excitation périodique**  
*composante de Fourier de  $x(t)$  de fréquence  $\Omega$*
- **Influence du niveau de bruit**
  - *Bruit faible : transitions rares*
  - *Bruit fort : dynamique dominée par le bruit*
  - *Bruit intermédiaire : **synchronisation** du mouvement hamiltonien et du bruit :*

$$r_K \approx \Omega / \pi$$





# *Plan de l'exposé*



## **0. Introduction**

**1. Réseaux optiques dissipatifs et refroidissement Sisyphe**

**2. Dynamique d'atomes froids dans le réseau : diffusion spatiale**

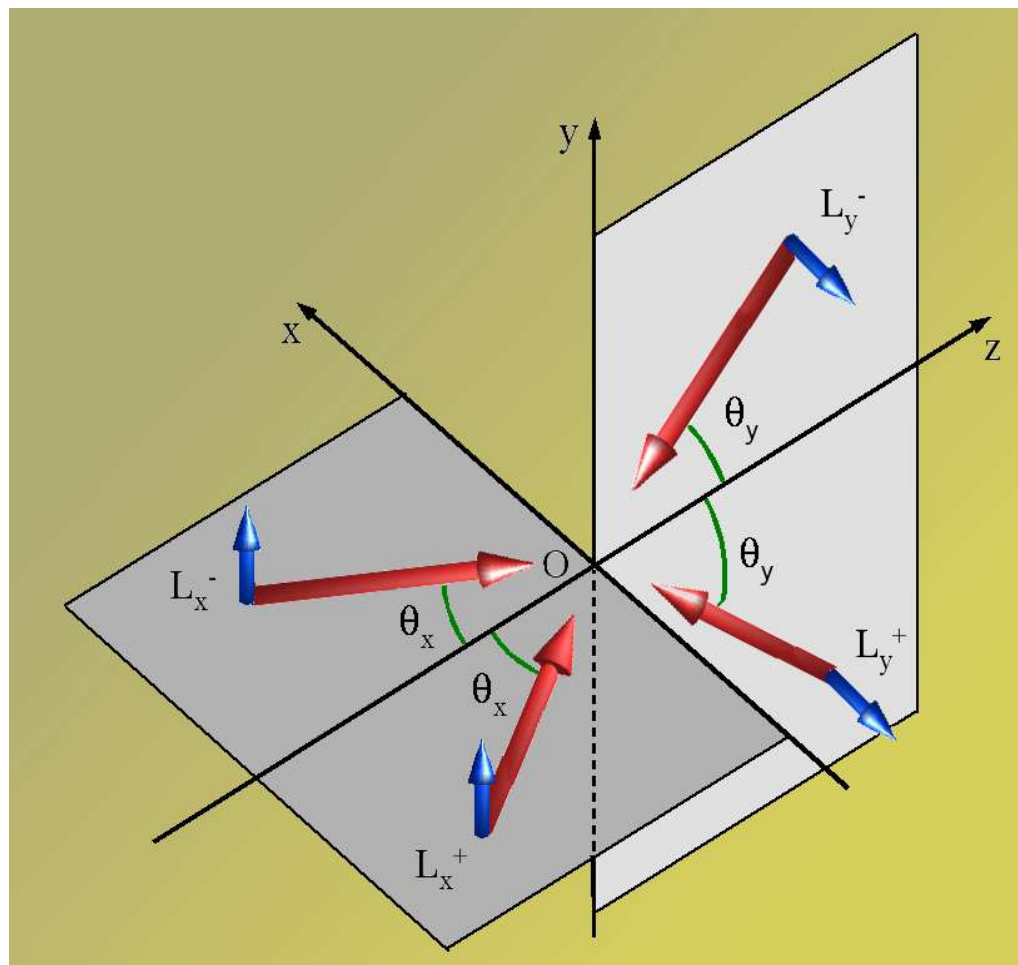
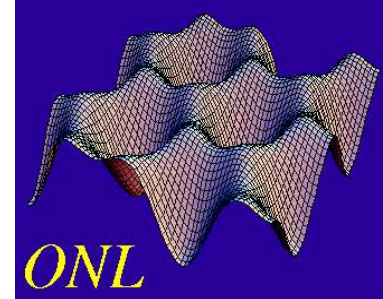
**3. Résonance stochastique (modes de propagation Brillouin)**

**4. Conclusion**





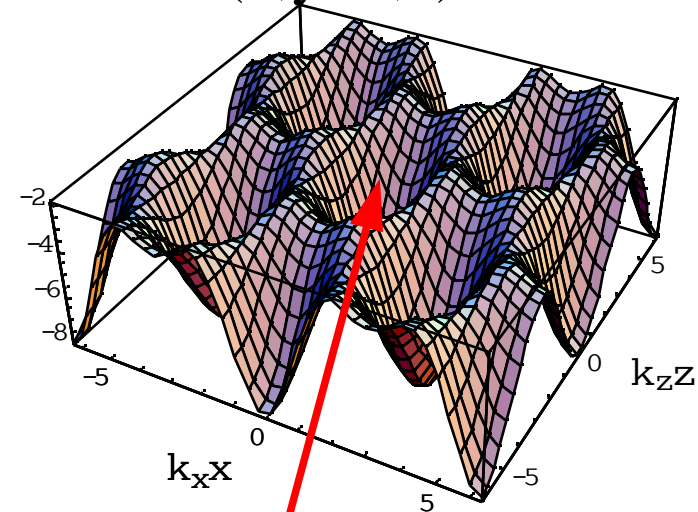
# Le réseau 3D- $lin \perp lin$



Déplacements lumineux  
et potentiel optique

$$U \propto \Delta_0'$$

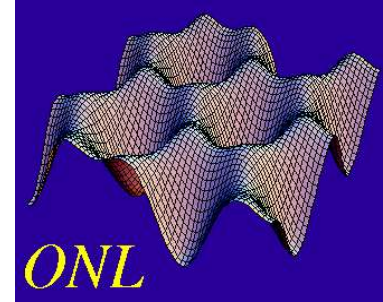
$$U(x, y=0, z)$$



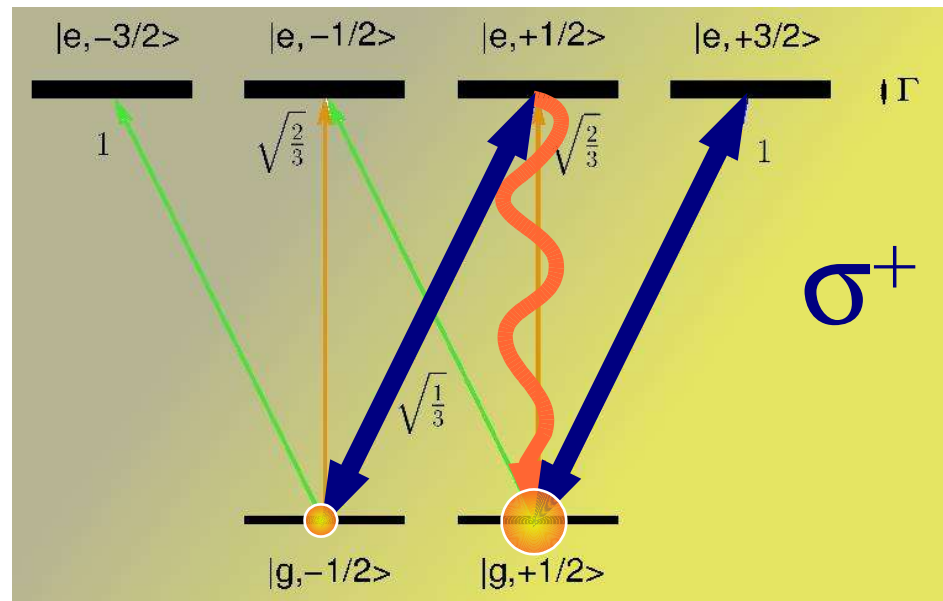
site de piégeage atomique



# Régime dissipatif et pompage optique



- *Pompage optique*
  - *lasers proches de résonance*
  - *refroidissement Sisyphé ( $k_B T \propto U$ )*

