

# MANIPULATION D'ATOMES INDIVIDUELS DANS UN MICRO-PIÈGE DIPOLAIRE : BLOCAGE COLLISIONNEL ET STATISTIQUES $\square$ SUB-POISSONIENNES

**Nicolas Schlosser, Georges Reymond, Igor Protsenko  
et  
Philippe Grangier**

*Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique,  
UMR 8501 du CNRS - SupOptique  
91403 Orsay, France*

**[http://www.iota.u-psud.fr/~grangier/Quantum\\_optics.html](http://www.iota.u-psud.fr/~grangier/Quantum_optics.html)**

**Idées de base du « Traitement quantique de l'information » :**

- \* Coder and manipuler l'information écrite sur des objets quantiques**
- \* Un bit classique (0 or 1) devient un « qubit »**

$$\alpha | 0 \rangle + \beta | 1 \rangle \quad (\text{superposition linéaire de 0 and 1})$$

- \* Applications : cryptographie quantique, calcul quantique...**

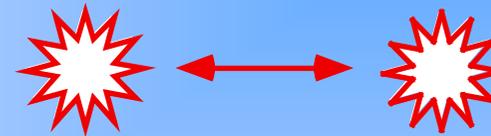
**Comment réaliser physiquement les qubits ?**

**\* Ici : atomes**      **| 0 > and | 1 > : 2 états de grande durée de vie**

**photons**      **| 0 > and | 1 > : 2 états de polarisation orthogonaux**

**Nombreuses propositions utilisant des atomes (ou des ions) piégés individuellement à des positions bien définies.**

\* Couplage direct atome-atome



\* Couplage atome-atome dans une cavité

⇒ portes logiques quantiques



chaque atome est un « qubit »

\* Echanges entre les atomes et les photons

⇒ mémoires quantiques



photons et atomes sont des « qubits »

\* Les atomes sont optiquement non-linéaires

⇒ portes logiques « photoniques »



**Dans ces schémas il faut localiser un atome par rapport à l'autre avec une précision typiquement meilleure que la longueur d'onde optique**

**Comment maintenir en place des atomes neutres avec une grande précision ?**

**Méthode :** **Piège dipolaire à très fort confinement spatial**

**Travaux en cours :** **\* Piéger des atomes neutres individuels à des positions bien définies, les refroidir et les détecter**  
**(ce séminaire)** **[N. Schlosser et al, Nature 411, 1024 (2001)]**

**\* Evaluation critique des propositions pour intriquer entre eux des atomes ou des photons**

**Buts poursuivis :** **Mise en œuvre de schémas simples de manipulation de « qubits » (production de photons uniques, d'états intriqués, portes quantiques)...**

# Force dipolaire

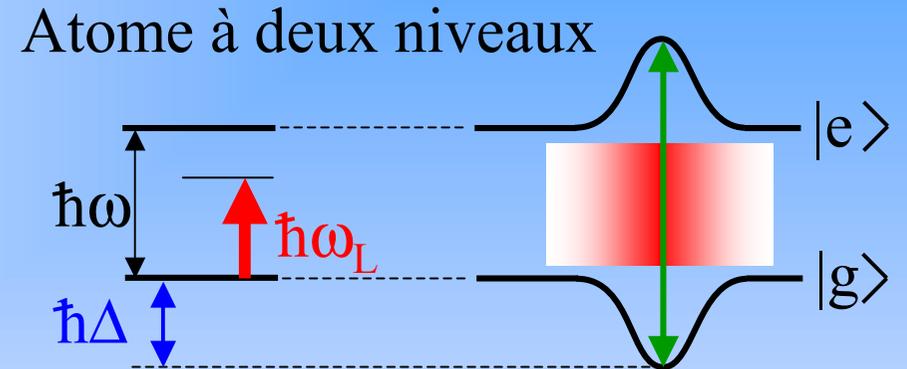
Atome à deux niveaux, de **largeur naturelle**  $\Gamma$ , dans un champ laser d'intensité  $I$  et de **fréquence**  $\omega_L$ , avec un **désaccord rouge** :  $\delta = \omega_L - \omega < 0$ .

La **force réactive** induite par le laser dérive d'une énergie potentielle  $U$ .

Pour de **grands désaccords**  $\delta$  :

$$U = \hbar\Delta = \hbar\Gamma \frac{I}{I_{\text{sat}}} \frac{\Gamma}{4\delta} < 0$$

où : -  $I_{\text{sat}}$  est l'**intensité de saturation**.  
 -  $\Delta$  le **déplacement lumineux**



Atome dans le champ laser de fréquence  $\omega_L$

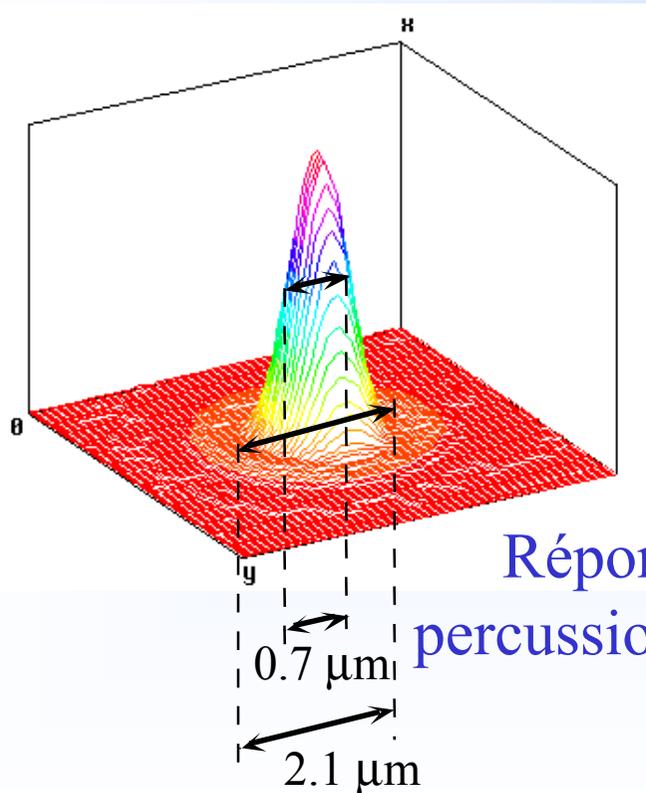
Les atomes sont piégés dans les régions de grande intensité.  
 La fréquence de la transition est décalée vers le bleu.

# Le Microscope de Grande OUverture : MIGOU

## Caractéristiques de l'objectif :

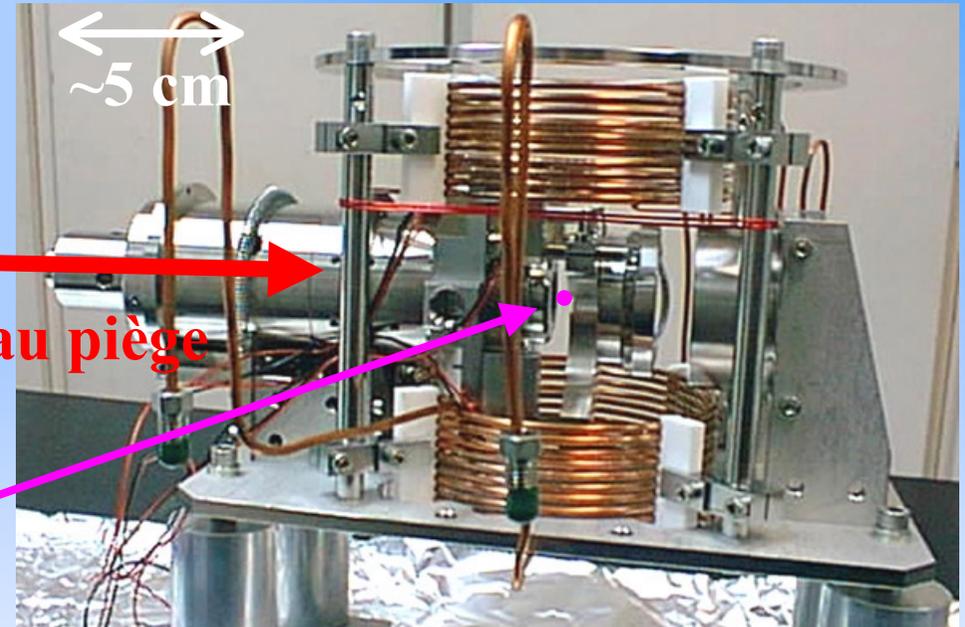
- Grande ouverture numérique :  $NA=0,7$
- Limité par la diffraction,  $w_0 < 1 \mu\text{m}$
- Grande frontale : 1 cm

Compatible Ultra-Vide.



Faisceau piège

Position  
du PMO



L'objectif est utilisé de deux façons différentes :

- pour faire focaliser le laser du piège dipolaire au centre du PMO.
- pour collecter la fluorescence des atomes piégés avec une grande efficacité.

Le piège Magnéto-Optique est réalisé autour du foyer de l'objectif « MIGOU ».

Le faisceau du piège dipolaire est focalisé au centre du PMO :

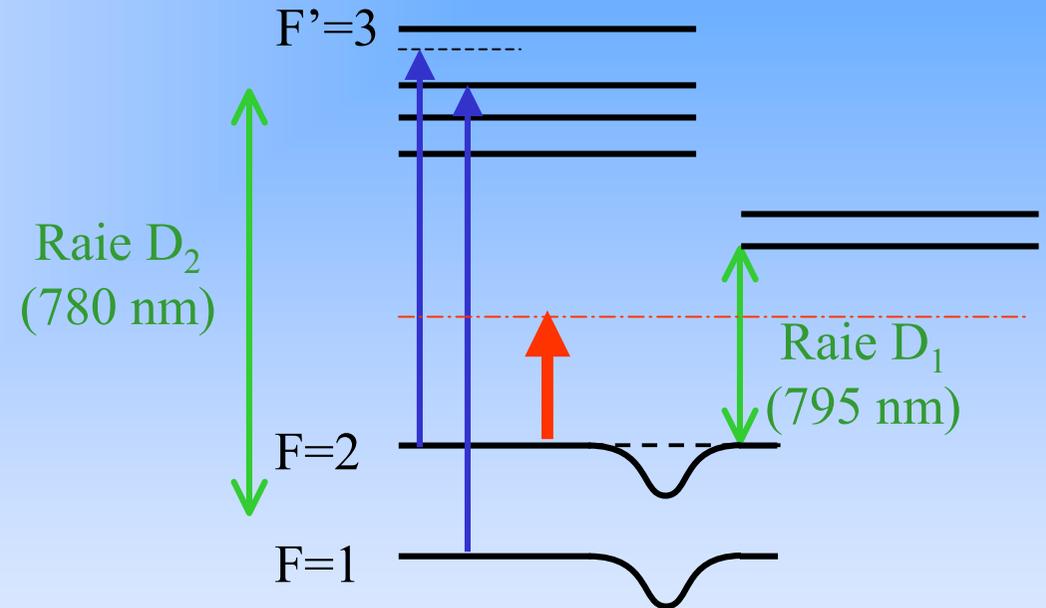
Puissance  $P =$  quelques mW

Waist de  $w_0 = 0,7 \mu\text{m}$

$\delta = -6700 \text{ GHz}$

sur le rouge de la raie  $D_1$   
du  $\text{Rb}^{87}$  ( $\lambda = 810 \text{ nm}$ )

Atomes piégés au niveau du waist



PMO & Repompeur

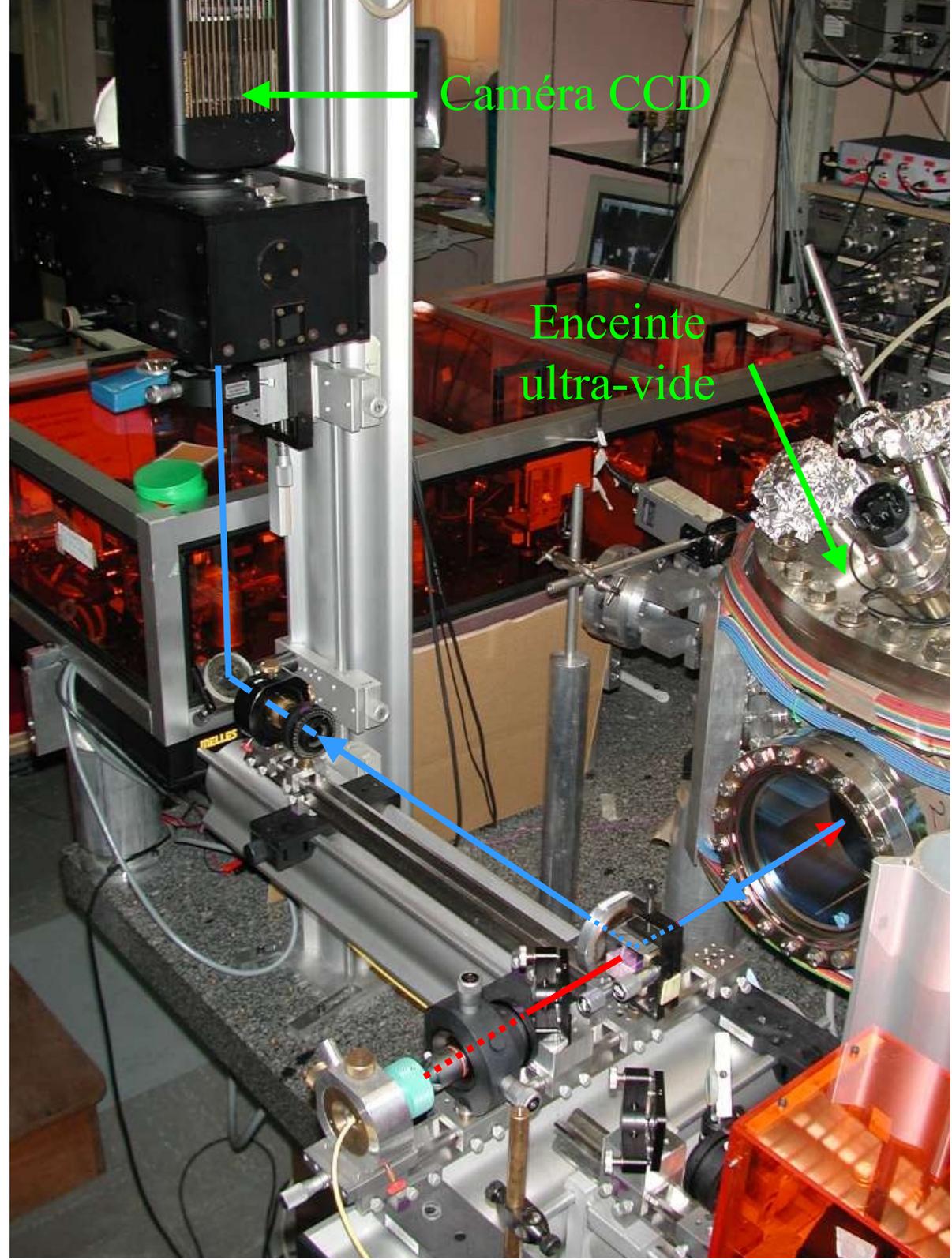
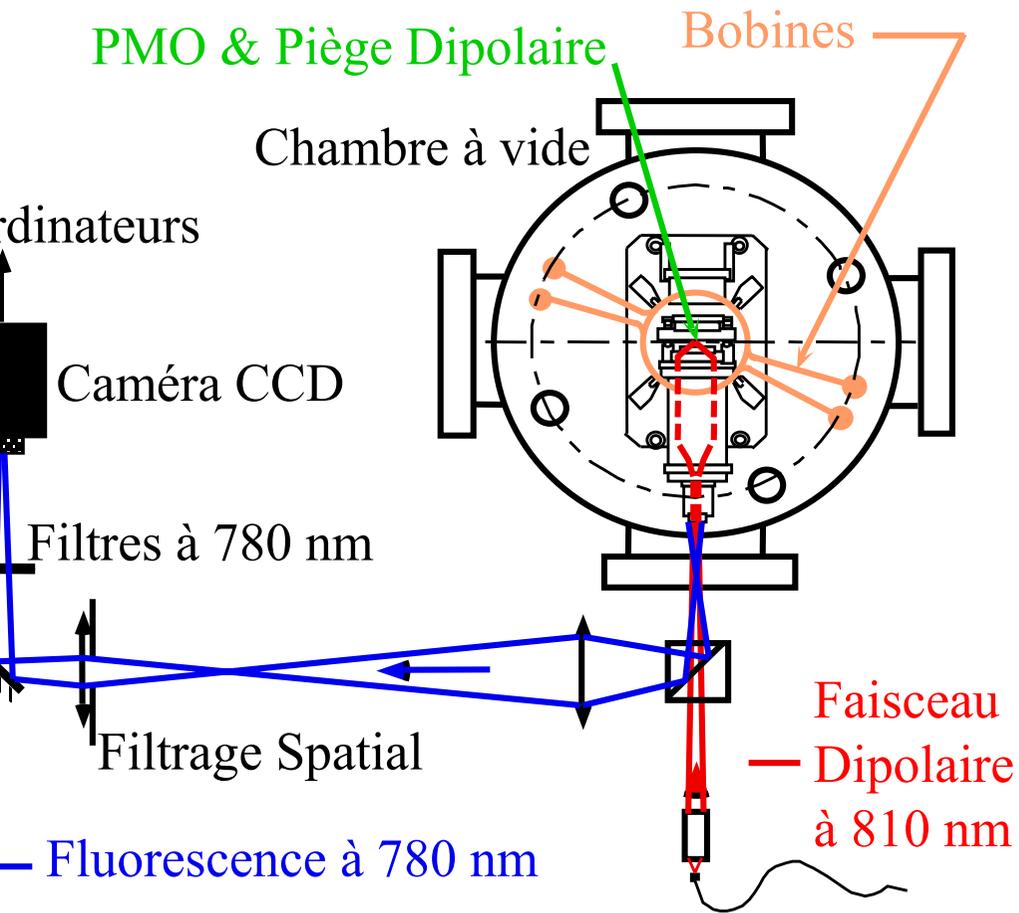
Piège Dipolaire

