

Condensation de Bose-Einstein sur une puce à atomes supraconductrice

Cédric Roux

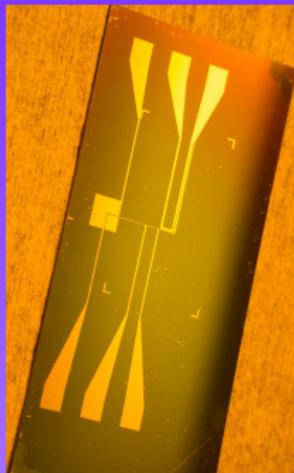
Directeur de thèse : Michel Brune

Laboratoire Kastler Brossel
École normale supérieure, Paris



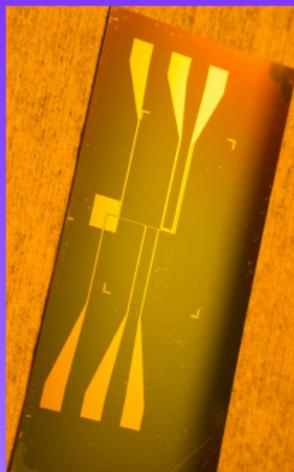
09/07/2008 - Soutenance de thèse de doctorat

Principe et succès des puces à atomes



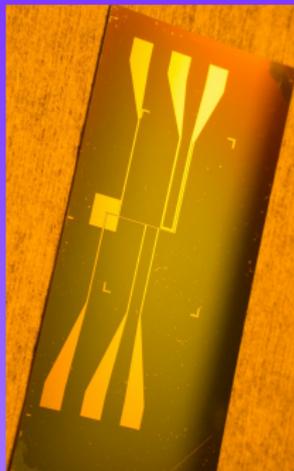
- **Potentiels piégeants au voisinage de microstructures réalisées sur un substrat**
 - idée (dès 1995 !) : rapprocher les atomes des sources du potentiel piégeant
 - courants dans des fils → piégeage magnétostatique (atomes neutres)
- **Avantages techniques**
 - fort confinement (portes quantiques rapides...)
 - dispositif compact et mécaniquement stable
 - réalisation de potentiels complexes : guide d'ondes, séparatrice, tapis roulant...
- **Intérêts physiques**
 - étude des interactions atomes-surfaces
 - intégration sur puce avec d'autres microstructures (micro-cavités...)

Principe et succès des puces à atomes



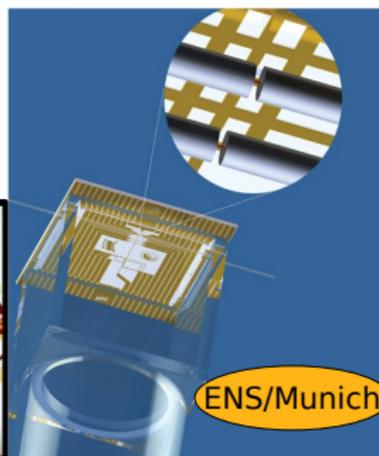
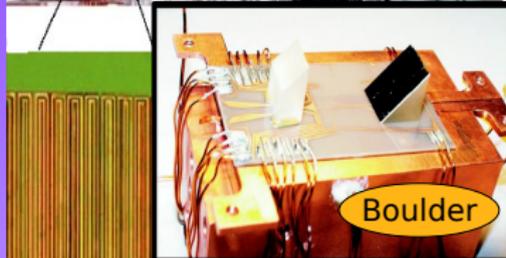
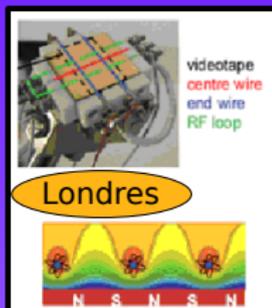
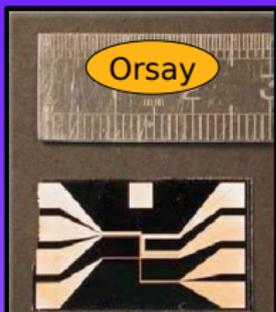
- Potentiels piégeants au voisinage de microstructures réalisées sur un substrat
 - idée (dès 1995 !) : rapprocher les atomes des sources du potentiel piégeant
 - courants dans des fils → piégeage magnétostatique (atomes neutres)
- Avantages techniques
 - fort confinement (portes quantiques rapides...)
 - dispositif compact et mécaniquement stable
 - réalisation de potentiels complexes : guide d'ondes, séparatrice, tapis roulant...
- Intérêts physiques
 - étude des interactions atomes-surfaces
 - intégration sur puce avec d'autres microstructures (micro-cavités...)

Principe et succès des puces à atomes



- Potentiels piégeants au voisinage de microstructures réalisées sur un substrat
 - idée (dès 1995 !) : rapprocher les atomes des sources du potentiel piégeant
 - courants dans des fils → piégeage magnétostatique (atomes neutres)
- Avantages techniques
 - fort confinement (portes quantiques rapides...)
 - dispositif compact et mécaniquement stable
 - réalisation de potentiels complexes : guide d'ondes, séparatrice, tapis roulant...
- Intérêts physiques
 - étude des interactions atomes-surfaces
 - intégration sur puce avec d'autres microstructures (micro-cavités...)

Quelques puces à atomes à travers le monde



Une puce à atomes supraconductrice : motivations

● Un nouvel environnement pour les atomes froids

- **Cryopompage** (meilleur vide résiduel donc meilleur temps de vie)
- **Réduction du bruit magnétique** (moins de pertes par retournement de spin)
- Piégeage dans une **boucle de courant permanent** (suppression du bruit technique)

● Quand les atomes froids rencontrent la physique du solide Couplage entre **atomes froids** et

- cavités linéaires supraconductrices
- SQUIDs
- oscillateurs mécaniques

● Compatible avec l'excitation vers les états de Rydberg

- **Blocage dipolaire** pour manipuler un atome de Rydberg unique
- Piégeage de cet atome unique : vers une **puce à atome de Rydberg**

Une puce à atomes supraconductrice : motivations

- Un nouvel environnement pour les atomes froids
 - Cryopompage (meilleur vide résiduel donc meilleur temps de vie)
 - Réduction du bruit magnétique (moins de pertes par retournement de spin)
 - Piégeage dans une boucle de courant permanent (suppression du bruit technique)
- Quand les atomes froids rencontrent la physique du solide
Couplage entre atomes froids et
 - cavités linéaires supraconductrices
 - SQUIDs
 - oscillateurs mécaniques
- Compatible avec l'excitation vers les états de Rydberg
 - Blocage dipolaire pour manipuler un atome de Rydberg unique
 - Piégeage de cet atome unique : vers une puce à atome de Rydberg

Une puce à atomes supraconductrice : motivations

- Un nouvel environnement pour les atomes froids
 - Cryopompage (meilleur vide résiduel donc meilleur temps de vie)
 - Réduction du bruit magnétique (moins de pertes par retournement de spin)
 - Piégeage dans une boucle de courant permanent (suppression du bruit technique)
- Quand les atomes froids rencontrent la physique du solide
Couplage entre atomes froids et
 - cavités linéaires supraconductrices
 - SQUIDs
 - oscillateurs mécaniques
- Compatible avec l'excitation vers les états de Rydberg
 - Blocage dipolaire pour manipuler un atome de Rydberg unique
 - Piégeage de cet atome unique : vers une puce à atome de Rydberg

Une puce à atomes supraconductrice : motivations

- Un nouvel environnement pour les atomes froids
 - Cryopompage (meilleur vide résiduel donc meilleur temps de vie)
 - **Réduction du bruit magnétique (moins de pertes par retournement de spin)**
 - Piégeage dans une boucle de courant permanent (suppression du bruit technique)
- Quand les atomes froids rencontrent la physique du solide
 - **Couplage entre atomes froids et**
 - **cavités linéaires supraconductrices**
 - SQUIDs
 - oscillateurs mécaniques
- Compatible avec l'excitation vers les états de Rydberg
 - **Blocage dipolaire pour manipuler un atome de Rydberg unique**
 - **Piégeage de cet atome unique : vers une puce à atome de Rydberg**

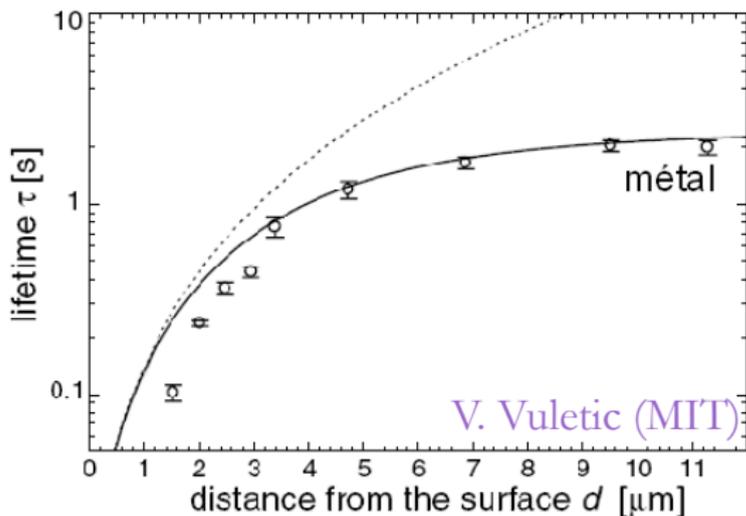
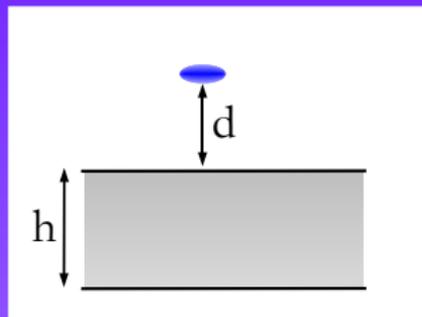
Plan de l'exposé

- 1 INTERACTIONS ATOMES-SURFACE SUPRACONDUCTRICE
- 2 PRÉPARATION D'UN CONDENSAT DE BOSE-EINSTEIN SUR PUCE À ATOMES SUPRACONDUCTRICE
- 3 PERSPECTIVES

Plan de l'exposé

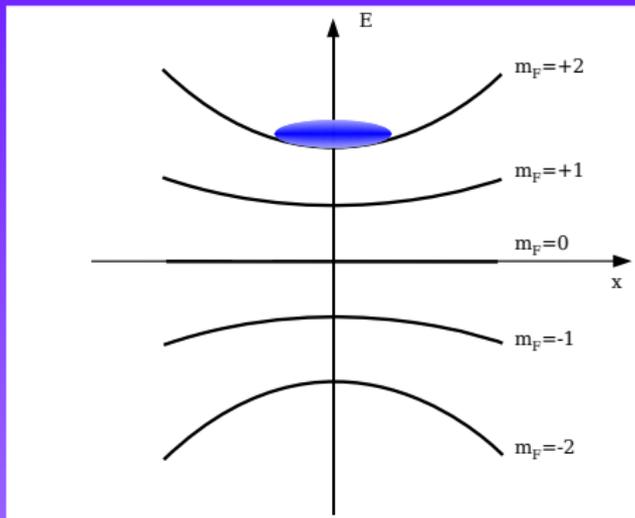
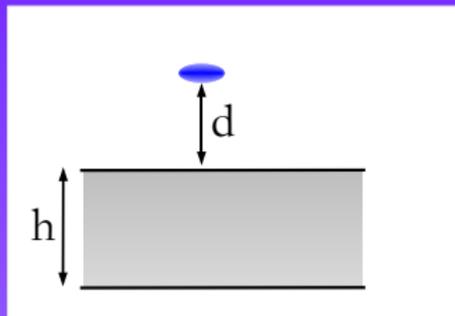
- 1 INTERACTIONS ATOMES-SURFACE SUPRACONDUCTRICE
- 2 PRÉPARATION D'UN CONDENSAT DE BOSE-EINSTEIN SUR PUCE À ATOMES SUPRACONDUCTRICE
- 3 PERSPECTIVES

Observations expérimentales



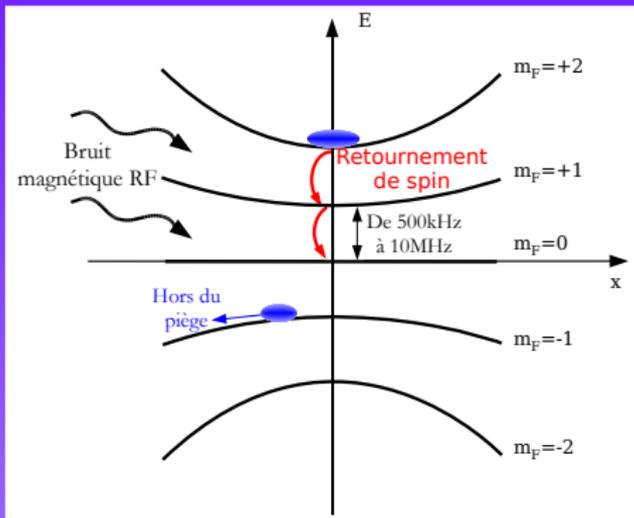
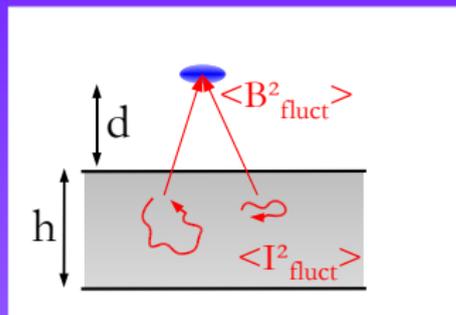
- **Situation** : un nuage d'**atomes froids** maintenus dans un piège magnétique à une **distance d de la surface** de la puce
- **Observation** : le **temps de vie diminue** quand le nuage se rapproche de la surface
- **Grand confinement** \rightarrow nécessité d'être proche du fil de piégeage (surface métallique)