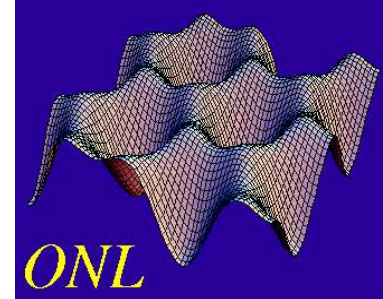


- *Le pompage optique : un processus dissipatif et aléatoire*
- *Peuplement du niveau dont l'énergie potentielle est minimale*





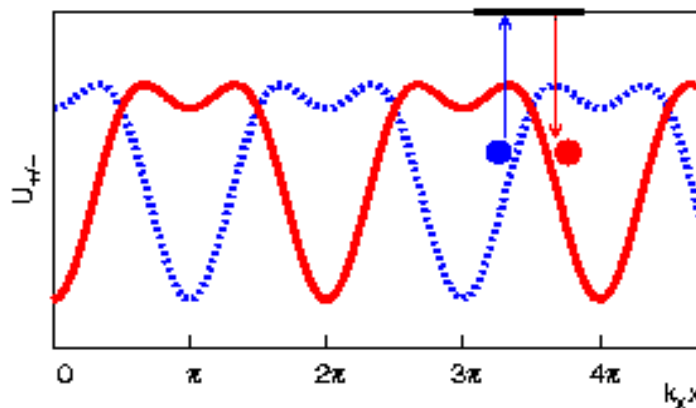
# Régime sautant et régime oscillant



pompage optique

$$\Gamma_0' \gg \Omega_\mu$$

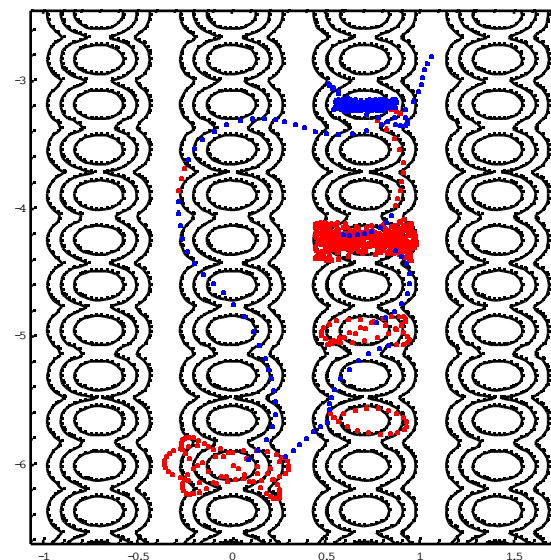
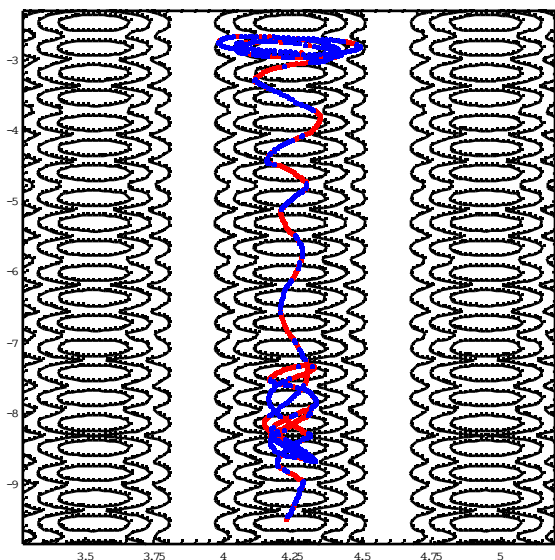
régime sautant



oscillations dans les puits

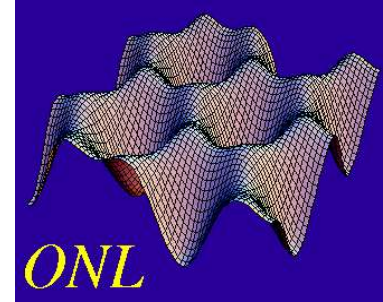
$$\Omega_\mu \gg \Gamma_0'$$

régime oscillant





# *Méthodes théoriques employées*



- **Calculs analytiques**

*transition 1/2- 3/2*

- **Simulations de Monte-Carlo**

- *quantiques*

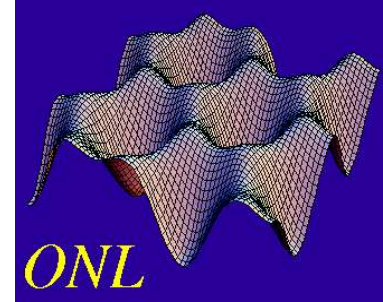
- *transition quelconque*
- *temps de calcul longs*

- *semi-classiques*

- *transition 1/2- 3/2*
- *temps de calcul plus courts*



# *Diffusion spatiale : une introduction*



## ● **Confinement visqueux et diffusion spatiale**

$F(v) = -\alpha_0 v$       force de friction

$D_p$                       diffusion en impulsion

relations d'Einstein

$$\Delta x = \sqrt{2 D_{sx} t}$$

$$k_B T = \frac{D_p}{\alpha_0}$$

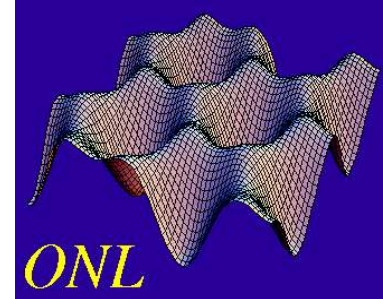
$$D_s = k_B \frac{T}{\alpha_0}$$

## ● **Pourquoi étudier la diffusion spatiale ?**

- Temps de vie des réseaux optiques
- Lien avec la spectroscopie
- Dynamique atomique



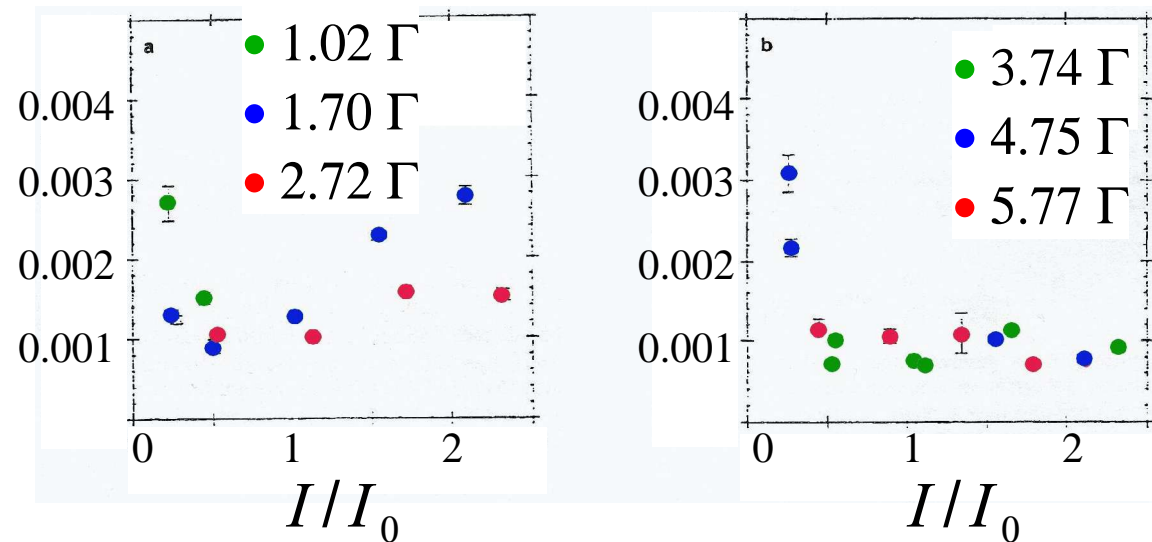
# Diffusion spatiale : premières études



## ● Diffusion spatiale dans une mélasse optique 3D (NIST, 1994)

Hodapp *et al.*, Appl. Phys. B **60**, 135 (1995)