Diamètre du piège :  $D \sim 1,5 \mu\text{m}$

Déplacement Lumineux :  $\Delta \sim 50 \text{ MHz}$

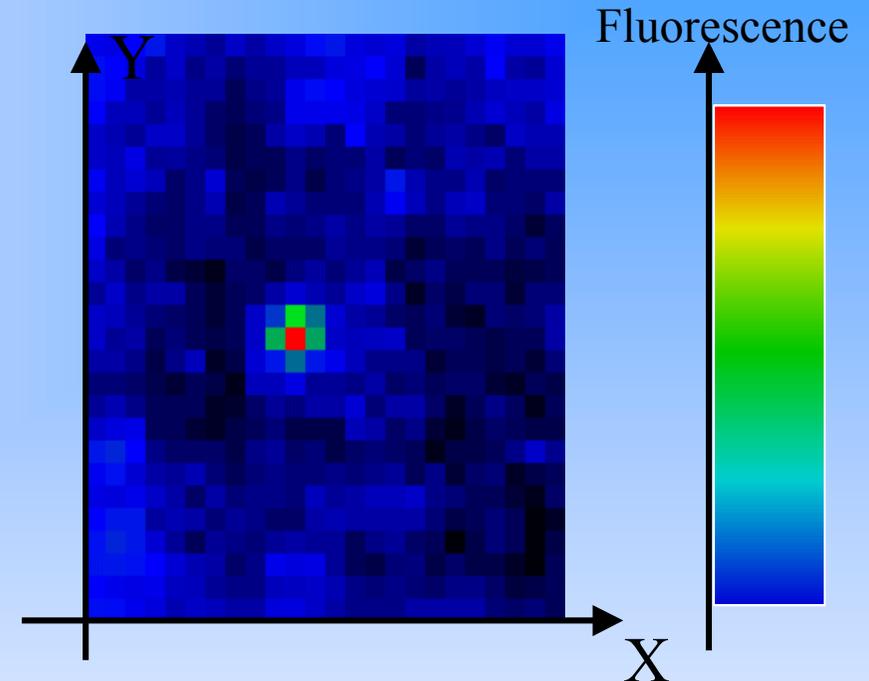
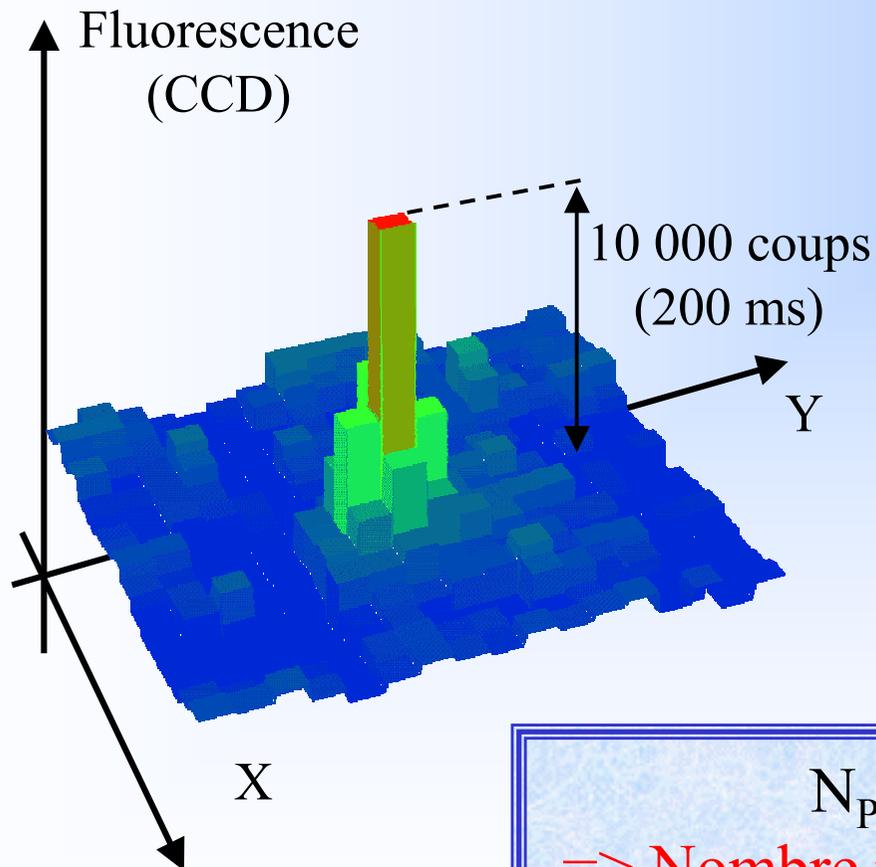
Profondeur du piège :  $U_0 =$  quelques mK

# Dispositif expérimental



# Image du piège dipolaire sur la caméra CCD

Observation continue de la fluorescence du micro-piège dipolaire sur la caméra CCD.



Echelle du système d'imagerie :

1 pixel = 1  $\mu\text{m}$

Temps d'intégration :

$\tau = 200 \text{ ms}$

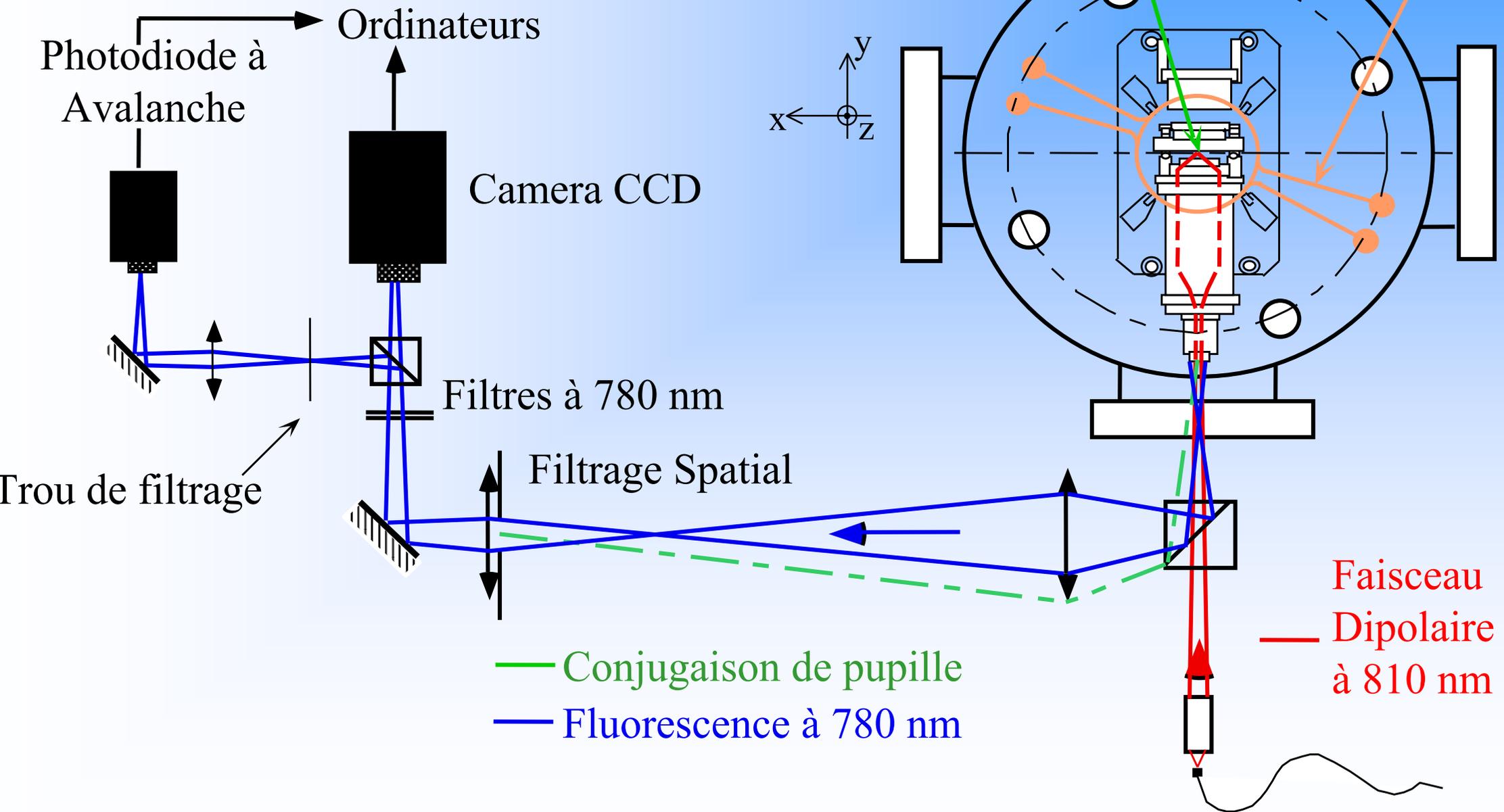
$N_{\text{Pic}} = 10000 \text{ Coups en } 200 \text{ ms}$   
 $\Rightarrow$  Nombre moyen d'atomes de l'ordre de 1 à 10.

# Dispositif expérimental

PMO & Piège Dipolaire

Bobines

Chambre à vide



# Régime à un seul atome

Coupure du champ magnétique du piège magnéto-optique => Régime de mélasse

Coupure du ralentisseur => Régime de faible chargement

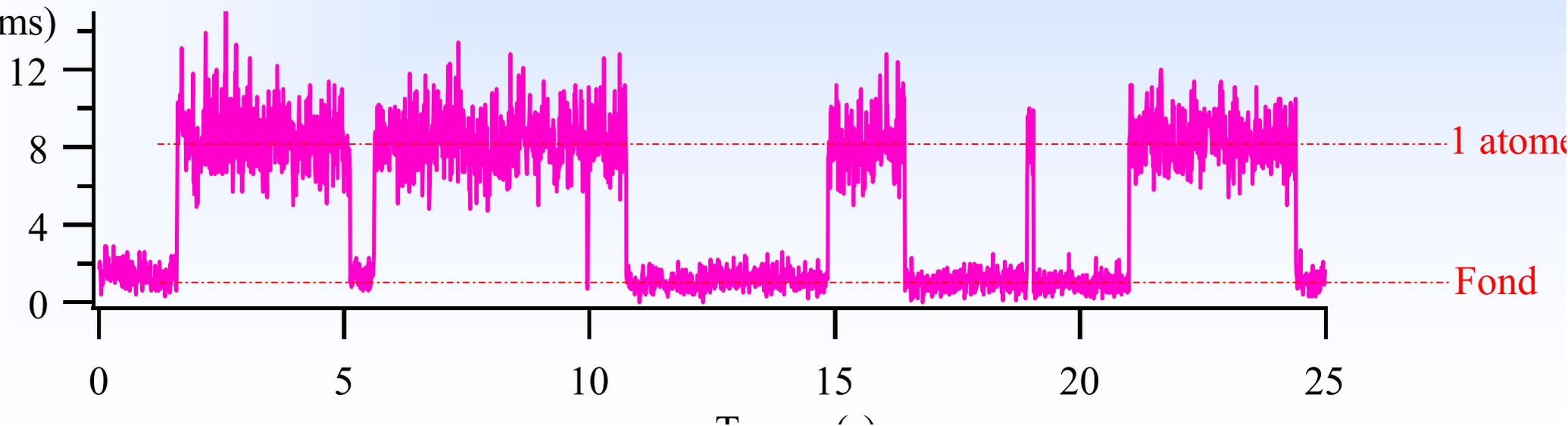
Augmentation de la durée des fenêtres de comptage => plus de photons par atome

Quantification des niveaux de fluorescence ! (8000 coups /s / atome)

Signature de la présence d'un atome unique

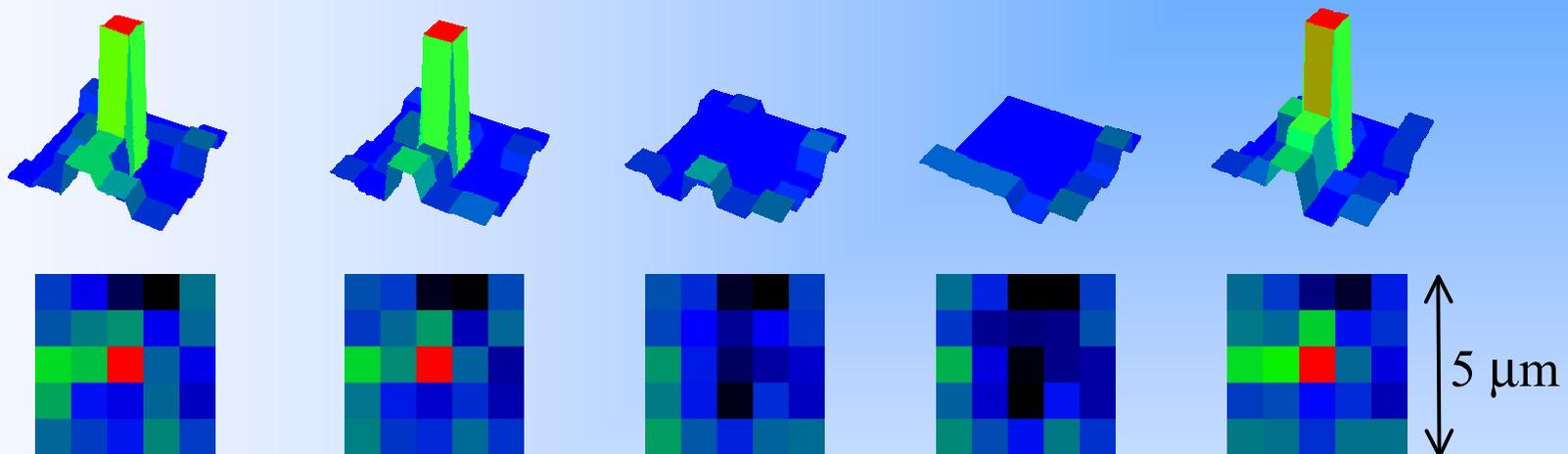
taux de comptage

(coups/10ms)

