

# CONDENSAT DE BOSE-EINSTEIN DE SODIUM DANS UN PIÈGE MÉSOSCOPIQUE

Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie - Paris VI

Mardi 28 septembre 2010

Emmanuel MIMOUN

sous la direction de Jean Dalibard et Fabrice Gerbier

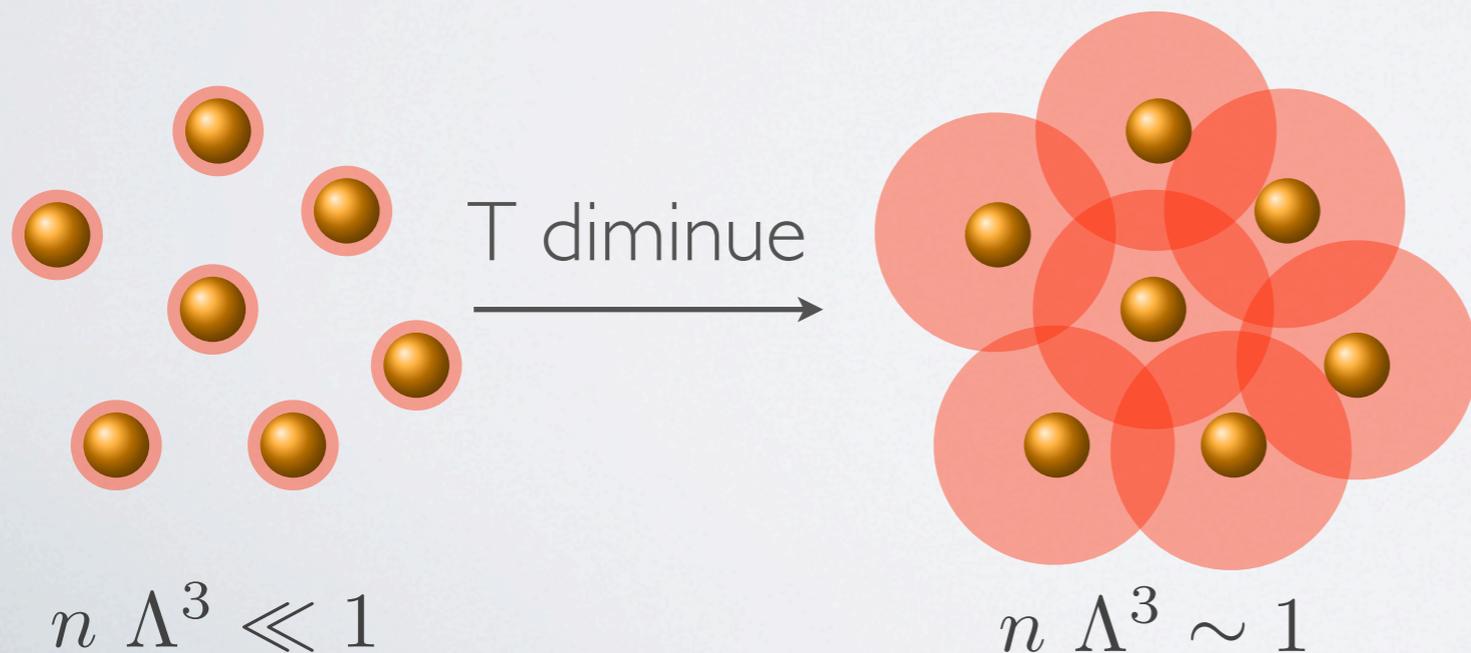


# La condensation de Bose-Einstein

- Ensemble **macroscopique** de bosons dans l'état fondamental **quantique** du système
- Prédit en 1925 par Einstein d'après les travaux de Bose sur la statistique des photons
- Observée expérimentalement dans un gaz dilué en 1995

M. H. Anderson *et al.*, Science **269** 5221 (1995) (NIST/JILA)

K. B. Davis *et al.*, Phys. Rev. Lett. **75** 3969 (1995) (MIT)

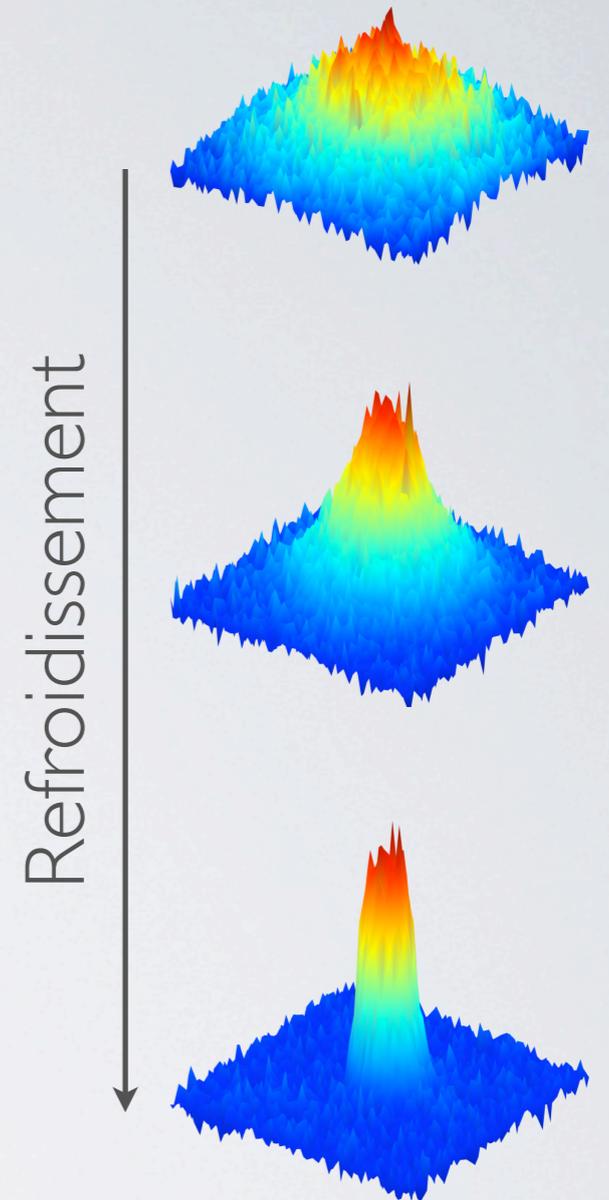


Longueur d'onde de de Broglie

$$\Lambda = \left( \frac{2\pi\hbar^2}{mk_B T} \right)^{1/2}$$

Densité dans l'espace des phases

$$n \Lambda^3$$



$N \sim 10^4$  atomes

# Etats quantiques fortement corrélés

## Etats corrélés

$$\begin{array}{ccc} \text{Paire de Bell} & \neq & \text{Etat séparable} \\ | \uparrow \uparrow \rangle + | \downarrow \downarrow \rangle & & ( | \uparrow \rangle + | \downarrow \rangle ) \otimes ( | \uparrow \rangle + | \downarrow \rangle ) \end{array}$$

## Etats corrélés macroscopiques



«Chat de Schrödinger» :  
superposition  
macroscopique d'états



# Etats quantiques fortement corrélés

- Pourquoi des états fortement corrélés ?

- Frontière classique/quantique

- Métrologie quantique : précision des mesures  $1/\sqrt{N} \rightarrow 1/N$

M. J. Holland and K. Burnett, PRL **71** 1355 (1993)

- A partir de quoi les former ?

- Photons

A. Ourjoumtsev *et al.*, Nature **448** 784 (2007)

S. Deléglise *et al.*, Nature **455** 510 (2008)

- Ions piégés

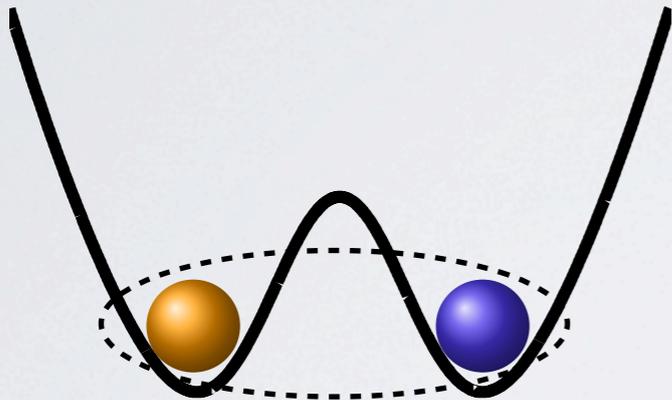
D. Leibfried *et al.*, Nature **438** 639 (2005)

- Atomes froids

# Etats corrélés avec des atomes froids

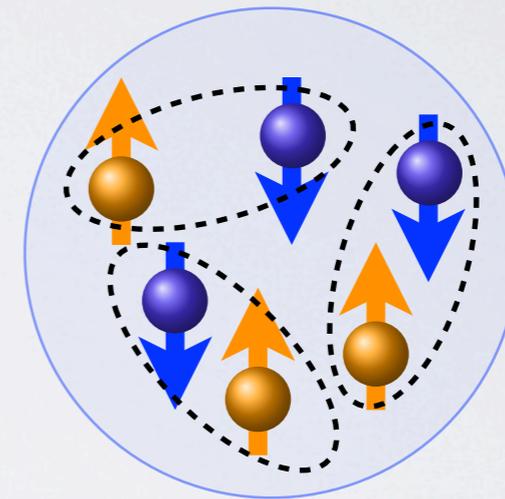
Quelles observables corréler ?

- **Variable externe** : Double puits  
Corrélations en position
- **Etat interne** : Condensat spinoriel  
Corrélations entre composantes de spin



J. Esteve *et al.*, Nature **455** 1216 (2008)

K. Maussang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105** 080403 (2010)



C. Gross *et al.*, Nature **464** 1165 (2010)

- **Survivre à la décohérence**
  - Petit nombre d'atomes
  - Eviter les pertes d'atomes
  - Contrôler les perturbations dues à l'environnement

# Plan de l'exposé

I. Motivations pour la création de l'expérience

II. Travail expérimental

1. Laser solide à 589 nm pour le refroidissement du sodium

2. Chargement d'un PMO par désorption induite par la lumière

3. Condensation tout-optique dans un piège mésoscopique

# Plan de l'exposé

I. Motivations pour la création de l'expérience

II. Travail expérimental

1. Laser solide à 589 nm pour le refroidissement du sodium

2. Chargement d'un PMO par désorption induite par la lumière

3. Condensation tout-optique dans un piège mésoscopique

# Chat de Schrödinger spinoriel

- Ensemble de  $N$  atomes occupant 2 modes, notés  $|a\rangle$  et  $|b\rangle$
- Couplage non linéaire entre ces deux modes de la forme

$$H_{\text{int}} = \hbar\chi(N_a - N_b)^2$$

B. Yurke and D. Stoler, Phys. Rev. Lett. **57** 13 (1986)

- Ces deux modes peuvent par exemple représenter deux composantes de spin  $m=\pm 1$  d'un condensat d'atomes dans  $F=1$
- Etant données les longueurs de diffusion mesurées pour le sodium :

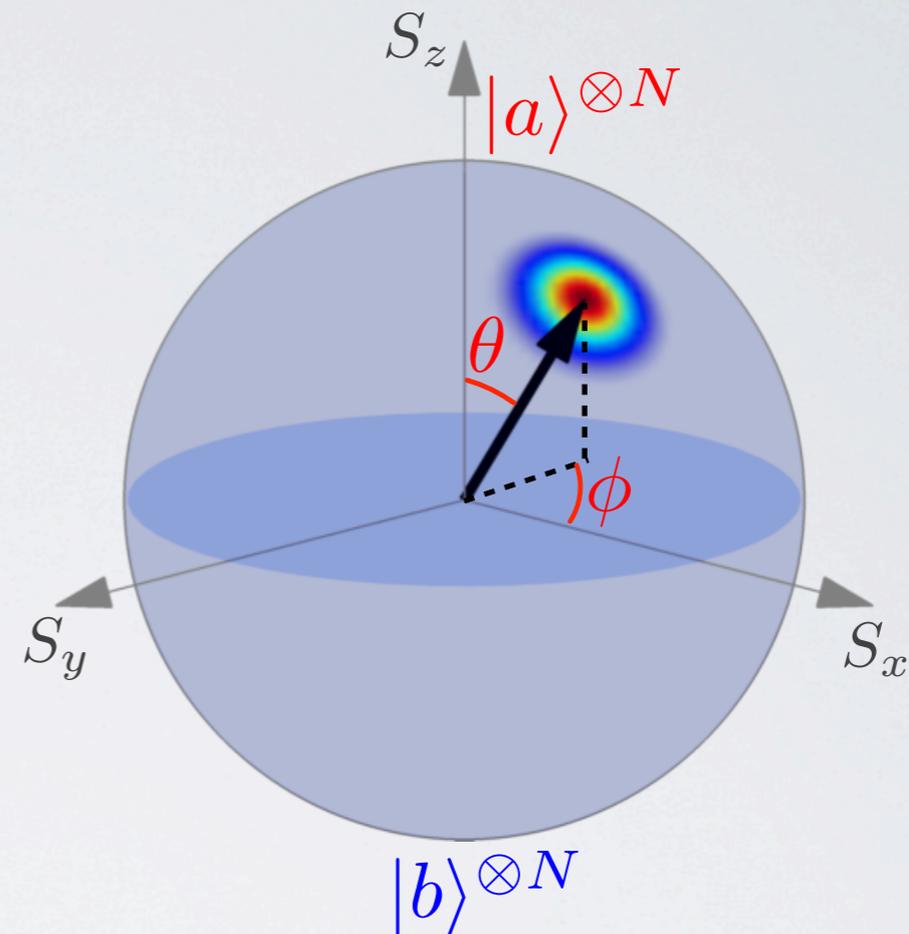
Pour  $N=100$  atomes et une densité de  $10^{14}$  atomes/cm<sup>3</sup> :  $1/\chi \sim 300$  ms

A. Black *et al.*, Phys. Rev. Lett. **99** 070403 (2007)

# Chat de Schrödinger spinoriel

- Condensat à deux modes analogue à un ensemble de spin 1/2 :

$$S_z \leftrightarrow N_a - N_b$$

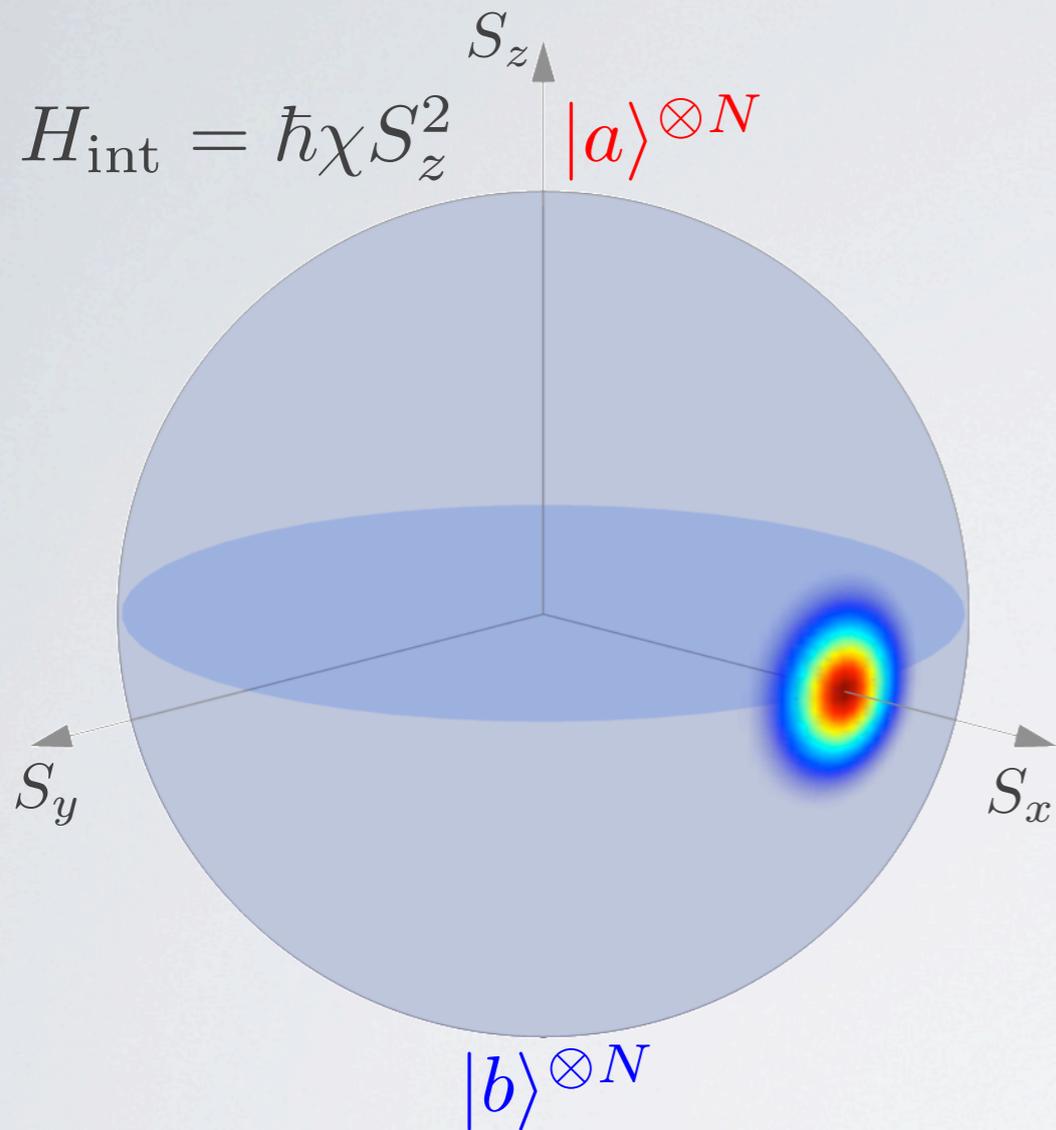


- Représentation d'un **état cohérent de spin**

$$|\theta, \phi\rangle = 2^{-N/2} \left[ \cos(\theta/2) e^{-i\phi/2} |a\rangle + \sin(\theta/2) e^{i\phi/2} |b\rangle \right]^{\otimes N}$$

par un vecteur sur la sphère de Bloch

# Chat de Schrödinger spinoriel



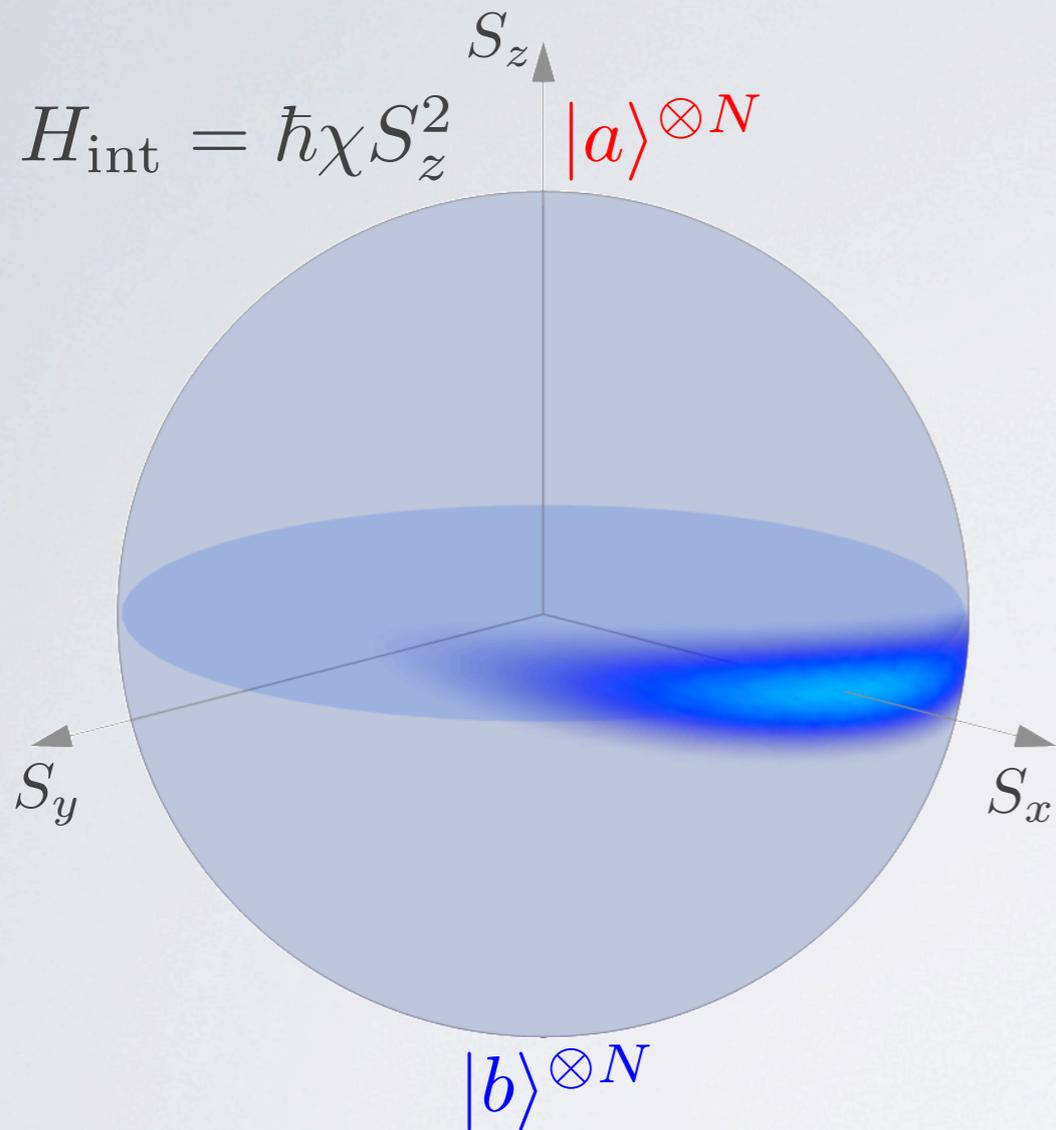
- Etat initial  $(|a\rangle + |b\rangle)^{\otimes N}$ ,  $\Delta^2 S_z = N/4$

- $\chi t \ll 1$ : Compression de spin

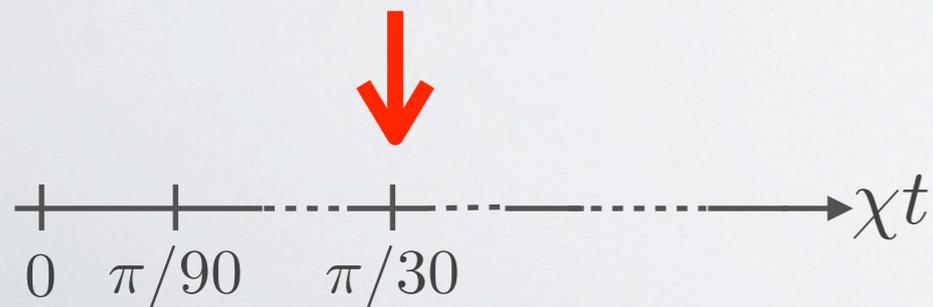
$$\Delta^2 S_z < N/4$$



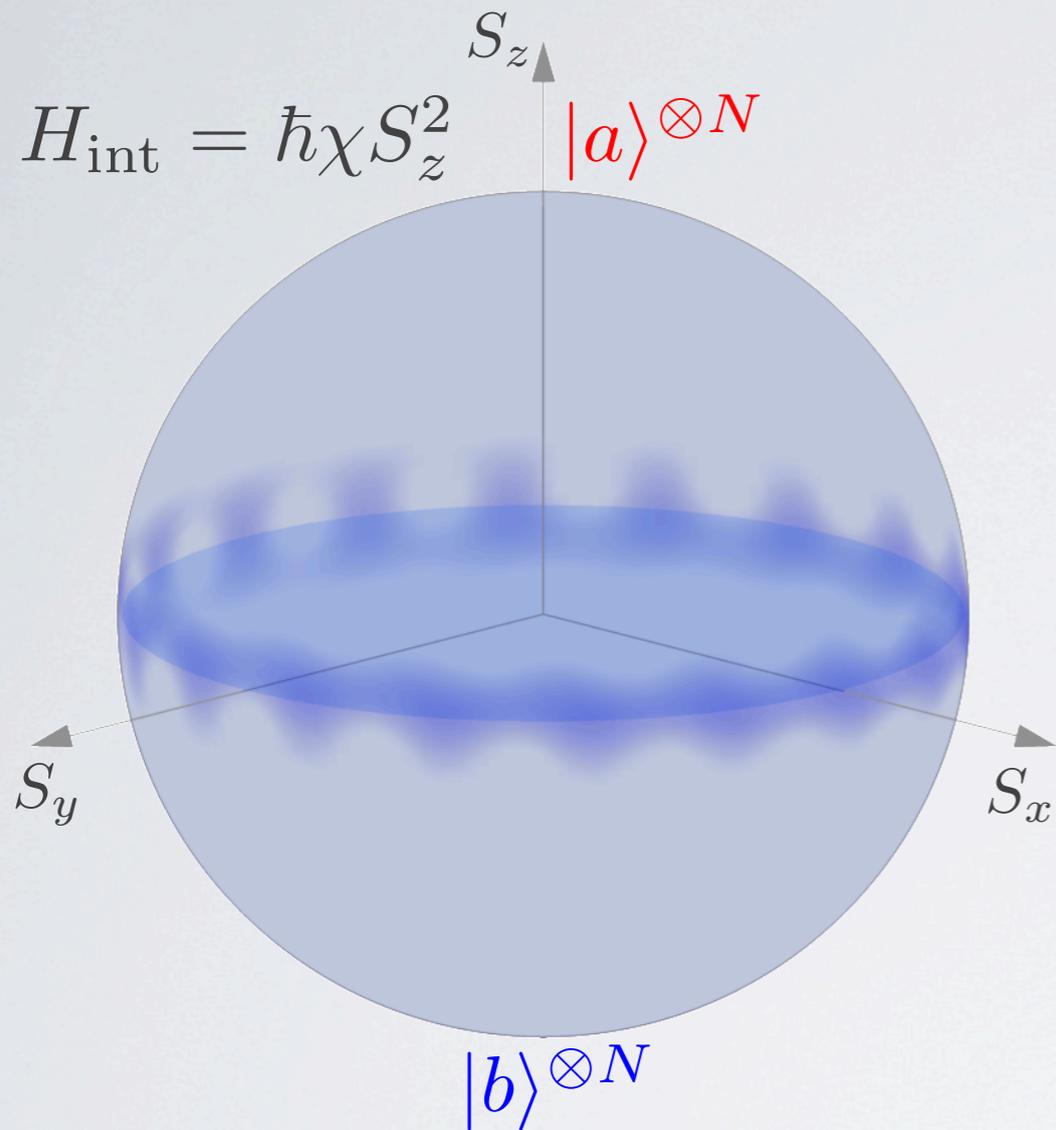
# Chat de Schrödinger spinoriel



- Etat initial  $(|a\rangle + |b\rangle)^{\otimes N}$ ,  $\Delta^2 S_z = N/4$
- $\chi t \ll 1$ : Compression de spin  
 $\Delta^2 S_z < N/4$
- $\chi t \gtrsim 1/\sqrt{N}$ : Brouillage de la phase

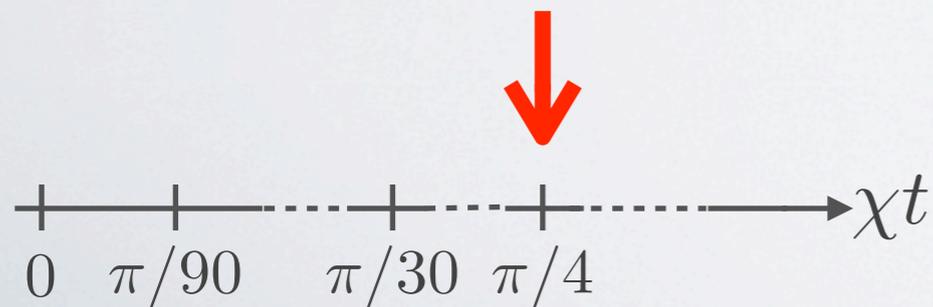


# Chat de Schrödinger spinoriel

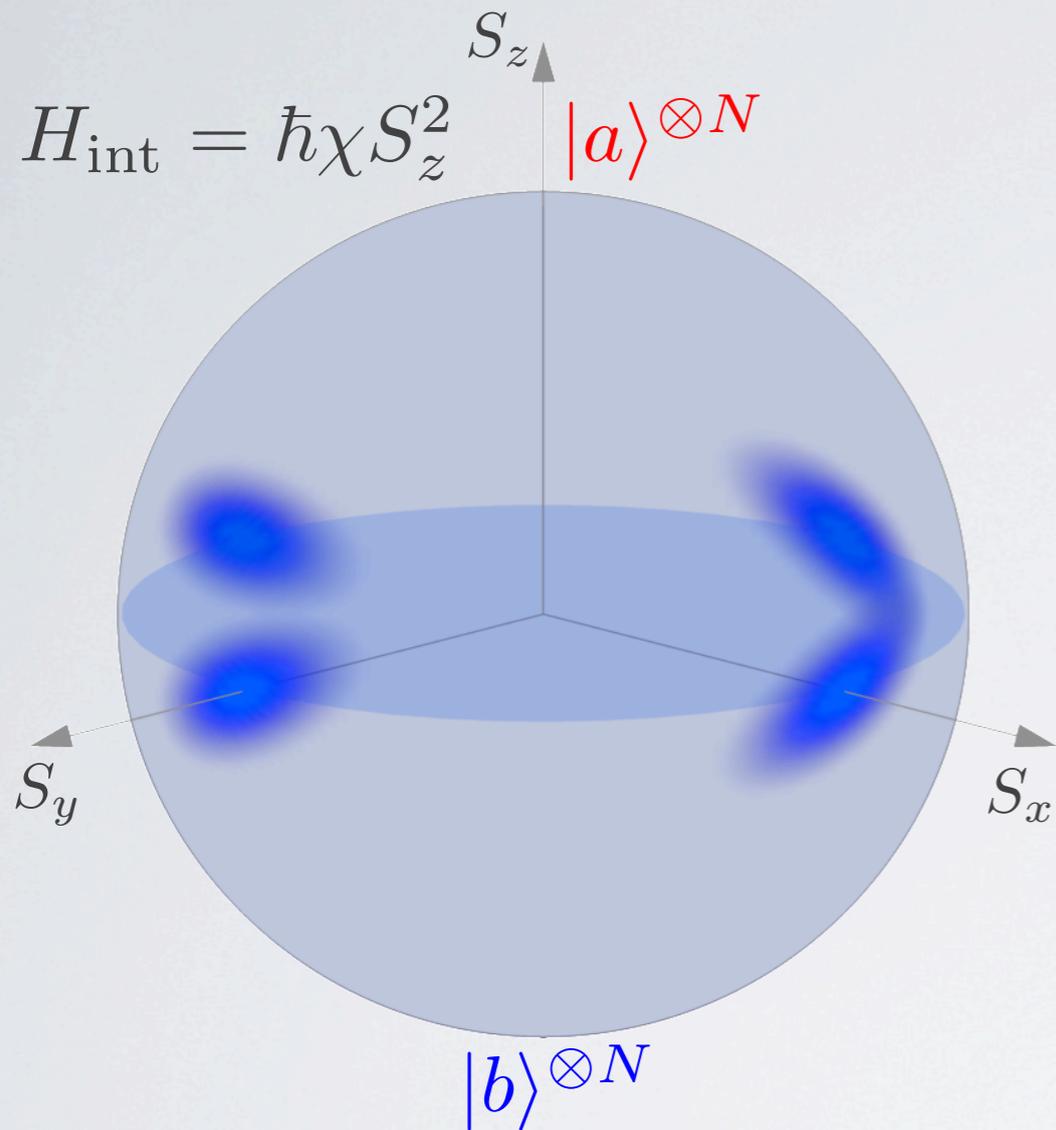


- Etat initial  $(|a\rangle + |b\rangle)^{\otimes N}$ ,  $\Delta^2 S_z = N/4$
- $\chi t \ll 1$  : Compression de spin  

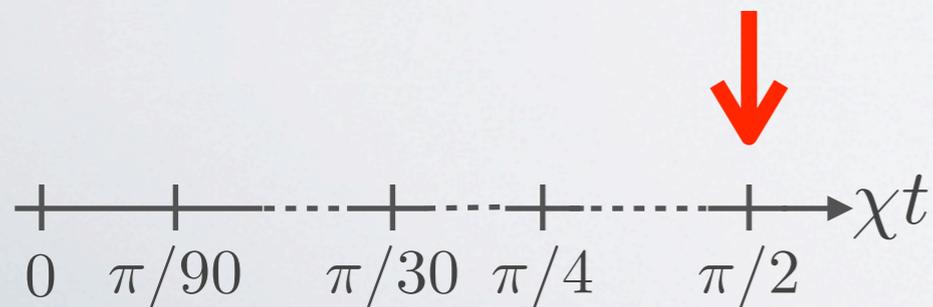
$$\Delta^2 S_z < N/4$$
- $\chi t \gtrsim 1/\sqrt{N}$  : Brouillage de la phase
- $\chi t = \pi/p$ ,  $N = 0[p]$  : Résurgences partielles  
 $\Rightarrow$  superposition de  $p$  états cohérents