$D_S$   
( $\text{cm}^2/\text{s}^{-1}$ )



## ● Etudes expérimentales plus récentes (LKB, Lille)

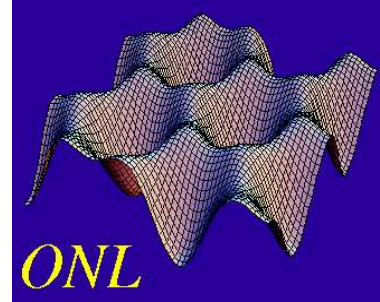
réseaux quasi-périodiques : Guidoni *et al.*, Phys. Rev. A **60**, R4233 (1999)

réseaux tavelés : Grynberg *et al.*, Europhys. Lett. **49**, 424 (2000)

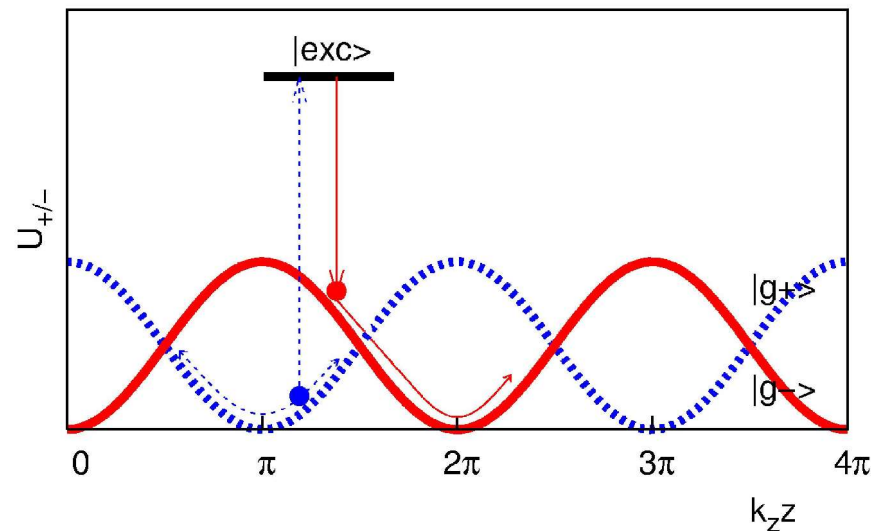
réseaux 3D-lin\_lin : Carminati *et al.*, Eur. Phys. J. D **17**, 249 (2001)



# Mécanismes d'échappement et diffusion spatiale



## ● Confinement imparfait dans les puits de potentiel



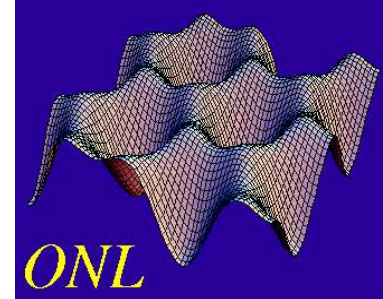
## ● Diffusion spatiale et marche aléatoire







# Diffusion spatiale en régimes sautant et oscillant



## ● **Modèle de marche aléatoire sur réseau**

*Transitions aléatoires tous les  $\tau$  entre des sites du réseau distants de  $d_\mu$  (en moyenne)*

$$D_{S\mu} = \frac{d_\mu^2}{2\tau}$$

## ● **Régime sautant**

$$\begin{aligned} d_\mu &\propto \lambda_\mu \\ \tau &\propto 1 / \Gamma_0' \end{aligned}$$



$$D_{S\mu} \propto \lambda_\mu^2 \Gamma_0'$$

## ● **Régime oscillant**

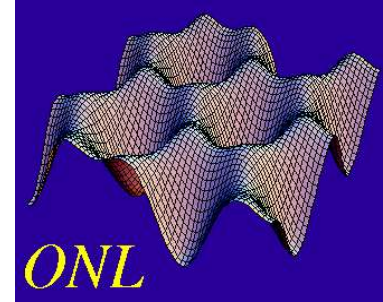
$$\begin{aligned} d &\propto v \tau_f \text{ où } v \simeq \sqrt{2 E_K / M} \\ \tau &\sim \tau_f \propto 1 / \Gamma_0' \end{aligned}$$



$$D_S \propto \frac{\hbar |\Delta|}{M \Gamma}$$



# Diffusion spatiale : modèle de mouvement brownien



## ● Point-clefs du modèle

- Force de freinage
- Friction généralisée
- Généralisation aux dimensions supérieures
- Moyennes spatiales (localisation dans les puits de potentiel)
- Idem pour  $D_p$

$$\frac{F(v)}{v} = \frac{-\alpha_0}{1+(v/v_c)^2}$$

$$v^2 \rightarrow k_B T / M$$

## ● Température et diffusion spatiale

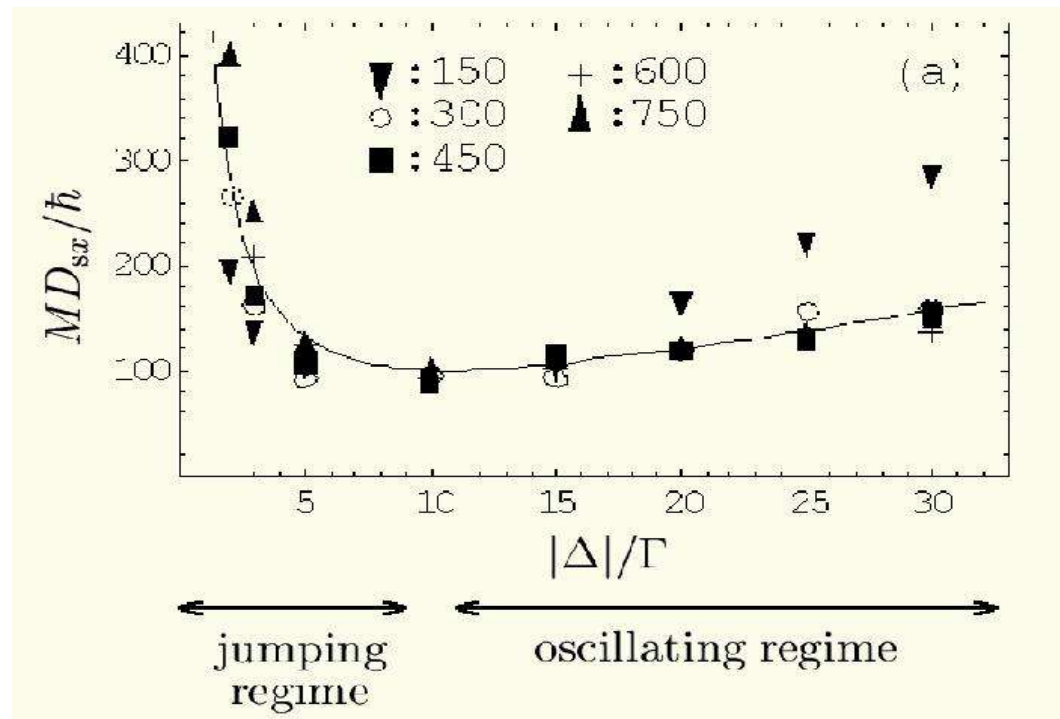
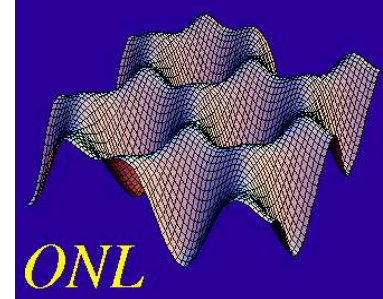
$$k_B T_\mu = \frac{D_{p\mu}}{\alpha_\mu}$$

$$D_{S\mu} = \frac{k_B T_\mu}{\alpha_\mu} \text{ * fraction d'atomes non piégés}$$