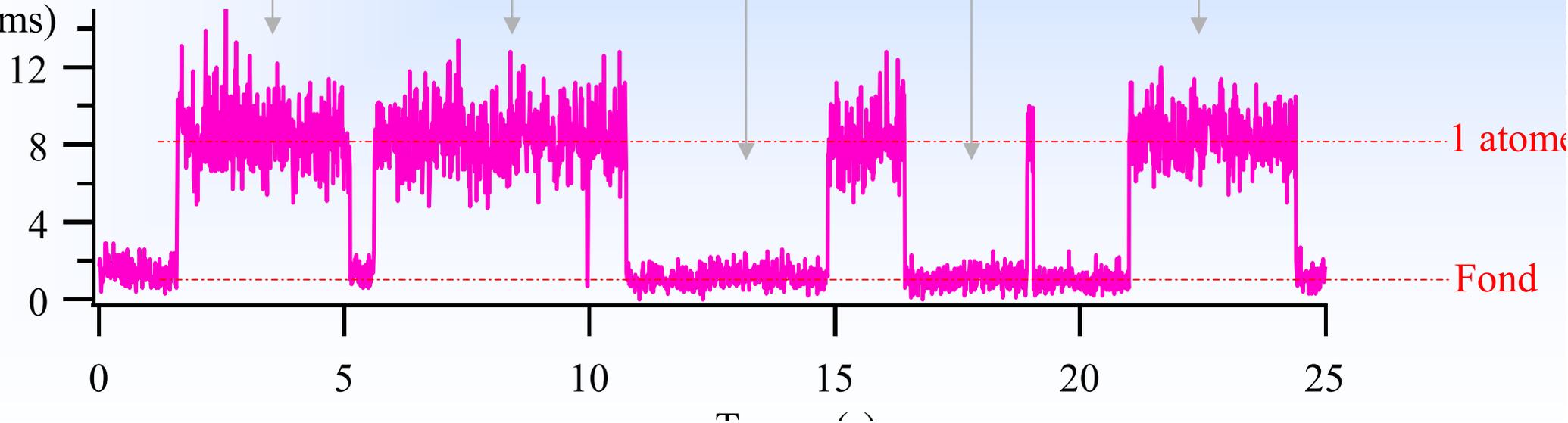


# Régime à un seul atome

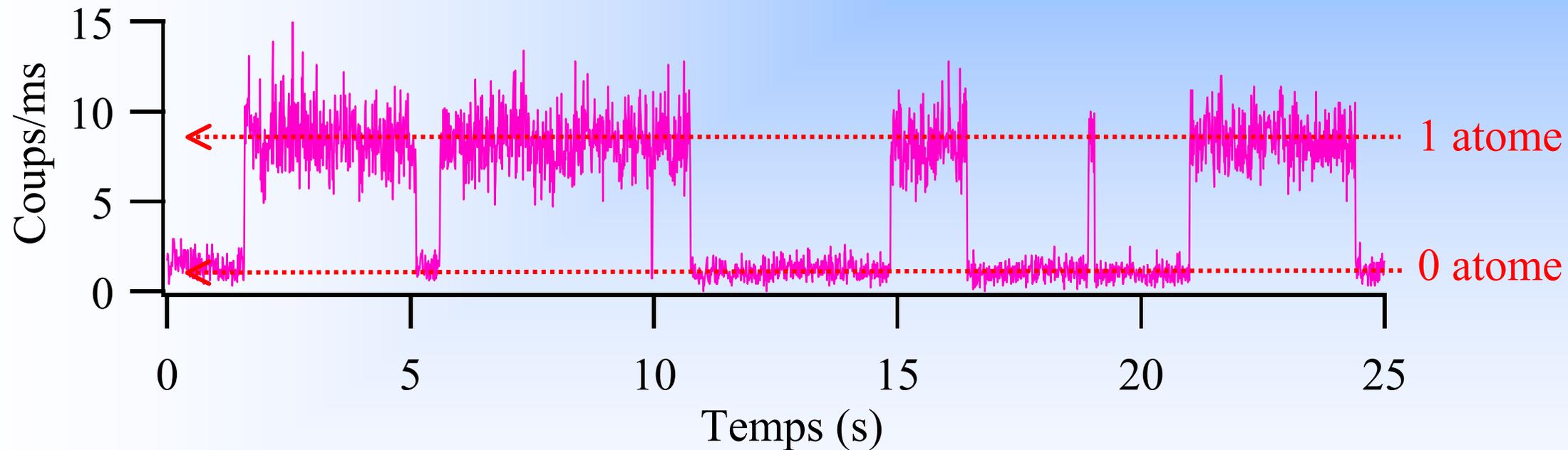
Images sur la  
camera CCD



Niveaux de comptage  
(clics/10ms)



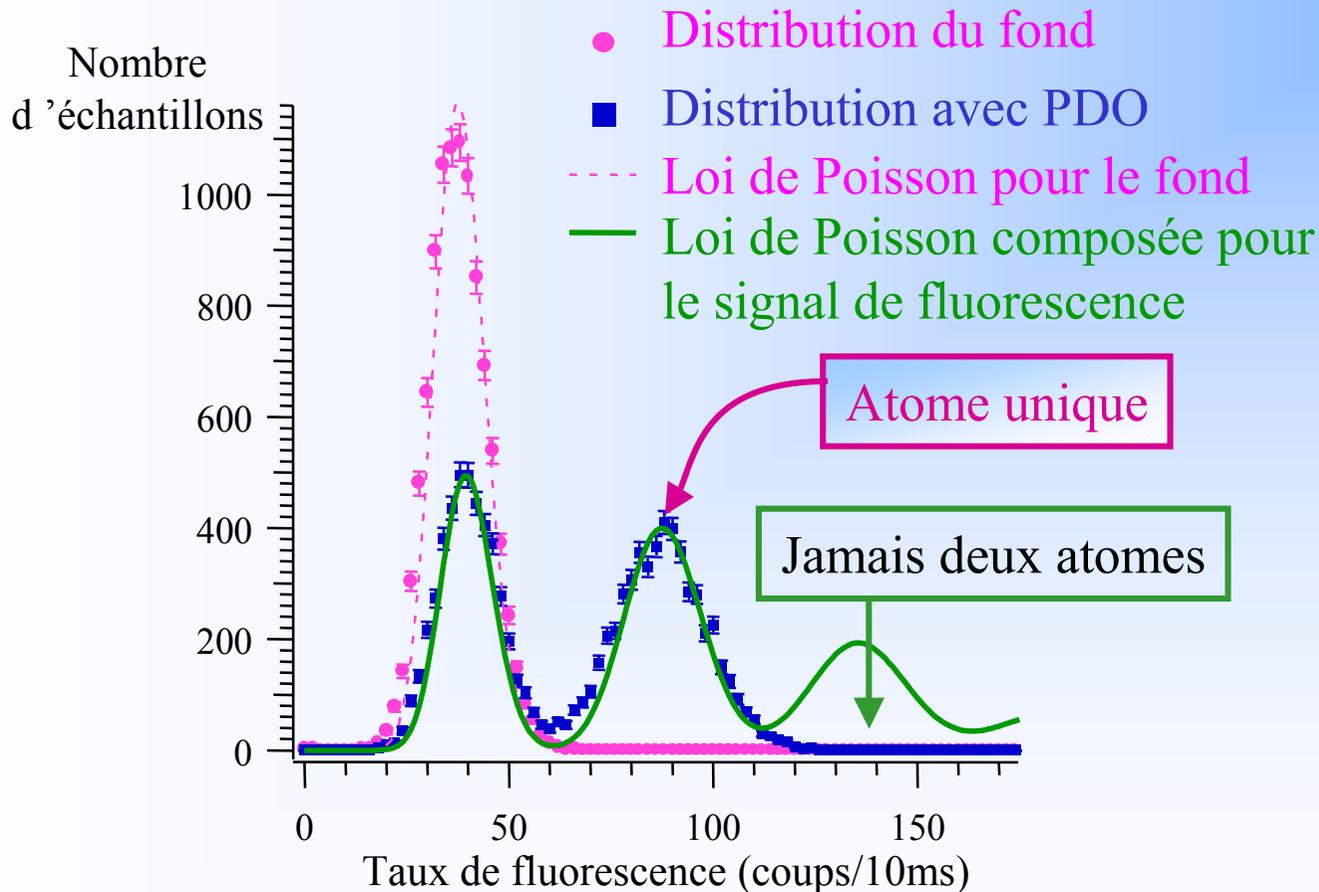
**L 'histogramme des niveaux de fluorescence levels  
donne la statistique du nombre d 'atomes piégés**



**Détection d'atomes individuels ! (8000 photons /sec/atome)**

# Statistique du nombre d'atomes piégés

Champ magnétique du PMO coupé en permanence => Mélasse

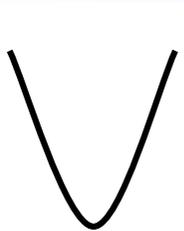


La statistique des atomes piégés n'est pas du tout une loi de Poisson.

Le nombre d'atomes piégés est limité à UN.

# Limitation du nombre d'atomes : modèle simple

Hypothèses du modèle : le piège est **trop petit pour contenir deux atomes**

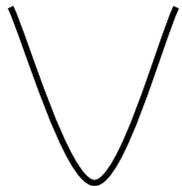


Les atomes arrivent avec un **taux de chargement** :  $R_0$ .

Durée de vie d'un atome unique dans le piège :  $\tau_0 = \frac{1}{\gamma}$

Quand un atome arrive dans un piège déjà occupé : **les deux atomes s'échappent**

On n'a que deux configurations possibles :



**Piège vide** : seul événement possible pour quitter cette configuration  
 - arrivée d'un atome avec la probabilité  $R_0 dt$

**durée de vie** :  $\tau(0) = \frac{1}{R_0}$



**1 Atome** : deux possibilités pour quitter cette configuration

- durée de vie propre  $\Rightarrow \gamma dt$

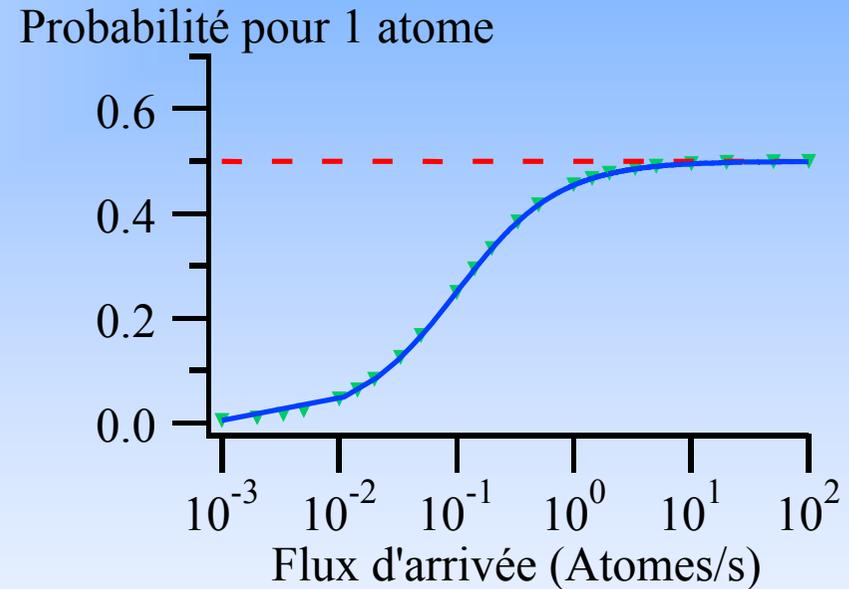
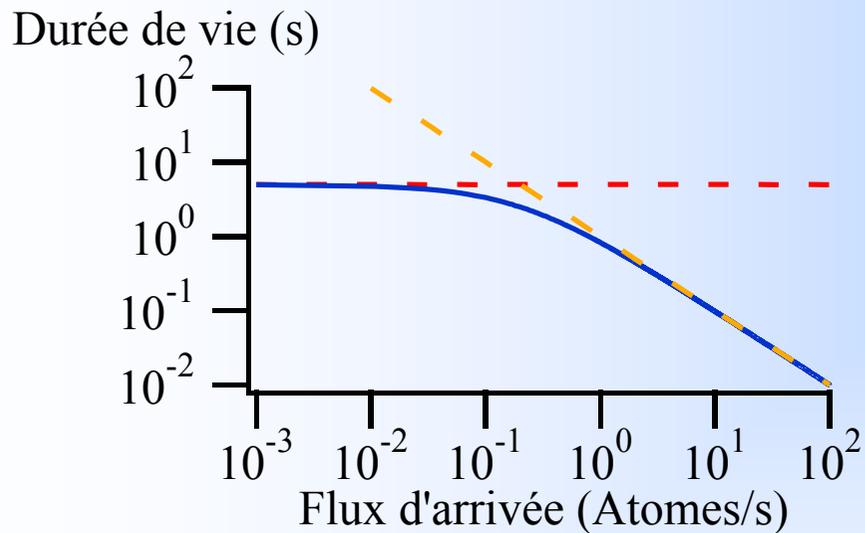
- arrivée d'un atome  $\Rightarrow R_0 dt$

**durée de vie** :  $\tau(1) = \frac{1}{R_0 + \gamma}$

# Limitation du nombre d'atomes : modèle simple

Conséquences du modèle simple : **deux prédictions principales**

Pour une durée de vie intrinsèque de 5 secondes



Durée de vie d'un atome :  $\tau(R_0) = \frac{1}{R_0 + \gamma}$

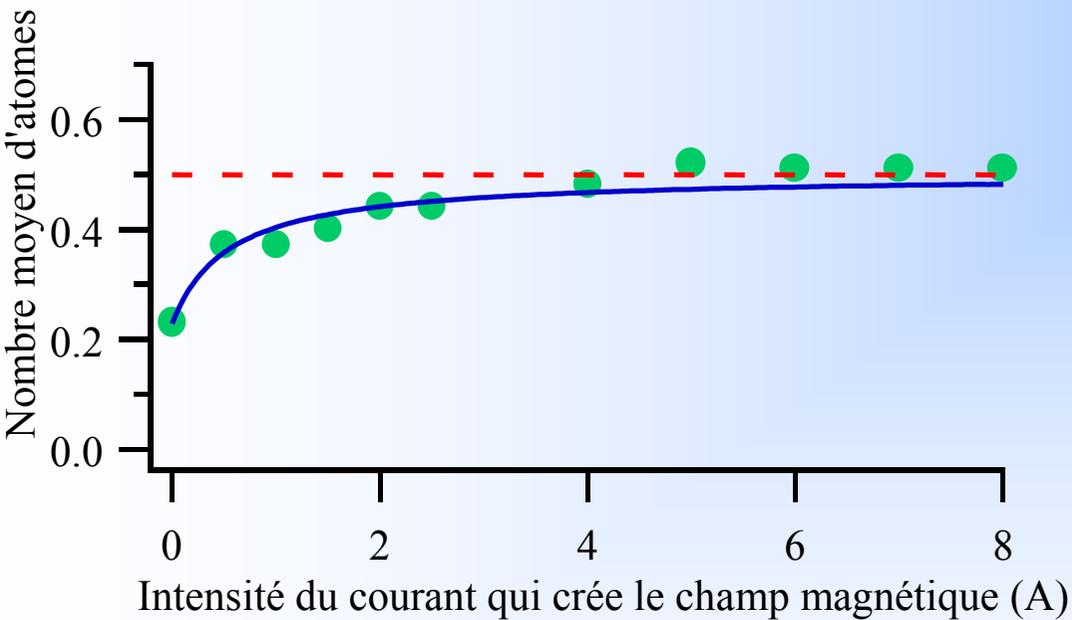
Taux d'occupation :  $P_1(R_0) = \frac{1}{2 + \frac{\gamma}{R_0}}$