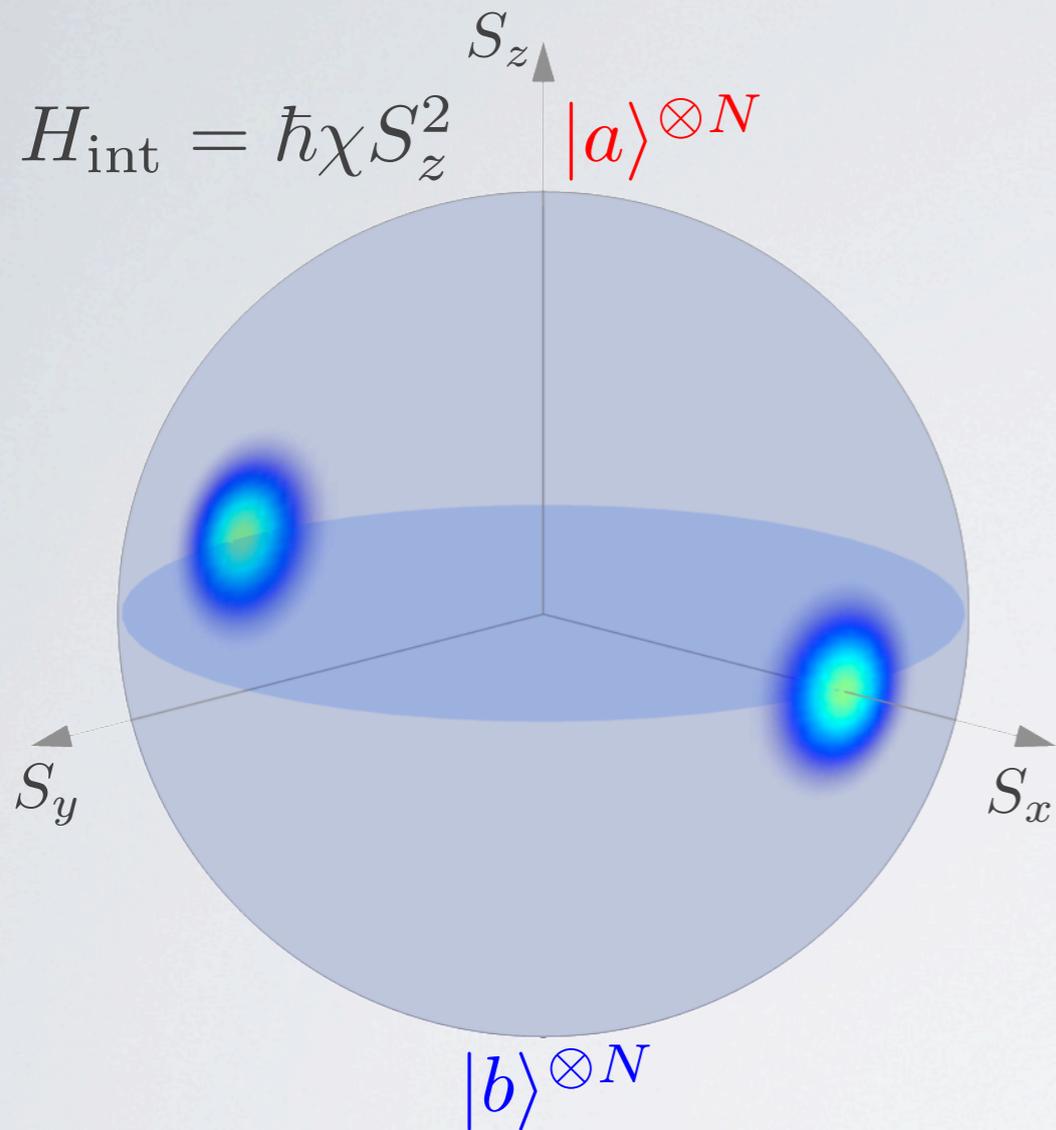
# Chat de Schrödinger spinoriel



- Etat initial  $(|a\rangle + |b\rangle)^{\otimes N}$ ,  $\Delta^2 S_z = N/4$
- $\chi t \ll 1$  : Compression de spin  
 $\Delta^2 S_z < N/4$
- $\chi t \gtrsim 1/\sqrt{N}$  : Brouillage de la phase
- $\chi t = \pi/p$ ,  $N = 0[p]$  : Résurgences partielles  
 $\Rightarrow$  superposition de  $p$  états cohérents
- $\chi t = \pi/2$  : Superposition  $\pm S_x$



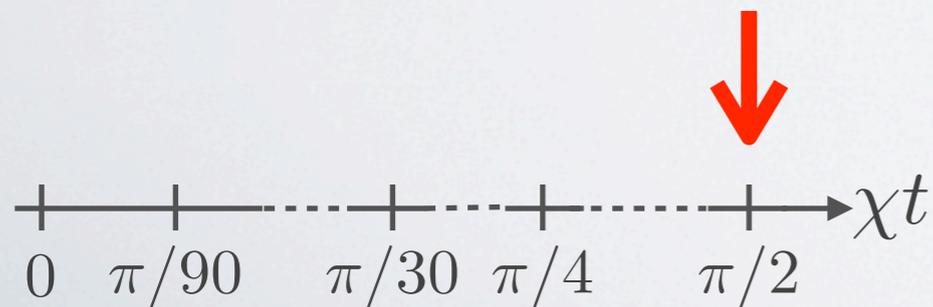
# Chat de Schrödinger spinoriel



- Etat initial  $(|a\rangle + |b\rangle)^{\otimes N}$ ,  $\Delta^2 S_z = N/4$
- $\chi t \ll 1$  : Compression de spin  

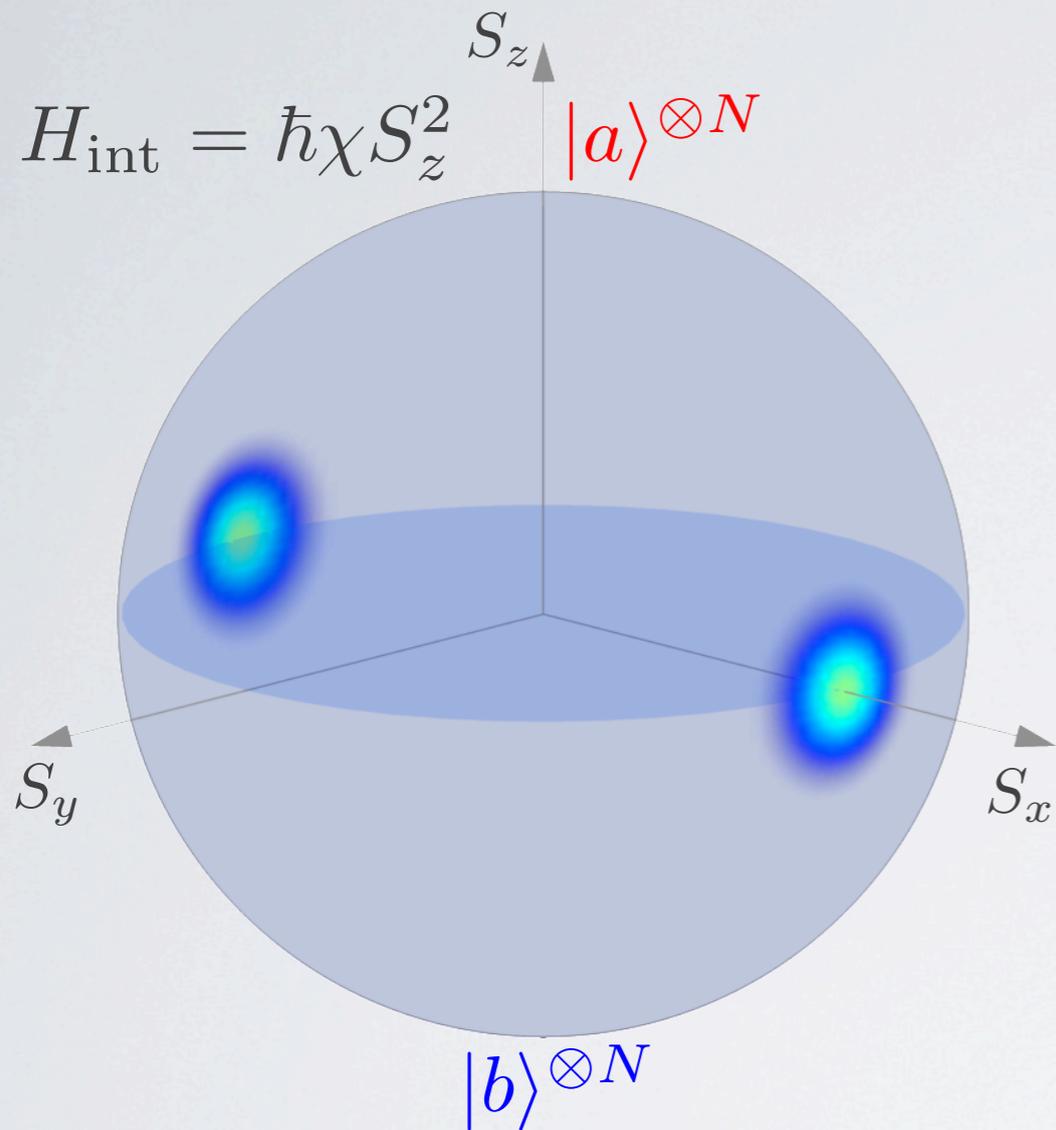
$$\Delta^2 S_z < N/4$$
- $\chi t \gtrsim 1/\sqrt{N}$  : Brouillage de la phase
- $\chi t = \pi/p$ ,  $N = 0[p]$  : Résurgences partielles  
 $\Rightarrow$  superposition de  $p$  états cohérents
- $\chi t = \pi/2$  : Superposition  $\pm S_x$
- Après un pulse  $\pi/2$  : **état NOON**  

$$|a : \mathbf{N}, b : \mathbf{0}\rangle + |a : \mathbf{0}, b : \mathbf{N}\rangle$$

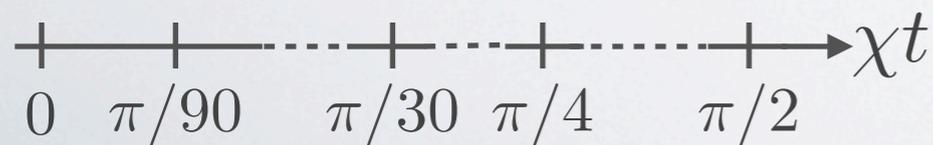


$\Rightarrow$  Chat de Schrödinger spinoriel

# Chat de Schrödinger spinoriel



**Décohérence !**



- Etat initial  $(|a\rangle + |b\rangle)^{\otimes N}$ ,  $\Delta^2 S_z = N/4$
- $\chi t \ll 1$  : Compression de spin  
 $\Delta^2 S_z < N/4$
- $\chi t \gtrsim 1/\sqrt{N}$  : Brouillage de la phase
- $\chi t = \pi/p$ ,  $N = 0[p]$  : Résurgences partielles  
 $\Rightarrow$  superposition de  $p$  états cohérents
- $\chi t = \pi/2$  Superposition  $\pm S_x$
- Après un pulse  $\pi/2$  : état NOON  
 $|a : \mathbf{N}, b : \mathbf{0}\rangle + |a : \mathbf{0}, b : \mathbf{N}\rangle$   
 $\Rightarrow$  Chat de Schrödinger spinoriel

# Limiter la décohérence

- Faible champ magnétique, dont les fluctuations sont source de décohérence

⇒ **Environnement  
amagnétique**

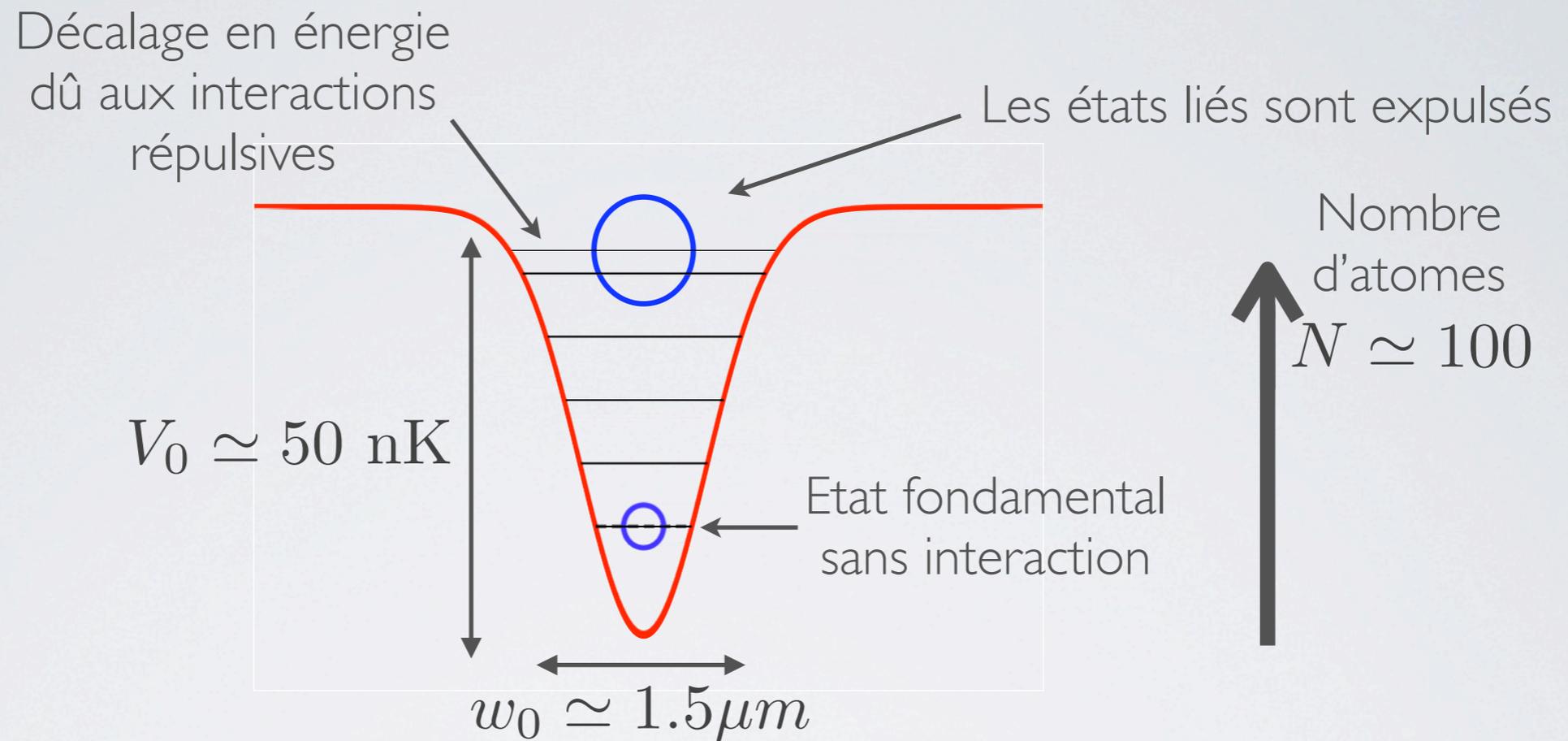
- Moins d'un atome perdu (en moyenne) pendant la durée de l'évolution
  - Maximiser les interactions entre espèces de spin
  - Utiliser une espèce atomique avec de faibles coefficients de pertes

⇒ **Atome de sodium**

- Limiter le nombre d'atomes de l'échantillon pour mieux le contrôler

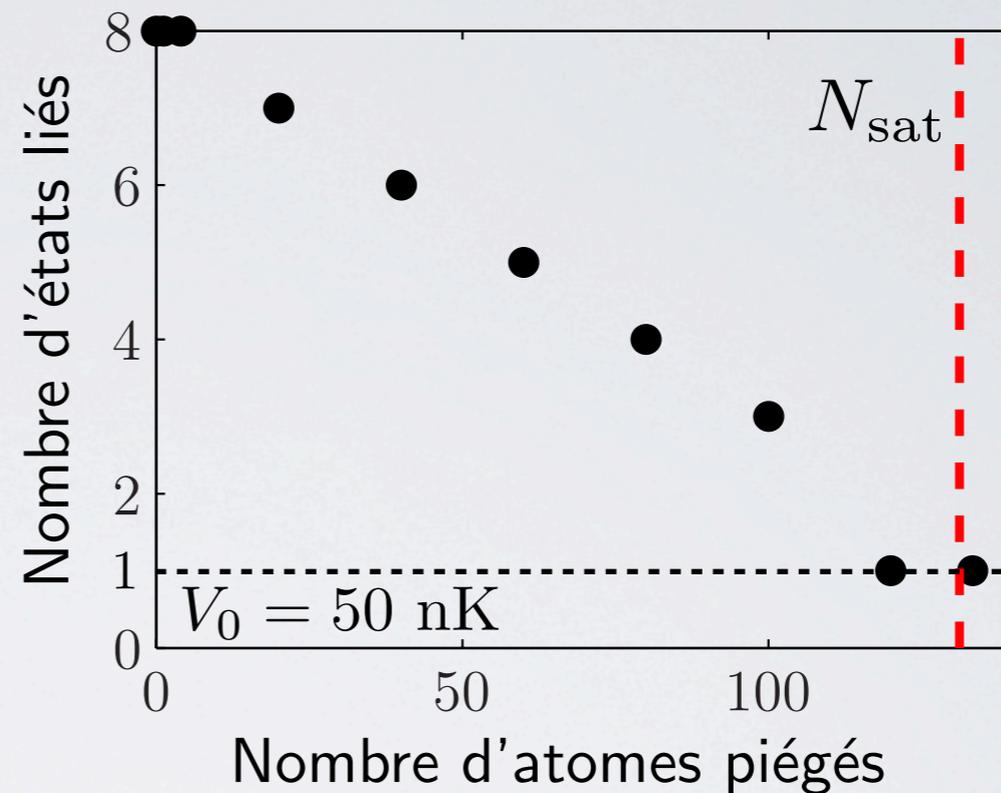
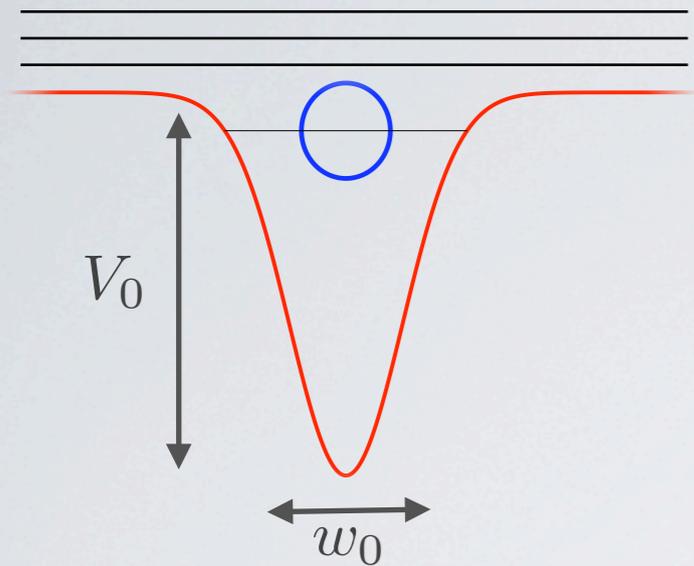
⇒ **Piège mésoscopique**

# Un piège optique mésoscopique



- Piège optique gaussien  $V(x)$  d'extension  $w_0$  et de profondeur  $V_0$  finie
- Le nombre d'atomes dans le piège est limité par les interactions répulsives
- Avec l'augmentation du nombre d'atomes, **un unique état lié** demeure  
⇒ pas d'interaction avec la fraction non condensée

# Etats excités du piège mésoscopique



- Résolution numérique de l'équation de Gross-Pitaevskii 1D pour trouver l'état fondamental du système :

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(x) + g_{1D} N |\varphi_0(x)|^2 \right] \varphi_0(x) = \mu \varphi_0(x)$$

- Seuil «d'explosion» de la taille du fondamental  $N_{\text{sat}} \propto \frac{V_0 w_0}{g_{1D}}$
- Stabilité accrue du condensat face aux perturbations du piège

# Plan de l'exposé

I. Motivations pour la création de l'expérience

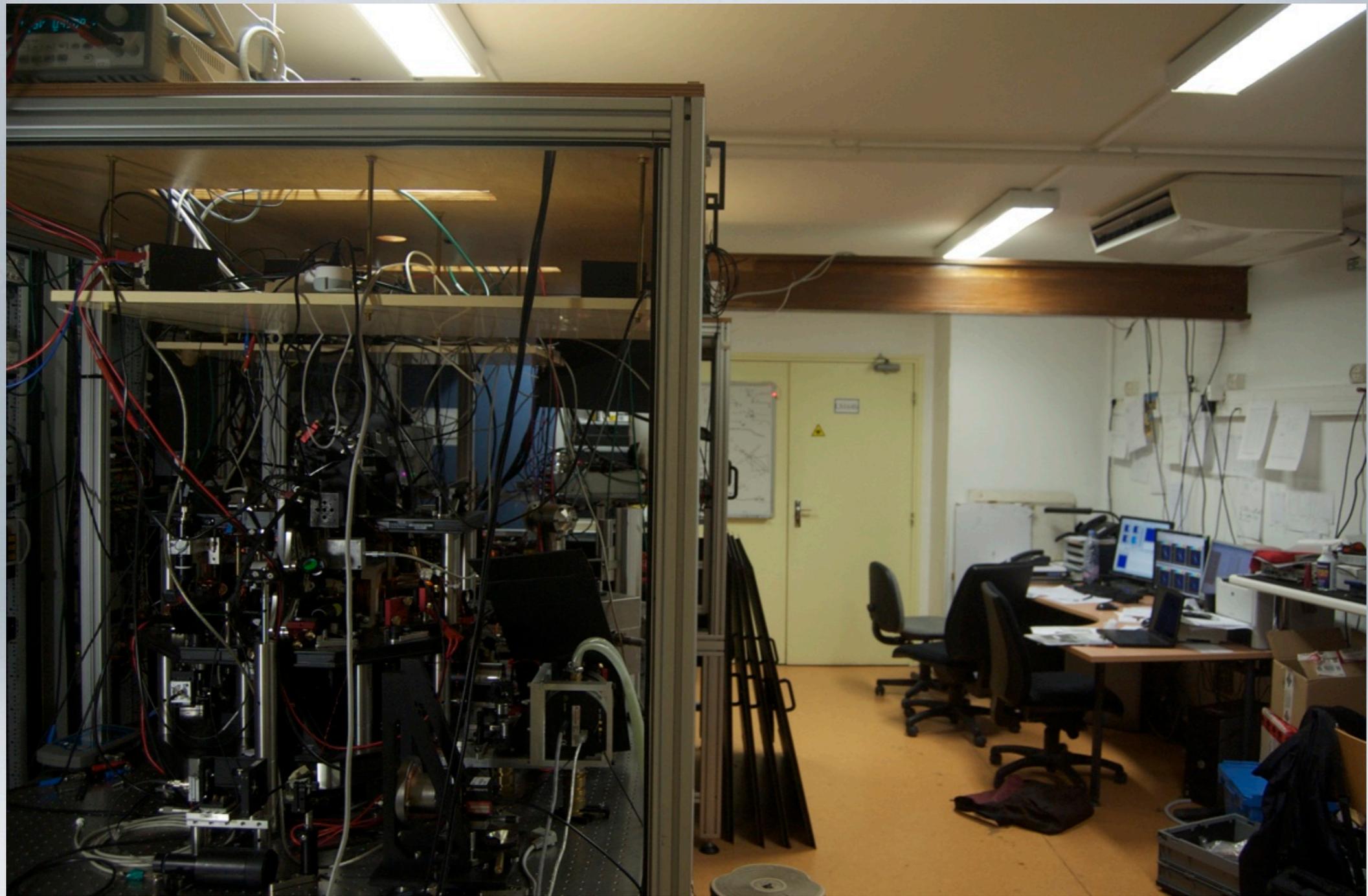
II. Travail expérimental

1. Laser solide à 589 nm pour le refroidissement du sodium

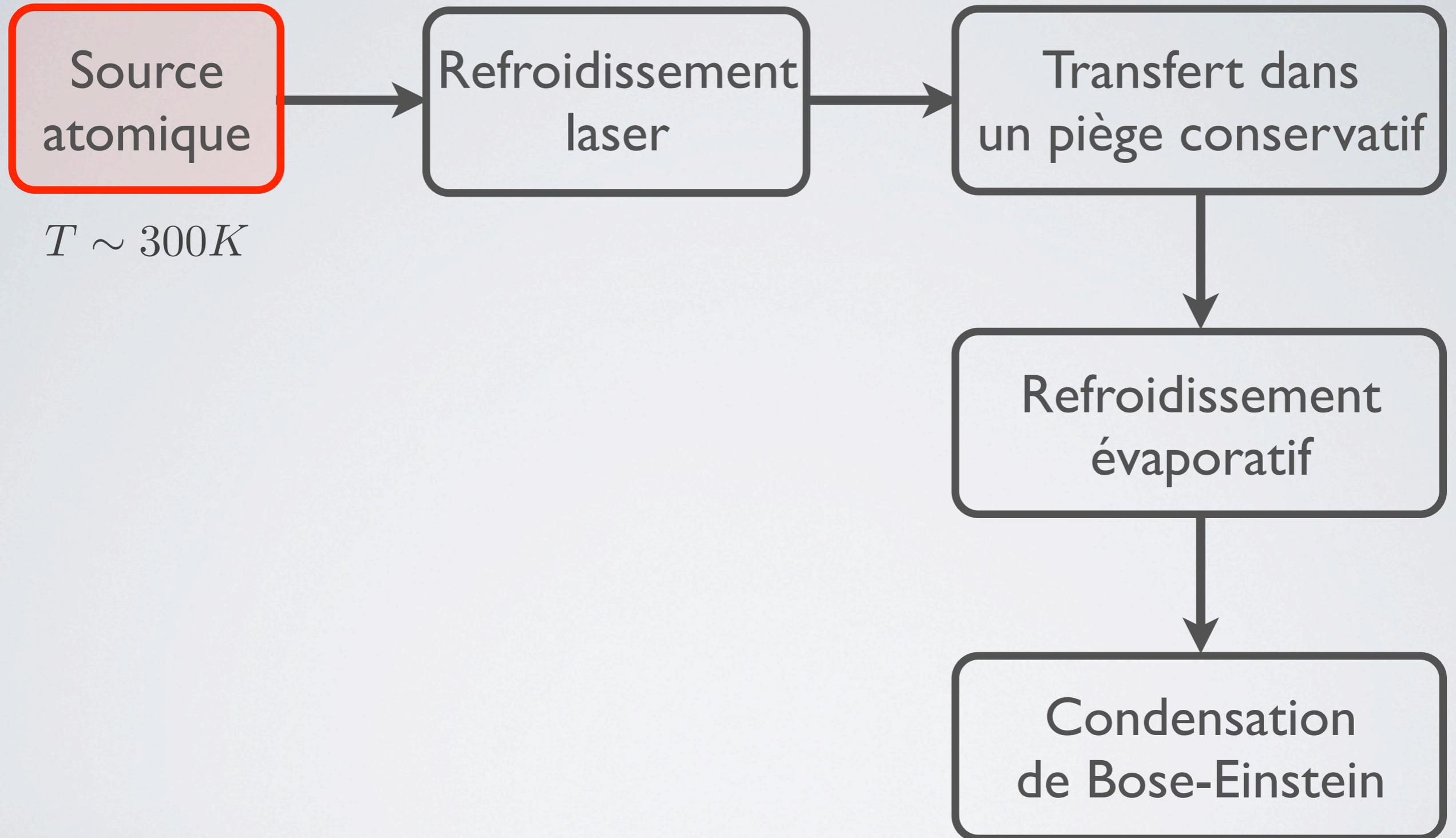
2. Chargement d'un PMO par désorption induite par la lumière