Interprétation physique



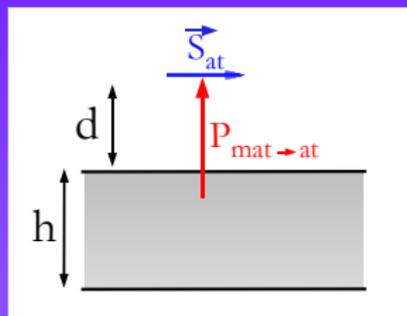
- Les atomes sont piégés dans $|F = 2, m_F = 2\rangle$ du ^{87}Rb

Interprétation physique



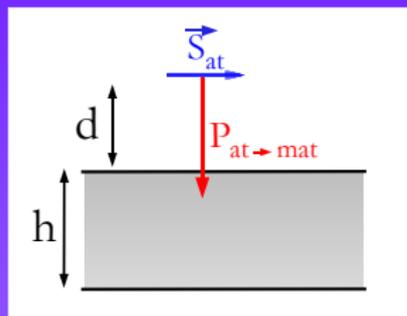
- Les atomes sont piégés dans $|F = 2, m_F = 2\rangle$ du ^{87}Rb
- **Fluctuations thermiques** de courant à la fréquence de retournement de spins ($\nu \sim 500 \text{ kHz} - 10 \text{ MHz}$)
 - ⇒ champ \vec{B} fluctuant (**champ proche**)
 - ⇒ **transitions Zeeman** vers niveaux non-piégeants
 - ⇒ diminution du temps de vie du nuage piégé

Modélisation des pertes (métal)



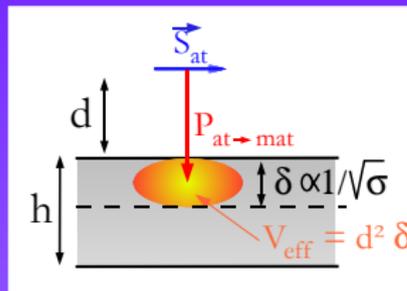
- On cherche le taux de transition $\Gamma_{i \rightarrow f}$ de $|i : F = 2, m_F = 2\rangle$ vers $|f : F = 2, m_F = 1\rangle$
- $\Gamma_{i \rightarrow f} \propto P_{\text{matériau} \rightarrow \text{atome}}$
- **Réciprocité** ($n_{th} \sim 10^6 \gg 1$)
 $P_{\text{matériau} \rightarrow \text{atome}} = P_{\text{atome} \rightarrow \text{matériau}}$
- $P_{\text{atome} \rightarrow \text{matériau}}$: problème d'**EM classique**
Pour caractériser l'absorption dans le matériau métallique : **conductivité** $\sigma(\omega)$
- **Théorème fluctuations-dissipation**

Modélisation des pertes (métal)



- On cherche le taux de transition $\Gamma_{i \rightarrow f}$ de $|i : F = 2, m_F = 2\rangle$ vers $|f : F = 2, m_F = 1\rangle$
- $\Gamma_{i \rightarrow f} \propto P_{\text{matériau} \rightarrow \text{atome}}$
- **Réciprocité** ($n_{\text{th}} \sim 10^6 \gg 1$)
$$P_{\text{matériau} \rightarrow \text{atome}} = P_{\text{atome} \rightarrow \text{matériau}}$$
- $P_{\text{atome} \rightarrow \text{matériau}}$: problème d'**EM classique**
Pour caractériser l'absorption dans le matériau métallique : **conductivité** $\sigma(\omega)$
- **Théorème fluctuations-dissipation**

Modélisation des pertes (métal)



- On cherche le taux de transition $\Gamma_{i \rightarrow f}$ de $|i : F = 2, m_F = 2\rangle$ vers $|f : F = 2, m_F = 1\rangle$
- $\Gamma_{i \rightarrow f} \propto P_{\text{matériau} \rightarrow \text{atome}}$
- **Réciprocité** ($n_{th} \sim 10^6 \gg 1$)

$$P_{\text{matériau} \rightarrow \text{atome}} = P_{\text{atome} \rightarrow \text{matériau}}$$
- $P_{\text{atome} \rightarrow \text{matériau}}$: problème d'**EM classique**
 Pour caractériser l'absorption dans le matériau métallique : **conductivité $\sigma(\omega)$**
- **Théorème fluctuations-dissipation**

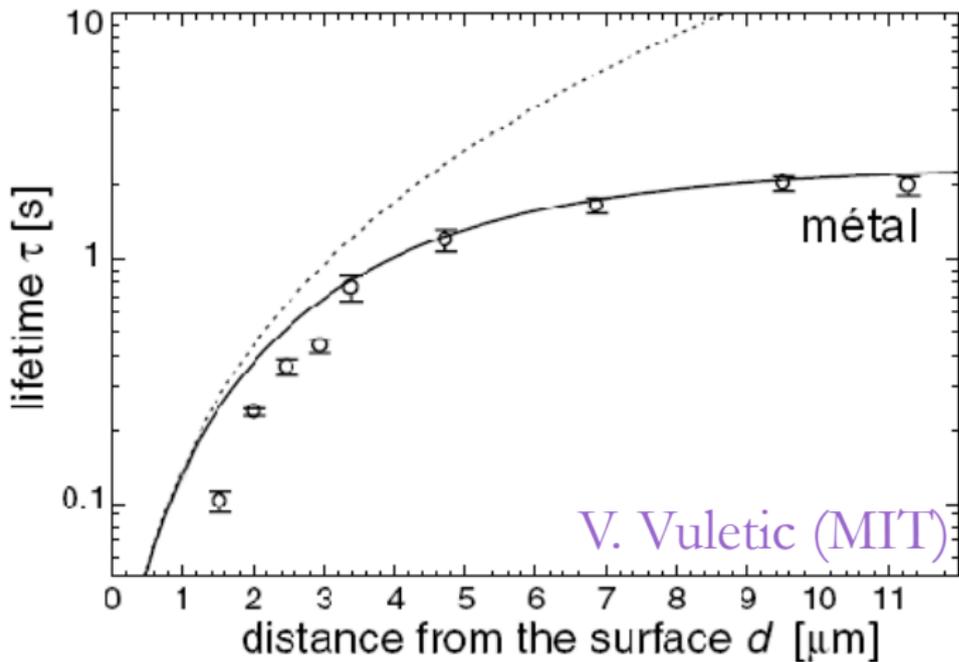
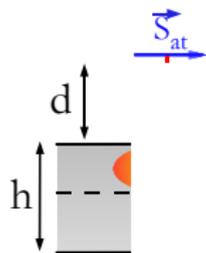
- $P_{\text{at.} \rightarrow \text{mat.}} \propto B_{\text{dip. at.}}^2 V_{\text{eff.}} = \left(\frac{1}{d^3}\right)^2 d^2 \delta = \frac{\delta}{d^4}$ (pour $\delta \ll d, h$)

où $\delta(\omega) = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \sigma \omega}}$ est l'épaisseur de peau du métal

- Calcul complet \rightarrow excellent accord avec les expériences

Modélisation des pertes (métal)

- On cherche le taux de transition $\Gamma_{i \rightarrow f}$ de $|i : F = 2, m_F = 2\rangle$ vers $|f : F = 2, m_F = 1\rangle$
- $\Gamma_{i \rightarrow f} \propto P_{\text{matériau-atome}}$



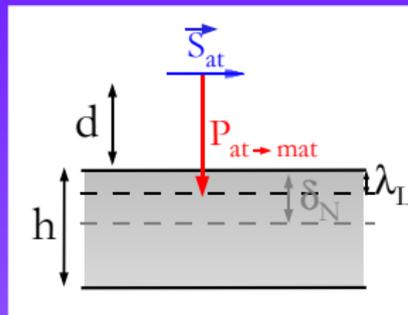
e

• P_e

ou

• C_e

Extension aux supraconducteurs ?



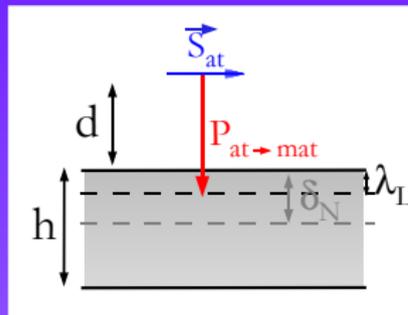
- Que vaut $\sigma(\omega)$ pour un supraconducteur ?
- Modèle le + simple : **modèle à deux fluides**
 e^- normaux (δ_N) / supra (λ_L)

Le champ \vec{B} pénètre dans le matériau sur la **longueur de London** λ_L

- **Longueur de London** : $\lambda_L \sim 35$ nm
- **Épaisseur de peau normale** :

$$\delta_N \sim 1 - 10 \mu\text{m} \text{ (à } 1 \text{ MHz)}$$

Extension aux supraconducteurs ?



- Que vaut $\sigma(\omega)$ pour un supraconducteur ?
- Modèle le + simple : **modèle à deux fluides**
 e^- normaux (δ_N) / supra (λ_L)

Le champ \vec{B} pénètre dans le matériau sur la **longueur de London** λ_L

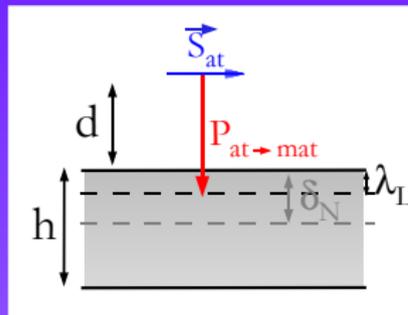
- **Longueur de London** : $\lambda_L \sim 35 \text{ nm}$
- **Épaisseur de peau normale** :

$$\delta_N \sim 1 - 10 \mu\text{m} \text{ (à } 1 \text{ MHz)}$$

Métal	Supraconducteur (2 fluides)
$\Gamma_{i \rightarrow f} \propto \frac{\delta}{d^4}$	$\Gamma_{i \rightarrow f} \propto \frac{\delta_N}{d^4} \left(\frac{\lambda_L}{\delta_N} \right)^3 \ll \frac{\delta_N}{d^4}$

- D'autres modèles de conductivité locale (BCS, Eliashberg...)
- Tous la même conclusion : temps de vie extrêmement élevé !
 ($> 10^7 \text{ s}$ pour $d = 10 \mu\text{m}$, à comparer avec $\sim 1 \text{ s}$ au-dessus d'un métal)

Extension aux supraconducteurs ?



- Que vaut $\sigma(\omega)$ pour un supraconducteur ?
- Modèle le + simple : **modèle à deux fluides**
 e^- normaux (δ_N) / supra (λ_L)

Le champ \vec{B} pénètre dans le matériau sur la **longueur de London λ_L**

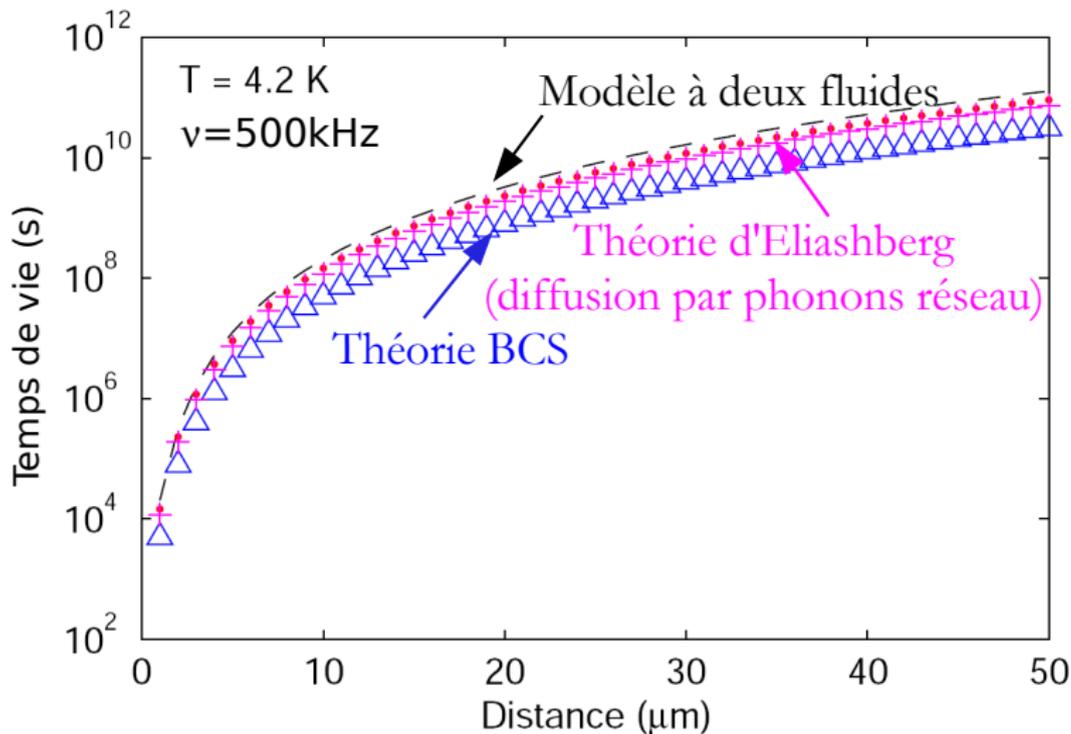
- **Longueur de London** : $\lambda_L \sim 35$ nm
- **Épaisseur de peau normale** :

