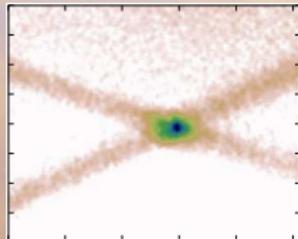
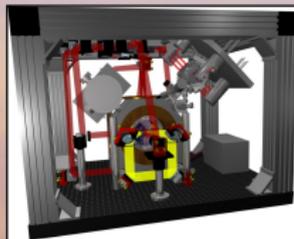


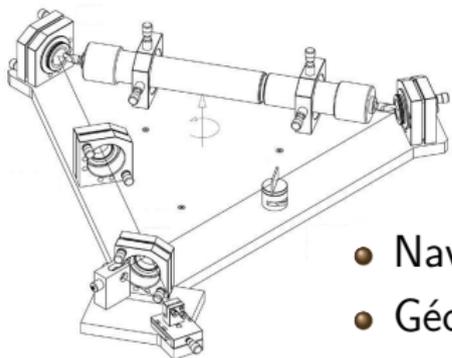
# Sources atomiques pour senseurs inertiels interférométriques à long temps d'interrogation

Gaël Varoquaux

Direction de thèse :  
Alain Aspect – Philippe Bouyer



*Mesures d'accélération, rotation, ...*



## Applications

- Navigation inertielle
- Géodésie
- Tests de physique fondamentale

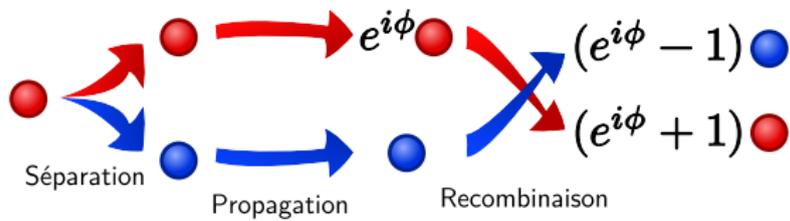
## État de l'art :

### les senseurs interférométriques

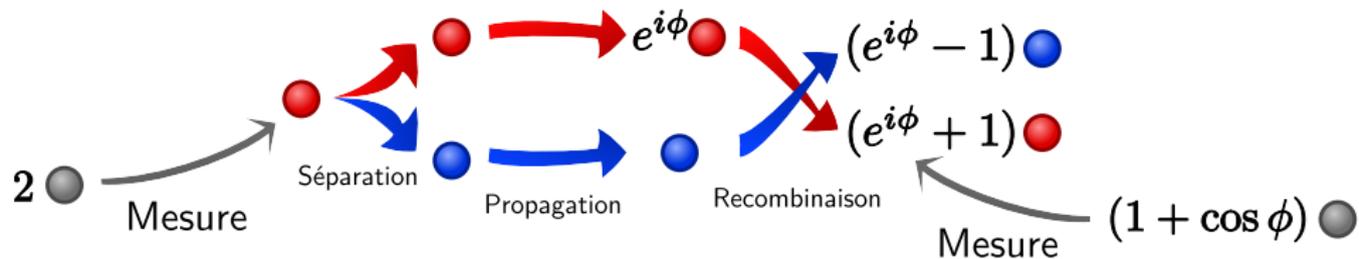
- Gyrolasers
- Suivi interférométrique de masses test



# Interférométrie



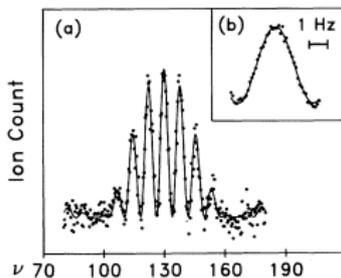
# Interférométrie



**Interférométrie = mesure du déphasage**



**Photons**



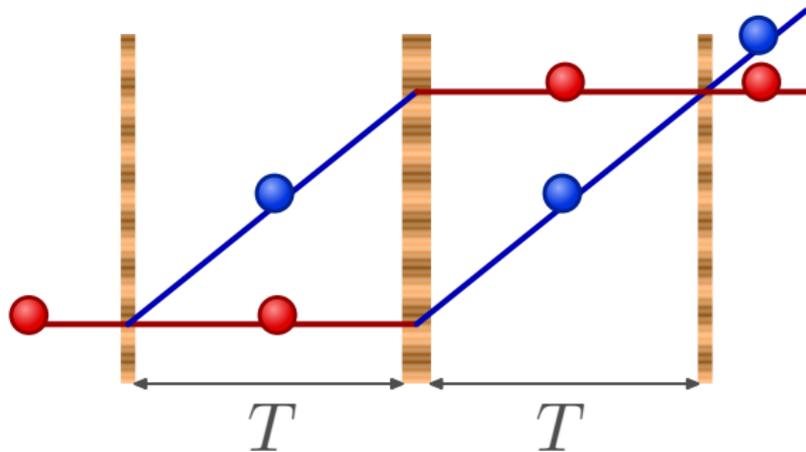
**Atomes**



**Condensat**

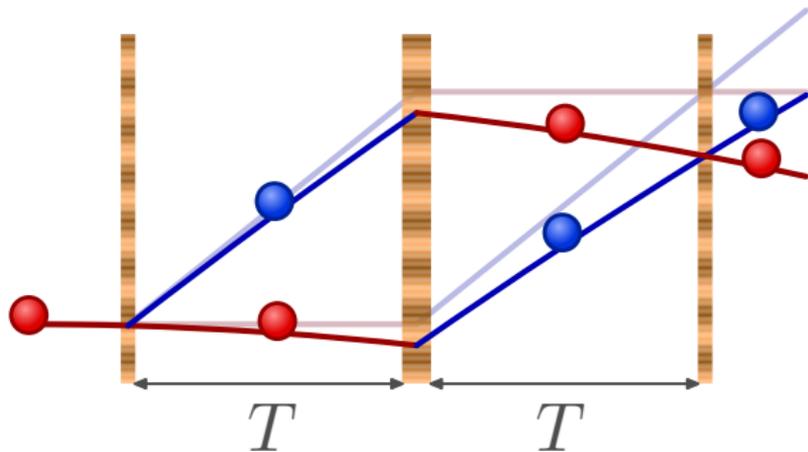
**Le déphasage se traduit par des franges**

# Un accéléromètre atomique



- Atomes défléchis et séparés par des impulsions laser  
⇒ Géométrie à la Mach-Zehnder
- Interféromètre symétrique : déphasage nul

# Un accéléromètre atomique



- Référentiel accéléré  
⇒ déplacement des atomes
- Phase locale des lasers imprimée sur les atomes  
⇒ déphasage atomique dû à la déflexion des atomes

$$\Delta\phi = \mathbf{k}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{a} T^2$$

$$\text{résolution : } \Delta a/a = 10^{-9}$$

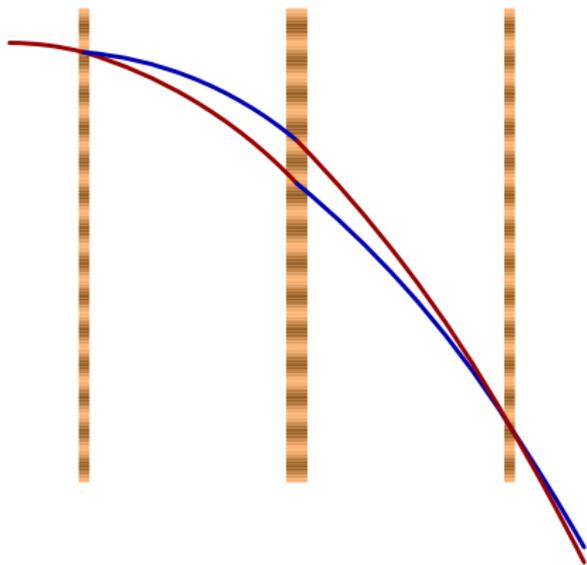
## Augmenter les temps d'interrogation

$$\Delta\phi \propto a T^2$$

# Augmenter les temps d'interrogation

$$\Delta\phi \propto a T^2$$

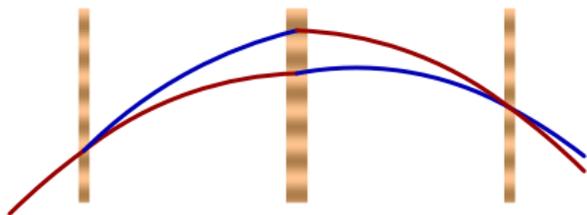
Chute des atomes



# Augmenter les temps d'interrogation

$$\Delta\phi \propto a T^2$$

## Chute des atomes

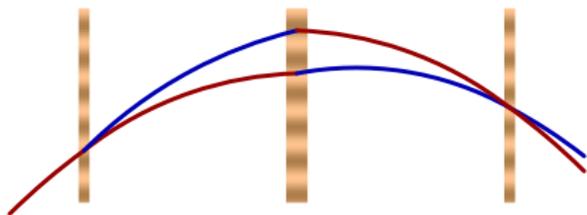


⇒ Fontaine (0.5 s)

# Augmenter les temps d'interrogation

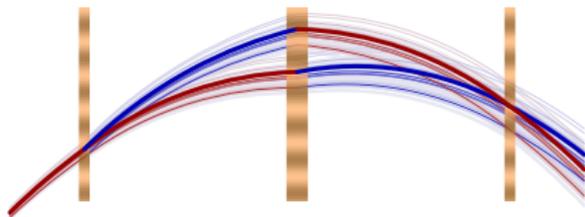
$$\Delta\phi \propto a T^2$$

**Chute des atomes**



⇒ Fontaine (0.5 s)

**Divergence du faisceau**

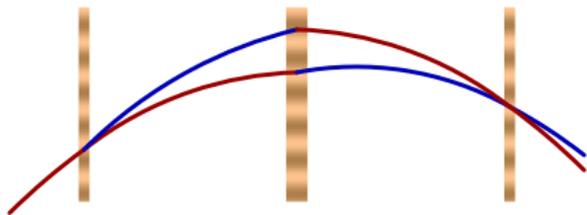


⇒ Atomes froids

# Augmenter les temps d'interrogation

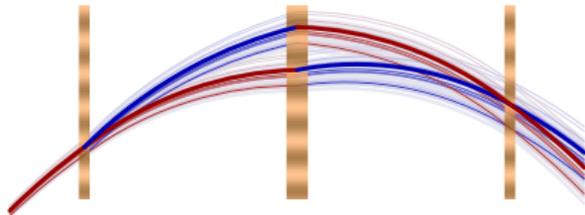
$$\Delta\phi \propto a T^2$$

Chute des atomes



⇒ Fontaine (0.5 s)

Divergence du faisceau



⇒ Atomes froids

Une bonne source atomique :

- ne chute pas
- est collimatée

**1** Interférométrie atomique en chute libre

**2** Vers une source atomique collimatée

# 1 Interférométrie atomique en chute libre

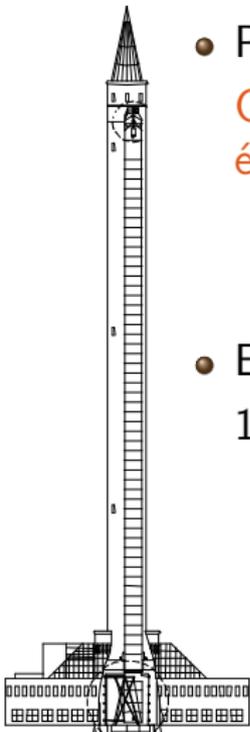
- Le vol en microgravité
- Des mesures en environnement bruité
- Un montage d'atomes froids en microgravité

## Sur Terre, les atomes tombent

- Plate-formes orbitales

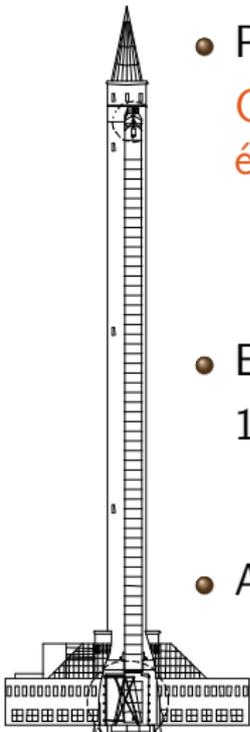
Coût et temps de développement élevés

- Expériences lâchées en chute libre  
100 m, 8 s, 50 g à l'atterrissage

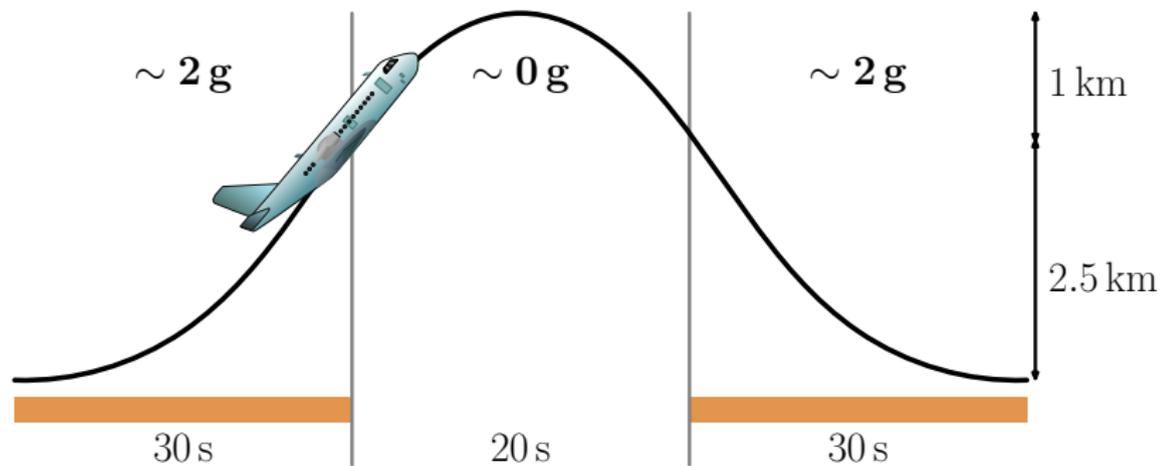


## Sur Terre, les atomes tombent

- Plate-formes orbitales  
Coût et temps de développement élevés
- Expériences lâchées en chute libre  
100 m, 8 s, 50 g à l'atterrissage
- Avions en vols balistiques  
Airbus A300, CNES



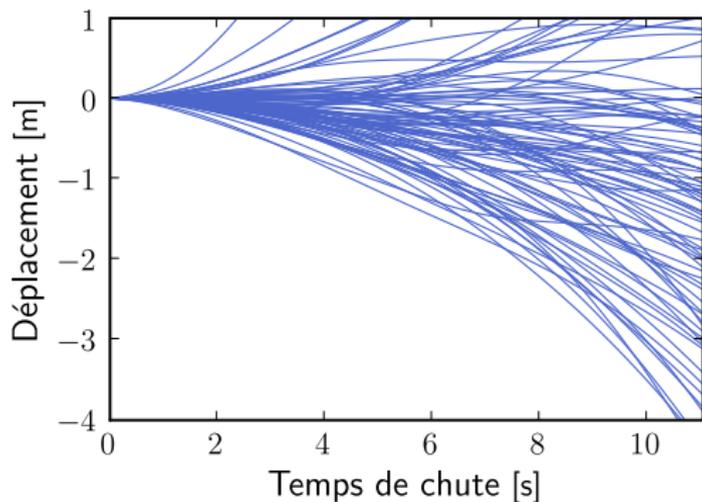
# 1 Microgravité en vols paraboliques



Les pilotes annulent manuellement la gravité

# 1 Microgravité en vols paraboliques

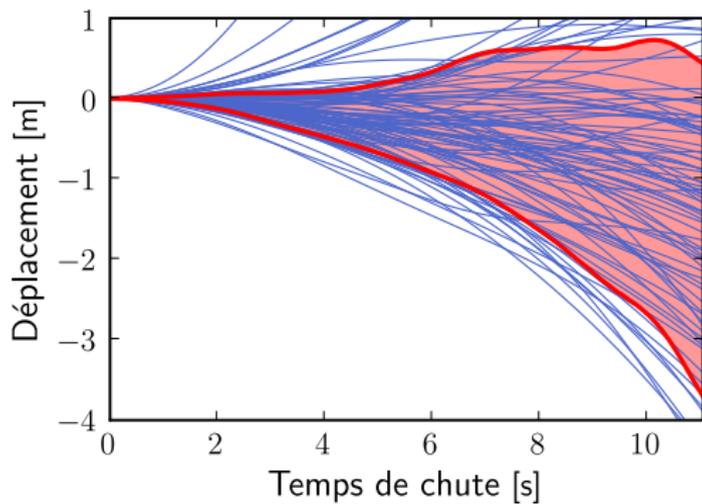
Objet en chute libre dans le référentiel de l'avion



Les pilotes annulent manuellement la gravité

# 1 Microgravité en vols paraboliques

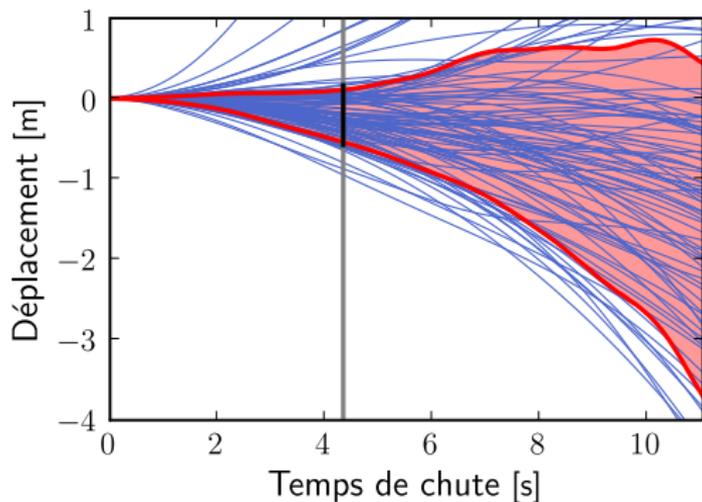
Région contenant 75% des trajectoires



$$d_{75\%} \sim 20 \text{ mm} \exp \frac{t}{0.7 \text{ s}}$$

# 1 Microgravité en vols paraboliques

Région contenant 75% des trajectoires



$$d_{75\%} \sim 20 \text{ mm} \exp \frac{t}{0.7 \text{ s}}$$

4 secondes de vraie chute libre pour 1 m de parcours

## 1 Vers un test du principe d'équivalence

*Tous les corps en chute libre dans un champ gravitationnel suivent la même trajectoire.*

