

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

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...**

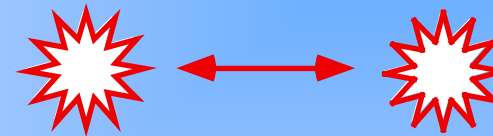
Comment réaliser physiquement les qubits ?

*** 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 : (ce séminaire)

- * Piéger des atomes neutres individuels à des positions bien définies, les refroidir et les détecter**
[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

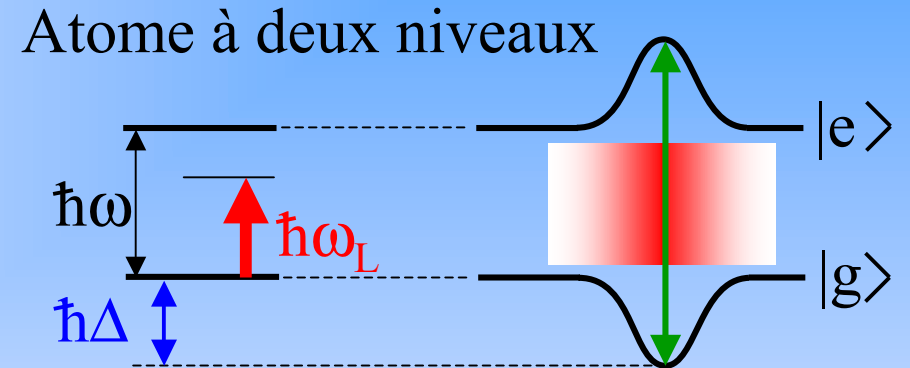
Atome à deux niveaux, de **largeur naturelle** Γ , dans un champ laser d'intensité I et de **fréquence** ω_L , avec un **désaccord rouge** : $\delta = \omega_L - \omega < 0$.

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

Pour de **grands désaccords** δ :

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

- où :
- I_{sat} est l'**intensité de saturation**.
 - Δ le **déplacement lumineux**



Atome dans le
 champ laser de
 fréquence ω_L

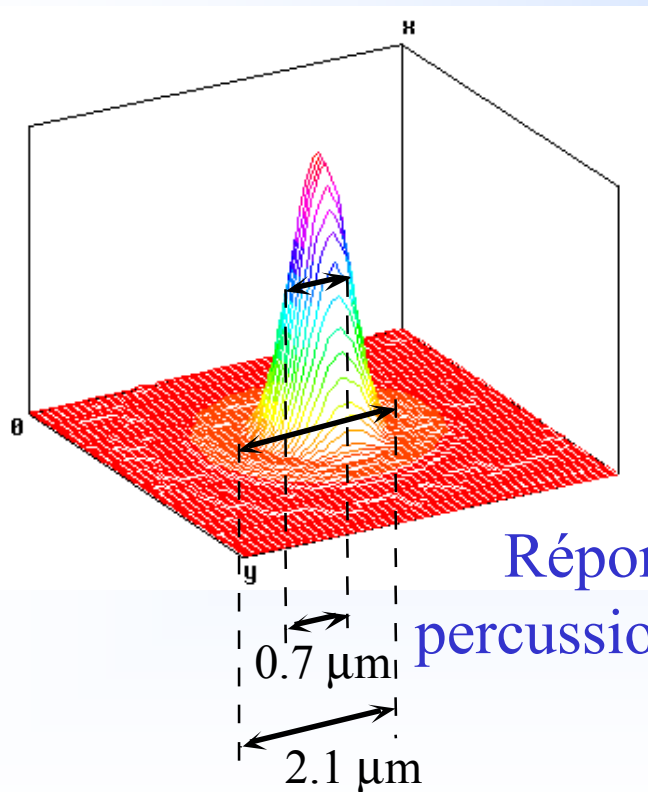
Les atomes sont piégés dans les régions de grande intensité.
 La fréquence de la transition est décalée vers le bleu.

Le Microscope de Grande OUverture : MIGOU

Caractéristiques de l'objectif :