3. Condensation tout-optique dans un piège mésoscopique

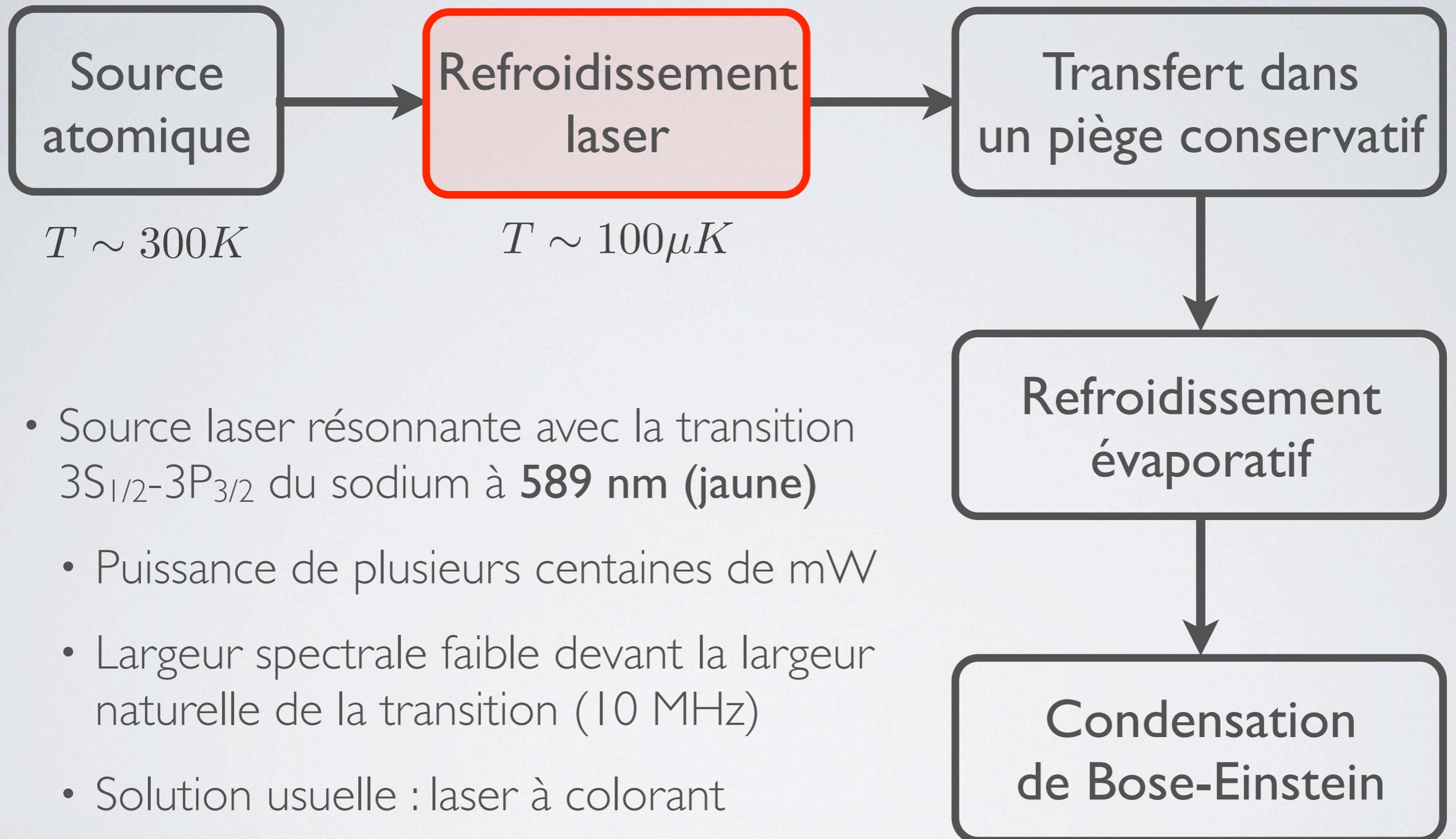




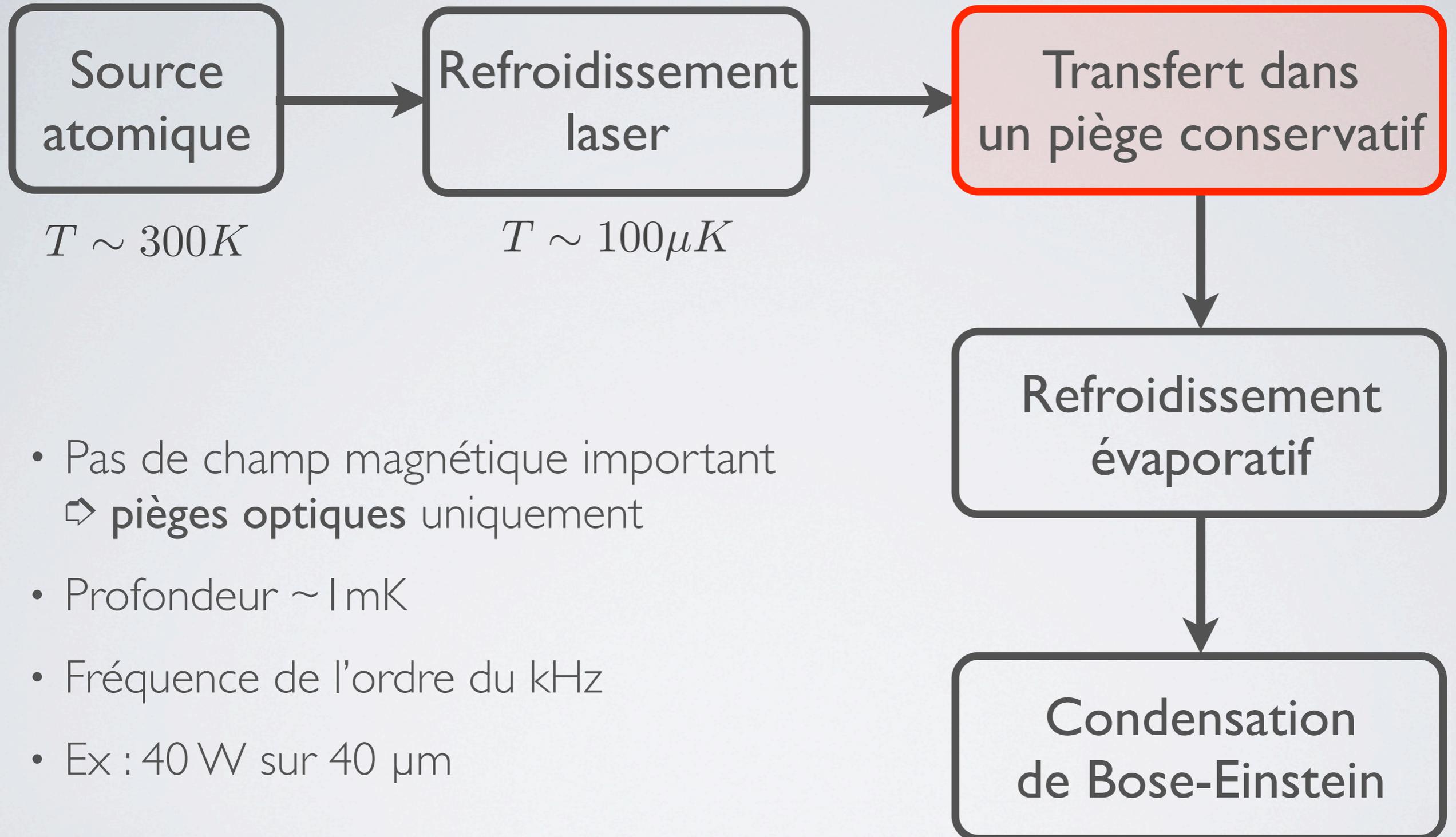
# Vers la condensation de Bose-Einstein



# Vers la condensation de Bose-Einstein

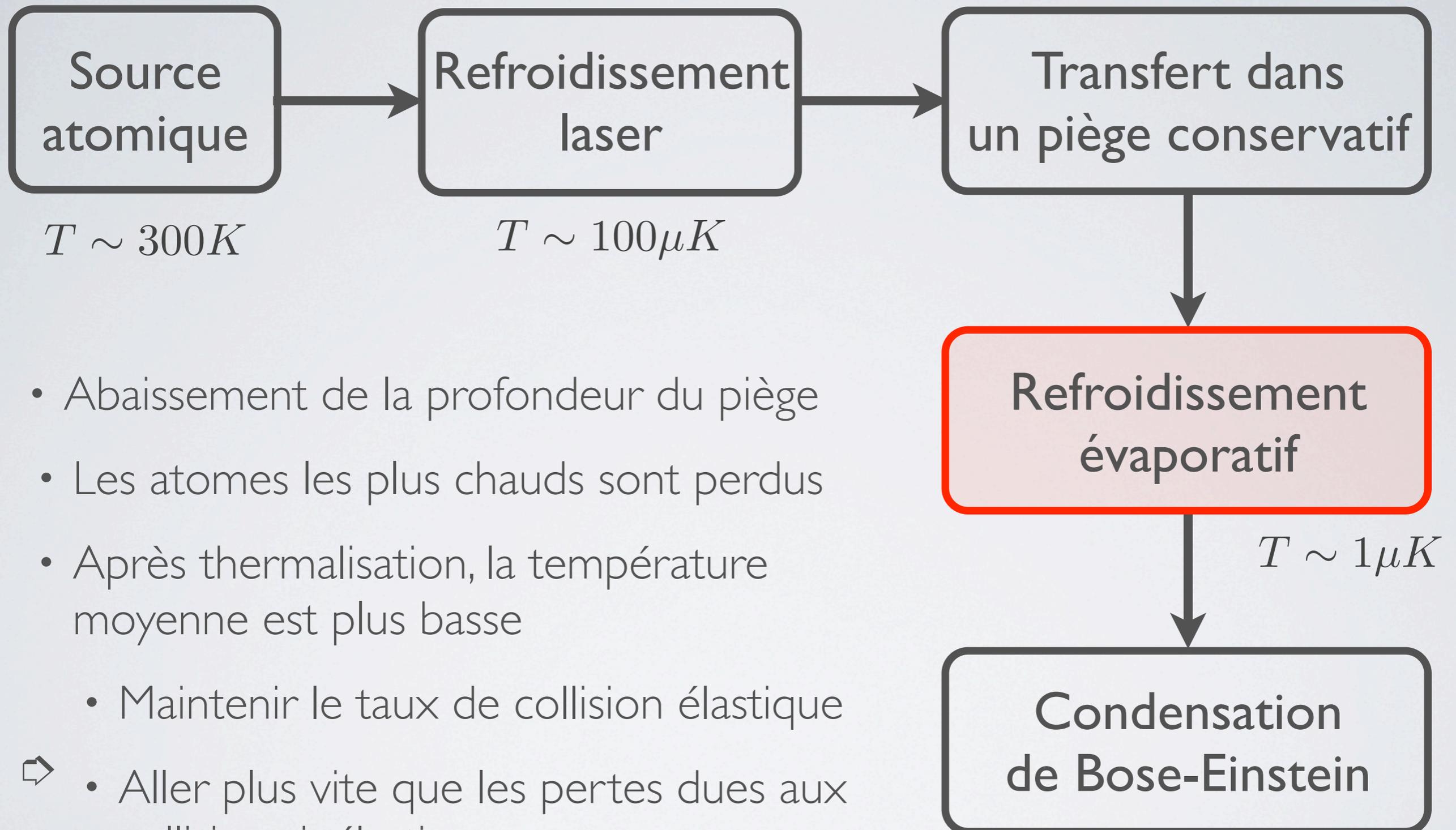


# Vers la condensation de Bose-Einstein



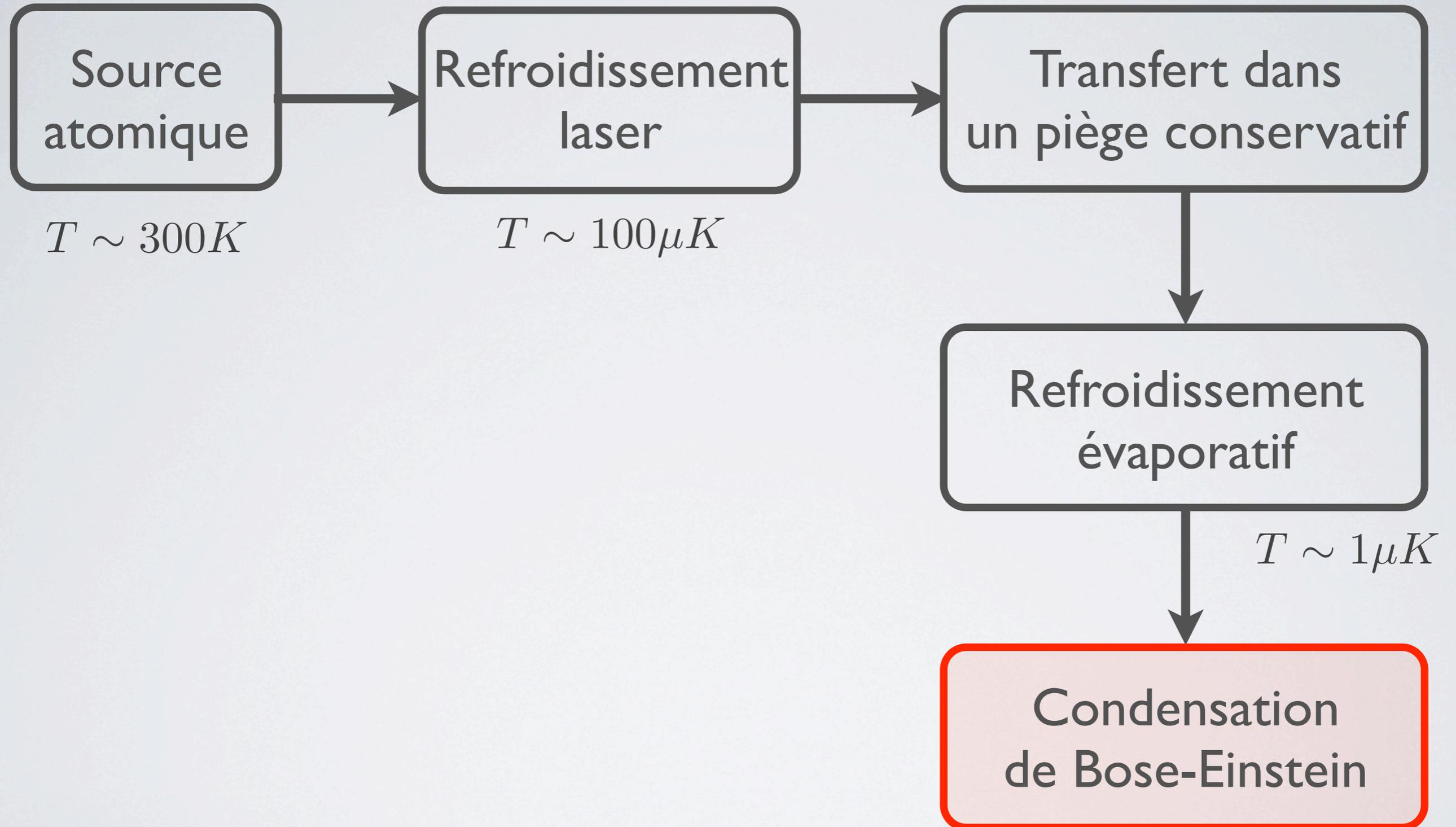
- Pas de champ magnétique important  
⇒ **pièges optiques** uniquement
- Profondeur  $\sim 1\text{ mK}$
- Fréquence de l'ordre du kHz
- Ex : 40 W sur  $40\ \mu\text{m}$

# Vers la condensation de Bose-Einstein



- Abaissement de la profondeur du piège
- Les atomes les plus chauds sont perdus
- Après thermalisation, la température moyenne est plus basse
  - Maintenir le taux de collision élastique
- ⇒ • Aller plus vite que les pertes dues aux collisions inélastiques

# Vers la condensation de Bose-Einstein



# Limiter la décohérence

- Faible champ magnétique, dont les fluctuations sont sources de décohérence

⇒ **Environnement  
amagnétique**

- Moins d'un atome perdu (en moyenne) pendant la durée de l'évolution
  - Maximiser les interactions entre espèces de spin
  - Utiliser une espèce atomique avec de faibles coefficients de pertes

⇒ **Atome de sodium**

- Limiter le nombre d'atomes de l'échantillon pour mieux le contrôler

⇒ **Piège mésoscopique**

# Cahier des charges expérimental

## ↳ Environnement amagnétique

- Blindage magnétique  
Matériaux amagnétiques
- Pas de ralentisseur Zeeman
- Compacité du dispositif  
↳ enceinte unique

## ↳ Atome de sodium

- Refroidissement laser à 589 nm
- Chargement d'un PMO  
↳ flux atomique élevé
- Temps de vie élevée pour le gaz piégé

## ↳ Piège mésoscopique

# Cahier des charges expérimental

## ↳ Environnement amagnétique

- Blindage magnétique  
Matériaux amagnétiques

Pas de ralentisseur  
Zeeman

- Compacité du dispositif  
↳ enceinte unique

## ↳ Atome de sodium

- Refroidissement laser à  
589 nm

- Chargement d'un PMO  
↳ flux atomique élevé

- Temps de vie élevée  
pour le gaz piégé

## ↳ Piège mésoscopique

# Cahier des charges expérimental

## ↳ Environnement amagnétique

- Blindage magnétique  
Matériaux amagnétiques
- Pas de ralentisseur Zeeman
- Compacité du dispositif  
↳ enceinte unique

## ↳ Atome de sodium

- Refroidissement laser à 589 nm
- Chargement d'un PMO  
↳ flux atomique élevé
- Temps de vie élevée pour le gaz piégé

## ↳ Piège mésoscopique

# Cahier des charges expérimental

## ⇒ Environnement amagnétique

- Blindage magnétique  
Matériaux amagnétiques
- Pas de ralentisseur Zeeman
- Compacité du dispositif  
⇒ enceinte unique

## ⇒ Atome de sodium

- Refroidissement laser à 589 nm
- Chargement d'un PMO  
⇒ flux atomique élevé
- Temps de vie élevée pour le gaz piégé

## ⇒ Piège mésoscopique

⇒ Alternance rapide nécessaire entre deux régimes de pression

# Cahier des charges expérimental

## ⇒ Environnement amagnétique

- Blindage magnétique  
Matériaux amagnétiques
- Pas de ralentisseur Zeeman
- Compacité du dispositif  
⇒ enceinte unique

## ⇒ Atome de sodium

- Refroidissement laser à 589 nm
- Chargement d'un PMO  
⇒ flux atomique élevé
- Temps de vie élevée pour le gaz piégé

## ⇒ Piège mésoscopique

- Focalisation à la limite de diffraction (1-2  $\mu\text{m}$ )
- Imagerie haute résolution  
⇒ optique dédiée à deux longueurs d'onde  
⇒ ouverture numérique élevée

⇒ Alternance rapide nécessaire entre deux régimes de pression

# Plan de l'exposé

I. Motivations pour la création de l'expérience

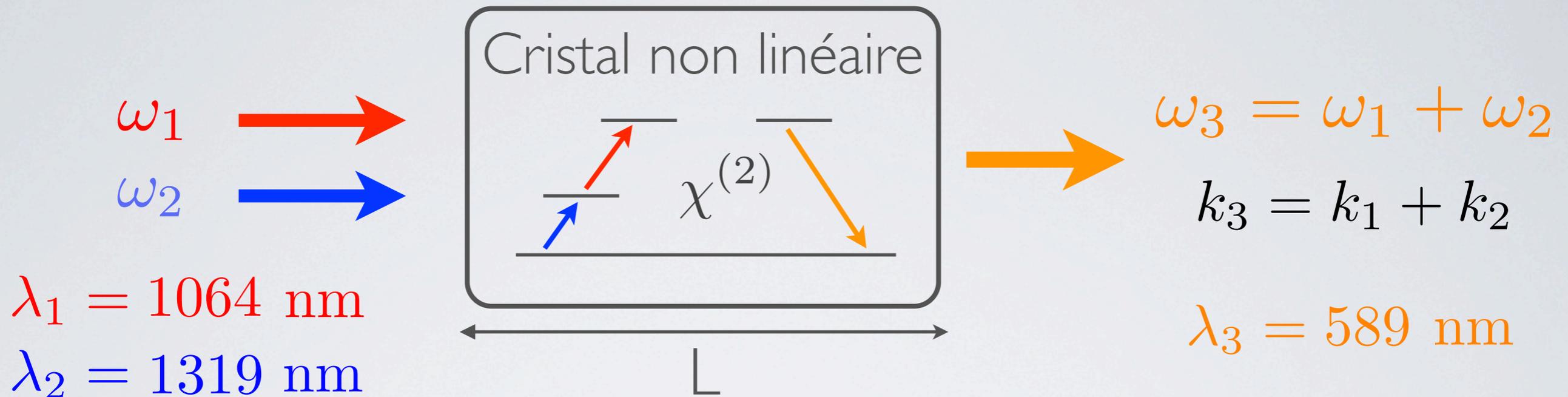
II. Travail expérimental

1. Laser solide à 589 nm pour le refroidissement du sodium

2. Chargement d'un PMO par désorption induite par la lumière

3. Condensation tout-optique dans un piège mésoscopique

# Somme de fréquence



$$P_3 = \alpha P_1 P_2$$

$$\alpha \propto d^2 L^2, \quad P_3 \ll P_1 P_2$$

d: coefficient non-linéaire  
L: longueur du cristal

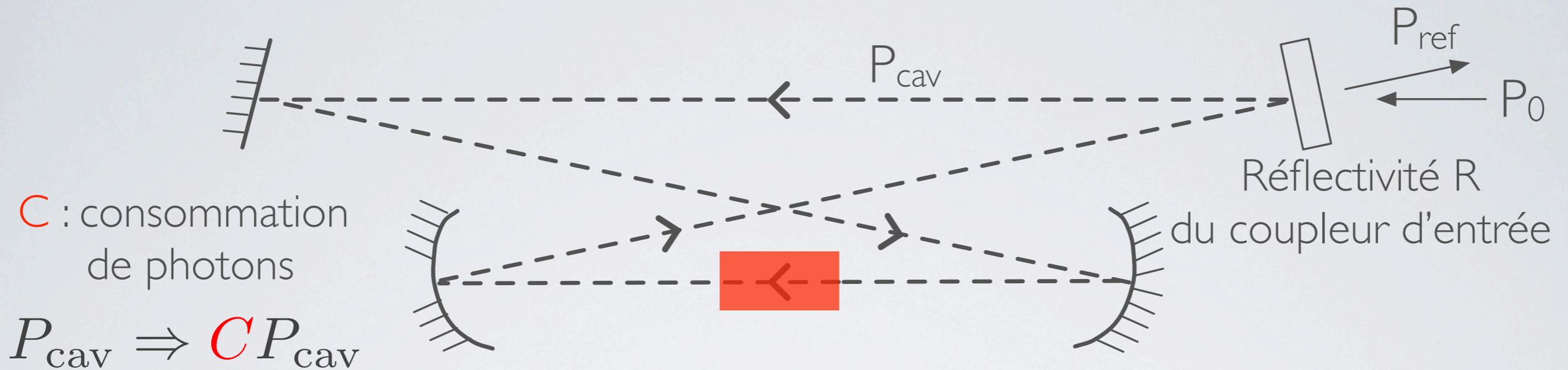
- Condition d'accord de phase  
⇒ cristal de ppKTP
- Coefficient de conversion non-linéaire typique assez faible

$$\alpha \simeq 0.02 \text{ W/W}^2$$

⇒ utilisation d'une cavité optique

1064 → 589  
1319 →

# Somme de fréquence en cavité



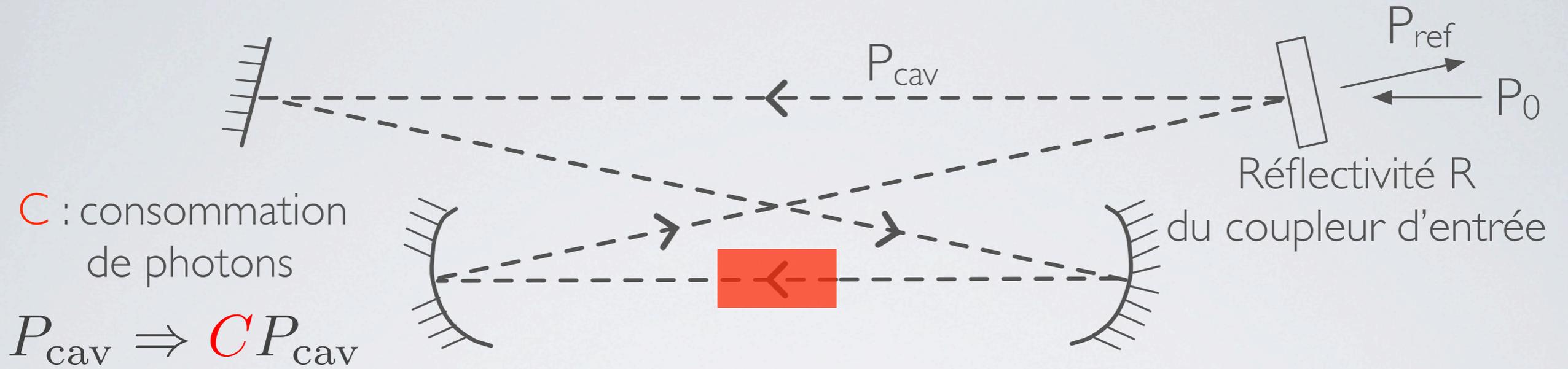
- A résonance les puissances intra-cavité  $P_{cav}$  et réfléchies  $P_{ref}$  sont:

$$\frac{P_{cav}}{P_0} = \frac{1 - R}{(1 - \sqrt{RC})^2} \quad \frac{P_{ref}}{P_0} = \left( \frac{\sqrt{C} - \sqrt{R}}{1 - \sqrt{RC}} \right)^2$$

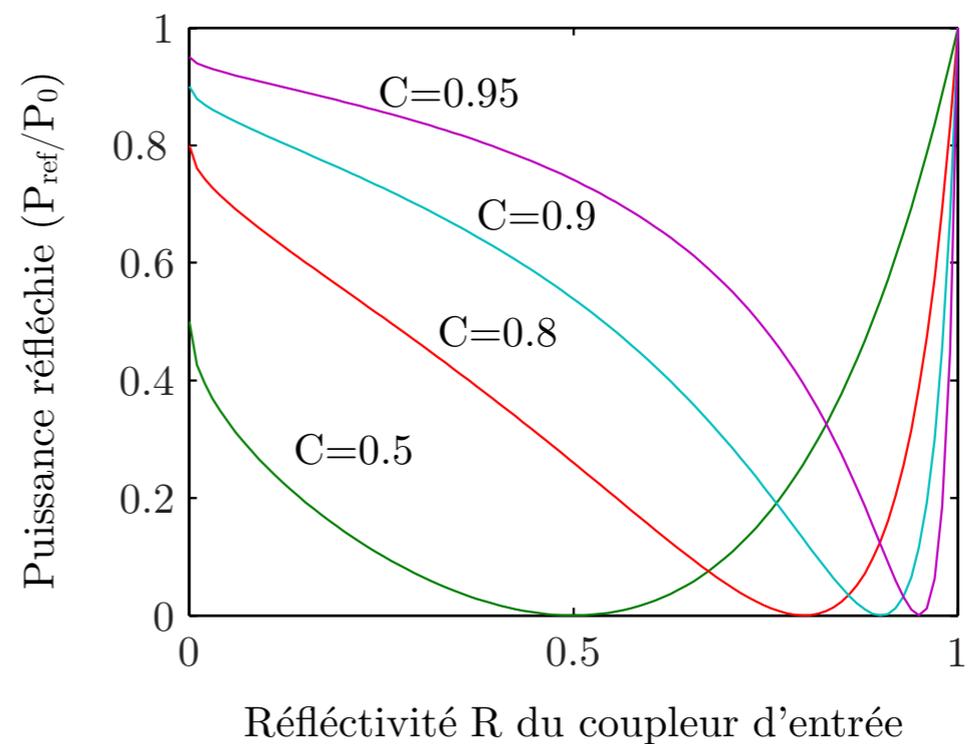
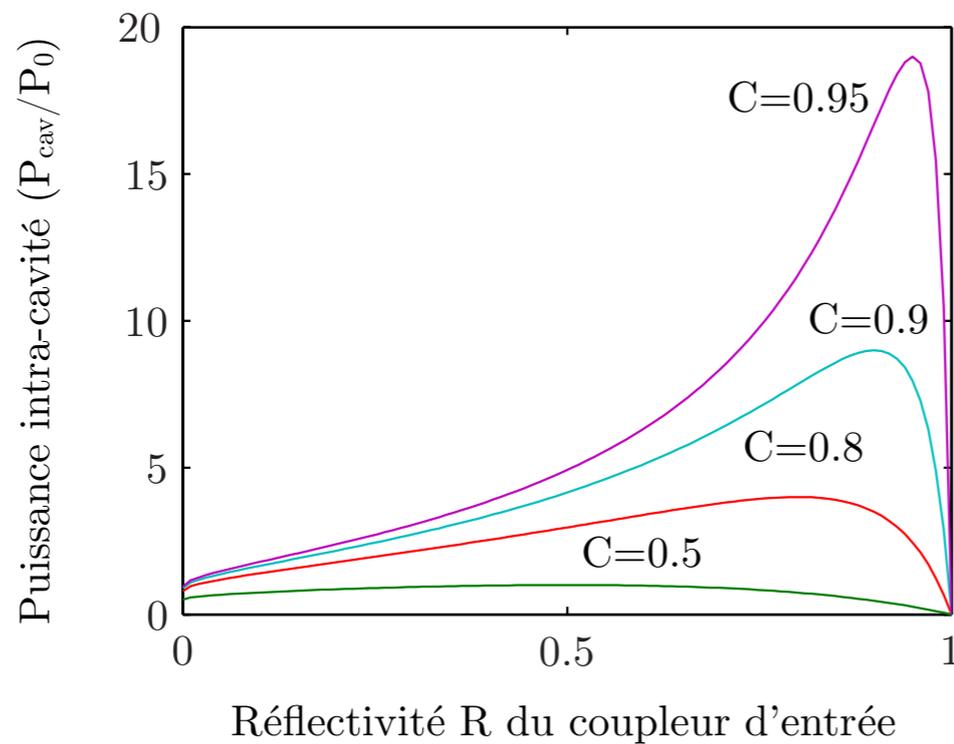
- Question : trouver la valeur  $R$  en fonction de  $C$  telle que tous les photons soient absorbés, i.e.  $P_{ref} = 0$  ?  $R = C$

1064  
1319 → 589

# Somme de fréquence en cavité

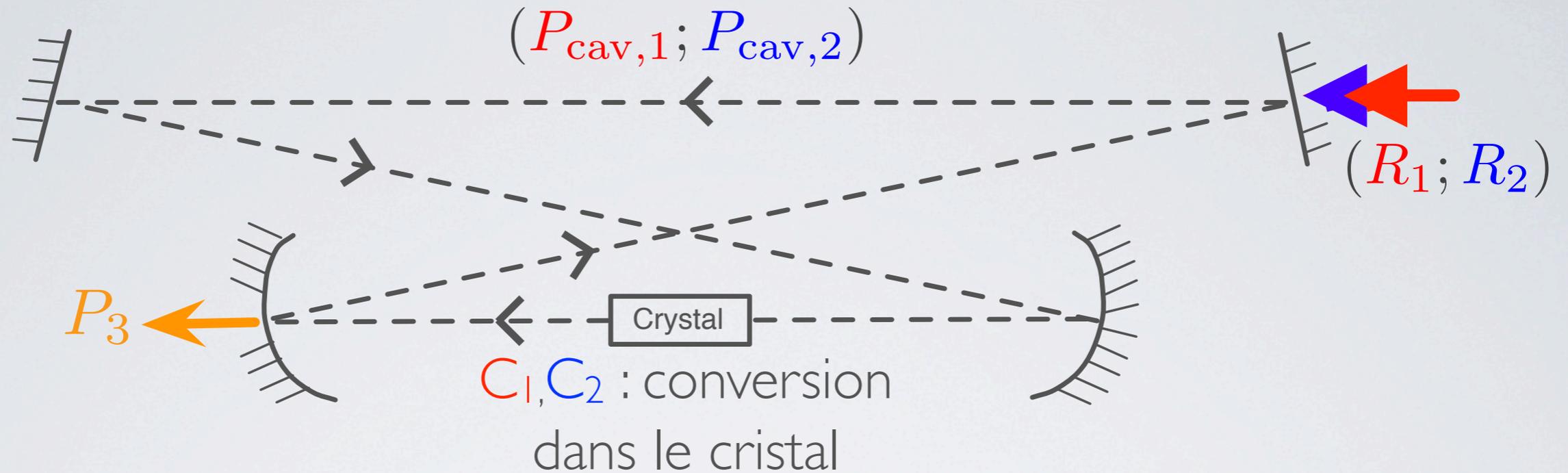


## Adaptation d'impédance



1064 → 589  
1319 →

# Somme de fréquence en cavité



- Conversion totale : 100% de la source laser la plus faible, ici le laser 2
- Problème non linéaire :  $C_2$  dépend de  $P_{cav,1}$  et inv., via  $P_3 = \alpha P_1 P_2$
- Sans pertes : une famille de couple  $(R_1, R_2)$  permet une conversion totale
- Pertes passives : il existe un optimum avec une conversion  $> 90\%$

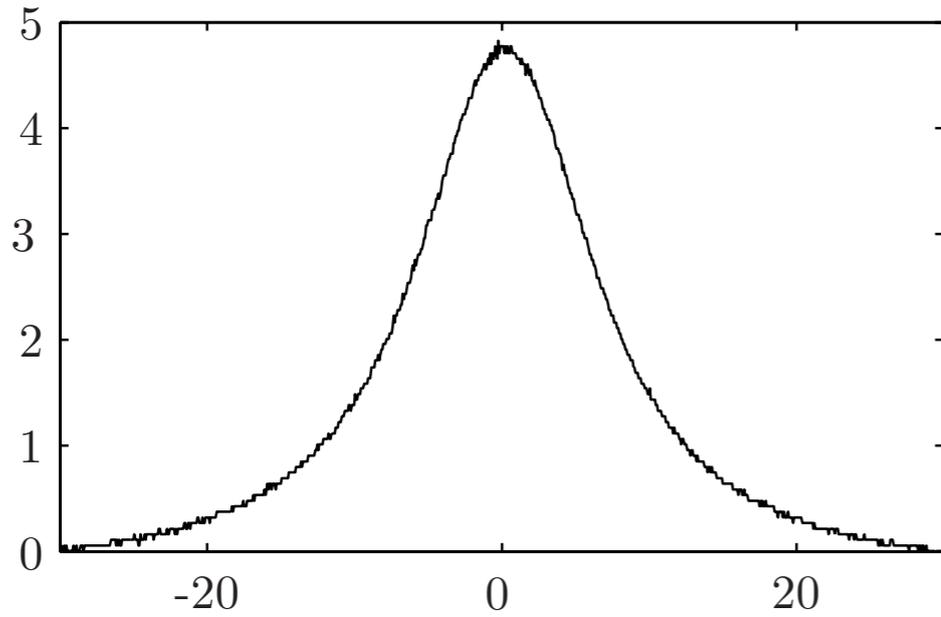
$$R_1 = 0.93, \quad P_{cav,1}/P_{0,1} = 16$$

$$R_2 = 0.75, \quad P_{cav,2}/P_{0,2} = 2.5$$

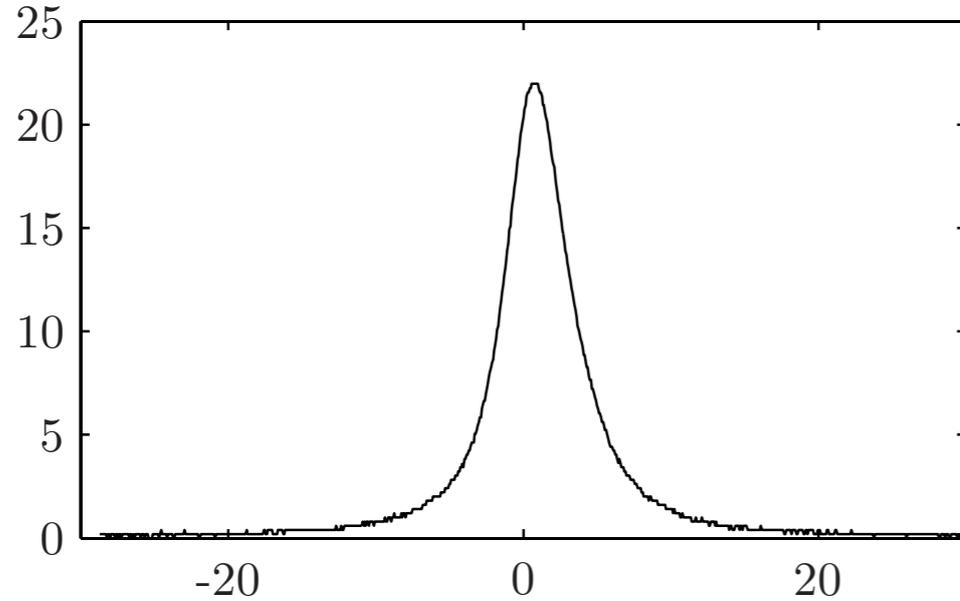
1064  
1319 → 589

# Somme de fréquence en cavité

Puissance intra-cavité  
à 1319 nm [W]

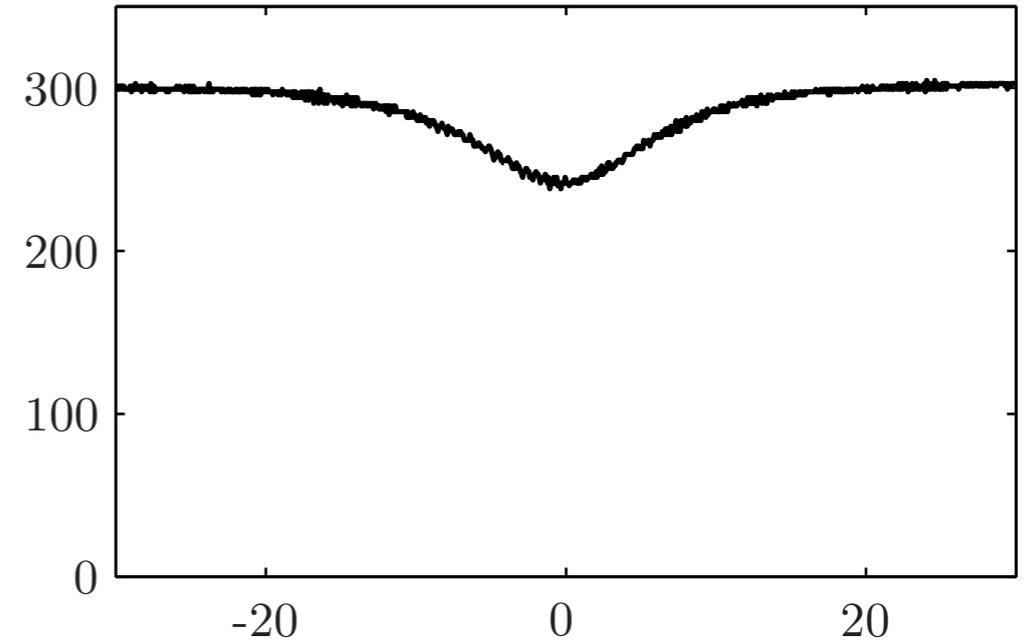


Puissance intra-cavité  
à 1064 nm [W]

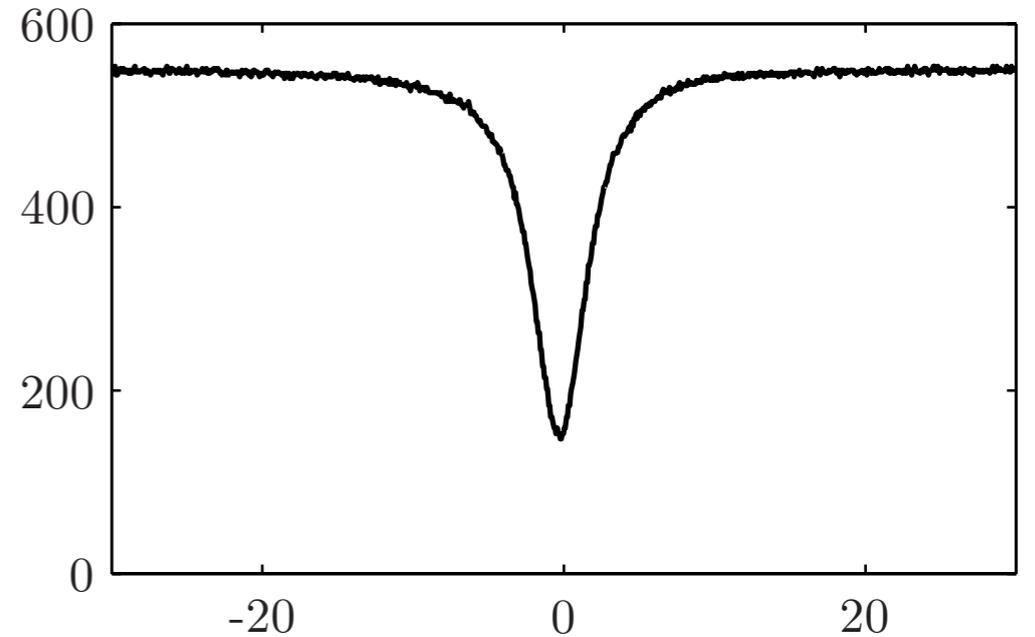


Scan en fréquence [Mhz]

Puissance réfléchie  
à 1319 nm [W]



Puissance réfléchie  
à 1064 nm [W]



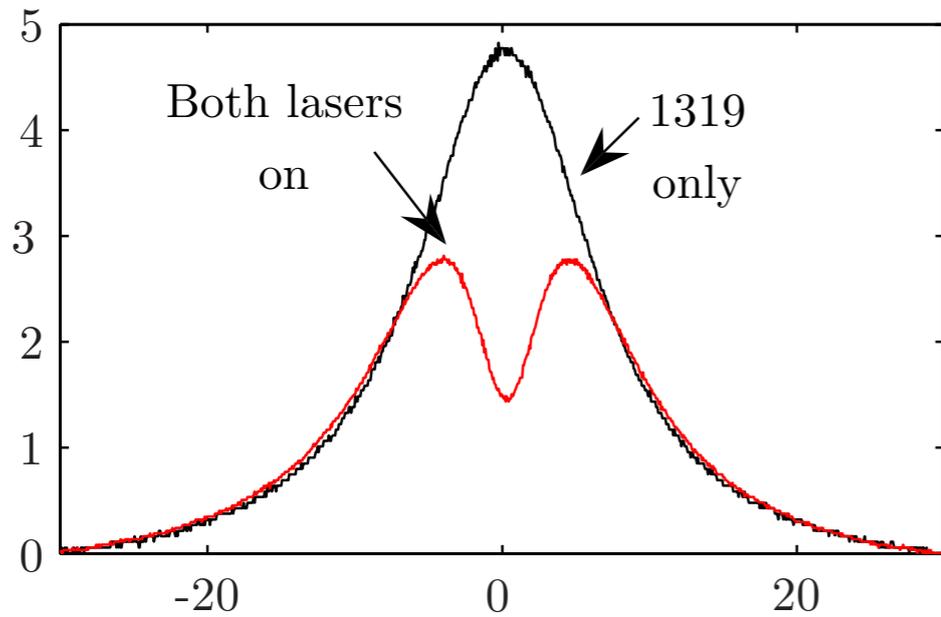
Scan en fréquence [Mhz]

Lorsqu'un seul laser est allumé, la conversion n'a pas lieu.  
La condition d'adaptation d'impédance n'est pas réalisée.