- Deux espèces atomiques : Potassium et Rubidium.
- Un accéléromètre atomique pour mesurer l'accélération.
- 4 secondes de temps de chute (= 80 m )

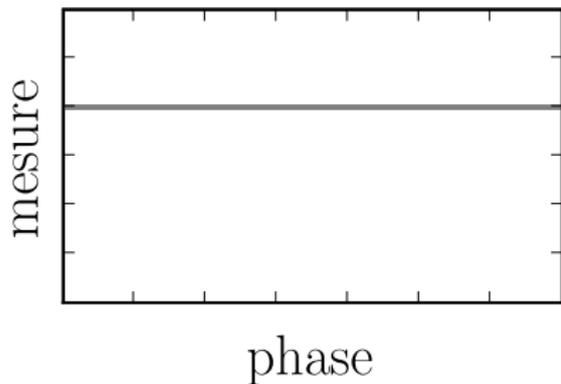
$$\Rightarrow \text{Résolution de } \frac{\Delta a}{a} \sim 10^{-12}$$

# 1 Estimation de l'accélération différentielle

De la mesure à la phase,

$$\text{mesure} = A + B \cos \phi$$

$A, B$  : fluctuent



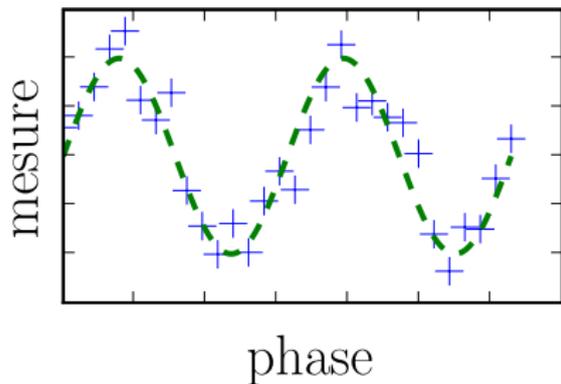
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

De la mesure à la phase,

$$\text{mesure} = A + B \cos \phi$$

$A, B$  : fluctuent

⇒ **Plusieurs mesures**



# 1 Estimation de l'accélération différentielle

De la mesure à la phase,

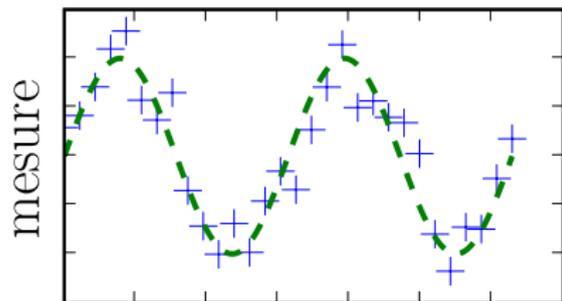
$$\text{mesure} = A + B \cos \phi$$

$A, B$  : fluctuent

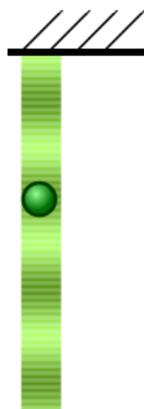
⇒ **Plusieurs mesures**

...à l'accélération

$$\phi = k (a T^2 + X_{\text{miroir}})$$



phase



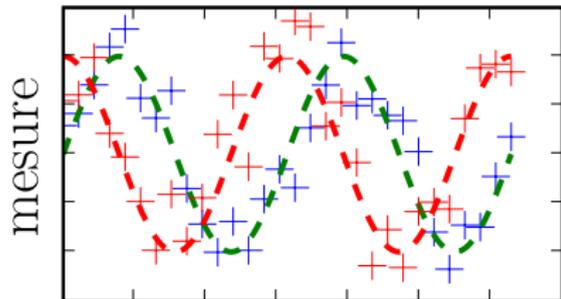
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

De la mesure à la phase,

$$\text{mesure} = A + B \cos \phi$$

$A, B$  : fluctuent

⇒ **Plusieurs mesures**

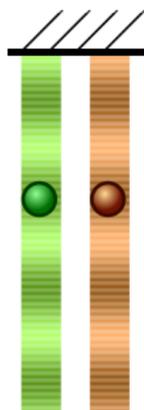


...à l'accélération différentielle

$$\begin{cases} \phi_K &= k (a_K T^2 + X_{\text{miroir}}) \\ \phi_{\text{Rb}} &= k (a_{\text{Rb}} T^2 + X_{\text{miroir}}) \end{cases}$$

Réjection de mode commun

phase



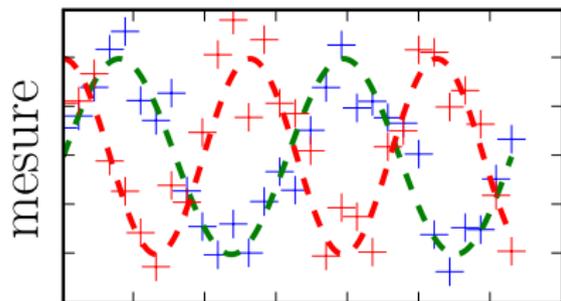
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

De la mesure à la phase,

$$\text{mesure} = A + B \cos \phi$$

$A, B$  : fluctuent

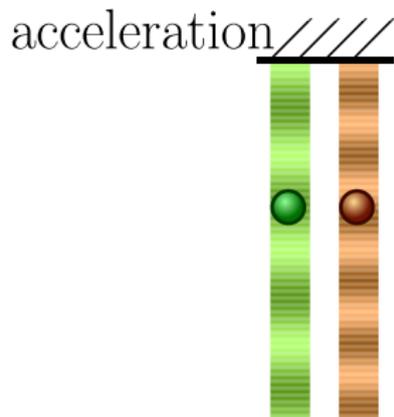
⇒ **Plusieurs mesures**



...à l'accélération différentielle

$$\begin{cases} \phi_K &= k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}}) \\ \phi_{\text{Rb}} &= k_{\text{Rb}} (a_{\text{Rb}} T^2 + X_{\text{miroir}}) \end{cases}$$

Réjection de mode commun



Mais : différence d'accélération  $\neq$  différence de phase

**Corréler des mesures de paraboles différentes**

# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

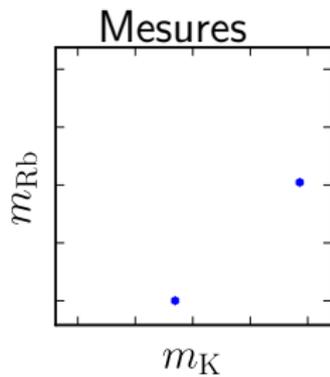
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



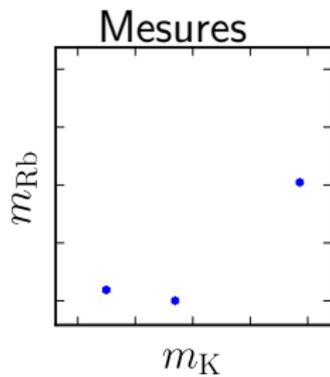
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



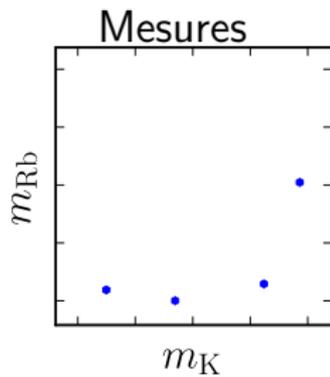
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



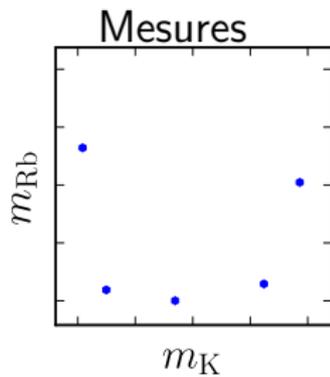
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



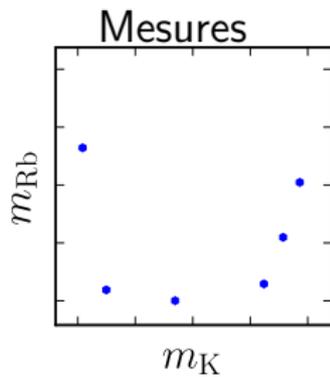
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



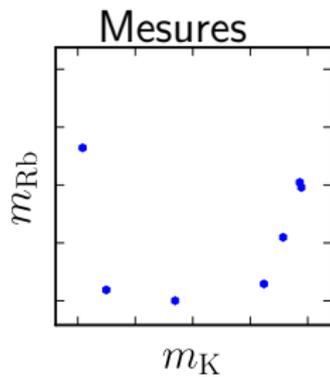
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



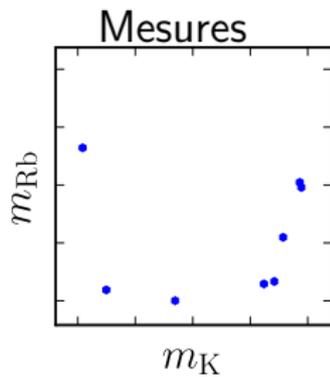
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



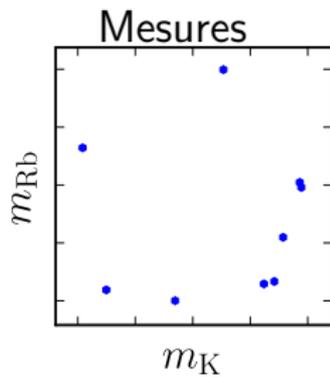
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



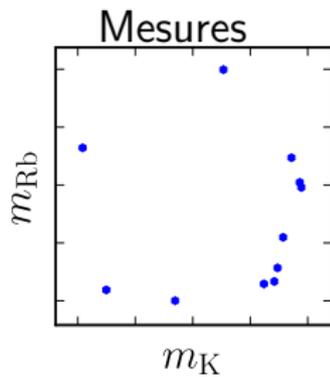
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



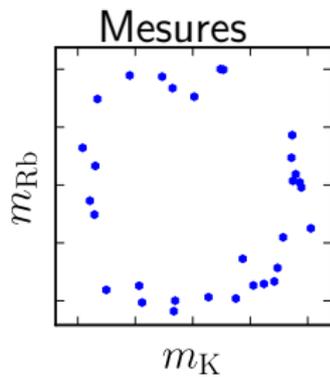
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



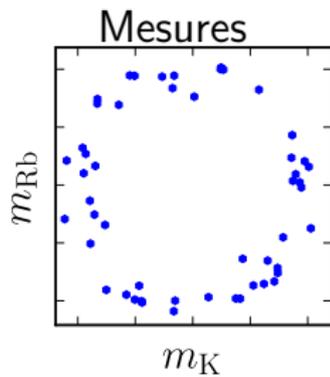
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



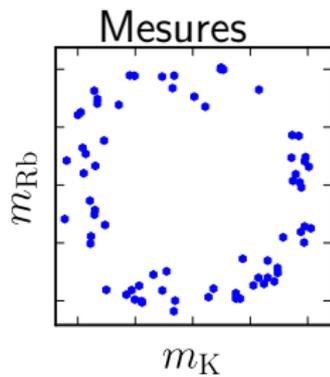
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



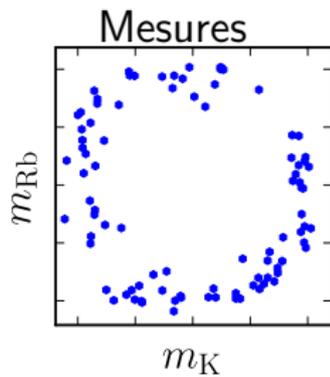
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



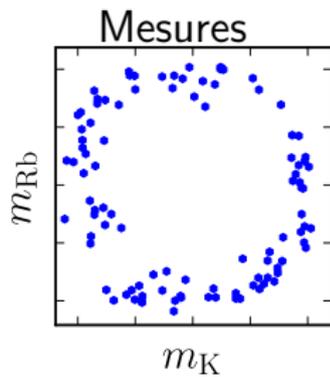
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



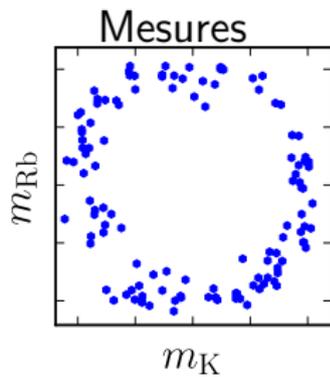
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



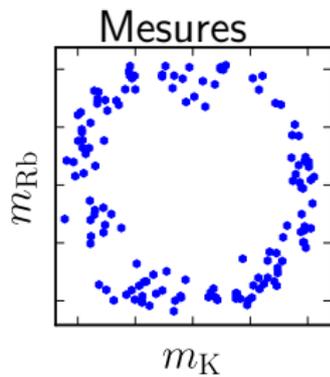
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



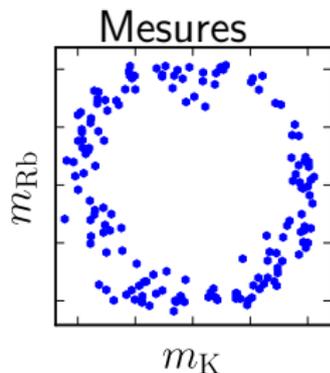
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



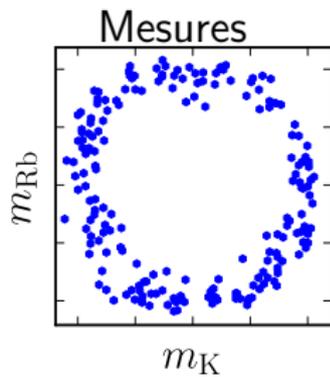
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



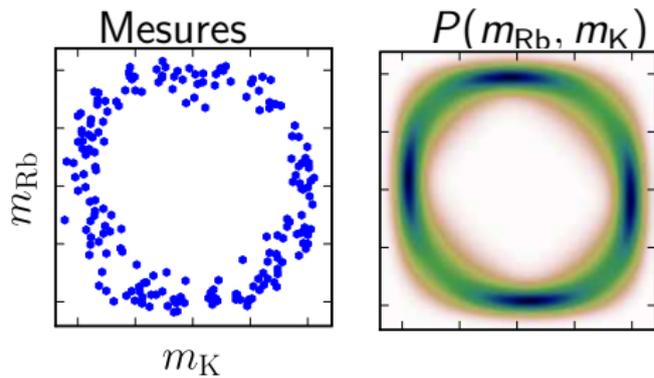
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



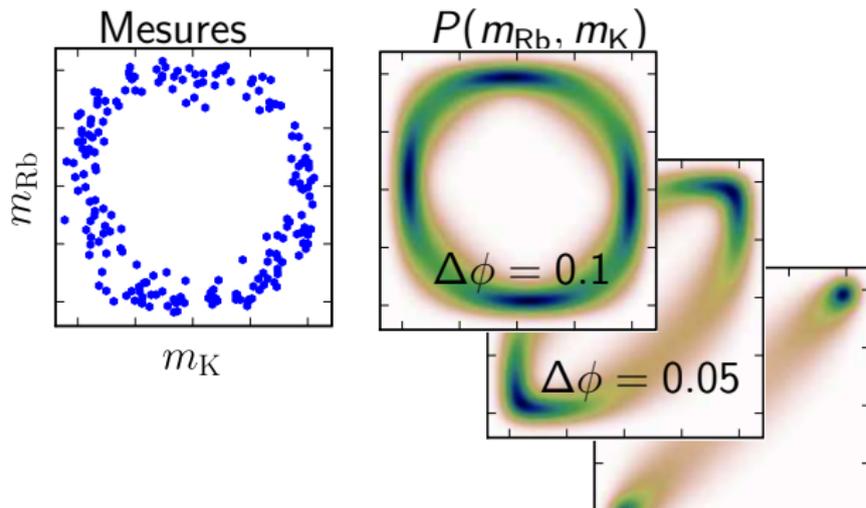
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