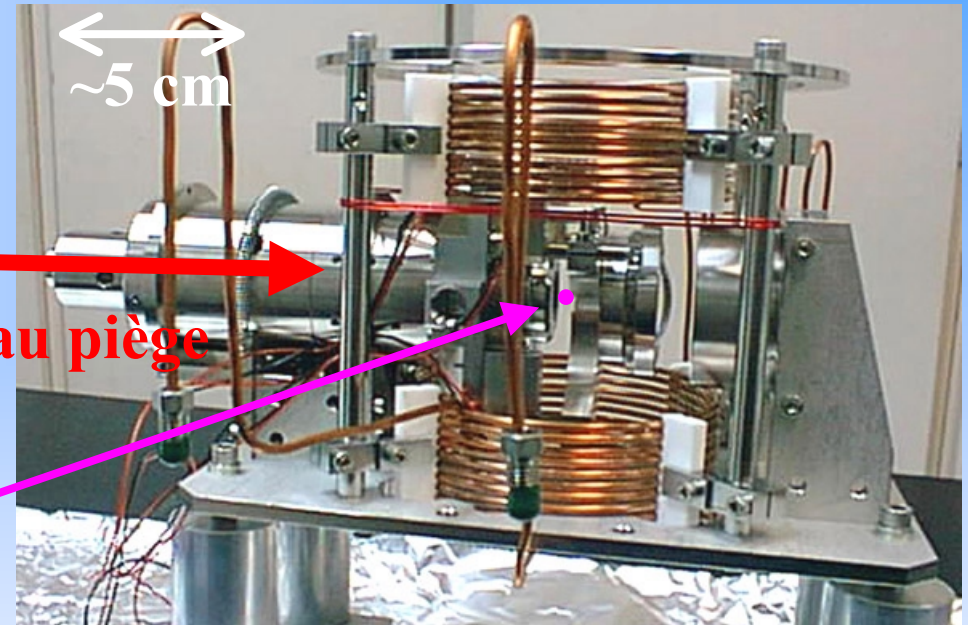
- Grande ouverture numérique : $NA=0,7$
- Limité par la diffraction, $w_0 < 1 \mu\text{m}$
- Grande frontale : 1 cm

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.

Quelques caractéristiques expérimentales

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

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

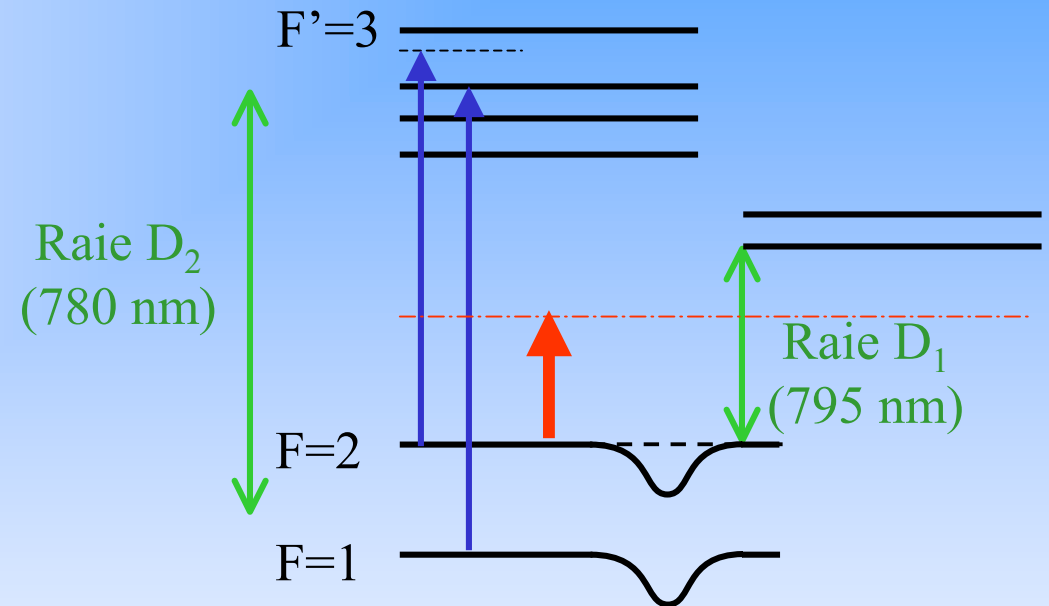
Puissance $P =$ quelques mW

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

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

sur le rouge de la raie D_1
du 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

