

# Dynamique Quantique d'Atomes Froids dans des Potentiels Lumineux

Quentin Thommen

Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes et Molécules

7 décembre 2004

## Introduction

### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- Etats de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

### Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne
- Section de Poincaré
- Conclusions

### Conclusion Générale



## Dynamique quantique et atomes froids

- Manipulation d'atomes avec des lasers
- Dynamique quantique avec des atomes froids
- Mesure par spectroscopie

## Thèmes retenus

- Dynamique du centre de masse atomique
- Potentiels périodiques  $\rightarrow$  physique du solide
- Solution analytique

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- États de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

#### Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

#### Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne
- Section de Poincaré
- Conclusions

#### Conclusion Générale



# Sommaire Général

- 1 Physique des atomes refroidis et oscillations de Bloch
- 2 Transport et diffusion dans le réseau
- 3 Dynamique d'un condensat de Bose Einstein

## Introduction

### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

### Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

## Conclusion Générale



# I - Oscillations de Bloch et Atomes Froids

- 1 Oscillations de Bloch
  - Atomes froids
  - Potentiels lumineux
  - Dynamique quantique
  - États de Wannier Stark
  - Oscillations de Bloch

## Introduction

### Oscillations de Bloch

#### Sommaire

Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

## Transport cohérent

#### Sommaire

Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

## Dynamique d'un condensat

#### Sommaire

C.B.E.  
Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

## Conclusion Générale



## Propriétés d'un gaz d'atomes refroidis par lasers

- Atomes lents :  
 $\sqrt{v^2} \simeq 1 \text{ mm.s}^{-1}$
- Gaz dilué :  
 $\bar{d} \simeq 10 \mu\text{m}.$

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

##### Sommaire

##### Atomes froids

##### Potentiels lumineux

##### Dynamique quantique

##### Etats de Wannier Stark

##### Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

##### Sommaire

##### Modulation harmonique

##### Résonance

##### Hors Résonance

##### Conclusions

### Dynamique d'un condensat

##### Sommaire

##### C.B.E.

##### Réseau incliné

##### Termes dominants

##### Oscillations de Bloch

##### Dynamique hamiltonienne

##### Section de Poincaré

##### Conclusions

### Conclusion Générale



## Propriétés d'un gaz d'atomes refroidis par lasers

- Atomes lents :  
 $\sqrt{v^2} \simeq 1 \text{ mm.s}^{-1}$
  - Gaz dilué :  $\bar{d} \simeq 10 \mu\text{m}$ .
- 
- Faible énergie cinétique
  - Particules indépendantes
  - $T \simeq \mu\text{K}$

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

#### Sommaire

#### Atomes froids

#### Potentiels lumineux

#### Dynamique quantique

#### États de Wannier Stark

#### Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

#### Sommaire

#### Modulation harmonique

#### Résonance

#### Hors Résonance

#### Conclusions

### Dynamique d'un condensat

#### Sommaire

#### C.B.E.

#### Réseau incliné

#### Termes dominants

#### Oscillations de Bloch

#### Dynamique hamiltonienne

#### Section de Poincaré

#### Conclusions

### Conclusion Générale



## Propriétés d'un gaz d'atomes refroidis par lasers

- Atomes lents :  
 $\sqrt{v^2} \simeq 1 \text{ mm.s}^{-1}$
  - Gaz dilué :  $\bar{d} \simeq 10 \mu\text{m}$ .
- 
- Faible énergie cinétique
  - Particules indépendantes
  - $T \simeq \mu\text{K}$

## Gaz d'atomes refroidis typique :

$10^8$  atomes sur  $1 \text{ mm}^3$

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

#### Sommaire

#### Atomes froids

#### Potentiels lumineux

#### Dynamique quantique

#### États de Wannier Stark

#### Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

#### Sommaire

#### Modulation harmonique

#### Résonance

#### Hors Résonance

#### Conclusions

### Dynamique d'un condensat

#### Sommaire

#### C.B.E.

#### Réseau incliné

#### Termes dominants

#### Oscillations de Bloch

#### Dynamique hamiltonienne

#### Section de Poincaré

#### Conclusions

### Conclusion Générale



# Potentiels Optiques

L'interaction atome-laser déplace les niveaux d'énergie atomiques proportionnellement à l'intensité lumineuse

Dynamique Quantique  
d'Atomes Froids dans  
des Potentiels Lumineux

Quentin Thommen

Introduction

Oscillations de Bloch

Sommaire

Atomes froids

Potentiels lumineux

Dynamique quantique

États de Wannier Stark

Oscillations de Bloch

Transport cohérent

Sommaire

Modulation harmonique

Résonance

Hors Résonance

Conclusions

Dynamique d'un condensat

Sommaire

C.B.E.

Réseau incliné

Termes dominants

Oscillations de Bloch

Dynamique hamiltonienne

Section de Poincaré

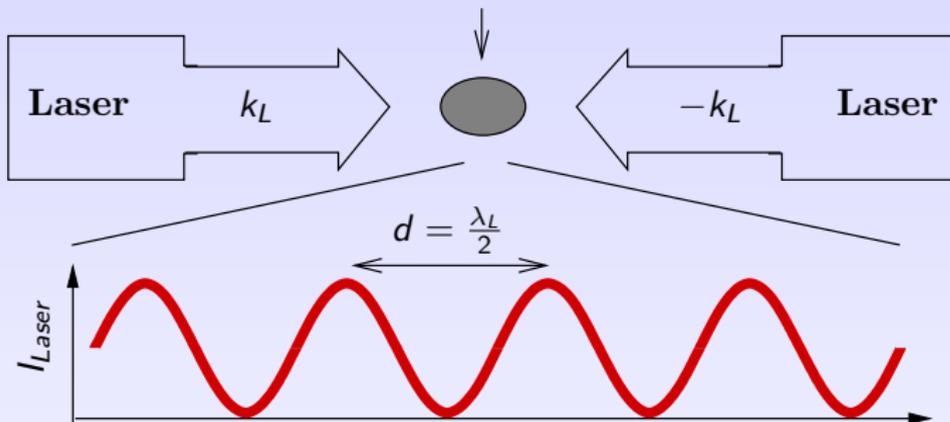
Conclusions

Conclusion Générale



L'interaction atome-laser déplace les niveaux d'énergie atomiques proportionnellement à l'intensité lumineuse

Nuage d'atomes refroidis



## Introduction

### Oscillations de Bloch

Sommaire

Atomes froids

Potentils lumineux

Dynamique quantique

États de Wannier Stark

Oscillations de Bloch

## Transport cohérent

Sommaire

Modulation harmonique

Résonance

Hors Résonance

Conclusions

## Dynamique d'un condensat

Sommaire

C.B.E.

Réseau incliné

Termes dominants

Oscillations de Bloch

Dynamique hamiltonienne

Section de Poincaré

Conclusions

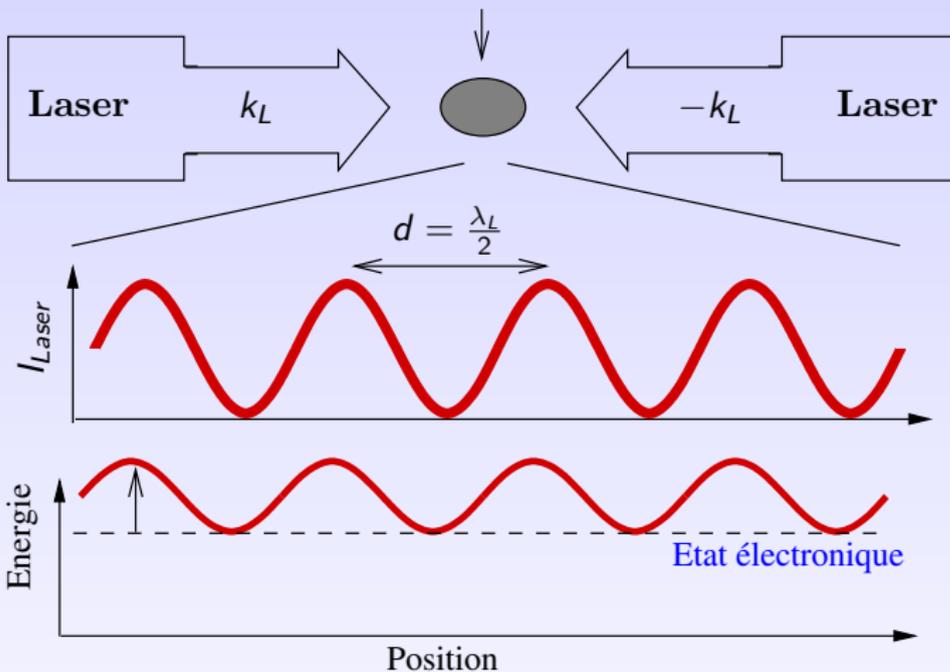
## Conclusion Générale



# Potentils Optiques

L'interaction atome-laser déplace les niveaux d'énergie atomiques proportionnellement à l'intensité lumineuse