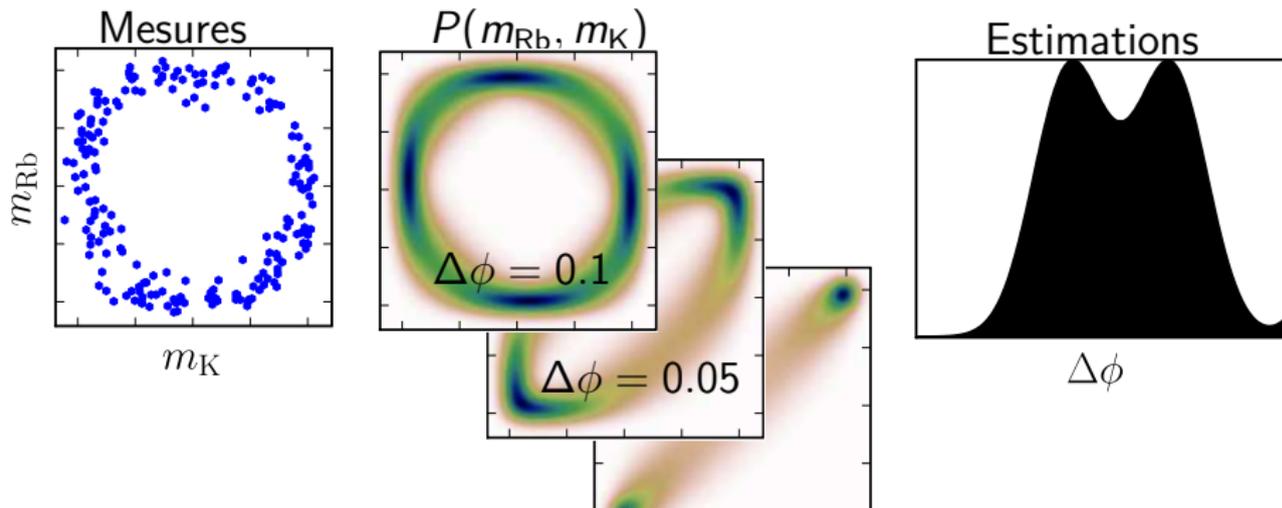
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



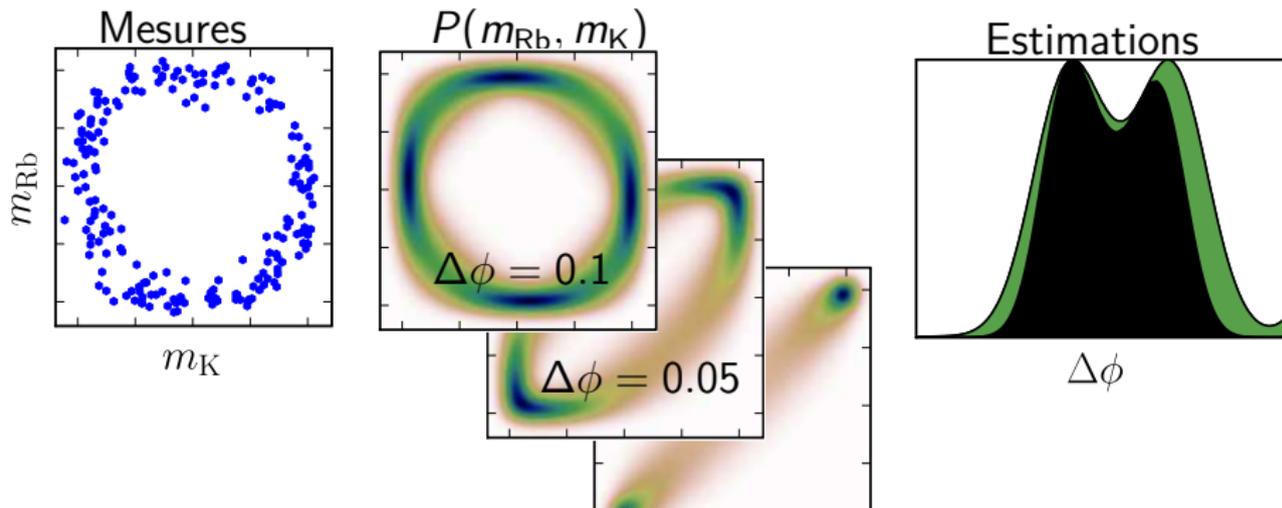
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



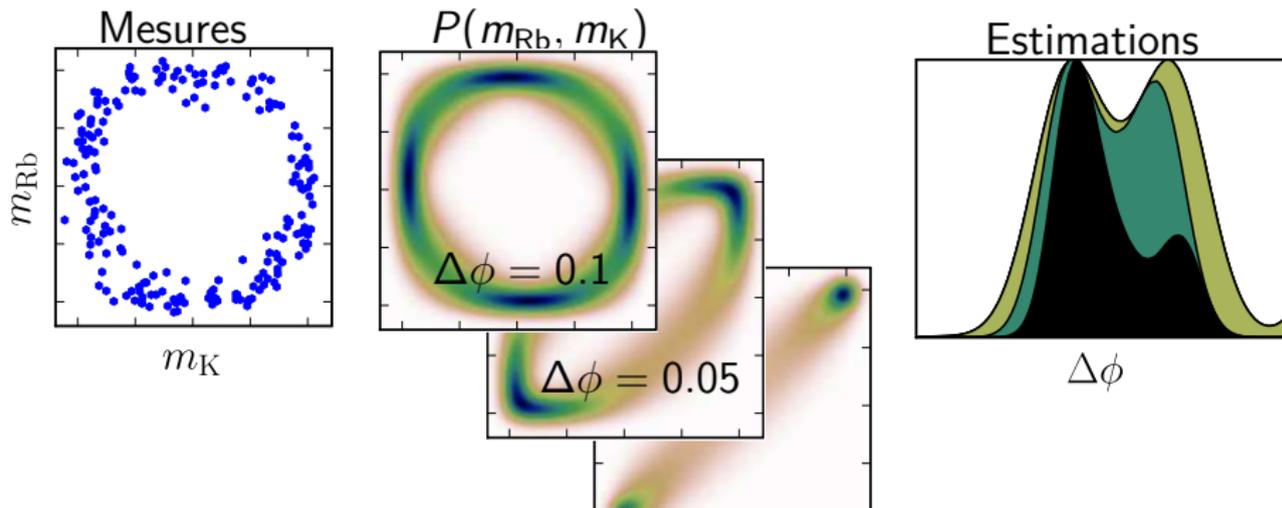
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



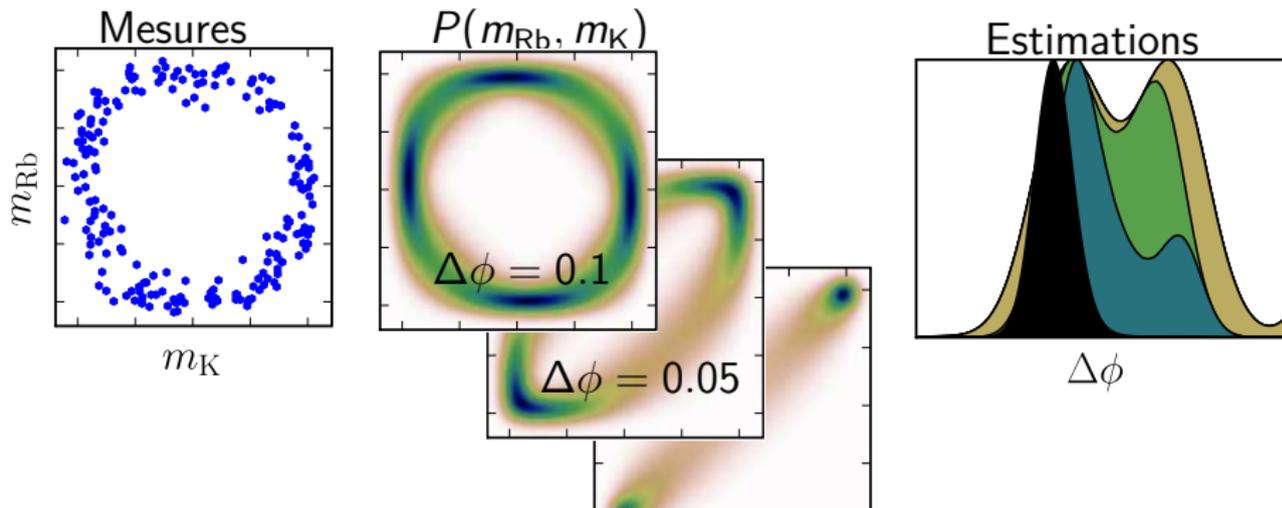
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



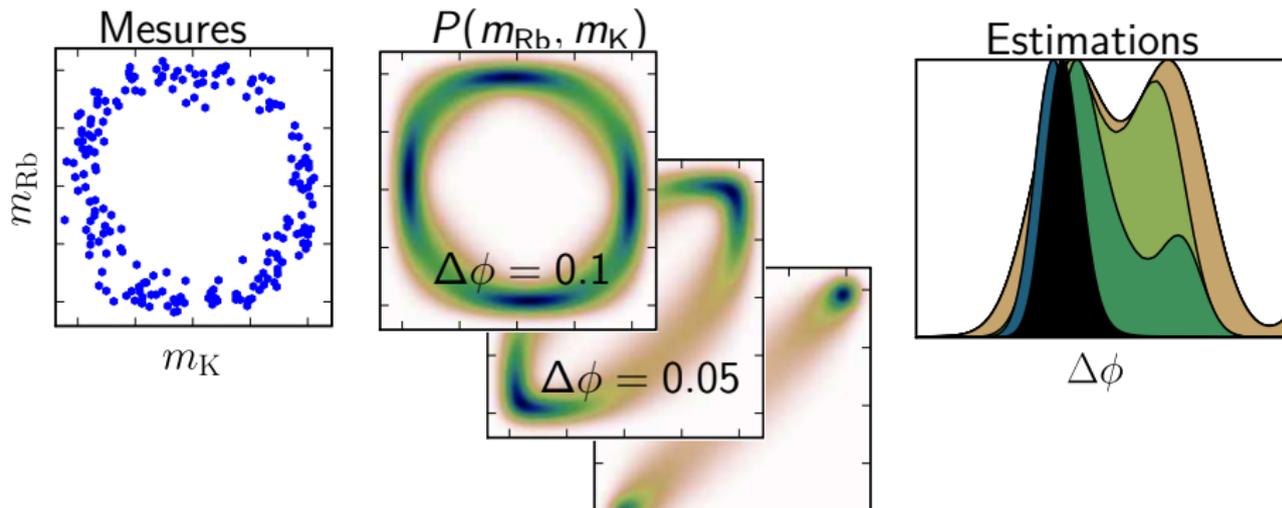
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



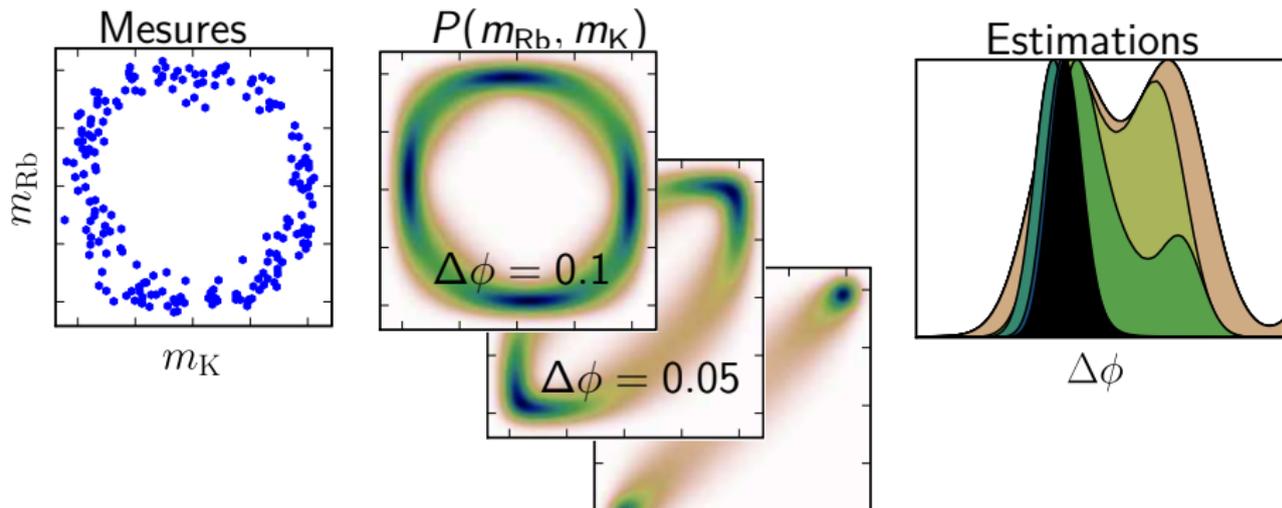
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



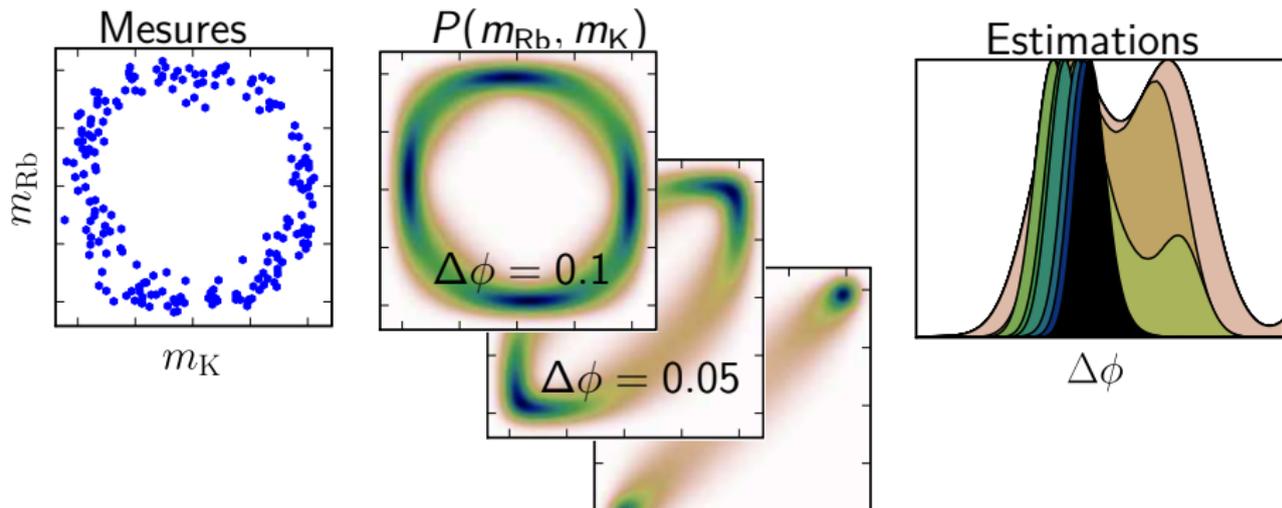
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



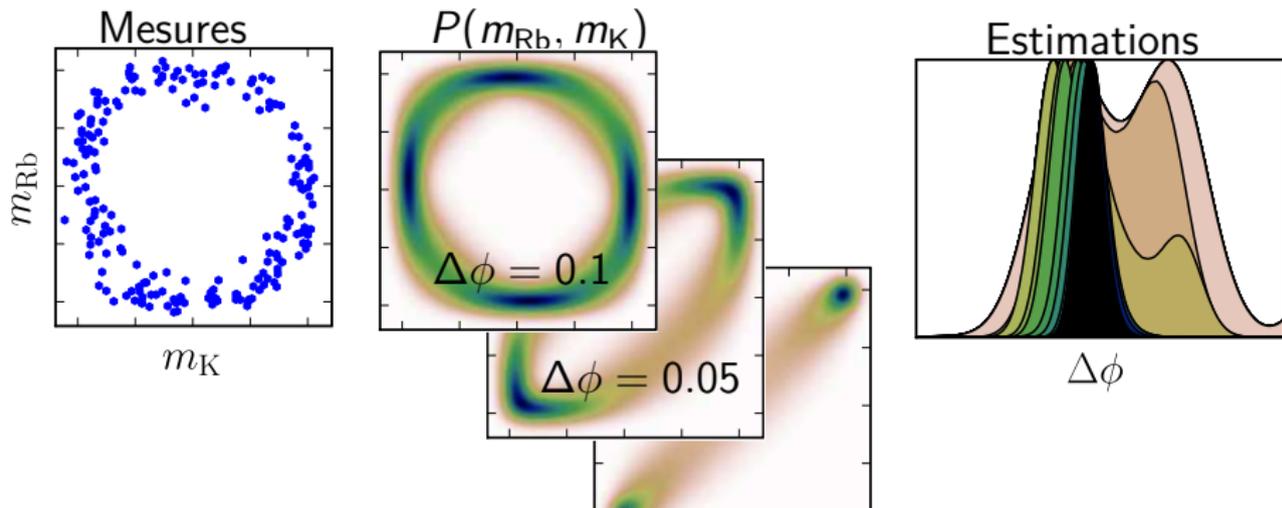
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



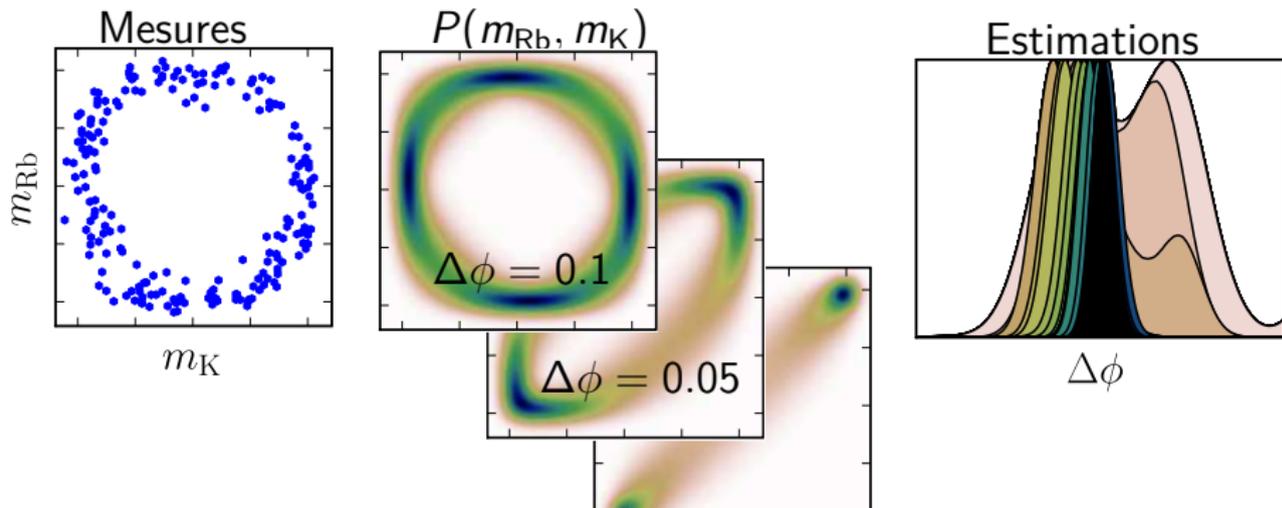
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