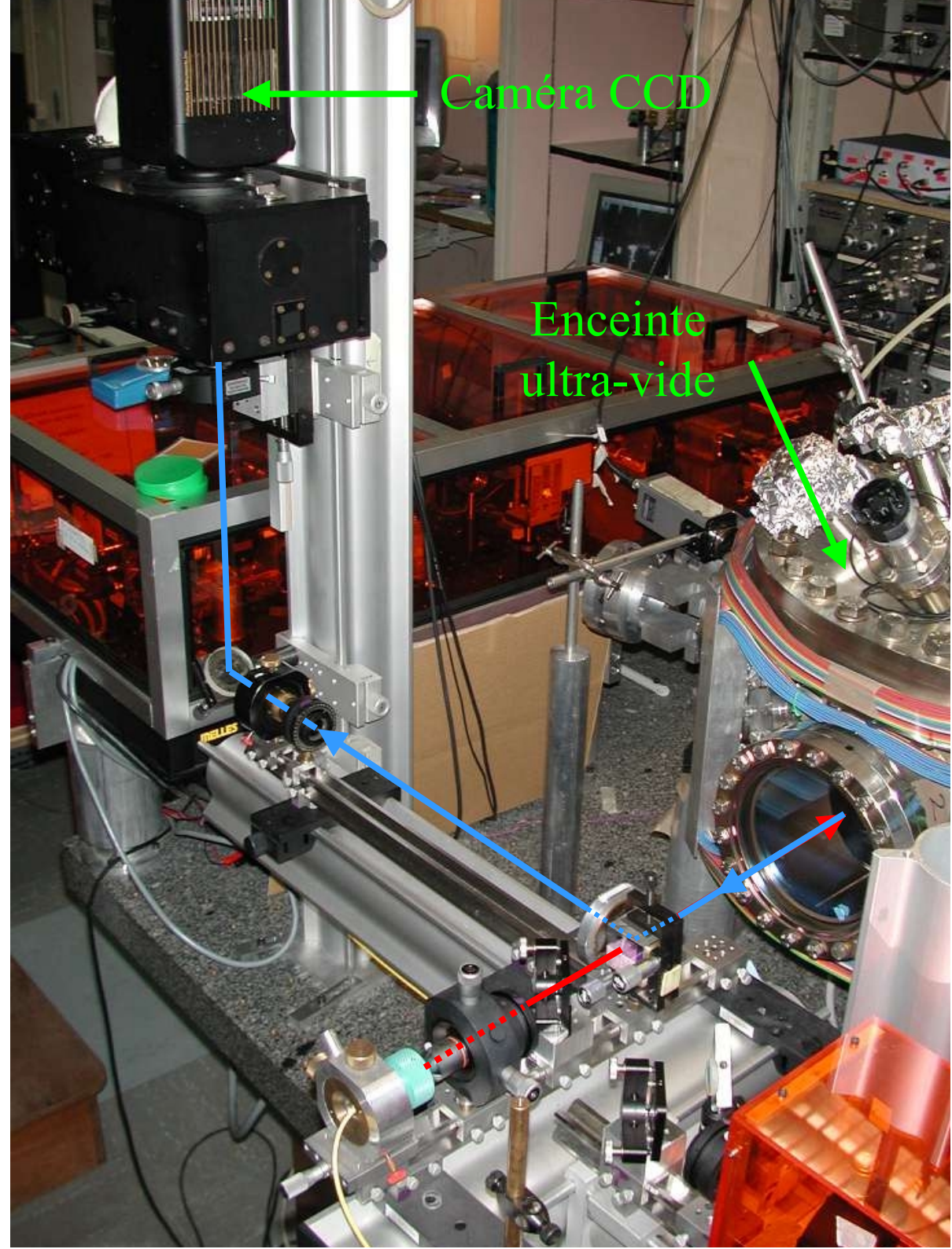
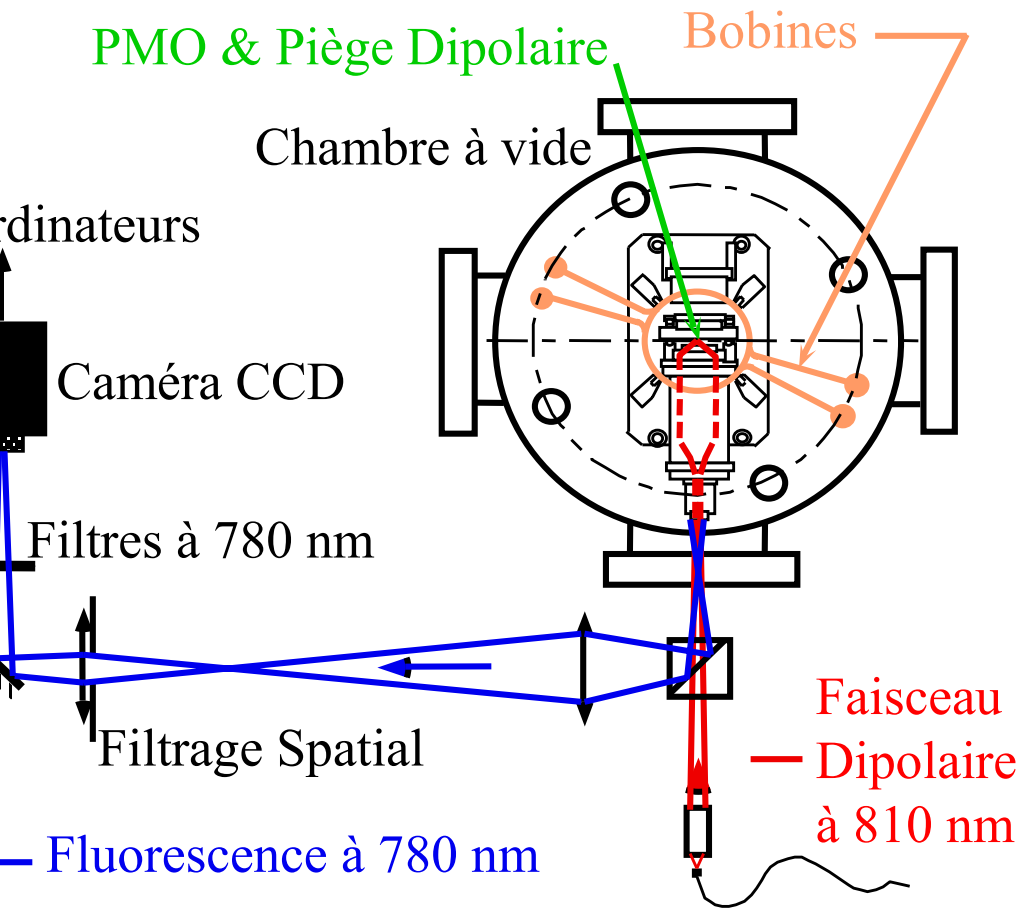