Nuage d'atomes refroidis



## Introduction

### Oscillations de Bloch

#### Sommaire

#### Atomes froids

#### Potentils lumineux

#### Dynamique quantique

#### Etats de Wannier Stark

#### Oscillations de Bloch

## Transport cohérent

### Sommaire

### Modulation harmonique

### Résonance

### Hors Résonance

### Conclusions

## Dynamique d'un condensat

### Sommaire

### C.B.E.

### Réseau incliné

### Termes dominants

### Oscillations de Bloch

### Dynamique hamiltonienne

### Section de Poincaré

### Conclusions

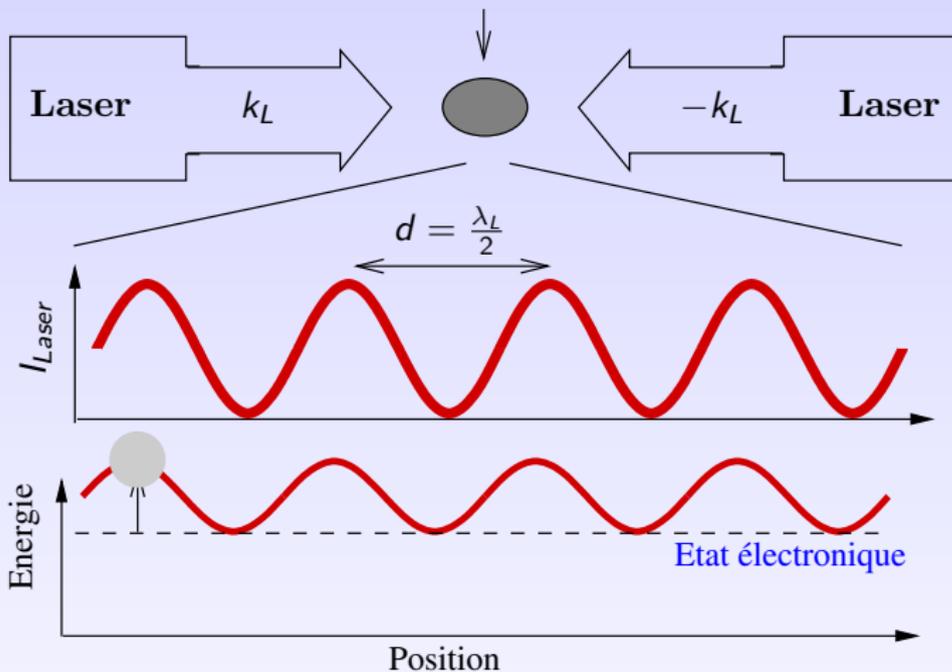
## Conclusion Générale



# Potentils Optiques

L'interaction atome-laser déplace les niveaux d'énergie atomiques proportionnellement à l'intensité lumineuse

Nuage d'atomes refroidis



## Introduction

### Oscillations de Bloch

Sommaire

Atomes froids

Potentils lumineux

Dynamique quantique

Etats de Wannier Stark

Oscillations de Bloch

## Transport cohérent

Sommaire

Modulation harmonique

Résonance

Hors Résonance

Conclusions

## Dynamique d'un condensat

Sommaire

C.B.E.

Réseau incliné

Termes dominants

Oscillations de Bloch

Dynamique hamiltonienne

Section de Poincaré

Conclusions

## Conclusion Générale



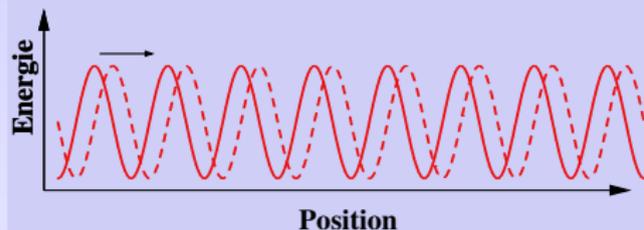
# Réseau incliné

Dynamique Quantique  
d'Atomes Froids dans  
des Potentiels Lumineux

Quentin Thommen

Référentiel du laboratoire

Accélération



$$\cos [2k_L (x + x_0 (t))]$$

Introduction

Oscillations de Bloch

Sommaire

Atomes froids

Potentiels lumineux

Dynamique quantique

États de Wannier Stark

Oscillations de Bloch

Transport cohérent

Sommaire

Modulation harmonique

Résonance

Hors Résonance

Conclusions

Dynamique d'un condensat

Sommaire

C.B.E.

Réseau incliné

Termes dominants

Oscillations de Bloch

Dynamique hamiltonienne

Section de Poincaré

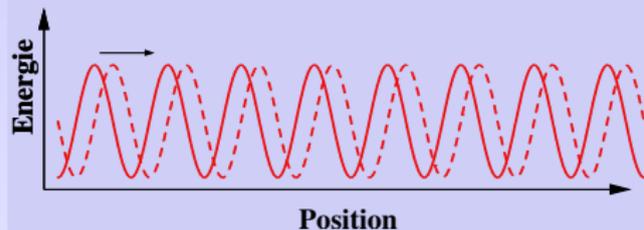
Conclusions

Conclusion Générale



## Référentiel du laboratoire

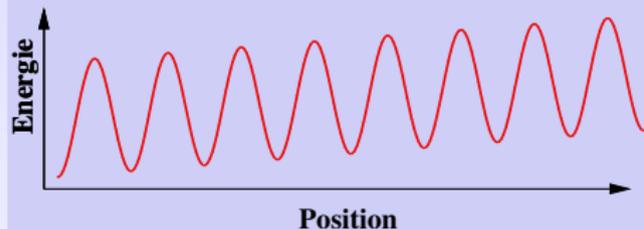
## Accélération



$$\cos [2k_L (x + x_0(t))]$$

## Référentiel de l'onde stationnaire

## Force homogène



$$\cos [2k_L x] + \underbrace{m\ddot{x}_0}_{F(t)} x$$

### Introduction

### Oscillations de Bloch

### Sommaire

### Atomes froids

### Potentiels lumineux

### Dynamique quantique

### États de Wannier Stark

### Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

### Sommaire

### Modulation harmonique

### Résonance

### Hors Résonance

### Conclusions

### Dynamique d'un condensat

### Sommaire

### C.B.E.

### Réseau incliné

### Termes dominants

### Oscillations de Bloch

### Dynamique hamiltonienne

### Section de Poincaré

### Conclusions

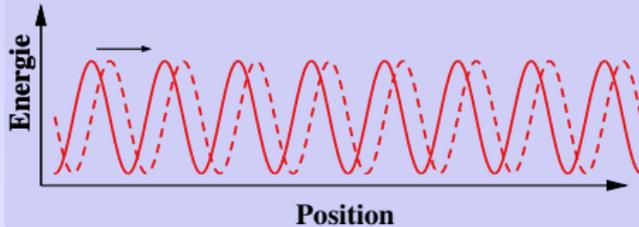
### Conclusion Générale



# Réseau incliné

Référentiel du laboratoire

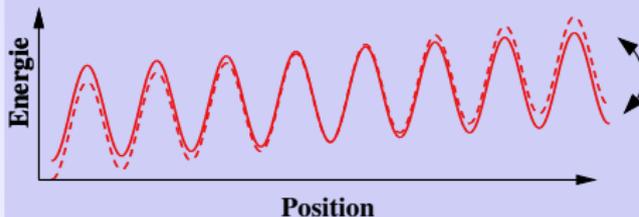
Accélération



$$\cos [2k_L (x + x_0 (t))]$$

Référentiel de l'onde stationnaire

Force homogène



$$\cos [2k_L x] + \underbrace{m\ddot{x}_0}_{F(t)} x$$

Introduction

Oscillations de Bloch

Sommaire

Atomes froids

Potentiels lumineux

Dynamique quantique

États de Wannier Stark

Oscillations de Bloch

Transport cohérent

Sommaire

Modulation harmonique

Résonance

Hors Résonance

Conclusions

Dynamique d'un condensat

Sommaire

C.B.E.

Réseau incliné

Termes dominants

Oscillations de Bloch

Dynamique hamiltonienne

Section de Poincaré

Conclusions

Conclusion Générale



## Atome délocalisé sur plusieurs puits de potentiel

$$\Delta p \leq \hbar k_L \quad \rightarrow \quad \Delta x \simeq \text{pas du réseau}$$

## L'atome est décrit par une fonction d'onde $\Psi$

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left[ \frac{p^2}{2m} + V(x) \right] \Psi(x)$$

$$V(x) = V_0 \cos(2k_L x) + F(t)x$$

Unités réduites  $\rightarrow \quad \hbar = 1$

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

##### Sommaire

##### Atomes froids

##### Potentiels lumineux

##### Dynamique quantique

##### États de Wannier Stark

##### Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

##### Sommaire

##### Modulation harmonique

##### Résonance

##### Hors Résonance

##### Conclusions

### Dynamique d'un condensat

##### Sommaire

##### C.B.E.

##### Réseau incliné

##### Termes dominants

##### Oscillations de Bloch

##### Dynamique hamiltonienne

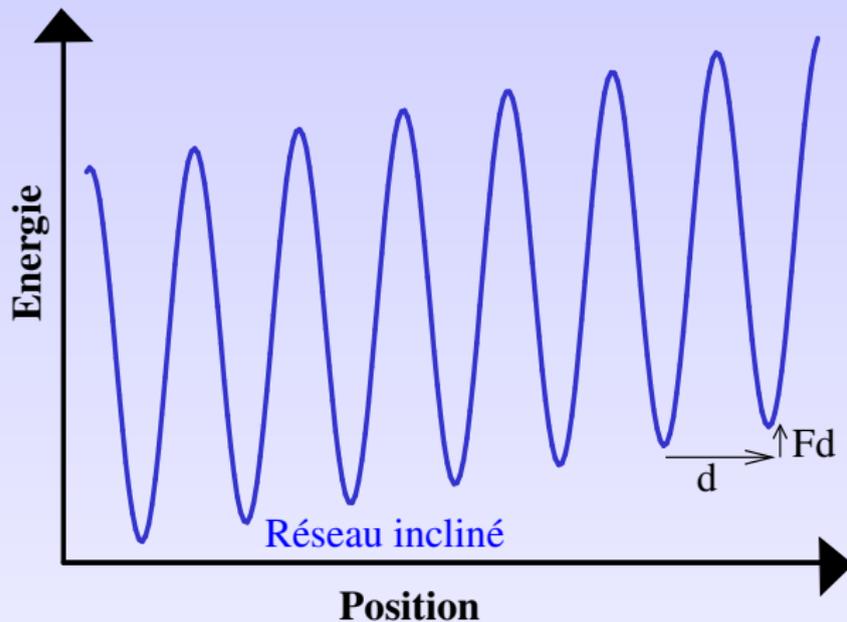
##### Section de Poincaré

##### Conclusions

### Conclusion Générale



# Les états propres du réseau incliné $F(t) = F$



## Introduction

### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- États de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

## Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

## Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne
- Section de Poincaré
- Conclusions

## Conclusion Générale



Introduction

Oscillations de Bloch

Sommaire

Atomes froids

Potentiels lumineux

Dynamique quantique

États de Wannier Stark

Oscillations de Bloch

Transport cohérent

Sommaire

Modulation harmonique

Résonance

Hors Résonance

Conclusions

Dynamique d'un condensat

Sommaire

C.B.E.