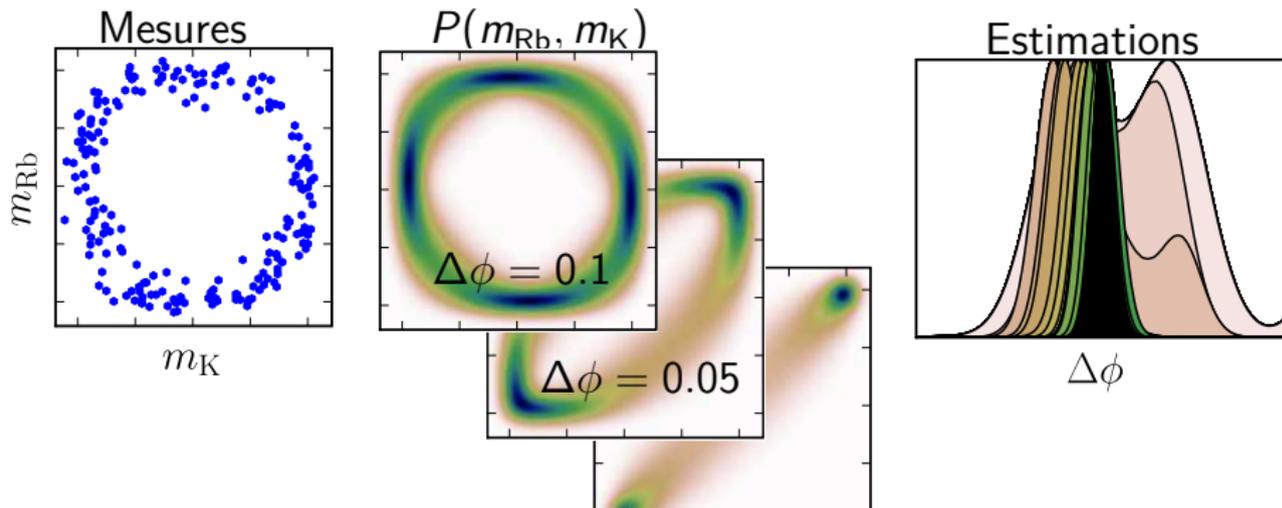
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Estimation Bayésienne

Probabilité de  $\Delta a$  en fonction de  $m_{Rb}$  et  $m_K$



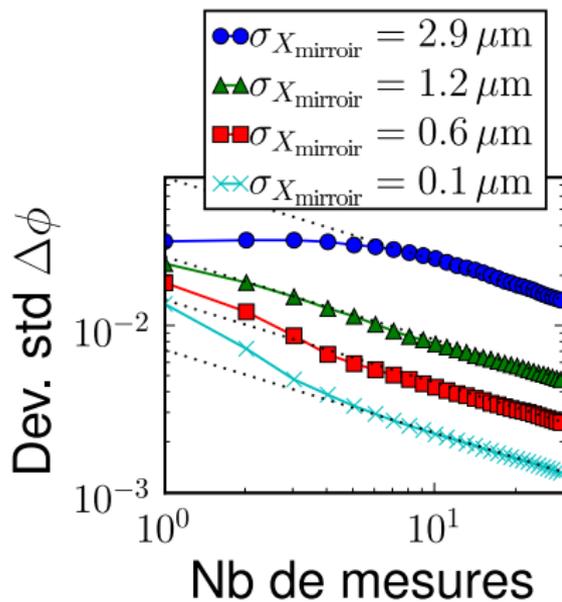
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{Rb} &= C + D \cos(k_{Rb} (a_{Rb} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Convergence de l'estimation

- Conditions suffisamment répétables
  - Expérience en vol libre
  - Configuration insensible à la rotation
- Vibration des miroirs limitées



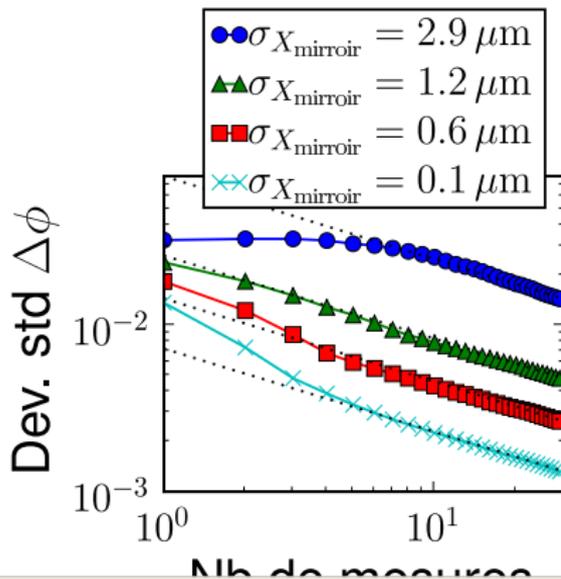
# 1 Estimation de l'accélération différentielle

## Description statistique de l'expérience

$$\begin{cases} m_K &= A + B \cos(k_K (a_K T^2 + X_{\text{miroir}})) \\ m_{\text{Rb}} &= C + D \cos(k_{\text{Rb}} (a_{\text{Rb}} T^2 + X_{\text{miroir}})) \end{cases}$$

## Convergence de l'estimation

- Conditions suffisamment répétables
  - Expérience en vol libre
  - Configuration insensible à la rotation
- Vibration des miroirs limitées



Si  $\sigma_{X_{\text{miroir}}} \sim 0.1 \mu\text{m}$ , en 30 mesures :  $\Delta a/a \sim 5 \cdot 10^{-11}$

# 1 Une source d'atomes froids en microgravité

## Source hyperfréquence



## Lasers



## Chambre d'optique atomique Infrastructure

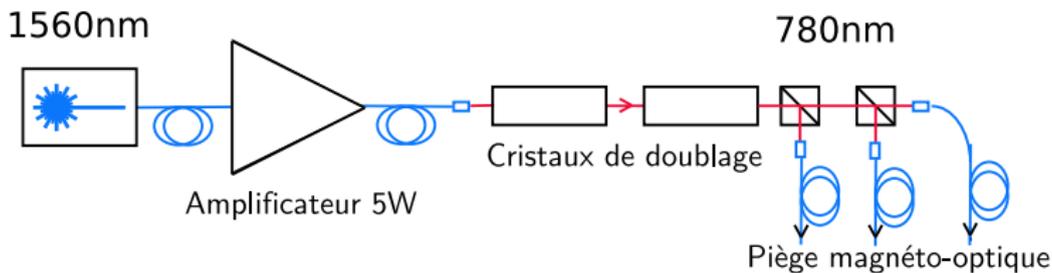


- Jusqu'à 9 g solidité structurelle
- 6°C–20°C cyclage thermique
- coupure de courant
- pression : 800–1000 hPa

- 4 mois
- 2m×2m
- 700Kg
- 1100VA

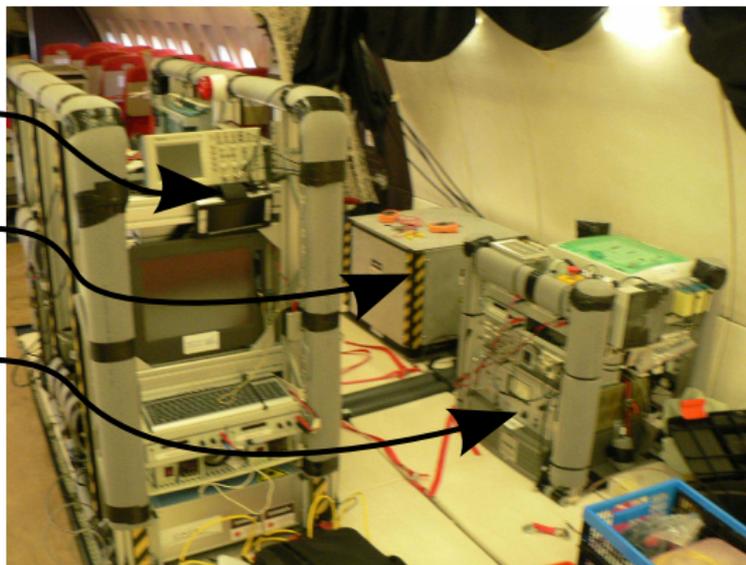
# 1 Une source d'atomes froids en microgravité

## Sources laser télécom doublées



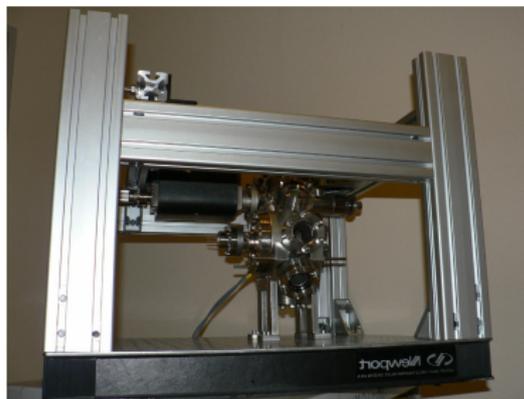
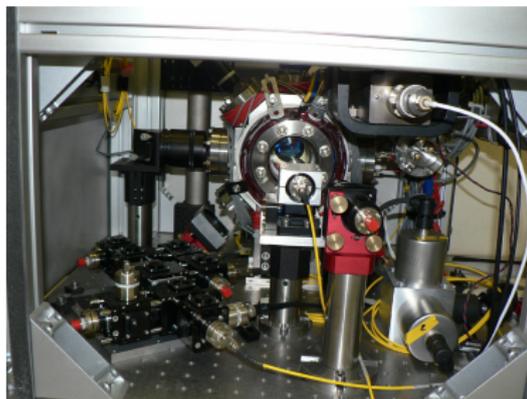
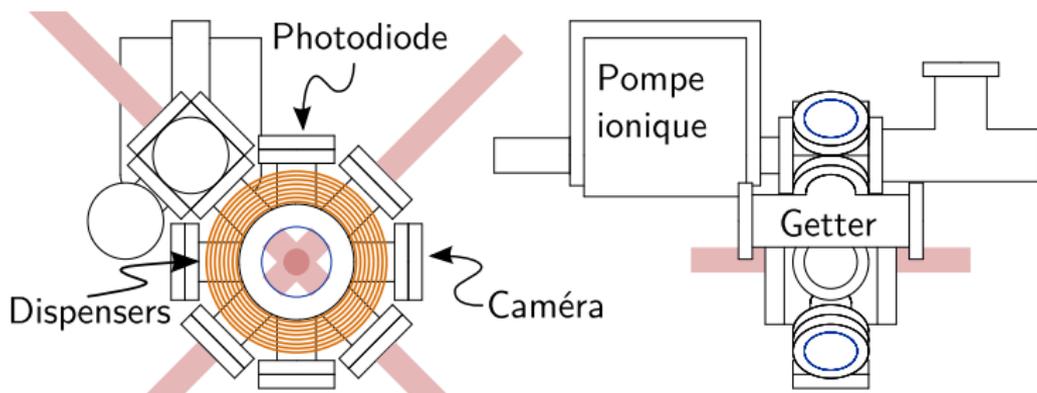
## Bâtis expérimentaux

- Bâti de lasers et contrôle  
450 Kg
- Bâti de physique atomique  
150 Kg
- Bâti d'alimentation  
100 Kg



# 1 Une source d'atomes froids en microgravité

## Chambre de physique atomique

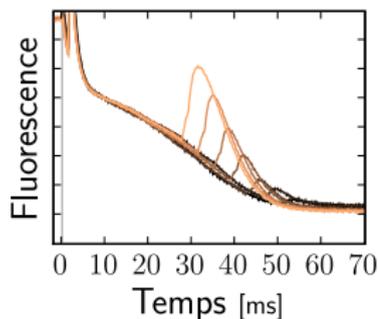
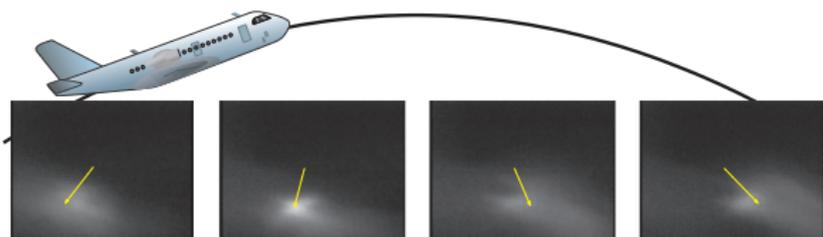


# 1 Résultats de la campagne de vol

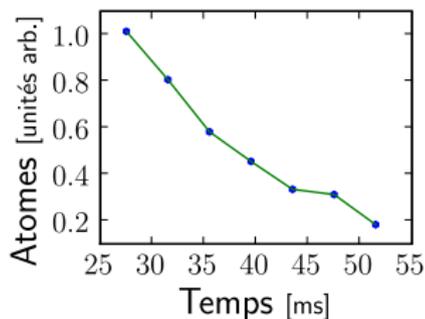
PMO très robuste  
( $\sim 10^9$  at)



Le champ magnétique terrestre déséquilibre les mélasses optiques



Temps de vol



G. Varoquaux *et al.*, Proceeding Rencontres de Moriond (2007)

## Test du principe d'équivalence

4 s de chute libre + estimateur Bayésien

$$\Rightarrow \frac{\Delta a}{a} \sim 5 \cdot 10^{-11}$$

## Mise en place d'une expérience d'atomes froids en microgravité

Nouvelle campagne de vols en février

## **2** Vers une source atomique collimatée

- Sources atomiques collimatées
- Le montage expérimental
- Des atomes dans le piège optique

## 2 Sources atomiques collimatées

**Collimation**

$$\Delta v \sim \frac{\hbar}{m \lambda_{\text{dB}}}$$

**Rapport signal à bruit**

Maximiser le nombre de particules par volume de cohérence,  
 $n \lambda_{\text{dB}}^3$

⇒ Paramètre clé :  $\lambda_{\text{dB}}$

**Interférométrie avec des gaz atomiques dégénérés**

## 2 Sources atomiques collimatées

### Collimation

$$\Delta v \sim \frac{\hbar}{m \lambda_{\text{dB}}}$$

### Rapport signal à bruit

Maximiser le nombre de particules par volume de cohérence,  
 $n \lambda_{\text{dB}}^3$

⇒ Paramètre clé :  $\lambda_{\text{dB}}$

## Interférométrie avec des gaz atomiques dégénérés

### Condensats de Bose

#### Interactions :

- erreurs systématiques
- diminution de  $\lambda_{\text{dB}}$

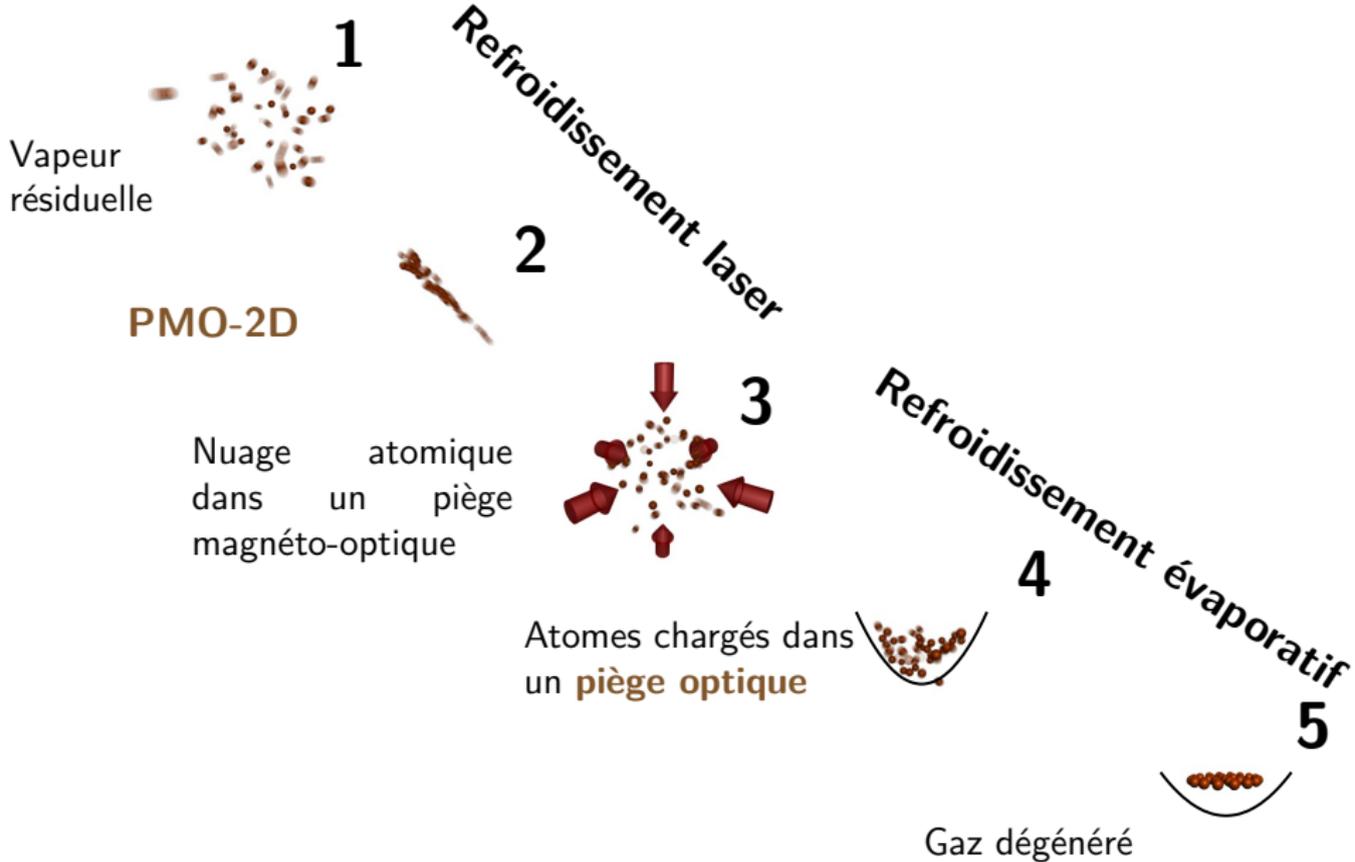
### Gaz de Fermi

#### Blocage de Pauli :

- pas d'erreurs systématiques
- élargissement spectral

$\lambda_{\text{dB}}$  seulement légèrement meilleur pour les Bosons

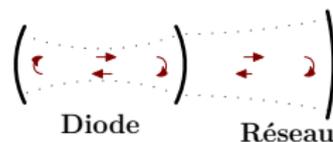
## 2 Produire des gaz atomiques dégénérés