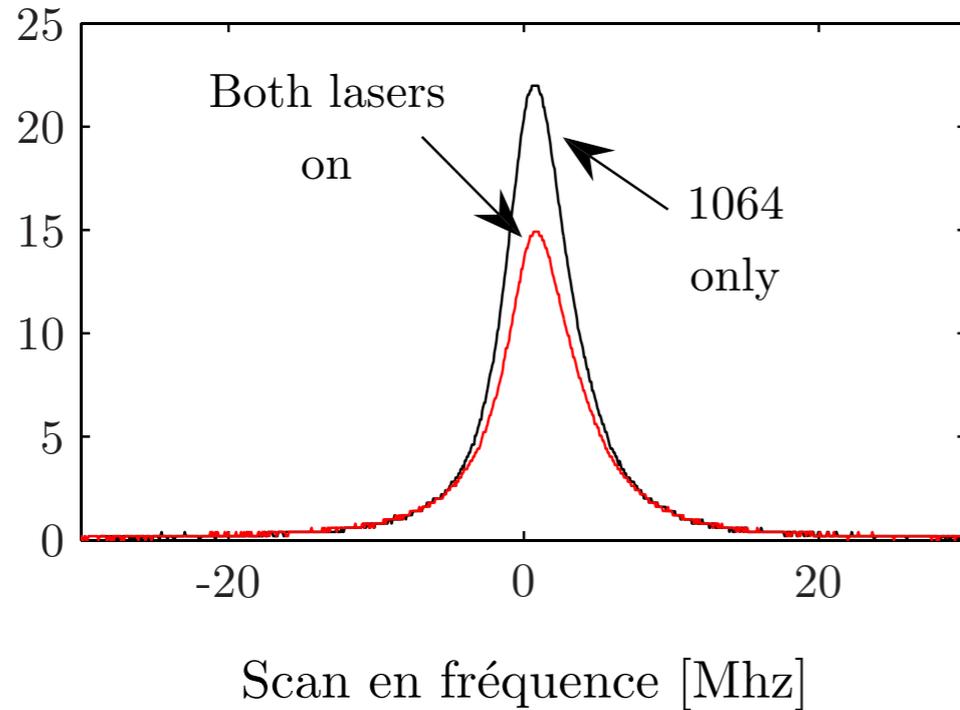
1064  
1319 → 589

# Somme de fréquence en cavité

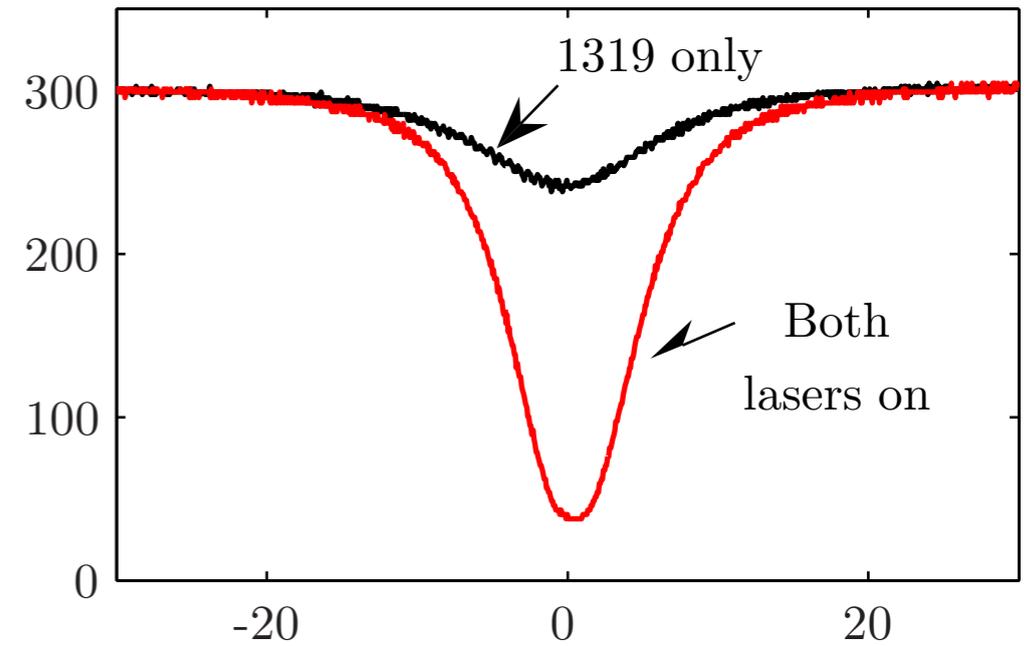
Puissance intra-cavité  
à 1319 nm [W]



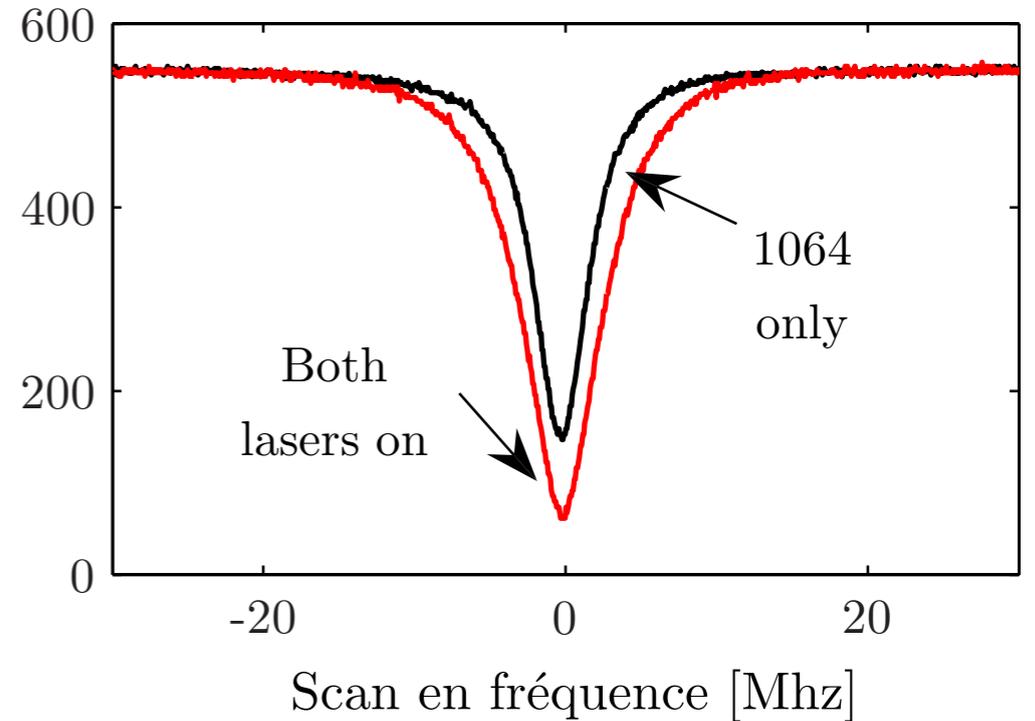
Puissance intra-cavité  
à 1064 nm [W]



Puissance réfléchie  
à 1319 nm [W]



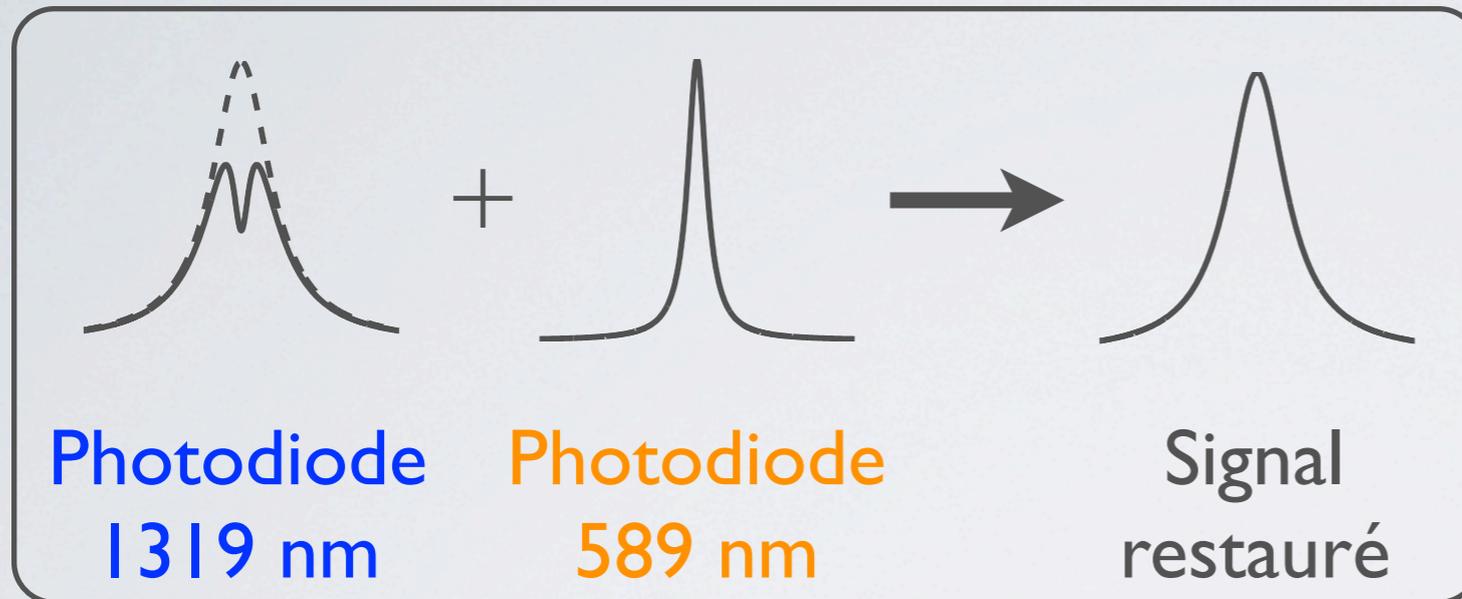
Puissance réfléchie  
à 1064 nm [W]



Adaptation d'impédance réalisée :  
92 % des photons du laser à 1319 nm sont convertis.

# Electronique de verrouillage

- Compensation de la déplétion de la puissance intra-cavité à 1319 nm

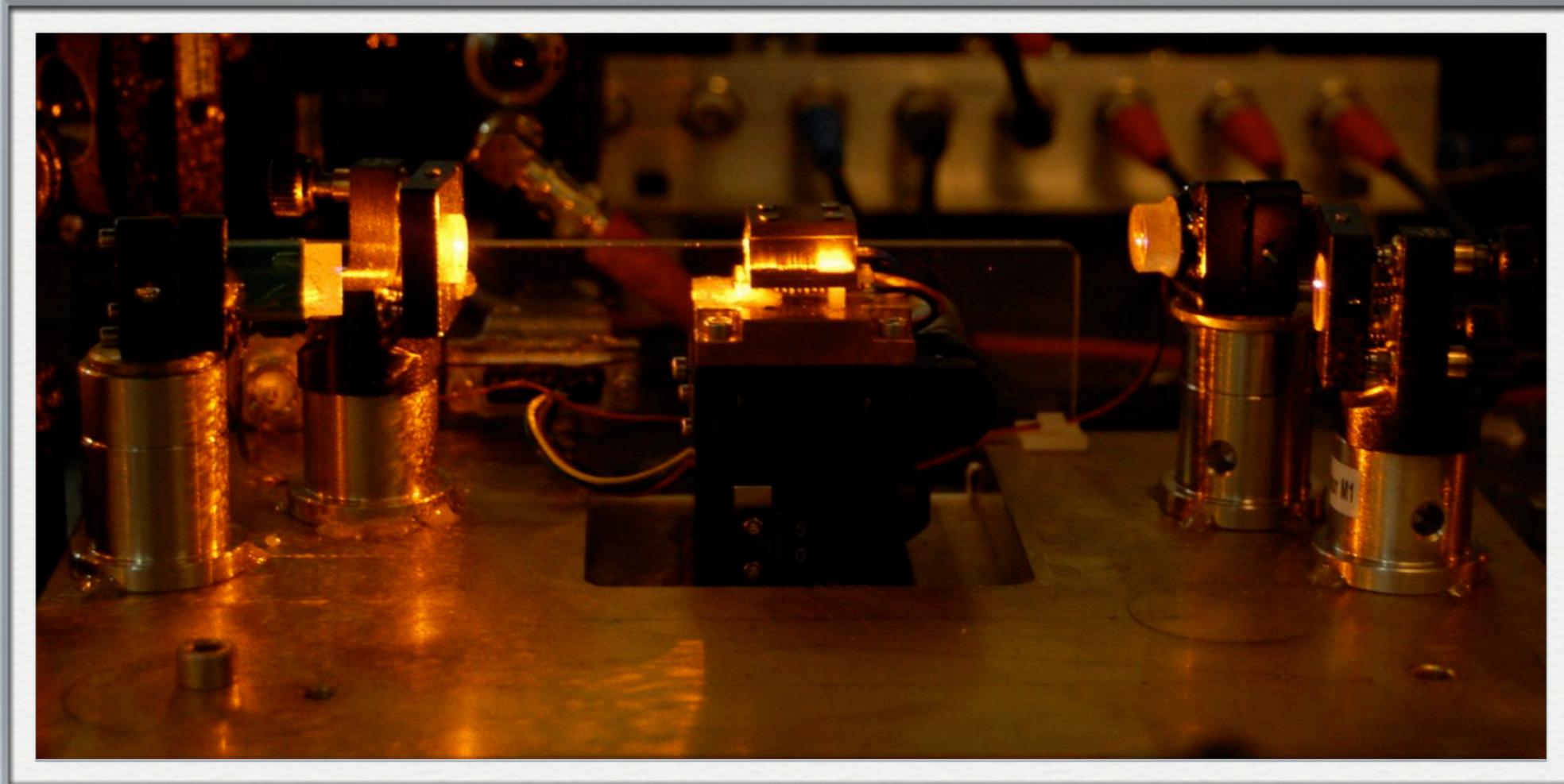


La combinaison électronique de l'onde consommée avec l'onde produite permet le verrouillage de la cavité.

- **Systeme «auto-relock»**
  - Lors d'une perturbation importante, l'intégrateur est neutralisé et la valeur de correction de l'asservissement est figée.
  - Lorsque la perturbation prend fin, l'intégrateur de la boucle est réactivé et le système retourne à son état initial.

1064  
1319  
589

# Caractéristiques du laser



EM et al., Opt. Express **16** 18684 (2008)

EM et al., Appl. Phys. B **99** 31 (2010)

- 800 mW, 92% des photons couplés dans la cavité convertis
- Bonne qualité de faisceau :  $M^2 = 1.01$
- Très faible maintenance
- Stable thermiquement, mise en route rapide

# Plan de l'exposé

I. Motivations pour la création de l'expérience

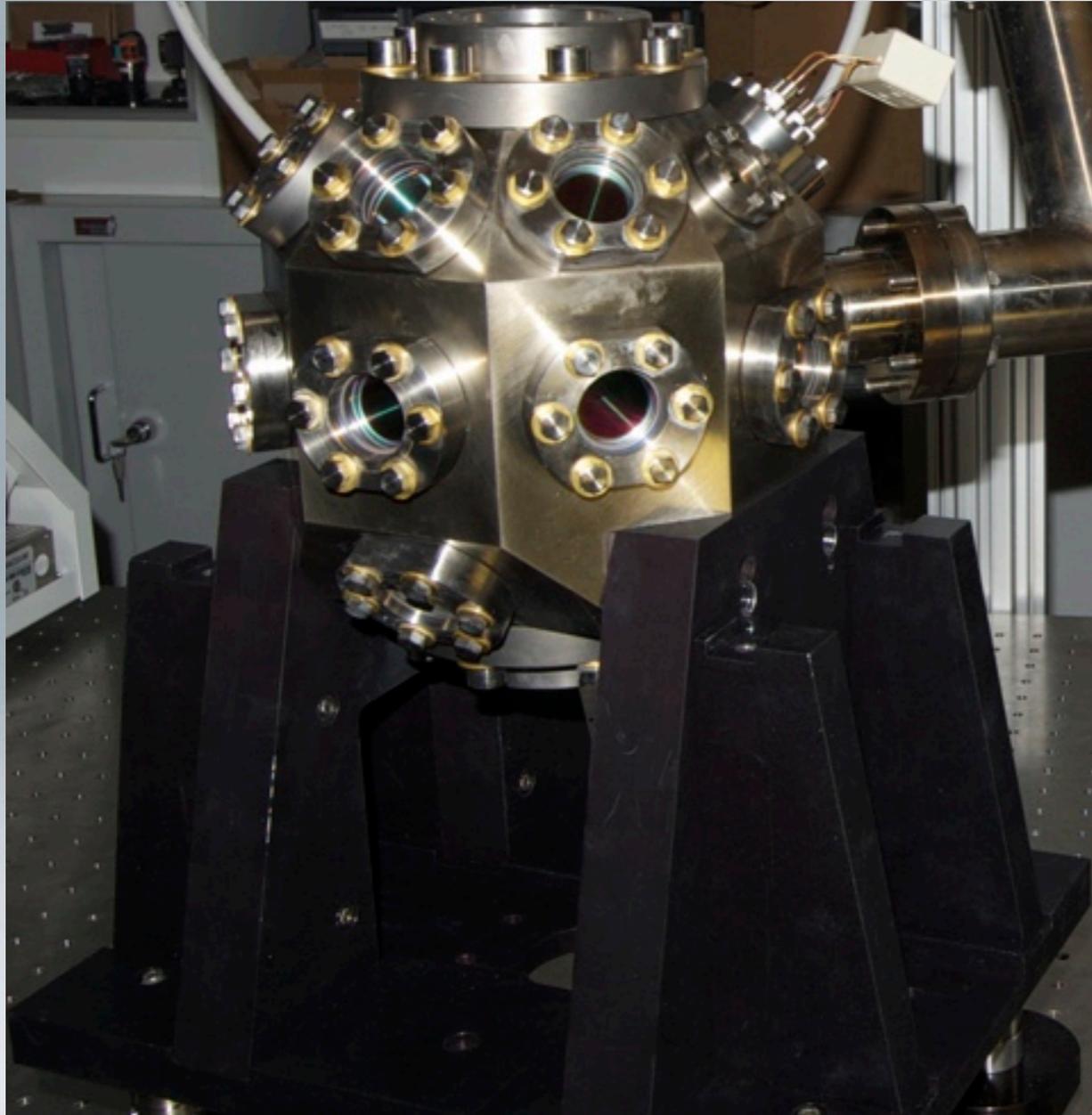
II. Travail expérimental

1. Laser solide à 589 nm pour le refroidissement du sodium

2. Chargement d'un PMO par désorption induite par la lumière

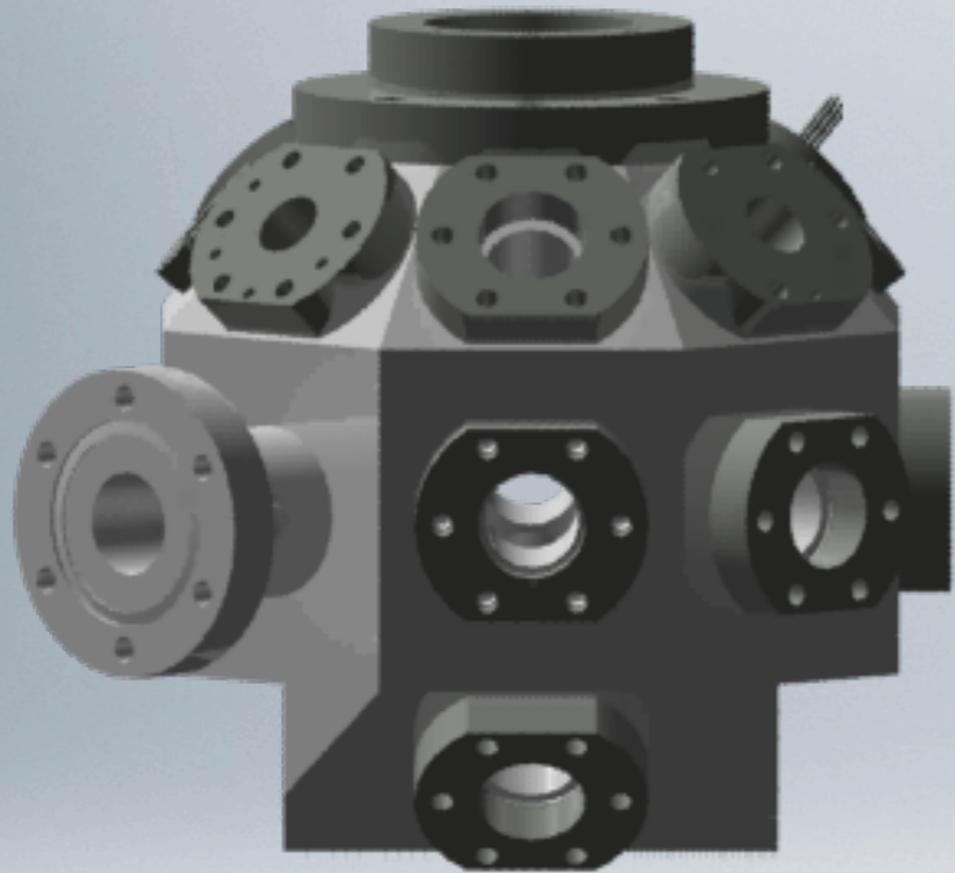
3. Condensation tout-optique dans un piège mésoscopique

# Une enceinte à vide amagnétique



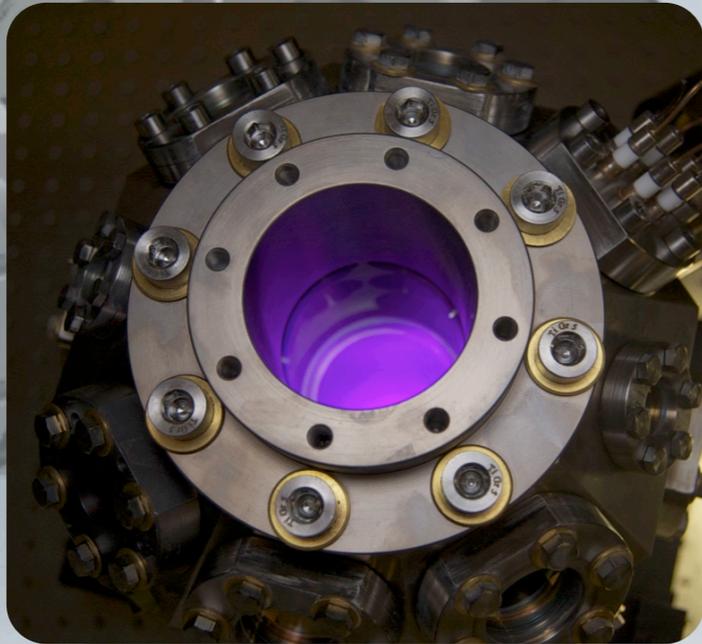
- Accès optique maximisé
- Réalisé en titane (amagnétique)

# Une enceinte à vide amagnétique



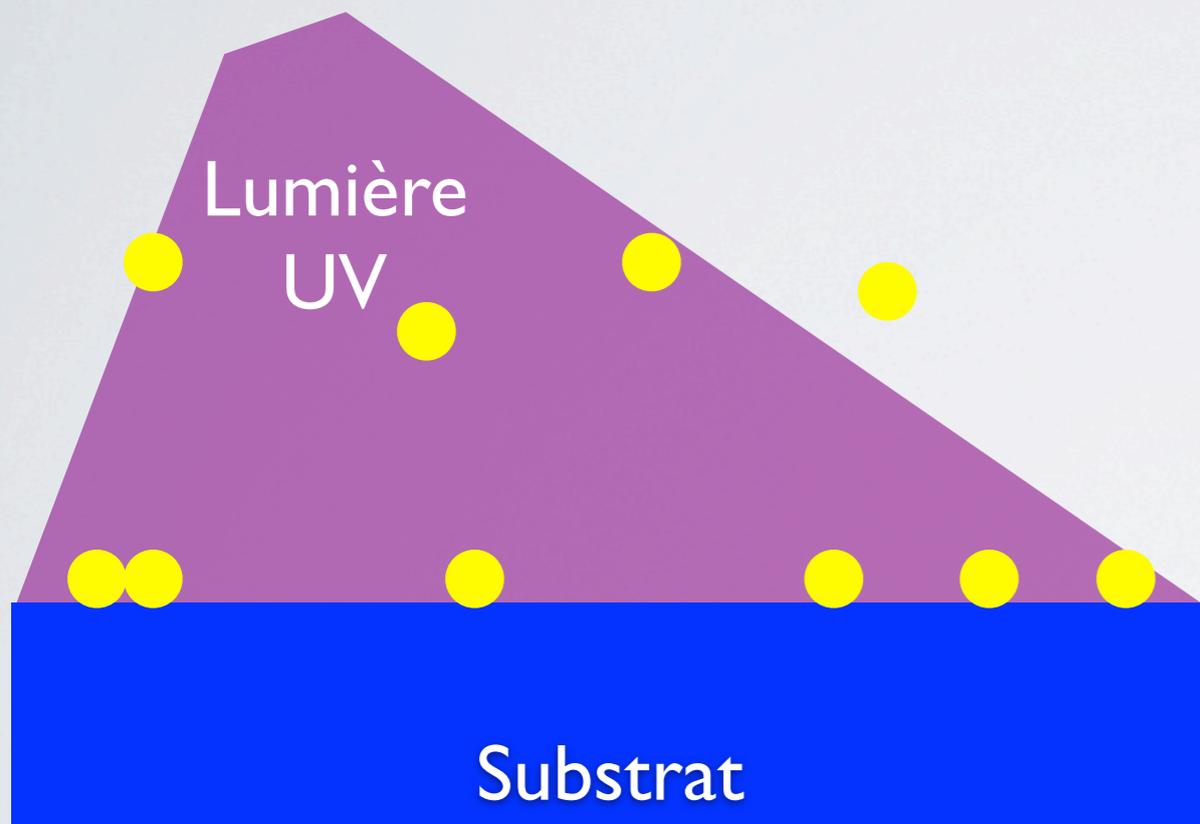
- Accès optique maximisé
- Réalisé en titane (amagnétique)

# Une enceinte à vide amagnétique



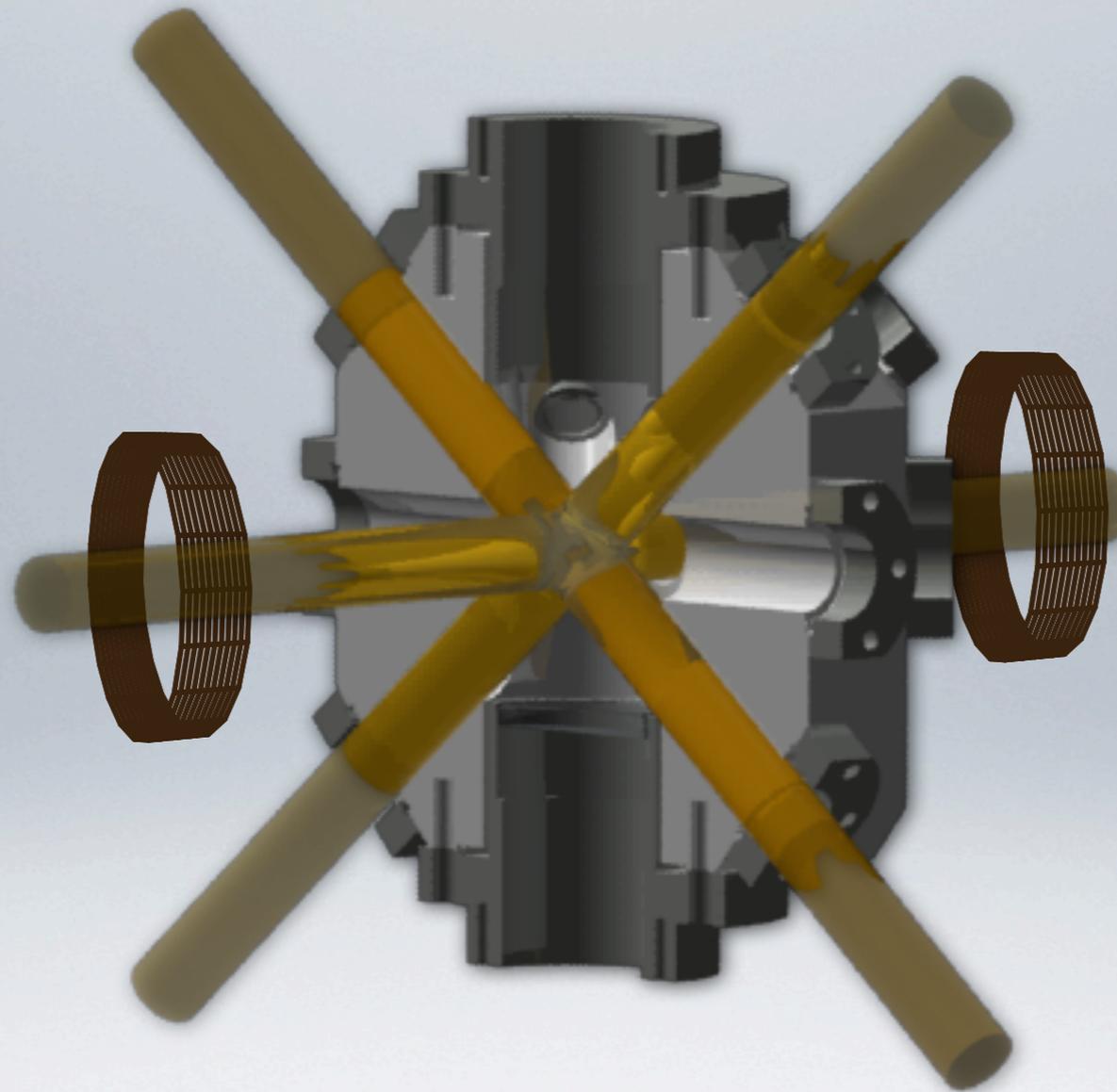
- Accès optique maximisé
- Réalisé en titane (amagnétique)
- Grande ouverture numérique sur 2 ports (NA  $\sim 0.33$ )
  - Piège dipolaire focalisé
  - Imagerie haute résolution