Prise en compte du potentiel optique



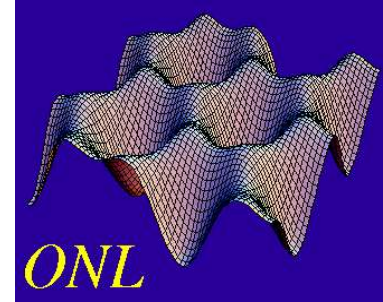
# Diffusion spatiale : modèle de mouvement brownien



$$D_{sr} = 0,5 \frac{h}{M} \left( \frac{k}{k_x} \right)^2 \times \left\{ \frac{|\Delta'_0|}{\omega_R} \frac{\Gamma}{|\Delta|} + 1,73 \frac{|\Delta|}{\Gamma} \left[ 1,16 \left( \frac{k_x}{k} \right)^2 + 0,83 \left( \frac{k_z}{k} \right)^2 \right] \right\}$$



# *Diffusion spatiale : conclusion*



## ● **Comparaison à l'expérience**

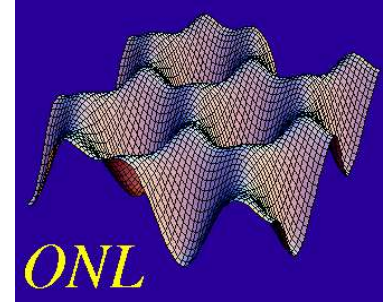
- *Accord avec les résultats du NIST*
- *Dépendance de  $D_s$  avec la géométrie du réseau (Paris)*

## ● **Théorie donne accès au régime intermédiaire**

- *Formule analytique pour  $D_s$*
- *Riche dynamique non linéaire : résonance stochastique*



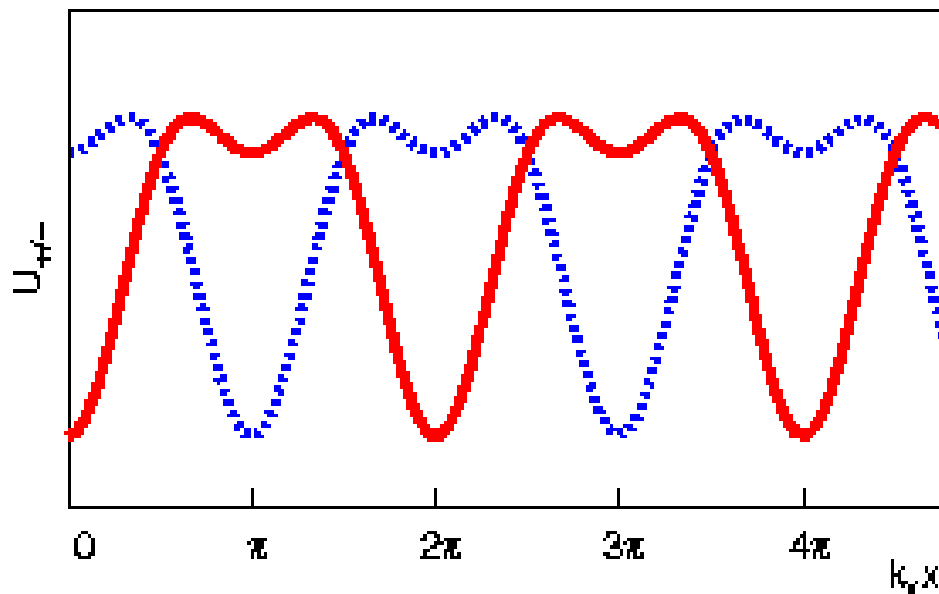
# A la recherche d'une résonance stochastique



- **Recherche de la « bonne » observable ?**

*Observable dont la valeur dépend d'un mécanisme combinant mouvement hamiltonien et processus dissipatifs*

- **Modes de propagation Brillouin**



Courtois *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 77, 40 (1996)

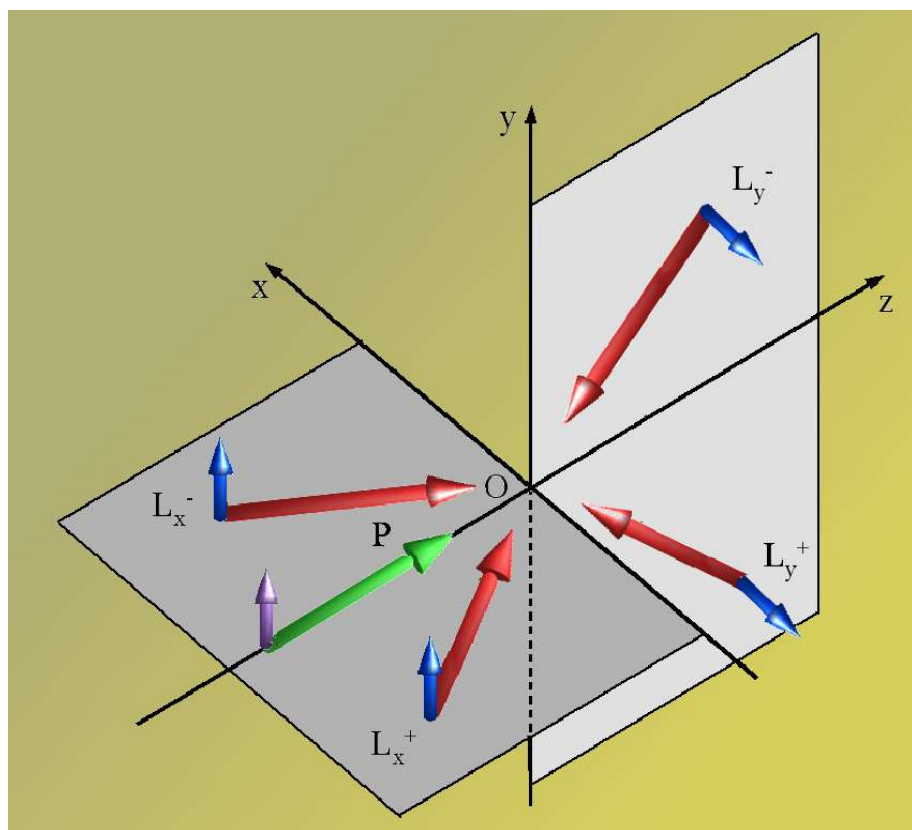
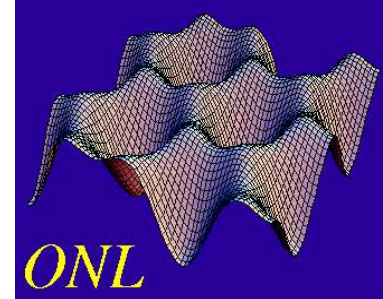
*vitesse de l'atome dans le mode :*