Quand on augmente  $R_0$  : la durée de vie diminue

le nombre d'atomes est limité à 0.5 => **blocage collisionnel**

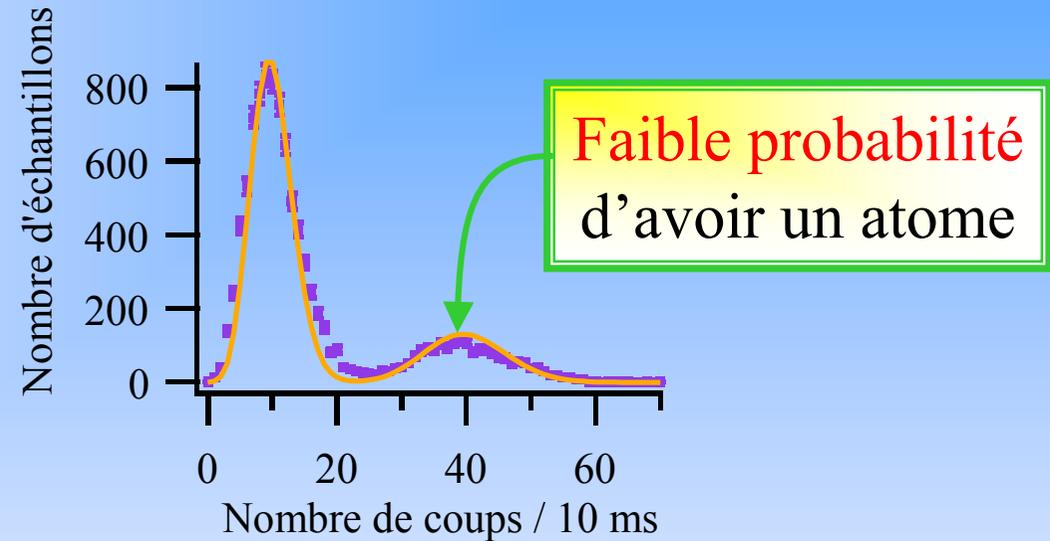
# Limitation du nombre d'atomes : Taux d'occupation

**Contrôle** du taux de chargement par la densité du piège magnéto-optique :  
 => Variation du champ magnétique

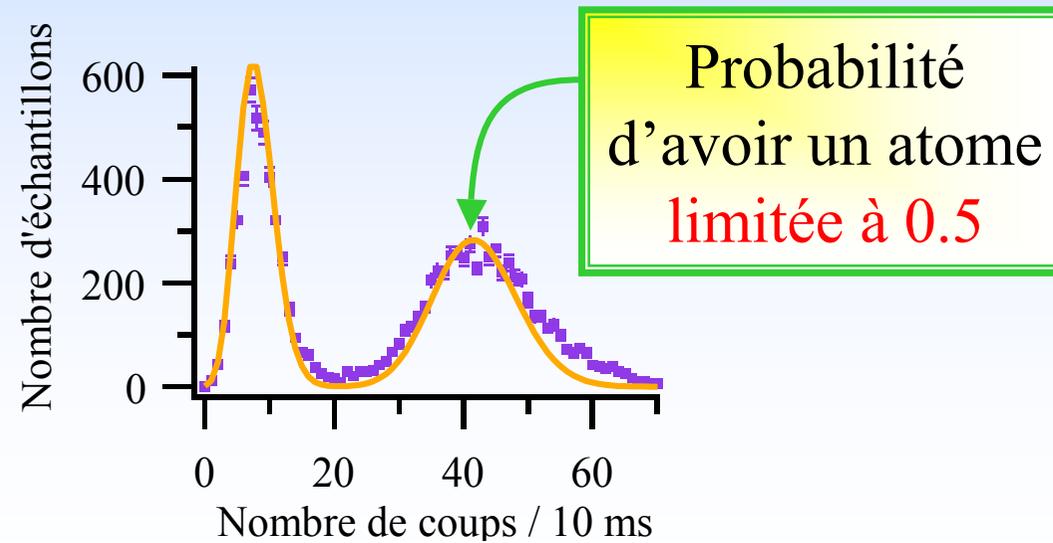


La probabilité de piéger un atome unique **augmente**, mais **ne dépasse jamais 50 %**

**A faible taux de chargement :**

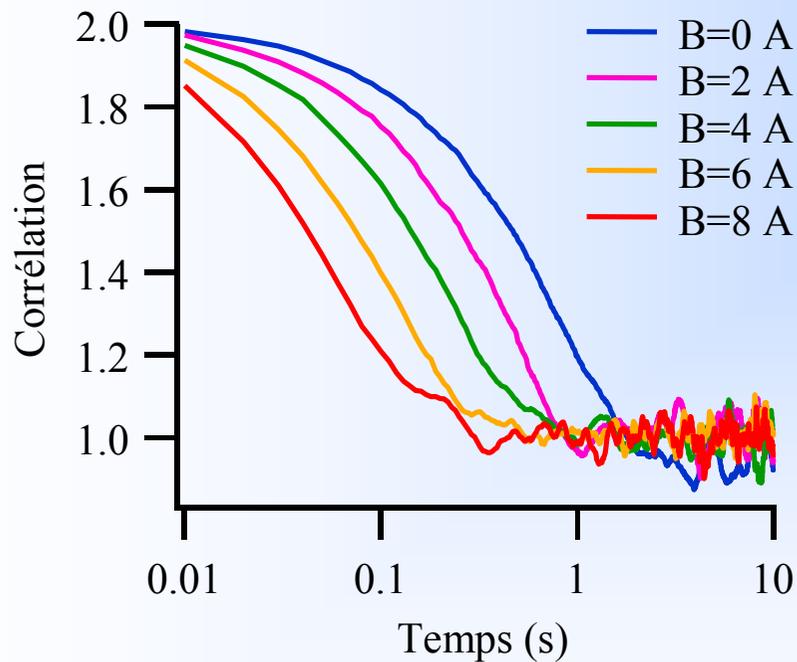


**A plus fort taux de chargement :**

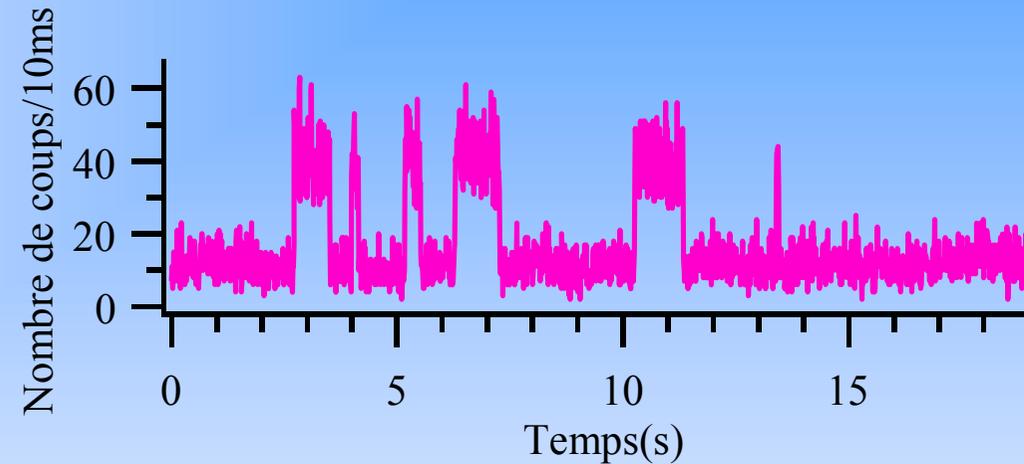


# Limitation du nombre d'atomes : Durée de vie

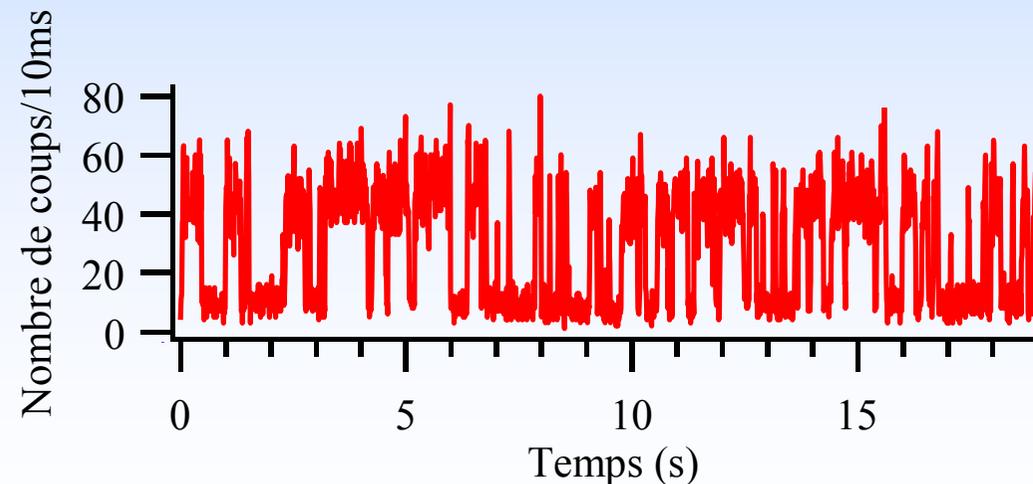
**Contrôle** du taux de chargement par la densité du piège magnéto-optique :  
 => Variation du champ magnétique



**A faible taux de chargement :**



**A plus fort taux de chargement :**



La durée de vie du piège **diminue**  
 lorsque le taux de chargement **augmente**

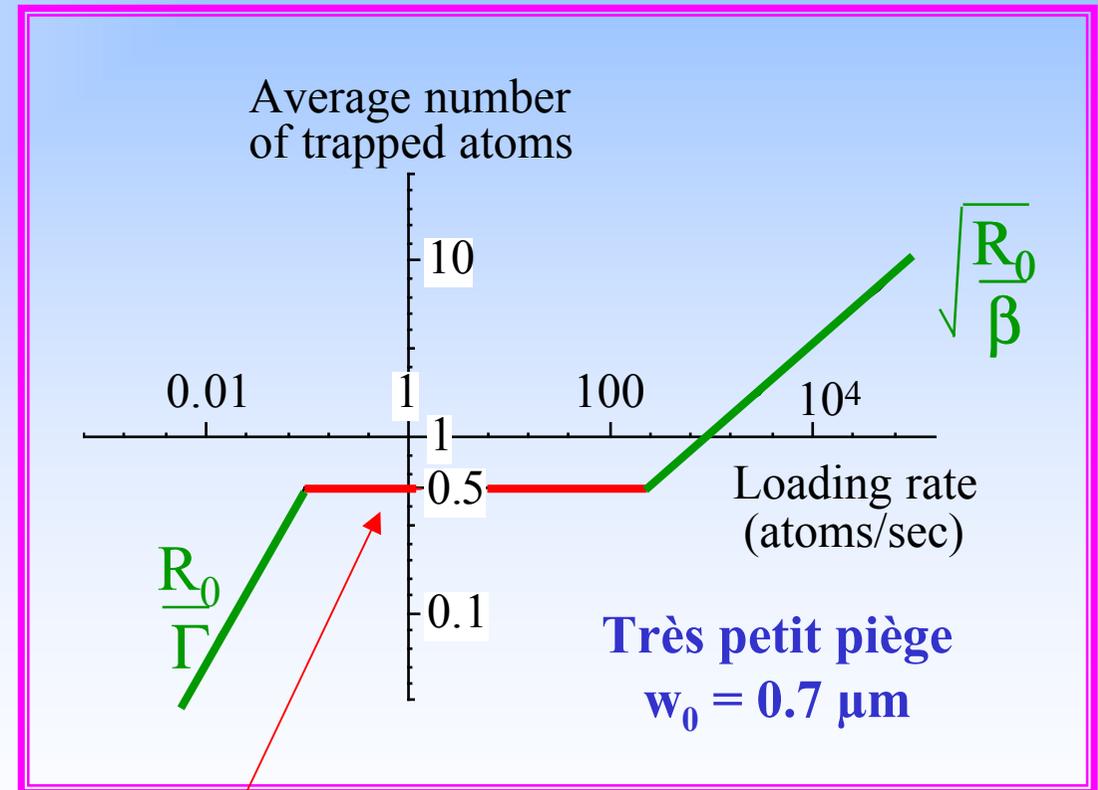
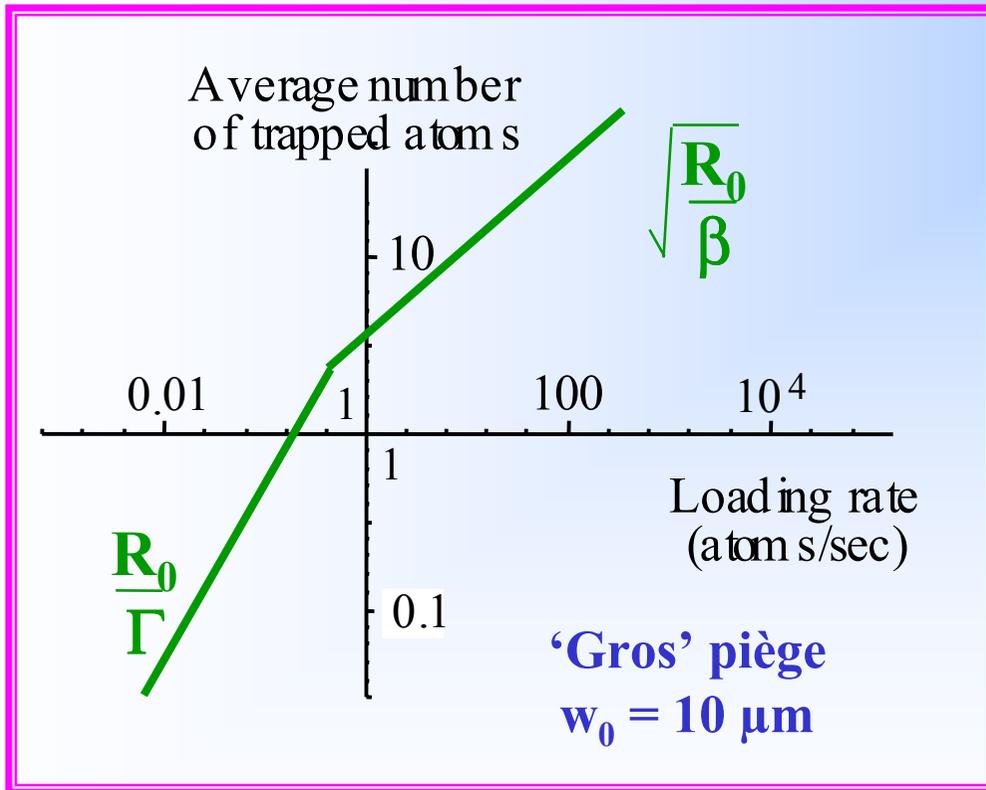
Equation régissant le nombre  $N$  d'atomes piégés:

$$dN/dt = R_0 - \Gamma N - \beta N(N-1)$$

$R_0$  : taux de chargement

$\Gamma$  : pertes ( $0.2 \text{ s}^{-1}$ )

$\beta$  : collisions (cf. Wieman)