# Désorption induite par la lumière

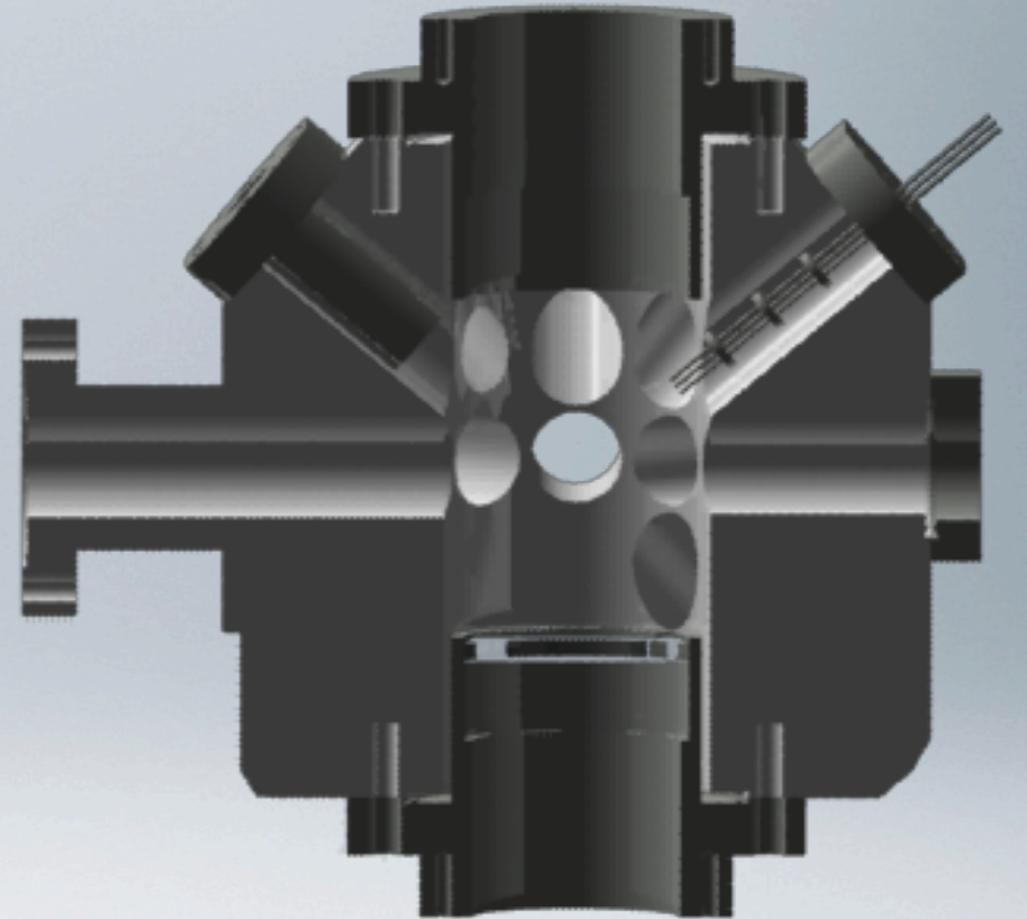
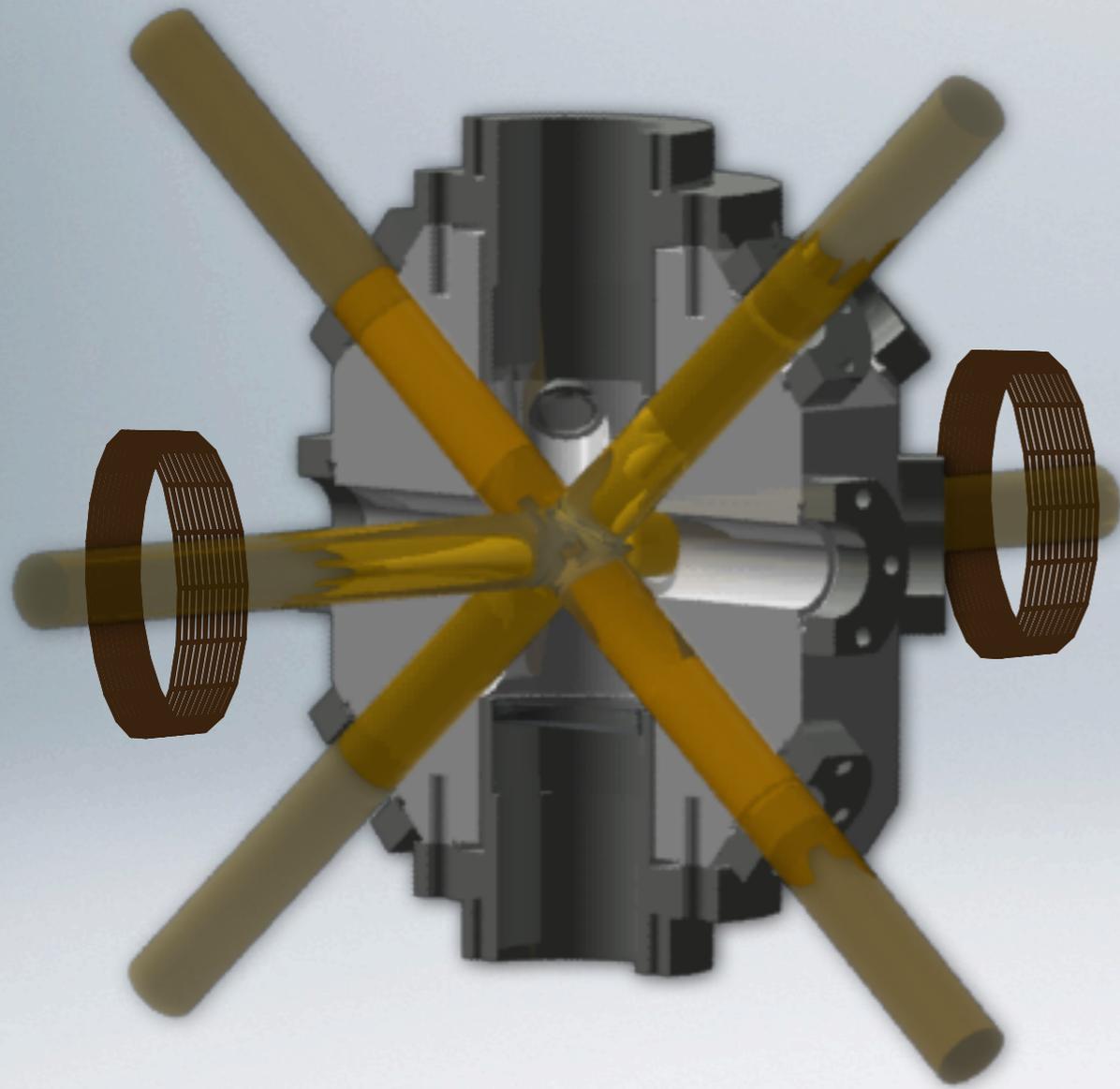


- Les atomes sont désorbés de la surface en absorbant un photon (effet analogue à l'effet photo-électrique)
- Les atomes désorbés forment une vapeur qui sert de source atomique pour le PMO (piège magnéto-optique)

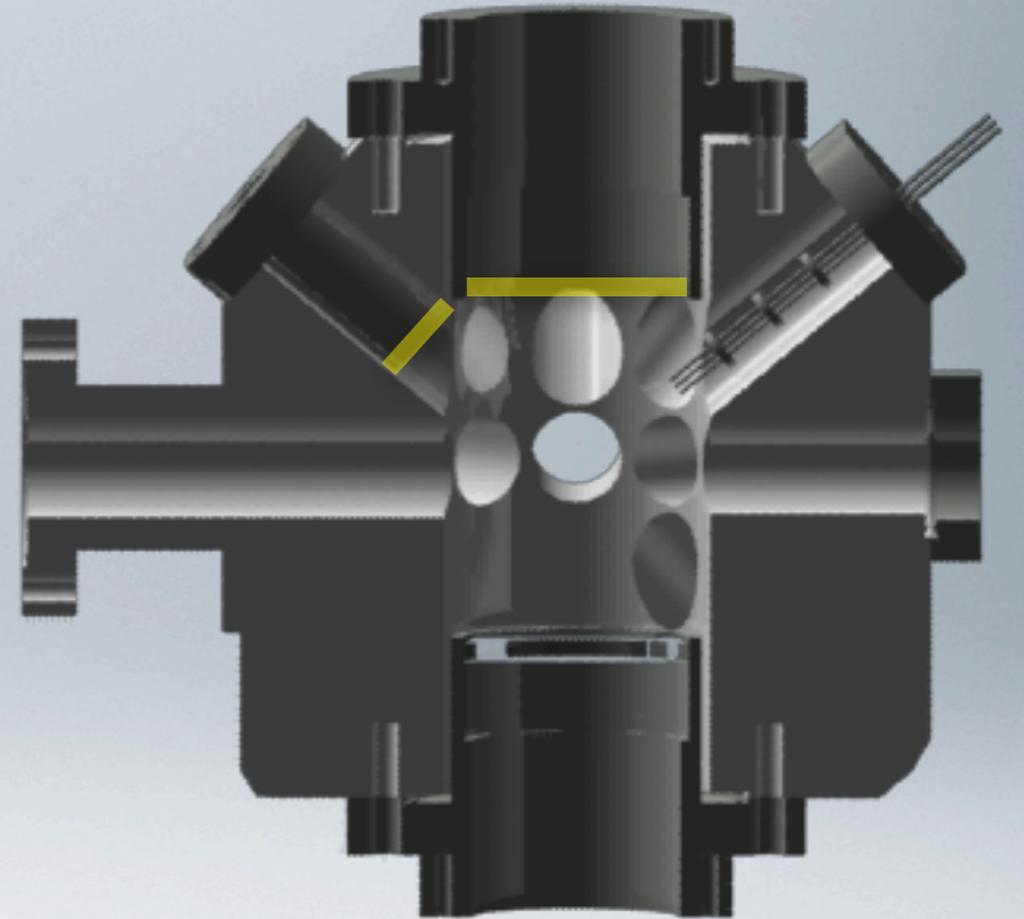
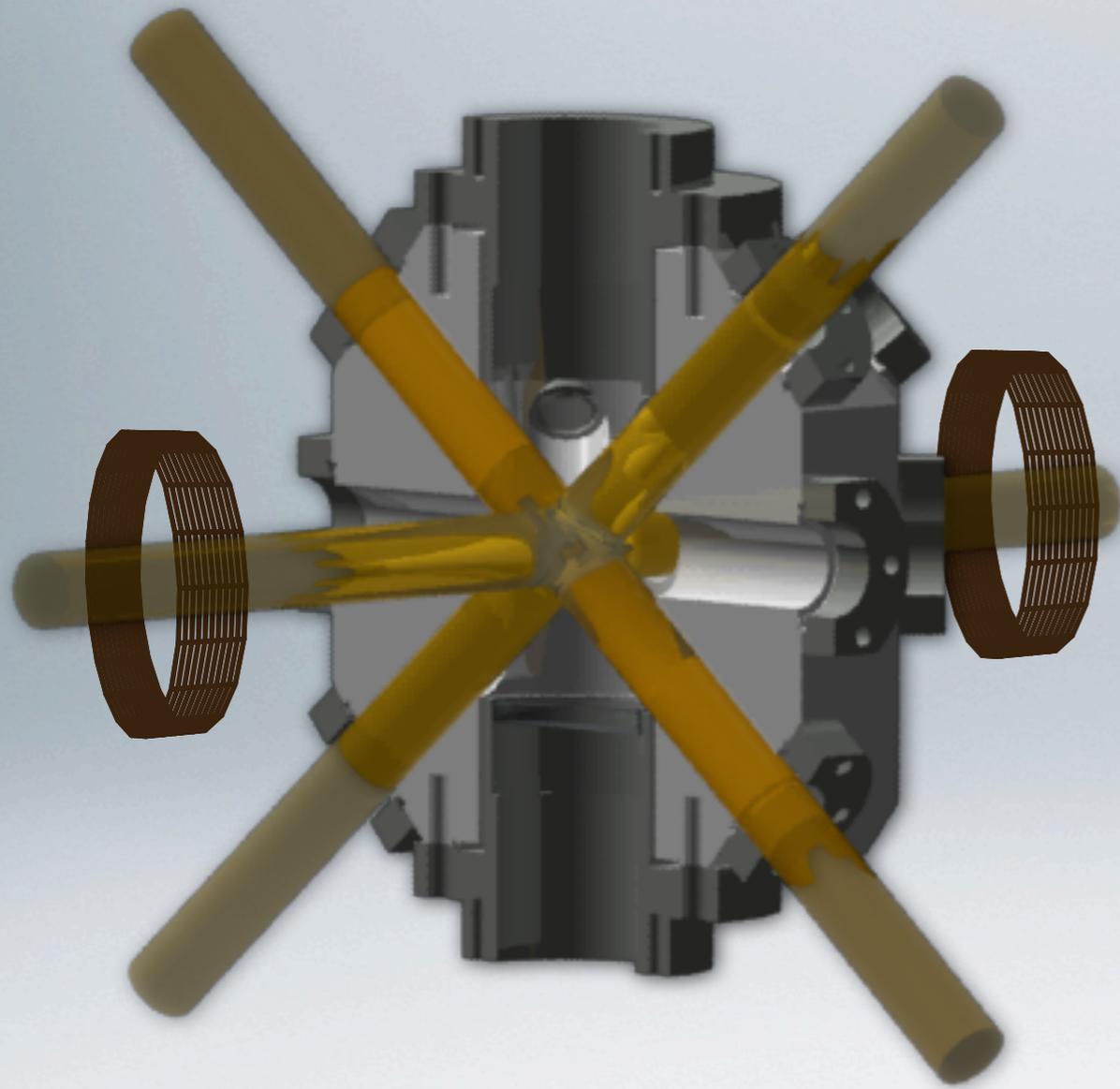
# Chargement du PMO



# Chargement du PMO

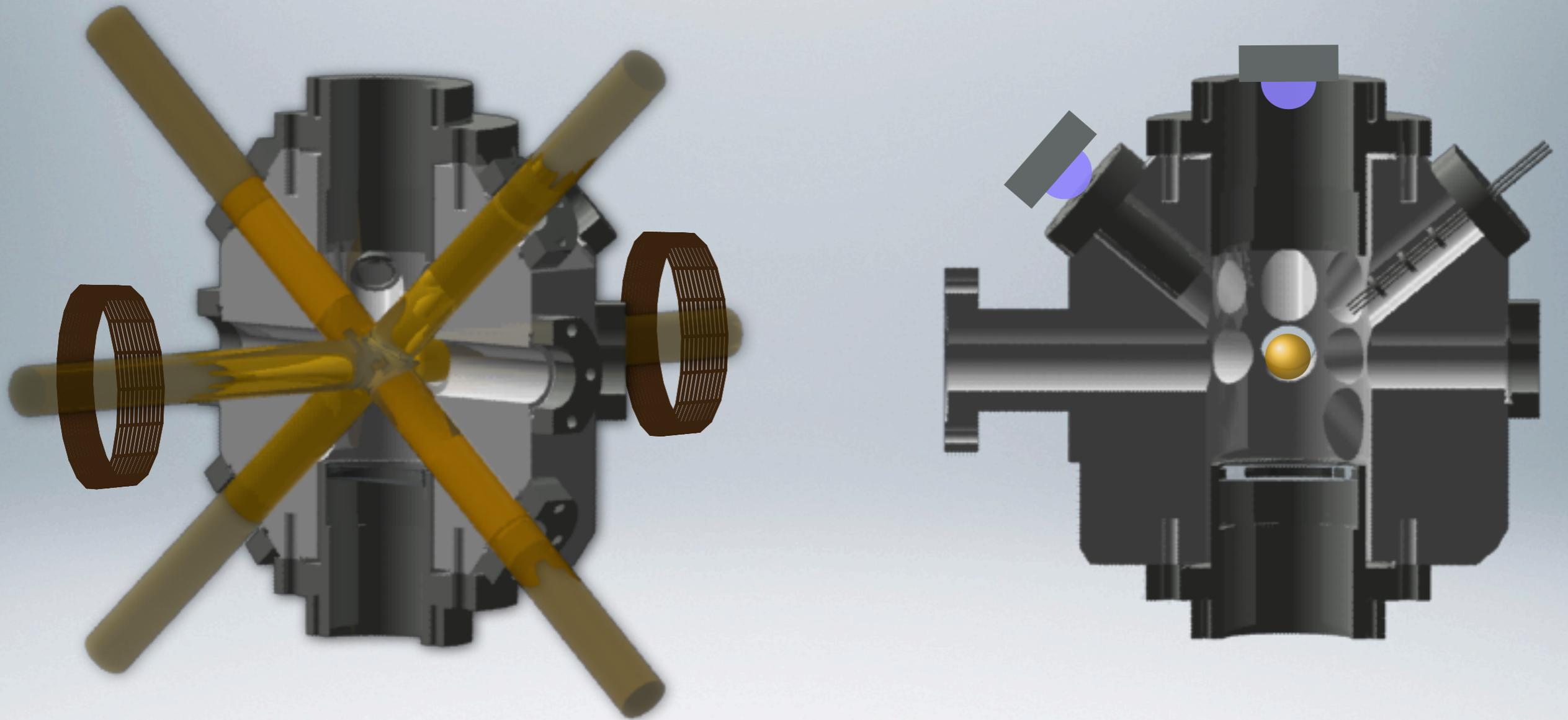


# Chargement du PMO



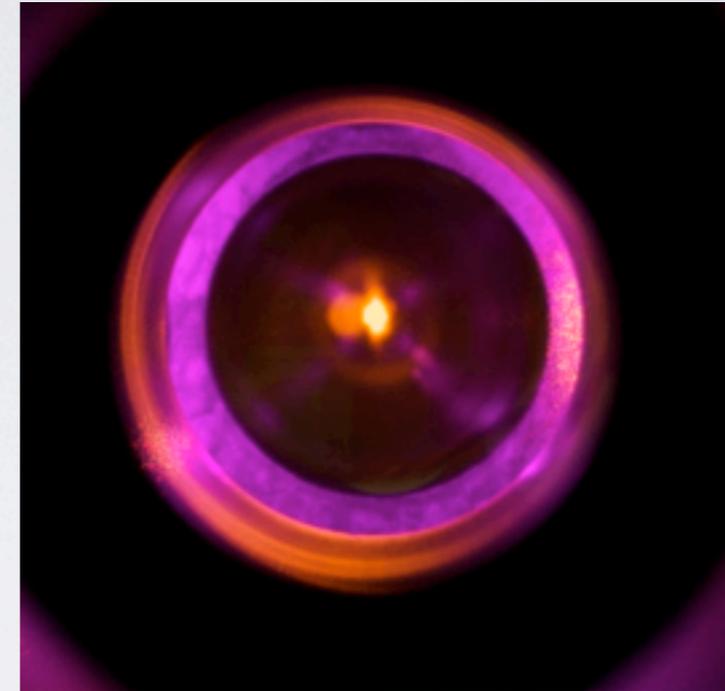
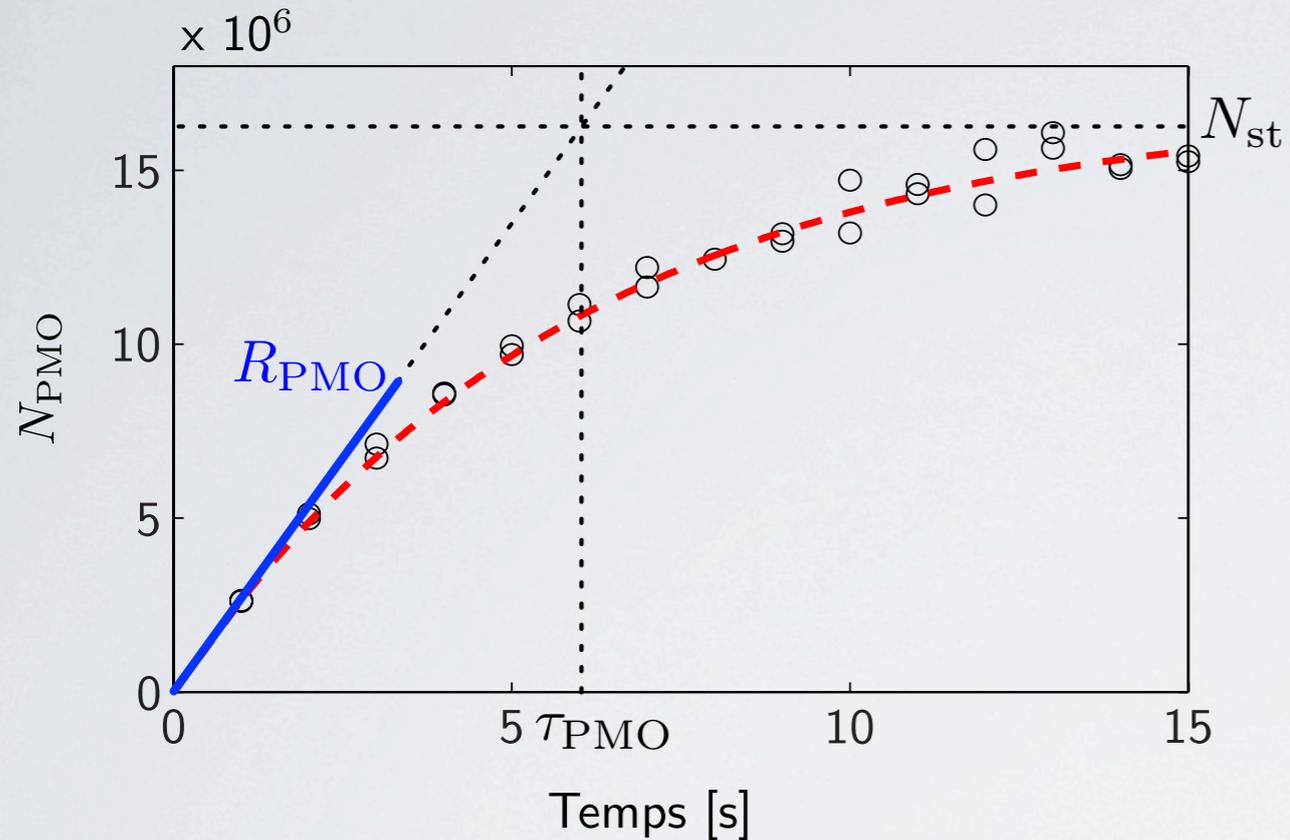
- Le courant dans les dispensers vaporise du sodium dans l'enceinte

# Chargement du PMO



- Le courant dans les dispensers vaporise du sodium dans l'enceinte
- A l'allumage des LEDs UV, le sodium est désorbé pour charger le PMO

# Chargement du PMO



$$\dot{N}_{\text{PMO}} = R_{\text{PMO}} - N_{\text{PMO}}/\tau_{\text{PMO}}$$

$$R_{\text{PMO}} \propto P_{\text{Na}}$$

$$1/\tau_{\text{PMO}} \propto P_{\text{Na}} + 1/\tau_0$$

↑  
Pression partielle  
de sodium

↑  
Durée de vie due  
aux impuretés du  
vide résiduel

# Chargement du PMO

$$\dot{N}_{\text{PMO}} = R_{\text{PMO}} - N_{\text{PMO}}/\tau_{\text{PMO}}$$

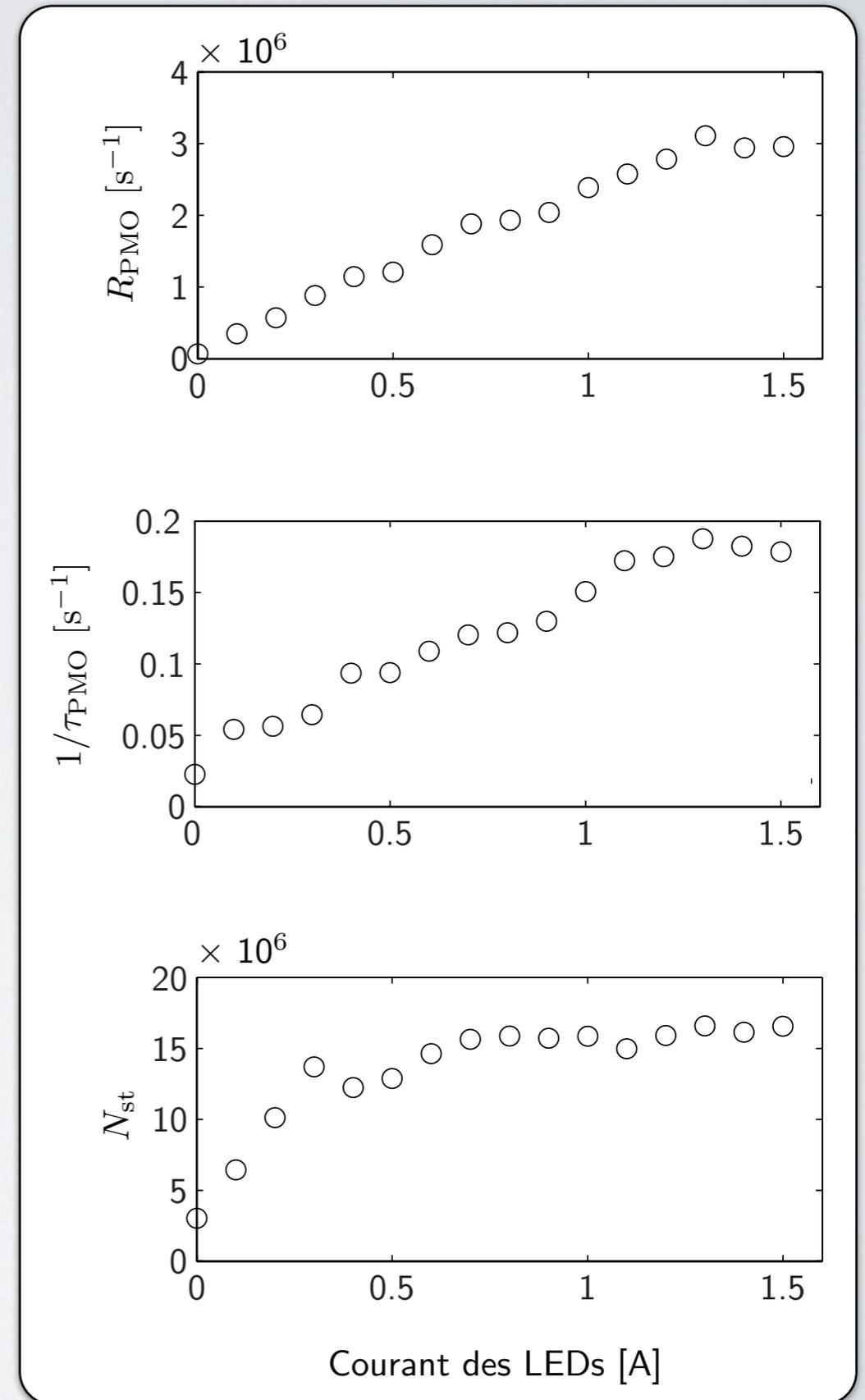
$$R_{\text{PMO}} \propto P_{\text{Na}}$$

$$1/\tau_{\text{PMO}} \propto P_{\text{Na}} + 1/\tau_0$$

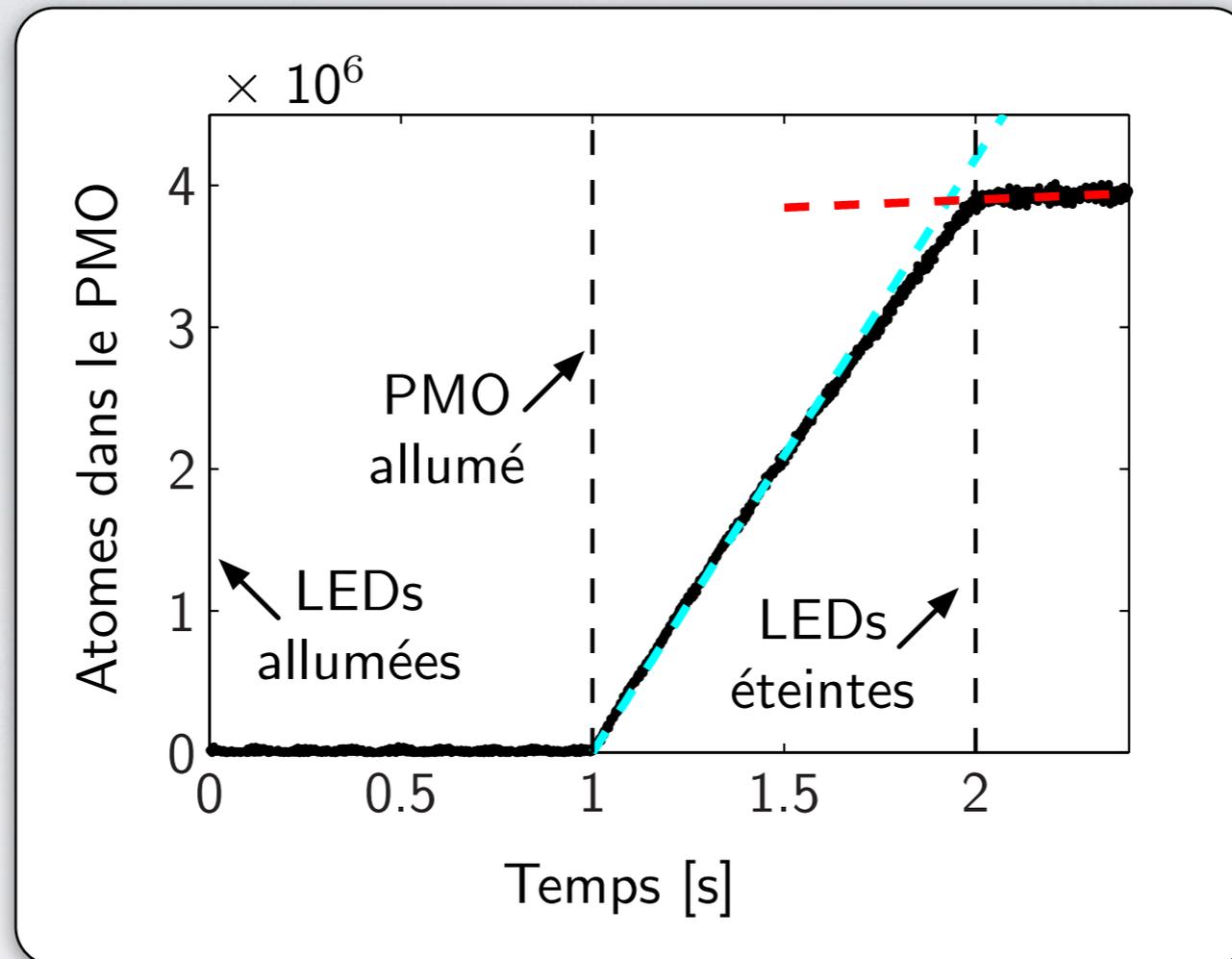
$\uparrow$   
 Pression partielle  
de sodium

$\uparrow$   
 Durée de vie due  
aux impuretés du  
vide résiduel

- $R_{\text{PMO}}$  augmente linéairement avec l'intensité lumineuse, jusqu'à saturation
- La pression de sodium est alors multipliée par un facteur  $\sim 40$
- Le nombre stationnaire d'atomes atteint jusqu'à  $2 \times 10^7$  atomes



# Retour à la pression de base



- L'extinction des LEDs permet de passer d'un régime de **chargement rapide** à une pression de base faible pour un **temps de vie élevé**
- Le taux de chargement baisse d'un facteur **40** en moins de **100 ms**.  
⇒ Le retour à basse pression est rapide devant le chargement du piège conservatif

# Plan de l'exposé

I. Motivations pour la création de l'expérience

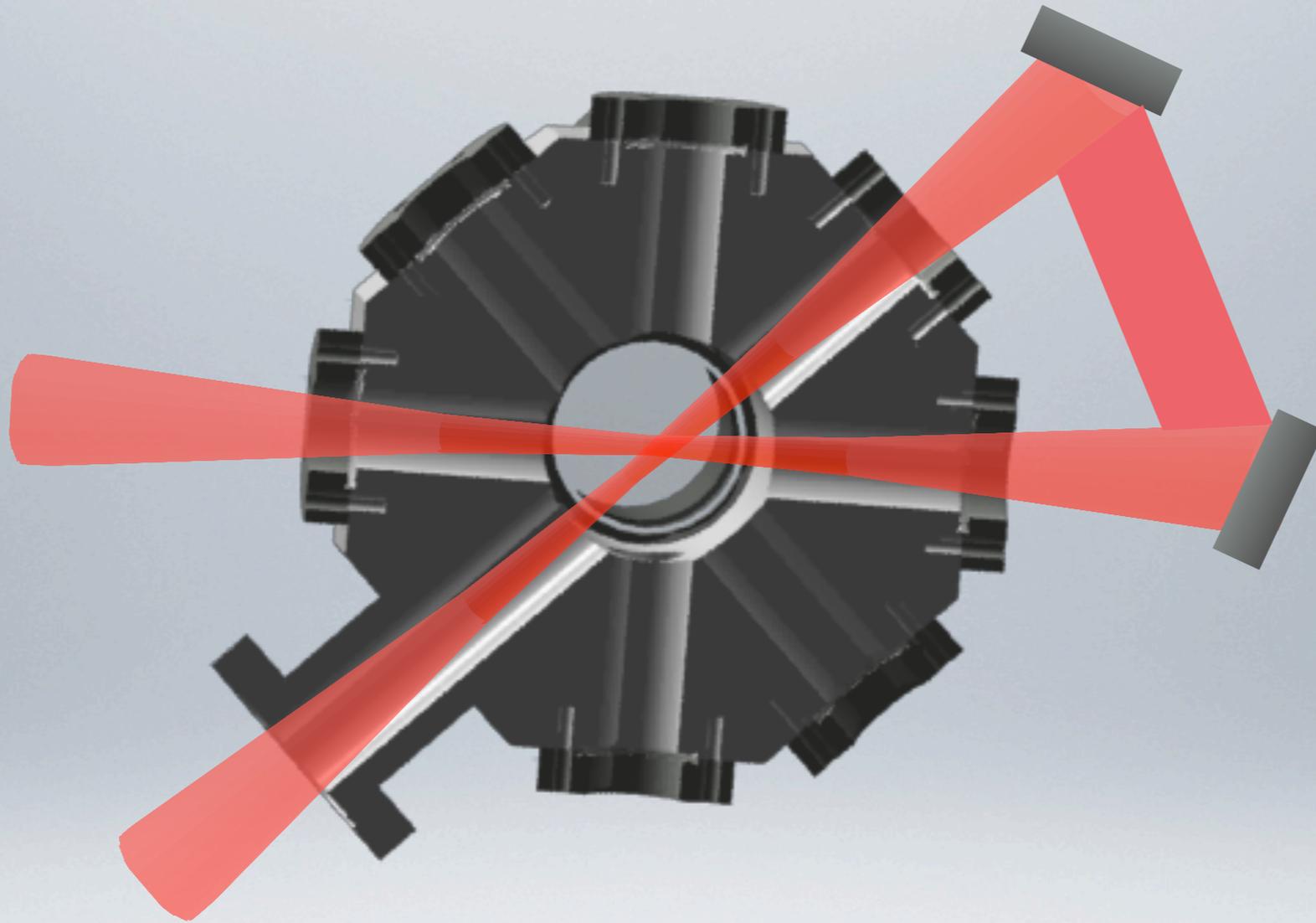
II. Travail expérimental

1. Laser solide à 589 nm pour le refroidissement du sodium

2. Chargement d'un PMO par désorption induite par la lumière

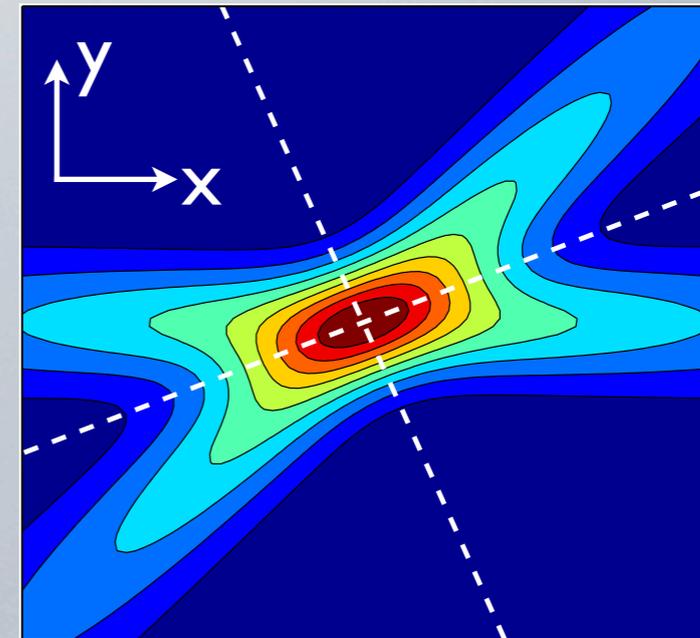
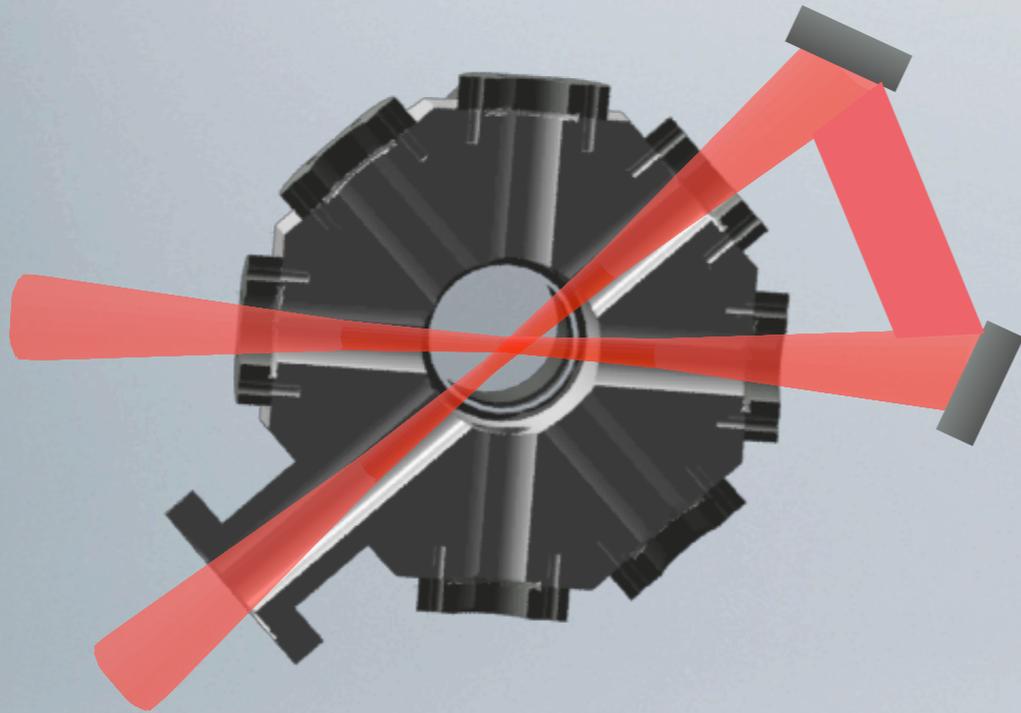
3. Condensation tout-optique dans un piège mésoscopique