Réseau incliné

Termes dominants

Oscillations de Bloch

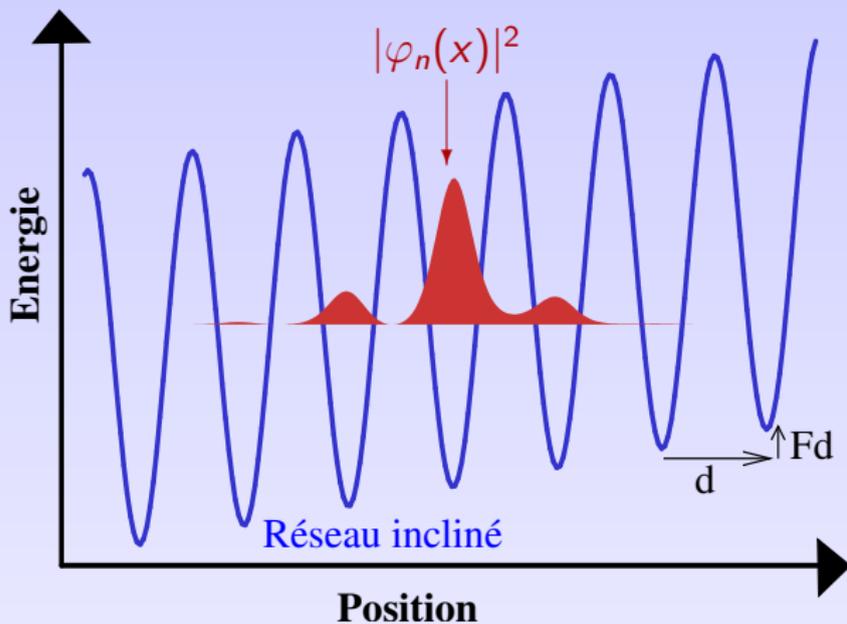
Dynamique hamiltonienne

Section de Poincaré

Conclusions

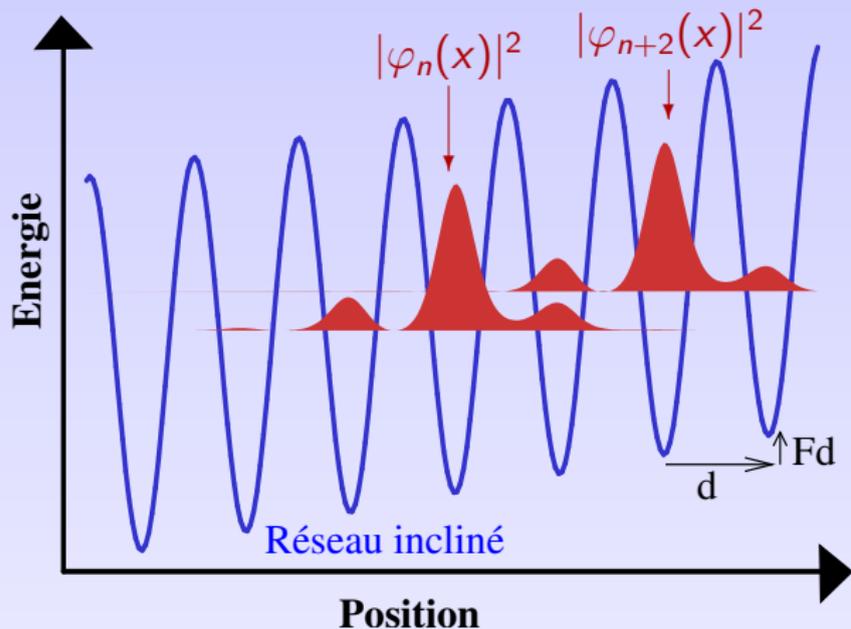
Conclusion Générale

# Les états propres du réseau incliné $F(t) = F$



$\varphi_n(x)$  : état propre localisé dans le puits numéro  $n$

# Les états propres du réseau incliné $F(t) = F$



$\varphi_n(x)$  : état propre localisé dans le puits numéro  $n$

## Introduction

### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- États de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

## Transport cohérent

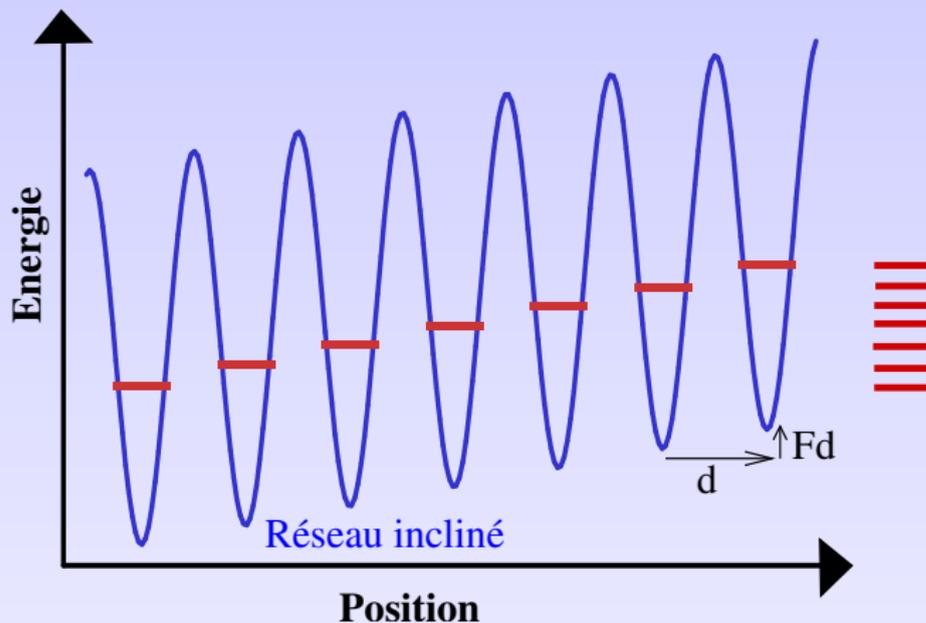
- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

## Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne
- Section de Poincaré
- Conclusions

## Conclusion Générale

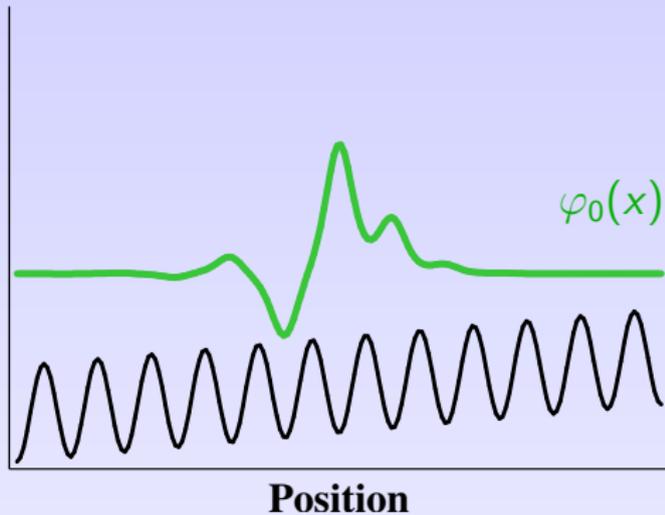
# Les états propres du réseau incliné $F(t) = F$



$\varphi_n(x)$  : état propre localisé dans le puits numéro  $n$

$$E_n = n\omega_B \quad \omega_B = Fd$$

# Oscillations de Bloch



## Introduction

### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

## Transport cohérent

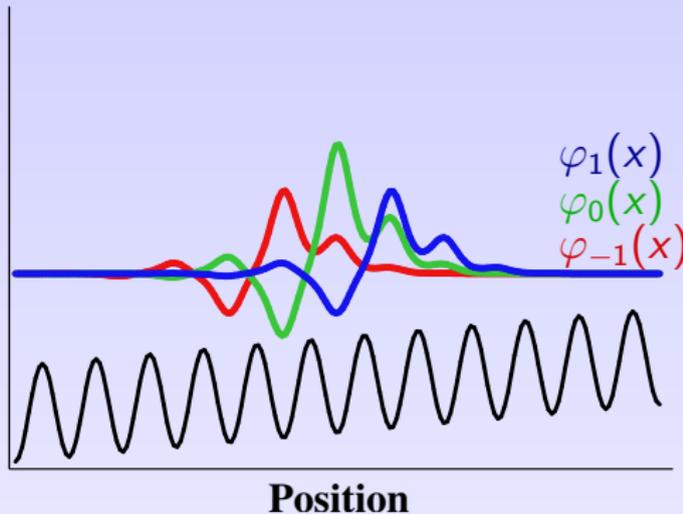
Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

## Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

## Conclusion Générale

# Oscillations de Bloch



## Introduction

### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

## Transport cohérent

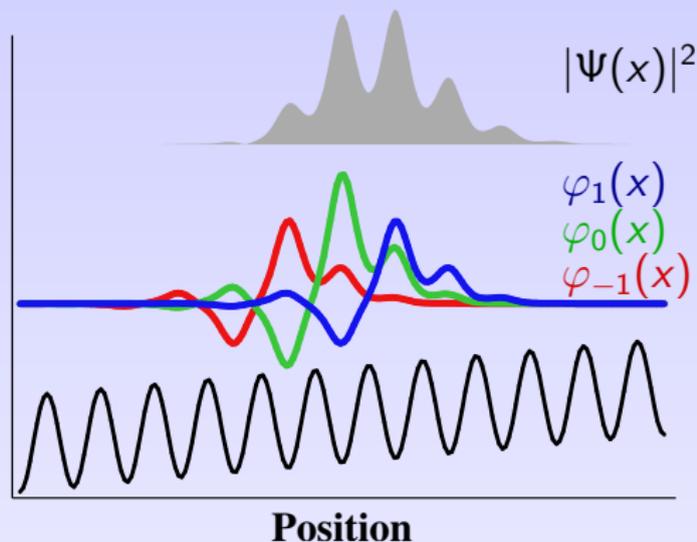
Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

## Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

## Conclusion Générale

# Oscillations de Bloch



$$\Psi(x, t) = c_{-1}\varphi_{-1}(x)e^{-i\omega_B t} + c_0\varphi_0(x) + c_1\varphi_1(x)e^{i\omega_B t}$$

## Introduction

### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

## Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

## Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

## Conclusion Générale



# Oscillations de Bloch - Ordres de grandeur

Dynamique Quantique  
d'Atomes Froids dans  
des Potentiels Lumineux

Quentin Thommen

## Introduction

### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

## Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

## Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

## Conclusion Générale

|                     | cristaux         | atomes froids                   |
|---------------------|------------------|---------------------------------|
| Pas de réseau       | 0.1 nm           | 0.5 $\mu\text{m}$               |
| Champ électrique    | 100 V/cm         | -                               |
| Accélération        | -                | 10 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ |
| Fréquence de Bloch  | 25 kHz           | 1 kHz                           |
| Période de Bloch    | 40 $\mu\text{s}$ | 1 ms                            |
| Temps de relaxation | 10 fs            | 10 ms                           |



## II - Modulation du réseau incliné: transport et diffusion

### 2 Transport cohérent

- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

#### Introduction

#### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- États de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

#### Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

#### Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne
- Section de Poincaré
- Conclusions

#### Conclusion Générale



# Modulation harmonique du réseau incliné

## Force modulée

$$F(t) = F + F_1 \sin(\omega t)$$

Dynamique Quantique  
d'Atomes Froids dans  
des Potentiels Lumineux

Quentin Thommen

Introduction

Oscillations de Bloch

Sommaire

Atomes froids

Potentiels lumineux

Dynamique quantique

États de Wannier Stark

Oscillations de Bloch

Transport cohérent

Sommaire

Modulation harmonique

Résonance

Hors Résonance

Conclusions

Dynamique d'un condensat

Sommaire

C.B.E.

Réseau incliné

Termes dominants

Oscillations de Bloch

Dynamique hamiltonienne

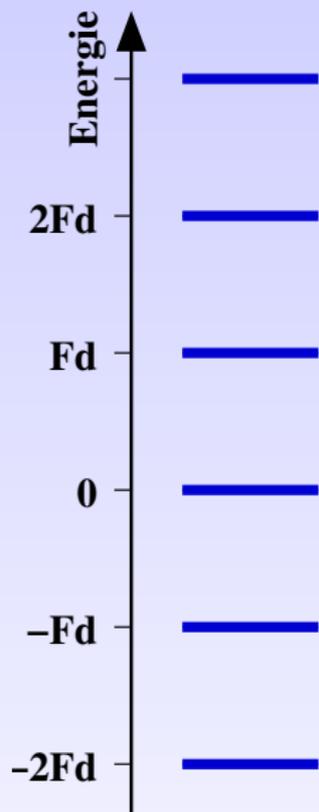
Section de Poincaré

Conclusions

Conclusion Générale



# Modulation harmonique du réseau incliné



Force modulée

$$F(t) = F + F_1 \sin(\omega t)$$

Décomposition

$$\Psi(x, t) = \sum_n c_n(t) \varphi_n(x) e^{-inFdt}$$

## Introduction

### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- États de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

## Transport cohérent

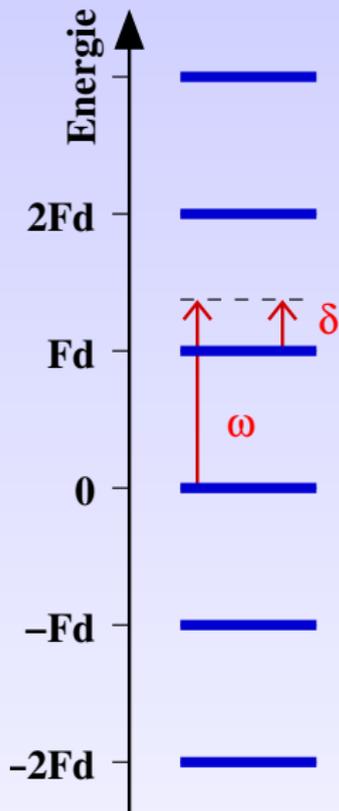
- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

## Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne
- Section de Poincaré
- Conclusions

## Conclusion Générale

# Modulation harmonique du réseau incliné



Force modulée

$$F(t) = F + F_1 \sin(\omega t)$$

Décomposition

$$\Psi(x, t) = \sum_n c_n(t) \varphi_n(x) e^{-inFdt}$$

## Introduction

### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- États de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

## Transport cohérent

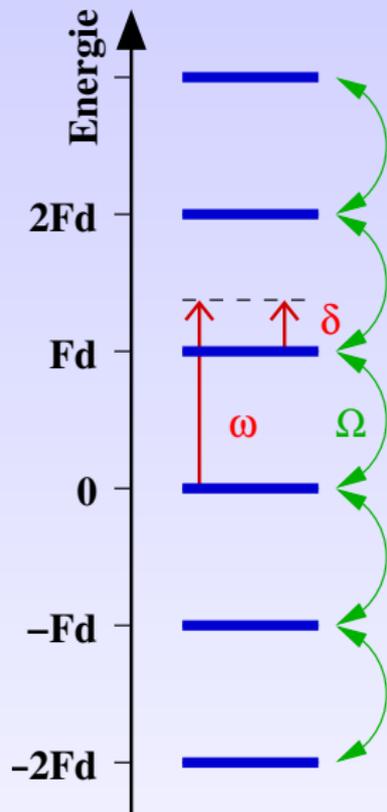
- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

## Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne
- Section de Poincaré
- Conclusions

## Conclusion Générale

# Modulation harmonique du réseau incliné



## Force modulée

$$F(t) = F + F_1 \sin(\omega t)$$

## Décomposition

$$\Psi(x, t) = \sum_n c_n(t) \varphi_n(x) e^{-inFdt}$$

## Évolution

$$\dot{c}_n = \Omega \{ c_{n-1} e^{-i\delta t} - c_{n+1} e^{i\delta t} \}$$

## Couplage

$$\Omega = F_1 \langle \varphi_n | x | \varphi_{n+1} \rangle$$

## Introduction

### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- États de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

## Transport cohérent

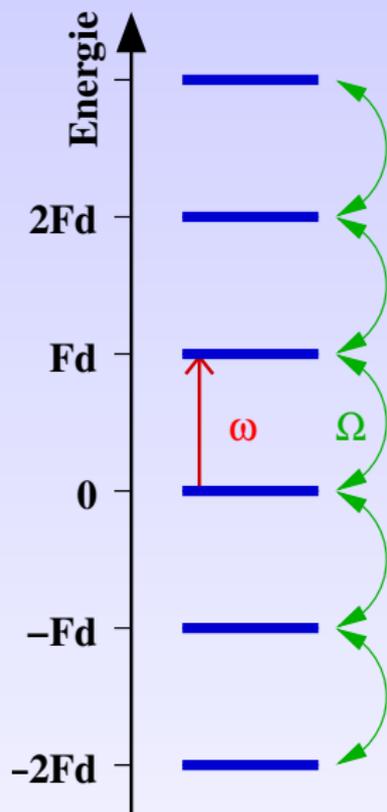
- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

## Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne
- Section de Poincaré
- Conclusions

## Conclusion Générale

# Modulation résonante



## Évolution

$$\dot{c}_n = \Omega \{c_{n-1} - c_{n+1}\}$$

### Introduction

Oscillations de Bloch  
Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance

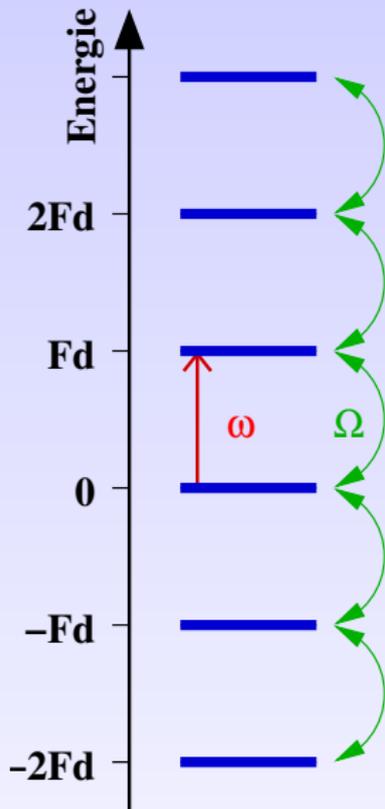
Hors Résonance  
Conclusions

### Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

### Conclusion Générale



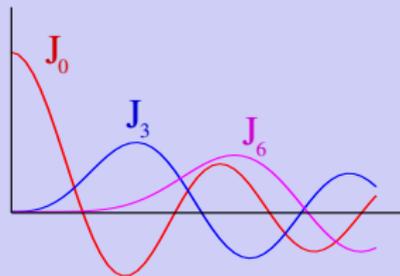


## Évolution

$$\dot{c}_n = \Omega \{c_{n-1} - c_{n+1}\}$$

## Un état initial peuplé

$$c_n(t) = J_n(2\Omega t)$$



## Introduction

- Oscillations de Bloch
- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- États de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

## Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance

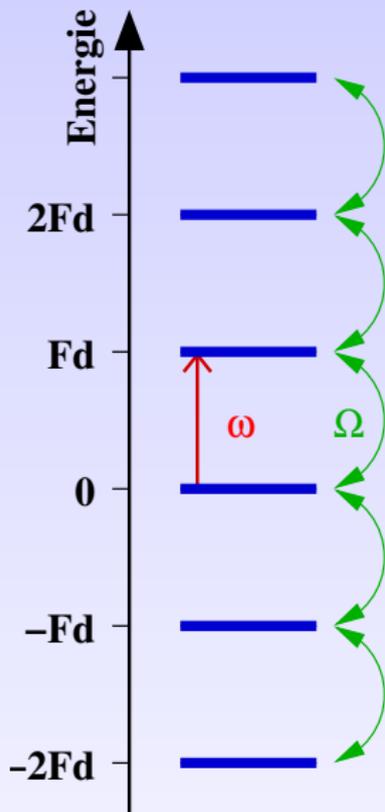
- Hors Résonance
- Conclusions

## Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne
- Section de Poincaré
- Conclusions

## Conclusion Générale

# Modulation résonante

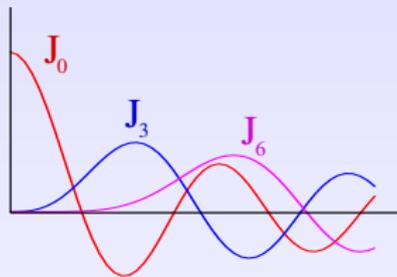


## Évolution

$$\dot{c}_n = \Omega \{c_{n-1} - c_{n+1}\}$$

## N états initiaux peuplés

$$c_n(t) = \sum_l c_l(0) J_{n-l}(2\Omega t)$$



## Introduction

### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- États de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

## Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance

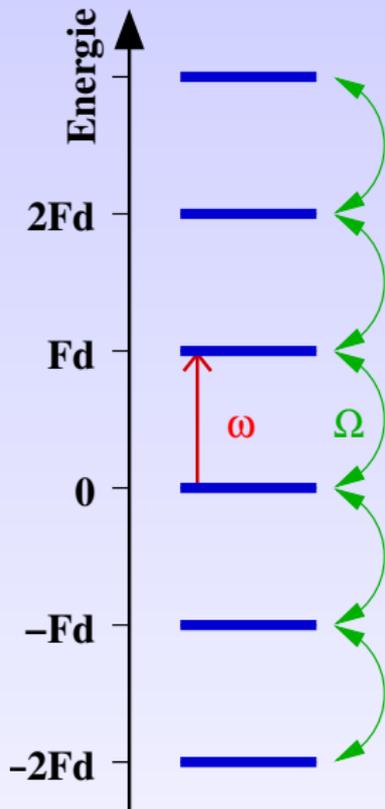
- Hors Résonance
- Conclusions

## Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne
- Section de Poincaré
- Conclusions

## Conclusion Générale

# Modulation résonante



## Évolution

$$\dot{c}_n = \Omega \{c_{n-1} - c_{n+1}\}$$

## N états initiaux peuplés

$$c_n(t) = \sum_l c_l(0) J_{n-l}(2\Omega t)$$

## Figure d'interférence

Remontée du potentiel  
Descente du potentiel  
Diffusion

## Introduction

Oscillations de Bloch  
Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
Etats de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

## Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance

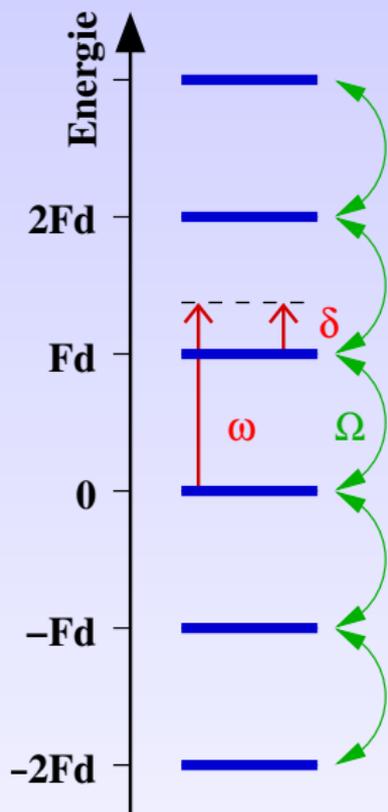
Hors Résonance  
Conclusions

## Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

## Conclusion Générale

# Modulation non résonante



## Évolution

$$\dot{c}_n = \Omega \{ c_{n-1} e^{-i\delta t} - c_{n+1} e^{i\delta t} \}$$

### Introduction

Oscillations de Bloch  
Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance

### Hors Résonance

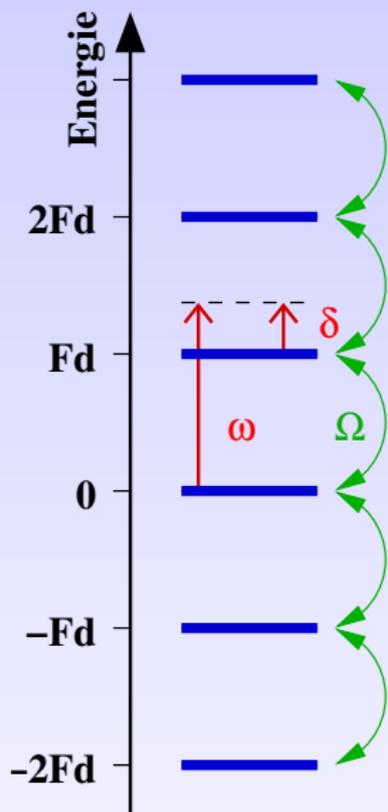
Conclusions

### Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

### Conclusion Générale

# Modulation non résonante



## Évolution

$$\dot{c}_n = \Omega \{ c_{n-1} e^{-i\delta t} - c_{n+1} e^{i\delta t} \}$$

## Un état initial peuplé

$$c_n(t) = J_n \left( \frac{4\Omega}{\delta} \sin\left(\frac{\delta t}{2}\right) \right) e^{-in\delta t}$$

### Introduction

Oscillations de Bloch  
Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

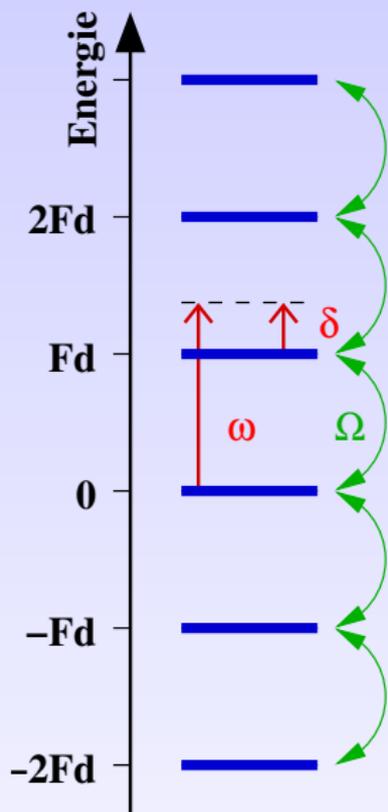
Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

### Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

### Conclusion Générale

# Modulation non résonante



## Évolution

$$\dot{c}_n = \Omega \{ c_{n-1} e^{-i\delta t} - c_{n+1} e^{i\delta t} \}$$

## Un état initial peuplé

$$c_n(t) = J_n \left( \frac{4\Omega}{\delta} \sin\left(\frac{\delta t}{2}\right) \right) e^{-in\delta t}$$

## N états initiaux peuplés

## Dynamique périodique

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- États de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance

### Hors Résonance

#### Conclusions

### Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne
- Section de Poincaré
- Conclusions

### Conclusion Générale

Introduction

Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
Etats de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance

Conclusions

Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

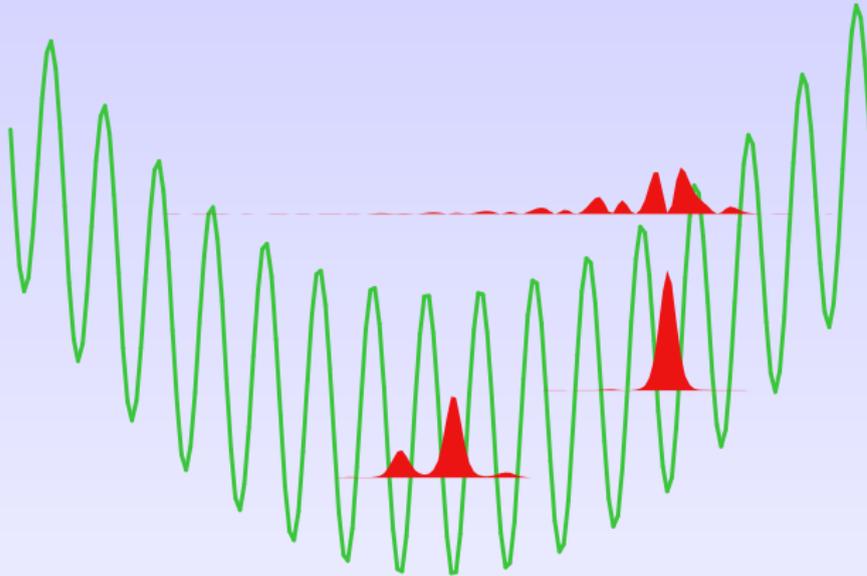
Conclusion Générale

## Conclusions

- La modulation couple les états
- Phénomènes de transport et de diffusion
- Importance de la phase initiale