## 2 Sources laser

### Diode laser en cavité étendue

⇒ spectralement fin + accordable



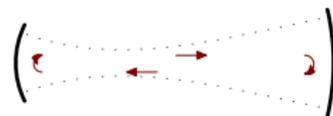
Diodes pour 780 nm : ne marchent **pas** à 767 nm (potassium)

### Diode traité anti-reflet en cavité étendue

⇒ pas de compétition entre cavités

+ plage de fonctionnement élargie

**Accordable sur 30 nm**



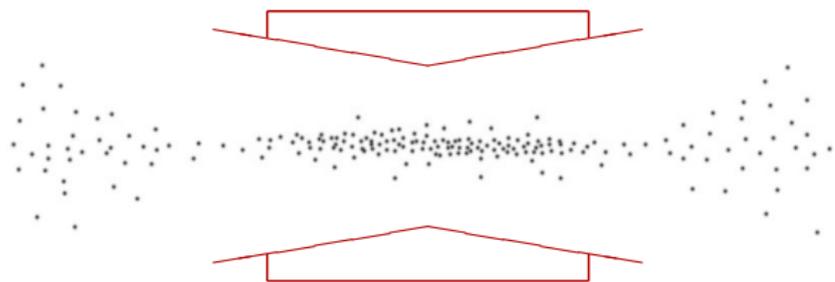
### Amplificateurs semi-conducteurs

⇒ 800 mW de puissance de sortie

**Largeur spectrale de 700 kHz**

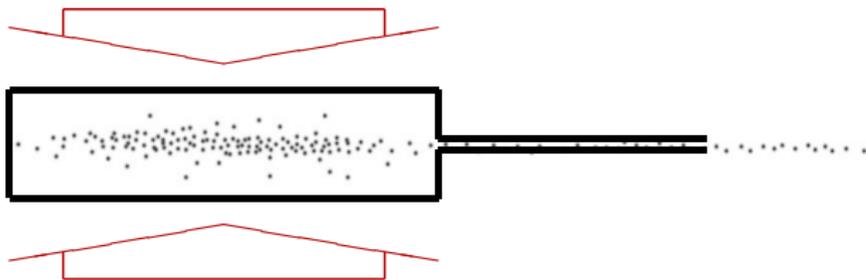
## 2 Jet atomique

piège magnéto-optique 2D

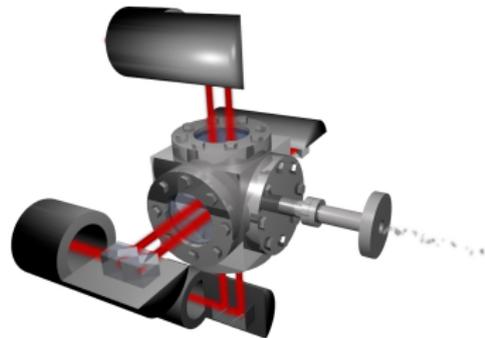


## 2 Jet atomique

### piège magnéto-optique 2D



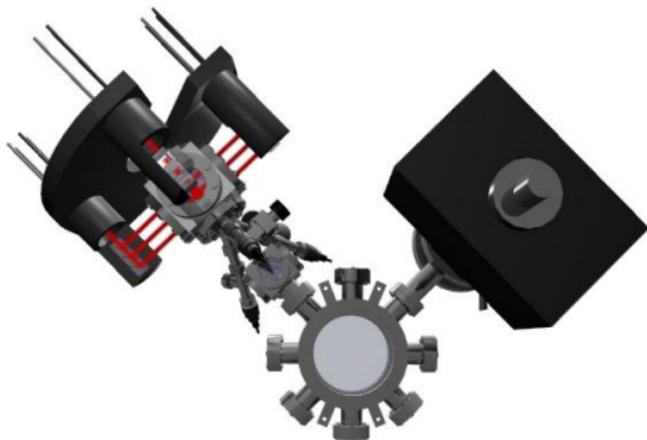
- Faisceaux transverses retro-réfléchis
- Faisceau pousseur



$5 \cdot 10^8$  atomes capturés dans un piège magnéto-optique

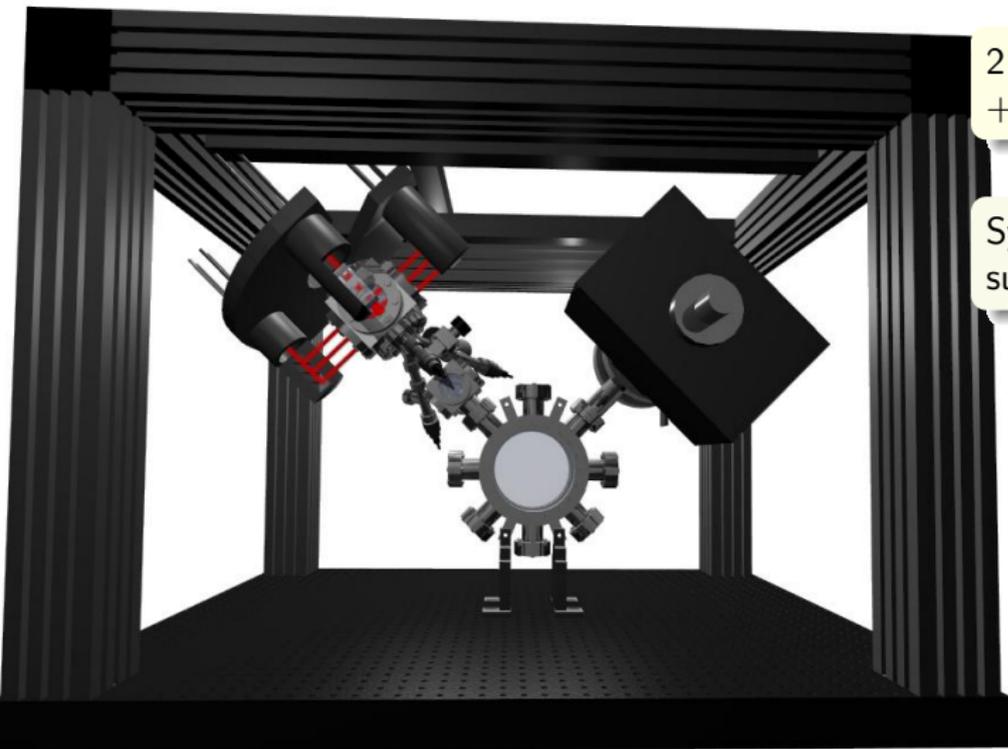
## 2 Agencement de l'enceinte

2 chambres  
+ pompes



R. Nyman, G. Varoquaux *et al.* *App. Phys. B*, **84**, 673-681 (2006)

## 2 Agencement de l'enceinte

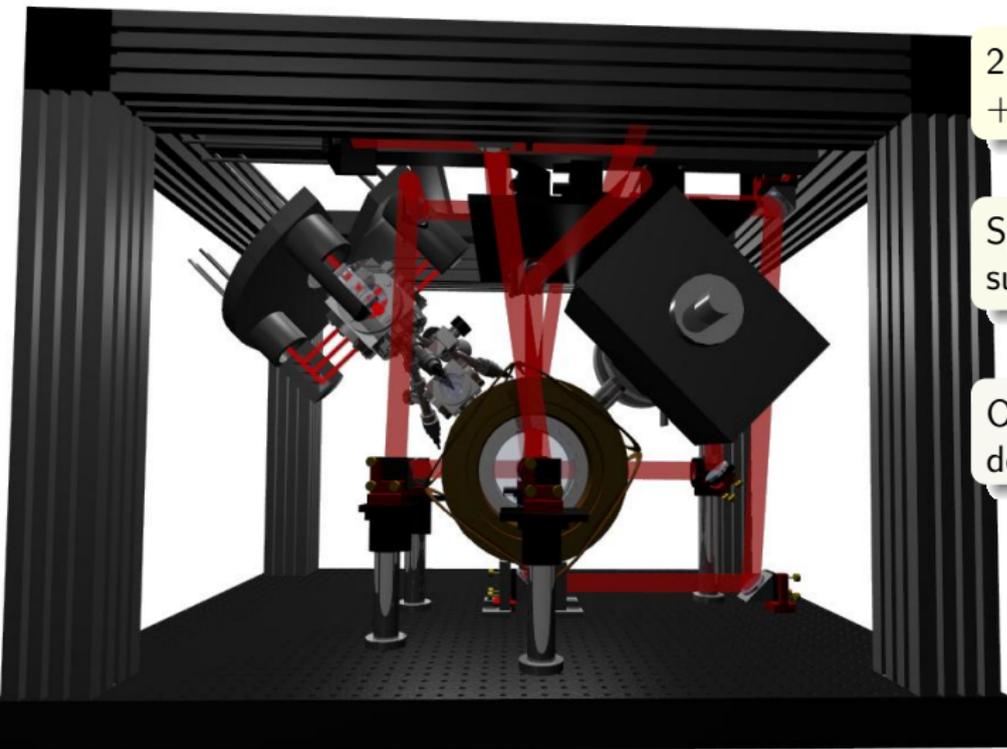


2 chambres  
+ pompes

Système à vide  
suspendu sur bâti

R. Nyman, G. Varoquaux *et al.* *App. Phys. B*, **84**, 673-681 (2006)

## 2 Agencement de l'enceinte



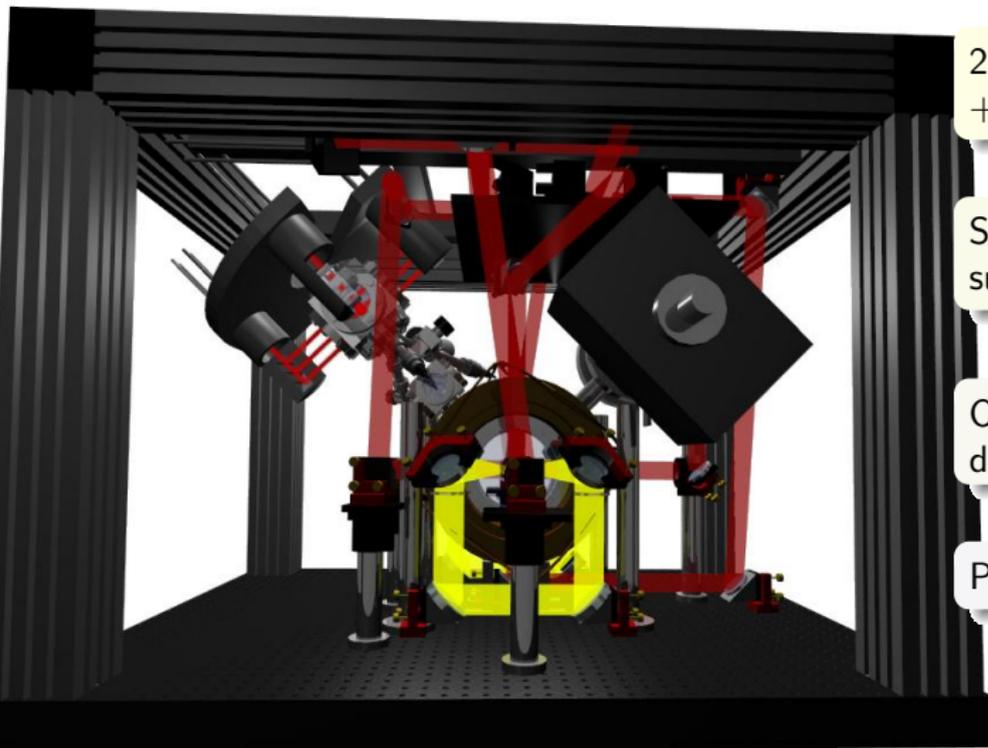
2 chambres  
+ pompes

Système à vide  
suspendu sur bâti

Optique au-dessus  
de l'enceinte

R. Nyman, G. Varoquaux *et al.* *App. Phys. B*, **84**, 673-681 (2006)

## 2 Agencement de l'enceinte



2 chambres  
+ pompes

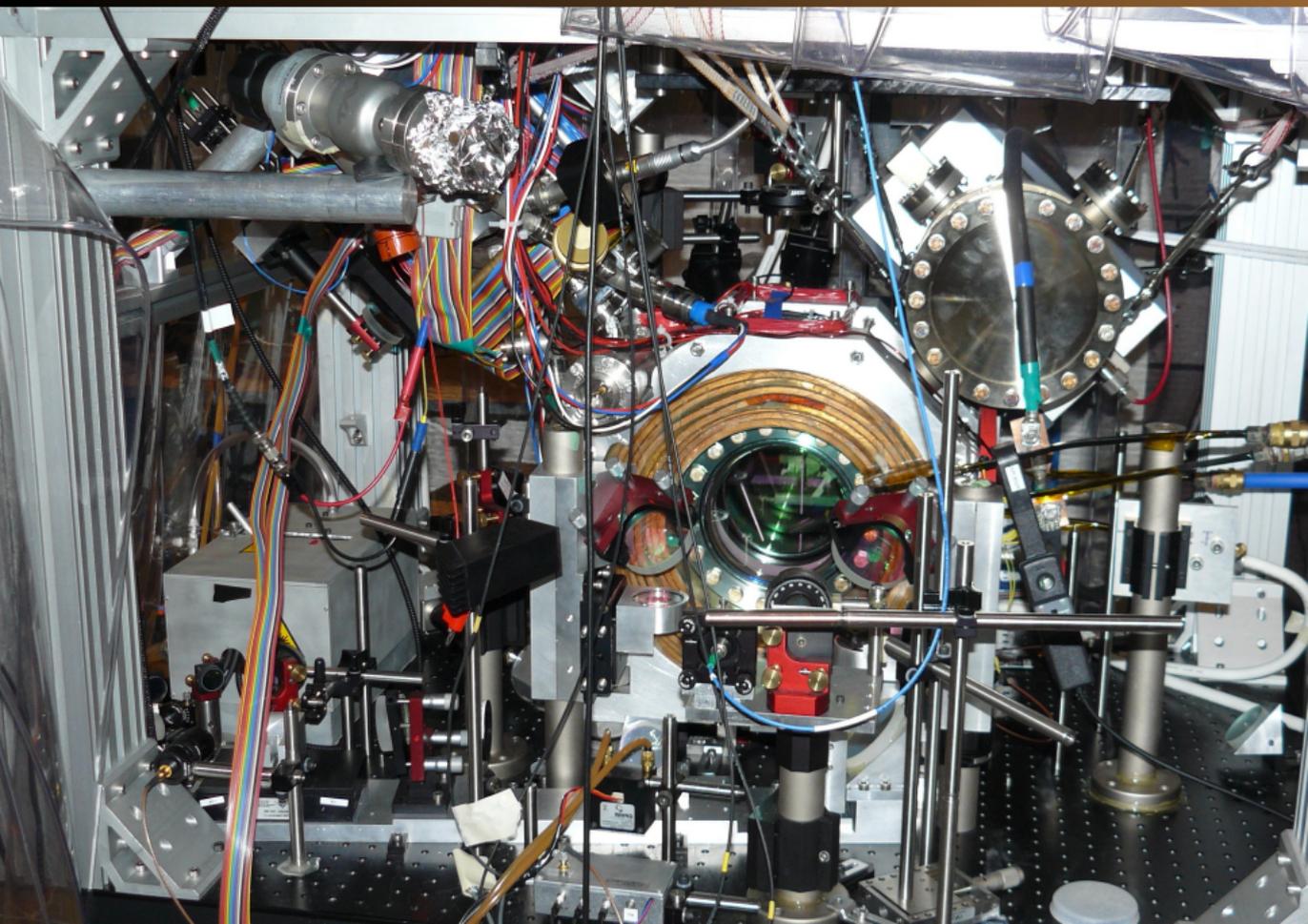
Système à vide  
suspendu sur bâti

Optique au-dessus  
de l'enceinte

Piège optique

R. Nyman, G. Varoquaux *et al.* *App. Phys. B*, **84**, 673-681 (2006)

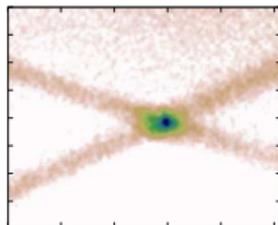
## 2 Agencement de l'enceinte



## 2 Le piège optique

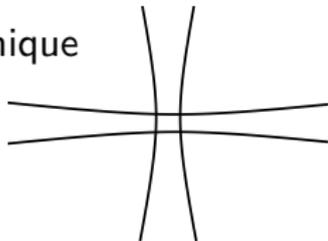
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