$$\delta_N \sim 1 - 10 \mu\text{m} \text{ (à 1 MHz)}$$

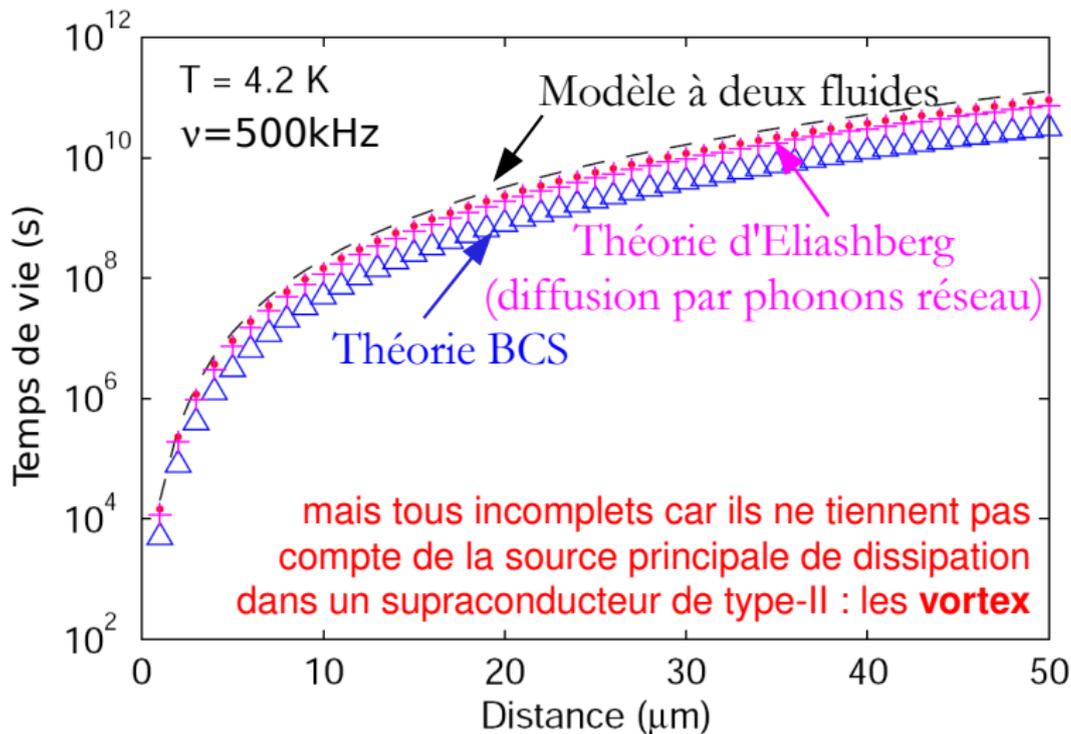
Métal	Supraconducteur (2 fluides)
$\Gamma_{i \rightarrow f} \propto \frac{\delta}{d^4}$	$\Gamma_{i \rightarrow f} \propto \frac{\delta_N}{d^4} \left(\frac{\lambda_L}{\delta_N} \right)^3 \ll \frac{\delta_N}{d^4}$

- D'autres modèles de conductivité locale (BCS, Eliashberg...)
- Tous la même conclusion : temps de vie extrêmement élevé !
 ($> 10^7$ s pour $d = 10 \mu\text{m}$, à comparer avec ~ 1 s au-dessus d'un métal)

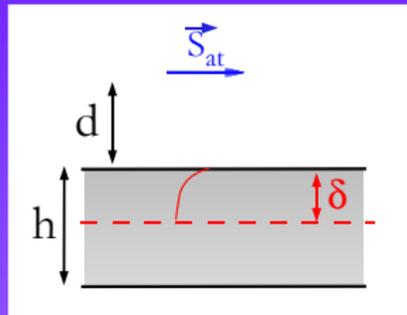
Extension aux supraconducteurs ?



Extension aux supraconducteurs ?



Dissipation en présence de vortex



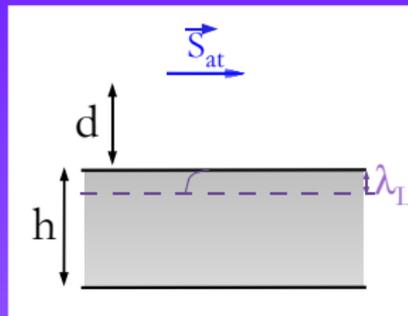
Métal	Supra idéal
$b = b_0 e^{-(1-i)z/\delta}$	$b = b_0 e^{-z/\lambda_L}$

En présence de vortex, [B. Plaçais, P. Mathieu et Y. Simon]

$$b = \beta_1 e^{-(1-i)z/\delta_f} + \beta_2 e^{-z/\lambda_V}$$

- $\delta_f \propto \delta_N \simeq 10 \mu\text{m}$: mode de volume
- $\lambda_V \propto \lambda_L \simeq 30 \text{ nm}$: mode de surface

Dissipation en présence de vortex



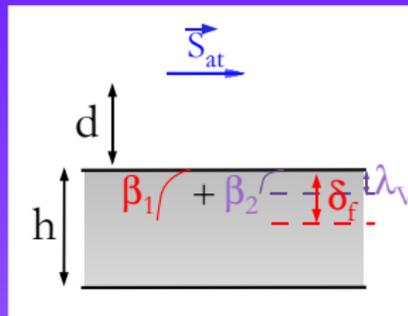
Métal	Supra idéal
$b = b_0 e^{-(1-i)z/\delta}$	$b = b_0 e^{-z/\lambda_L}$

En présence de vortex, [B. Plaçais, P. Mathieu et Y. Simon]

$$b = \beta_1 e^{-(1-i)z/\delta_V} + \beta_2 e^{-z/\lambda_V}$$

- $\delta_V \propto \delta_N \simeq 10 \mu\text{m}$: mode de volume
- $\lambda_V \propto \lambda_L \simeq 30 \text{ nm}$: mode de surface

Dissipation en présence de vortex



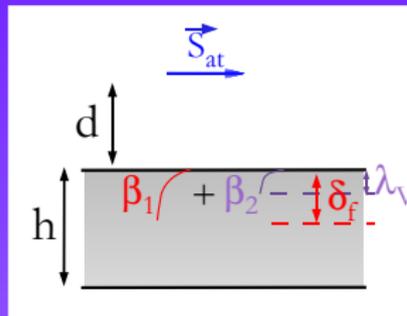
Métal	Supra idéal
$b = b_0 e^{-(1-i)z/\delta}$	$b = b_0 e^{-z/\lambda_L}$

En présence de vortex, [B. Plaçais, P. Mathieu et Y. Simon]

$$b = \beta_1 e^{-(1-i)z/\delta_f} + \beta_2 e^{-z/\lambda_v}$$

- $\delta_f \propto \delta_N \simeq 10 \mu\text{m}$: mode de volume
- $\lambda_v \propto \lambda_L \simeq 30 \text{ nm}$: mode de surface

Dissipation en présence de vortex



Métal	Supra idéal
$b = b_0 e^{-(1-i)z/\delta}$	$b = b_0 e^{-z/\lambda_L}$

En présence de vortex, [B. Plaçais, P. Mathieu et Y. Simon]

$$b = \beta_1 e^{-(1-i)z/\delta_f} + \beta_2 e^{-z/\lambda_v}$$

- $\delta_f \propto \delta_N \simeq 10 \mu\text{m}$: mode de volume
- $\lambda_v \propto \lambda_L \simeq 30 \text{nm}$: mode de surface

- **Problème** : on ne peut pas définir de conductivité locale σ
- **Idée** : intégrer la non-localité suivant z et la « cacher » dans une **impédance de surface** : $Z_S \vec{J}_{\text{surf}} = \vec{E}_{\parallel}$
- Épaisseur finie h du matériau, condition aux limites d'**ancrage en surface** : **vortex \perp surface rugueuse**, rugosité de surface à partir du courant critique... \Rightarrow on obtient $Z_S(\omega)$

Temps de vie en fonction de l'impédance de surface

Métal

$$\sigma \in \mathbb{R}$$

Supra local

$$\sigma = \sigma' + i\sigma''$$

$$\Gamma_{i \rightarrow f} \propto \frac{1}{d^4} \sqrt{\frac{1}{\sigma}}$$

$$\Gamma_{i \rightarrow f} \propto \frac{1}{d^4} \frac{1}{(\sigma'')^{3/2}}$$

E.A. Hinds *et al.*, PRA 2005

P.K. Rekdal *et al.*, PRL 2006

Temps de vie en fonction de l'impédance de surface

Métal

$$\sigma \in \mathbb{R}$$

Supra local

$$\sigma = \sigma' + i\sigma''$$

Unification

$$\Gamma_{i \rightarrow f} \propto \frac{1}{d^4} \sqrt{\frac{1}{\sigma}}$$

$$\Gamma_{i \rightarrow f} \propto \frac{1}{d^4} \frac{1}{(\sigma'')^{3/2}}$$

$$\Gamma_{i \rightarrow f} \propto \frac{1}{d^4} \text{Re}(Z_S)$$

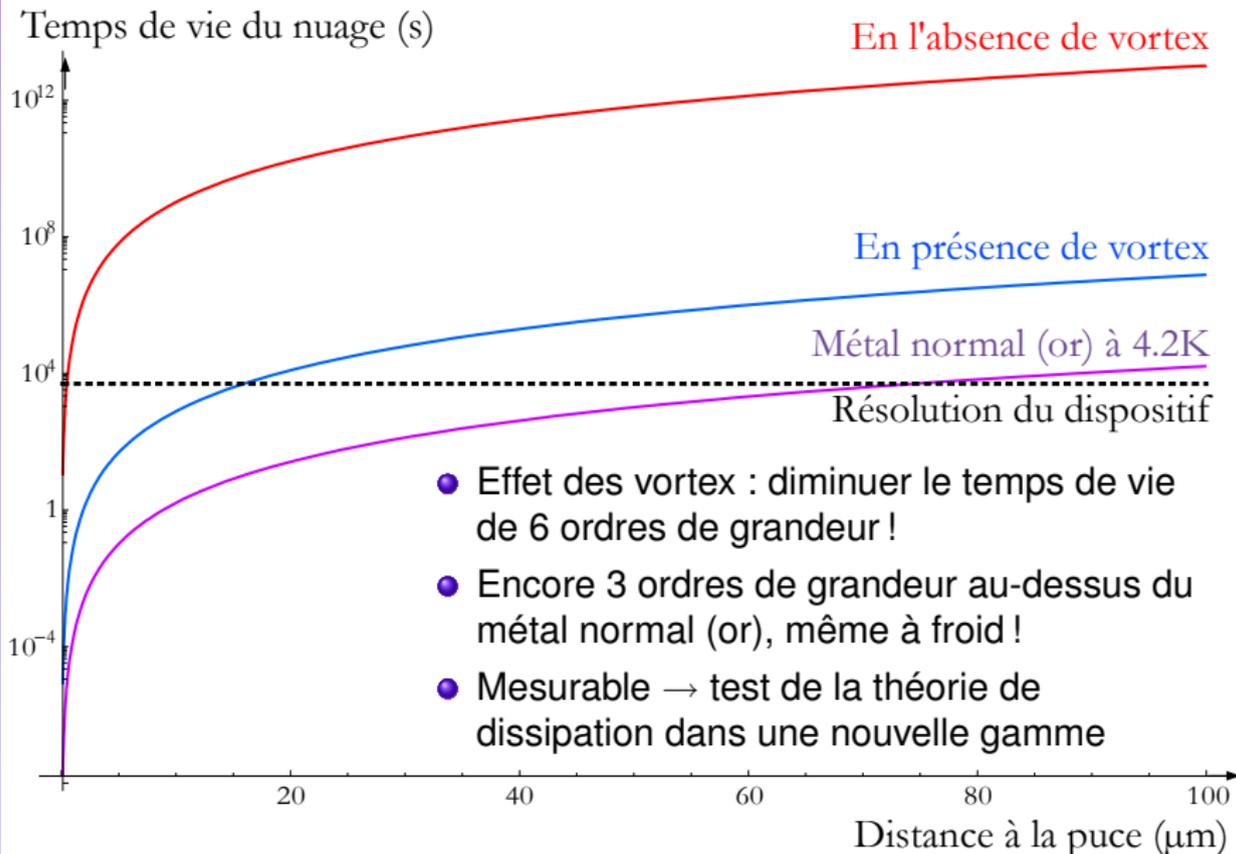
E.A. Hinds *et al.*, PRA 2005

P.K. Rekdal *et al.*, PRL 2006

C. Roux *et al.*, en préparation

- **Vision unifiée** pour le métal et le supraconducteur, avec ou sans conductivité locale σ
- Hypothèse : modèle d'impédance de surface :
$$\delta, \delta_N, \delta_f, \lambda_L, \lambda_V \ll d, h$$
- **Théorème fluctuations-dissipation** beaucoup plus clair
- On peut utiliser notre modèle de dissipation par les vortex

Résultat : temps de vie vs. distance



Perspectives

- **Théoriques** :
 - tenir compte de l'**inhomogénéité de la densité de vortex** dans le plan de la puce (en cours)
 - $\delta_f \ll h$? Absorption en volume, calcul complet à deux modes
- **Expérimentales** : réaliser la mesure du temps de vie en fonction de la distance
 - Nécessité d'avoir un **nuage très froid** au voisinage d'un fil supraconducteur : un **condensat de Bose-Einstein** comme sonde locale

Plan de l'exposé

- 1 INTERACTIONS ATOMES-SURFACE SUPRACONDUCTRICE
- 2 PRÉPARATION D'UN CONDENSAT DE BOSE-EINSTEIN SUR PUCE À ATOMES SUPRACONDUCTRICE
- 3 PERSPECTIVES