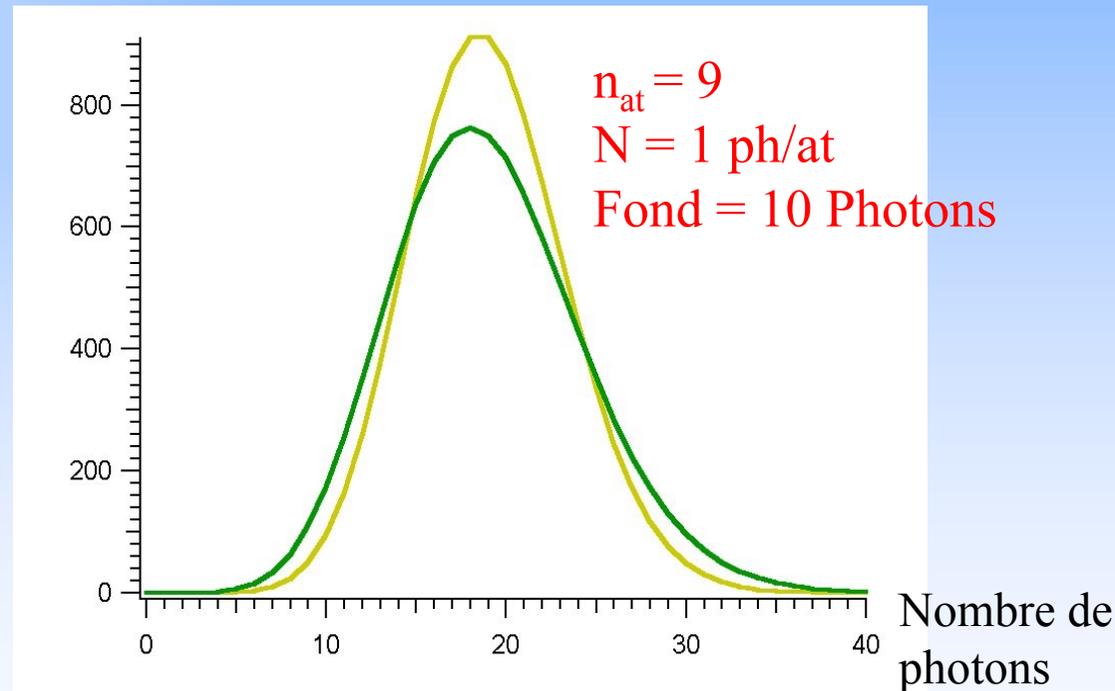
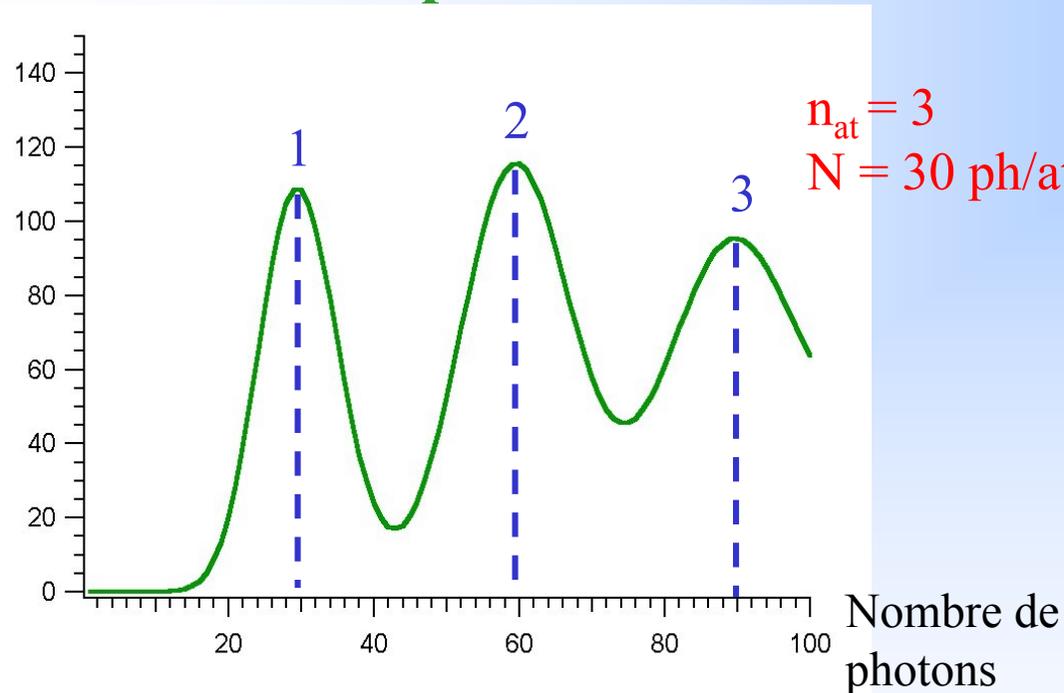
**Blocage collisionnel : propriété spécifique des très petits pièges ( $< 4 \mu\text{m}$ ) !**

# Résultats expérimentaux : taux de chargement élevé

Nombre fixe de  $n_{\text{at}}$  atomes, émission aléatoire de  $N$  photons par atome.

$\Rightarrow$  Loi de Poisson avec  $\langle n \rangle = N n_{\text{at}}$ .

Prise en compte les fluctuations de  $n_{\text{at}} \Rightarrow$  Loi de Poisson composée



**Cas simple :  $N$  est grand**

$\Rightarrow$  La distribution du nombre d'atomes est résolue directement

**Cas compliqué :  $N$  est petit**

$\Rightarrow$  La distribution du nombre d'atomes est évaluée indirectement

# Résultats expérimentaux : taux de chargement élevé

Fluorescence détectée:

- dans le PMO (fond)
- dans le piège dipolaire

**Désaccord avec une loi de Poisson**

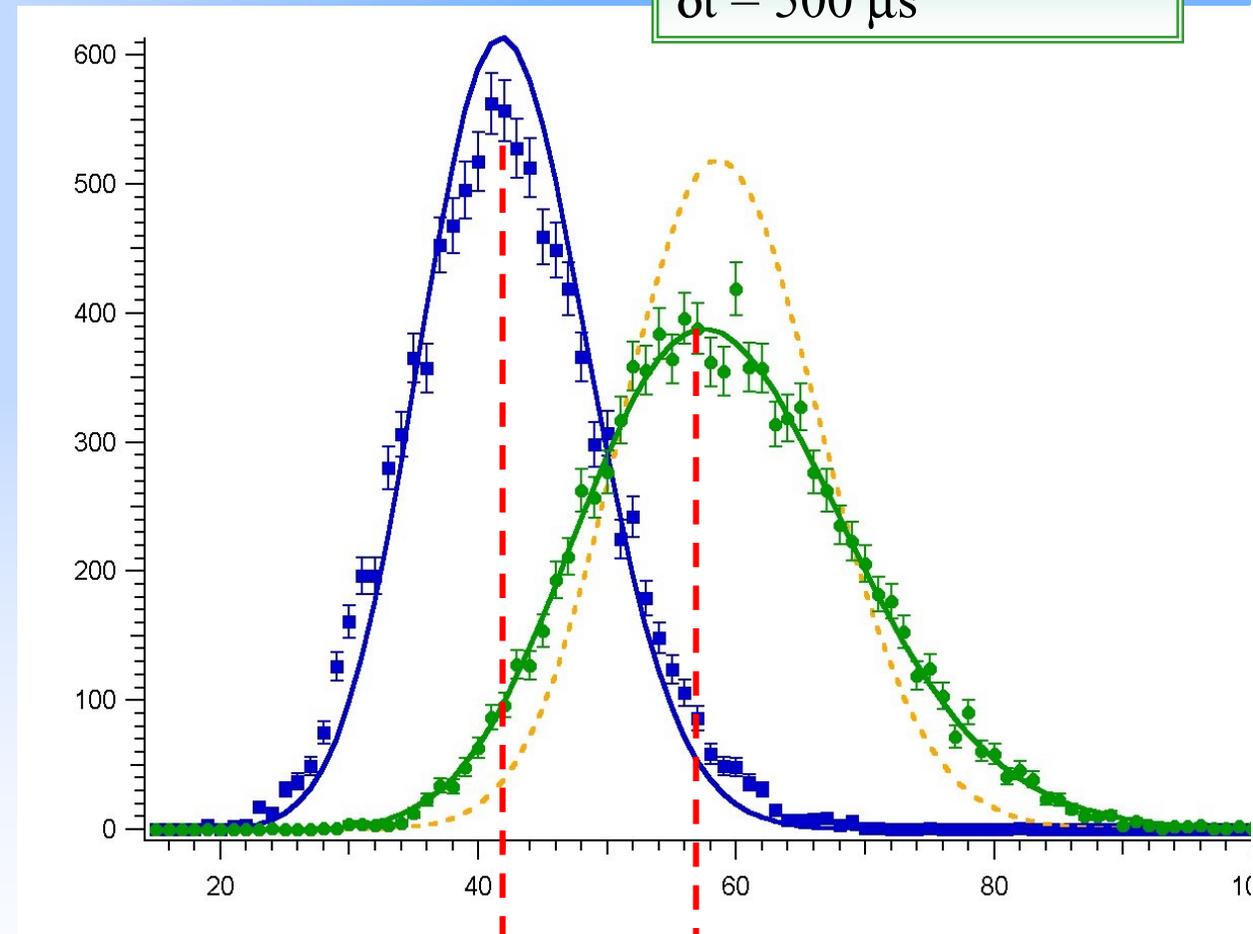
Courbe calculée en utilisant  
une loi de Poisson composée :

Paramètre libre : nombre d'atomes

$n_{\text{at}} = 9$  atomes

$N = 3$  photons/atome

Fe nêtre de comptage :  
 $\delta t = 500 \mu\text{s}$



Atomes du piège dipolaire

## Régimes de fonctionnement (PMO + Piège dipolaire) :

### \* Taux de chargement faible :

$$p(N = 0) \cong 1, \quad p(N = 1) \ll 1, \quad p(N \geq 2) = 0$$

**Durée de vie limitée par les collisions avec le gaz résiduel (quelques sec.)**

### \* Taux de chargement intermédiaire (“**Blocage collisionnel**”) :

$$p(N = 0) \cong p(N = 1) \cong 0.5 \quad p(N \geq 2) = 0$$

**Durée de vie limitée par l’arrivée d’un autre atome (sec -> msec)**

### \* Taux de chargement élevé :

**Faible nombre de photons détectés / durée de vie -> analyse statistique**

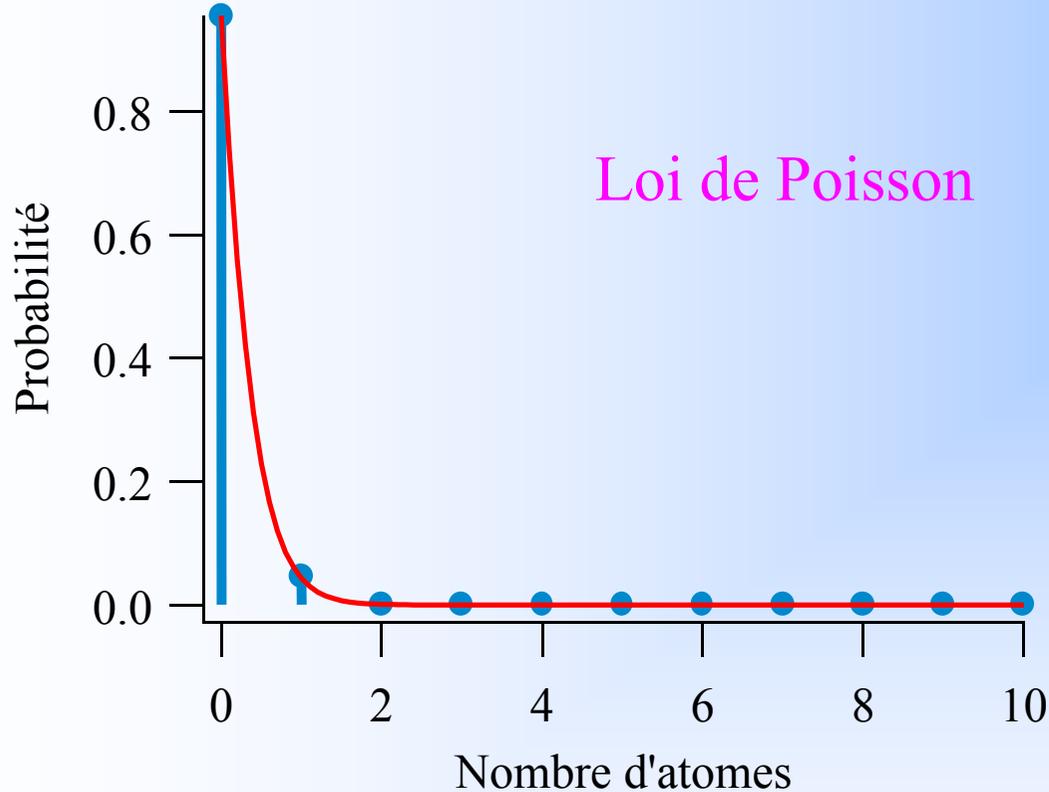
**Plus de 10 atomes dans le piège !**

## Régimes de fonctionnement (Piège dipolaire seul) :

**Durée de vie limitée par les collisions avec le gaz résiduel (quelques sec.)**

# Etude des collisions : Modélisation du chargement

Durée de vie d'une paire  $\ll$  Durée de vie intrinsèque



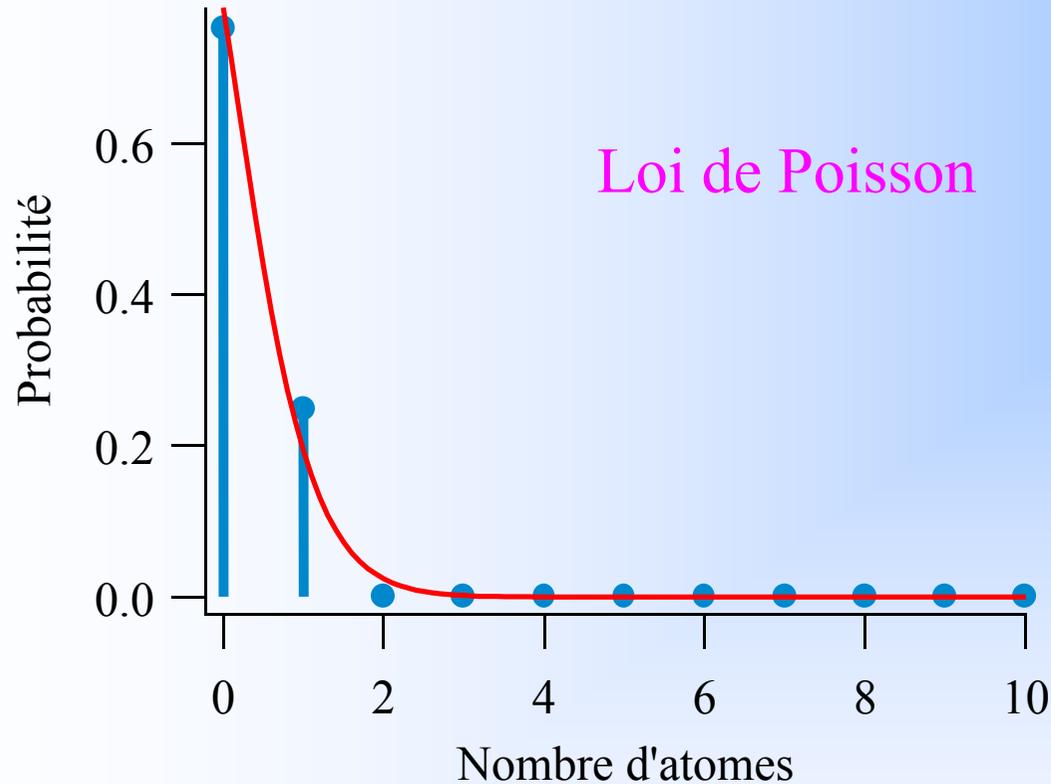
$$R_0 = 0.01 \text{ Atome/s}$$

- **A faible taux de chargement  $R_0$  :**  
 $R_0 \ll \gamma$   
 le piège est **rarement occupé**