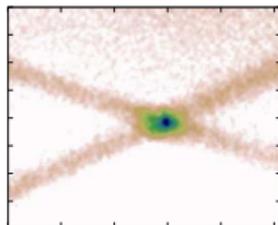
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

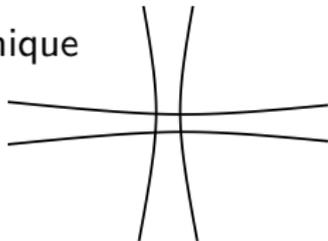
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



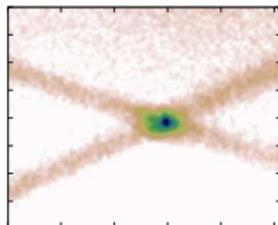
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

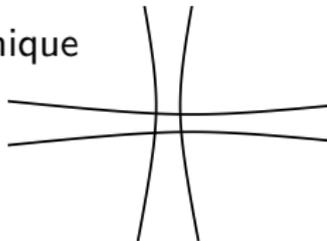
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



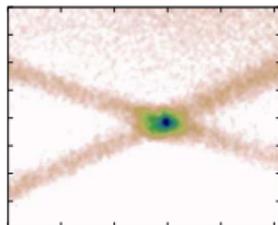
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

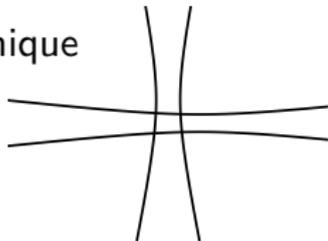
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



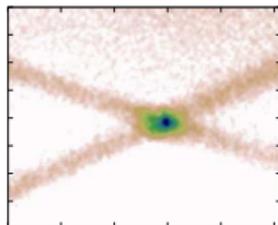
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

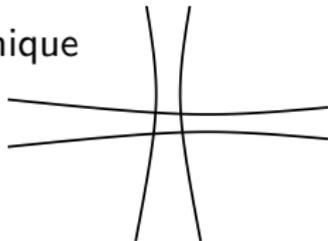
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



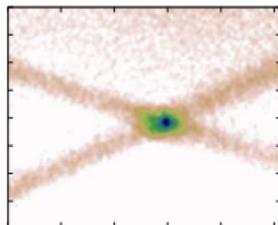
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

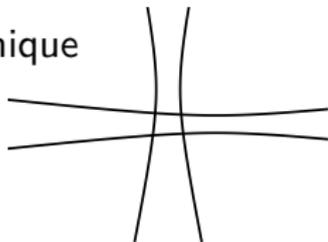
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



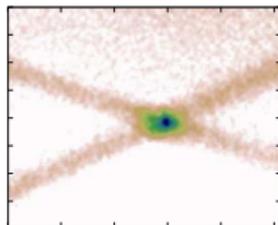
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

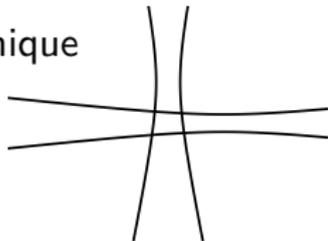
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



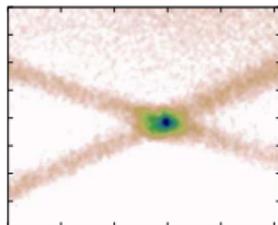
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

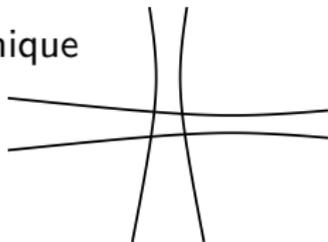
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



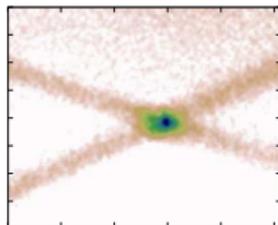
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

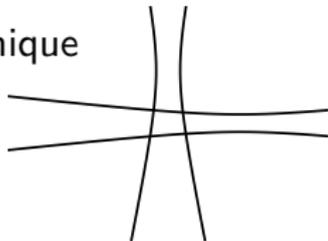
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



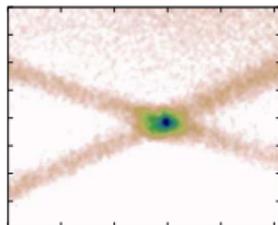
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

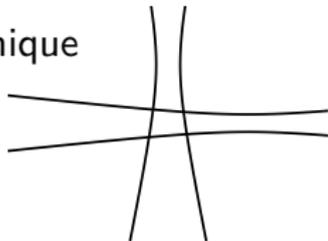
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



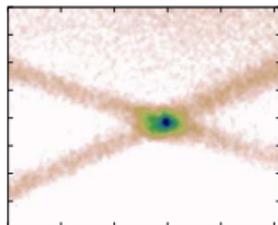
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

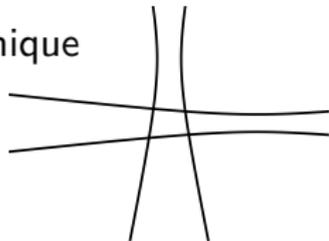
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



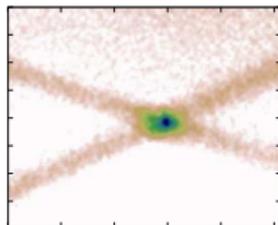
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

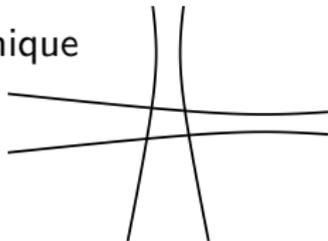
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



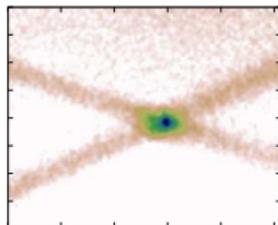
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

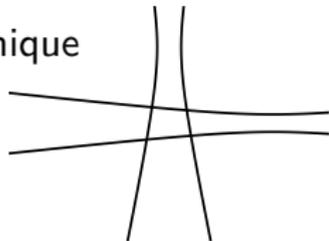
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



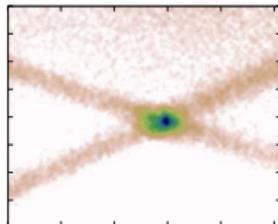
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

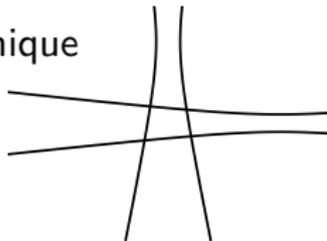
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



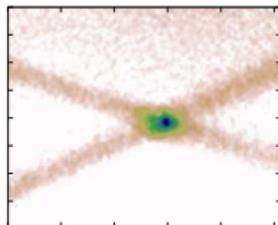
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

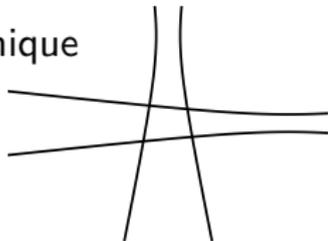
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



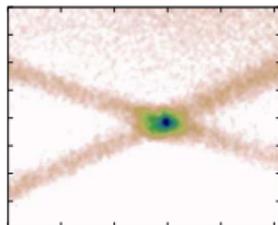
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

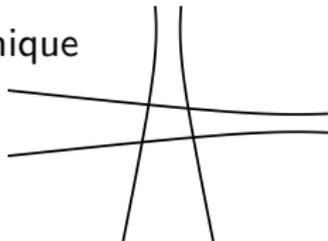
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



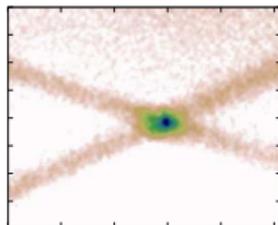
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

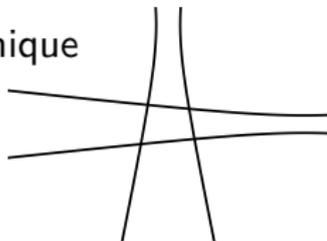
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



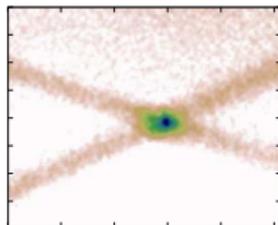
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

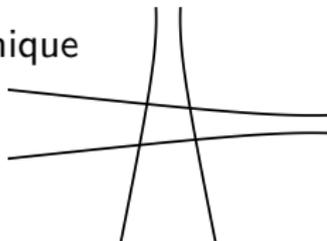
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



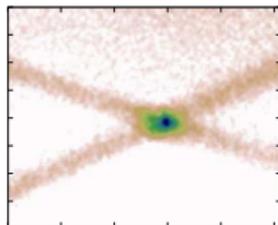
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

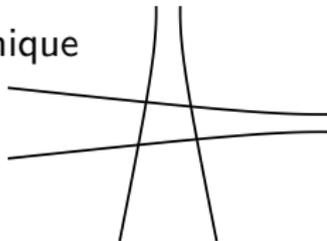
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



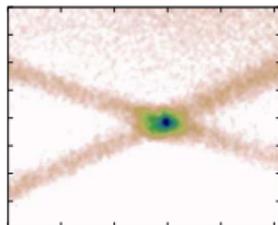
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

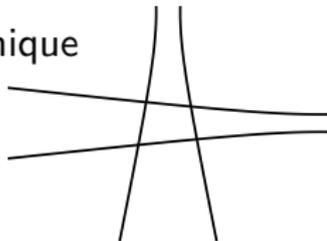
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



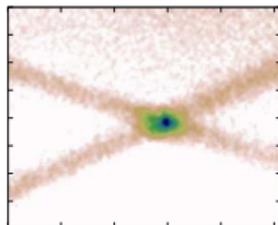
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

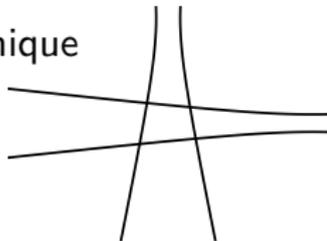
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



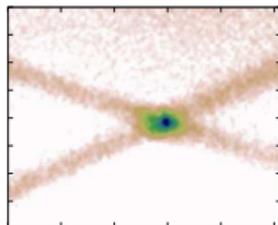
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

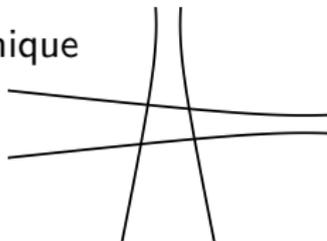
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



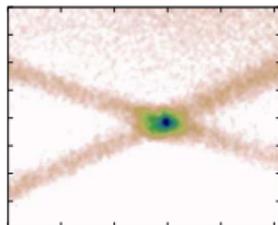
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

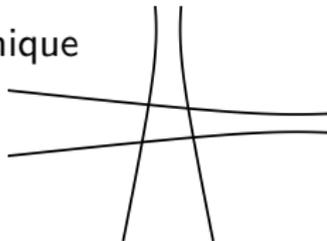
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



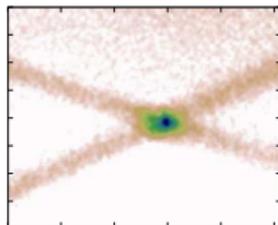
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

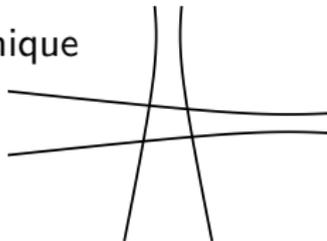
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



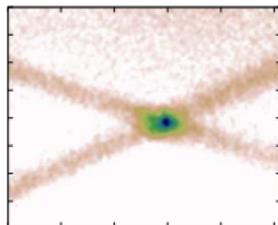
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

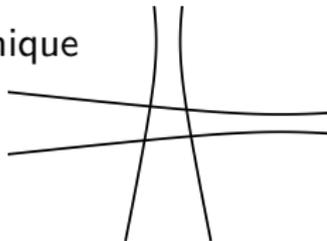
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



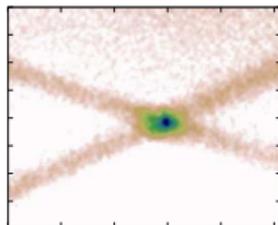
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

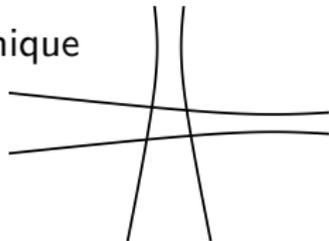
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



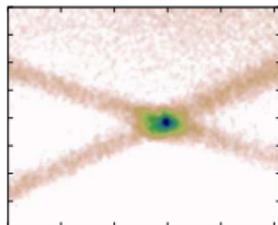
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

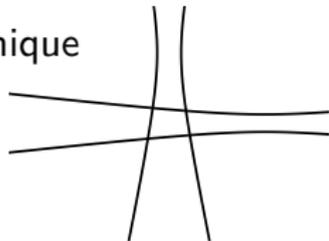
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



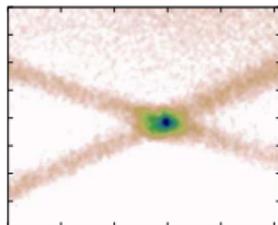
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

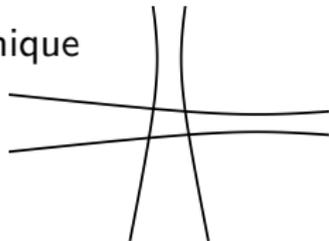
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



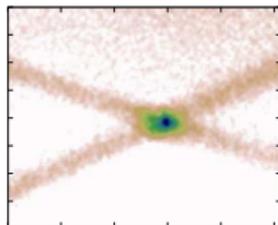
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

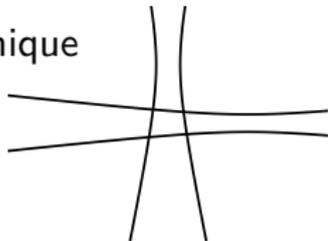
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



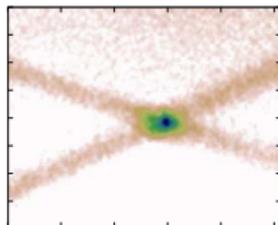
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

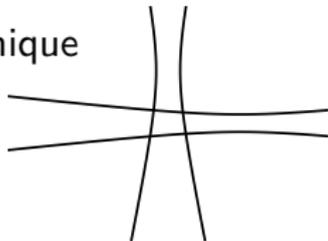
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



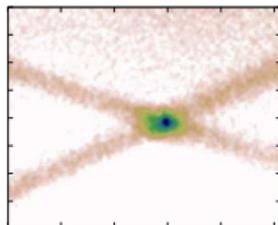
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

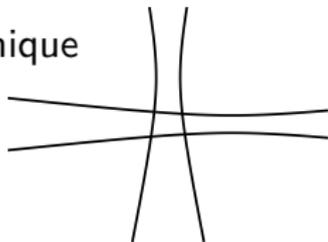
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



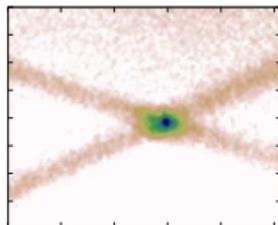
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

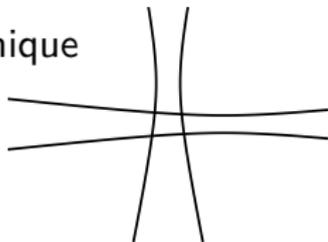
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



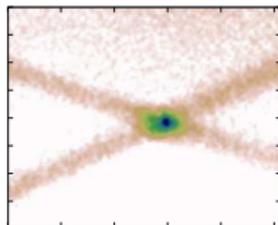
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

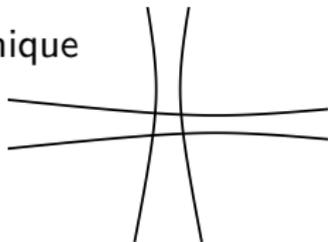
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



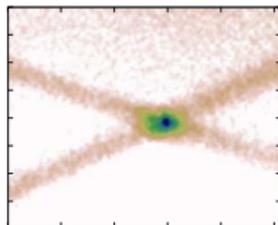
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

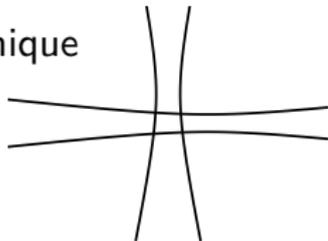
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



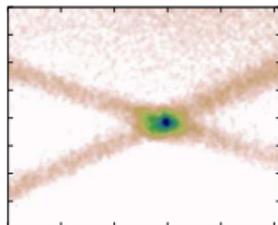
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

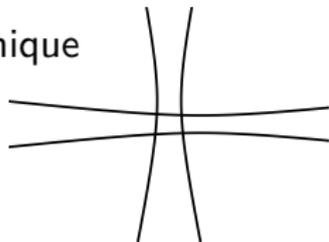
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