# Réseau Parabolique



Dynamique Quantique  
d'Atomes Froids dans  
des Potentiels Lumineux

Quentin Thommen

## Introduction

### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

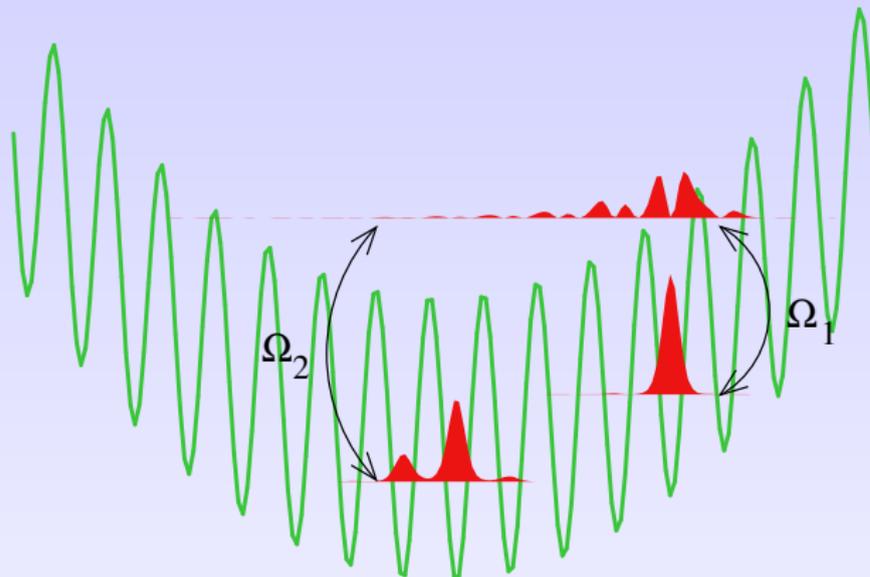
### Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

### Conclusion Générale



# Réseau Parabolique



## Introduction

### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance

### Conclusions

## Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

## Conclusion Générale



# III - Dynamique d'un condensat de Bose Einstein

## Introduction

### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- Etats de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

### Dynamique d'un condensat

#### Sommaire

- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne
- Section de Poincaré
- Conclusions

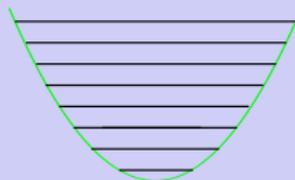
### Conclusion Générale



## Condensation de Bose Einstein

$$\rho \lambda_{dB}^3(T) \leq 1$$

Accumulation macroscopique  
de particules dans l'état  
fondamental du puits



### Introduction

#### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

#### Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

#### Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.

Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

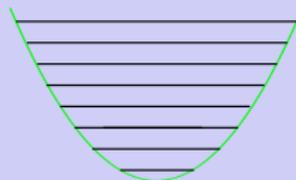
#### Conclusion Générale



## Condensation de Bose Einstein

$$\rho \lambda_{dB}^3(T) \leq 1$$

Accumulation macroscopique  
de particules dans l'état  
fondamental du puits



## De l'intérêt des condensats

- Objet mésoscopique (env  $10^6$  atomes)
- Cohérence de phase  $\rightarrow$  objet quantique
- Intérêt expérimental et fondamental
- Nécessité de prendre en compte les interactions entre atomes

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

#### Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

#### Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.

Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

### Conclusion Générale



## Fonction d'onde d'un condensat de Bose Einstein

Le condensat est décrit par une fonction d'onde  $\Psi$

$|\Psi(x)|^2$  est la densité atomique

$$i\frac{\partial\Psi}{\partial t} = \left[ \frac{p^2}{2m} + V(x) \right] \Psi(x) + g|\Psi|^2\Psi$$

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

#### Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

#### Dynamique d'un condensat

##### Sommaire

##### C.B.E.

Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

### Conclusion Générale



# Dynamique d'un condensat

Dynamique Quantique  
d'Atomes Froids dans  
des Potentiels Lumineux

Quentin Thommen

## Fonction d'onde d'un condensat de Bose Einstein

Le condensat est décrit par une fonction d'onde  $\Psi$

$|\Psi(x)|^2$  est la densité atomique

$$i\frac{\partial\Psi}{\partial t} = \left[ \frac{p^2}{2m} + V(x) \right] \Psi(x) + g|\Psi|^2\Psi$$

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- États de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

#### Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

#### Dynamique d'un condensat

##### Sommaire

##### C.B.E.

- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne
- Section de Poincaré
- Conclusions

### Conclusion Générale



# Dynamique d'un condensat

## Fonction d'onde d'un condensat de Bose Einstein

Le condensat est décrit par une fonction d'onde  $\Psi$

$|\Psi(x)|^2$  est la densité atomique

$$i\frac{\partial\Psi}{\partial t} = \left[ \frac{p^2}{2m} + V(x) \right] \Psi(x) + g|\Psi|^2\Psi$$

$$V(x) = V_0 \cos(2k_L x) + Fx$$

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- États de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

#### Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

#### Dynamique d'un condensat

##### Sommaire

##### C.B.E.

- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne
- Section de Poincaré
- Conclusions

### Conclusion Générale



# Dynamique d'un condensat

## Fonction d'onde d'un condensat de Bose Einstein

Le condensat est décrit par une fonction d'onde  $\Psi$

$|\Psi(x)|^2$  est la densité atomique

$$i\frac{\partial\Psi}{\partial t} = \left[ \frac{p^2}{2m} + V(x) \right] \Psi(x) + g|\Psi|^2\Psi$$

$$V(x) = V_0 \cos(2k_L x) + Fx$$

## Décomposition de la fonction d'onde en états localisés

$$\Psi(x, t) = \sum_n c_n(t) \varphi_n(x)$$

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- États de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

### Dynamique d'un condensat

#### Sommaire

#### C.B.E.

- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne
- Section de Poincaré
- Conclusions

### Conclusion Générale



# Dynamique d'un condensat dans un réseau incliné

## Évolution des amplitudes $c_n$

$$i \frac{dc_n}{dt} = E_n c_n + g \sum_{o,p,q} \chi_{n,p}^{o,q} c_o c_p^* c_q$$

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

#### Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

#### Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.

#### Réseau incliné

Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

#### Conclusion Générale



# Dynamique d'un condensat dans un réseau incliné

## Évolution des amplitudes $c_n$

$$i \frac{dc_n}{dt} = E_n c_n + g \sum_{o,p,q} \chi_{n,p}^{o,q} c_o c_p^* c_q$$

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

### Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.

### Réseau incliné

Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

### Conclusion Générale



# Dynamique d'un condensat dans un réseau incliné

## Évolution des amplitudes $c_n$

$$i \frac{dc_n}{dt} = E_n c_n + g \sum_{o,p,q} X_{n,p}^{o,q} c_o c_p^* c_q$$

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

### Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.

### Réseau incliné

Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

### Conclusion Générale

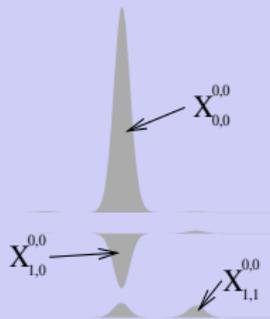
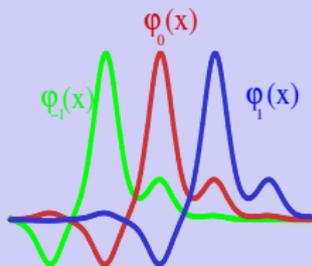


# Dynamique d'un condensat dans un réseau incliné

## Évolution des amplitudes $c_n$

$$i \frac{dc_n}{dt} = E_n c_n + g \sum_{o,p,q} X_{n,p}^{o,q} c_o c_p^* c_q$$

$X_{n,p}^{o,q} = \int \varphi_n \varphi_o \varphi_p \varphi_q$ : termes d'échange



$$X_{0,0}^{0,0} \gg X_{0,1}^{0,0}$$

$$X_{0,1}^{0,0} \gg X_{1,1}^{0,0}$$

## Introduction

### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- Etats de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

### Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.

### Réseau incliné

- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne
- Section de Poincaré
- Conclusions

### Conclusion Générale

# Effet du terme dominant $X_{n,n}^{n,n}$

## Symétrie des fonctions d'onde

$$X_{n,n}^{n,n} = X_{0,0}^{0,0}$$

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

### Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné

### Termes dominants

Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

### Conclusion Générale



## Symétrie des fonctions d'onde

$$X_{n,n}^{n,n} = X_{0,0}^{0,0}$$

## Déplacement des niveaux

$$i \frac{dc_n}{dt} = \left( E_n + g X_{0,0}^{0,0} |c_n|^2 \right) c_n$$

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

Sommaire

Atomes froids

Potentiels lumineux

Dynamique quantique

Etats de Wannier Stark

Oscillations de Bloch

#### Transport cohérent

Sommaire

Modulation harmonique

Résonance

Hors Résonance

Conclusions

#### Dynamique d'un condensat

Sommaire

C.B.E.