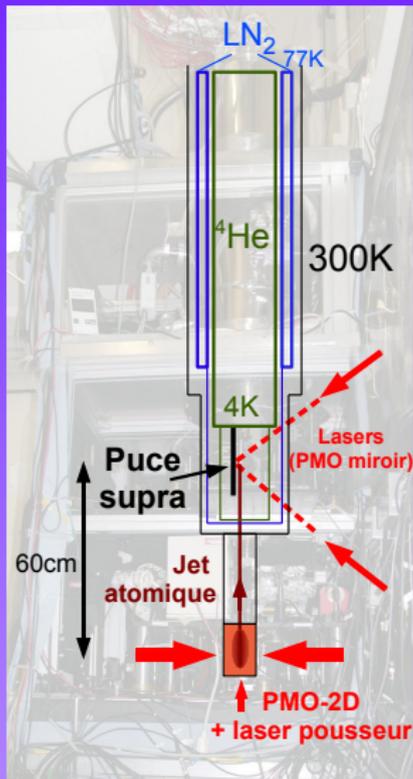
Vision d'ensemble de l'expérience



Cryostat ^4He avec accès optique

- Vide d'isolement : $P=10^{-8}$ mbar (pompe turbomoléculaire)
- 2 écrans thermiques (4 K, 77 K)

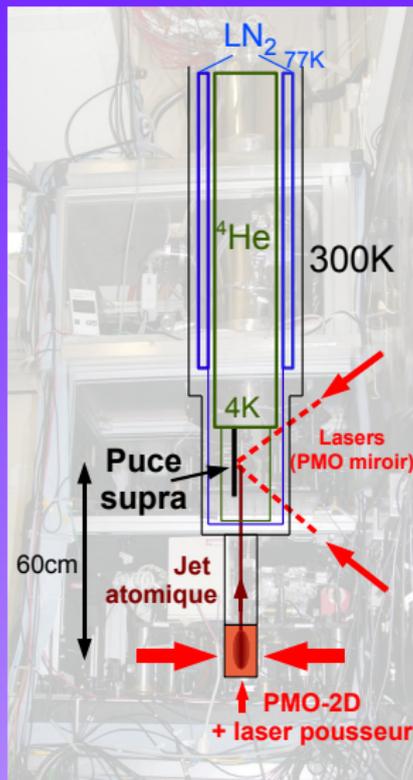
Vision d'ensemble de l'expérience



Cryostat ^4He avec accès optique

- Vide d'isolement : $P=10^{-8}$ mbar (pompe turbomoléculaire)
- 2 écrans thermiques (4 K, 77 K)

Vision d'ensemble de l'expérience



Cryostat ^4He avec accès optique

- Vide d'isolement : $P=10^{-8}$ mbar (pompe turbomoléculaire)
- 2 écrans thermiques (4 K, 77 K)

Source continue d'atomes lents : PMO-2D

- Enceinte UHV à 300 K séparée.

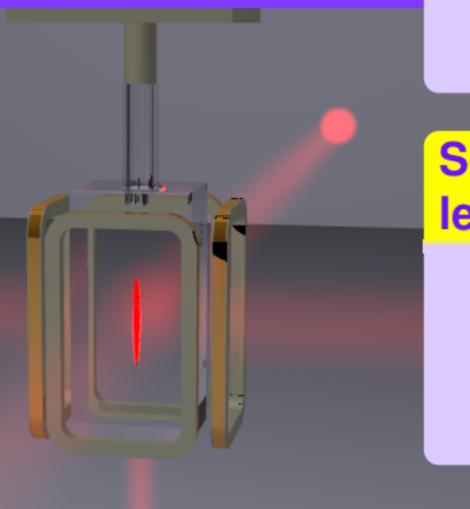
Vision d'ensemble de l'expérience

Cryostat ^4He avec accès optique

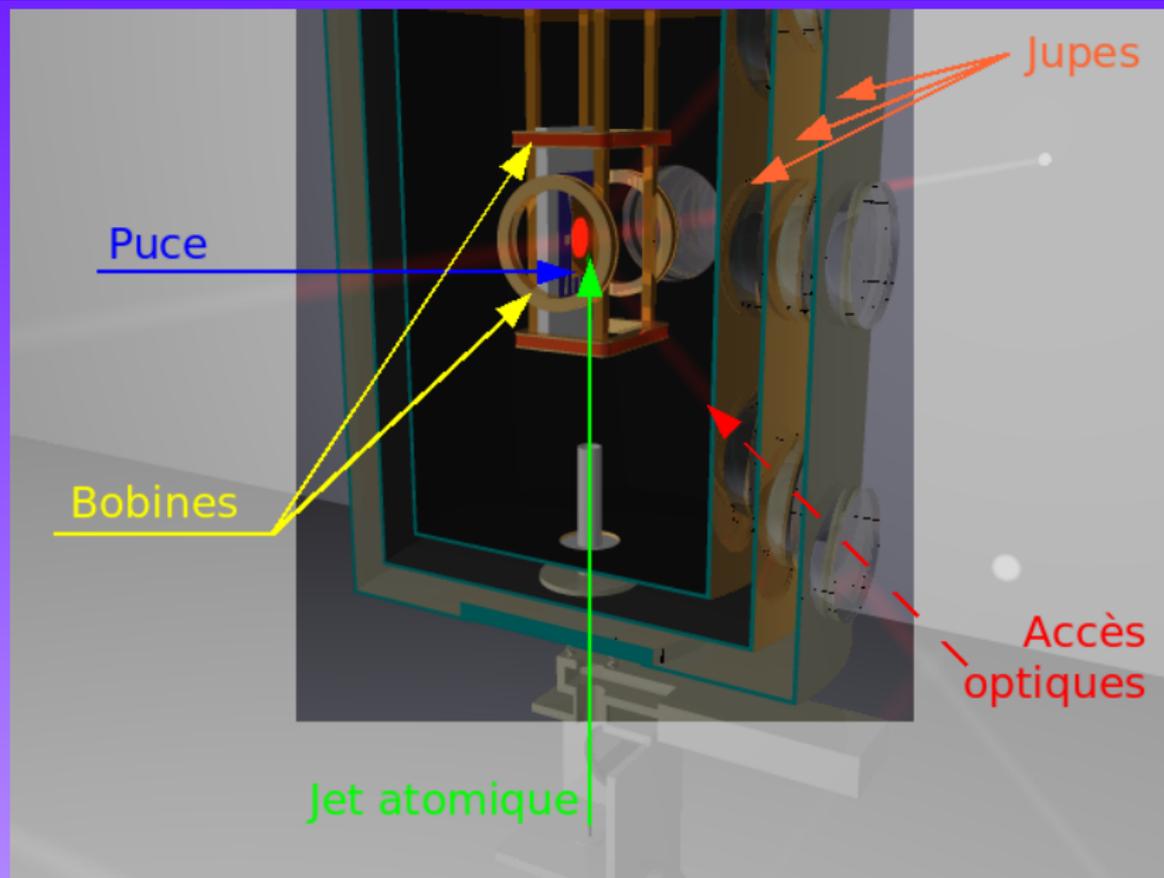
- Vide d'isolement : $P=10^{-8}$ mbar (pompe turbomoléculaire)
- 2 écrans thermiques (4 K, 77 K)

Source continue d'atomes lents : PMO-2D

- Enceinte UHV à 300 K séparée.
- PMO à 2 dimensions + faisceau pousseur
- $1.5 \cdot 10^7$ atomes/s, entre 10 et 20 m/s

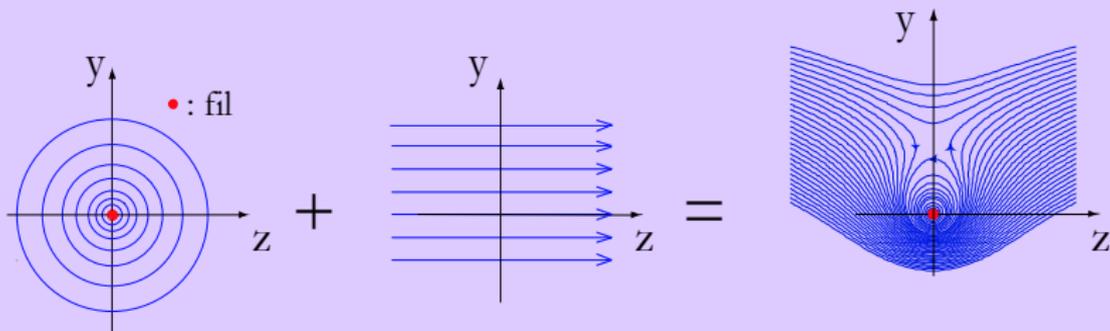


Vision d'ensemble de l'expérience



Parenthèse : configurations magnétiques

Un fil rectiligne



Champ créé
par un fil

+

Champ
homogène

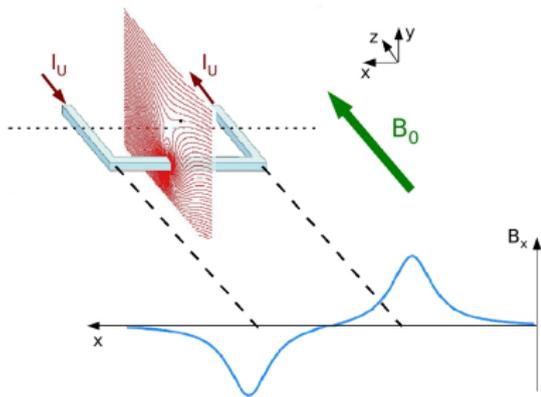
=

Guide quadrupolaire
bidimensionnel

Un fil + un champ magnétique homogène = un minimum de $|\vec{B}|$
Guide 2D pour chercheurs de champ faible

Parenthèse : configurations magnétiques

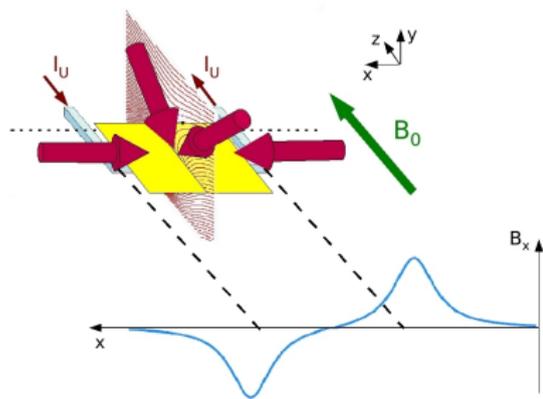
Fil U



Piège **quadrupolaire**

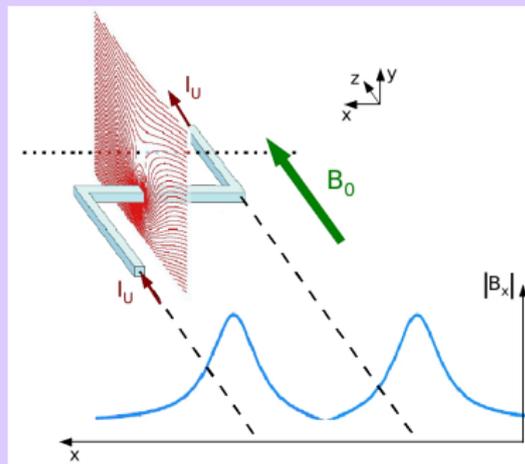
Parenthèse : configurations magnétiques

Fil U



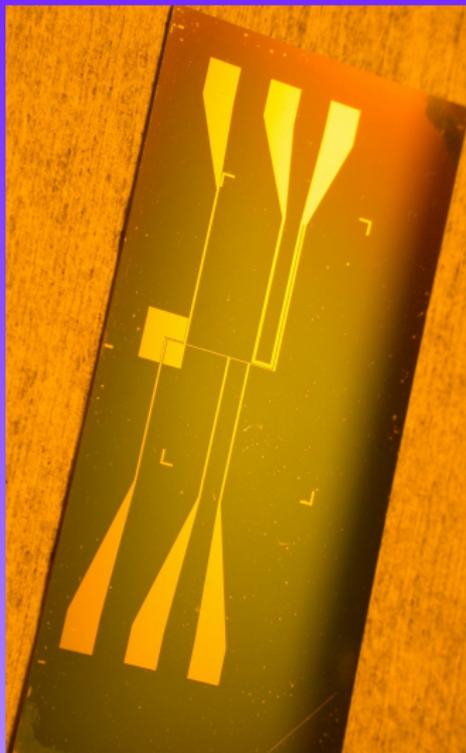
Piège **quadrupolaire**
Piège magnéto-optique **miroir**

Fil Z



Piège de **Ioffe-Pritchard**

La puce à atomes



● Fabrication

- Substrat de Si oxydé : 60×35 mm
- Nb pulvérisé : $1 \mu\text{m}$
- Lithographie optique + gravure ionique

● Éléments remarquables

- Fil U (largeur $300 \mu\text{m}$)
- Fil Z (largeur $40 \mu\text{m}$)
- Carré supraconducteur

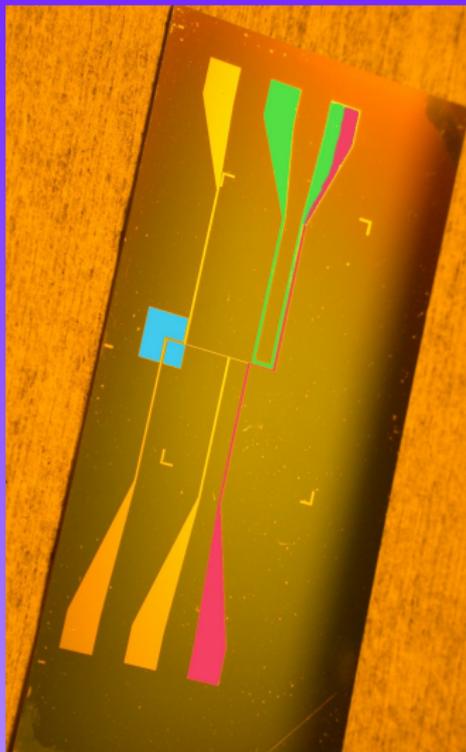
● Dépôt d'une couche d'or

- Planarisation (BCB $1.5 \mu\text{m}$)
- Couche d'or 200 nm (évap.)