$$v_{B\mu} = \Omega_{\mu} / k_{\mu}$$

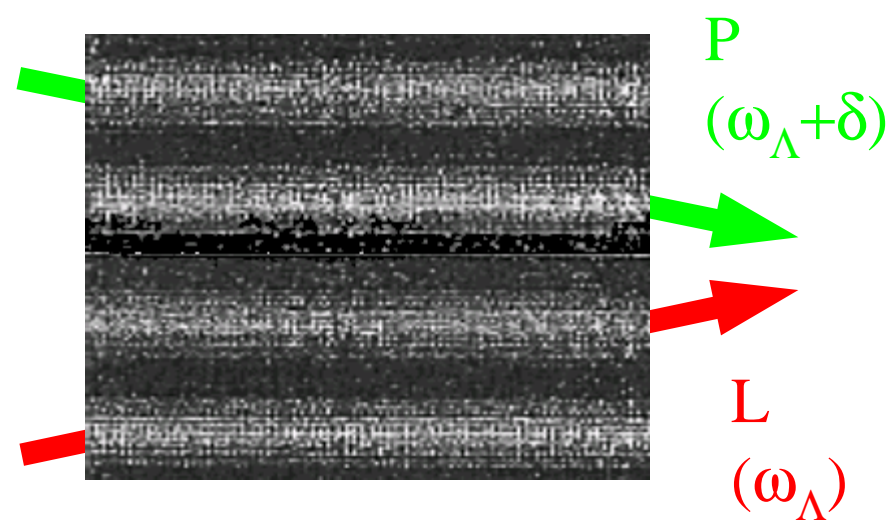




# Excitation des modes de propagation

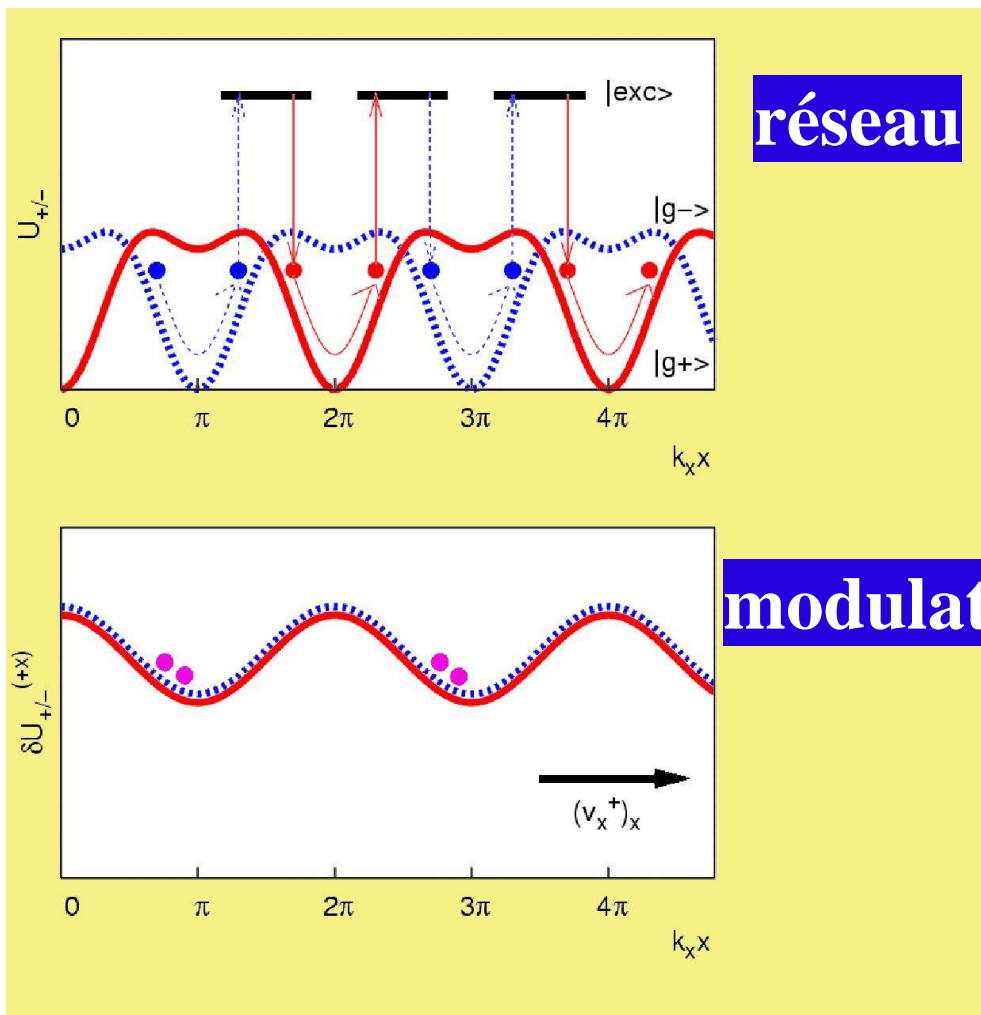
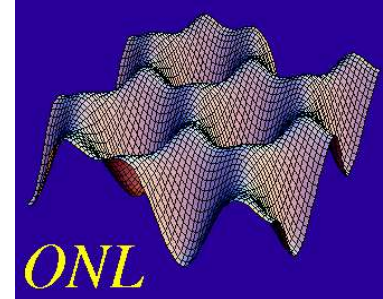


$$v_{q\mu} = \frac{\delta}{k_{q\mu}}$$





# Direction $x$ : mécanisme $E_{||}$

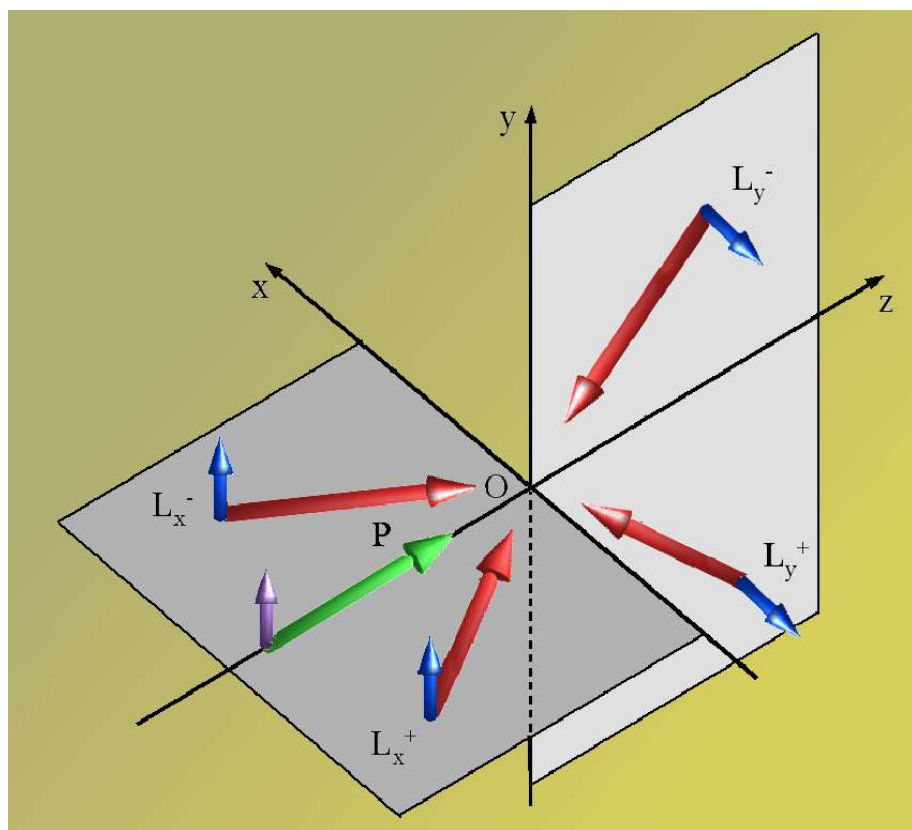
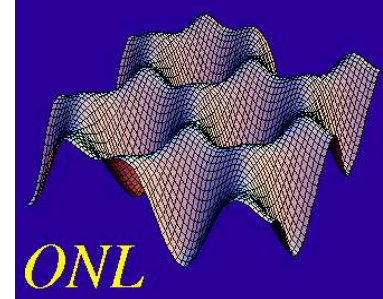