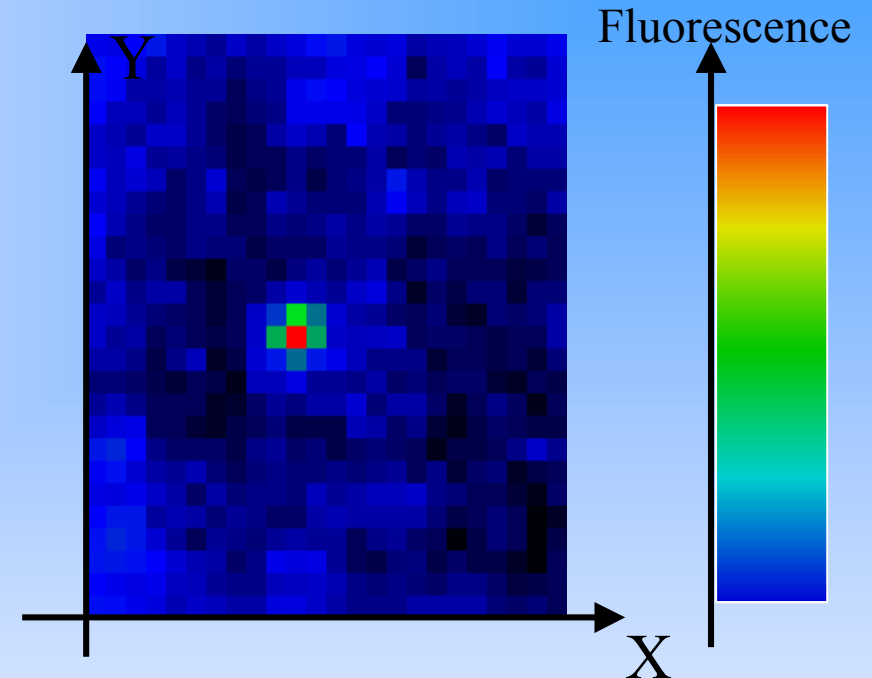
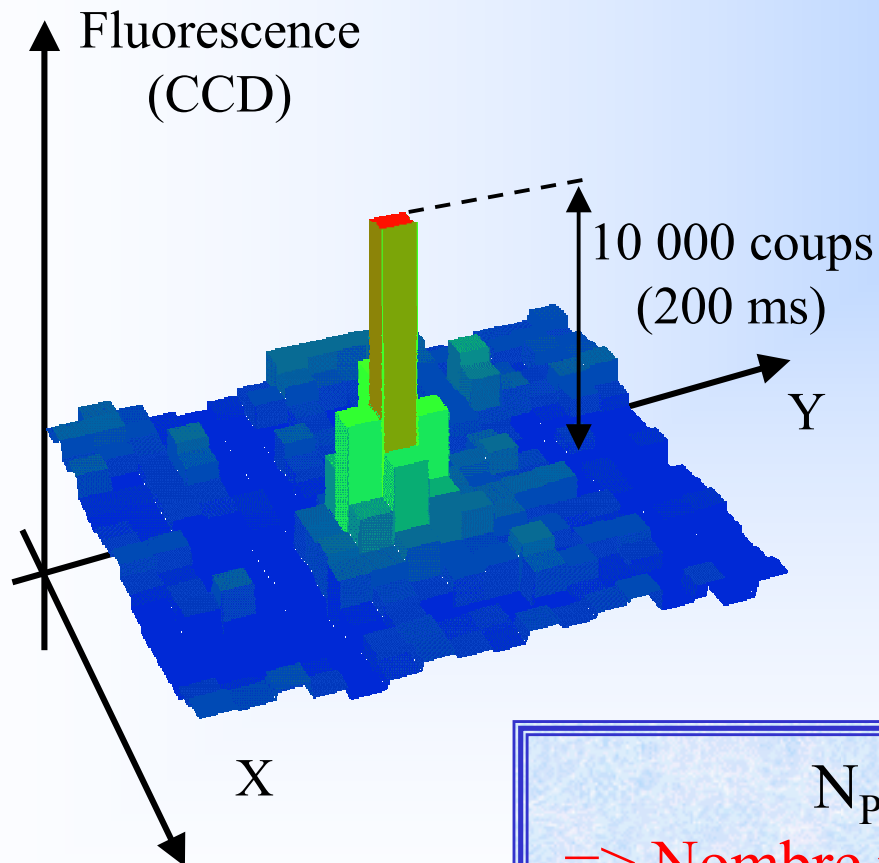