● Tout supraconducteur

- Fils d'arrivée du courant
- Contacts (soudure spéciale)
- Courants critiques : 1.8 A dans le fil Z et > 5 A dans le fil U

La puce à atomes



● Fabrication

- Substrat de Si oxydé : 60×35 mm
- Nb pulvérisé : $1 \mu\text{m}$
- Lithographie optique + gravure ionique

● Éléments remarquables

- Fil U (largeur $300 \mu\text{m}$)
- Fil Z (largeur $40 \mu\text{m}$)
- Carré supraconducteur

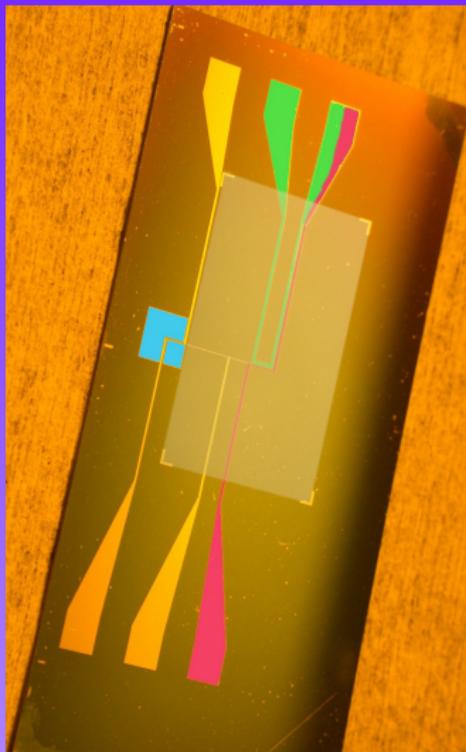
● Dépôt d'une couche d'or

- Planarisation (BCB $1.5 \mu\text{m}$)
- Couche d'or 200 nm (évap.)

● Tout supraconducteur

- Fils d'arrivée du courant
- Contacts (soudure spéciale)
- Courants critiques : 1.8 A dans le fil Z et > 5 A dans le fil U

La puce à atomes



● Fabrication

- Substrat de Si oxydé : 60×35 mm
- Nb pulvérisé : $1 \mu\text{m}$
- Lithographie optique + gravure ionique

● Éléments remarquables

- Fil U (largeur $300 \mu\text{m}$)
- Fil Z (largeur $40 \mu\text{m}$)
- Carré supraconducteur

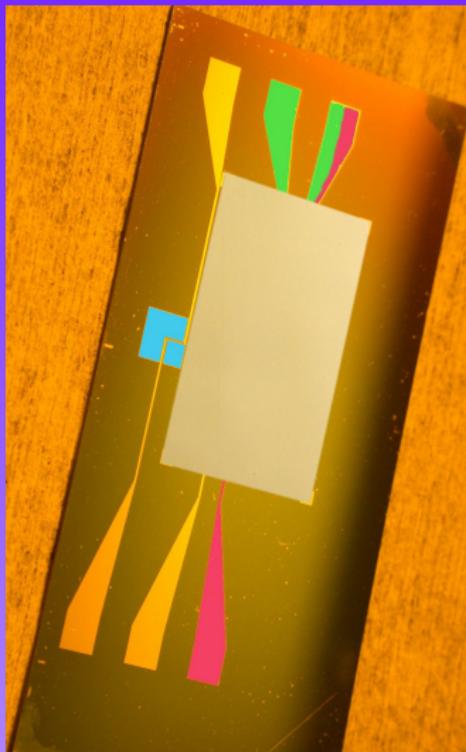
● Dépôt d'une couche d'or

- Planarisation (BCB $1.5 \mu\text{m}$)
- Couche d'or 200 nm (évap.)

● Tout supraconducteur

- Fils d'arrivée du courant
- Contacts (soudure spéciale)
- Courants critiques : 1.8 A dans le fil Z et > 5 A dans le fil U

La puce à atomes



● Fabrication

- Substrat de Si oxydé : 60×35 mm
- Nb pulvérisé : $1 \mu\text{m}$
- Lithographie optique + gravure ionique

● Éléments remarquables

- Fil U (largeur $300 \mu\text{m}$)
- Fil Z (largeur $40 \mu\text{m}$)
- Carré supraconducteur

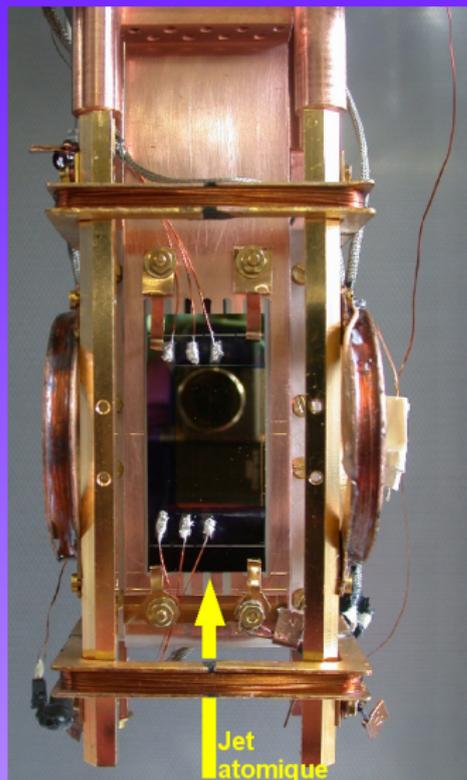
● Dépôt d'une couche d'or

- Planarisation (BCB $1.5 \mu\text{m}$)
- Couche d'or 200 nm (évap.)

● Tout supraconducteur

- Fils d'arrivée du courant
- Contacts (soudure spéciale)
- Courants critiques : 1.8 A dans le fil Z et > 5 A dans le fil U

La puce à atomes



● Fabrication

- Substrat de Si oxydé : 60×35 mm
- Nb pulvérisé : $1 \mu\text{m}$
- Lithographie optique + gravure ionique

● Éléments remarquables

- Fil U (largeur $300 \mu\text{m}$)
- Fil Z (largeur $40 \mu\text{m}$)
- Carré supraconducteur

● Dépôt d'une couche d'or

- Planarisation (BCB $1.5 \mu\text{m}$)
- Couche d'or 200 nm (évap.)

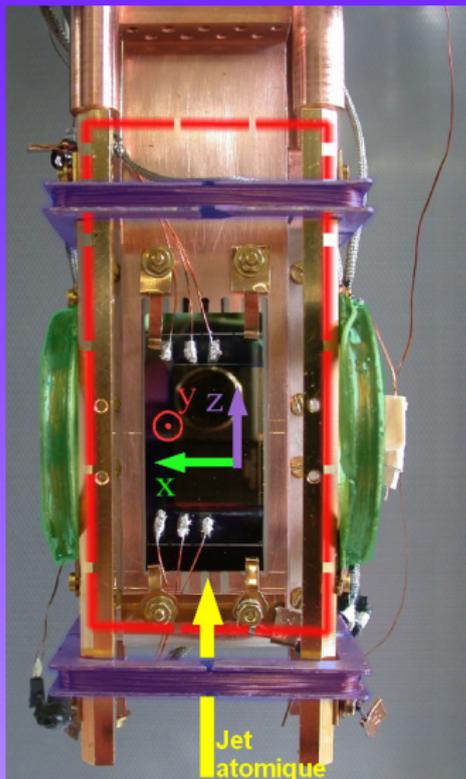
● Tout supraconducteur

- Fils d'arrivée du courant
- Contacts (soudure spéciale)
- Courants critiques : 1.8 A dans le fil Z et > 5 A dans le fil U

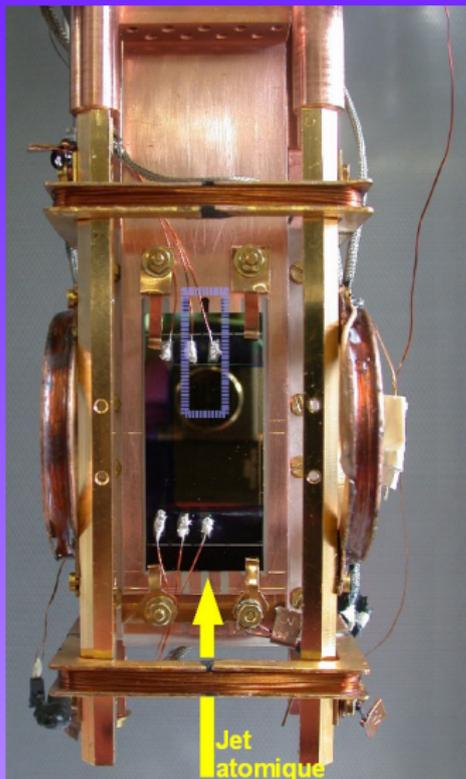
La cellule expérimentale

Les bobines de biais

- Bobines de biais
- Bobines supraconductrices (fil NbTi)
- Thermalisation des bobines et de leurs fils d'alimentation



La cellule expérimentale



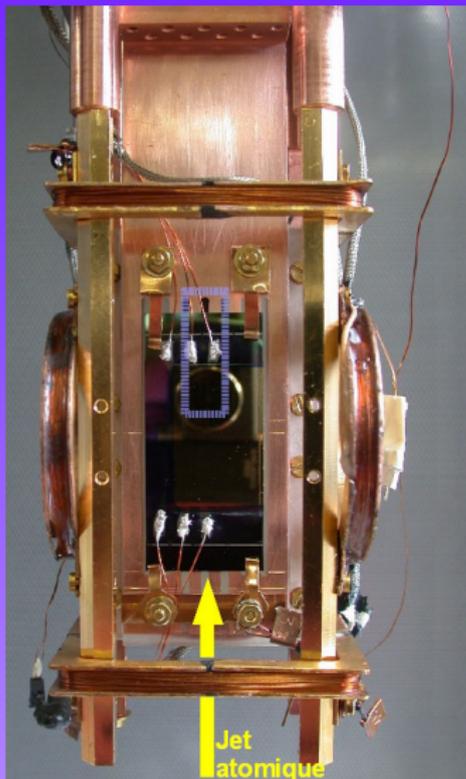
Les bobines de biais

- Bobines de biais
- Bobines supraconductrices (fil NbTi)
- Thermalisation des bobines et de leurs fils d'alimentation

Bobine « quadrupolaire »

- 1.5 mm derrière la puce
- Sa partie inférieure en « U » crée un champ quadrupolaire pour le PMO initial (grande extension spatiale)

La cellule expérimentale



Les bobines de biais

- Bobines de biais
- Bobines supraconductrices (fil NbTi)
- Thermalisation des bobines et de leurs fils d'alimentation

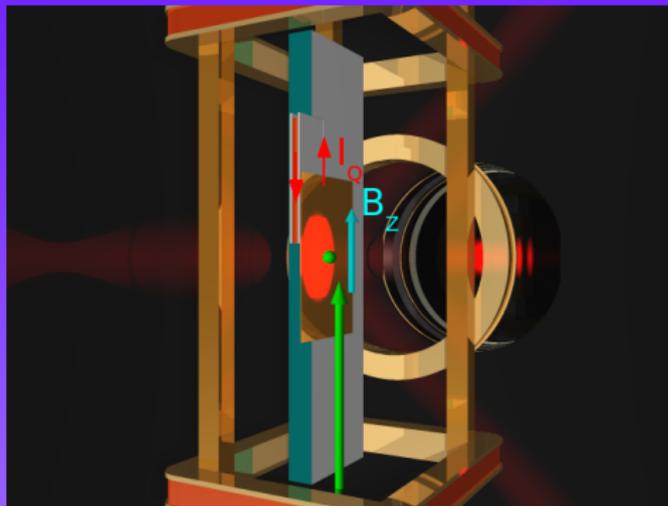
Bobine « quadrupolaire »

- 1.5 mm derrière la puce
- Sa partie inférieure en « U » crée un champ quadrupolaire pour le PMO initial (grande extension spatiale)

Courants de Foucault

- Cuivre froid : très bon conducteur
- 1 s \rightarrow 1 ms

Une séquence expérimentale typique

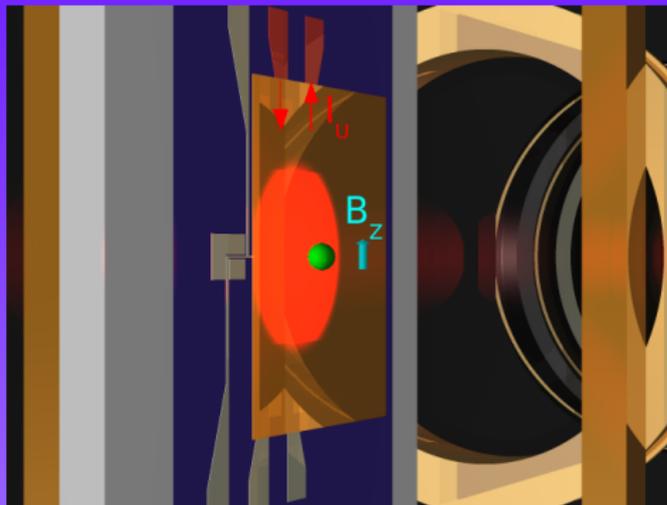


PMO miroir

- Gradient 27 G/cm

	PMO miroir
Durée	5 s
N_{at}	$5 \cdot 10^7$
T	$300 \mu\text{K}$
d	2.3 mm

Une séquence expérimentale typique

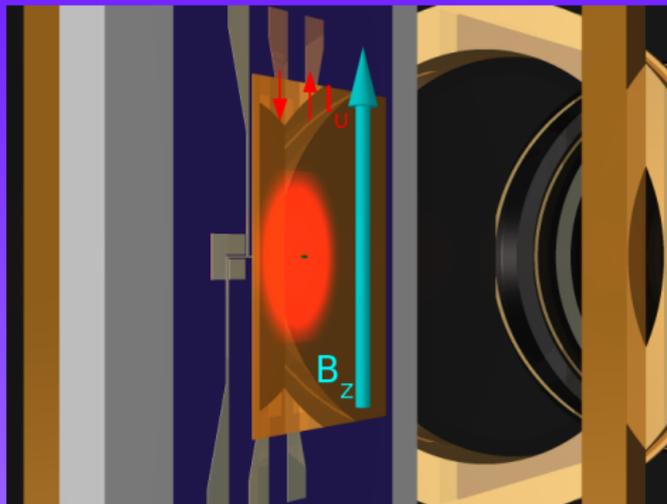


Transfert au PMO en U

- I_Q éteint
- I_U allumé
- B_Z ajusté pour garder d constante
- Gradient : 1 G/cm
- Efficacité : 85%