- Résultats d'une simulation numérique de l'évolution du nombre d'atomes piégés, en incluant :**
- \* le chargement (taux  $R_0$ ),
  - \* les pertes à un corps (taux  $\gamma$ )
  - \* les pertes à 2 corps (taux  $(N-1)\beta$ )

# Etude des collisions : Modélisation du chargement

Durée de vie d'une paire  $\ll$  Durée de vie intrinsèque

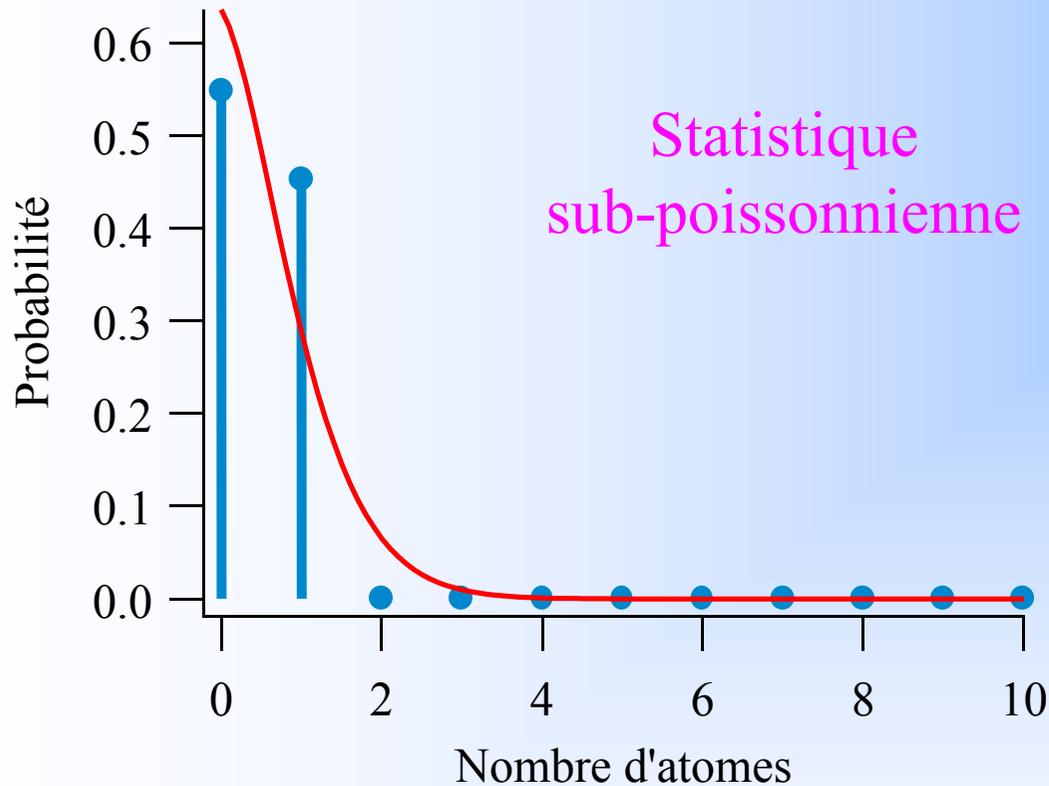


$$R_0 = 0.1 \text{ Atome/s}$$

- **A faible taux de chargement  $R_0$  :**  
 $R_0 \ll \gamma$   
 le piège est rarement occupé
- **Augmentation de  $R_0$**   
 $\Rightarrow$  augmentation du taux  
 d'occupation du piège

# Etude des collisions : Modélisation du chargement

Durée de vie d'une paire  $\ll$  Durée de vie intrinsèque

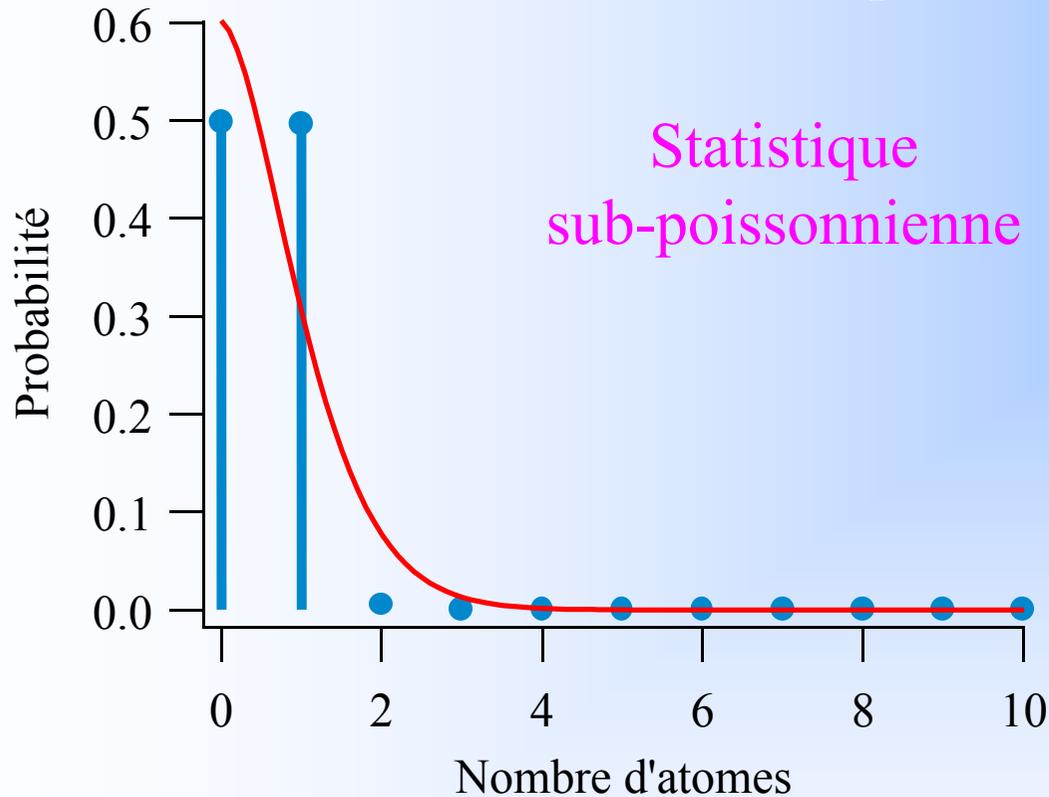


$$R_0 = 1 \text{ Atome/s}$$

- A faible taux de chargement  $R_0$  :**  
 $R_0 \ll \gamma$   
 le piège est **rarement occupé**
- A taux de chargement intermédiaire**  
 $\gamma \ll R_0 \ll \beta$   
**Collisions quasi-immédiates**  
 $\Rightarrow$  **Le modèle simple s'applique**  
**« Blocage collisionnel »**

# Etude des collisions : Modélisation du chargement

Durée de vie d'une paire  $\ll$  Durée de vie intrinsèque

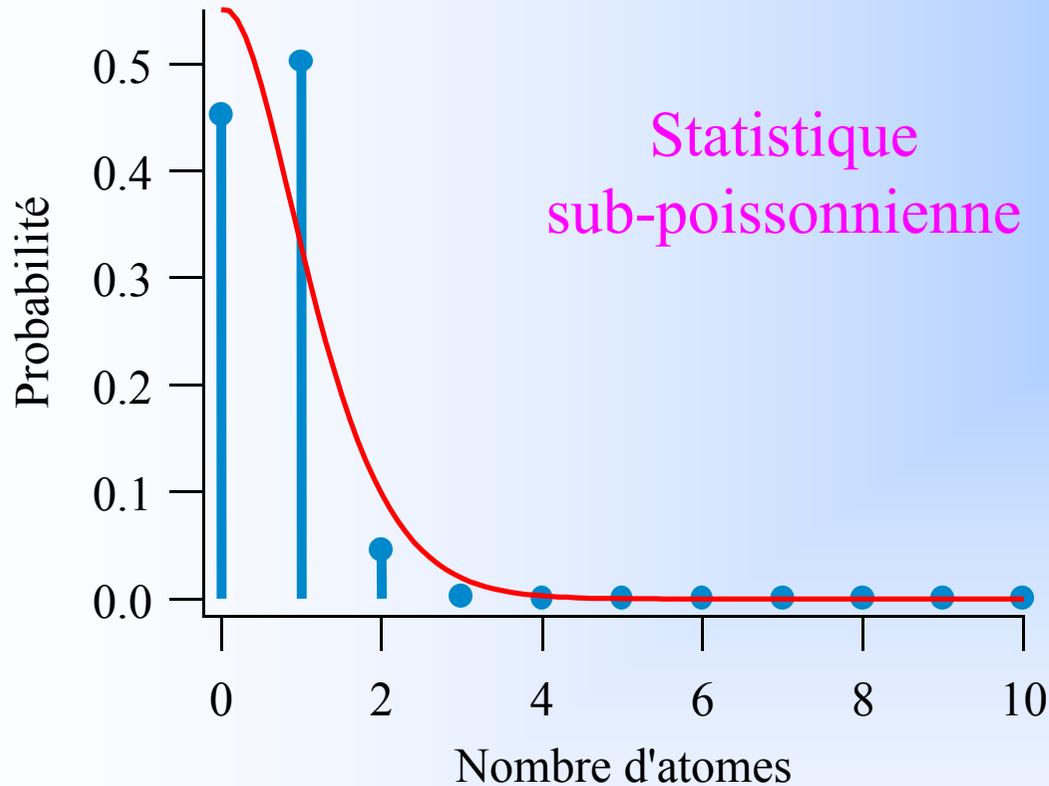


$$R_0 = 10 \text{ Atomes/s}$$

- A faible taux de chargement  $R_0$  :**  
 $R_0 \ll \gamma$   
 le piège est rarement occupé
- A taux de chargement intermédiaire**  
 $\gamma \ll R_0 \ll \beta$   
**Collisions quasi-immédiates**  
 $\Rightarrow$  Le modèle simple s'applique  
**« Blocage collisionnel »**

# Etude des collisions : Modélisation du chargement

Durée de vie d'une paire  $\ll$  Durée de vie intrinsèque

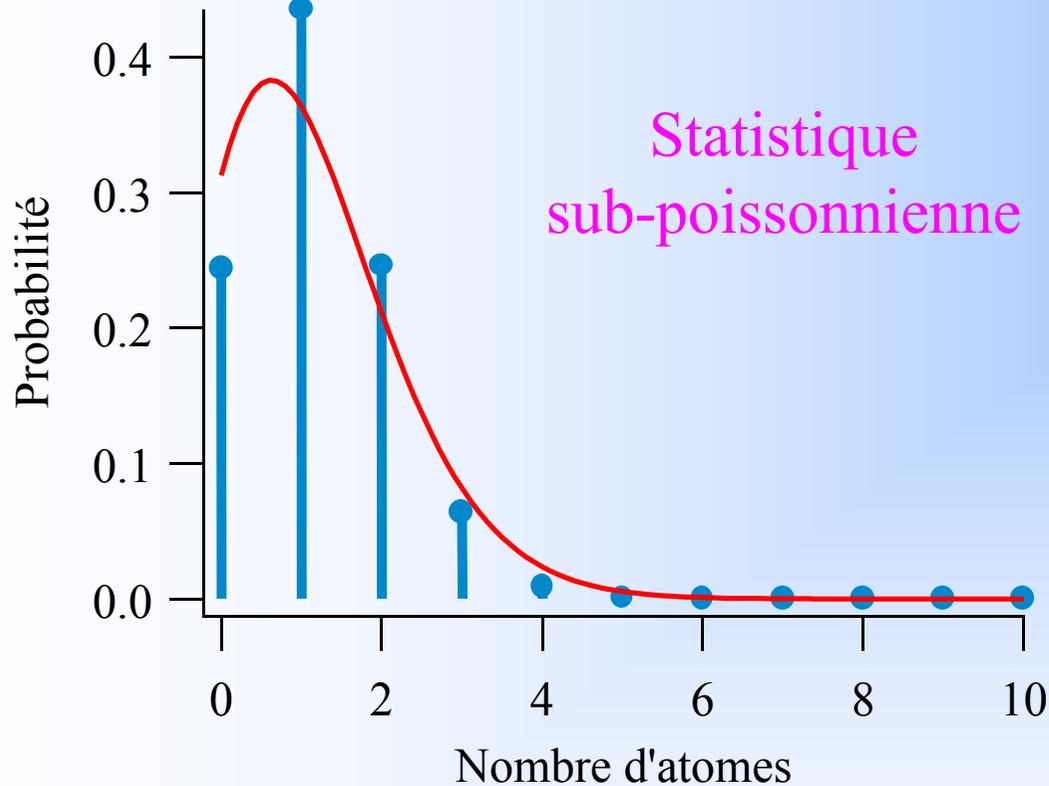


$$R_0 = 100 \text{ Atomes/s}$$

- A faible taux de chargement  $R_0$  :**  
 $R_0 \ll \gamma$   
 le piège est rarement occupé
- A taux de chargement intermédiaire**  
 $\gamma \ll R_0 \ll \beta$   
**Collisions quasi-immédiates**  
 $\Rightarrow$  Le modèle simple s'applique  
**« Blocage collisionnel »**

# Etude des collisions : Modélisation du chargement

Durée de vie d'une paire  $\ll$  Durée de vie intrinsèque

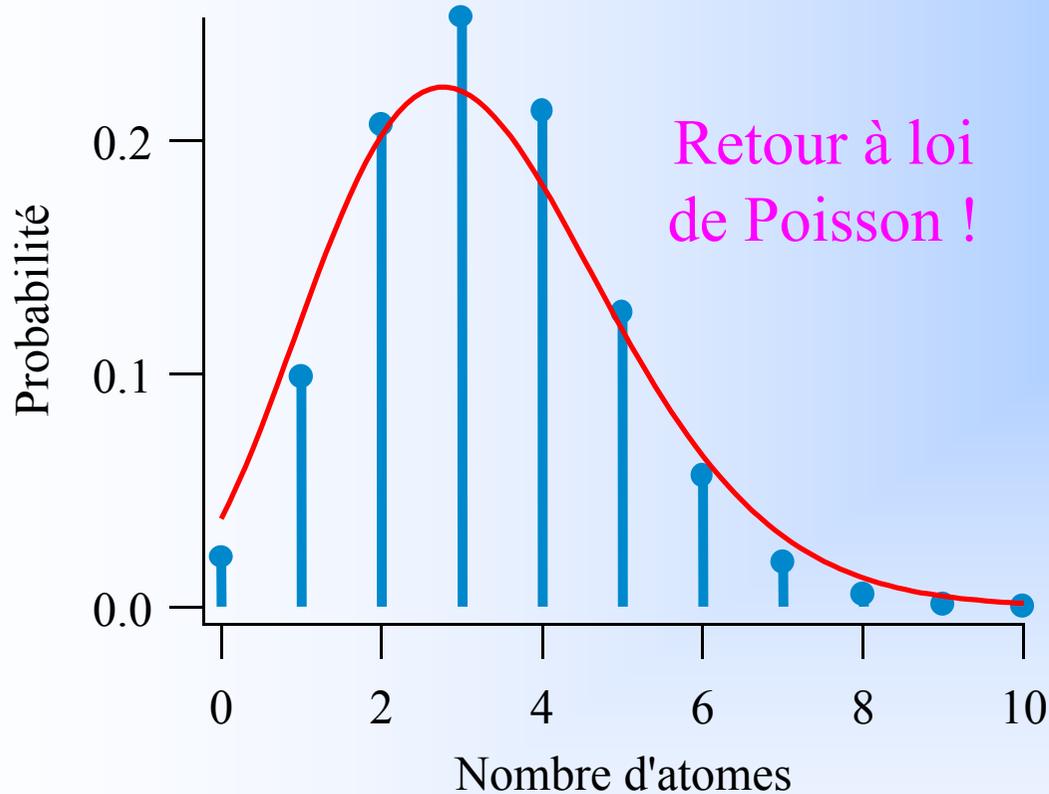


$$R_0 = 1000 \text{ Atomes/s}$$

- A faible taux de chargement  $R_0$  :**  
 $R_0 \ll \gamma$   
 le piège est rarement occupé
- A taux de chargement intermédiaire**  
 $\gamma \ll R_0 \ll \beta$   
 $\Rightarrow$  Le modèle simple s'applique  
 « Blocage collisionnel »
- A taux de chargement élevé :**  
 $R_0 \gg \beta$   
 Arrivées très rapide des atomes :  
 les collisions ne limitent plus  $N_{at}$