Image du piège dipolaire sur la caméra CCD

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



Echelle du système d'imagerie :

1 pixel = 1 μm

Temps d'intégration :

$\tau = 200 \text{ ms}$

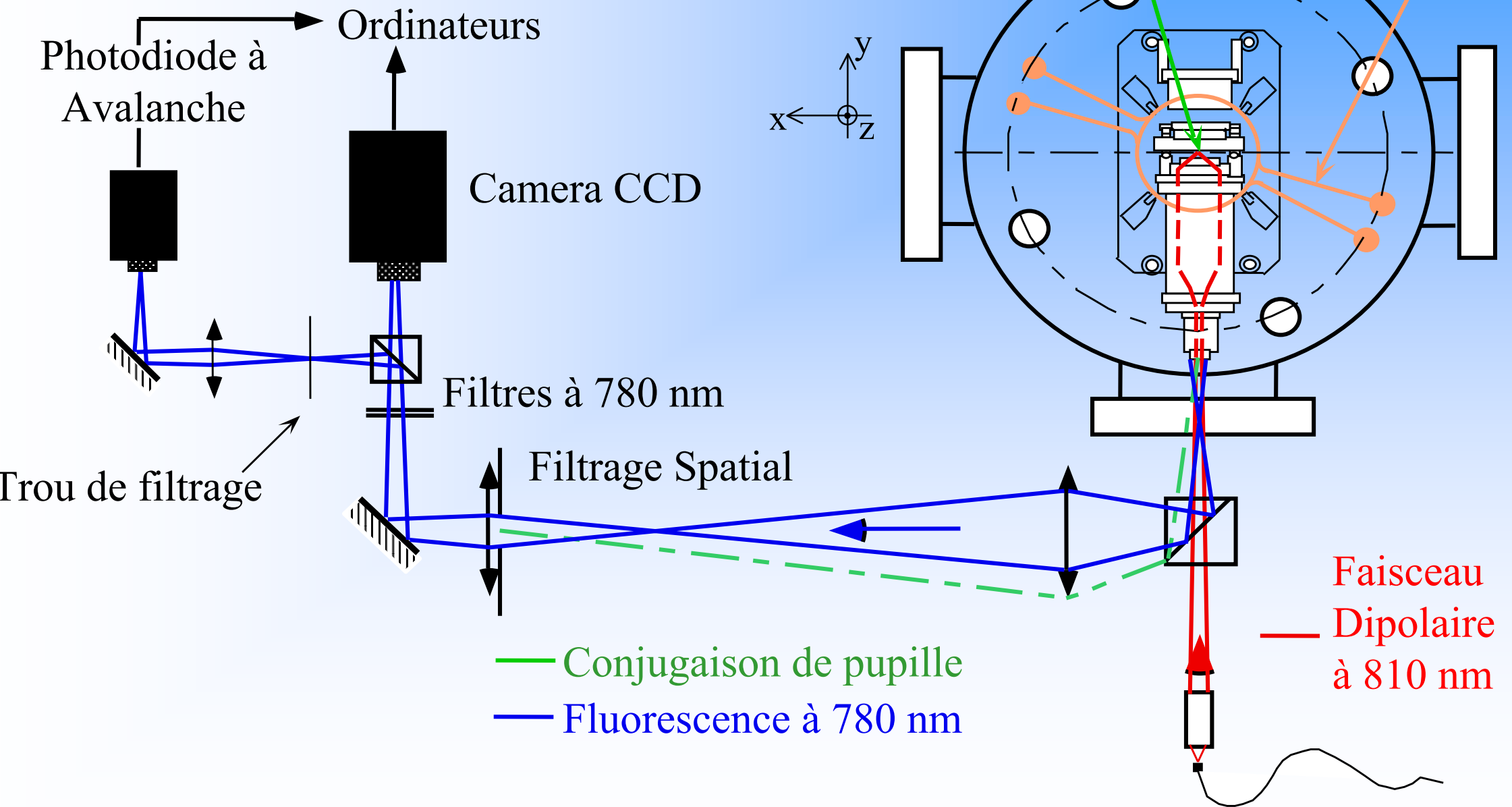
$N_{\text{Pic}} = 10000 \text{ Coups en } 200 \text{ ms}$
 \Rightarrow Nombre moyen d'atomes de l'ordre de 1 à 10.