	PMO miroir	Transfert au U-MOT
Durée	5 s	20 ms
N_{at}	$5 \cdot 10^7$	$4.2 \cdot 10^7$
T	300 μ K	80 μ K
d	2.3 mm	2.3 mm

Une séquence expérimentale typique

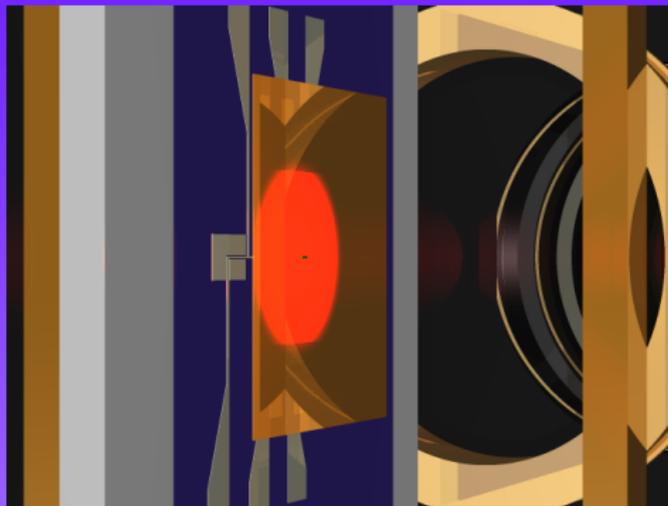


U-PMO : compression

- $d \propto \frac{l_U}{B_z}, b' \propto \frac{B_z^2}{l_U}$
- B_z augmenté
- l_U constant
- Gradient : 20 G/cm
- Désaccord $\delta \rightarrow -9.2\Gamma$

	PMO miroir	Transfert au U-MOT	Compres- sion
Durée	5 s	20 ms	20 ms
N_{at}	$5 \cdot 10^7$	$4.2 \cdot 10^7$	$1.2 \cdot 10^7$
T	300 μ K	80 μ K	80 μ K
d	2.3 mm	2.3 mm	460 μ m

Une séquence expérimentale typique

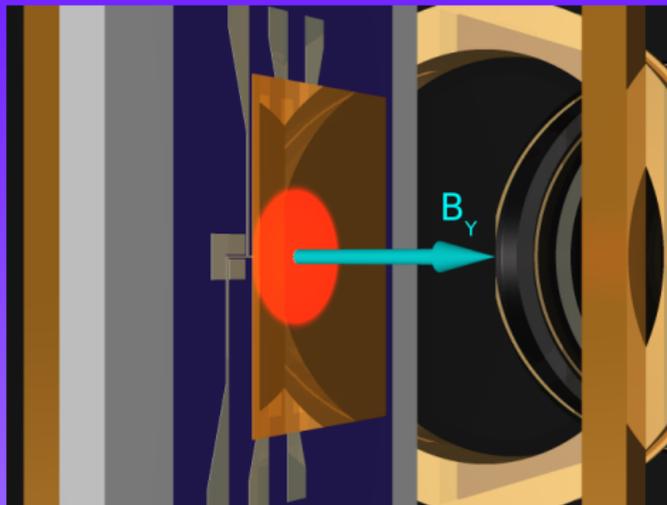


Mélasse optique

- Champs éteints en < 1 ms
- $\delta \rightarrow -10.2\Gamma$
- Puissance laser divisée par 200

	PMO miroir	Transfert au U-MOT	Compression	Mélasse optique
Durée	5 s	20 ms	20 ms	2 ms
N_{at}	$5 \cdot 10^7$	$4.2 \cdot 10^7$	$1.2 \cdot 10^7$	$1.1 \cdot 10^7$
T	300 μ K	80 μ K	80 μ K	20 μK
d	2.3 mm	2.3 mm	460 μ m	460 μm

Une séquence expérimentale typique

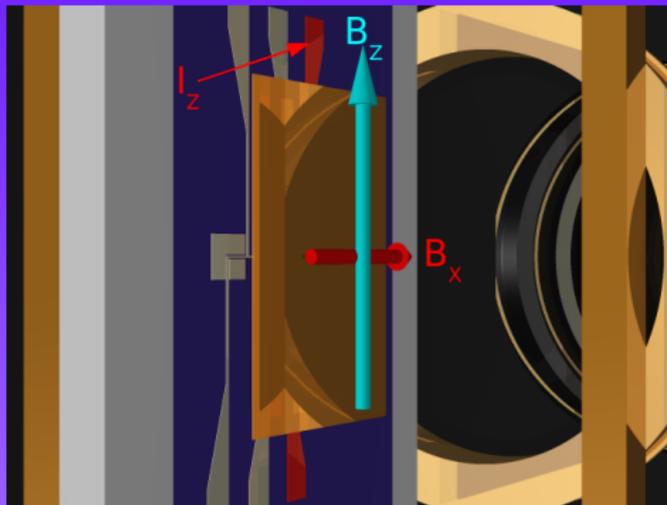


Pompage optique

- Quantification y
- Polarisation σ^+
- Laser rétro réfléché
- **Efficacité** ~ 3

	PMO miroir	Transfert au U-MOT	Compression	Mélasse optique	Pompage optique
Durée	5 s	20 ms	20 ms	2 ms	0.2 ms
N_{at}	$5 \cdot 10^7$	$4.2 \cdot 10^7$	$1.2 \cdot 10^7$	$1.1 \cdot 10^7$	$1.1 \cdot 10^7$
T	300 μ K	80 μ K	80 μ K	20 μ K	20 μK
d	2.3 mm	2.3 mm	460 μ m	460 μ m	460 μm

Une séquence expérimentale typique

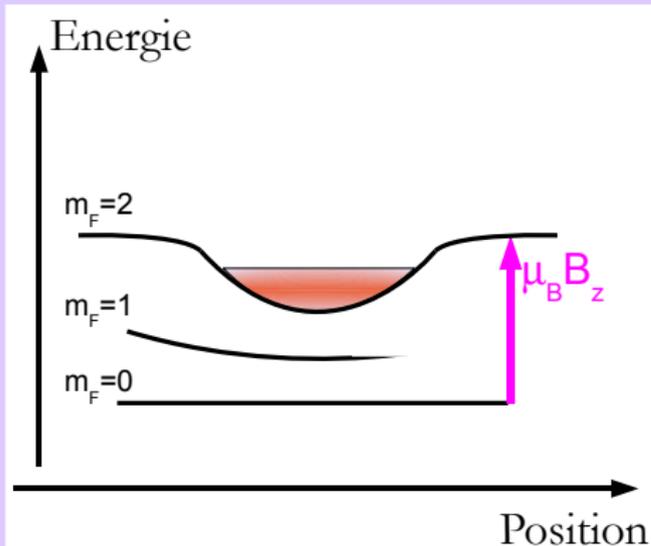


Piégeage magnétique

- $(\nu_{\parallel}, \nu_{\perp}) = (22, 130)$ Hz
- $\gamma_{col} = 8.5 \text{ s}^{-1}$
- $\eta \simeq 10$

	PMO miroir	Transfert au U-MOT	Compression	Mélasse optique	Pompage optique	Piège magnétique
Durée	5 s	20 ms	20 ms	2 ms	0.2 ms	50 ms-100 s
N_{at}	$5 \cdot 10^7$	$4.2 \cdot 10^7$	$1.2 \cdot 10^7$	$1.1 \cdot 10^7$	$1.1 \cdot 10^7$	$3.6 \cdot 10^6$
T	300 μK	80 μK	80 μK	20 μK	20 μK	20 μK
d	2.3 mm	2.3 mm	460 μm	460 μm	460 μm	440 μm

Refroidissement par évaporation forcée



- **Compression adiabatique**

- $d = 85 \mu m$
- $(\nu_{\parallel}, \nu_{\perp}) = (0.1, 6) \text{ kHz}$
- $\gamma_{col} = 4.10^3 \text{ s}^{-1}$

- **Couteau radiofréquence (un fil sur la puce)**

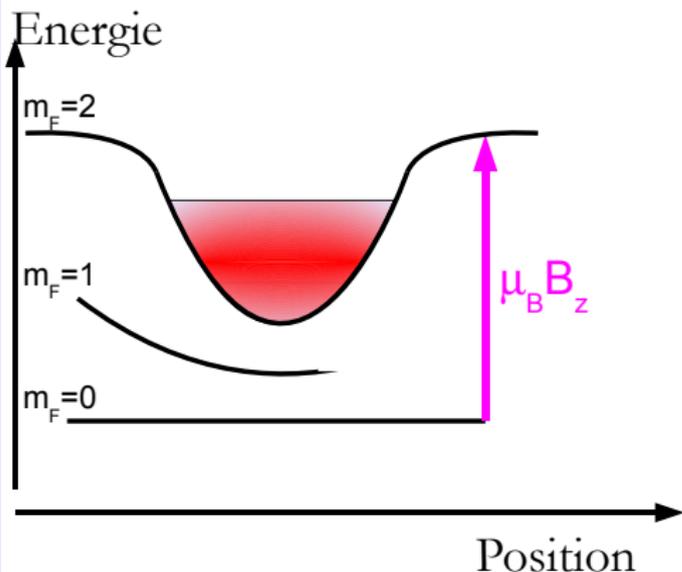
- **Rampe RF : évaporation forcée**

- **Imagerie par absorption**

- **Décompression** puis extinction des champs
- Temps de vol : 17 ms

- **Optimisation de la densité dans l'espace des phases (rapport N/T^3) à chaque étape**

Refroidissement par évaporation forcée



- **Compression adiabatique**

- $d = 85 \mu m$
- $(\nu_{\parallel}, \nu_{\perp}) = (0.1, 6) \text{ kHz}$
- $\gamma_{col} = 4.10^3 \text{ s}^{-1}$

- Couteau radiofréquence (un fil sur la puce)

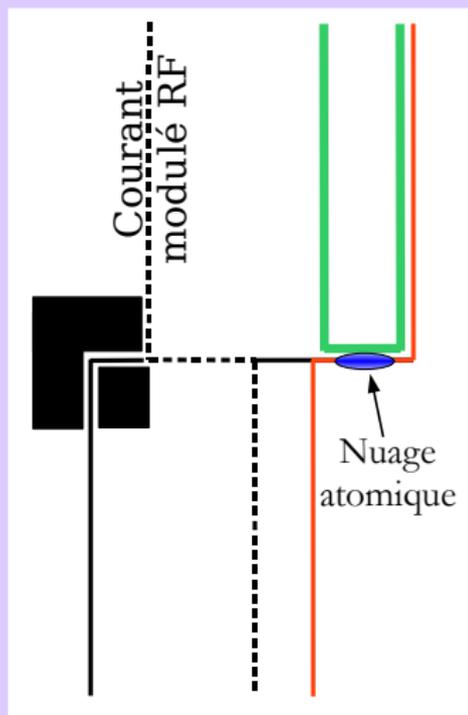
- Rampe RF : évaporation forcée

- Imagerie par absorption

- Décompression puis extinction des champs
- Temps de vol : 17 ms

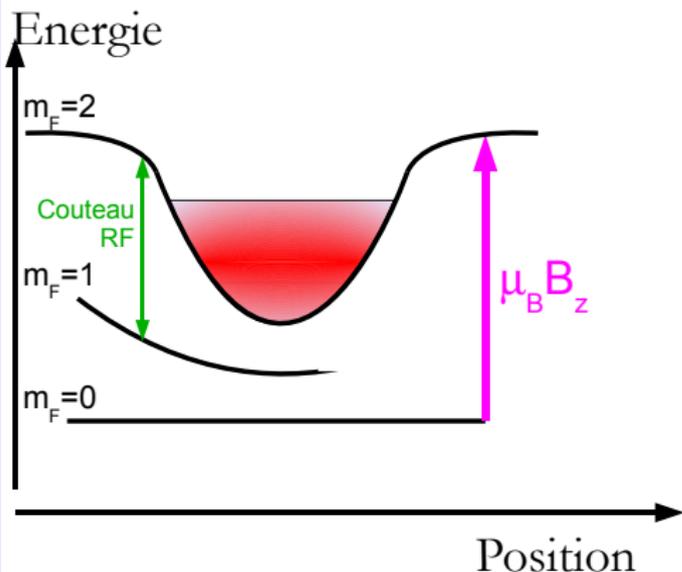
- Optimisation de la densité dans l'espace des phases (rapport N/T^3) à chaque étape