# Piège dipolaire optique croisé



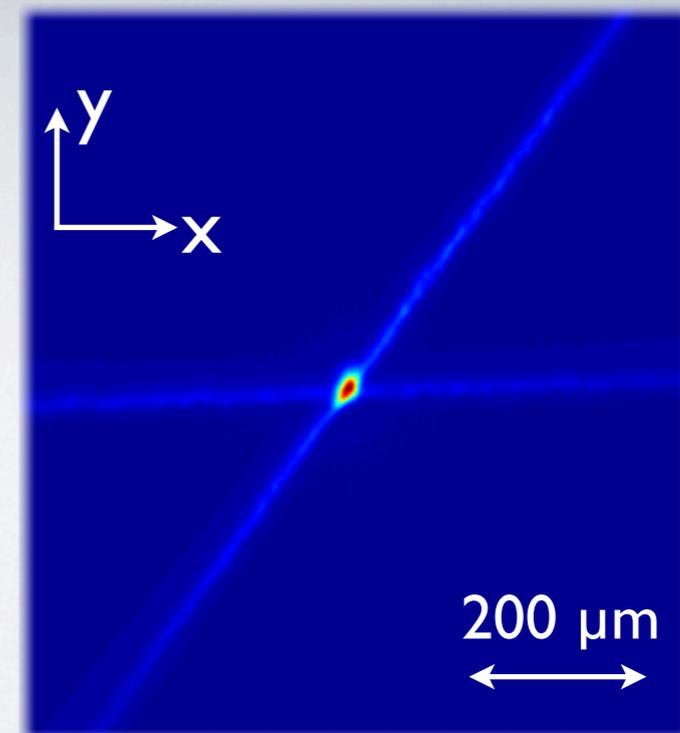
- Laser de 40 W à 1070 nm, 2 bras formant un angle de  $45^\circ$
- Le laser est renvoyé vers la chambre après le premier passage, assurant la totalité de la puissance sur les 2 bras

# Piège dipolaire optique croisé



Contours isopotentiels

Puissance	36 W - 0.2 W
Profondeur	1.2 mK - 7 $\mu$ K
Taille du faisceau	42 $\mu$ m
Fréquence au centre	4 kHz
Fréquence axiale	20 Hz

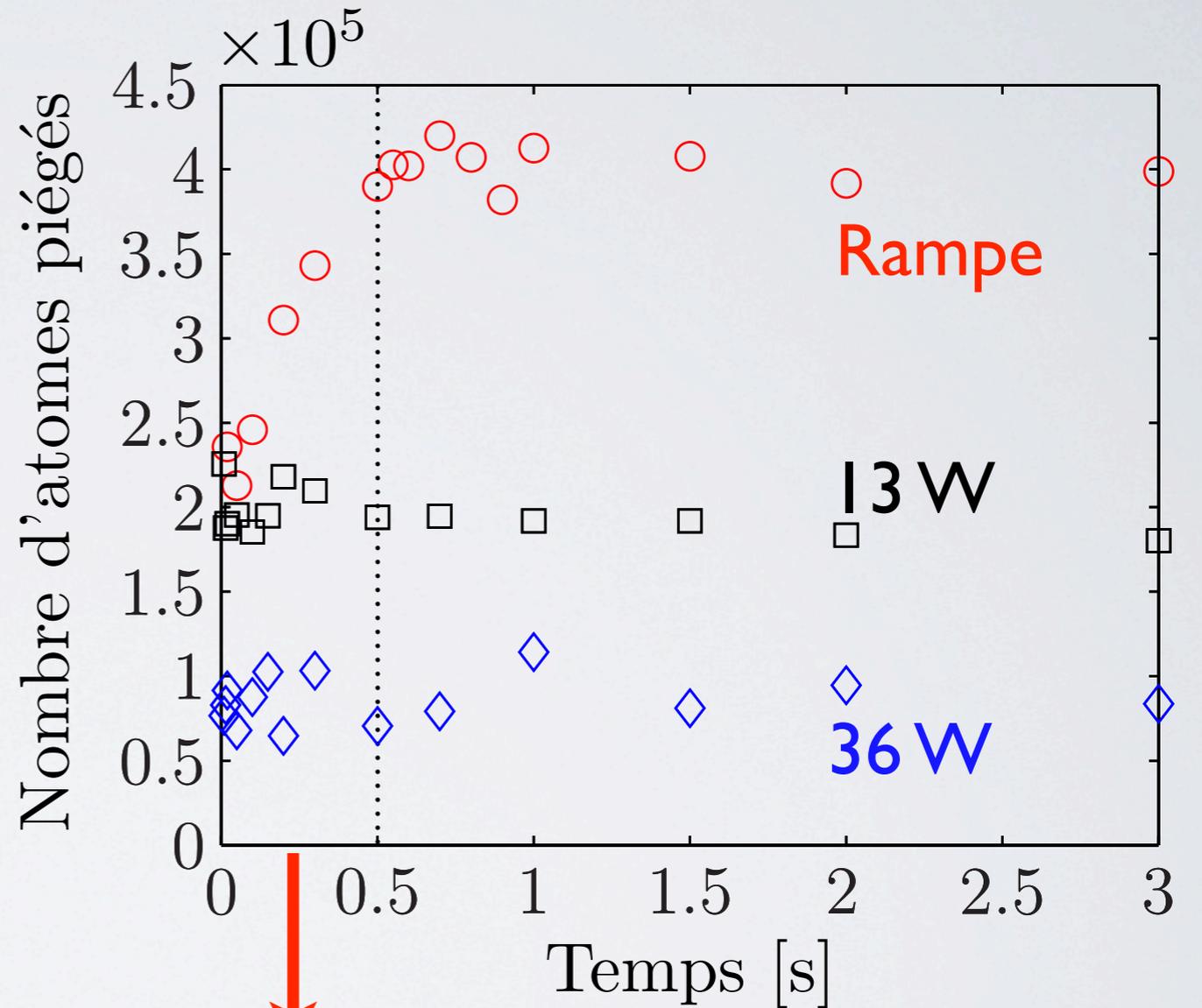


# Chargement du piège dipolaire

- Chargement du piège croisé à partir du PMO
- Diminution de la puissance du faisceau repompeur pour limiter les collisions assistées par la lumière
- Décalage en fréquence des faisceaux de refroidissement pour obtenir un PMO plus froid

# Chargement du piège dipolaire

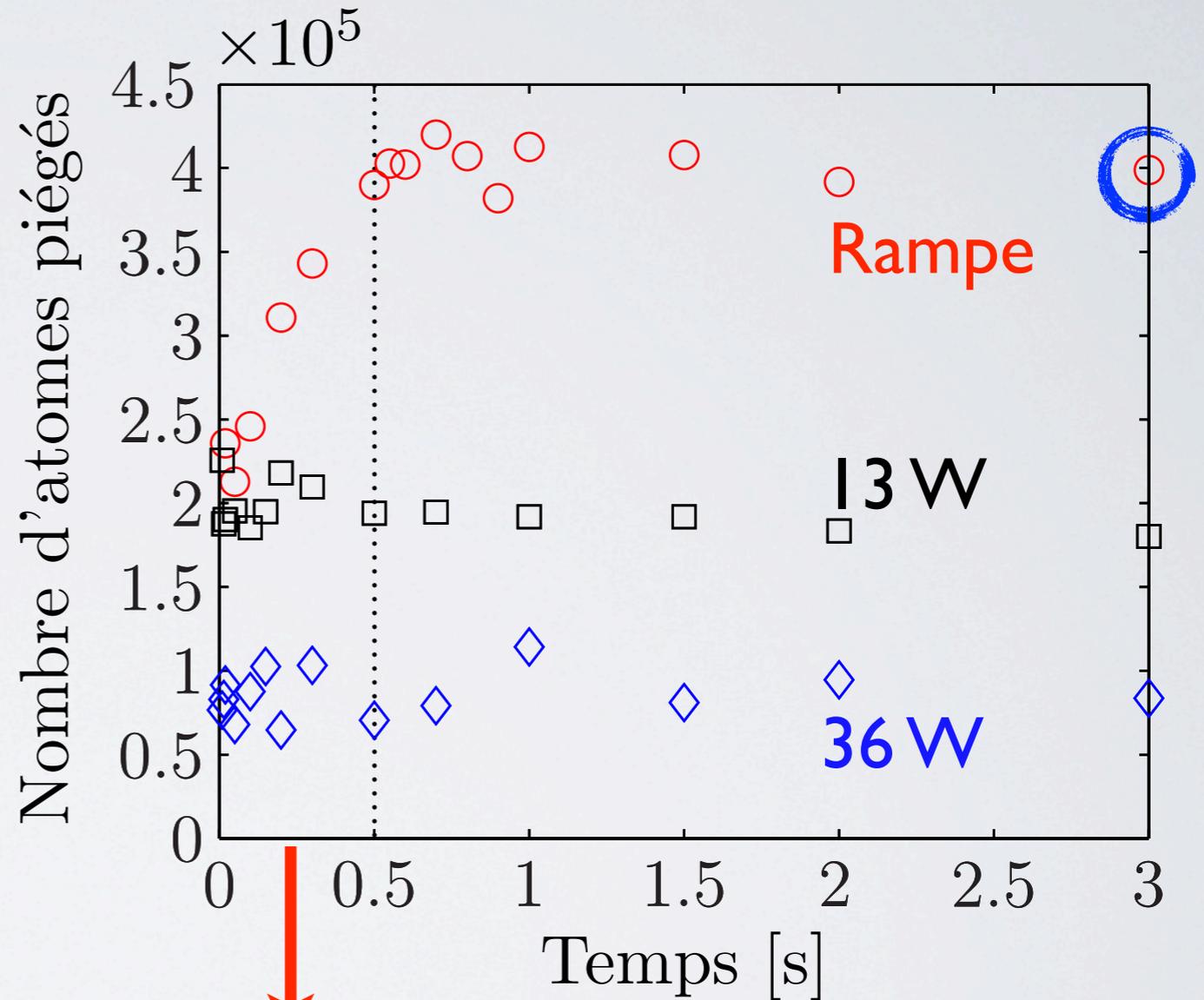
- Déplacement lumineux dû au piège trop important à haute puissance



Rampe de puissance  
de 13 W à 36 W

# Chargement du piège dipolaire

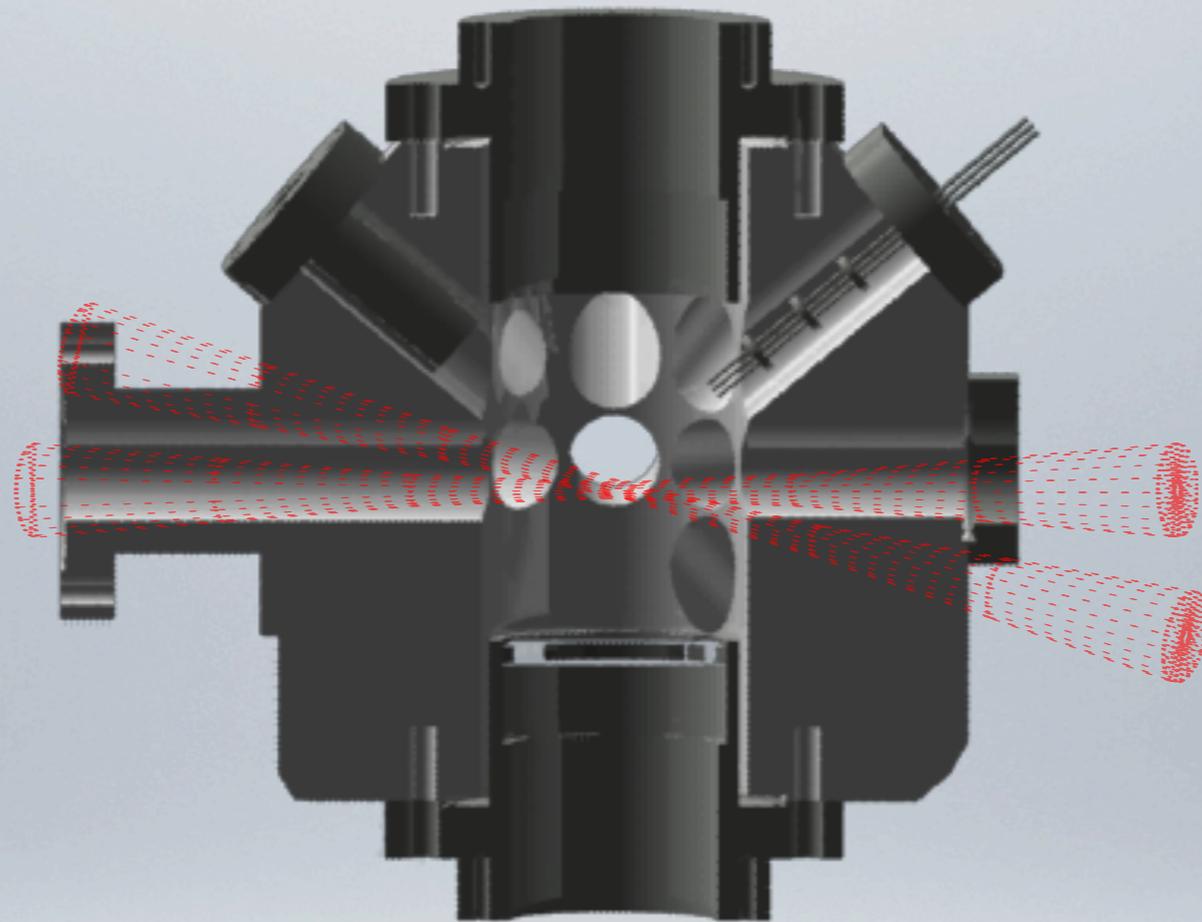
- Déplacement lumineux dû au piège trop important à haute puissance



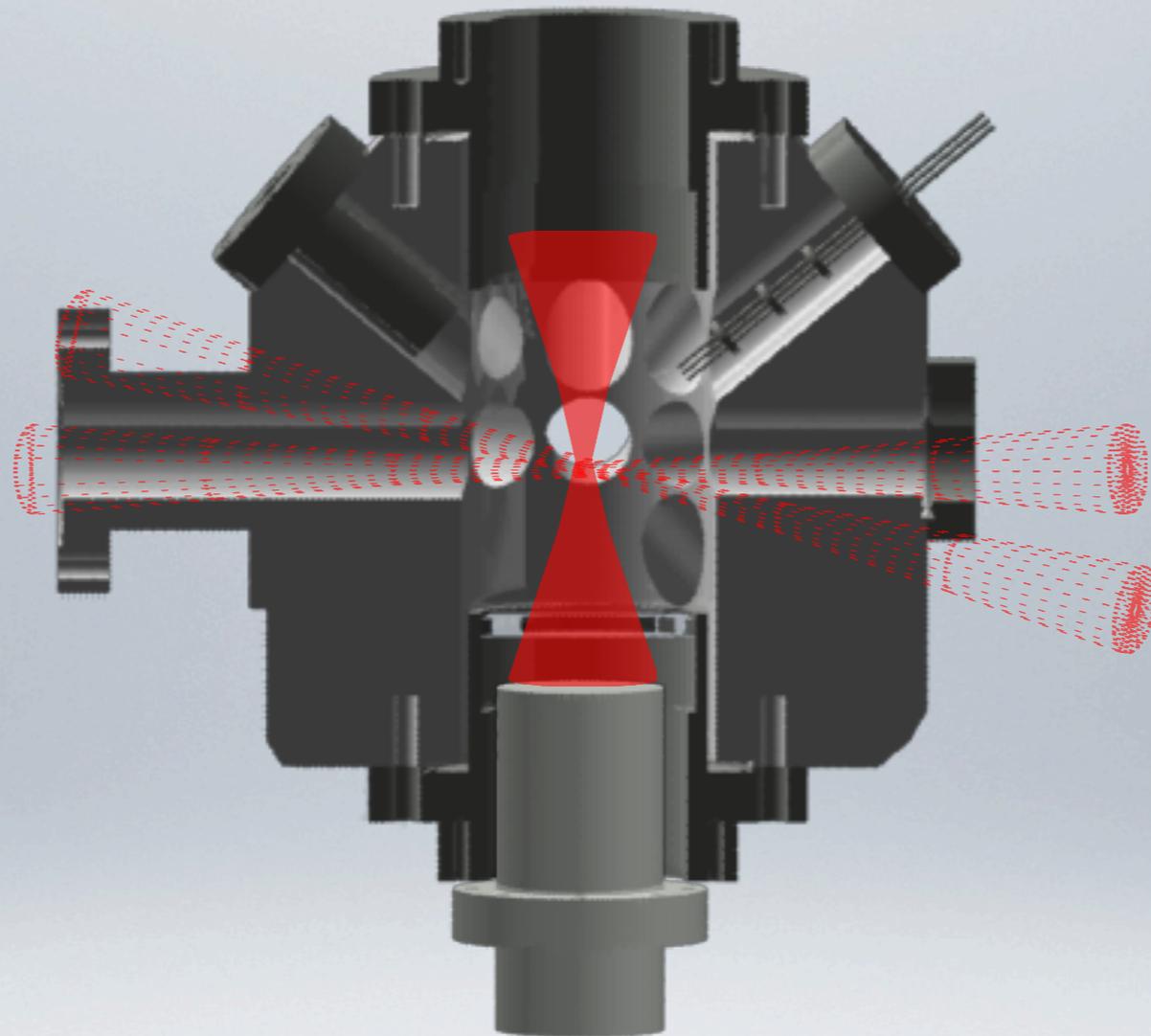
⇒  $4 \times 10^5$  atomes à  $\sim 100 \mu\text{K}$

Rampe de puissance  
de 13 W à 36 W

# Piège fortement focalisé *dimple*



# Piège fortement focalisé *dimple*



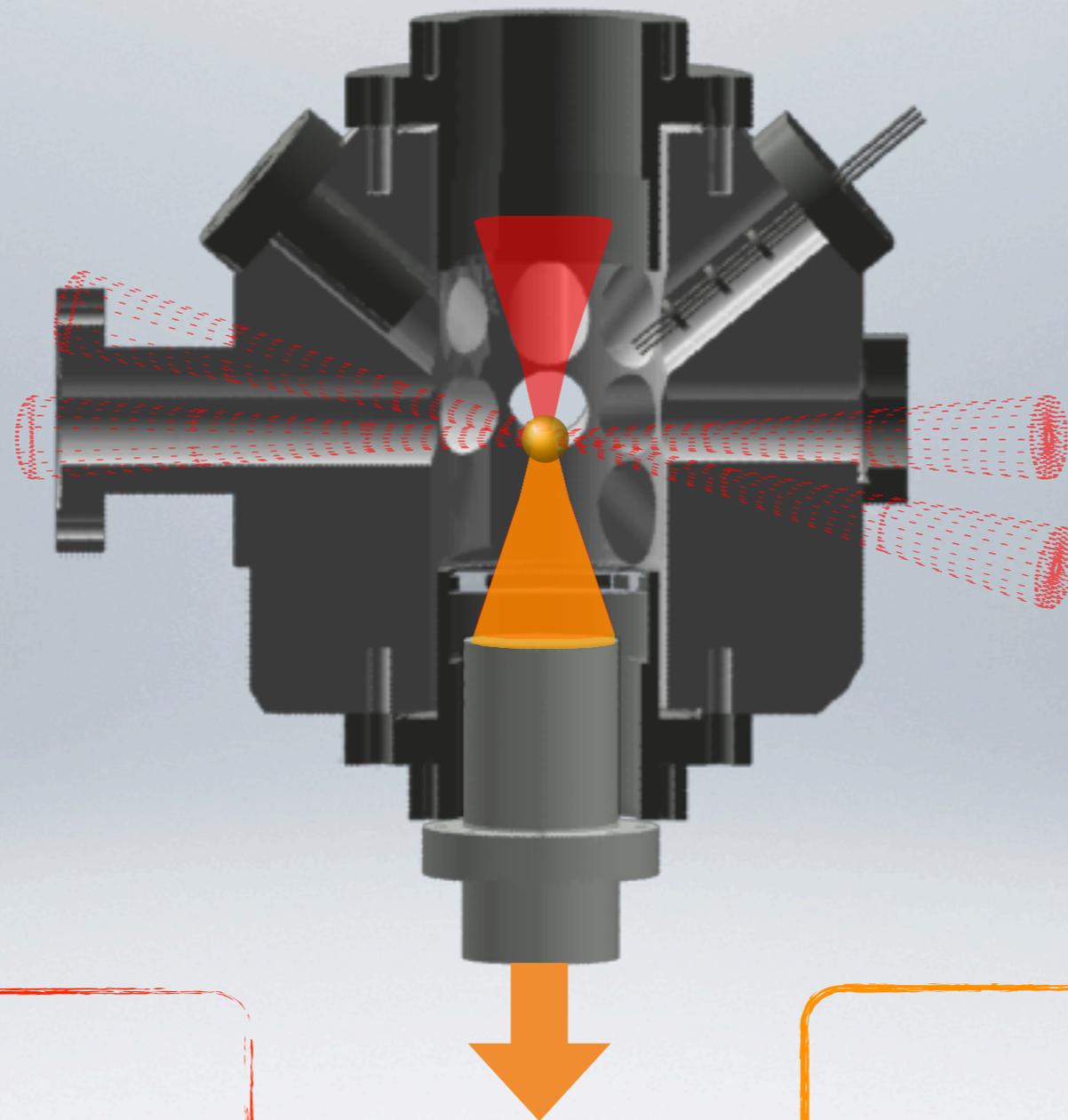
## Micro-piège

$\lambda$	1070 nm
-----------	---------

Col	8 $\mu\text{m}$
-----	-----------------

Fréq. Radiale	7 kHz
---------------	-------

# Piège fortement focalisé *dimple*



## Micro-piège

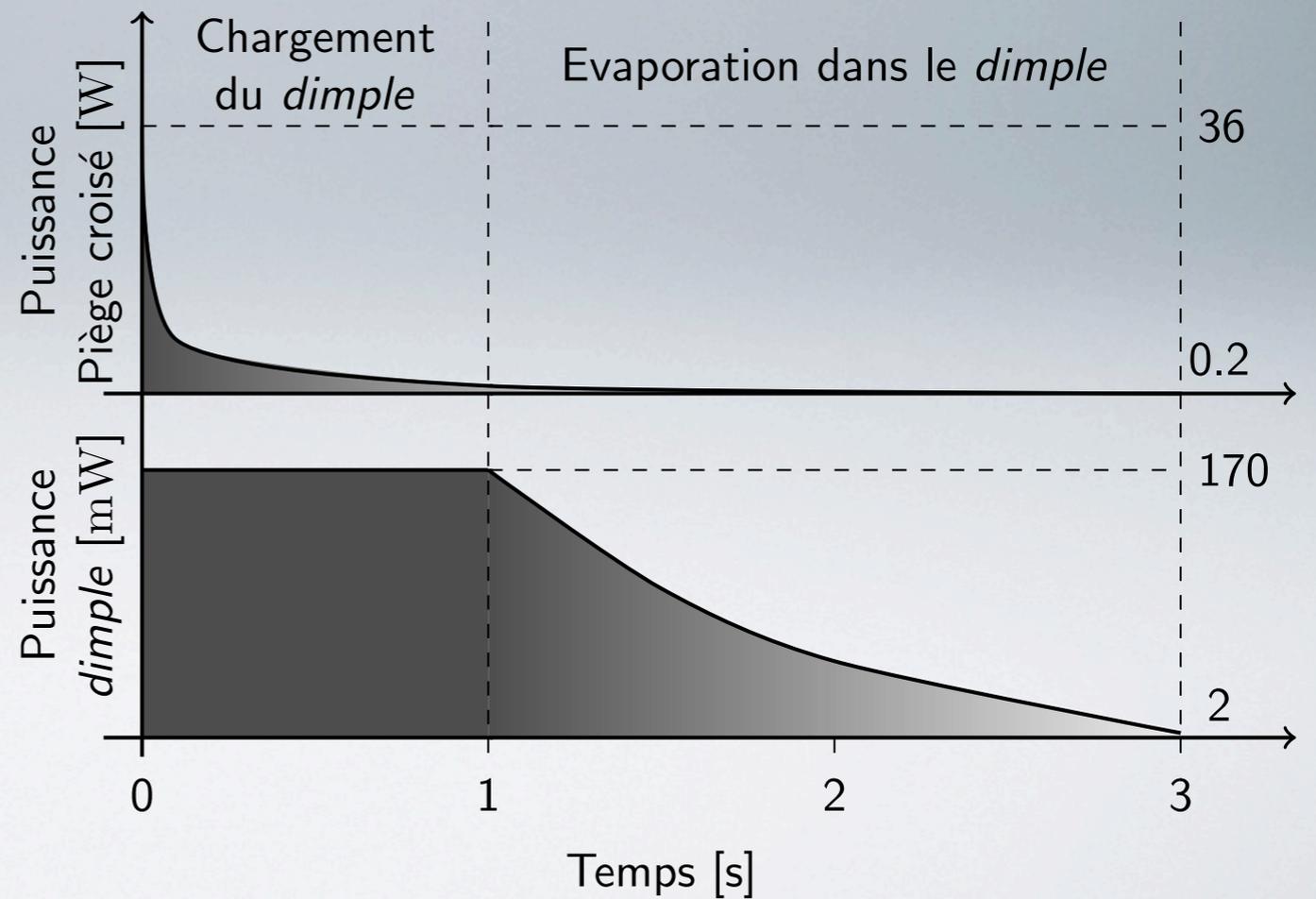
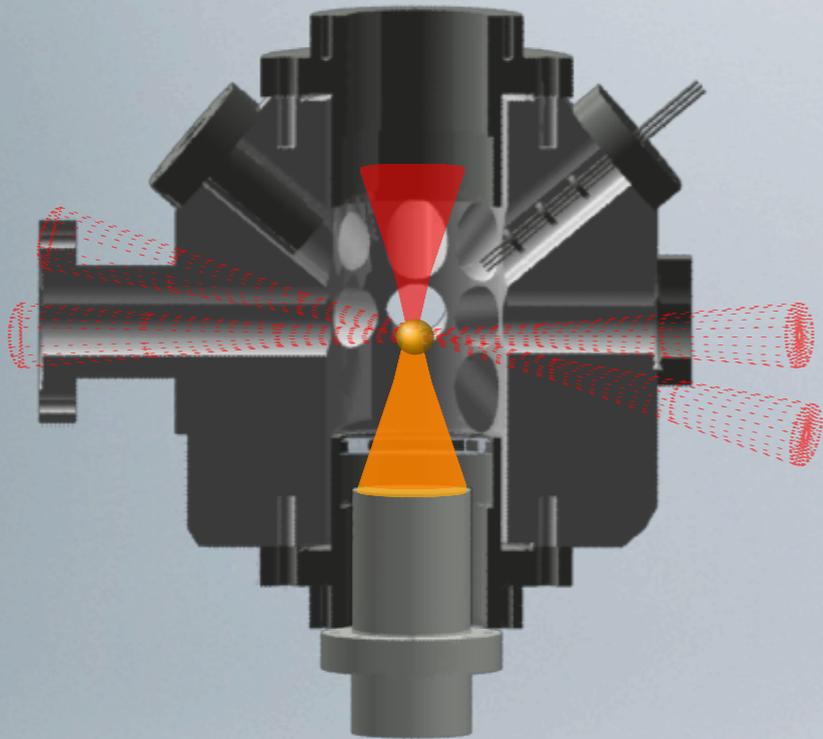
$\lambda$	1070 nm
Col	8 $\mu\text{m}$
Fréq. Radiale	7 kHz

Imagerie

## Imagerie

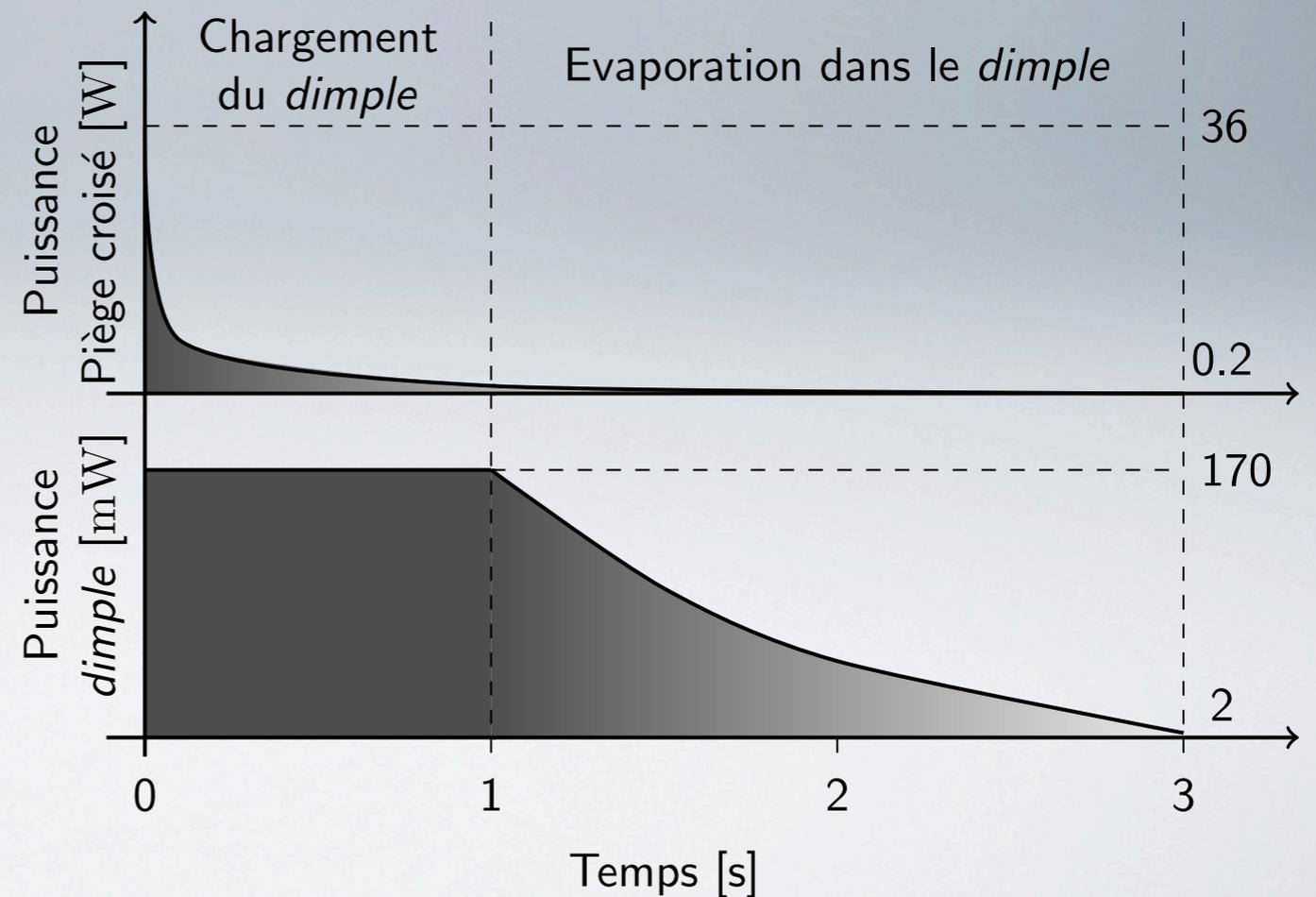
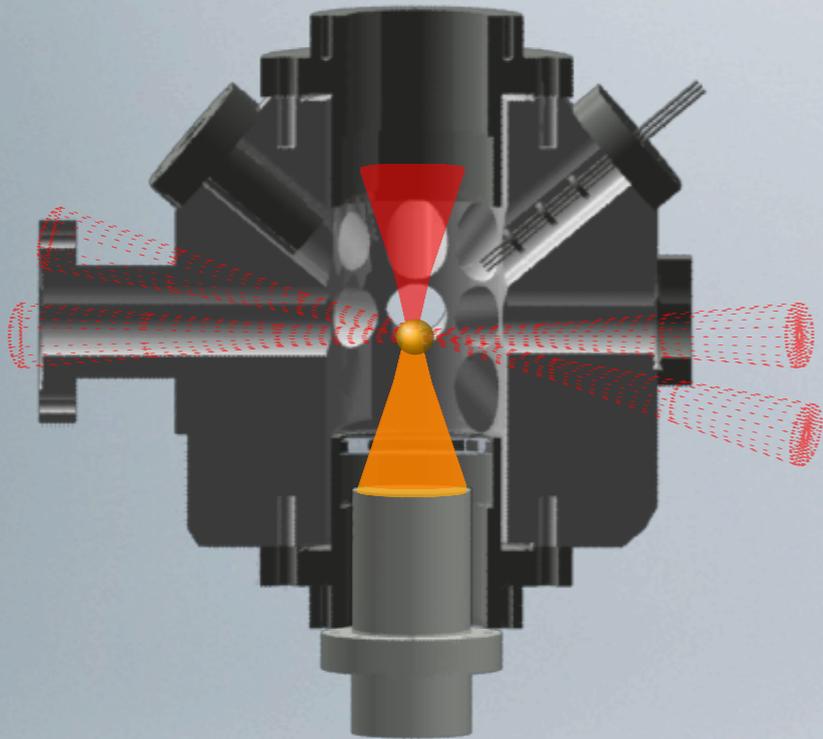
$\lambda$	589 nm
Résolution	1 $\mu\text{m}$
Ouverture Num.	0.33