# Etude des collisions : Modélisation du chargement

Durée de vie d'une paire  $\ll$  Durée de vie intrinsèque



$$R_0 = 10000 \text{ Atomes/s}$$

- A faible taux de chargement  $R_0$  :**  
 $R_0 \ll \gamma$   
 le piège est rarement occupé
- A taux de chargement intermédiaire**  
 $\gamma \ll R_0 \ll \beta$   
 $\Rightarrow$  Le modèle simple s'applique  
 « Blocage collisionnel »
- A taux de chargement élevé :**  
 $R_0 \gg \beta$   
 Arrivées très rapide des atomes :  
 les collisions ne limitent plus  $N_{at}$

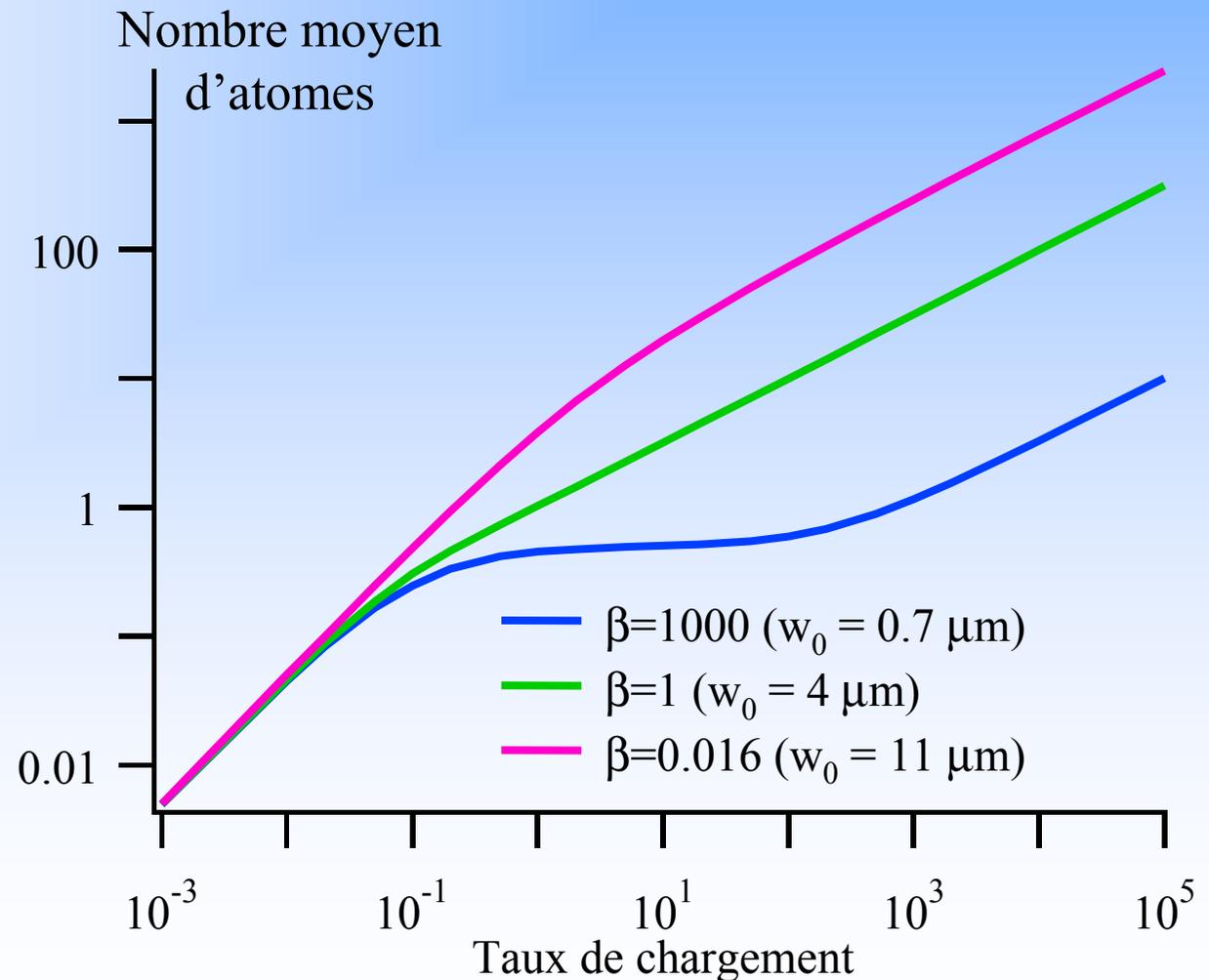
# Etude des collisions : Importance du volume

Le taux de collisions  $\beta$ , relatif au nombre d'atomes, est **inversement proportionnel au volume du piège**

En général  $\beta \ll \gamma$

« L'ouverture d'un gap »  
caractéristique du régime de blocage collisionnel impose  $\beta \gg \gamma$  !!

**Le blocage collisionnel est une propriété spécifique des pièges très petits**



# Double Piège

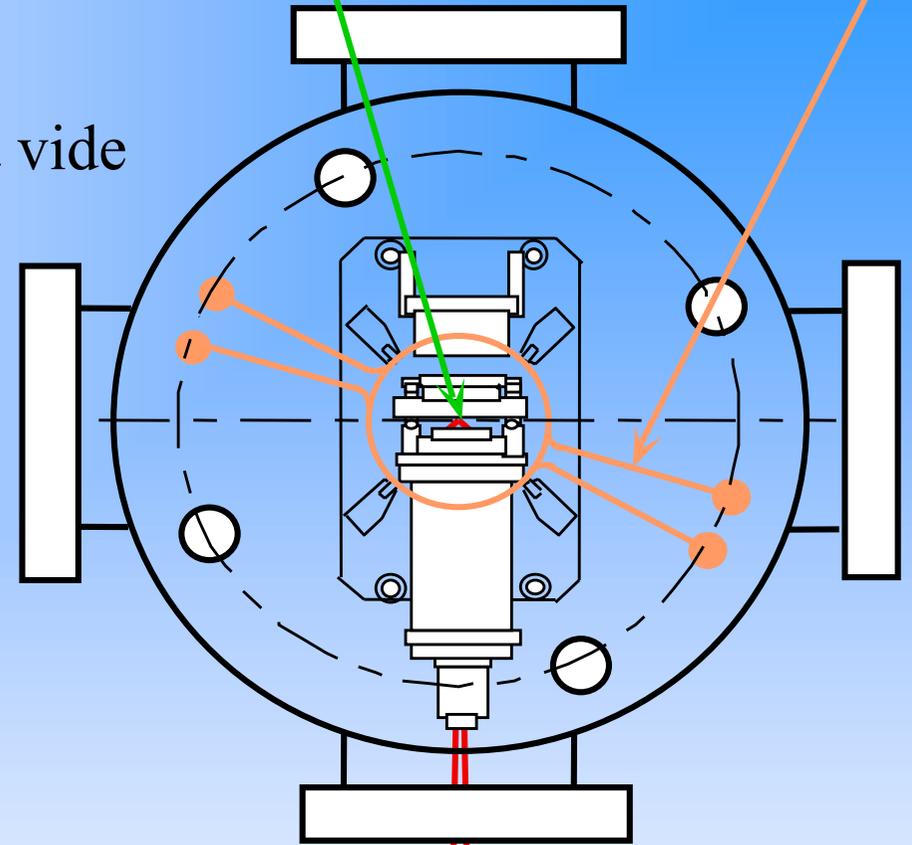
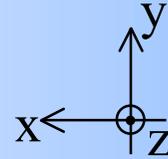
PMO & Piège Dipolaire

Bobines

Chambre à vide

Double piège pour deux atomes :

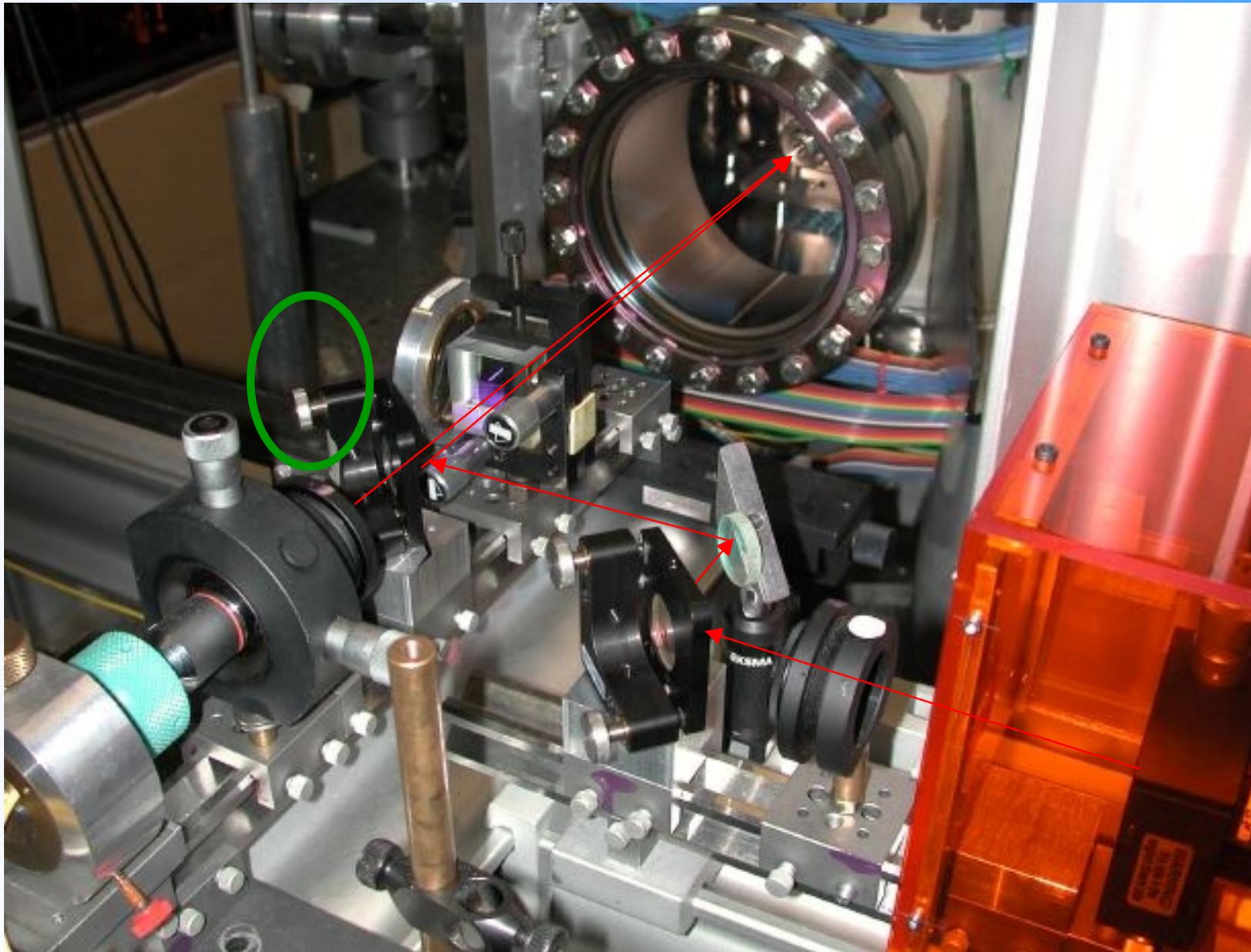
- Deuxième faisceau piège dans le même objectif
- Petit angle entre les deux faisceaux piégeants



Une simple vis de la lame séparatrice contrôle la distance entre les deux pièges.

Lame semi réfléchissante  
Contrôle de la distance

Deuxième faisceau piège



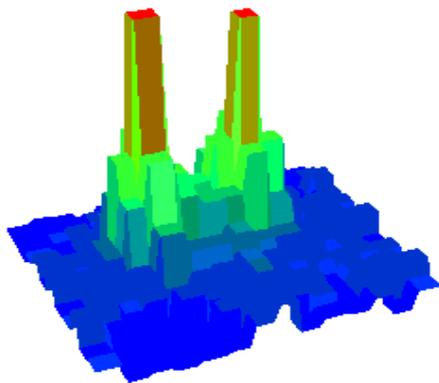
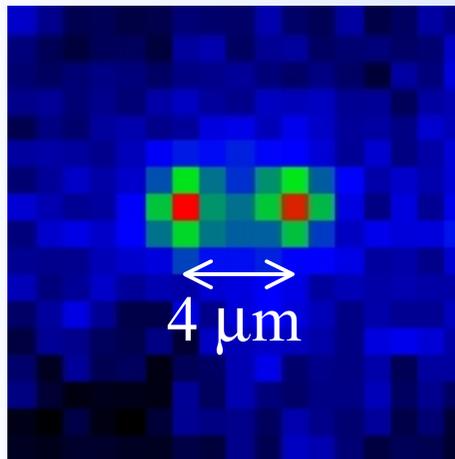
Sortie  
fibre  
optique

Sortie  
fibre  
optique

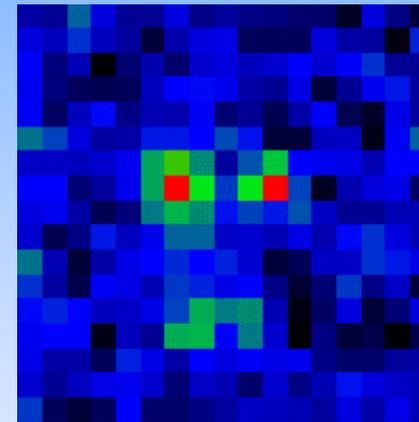
# Tweezers optiques

Un atome unique est piégé dans chaque site

La résolution de l'imagerie permet de résoudre des distances de l'ordre du micron.



En régime « Atomes uniques », on a quatre configurations possibles :



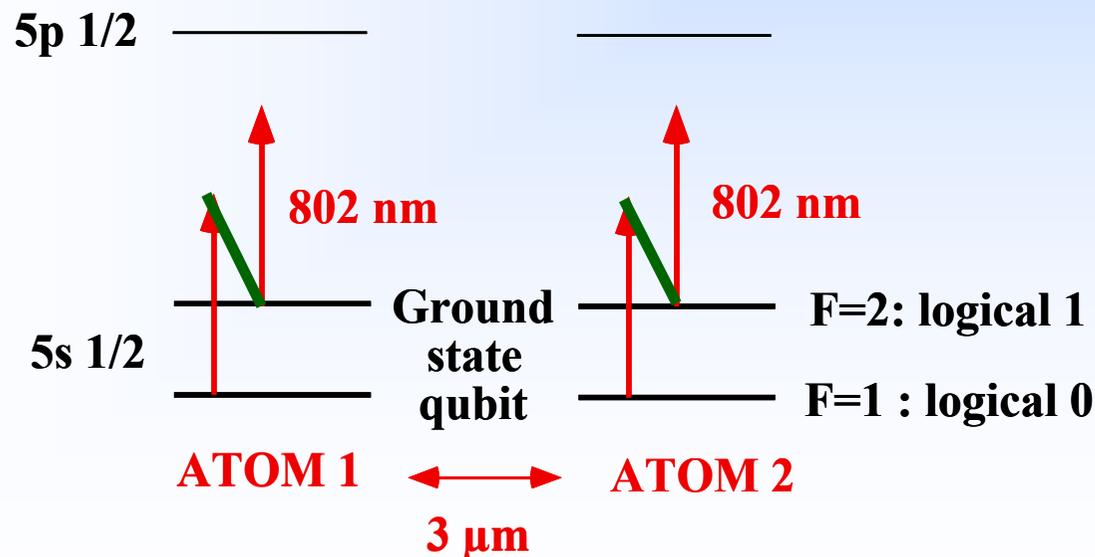
QuickTime™ et un décompresseur GIF sont requis pour visualiser cette image.