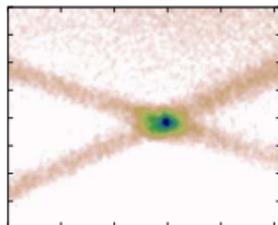
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

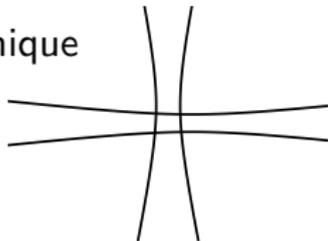
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



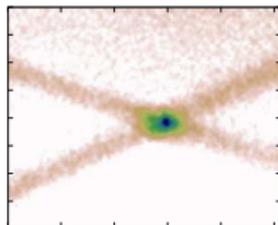
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

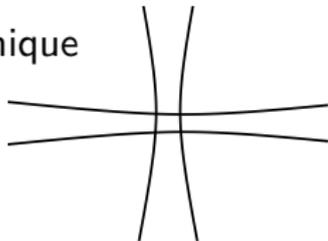
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



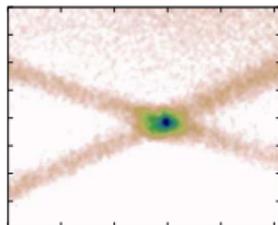
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

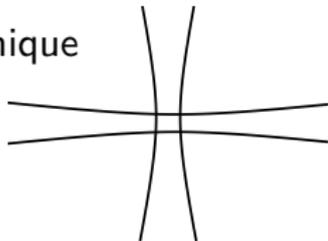
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



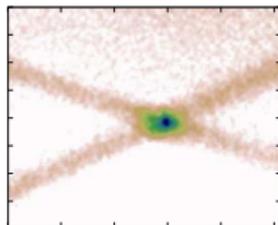
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

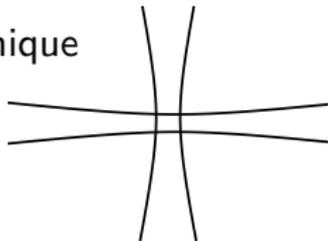
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



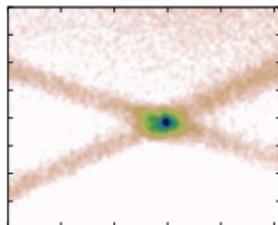
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

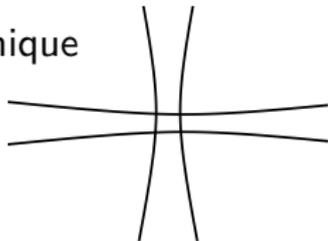
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



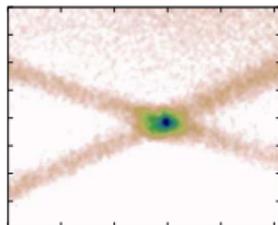
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

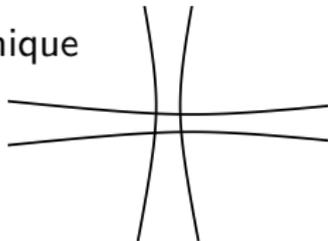
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



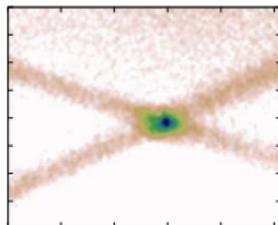
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

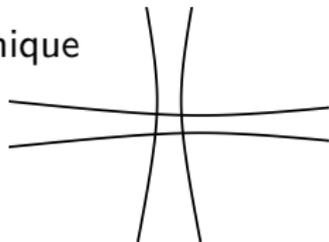
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



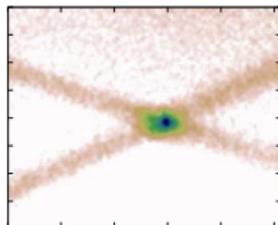
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

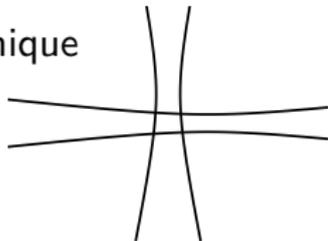
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



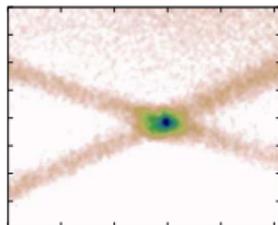
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

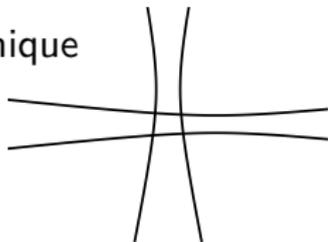
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



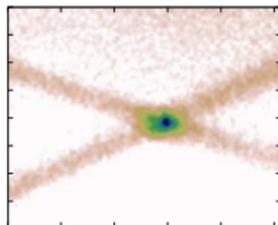
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

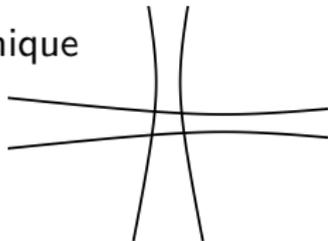
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



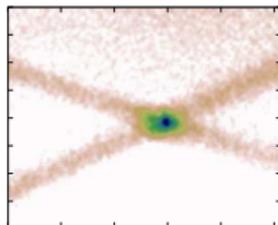
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

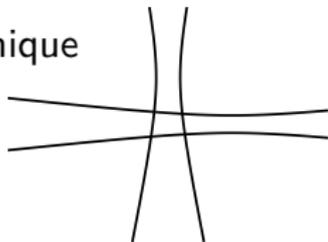
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



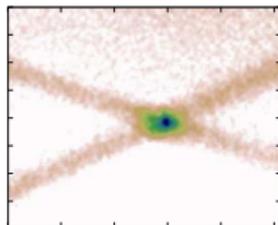
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

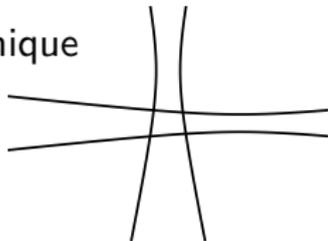
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



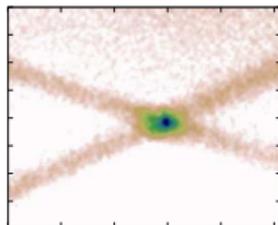
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

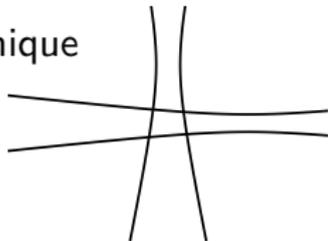
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



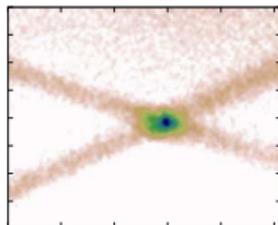
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

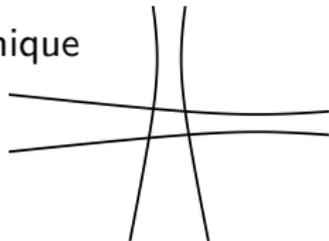
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



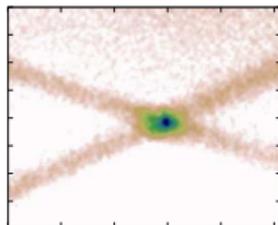
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

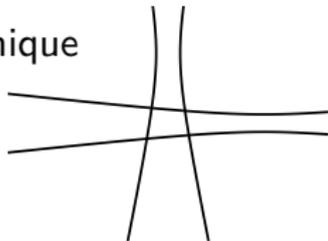
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



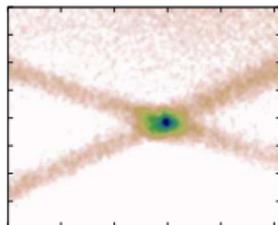
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

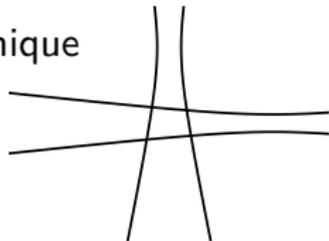
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



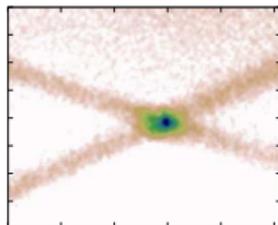
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

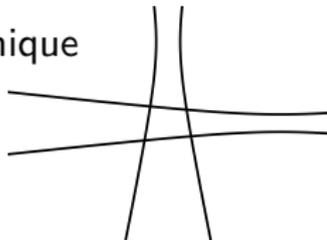
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



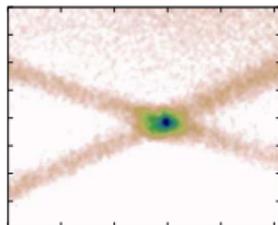
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

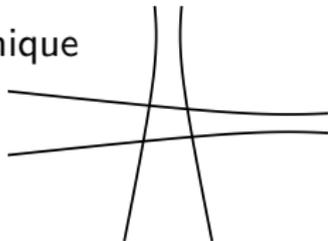
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



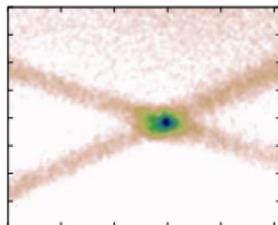
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

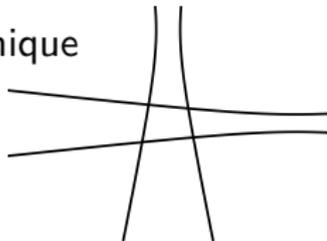
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



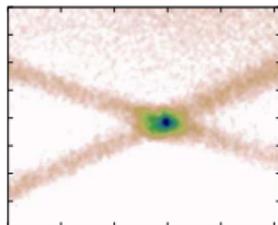
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

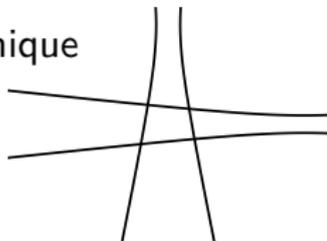
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



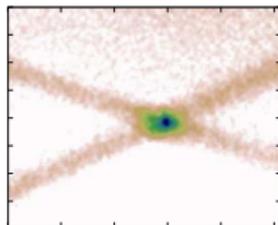
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

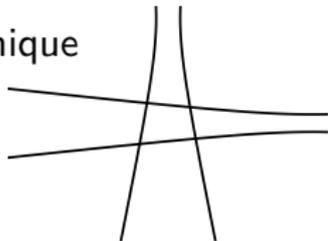
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



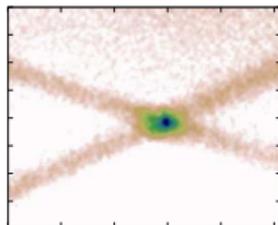
### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Le piège optique

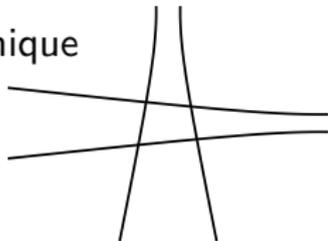
### Atomes piégés au voisinage des fortes intensités

- Laser Erbium fibré : 50 W à 1560 nm
- Profondeur :  $75 \mu\text{K}$  pour  $w = 200 \mu\text{m}$



### Ajuster la taille du piège

- Chargement : taille comparable au nuage atomique
- Évaporation : fort confinement



### Optimum de chargement

- Piège magnéto-optique comprimé :  $10^7$  At,  $300 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{K}$
- Optimum expérimental : taille du piège  $\sim 200 \mu\text{m}$ ,  
profondeur  $\sim 75 \mu\text{K}$