# Piège fortement focalisé *dimple*



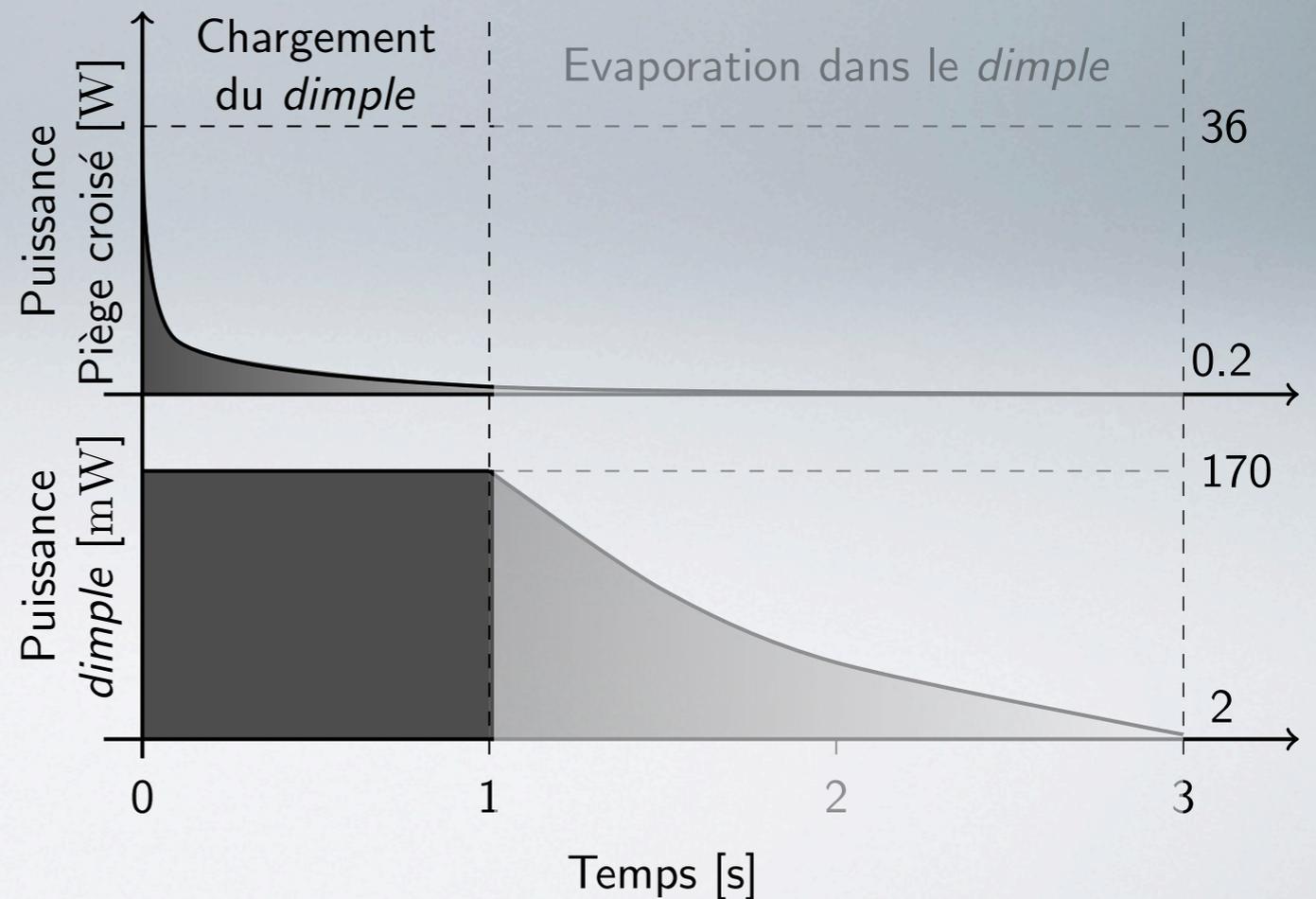
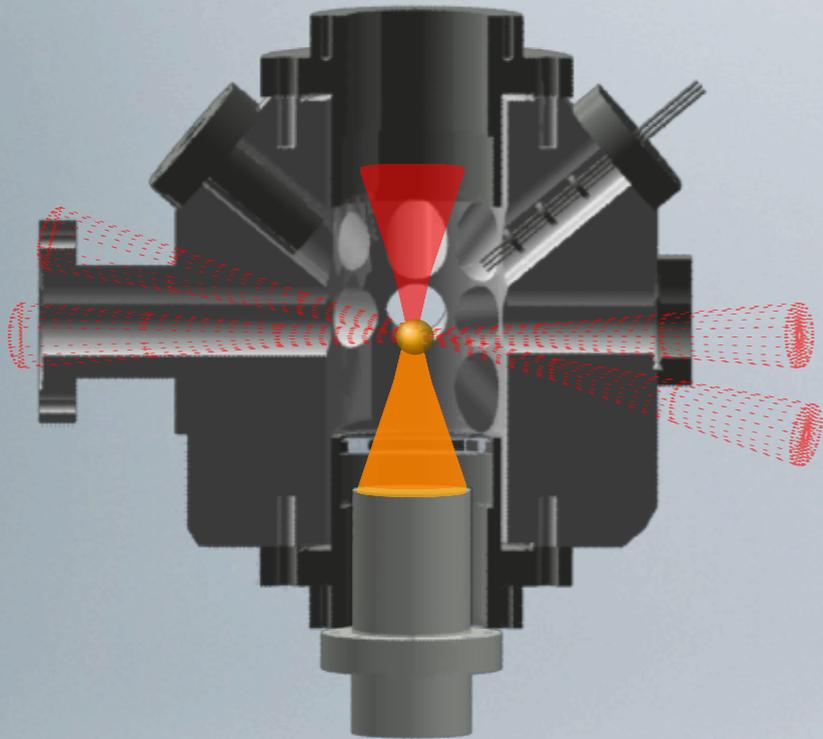
# Piège fortement focalisé *dimple*

- Condensation en deux temps, en jouant sur l'intensité des deux pièges

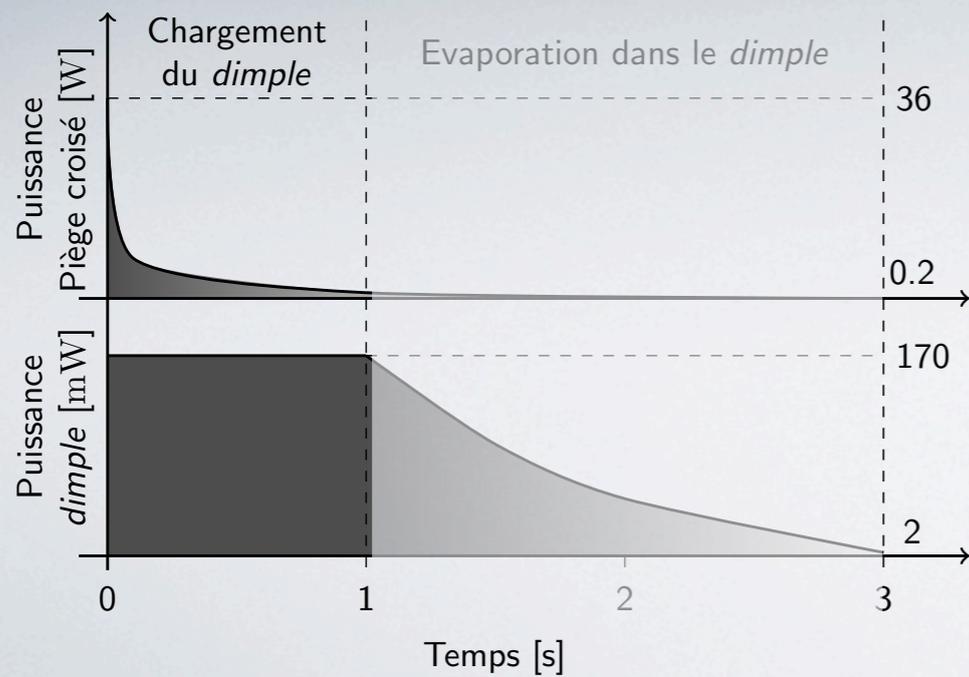
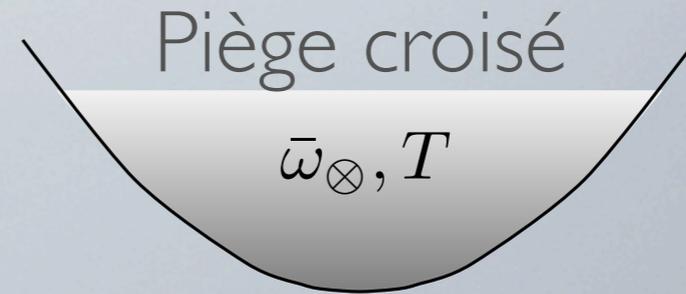
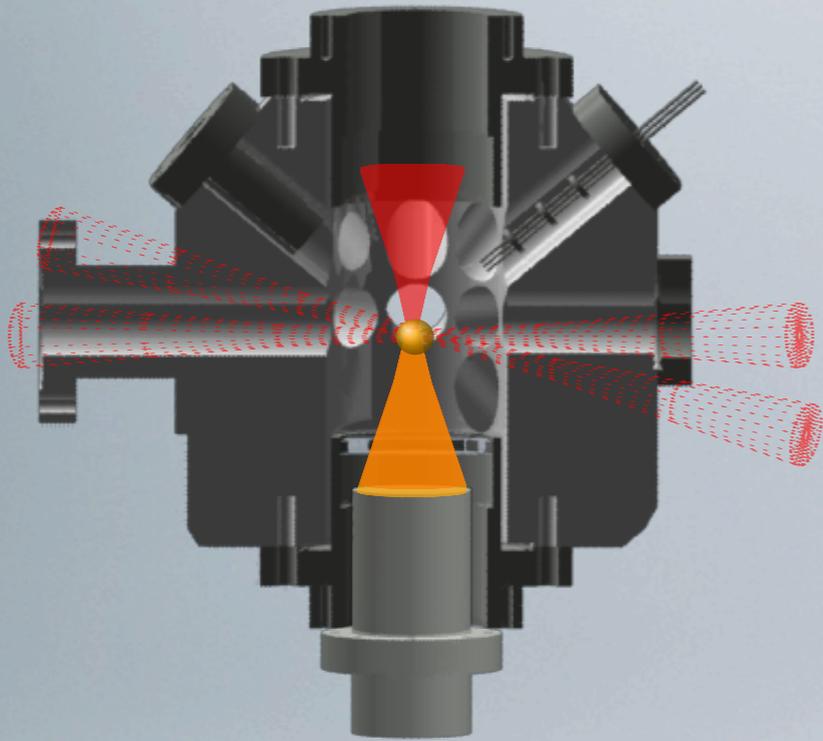


# Piège fortement focalisé *dimple*

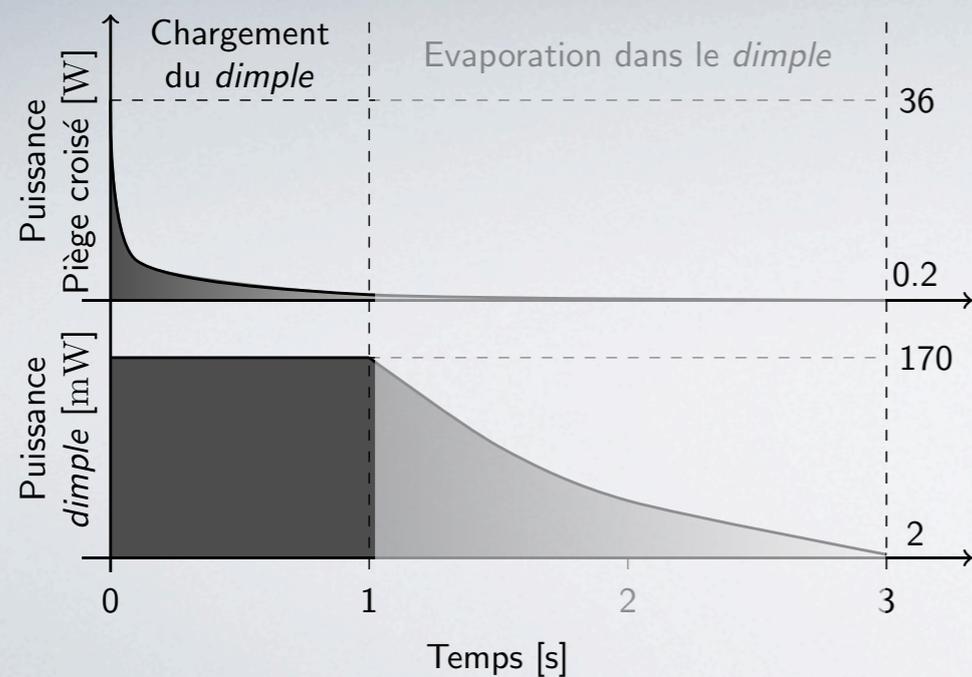
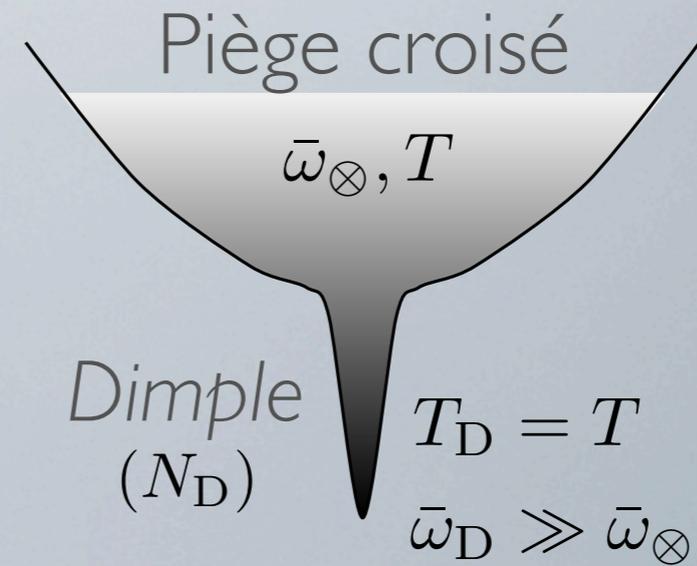
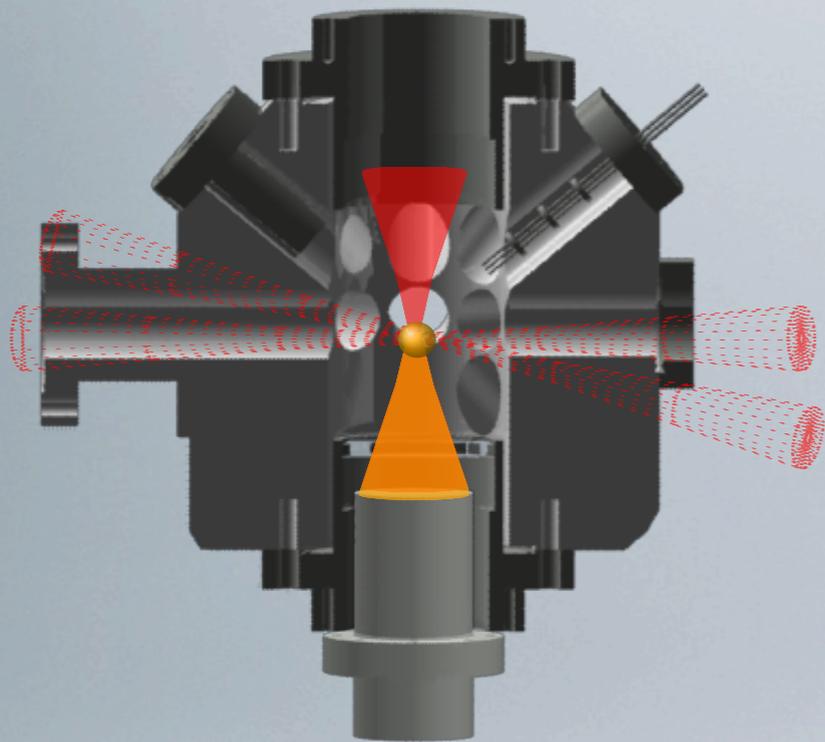
- Condensation en deux temps, en jouant sur l'intensité des deux pièges
- Tout d'abord, chargement du piège *dimple*



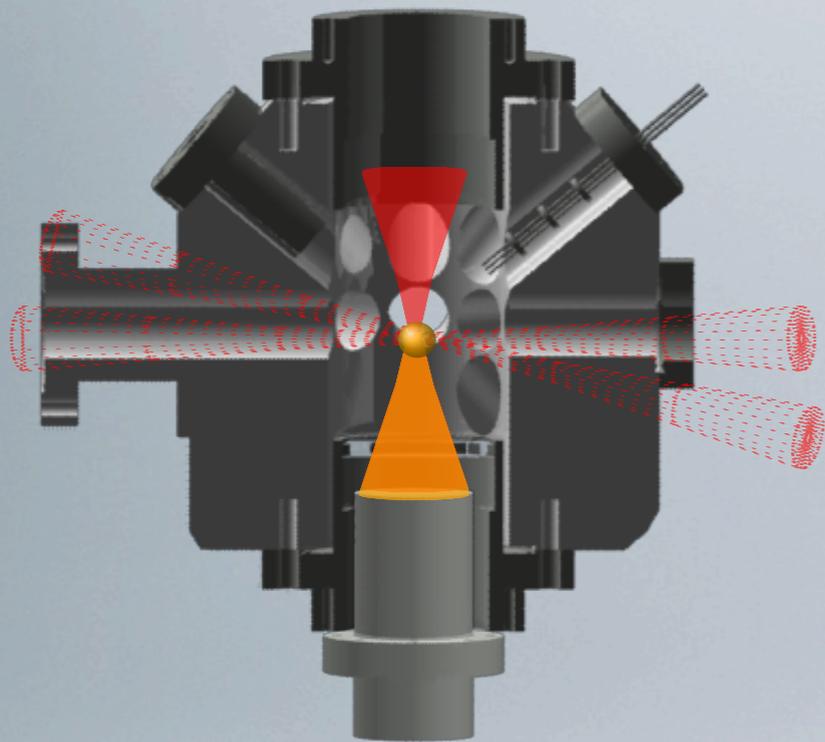
# Piège fortement focalisé *dimple*



# Piège fortement focalisé *dimple*

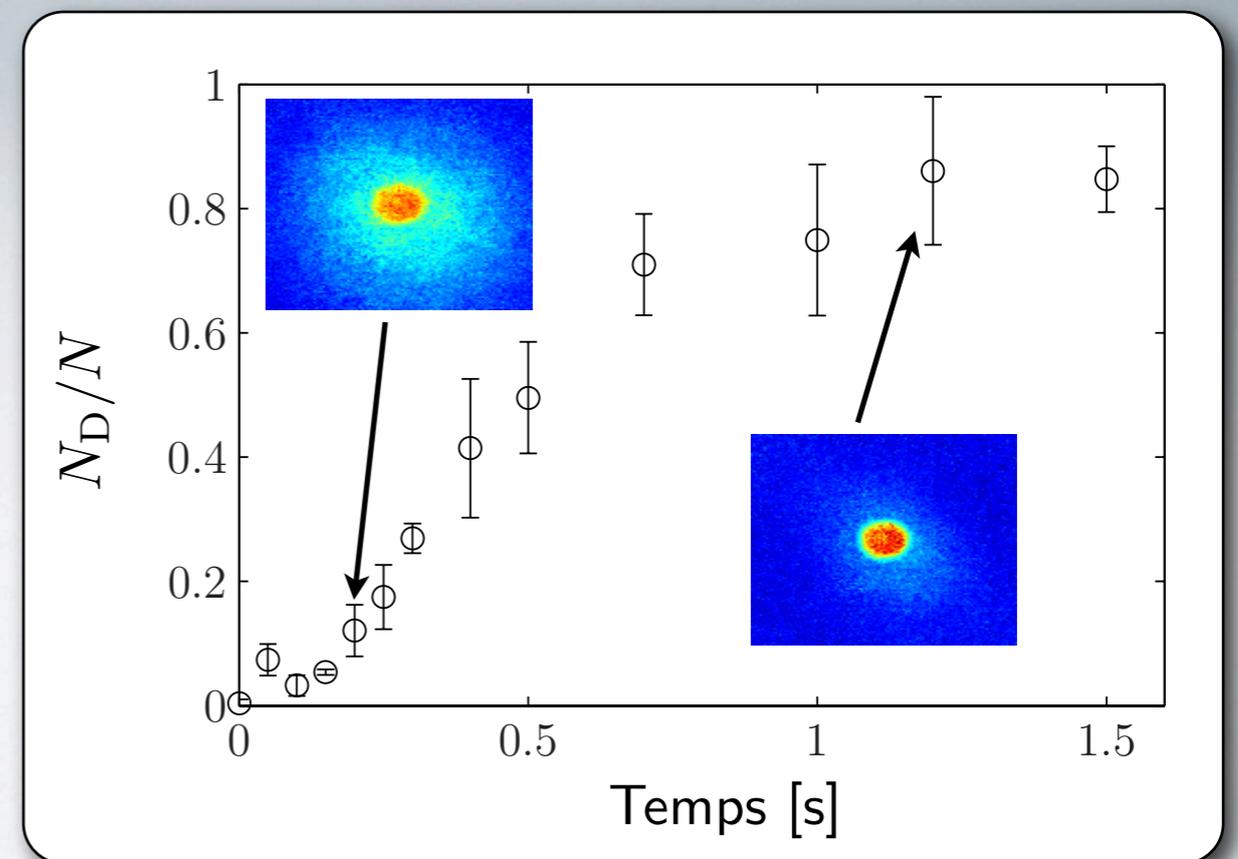
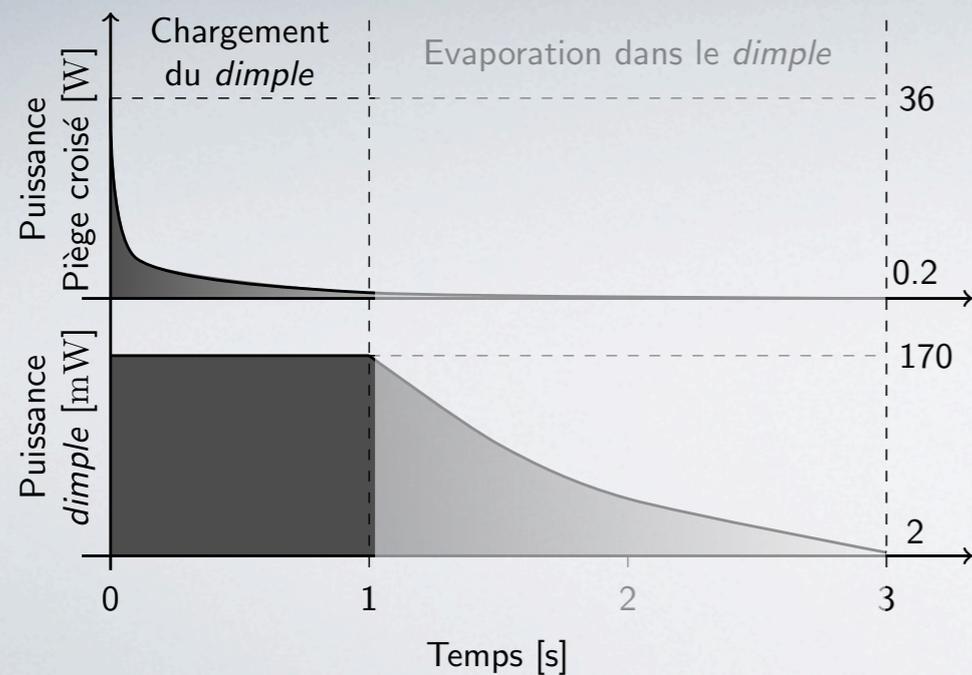
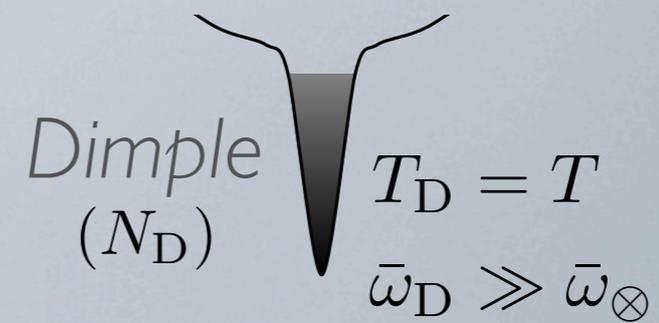


# Piège fortement focalisé *dimple*



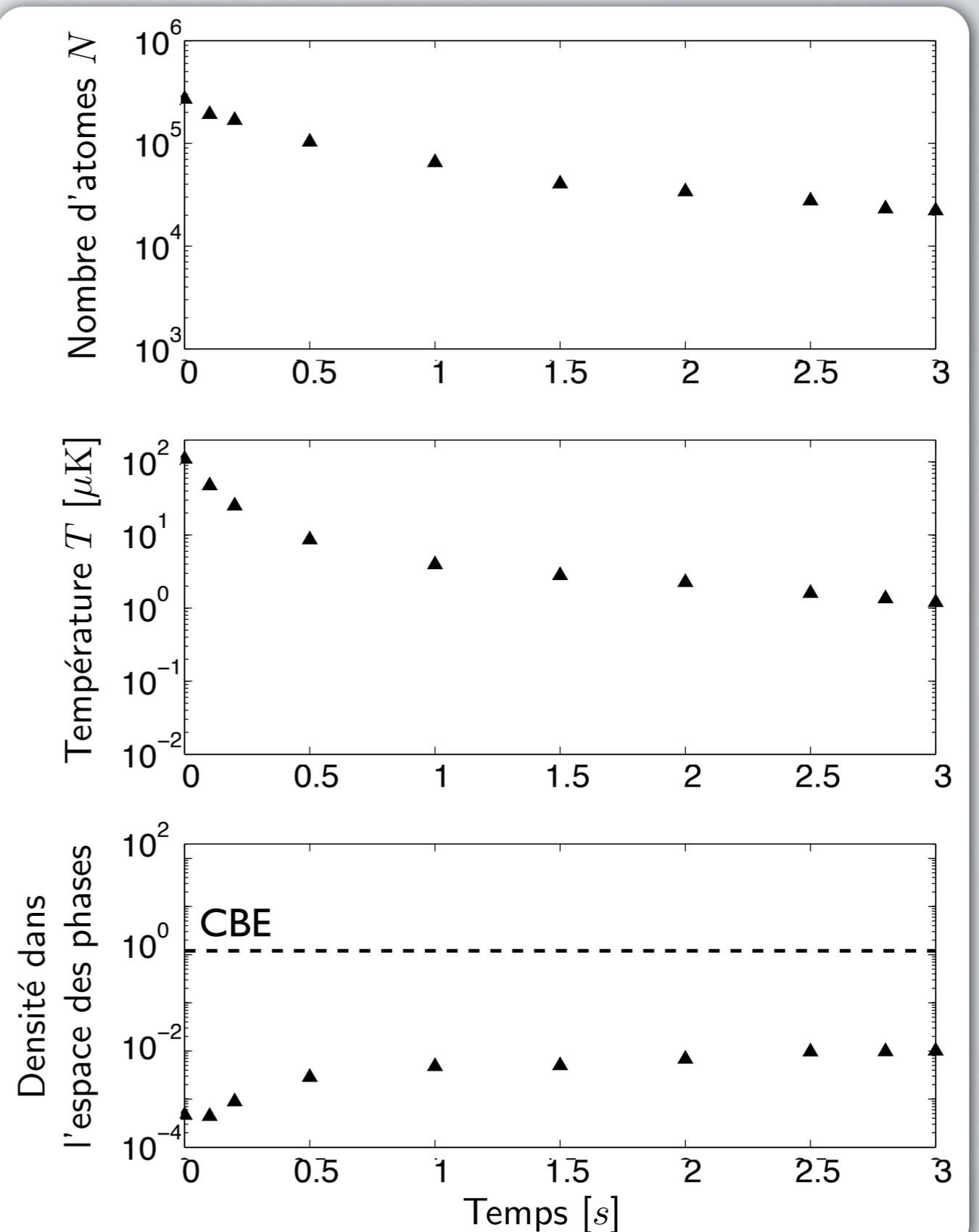
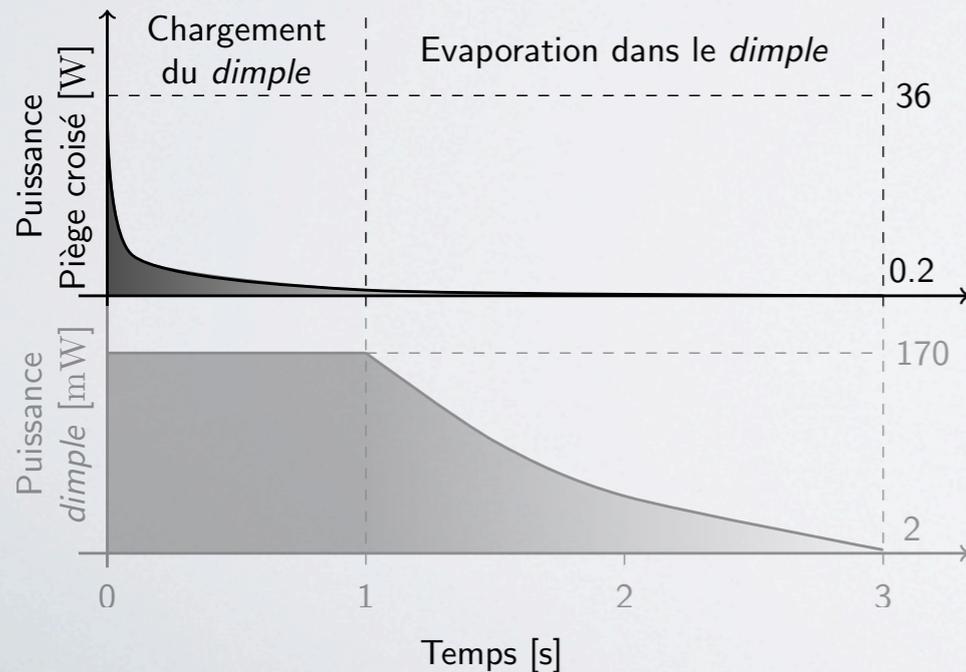
Piège croisé

$$\bar{\omega}_{\otimes}, T$$



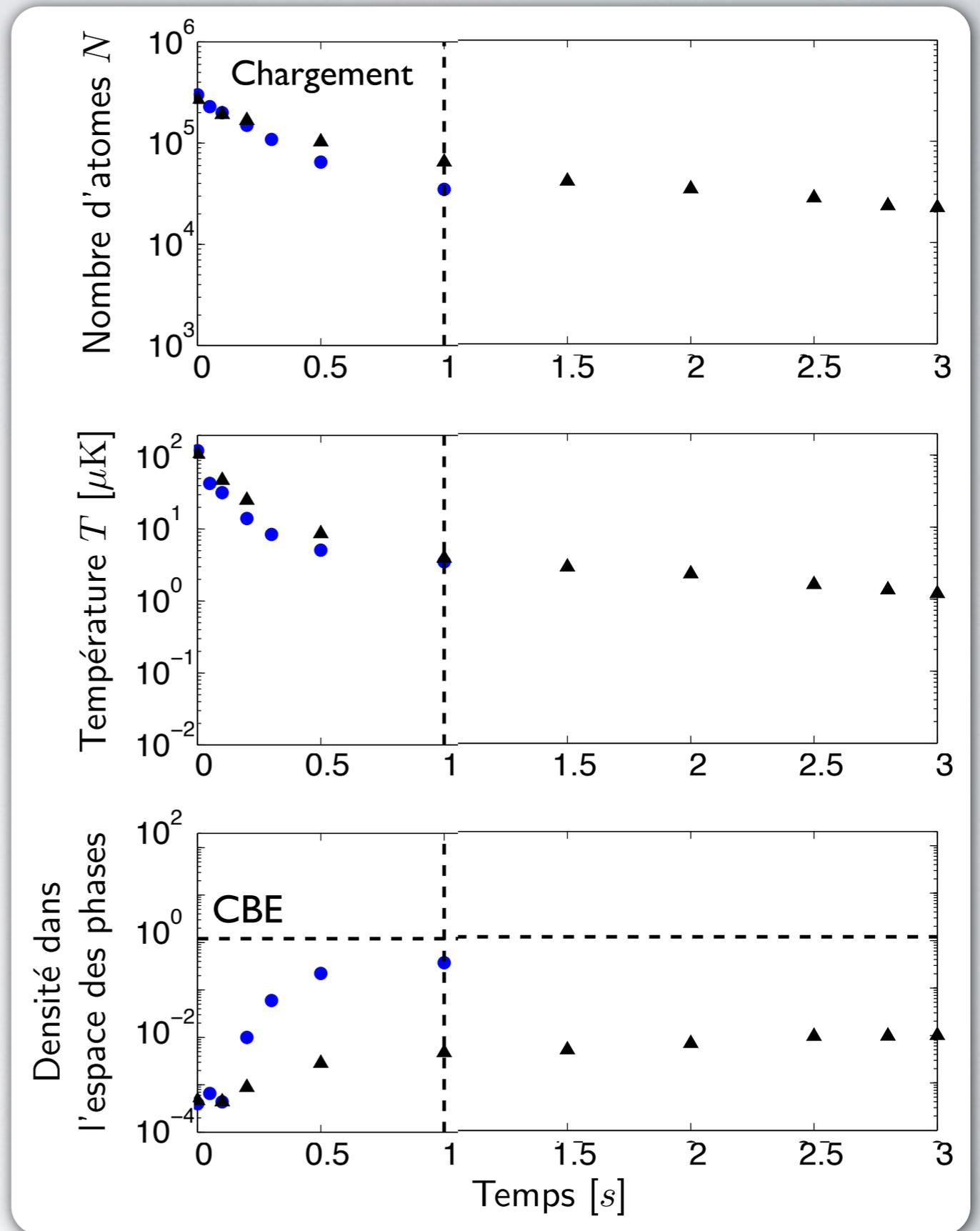
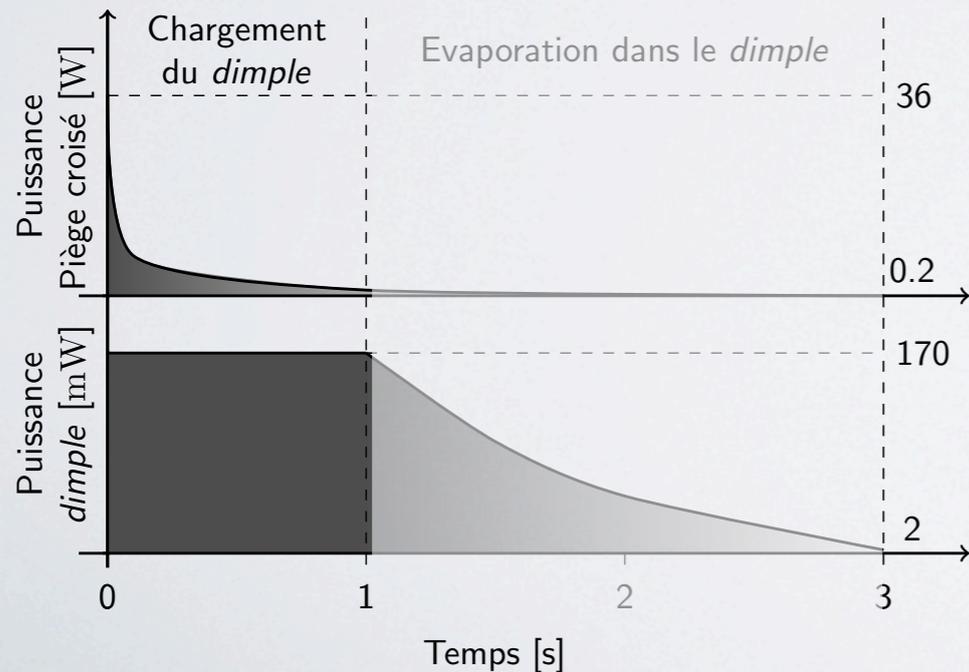
# Evaporation dans le piège croisé