Réseau incliné

#### Termes dominants

Oscillations de Bloch

Dynamique hamiltonienne

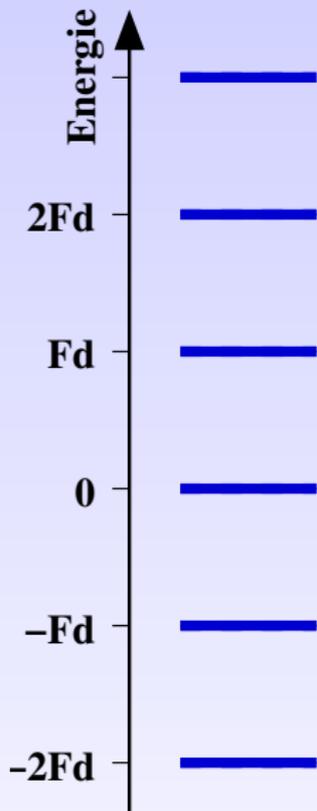
Section de Poincaré

Conclusions

#### Conclusion Générale



# Effet du terme dominant $X_{n,n}^{n,n}$



## Symétrie des fonctions d'onde

$$X_{n,n}^{n,n} = X_{0,0}^{0,0}$$

## Déplacement des niveaux

$$i \frac{dc_n}{dt} = \left( E_n + g X_{0,0}^{0,0} |c_n|^2 \right) c_n$$

- Population constante
- Énergie déplacée avec la population de l'état

### Introduction

### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- Etats de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

### Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné

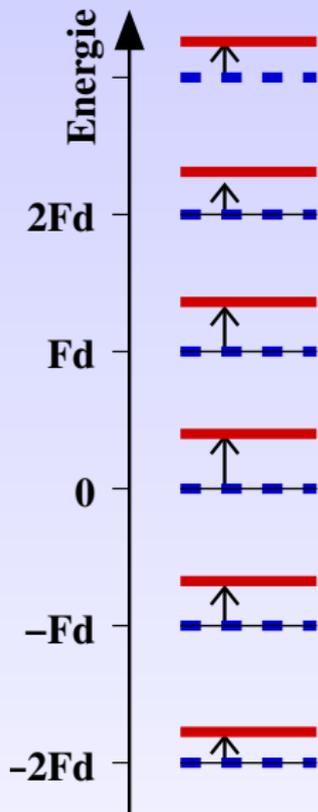
### Termes dominants

- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne
- Section de Poincaré
- Conclusions

### Conclusion Générale



# Effet du terme dominant $X_{n,n}^{n,n}$



## Symétrie des fonctions d'onde

$$X_{n,n}^{n,n} = X_{0,0}^{0,0}$$

## Déplacement des niveaux

$$i \frac{dc_n}{dt} = \left( E_n + g X_{0,0}^{0,0} |c_n|^2 \right) c_n$$

- Population constante
- Énergie déplacée avec la population de l'état

## Introduction

### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
Etats de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

## Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

## Dynamique d'un condensat

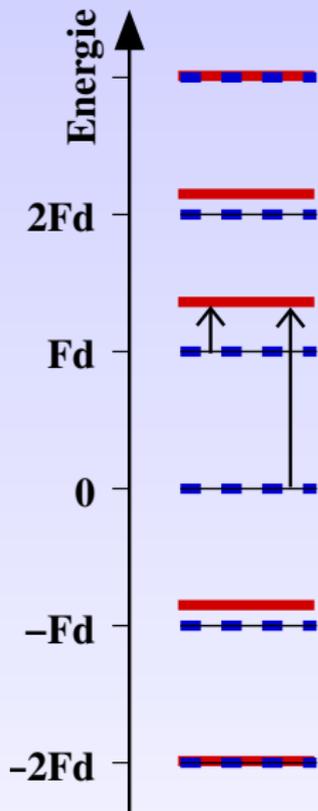
Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné

## Termes dominants

Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

## Conclusion Générale

# Effet du terme dominant $X_{n,n}^{n,n}$



## Symétrie des fonctions d'onde

$$X_{n,n}^{n,n} = X_{0,0}^{0,0}$$

## Déplacement des niveaux

$$i \frac{dc_n}{dt} = \left( E_n + g X_{0,0}^{0,0} |c_n|^2 \right) c_n$$

- Population constante
- Énergie déplacée avec la population de l'état

## Dégénérescences accidentelles

$$|c_{n+1}| - |c_n| = \frac{F}{g X_{0,0}^{0,0}}$$

### Introduction

### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- Etats de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

### Dynamique d'un condensat

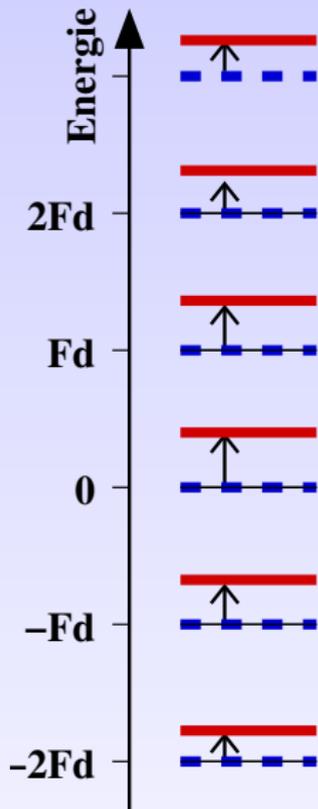
- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné

### Termes dominants

- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne
- Section de Poincaré
- Conclusions

### Conclusion Générale

# Oscillations de Bloch



Distribution initiale douce

$$c_n(t) \simeq c_n(0)e^{i\Omega_n t}$$

$$\Omega_n = E_n + g\chi_{0,0}^{0,0} |c_n(0)|^2$$

## Introduction

### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
Etats de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

## Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

## Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné  
Termes dominants

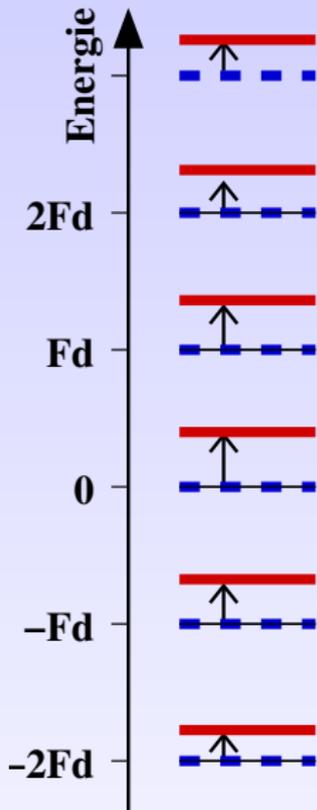
## Oscillations de Bloch

Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

## Conclusion Générale



# Oscillations de Bloch



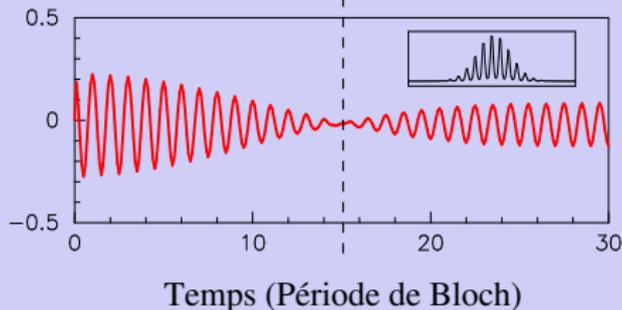
## Distribution initiale douce

$$c_n(t) \simeq c_n(0)e^{i\Omega_n t}$$

$$\Omega_n = E_n + gX_{0,0}^{0,0} |c_n(0)|^2$$

## Position moyenne

$$\tau_c \propto \frac{N}{gX_{0,0}^{0,0}}$$



## Introduction

### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- Etats de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

## Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

## Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants

## Oscillations de Bloch

- Dynamique hamiltonienne
- Section de Poincaré
- Conclusions

## Conclusion Générale

# Dynamique hamiltonienne

## Variables intensités-phases

$$c_n(t) = \sqrt{I_n(t)} e^{i\theta_n(t)}$$

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- Etats de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

#### Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

#### Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch

#### Dynamique hamiltonienne

- Section de Poincaré
- Conclusions

### Conclusion Générale



## Variables intensités-phases

$$c_n(t) = \sqrt{I_n(t)} e^{i\theta_n(t)}$$

## Évolution

$$\begin{cases} \frac{dI_n}{dt} = \frac{dH}{d\theta_n} \\ \frac{d\theta_n}{dt} = -\frac{dH}{dI_n} \end{cases}$$

## Introduction

### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- États de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

### Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch

### Dynamique hamiltonienne

- Section de Poincaré
- Conclusions

## Conclusion Générale



## Variables intensités-phases

$$c_n(t) = \sqrt{I_n(t)} e^{i\theta_n(t)}$$

## Évolution

$$\begin{cases} \frac{dI_n}{dt} = \frac{dH}{d\theta_n} \\ \frac{d\theta_n}{dt} = -\frac{dH}{dI_n} \end{cases}$$

## Hamiltonien

$$H = H_0(I) + V(I, \theta) \quad \text{avec} \quad \frac{H_0}{V} \simeq \frac{X_{0,0}^{0,0}}{X_{0,1}^{0,0}} \gg 1$$

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- États de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

#### Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

#### Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne

- Section de Poincaré
- Conclusions

#### Conclusion Générale



## Variables intensités-phases

$$c_n(t) = \sqrt{I_n(t)} e^{i\theta_n(t)}$$

## Évolution

$$\begin{cases} \frac{dI_n}{dt} = \frac{dH}{d\theta_n} \\ \frac{d\theta_n}{dt} = -\frac{dH}{dI_n} \end{cases}$$

## Hamiltonien

$$H = H_0(I) + V(I, \theta) \quad \text{avec} \quad \frac{H_0}{V} \simeq \frac{X_{0,0}^{0,0}}{X_{0,1}^{0,0}} \gg 1$$

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- États de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

#### Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

#### Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne

- Section de Poincaré
- Conclusions

#### Conclusion Générale



## Variables intensités-phases

$$c_n(t) = \sqrt{I_n(t)} e^{i\theta_n(t)}$$

## Évolution

$$\begin{cases} \frac{dI_n}{dt} = \frac{dH}{d\theta_n} \\ \frac{d\theta_n}{dt} = -\frac{dH}{dI_n} \end{cases}$$

## Hamiltonien

$$H = H_0(I) + V(I, \theta) \quad \text{avec} \quad \frac{H_0}{V} \simeq \frac{X_{0,0}^{0,0}}{X_{0,1}^{0,0}} \gg 1$$

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- États de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

#### Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

#### Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne

- Section de Poincaré
- Conclusions

#### Conclusion Générale



# Dynamique hamiltonienne

## Variables intensités-phases

$$c_n(t) = \sqrt{I_n(t)} e^{i\theta_n(t)}$$

## Évolution

$$\begin{cases} \frac{dI_n}{dt} = \frac{dH}{d\theta_n} \\ \frac{d\theta_n}{dt} = -\frac{dH}{dI_n} \end{cases}$$

## Hamiltonien

$$H = H_0(I) + V(I, \theta) \quad \text{avec} \quad \frac{H_0}{V} \simeq \frac{X_{0,0}^{0,0}}{X_{0,1}^{0,0}} \gg 1$$

## Termes dominants $H = H_0$

$$\begin{cases} I_n(t) = I_n(0) \\ \theta_n(t) = -\Omega_n t + \theta_n(0) \end{cases}$$

$$\Omega_n = E_n + gX_{0,0}^{0,0} I_n(0)$$

## Introduction

### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- Etats de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

## Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

## Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne

- Section de Poincaré
- Conclusions

## Conclusion Générale



## Variables intensités-phases

$$c_n(t) = \sqrt{I_n(t)} e^{i\theta_n(t)}$$

## Évolution

$$\begin{cases} \frac{dI_n}{dt} = \frac{dH}{d\theta_n} \\ \frac{d\theta_n}{dt} = -\frac{dH}{dI_n} \end{cases}$$

## Hamiltonien

$$H = H_0(I) + V(I, \theta) \quad \text{avec} \quad \frac{H_0}{V} \simeq \frac{X_{0,0}^{0,0}}{X_{0,1}^{0,0}} \gg 1$$

## Théorème Kolmogorov Arnold Moser

Si les fréquences d'évolution  $\Omega_n$  de  $H_0$  sont linéairement indépendantes alors les trajectoires du système perturbé  $H$  sont voisines de celles de  $H_0$

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- Etats de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

### Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch

### Dynamique hamiltonienne

- Section de Poincaré
- Conclusions

### Conclusion Générale



# Termes de perturbation

## Espace de phase

Les variables populations et phases définissent un espace de phase classique

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

- Sommaire
- Atomes froids
- Potentiels lumineux
- Dynamique quantique
- États de Wannier Stark
- Oscillations de Bloch

#### Transport cohérent

- Sommaire
- Modulation harmonique
- Résonance
- Hors Résonance
- Conclusions

#### Dynamique d'un condensat

- Sommaire
- C.B.E.
- Réseau incliné
- Termes dominants
- Oscillations de Bloch
- Dynamique hamiltonienne

#### Section de Poincaré

#### Conclusions

### Conclusion Générale



# Termes de perturbation

## Espace de phase

Les variables populations et phases définissent un espace de phase classique  
On peut définir une trajectoire

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
Etats de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

#### Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

#### Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne

#### Section de Poincaré

#### Conclusions

### Conclusion Générale

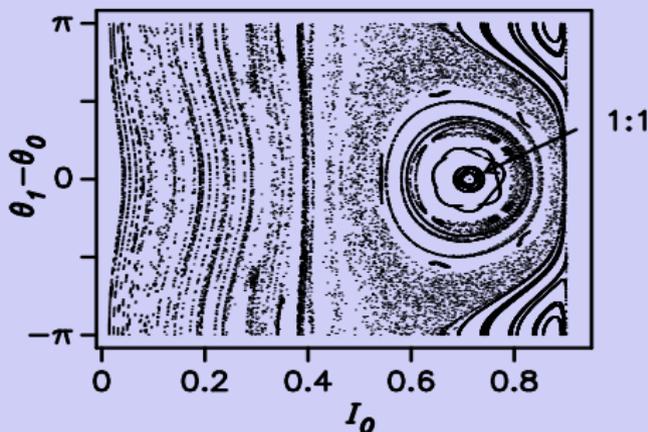


# Termes de perturbation

## Espace de phase

Les variables populations et phases définissent  
un espace de phase classique  
On peut définir une trajectoire

## Section de Poincaré



## Introduction

### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
Etats de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

### Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne

### Section de Poincaré

Conclusions

### Conclusion Générale



# Dynamique des populations

Dynamique Quantique  
d'Atomes Froids dans  
des Potentiels Lumineux

Quentin Thommen

## Introduction

### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

### Dynamique d'un condensat

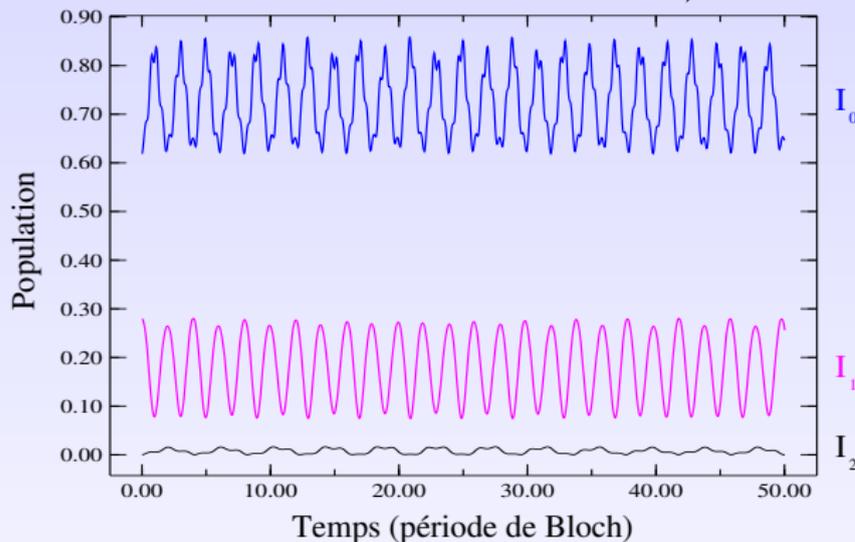
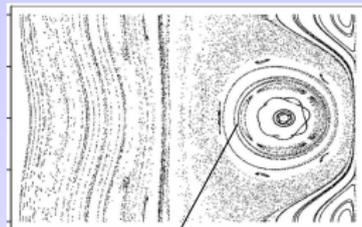
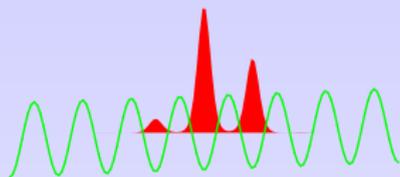
Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne

### Section de Poincaré

Conclusions

### Conclusion Générale

Condition initiale



# Dynamique des populations

Dynamique Quantique  
d'Atomes Froids dans  
des Potentiels Lumineux

Quentin Thommen

## Introduction

### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

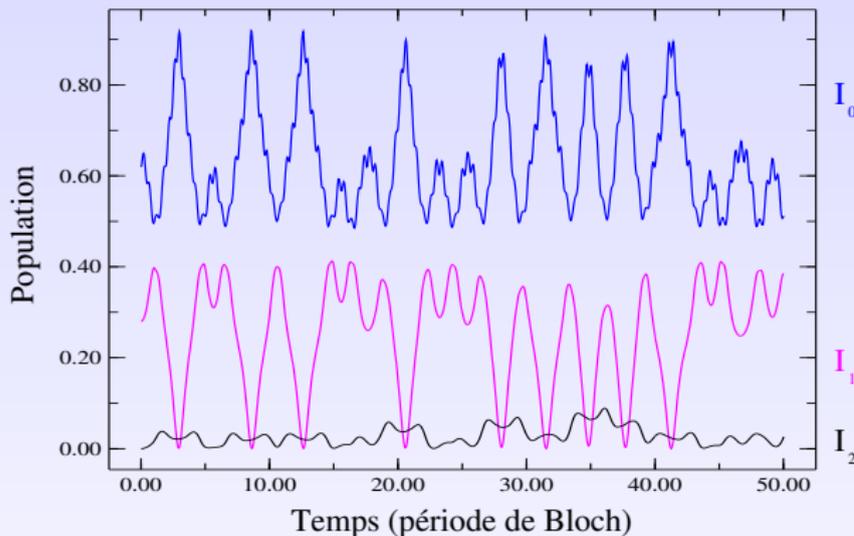
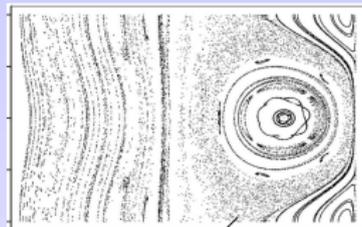
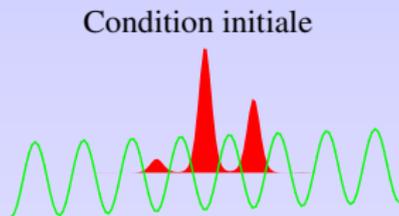
### Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne

### Section de Poincaré

Conclusions

### Conclusion Générale



## Conclusions

- Passerelle entre mécanique quantique et dynamique non-linéaire
- Généralisation possible à d'autres potentiels
- Généralisation possible à trois dimensions

## Perspectives

- Effet d'une modulation
- Couplage transverse

### Introduction

#### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

#### Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

#### Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

### Conclusion Générale



# Conclusion

## Introduction

### Oscillations de Bloch

Sommaire  
Atomes froids  
Potentiels lumineux  
Dynamique quantique  
États de Wannier Stark  
Oscillations de Bloch

### Transport cohérent

Sommaire  
Modulation harmonique  
Résonance  
Hors Résonance  
Conclusions

### Dynamique d'un condensat

Sommaire  
C.B.E.  
Réseau incliné  
Termes dominants  
Oscillations de Bloch  
Dynamique hamiltonienne  
Section de Poincaré  
Conclusions

## Conclusions

- Réseau incliné, avantage d'une double discrétisation espace-énergie
- Mise en évidence d'interférences quantiques

## Conclusion Générale