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

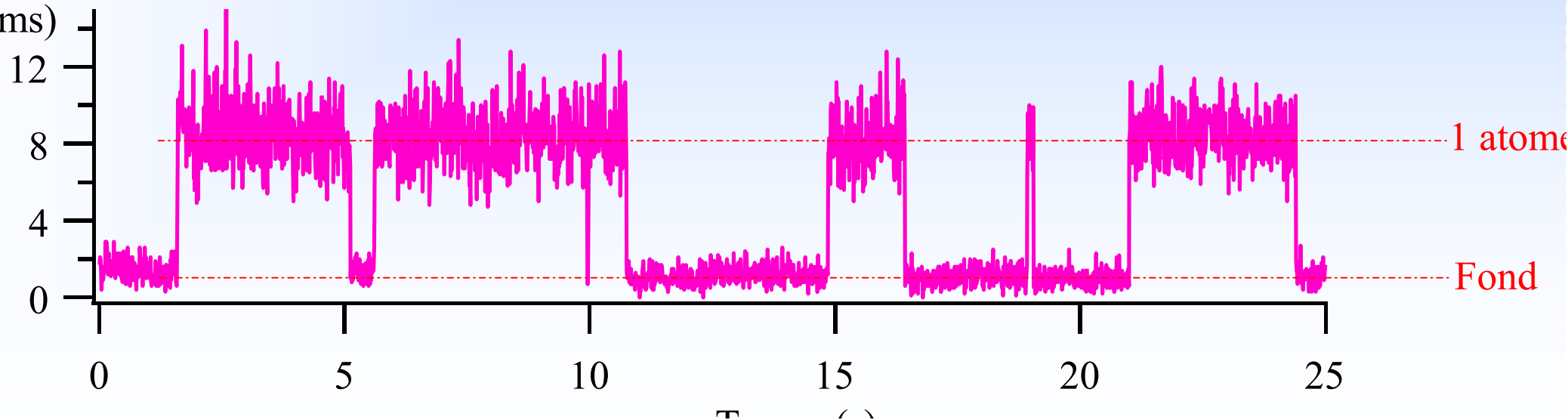
Augmentation de la durée des fenêtres de comptage => plus de photons par atome

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

Signature de la présence d'un atome unique

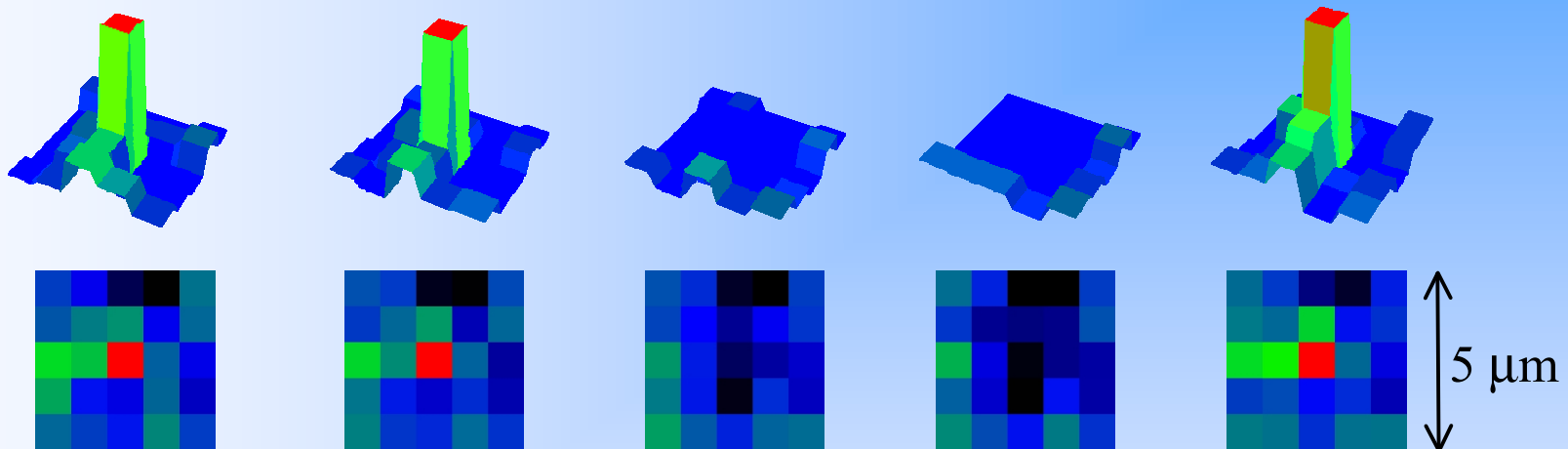
taux de comptage

(coups/10ms)