$\Rightarrow$  **résonance Brillouin**

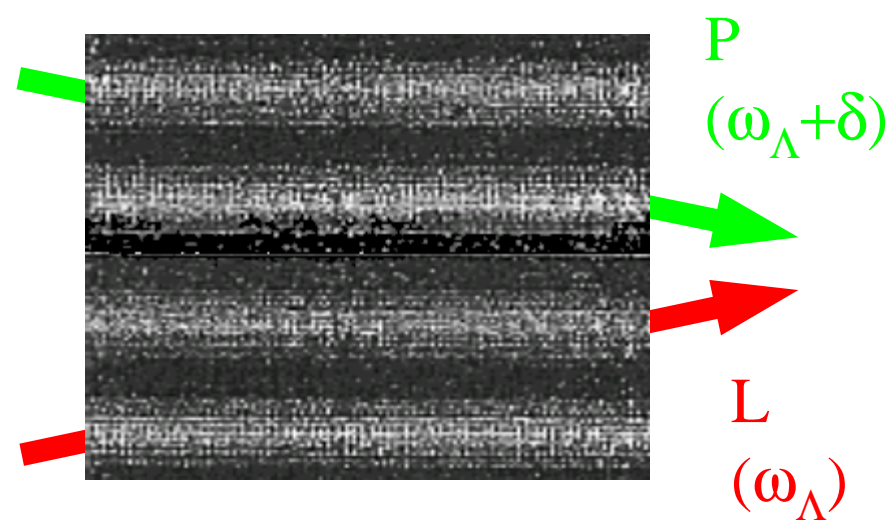
$$\delta_B = \Omega_x$$



# Excitation des modes de propagation

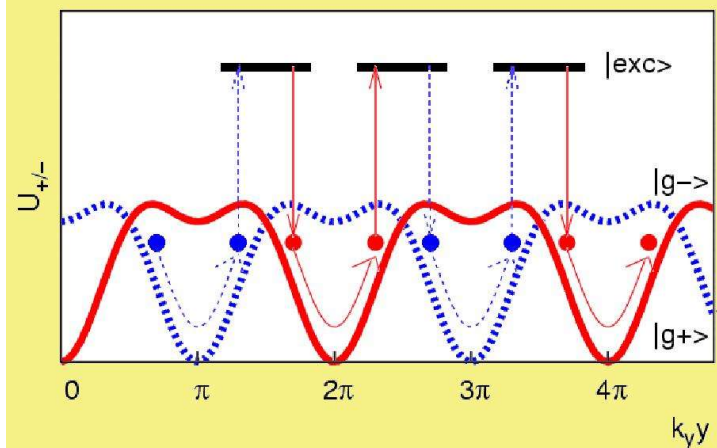
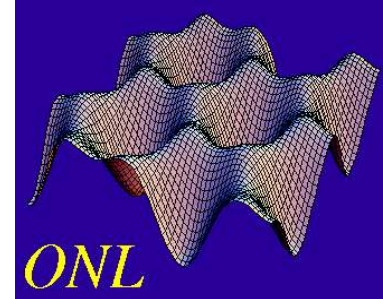