## 2 Déplacement lumineux des lignes atomiques

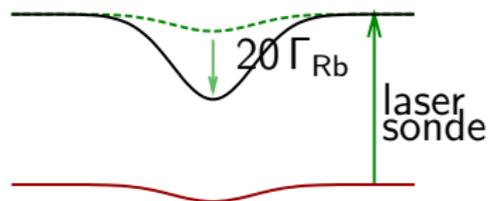
Déplacement lumineux



## 2 Déplacement lumineux des lignes atomiques

### Déplacement lumineux

Niveau supérieur de la raie D2 fortement déplacé

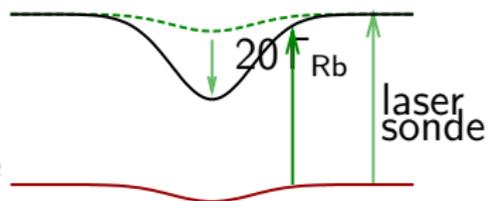


## 2 Déplacement lumineux des lignes atomiques

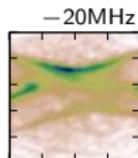
### Déplacement lumineux

Niveau supérieur de la raie D2 fortement déplacé

⇒ Imagerie sélective en énergie potentielle



### Tomographie spatiale du piège

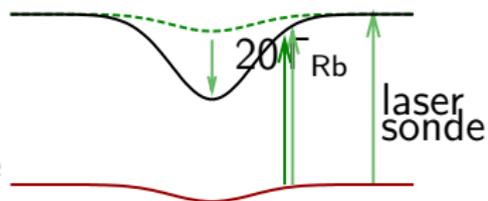


## 2 Déplacement lumineux des lignes atomiques

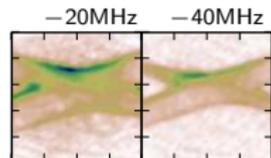
### Déplacement lumineux

Niveau supérieur de la raie D2 fortement déplacé

⇒ Imagerie sélective en énergie potentielle



### Tomographie spatiale du piège

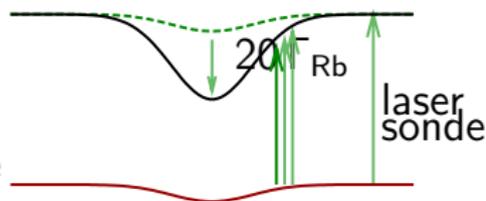


## 2 Déplacement lumineux des lignes atomiques

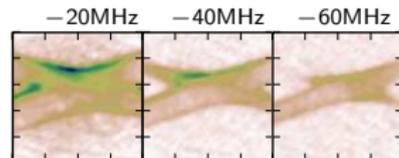
### Déplacement lumineux

Niveau supérieur de la raie D2 fortement déplacé

⇒ Imagerie sélective en énergie potentielle



### Tomographie spatiale du piège

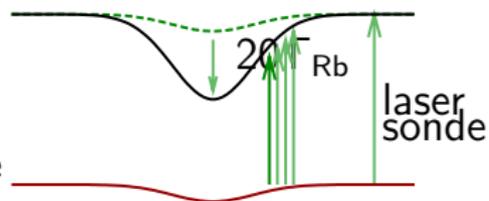


## 2 Déplacement lumineux des lignes atomiques

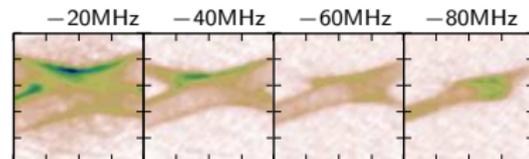
### Déplacement lumineux

Niveau supérieur de la raie D2 fortement déplacé

⇒ Imagerie sélective en énergie potentielle



### Tomographie spatiale du piège

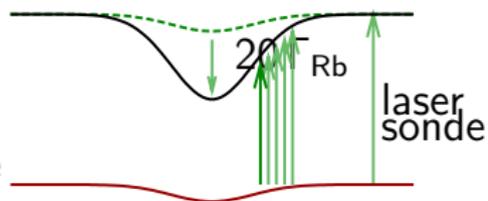


## 2 Déplacement lumineux des lignes atomiques

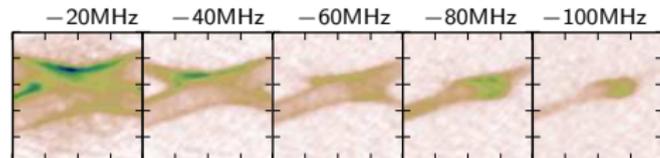
### Déplacement lumineux

Niveau supérieur de la raie D2 fortement déplacé

⇒ Imagerie sélective en énergie potentielle



### Tomographie spatiale du piège

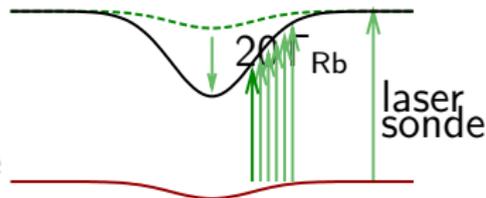


## 2 Déplacement lumineux des lignes atomiques

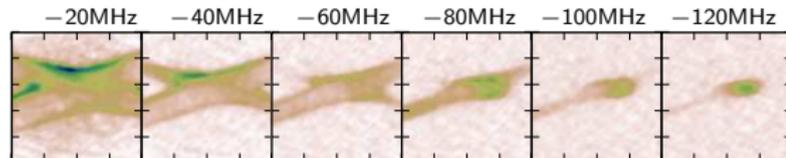
### Déplacement lumineux

Niveau supérieur de la raie D2 fortement déplacé

⇒ Imagerie sélective en énergie potentielle



### Tomographie spatiale du piège

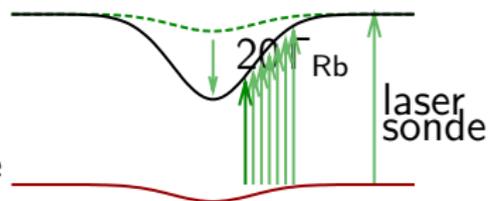


## 2 Déplacement lumineux des lignes atomiques

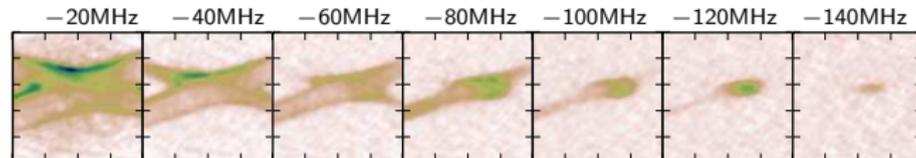
### Déplacement lumineux

Niveau supérieur de la raie D2 fortement déplacé

⇒ Imagerie sélective en énergie potentielle



### Tomographie spatiale du piège

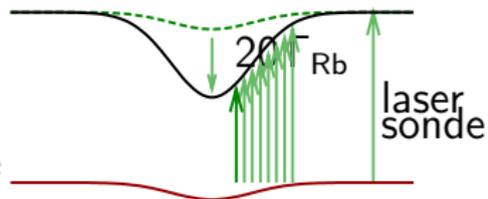


## 2 Déplacement lumineux des lignes atomiques

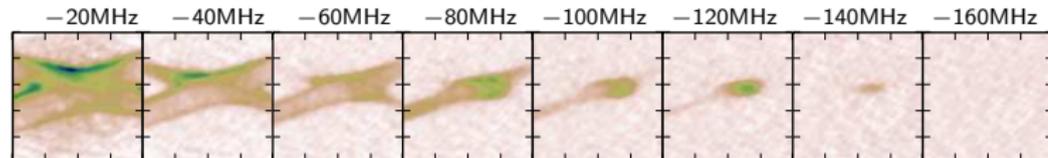
### Déplacement lumineux

Niveau supérieur de la raie D2 fortement déplacé

⇒ Imagerie sélective en énergie potentielle



### Tomographie spatiale du piège

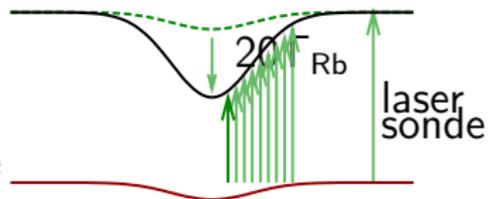


## 2 Déplacement lumineux des lignes atomiques

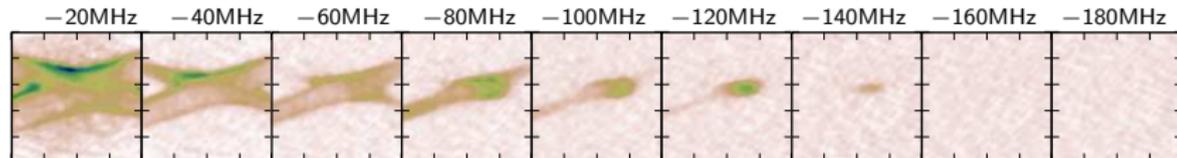
### Déplacement lumineux

Niveau supérieur de la raie D2 fortement déplacé

⇒ Imagerie sélective en énergie potentielle

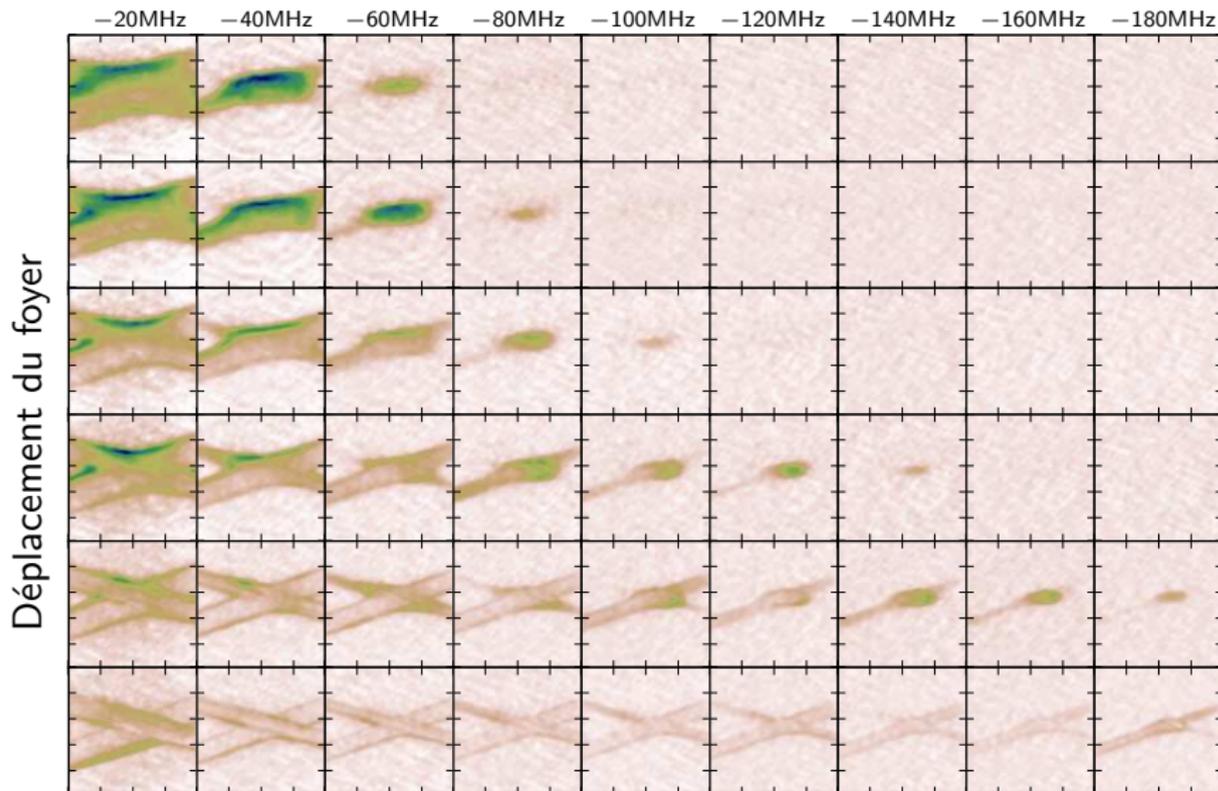


### Tomographie spatiale du piège



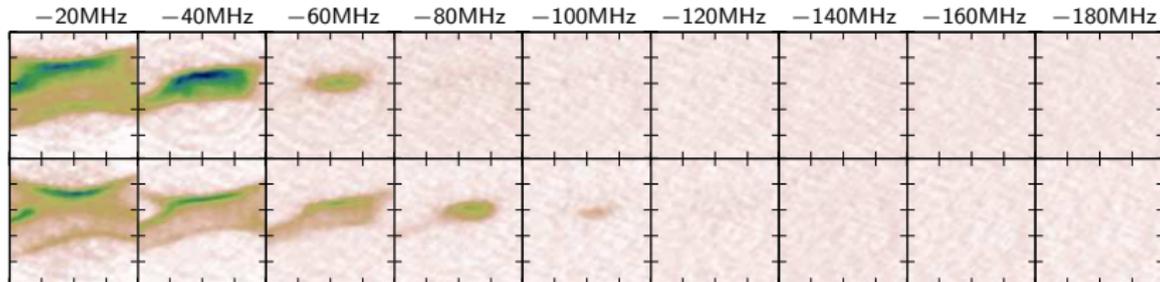
## 2 Déplacement lumineux des lignes atomiques

### Reconstruction de la forme du faisceau

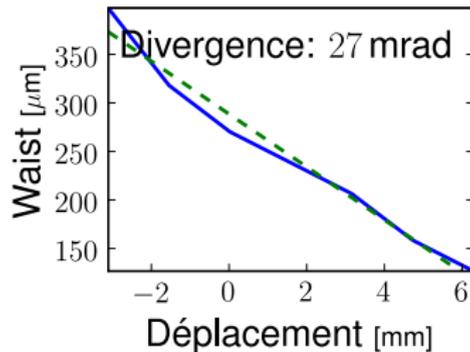
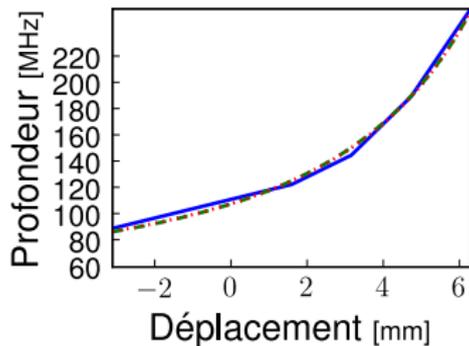


## 2 Déplacement lumineux des lignes atomiques

### Reconstruction de la forme du faisceau



### Description du faisceau gaussien



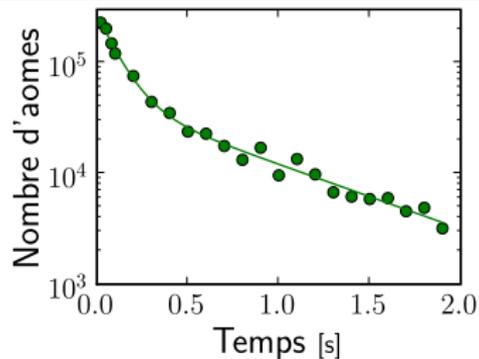
Extraction du M2 :  $\sim 2$

## 2 Chargement du piège dipolaire

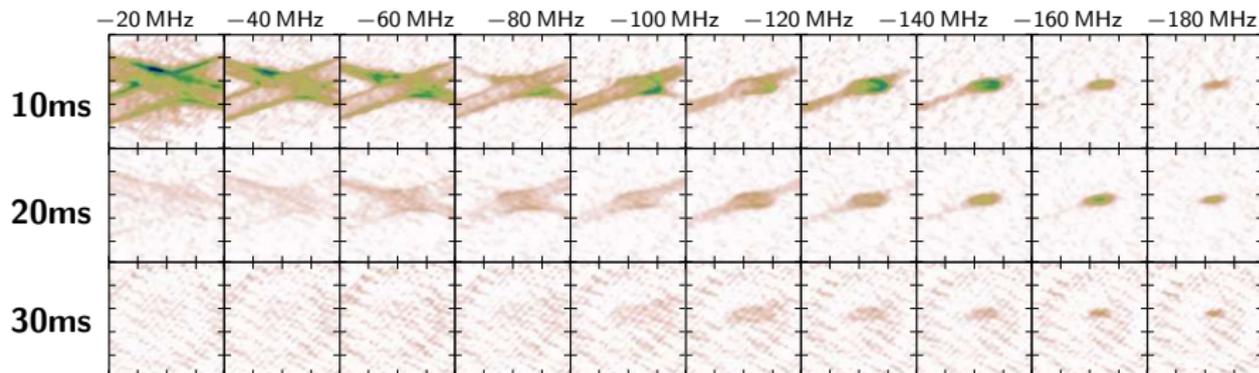
### Deux processus de pertes

$$\tau_1 \sim 100 \text{ ms}$$

$$\tau_2 \sim 1 \text{ s}$$



### Premier processus : évaporation

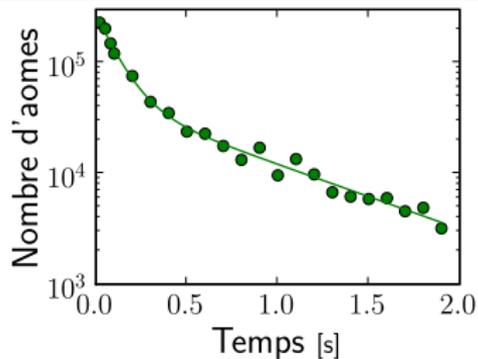


## 2 Chargement du piège dipolaire

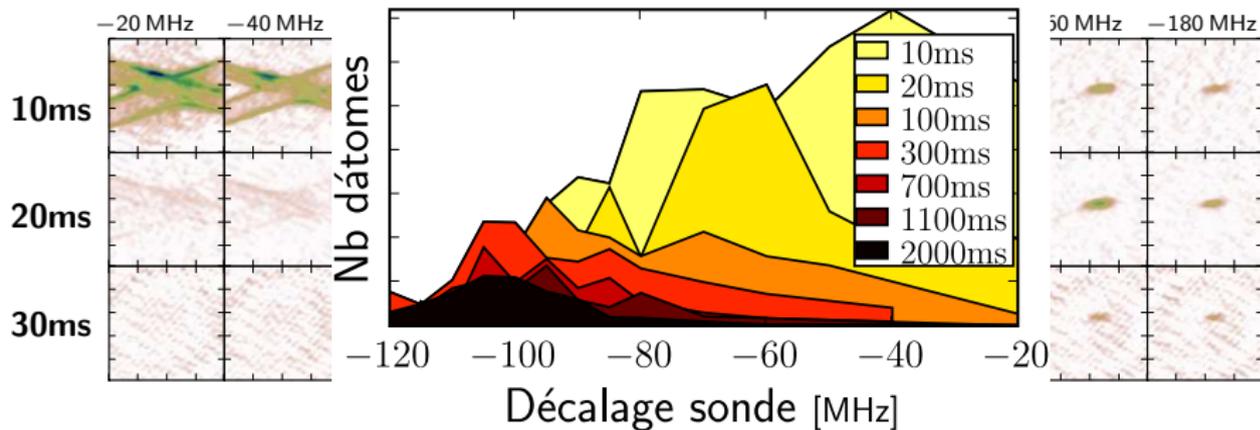
### Deux processus de pertes

$$\tau_1 \sim 100 \text{ ms}$$

$$\tau_2 \sim 1 \text{ s}$$



### Premier processus : évaporation

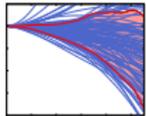


$10^5$  atomes transférés après évaporation libre

# Conclusion

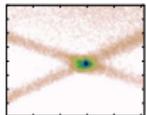
## Une source atomique en microgravité

- Construction et démonstration d'une source d'atomes froids
- Jusqu'à 4 s de temps de vol possible
- Un protocole pour tester le principe d'équivalence



## Vers une source cohérente toute optique

- Développement de lasers semi-conducteurs accordables
- Construction d'une expérience d'atomes ultra-froids compacte
- Chargement des atomes dans un piège optique compressible



## Tester le principe d'équivalence avec des gaz dégénérés

- Faire rebondir les atomes
- Annuler les interactions

# Perspective

## Tester le principe d'équivalence avec des gaz dégénérés

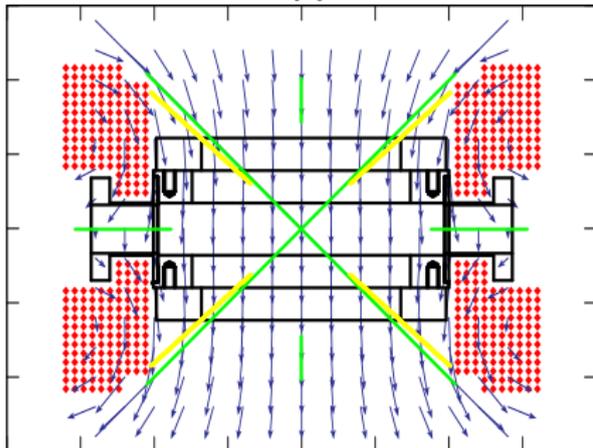
- Faire rebondir les atomes
- Annuler les interactions

## Contrôle des interactions avec du potassium et du rubidium

Champs jusqu'à 1000 Gauss

Homogénéité 70 ppm

**Simulation** 20 ppm sur 4 mm<sup>2</sup>



**Réalisation** 2 kW, 25 Kg



Homogénéité mesurée sur 4 mm<sup>2</sup> : 180 ppm



**Merci !**

Alain et Philippe

**Krub** particulièrement

Rob, Jean-François, Jean-Philippe



**Little-ICE**

particulièrement Nassim



**Les électroniciens**

Frédérique et André

Tout le groupe  
d'optique atomique

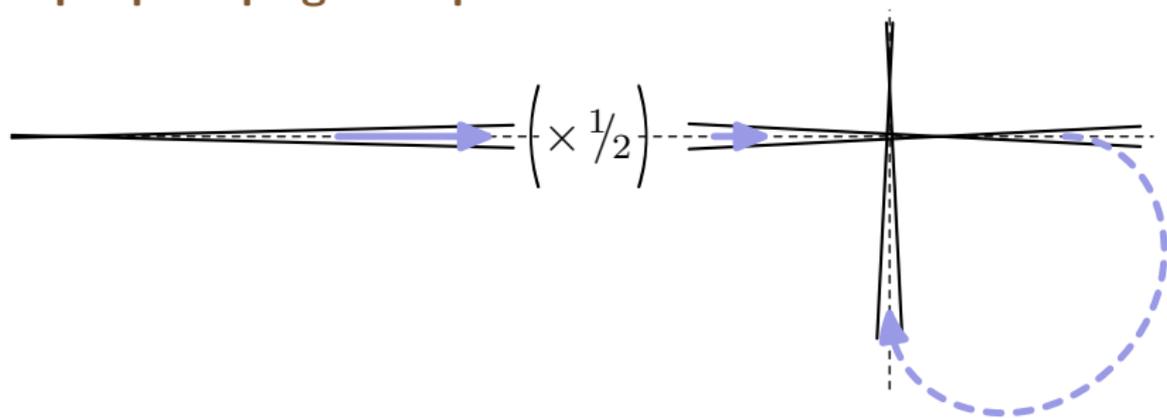
Le service achat, les  
services généraux, les TP's

Les mécaniciens  
Patrick et Michel

Tous ceux que j'ai  
oubliés

# Le piège optique compressible

## Optique pour piège compressible



- Lentille sur platine de translation
- Transport d'image dans l'enceinte
- Recirculation