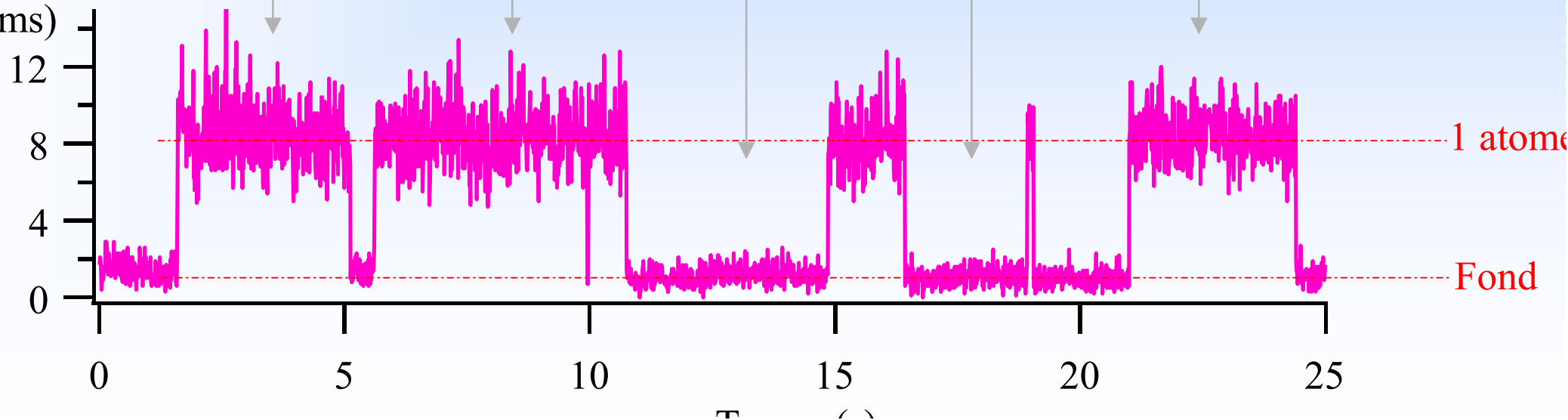


Régime à un seul atome

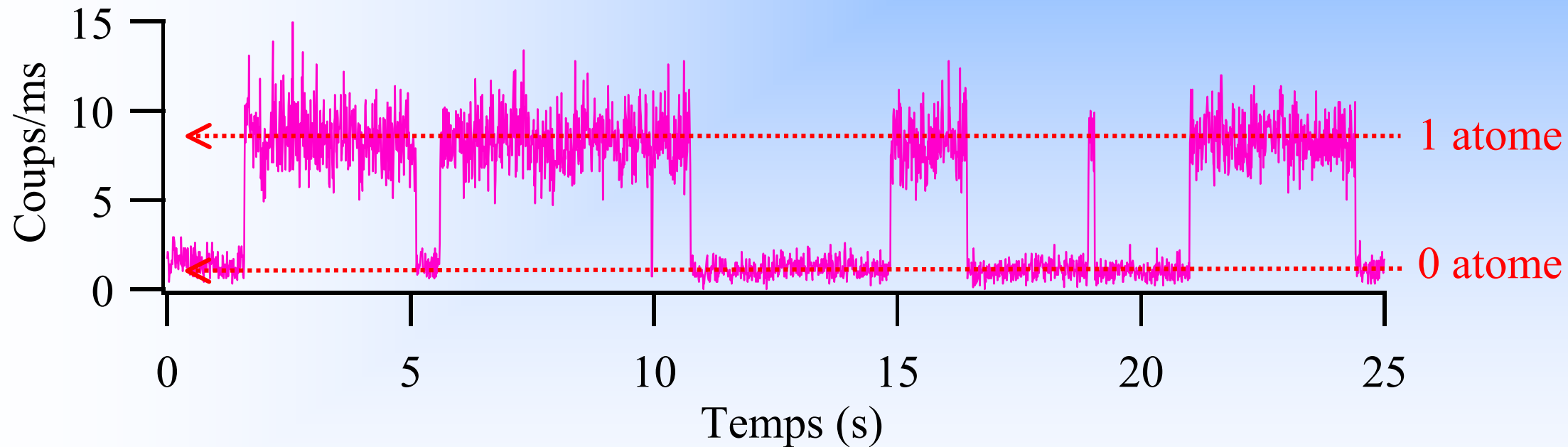
Images sur la
camera CCD



Niveaux de comptage
(clics/10ms)