$$v_{q\mu} = \frac{\delta}{k_{q\mu}}$$





# Direction $y$ : mécanisme $E_{\perp}$

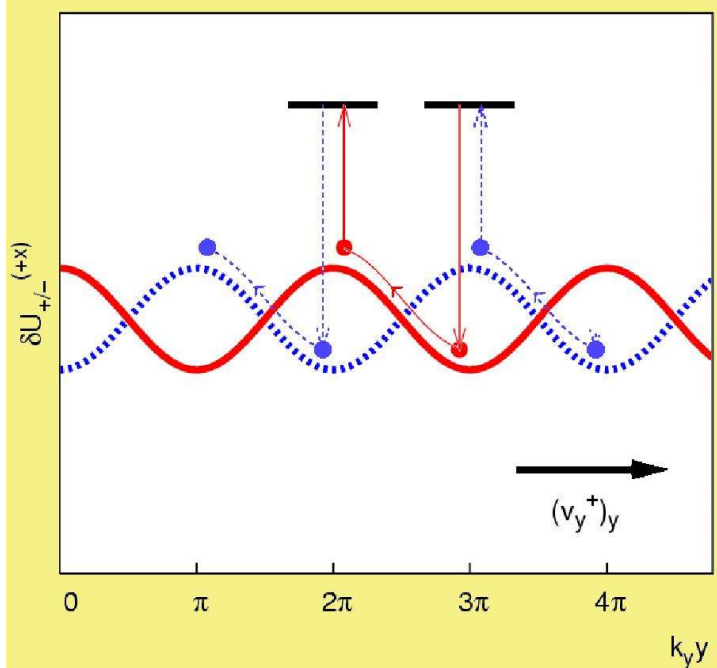


**réseau**

$$v_{at/latt} = +\Omega_y / k_y$$

$$v_{at/mod} = -\Omega_y / k_y$$

$$v_{mod/latt} = 2 \Omega_y / k_y = \delta / k_y$$



**modulation**

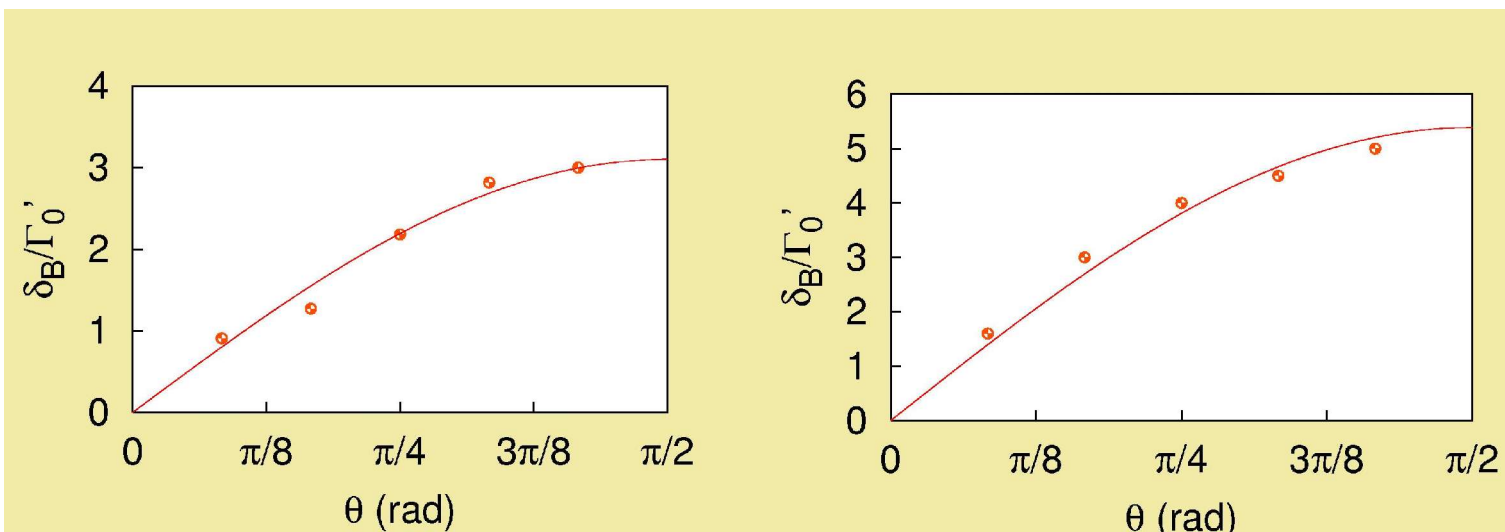
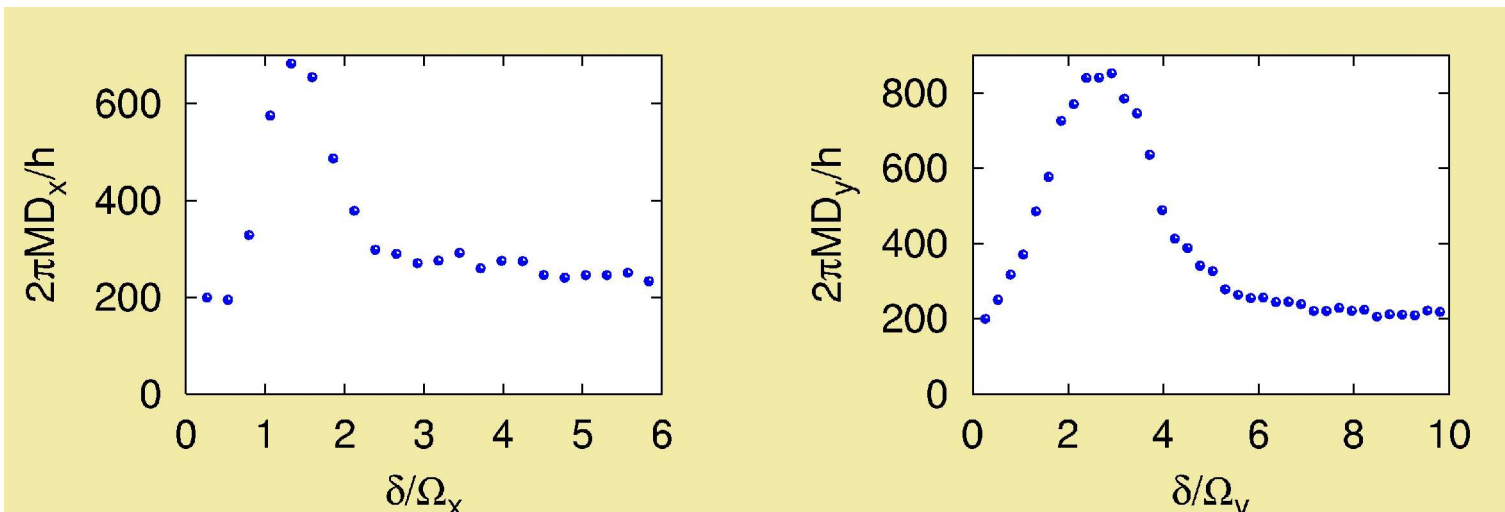
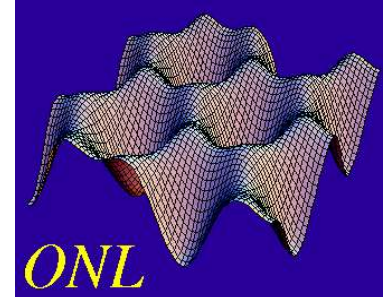
**⇒ résonance Brillouin**  
 $\delta_B = 2 \Omega_y$

M. Schiavoni, L.Sanchez-Palencia, F.-R. Carminati, F. Renzoni and G. Grynberg, Phys. Rev. A **66**, 053821 (2003)





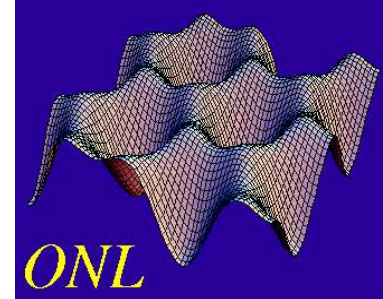
# Mise en évidence des modes de propagation







# Résonance stochastique dans le réseau 3D-lin $\perp$ lin



*modèle générique*

*réseau optique*

*puits séparés par une barrière*



*potentiel optique*

*modulation périodique de la barrière*



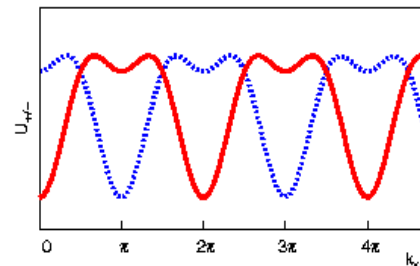
*modulation de potentiel en mouvement (transitions au taux  $2\Omega_x$ )*

*bruit*



*pompage optique (transitions au taux  $\gamma_{\pm} \sim \Gamma_0'$ )*

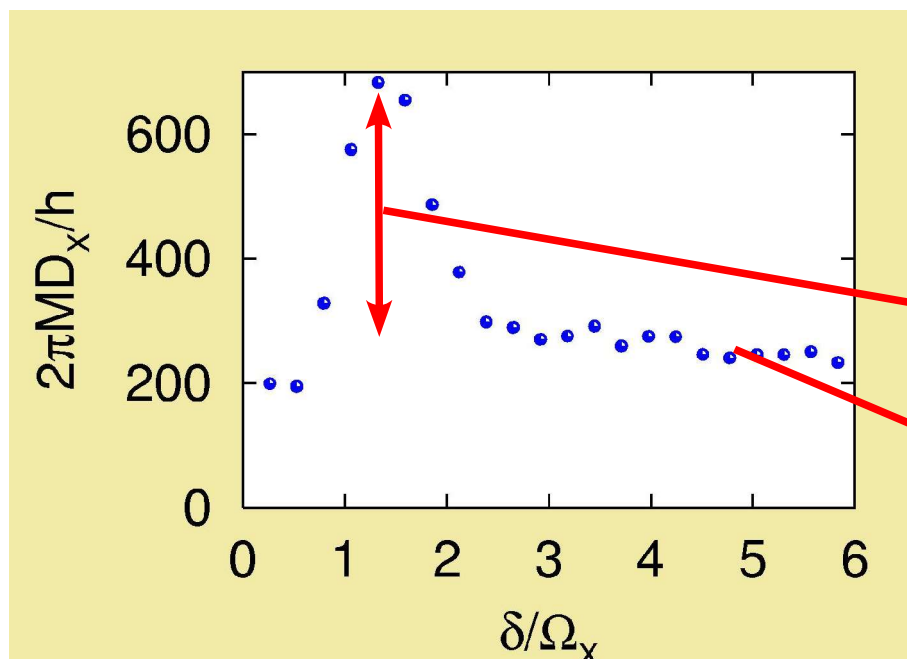
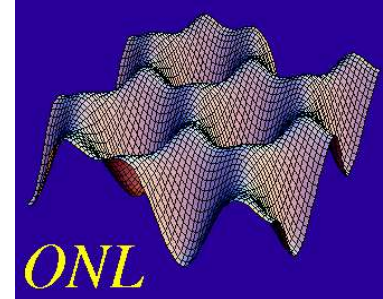
*résonance stochastique = synchronisation du mouvement hamiltonien et du bruit*



SR :  
 $\gamma_{\pm} \approx \Omega_x / \pi$  ????