Refroidissement par évaporation forcée



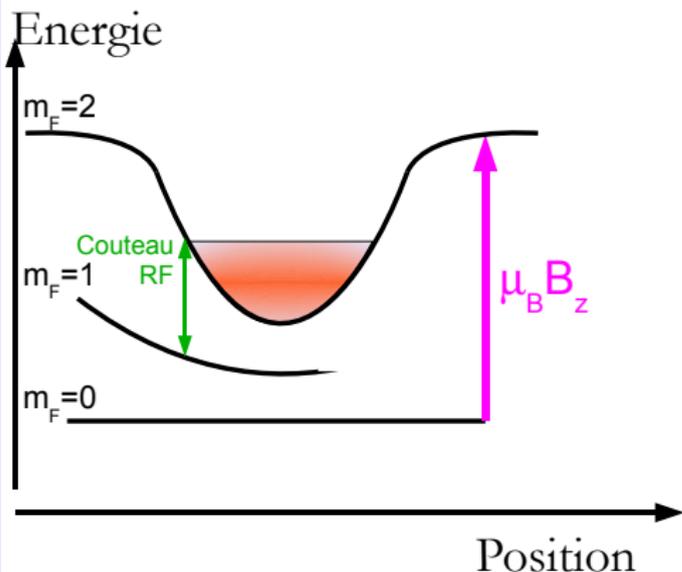
- **Compression adiabatique**
 - $d = 85 \mu m$
 - $(\nu_{\parallel}, \nu_{\perp}) = (0.1, 6) \text{ kHz}$
 - $\gamma_{col} = 4.10^3 \text{ s}^{-1}$
- **Couteau radiofréquence (un fil sur la puce)**
- Rampe RF : évaporation forcée
- Imagerie par absorption
 - Décompression puis extinction des champs
 - Temps de vol : 17 ms
- Optimisation de la densité dans l'espace des phases (rapport N/T^3) à chaque étape

Refroidissement par évaporation forcée



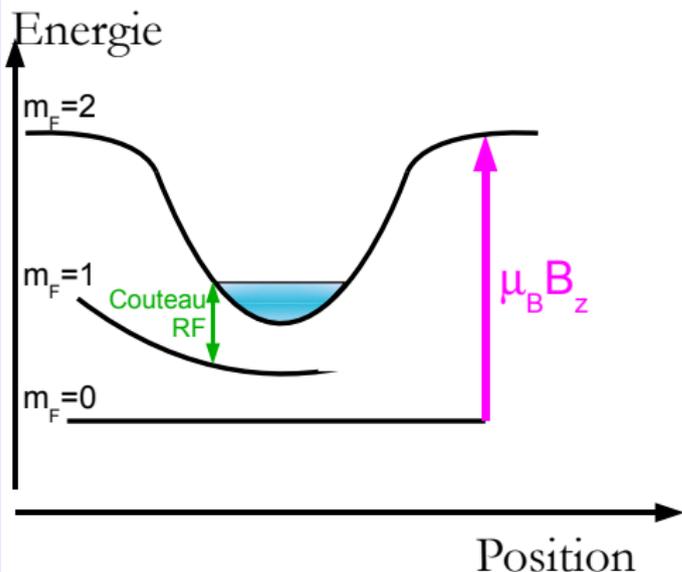
- **Compression adiabatique**
 - $d = 85 \mu m$
 - $(\nu_{\parallel}, \nu_{\perp}) = (0.1, 6) \text{ kHz}$
 - $\gamma_{col} = 4.10^3 \text{ s}^{-1}$
- **Couteau radiofréquence** (un fil sur la puce)
- **Rampe RF** : évaporation forcée
- **Imagerie par absorption**
 - **Décompression** puis extinction des champs
 - Temps de vol : 17 ms
- **Optimisation de la densité** dans l'espace des phases (rapport N/T^3) à chaque étape

Refroidissement par évaporation forcée



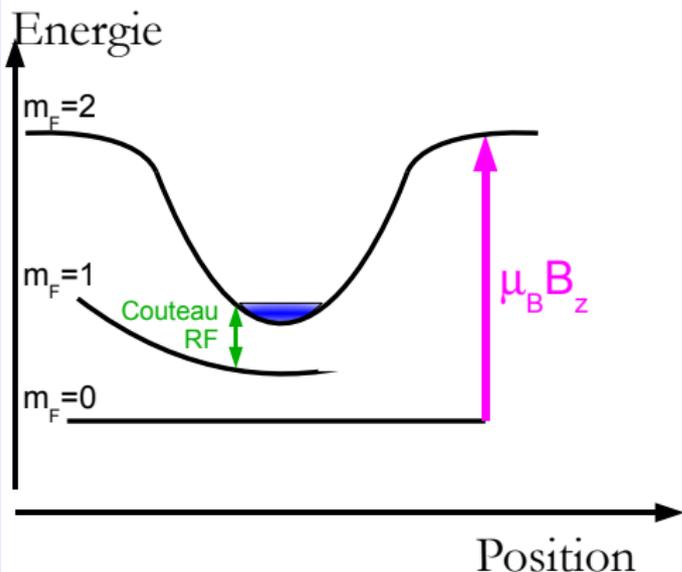
- **Compression adiabatique**
 - $d = 85 \mu\text{m}$
 - $(\nu_{\parallel}, \nu_{\perp}) = (0.1, 6) \text{ kHz}$
 - $\gamma_{\text{col}} = 4.10^3 \text{ s}^{-1}$
- **Couteau radiofréquence** (un fil sur la puce)
- **Rampe RF** : évaporation forcée
- **Imagerie par absorption**
 - Décompression puis extinction des champs
 - Temps de vol : 17 ms
- **Optimisation de la densité dans l'espace des phases** (rapport N/T^3) à chaque étape

Refroidissement par évaporation forcée



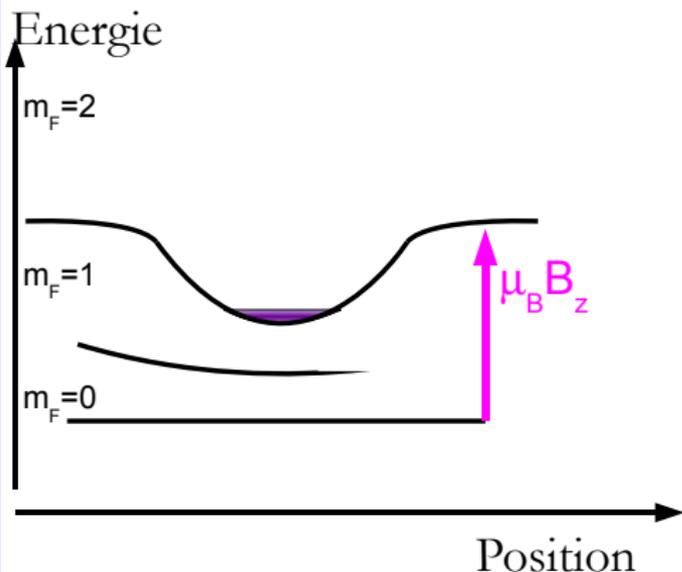
- **Compression adiabatique**
 - $d = 85 \mu\text{m}$
 - $(\nu_{\parallel}, \nu_{\perp}) = (0.1, 6) \text{ kHz}$
 - $\gamma_{\text{col}} = 4.10^3 \text{ s}^{-1}$
- **Couteau radiofréquence** (un fil sur la puce)
- **Rampe RF** : évaporation forcée
- **Imagerie par absorption**
 - Décompression puis extinction des champs
 - Temps de vol : 17 ms
- **Optimisation de la densité dans l'espace des phases** (rapport N/T^3) à chaque étape

Refroidissement par évaporation forcée



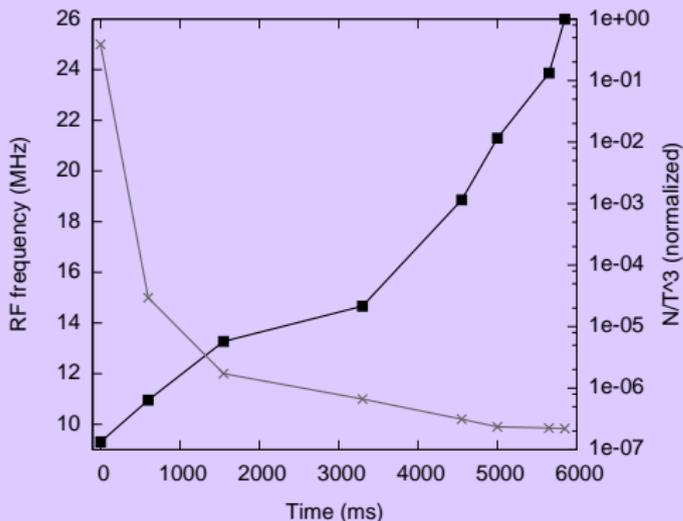
- **Compression adiabatique**
 - $d = 85 \mu\text{m}$
 - $(\nu_{\parallel}, \nu_{\perp}) = (0.1, 6) \text{ kHz}$
 - $\gamma_{\text{col}} = 4.10^3 \text{ s}^{-1}$
- **Couteau radiofréquence** (un fil sur la puce)
- **Rampe RF** : évaporation forcée
- **Imagerie par absorption**
 - **Décompression** puis extinction des champs
 - Temps de vol : 17 ms
- **Optimisation de la densité** dans l'espace des phases (rapport N/T^3) à chaque étape

Refroidissement par évaporation forcée



- **Compression adiabatique**
 - $d = 85 \mu m$
 - $(\nu_{\parallel}, \nu_{\perp}) = (0.1, 6) \text{ kHz}$
 - $\gamma_{col} = 4.10^3 \text{ s}^{-1}$
- **Couteau radiofréquence (un fil sur la puce)**
- **Rampe RF : évaporation forcée**
- **Imagerie par absorption**
 - **Décompression** puis extinction des champs
 - Temps de vol : 17 ms
- Optimisation de la densité dans l'espace des phases (rapport N/T^3) à chaque étape

Refroidissement par évaporation forcée



- **Compression adiabatique**

- $d = 85 \mu m$
- $(\nu_{\parallel}, \nu_{\perp}) = (0.1, 6) \text{ kHz}$
- $\gamma_{col} = 4.10^3 \text{ s}^{-1}$

- **Couteau radiofréquence (un fil sur la puce)**

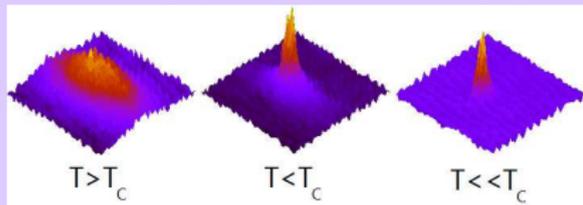
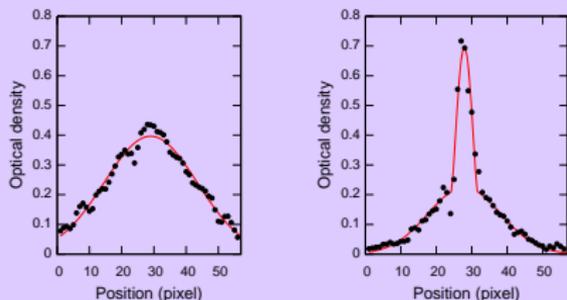
- **Rampe RF : évaporation forcée**

- **Imagerie par absorption**

- **Décompression** puis extinction des champs
- Temps de vol : 17 ms

- **Optimisation de la densité dans l'espace des phases** (rapport N/T^3) à chaque étape

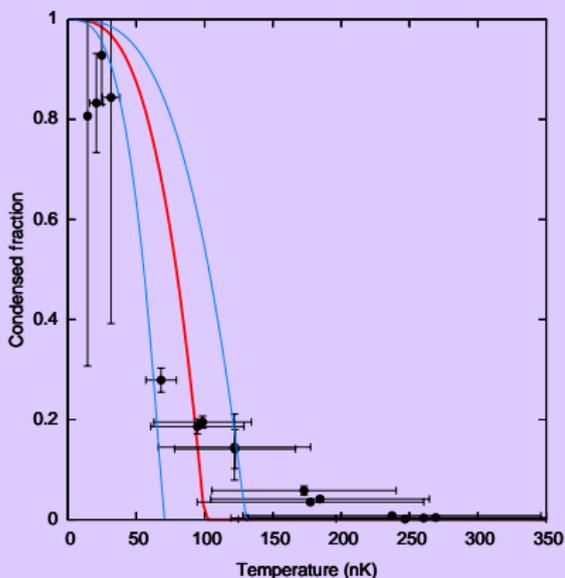
Caractérisation du condensat



C. Roux *et al.*, EPL 2008

- Images d'absorption pour différentes fréquences finales de la rampe d'évaporation RF
- **Distribution bimodale**
 - fraction condensée ajustée par distribution de **Thomas-Fermi**
 - fraction thermique ajustée par une **gaussienne** : mesure de T