- Le nombre d'atomes initial est insuffisant pour atteindre la condensation avec le piège croisé seul



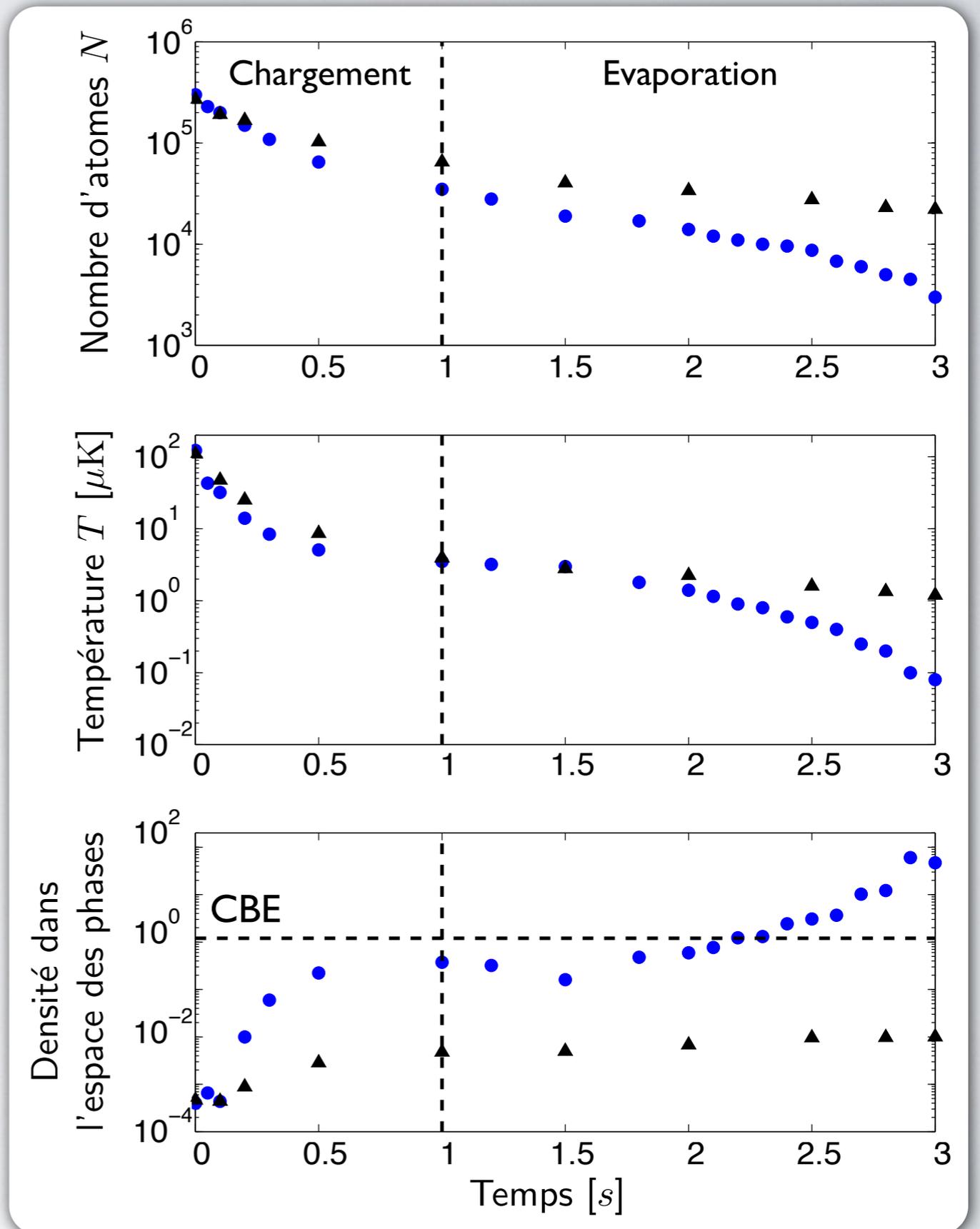
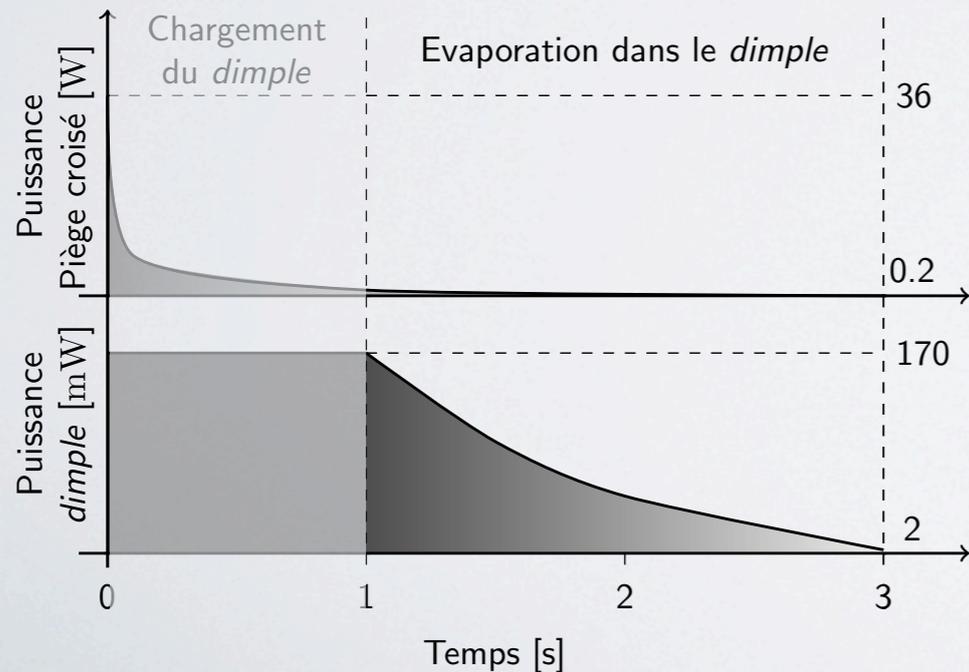
# Chargement du *dimple*

- La quasi-totalité des atomes est transférée, sans chauffage, avec une densité dans l'espace des phases 100 fois plus grande



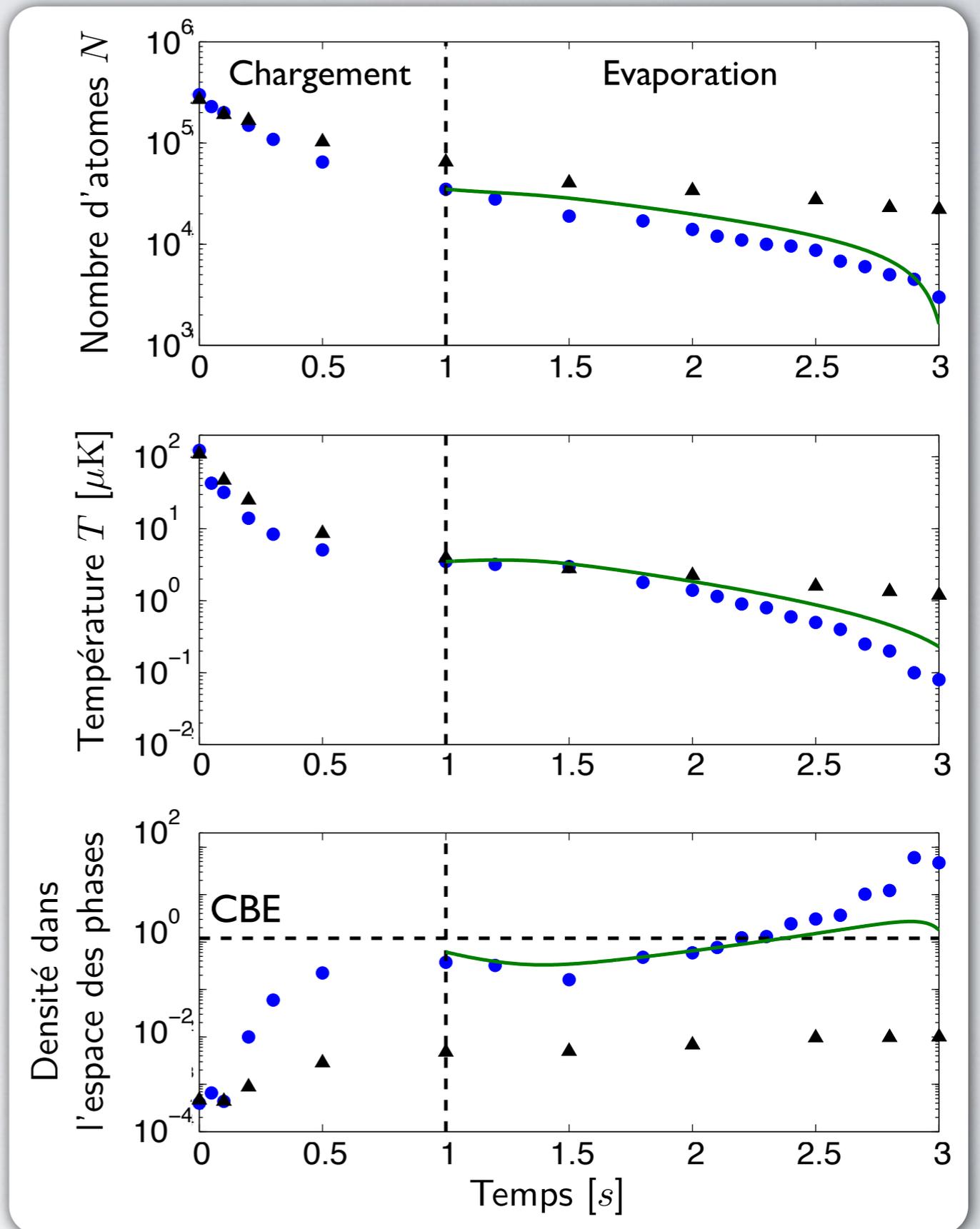
# Evaporation dans le *dimple*

- La condensation est atteinte après environ 2 s avec  $\sim 10^4$  atomes à  $\sim 1 \mu\text{K}$



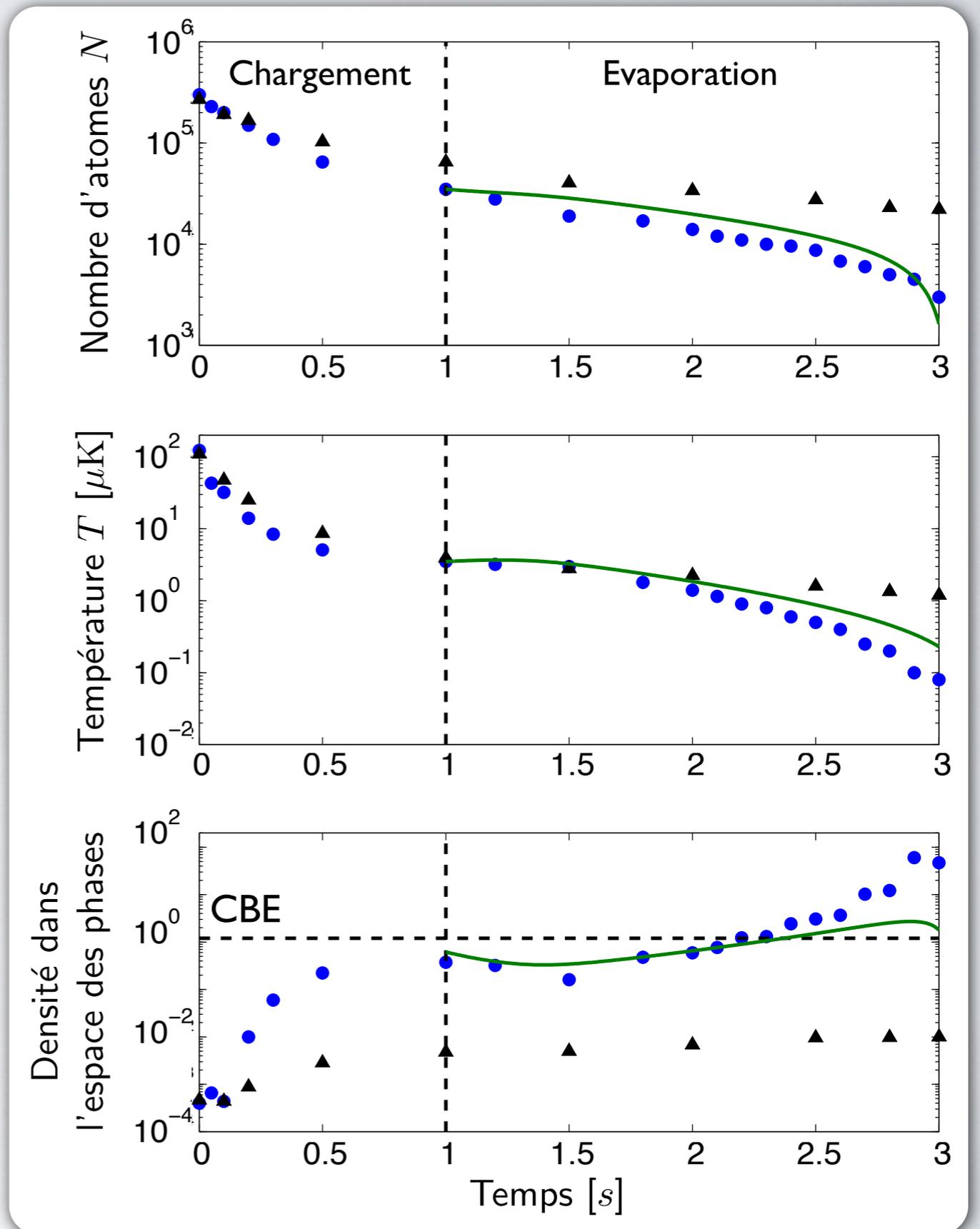
# Evaporation dans le *dimple*

- Modèle original d'évaporation
- Nette divergence avec les modèles plus simples (en vert)  
Ex. K. M. O'Hara *et al.*, PRA **64** 051403 (2001)



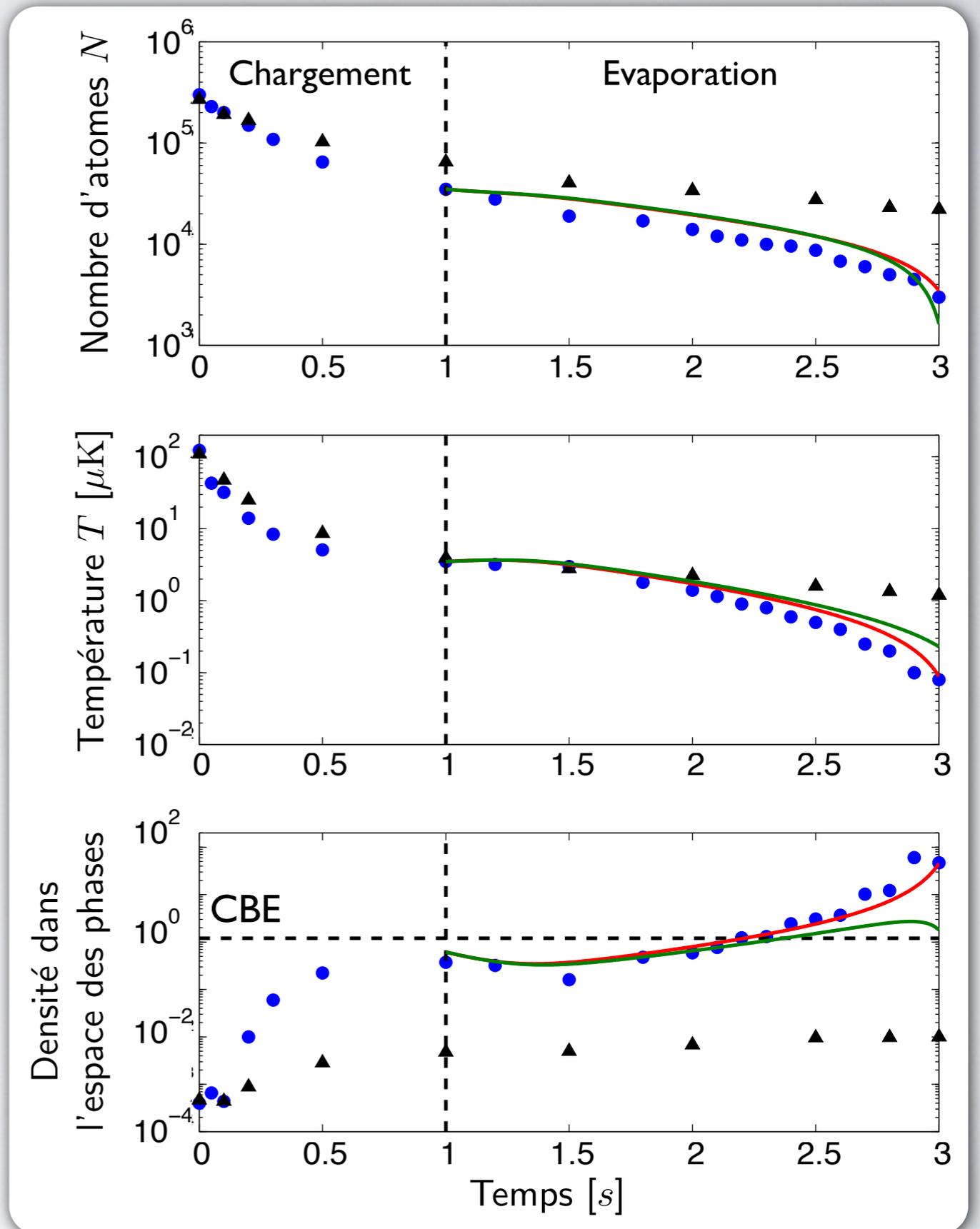
# Evaporation dans le *dimple*

- Modèle original d'évaporation
- Nette divergence avec les modèles plus simples (en vert)  
Ex. K. M. O'Hara *et al.*, PRA **64** 051403 (2001)
- Terme de déversement important pour les rampes rapides (piège optique)



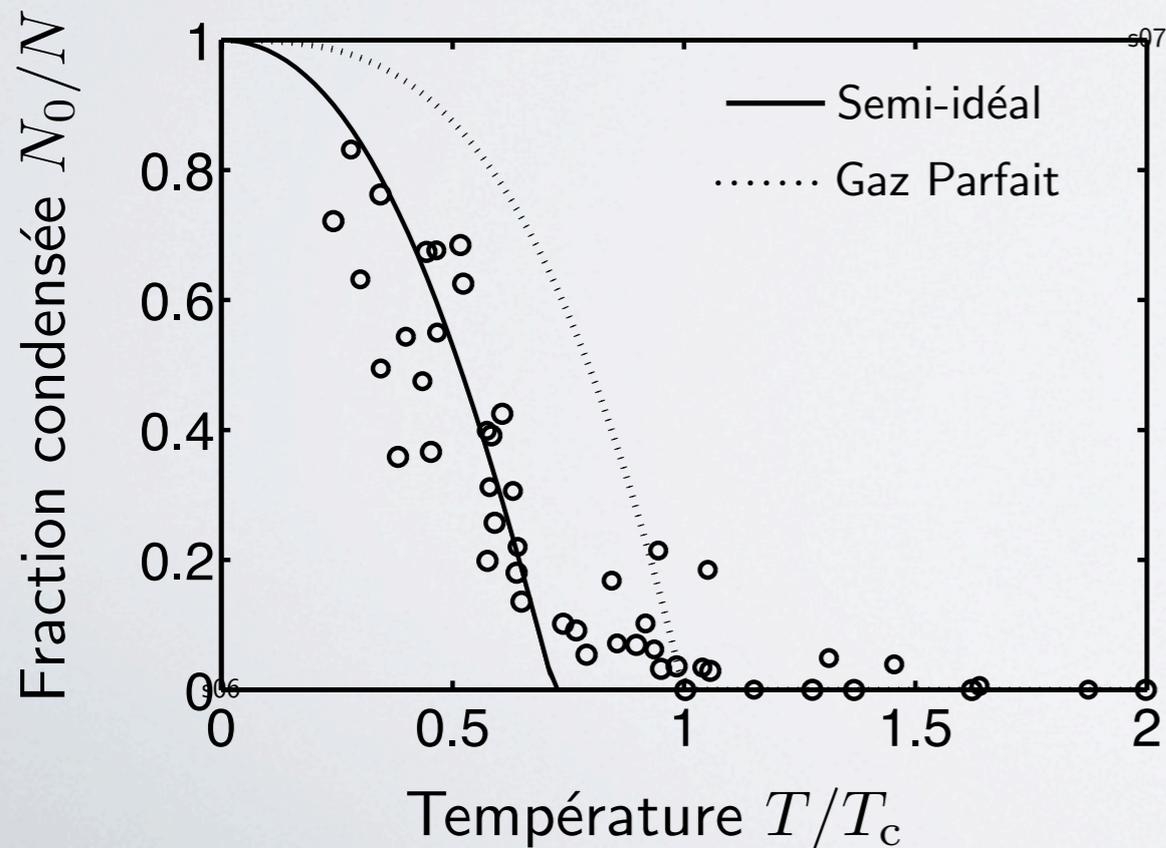
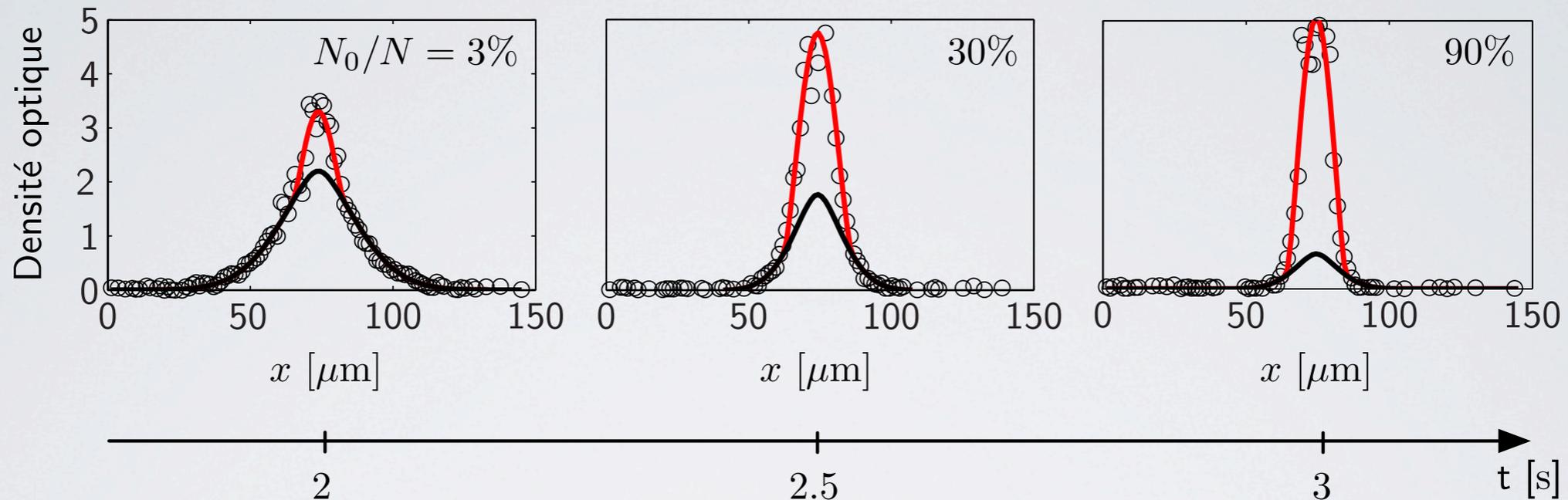
# Evaporation dans le *dimple*

- Modèle original d'évaporation
- Nette divergence avec les modèles plus simples (en vert)  
Ex. K. M. O'Hara *et al.*, PRA **64** 051403 (2001)
- Terme de déversement important pour les rampes rapides (piège optique)
- Anharmonicité du piège importante pour ce terme prise en compte (en rouge)



# Mesure de la fraction condensée

- Double structure, avec purification du condensat au cours de l'évaporation



- La fraction condensée et la température sont déduites de ces profils
- Bien décrit par un modèle semi-idéal  
M. Naraschewski et al., PRA **58** 2423 (1998)

⇒ L'effet des interactions demeure bien visible à petit nombre d'atomes grâce au piège mésoscopique

# Conclusion

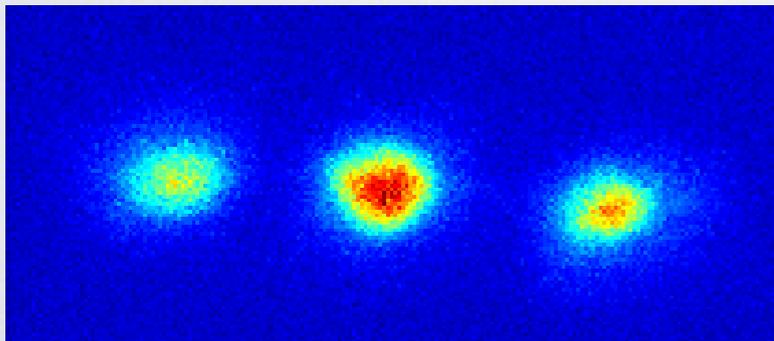
- Conception d'un dispositif expérimental pour l'étude de systèmes quantiques mésoscopiques fortement corrélés
- Laser solide à 589 nm pour le refroidissement du sodium
- Formation d'un condensat de Bose-Einstein de sodium dans une enceinte unique en utilisant la désorption
- Condensation tout optique en deux temps en utilisant un piège optique mésoscopique fortement focalisé

# Perspectives

## Condensat de sodium et piège mésoscopique

- Formation d'un piège plus focalisé,  $w_0 \sim 1.5 \mu\text{m}$
  - Configuration état lié unique
- ⇒ Observation d'une réduction des fluctuations du nombre d'atomes dans le piège ?

## Etude de condensats spinoriels



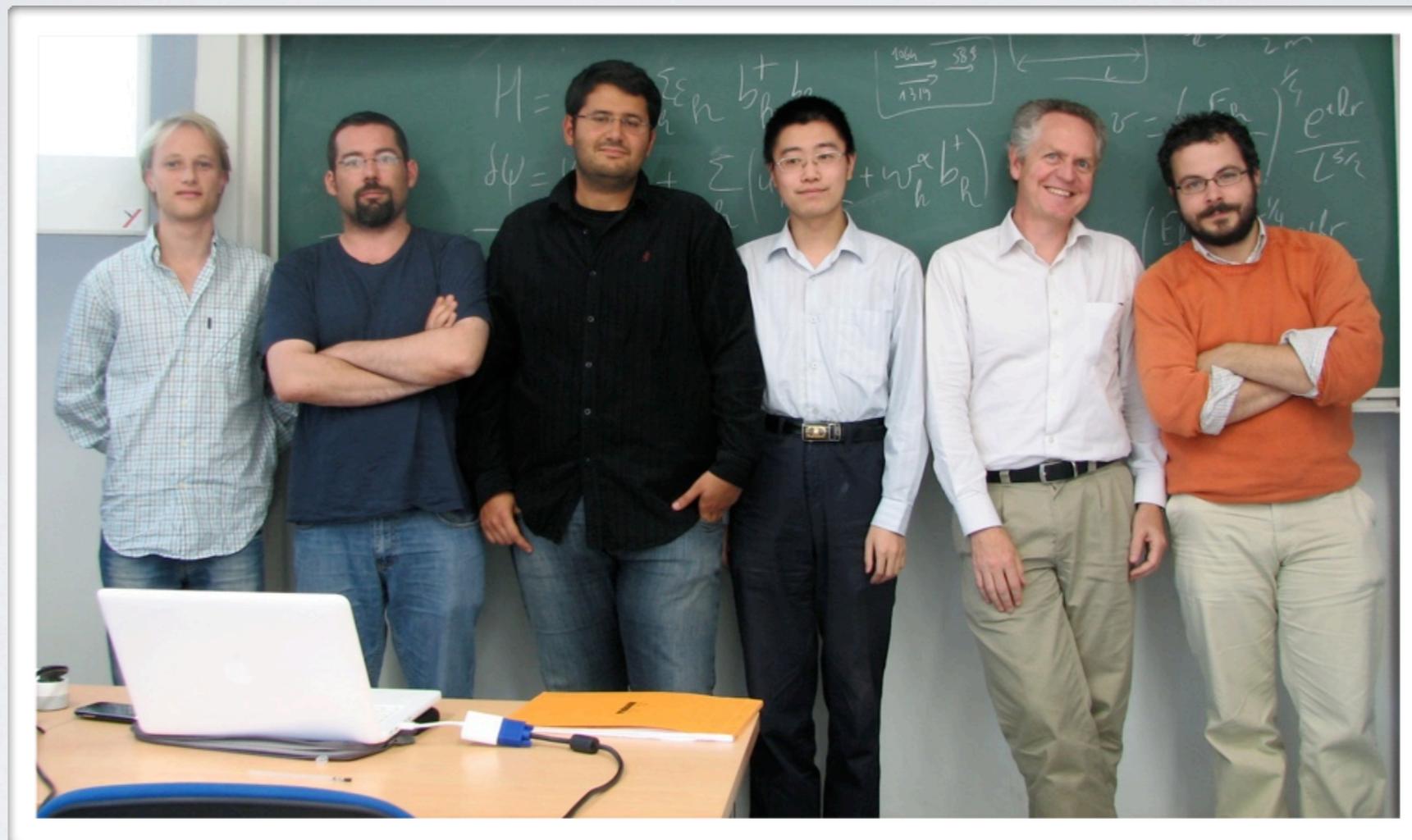
- Comptage des atomes par fluorescence à l'unité près
- Observation d'états de spin comprimés
- Anti-ferromagnétisme : état fondamental corrélé

# Remerciements

Un grand merci à toute l'équipe !

David Fabrice  
Jacob Gerbier

Lingxuan Shao    Jean Dalibard    Luigi de Sarlo



Merci au groupe atomes froids, et aux membres du secrétariat, de la bibliothèque, des ateliers, des services généraux...