La distance entre les atomes est très facilement contrôlable.

# Couplage entre 2 atomes

Principe dérivé de la proposition de D. Jaksch et al.

« Fast Quantum gates for neutral atoms », Phys. Rev. Lett. 85, 2208-11 (2000)



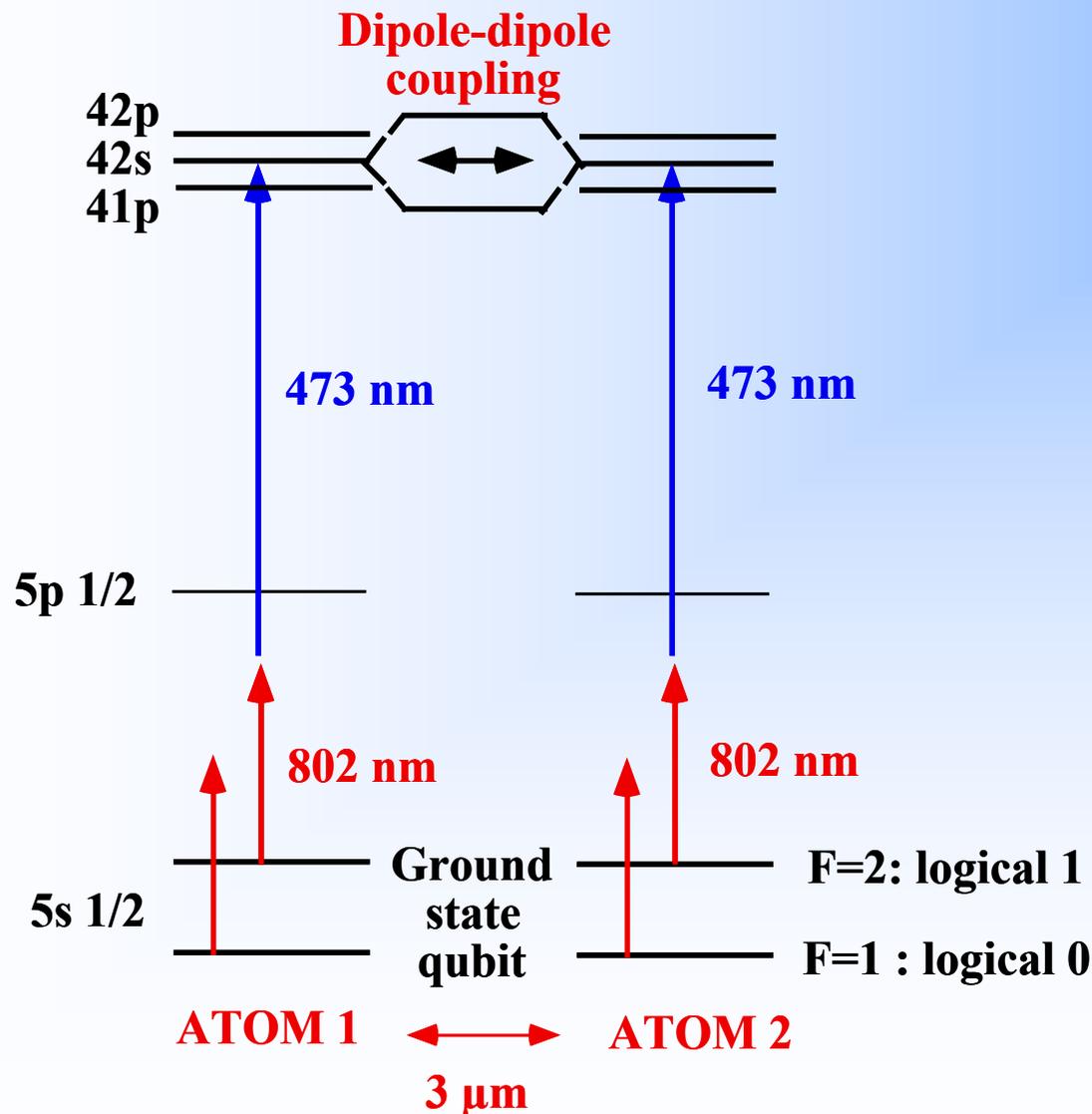
Opérations à un qubit :

Transitions Raman

# Couplage entre 2 atomes

Principe dérivé de la proposition de D. Jaksch et al.

« Fast Quantum gates for neutral atoms », Phys. Rev. Lett. 85, 2208-11 (2000)



**Opérations à 2 qubits :**

Excitation impulsionnelle à 2 photons d'un état de Rydberg ( $42s$ , couplé à  $41p$  et  $42p$ ) :

**Forte interaction dipole-dipole lorsque les deux atomes sont dans l'état excité**

Pour une impulsion  $2\pi$  de durée environ  $5 \mu\text{s}$  :

$$\begin{aligned}
 |00\rangle &\Rightarrow |00\rangle \\
 |01\rangle &\Rightarrow |01\rangle \\
 |10\rangle &\Rightarrow |10\rangle \\
 |11\rangle &\Rightarrow -|11\rangle
 \end{aligned}$$

**Porte de phase**

## Compromis (couplage en $1/r^3$ )...

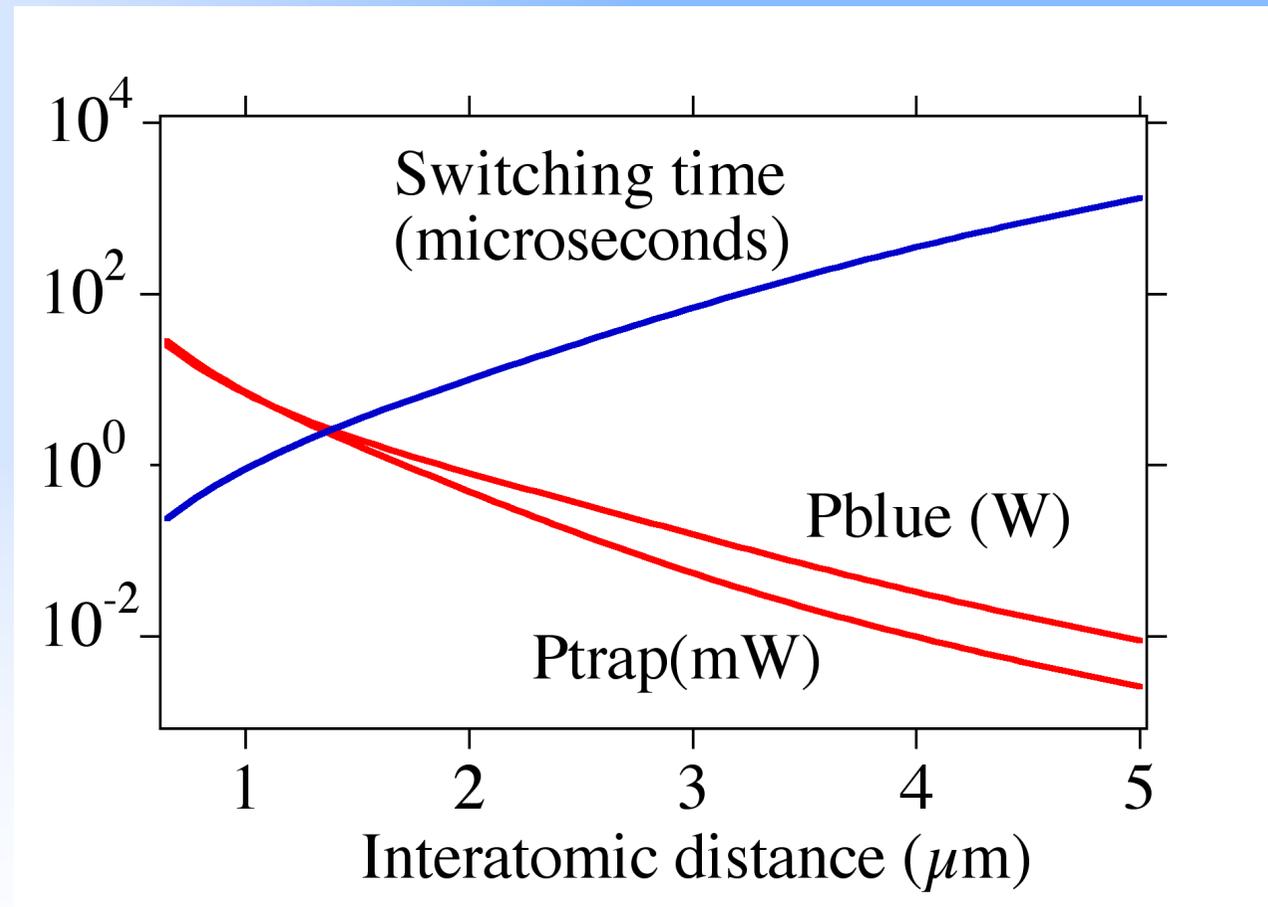
- |  |    |  |
|--|----|--|
| - Fort couplage dipole-dipole<br>$0.3 \mu\text{m}$<br>commutation en 10 ns                           | ou | adressage de chaque atome<br>$3 \mu\text{m}$<br>commutation en $10 \mu\text{s}$                              |
| - Excitation résonnante<br>petit $\Omega_{2\text{-photon}}$ (auto-tr.)<br>très sensible à $\Delta r$ | ou | excitation non-résonnante<br>grand $\Omega_{2\text{-photon}}$ (lasers ???)<br>pas trop sensible à $\Delta r$ |
| - Etats de très grand $n$ ( $\sim 50..$ )<br>grand dipole<br>champs thermique, parasites...          | ou | états de petit $n$ ( $\sim 20..$ )<br>petit dipole<br>moins sensibles aux perturbations                      |

**Temps de commutation** : diminue en augmentant simultanément l'intensité laser et le couplage dipole-dipole (en diminuant la distance)

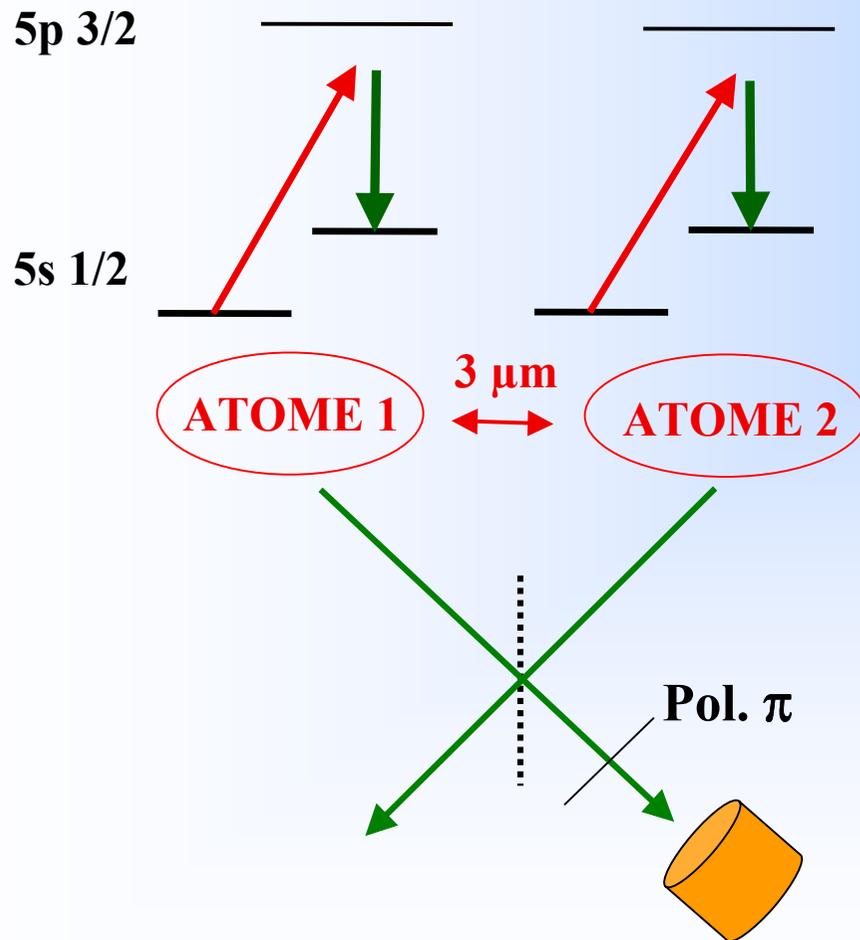
Conditions optimisées :

Distance  $1.3 \mu\text{m}$   
 $P_{\text{trap}} = 2 \text{ mW (c.w.)}$   
 $P_{\text{bleu}} = 2 \text{ W (pic)}$

**Temps de commutation : environ  $2 \mu\text{s}$**



**But : préparer une paire d'atomes intriqués**  
 proposition (P. Zoller et al.) : PRA 59, 1025 (1999)



**Flèches rouges : faisceau pompe**  
**Flèches vertes : photons spontanés**  
 ( polarisation  $\pi$  )

F=2: logical 1

F=1 : logical 0

**« Clic sur le détecteur » =  
 préparation de l'état intriqué :**

$$\{(\exp(i \varphi) | 1 0 \rangle + \exp(-i \varphi) | 0 1 \rangle) / \sqrt{2}$$

où  $\varphi$  depend de la différence de marche  
 dans l'interféromètre

## Résumé :

Piège dipolaire de très petit volume : quelques microns cube

Temps de piégeage assez long : typiquement 2 sec, jusqu'à 15 sec

Mesure du nombre d'atomes : de 1 à 10 suivant les paramètres.

Effet de « blocage collisionnel » : liés à la très petite taille du piège.

**=> Piégeage d'atomes individuels.**

## Perspectives :

Piège dipolaires multiples (facile ! double piège déjà réalisé)

Transitions Raman (refroidissement Raman, qubits)

Mise en œuvre d'un couplage atome-atome (direct ou conditionnel) ...

Utilisation de « nano-nuages » ?

# Micro-piège dipolaire

**Post-doc disponible immédiatement !**

email : [philippe.grangier@iota.u-psud.fr](mailto:philippe.grangier@iota.u-psud.fr)

**EC Support :**

**IST/FET/QIPC Project « QUBITS »**

**IHP/RTN Project « QUEST »**

**« Quantum Entangled States of Trapped particles »**

**<http://www.iota.u-psud.fr/~quest/>**

# Autres idées de couplage atome-atome

\* Couplage dipole-dipole résonnant :  
( énergie de couplage :  $\hbar\Gamma/(k r)^3$  ) :

G. Brennen, I. Deutsch et P. Jessen, PRA **61**, 062309 (2000).  
Contrôle de la position relative des atomes très critique

\* Couplage assisté par cavité :  
( efficace à grande distance entre atomes)

S. B. Zheng and G.C. Guo, Phys. Rev. Lett. 85, 2392 (2000)  
S. Osnaghi et al., Phys. Rev. Lett. 87, 037902 (2001)  
Cavité optique en régime de couplage fort

\* Contrôle des collisions à grande distance...