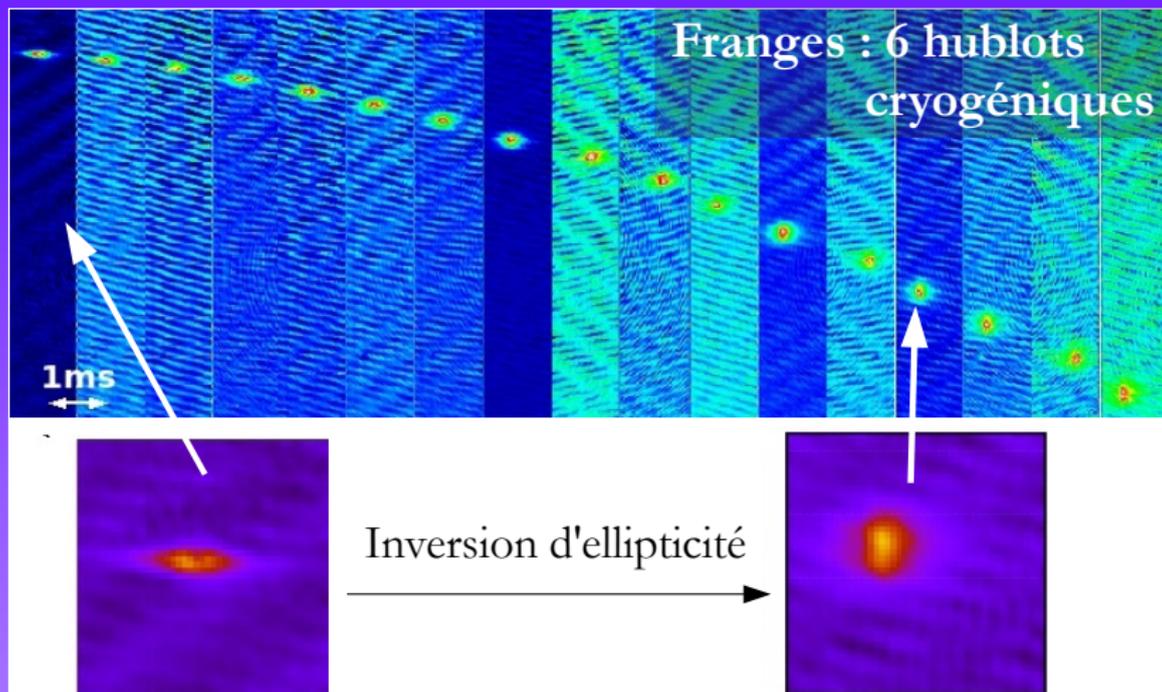
Caractérisation du condensat



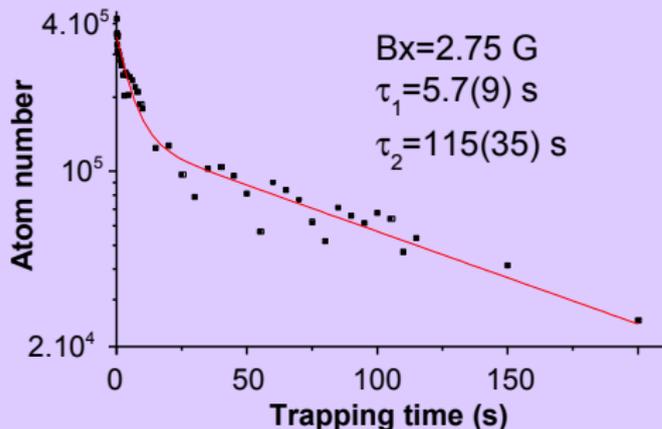
C. Roux *et al.*, EPL 2008

- Images d'absorption pour différentes fréquences finales de la rampe d'évaporation RF
- **Distribution bimodale**
 - fraction condensée ajustée par distribution de **Thomas-Fermi**
 - fraction thermique ajustée par une **gaussienne** : mesure de T
- **Fraction condensée** vs. T condensat quasi-pur
- **Transition** pour $T_C = 100(30)$ nK piège lâche (700 nK dans piège comprimé)
 $N = 1.0(5) \cdot 10^4$

Caractérisation du condensat

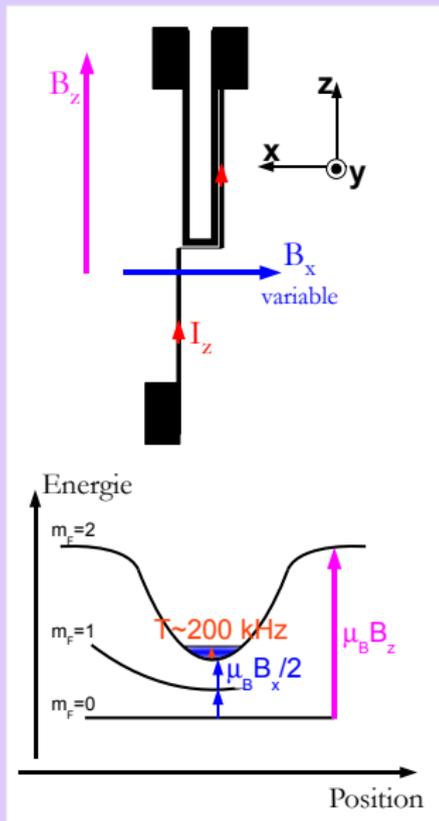


Mesures de durée de vie



- Première mesure à $d = 450 \mu\text{m}$: $\tau = 115 \text{ s}$
T. Nirrengarten *et al.*, PRL 2006
- Près de la surface : Temps de vie s'effondre très rapidement
- Mesure des pertes atomiques en fonction du fond du piège (B_x). Résolution : 200 kHz
- Pics de bruit technique à des fréquences précises :
 - alimentation de courant
 - boucles de masse
 - climatisation
- Améliorations en cours
2 min \rightarrow 12 min ($d = 450 \mu\text{m}$)

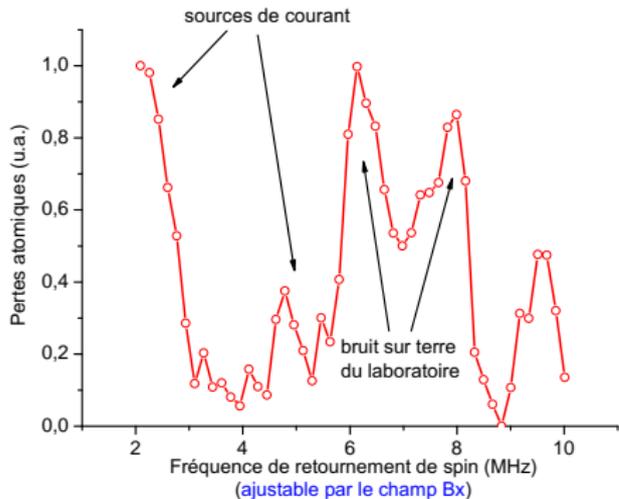
Mesures de durée de vie



- Première mesure à $d = 450 \mu\text{m} : \tau = 115 \text{ s}$
T. Nirrengarten *et al.*, PRL 2006
- Près de la surface : Temps de vie s'effondre très rapidement
- Mesure des pertes atomiques en fonction du fond du piège (B_x). Résolution : 200 kHz
- Pics de bruit technique à des fréquences précises :
 - alimentation de courant
 - boucles de masse
 - climatisation
- Améliorations en cours
2 min \rightarrow 12 min ($d = 450 \mu\text{m}$)

Mesures de durée de vie

Nombre d'atomes piégés après 2 s en fonction de la fréquence Zeeman au fond du piège, gradué en pertes atomiques

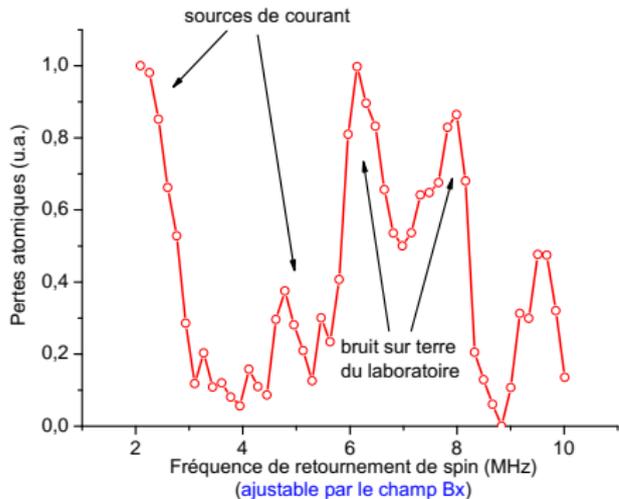


$$d=85 \mu\text{m}, T=1 \mu\text{K}$$

- Première mesure à $d = 450 \mu\text{m} : \tau = 115 \text{ s}$
T. Nirrengarten *et al.*, PRL 2006
- **Près de la surface** : Temps de vie s'effondre très rapidement
- Mesure des **pertes atomiques** en fonction du fond du piège (B_x). Résolution : 200 kHz
- Pics de **bruit technique** à des fréquences précises :
 - alimentation de courant
 - boucles de masse
 - climatisation
- **Améliorations** en cours
2 min \rightarrow 12 min ($d = 450 \mu\text{m}$)

Mesures de durée de vie

Nombre d'atomes piégés après 2 s en fonction de la fréquence Zeeman au fond du piège, gradué en pertes atomiques



$$d=85 \mu\text{m}, T=1 \mu\text{K}$$

- Première mesure à $d = 450 \mu\text{m} : \tau = 115 \text{ s}$
T. Nirrengarten *et al.*, PRL 2006
- **Près de la surface** : Temps de vie s'effondre très rapidement
- Mesure des **pertes atomiques** en fonction du fond du piège (B_x). Résolution : 200 kHz
- Pics de **bruit technique** à des fréquences précises :
 - alimentation de courant
 - boucles de masse
 - climatisation
- **Améliorations** en cours
2 min \rightarrow 12 min ($d = 450 \mu\text{m}$)

Résumé

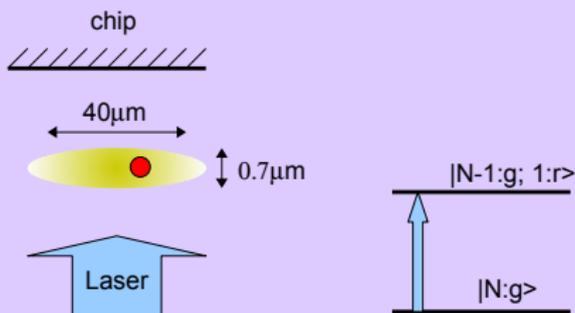
- Le premier condensat de Bose-Einstein sur une puce à atomes supraconductrice
- Environ 10^4 atomes à $T_c = 100$ nK (après décompression)
- Mesures de **temps de vie en fonction de la distance**
 - Bruit technique : résolution en cours
 - Pour mesurer l'effet du supraconducteur, le système doit être très propre !

Plan de l'exposé

- 1 INTERACTIONS ATOMES-SURFACE SUPRACONDUCTRICE
- 2 PRÉPARATION D'UN CONDENSAT DE BOSE-EINSTEIN SUR PUCE À ATOMES SUPRACONDUCTRICE
- 3 PERSPECTIVES

Mise en évidence du blocage dipolaire

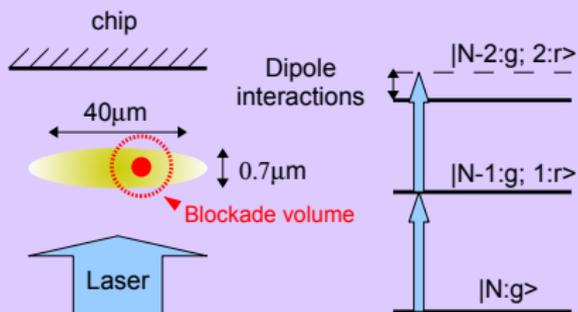
Sujet très actif (Storrs, Stuttgart, Freiburg, Wisconsin, Institut d'optique, Orsay)



- L'interaction dipole-dipole déplace les énergies des états à deux atomes (van der Waals)
- La présence d'un atome de Rydberg bloque l'excitation dans un volume avoisinant.
Ex : $78s_{1/2}$ déplacement de 10 MHz à $R = 3\mu\text{m}$
- Piège « dimple » : besoin d'une nouvelle puce

Mise en évidence du blocage dipolaire

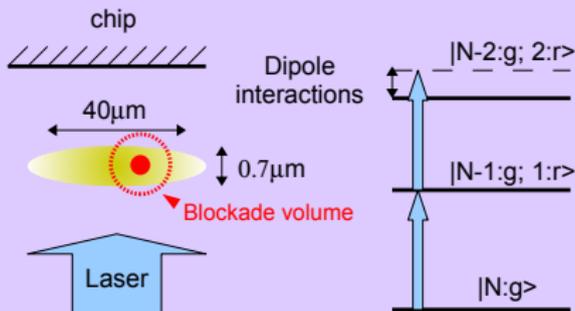
Sujet très actif (Storrs, Stuttgart, Freiburg, Wisconsin, Institut d'optique, Orsay)



- L'interaction dipole-dipole déplace les énergies des états à deux atomes (van der Waals)
- La présence d'un atome de Rydberg bloque l'excitation dans un volume avoisinant.
Ex : $78s_{1/2}$ déplacement de 10 MHz à $R = 3\mu\text{m}$
- Piège « dimple » : besoin d'une nouvelle puce

Mise en évidence du blocage dipolaire

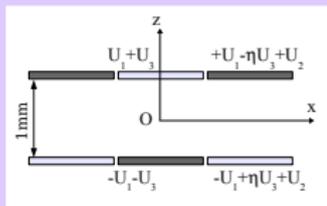
Sujet très actif (Storrs, Stuttgart, Freiburg, Wisconsin, Institut d'optique, Orsay)



- L'interaction dipole-dipole déplace les énergies des états à deux atomes (van der Waals)
- La présence d'un atome de Rydberg bloque l'excitation dans un volume avoisinant.
Ex : $78s_{1/2}$ déplacement de 10 MHz à $R = 3\mu\text{m}$
- Piège « dimple » : besoin d'une nouvelle puce

Et ensuite ?

Piégeage d'un atome de Rydberg



- Atome de Rydberg circulaire = dipôle électrique
- Piégeage électrodynamique
- Manipulation cohérente pendant des secondes !
- P. Hyafil *et al.* PRL 2004, J. Mozley *et al.* EPJD 2005

Et ensuite ?

Piégeage d'un atome de Rydberg

Couplage à une cavité supraconductrice



- **Atome de Rydberg unique**
 - Système à deux niveaux
 - $\nu(n = 50 \rightarrow n = 51) = 51 \text{ GHz}$
- **Cavité linéaire supraconductrice**
 - Guide d'onde planaire
 - Fréquence de résonance 51 GHz
 - Grand facteur de qualité
 - R. Schoelkopf *et al.* (Yale), *Nature* (2004)
- **Couplage entre les deux**
 - Dipôle électrique de l'atome de Rydberg très grand ($\sim 2000ea_0$)
 - Régime de **couplage fort**

Merci pour votre attention !!!

M. Brune

C. Guerlin (CQED)

J. Bernu (CQED)

S. Haroche

J.M. Raimond

S. Deléglise (CQED)

C. Sayrin (CQED)



A. Lupascu

T. Nirrengarten

C. Roux

G. Nogues

A. Emmert

merci aussi aux services techniques, aux secrétariats du laboratoire,
du département, à la DGA