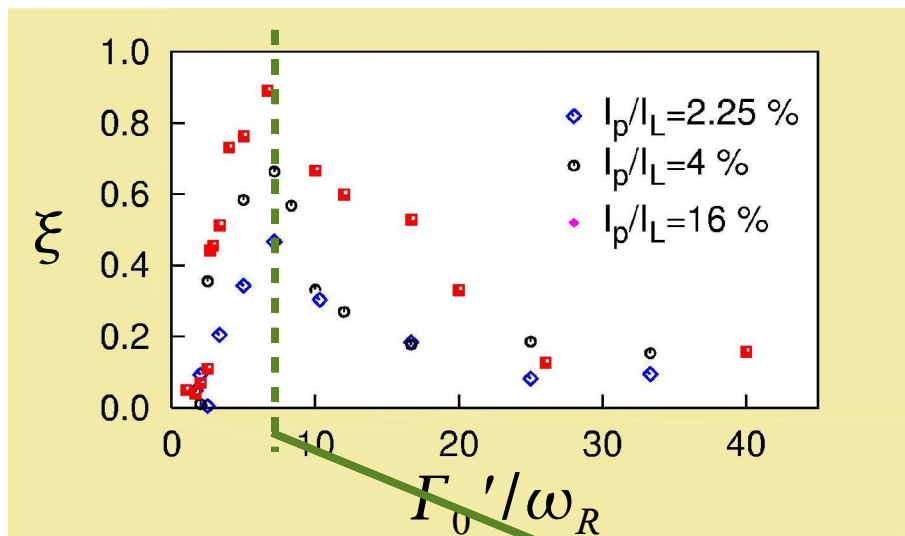
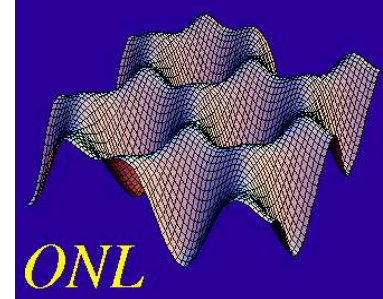
# Résonance stochastique : démonstration



$$\xi = \frac{D_x - D_x^0}{D_x^0}$$

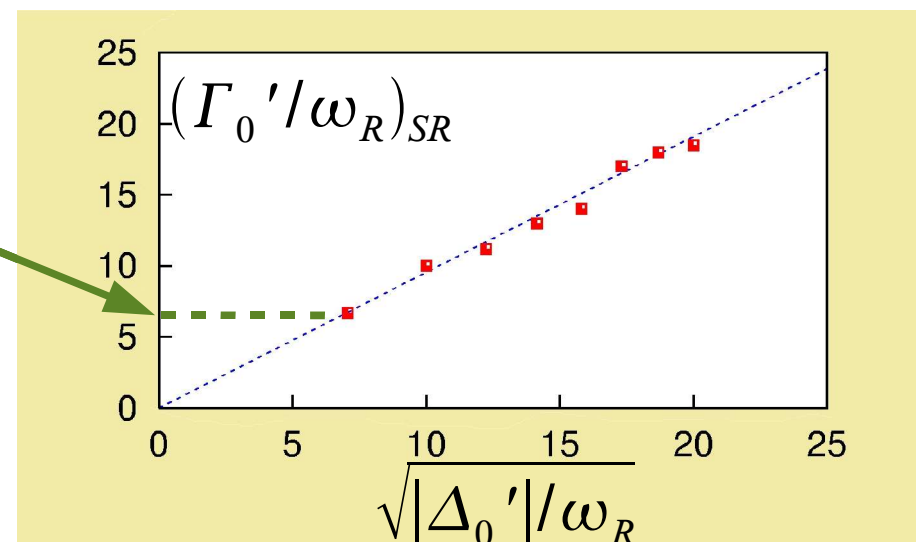


# Résonance stochastique : démonstration



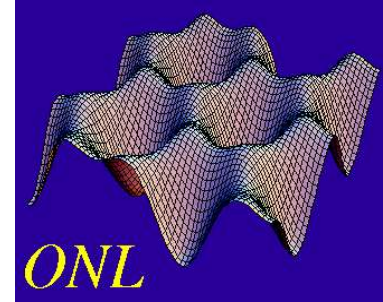
**résonance stochastique !!**

$$(\Gamma_0')_{SR} = \frac{9 \sin(\theta) \sqrt{|\Delta_0'|} \omega_R}{\pi (\cos(2\pi \hat{x})^2 + \cos(2\pi \hat{y})^2)}$$





# Résonance stochastique : conclusion

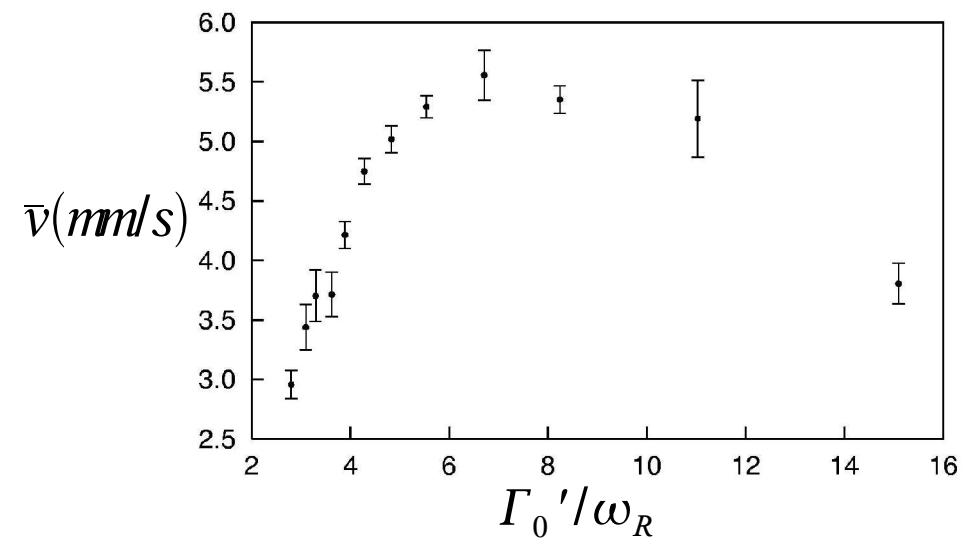


## ● Simulations numériques

- *Amplitude des modulations de matière en mouvement*
- *Spectroscopie Brillouin*

## ● Réalisation expérimentale

M. Schiavoni, L. Sanchez-Palencia,  
F.-R. Carminati, F. Renzoni and G.  
Grynberg, Europhys. Lett **59**, 493  
(2003)

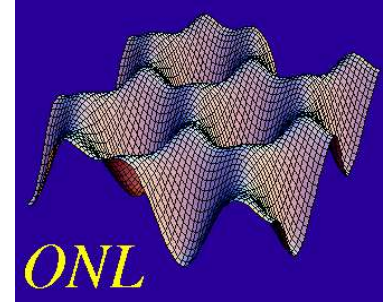


## ● Intérêt de notre système

- *Contrôle des paramètres* → *test de la condition de synchronization*
- *Résonance stochastique dans un système complexe*



# *Conclusion et perspectives*



## ● Conclusion

- *Diffusion spatiale, dynamique atomique*
- *Modes de propagation et résonance stochastique*
- *[Rochet atomique temporel]*

M. Schiavoni, L. Sanchez-Palencia, F. Renzoni and G. Grynberg,  
Phys. Rev. Lett. **90**, 094101 (2003)

## ● Perspectives

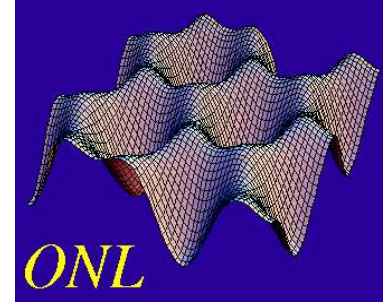
*Suppression cohérente de l'effet tunnel*

Grossmann *et al.*, Phys. Rev. Lett. **67**, 516 (1991)





# Remerciements



P. Horak

A. Kastberg  
J. Jersblad  
H. Ellmann  
C. Stochkel

G. Grynberg  
F.-R. Carminati  
F. Renzoni  
M. Schiavoni  
J. Dalibard

R. Kaiser