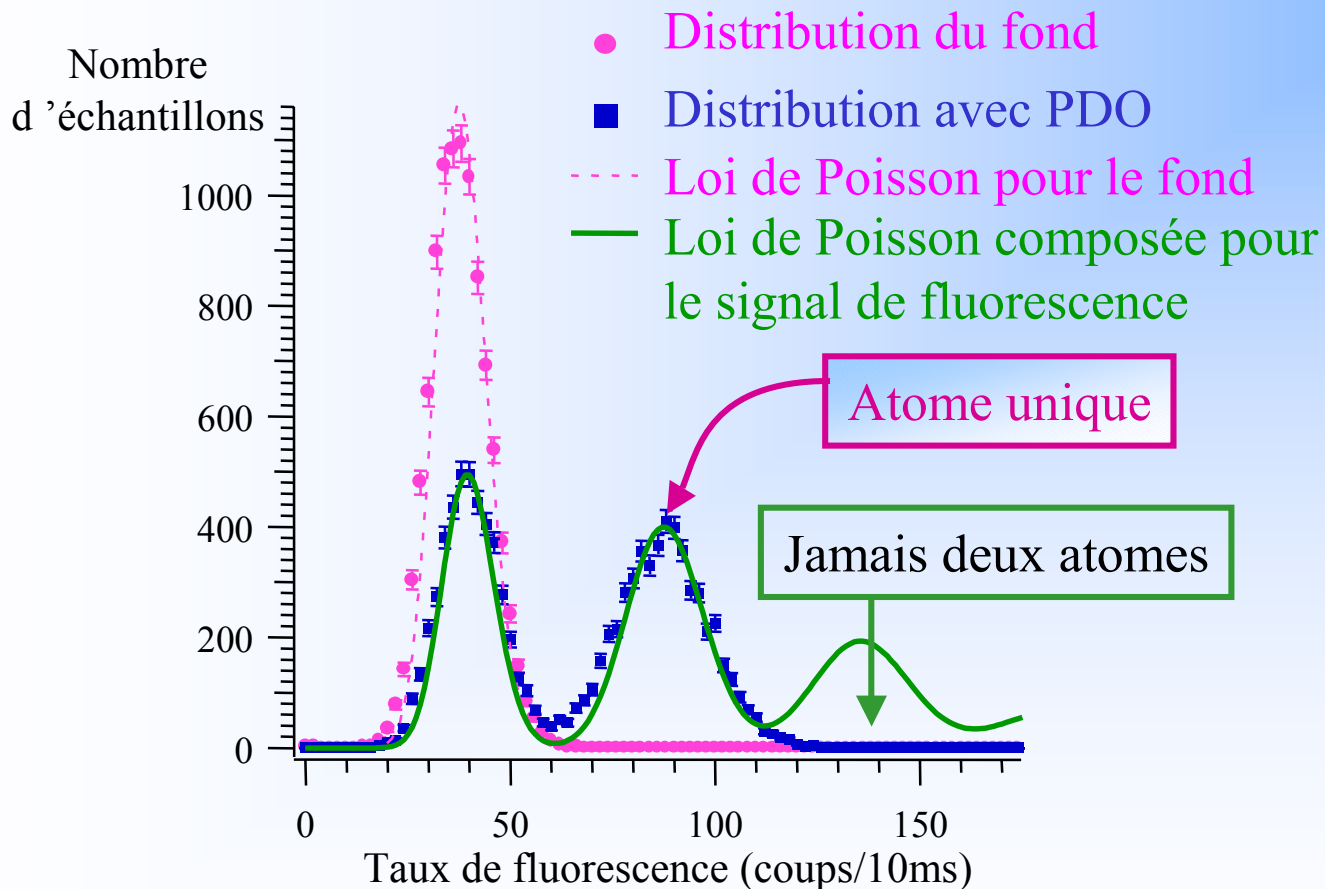
**L 'histogramme des niveaux de fluorescence levels
donne la statistique du nombre d 'atomes piégés**



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

Statistique du nombre d'atomes piégés

Champ magnétique du PMO coupé en permanence => Mélasse

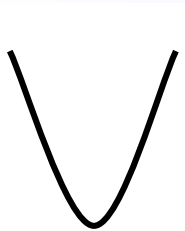


La statistique des atomes piégés n'est pas du tout une loi de Poisson.

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**

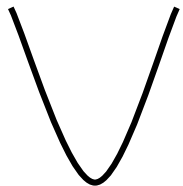


Les atomes arrivent avec un **taux de chargement** : R_0 .

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

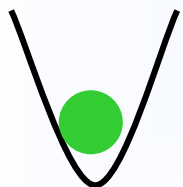
Quand un atome arrive dans un piège déjà occupé : **les deux atomes s'échappent**

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 $\Rightarrow \gamma dt$

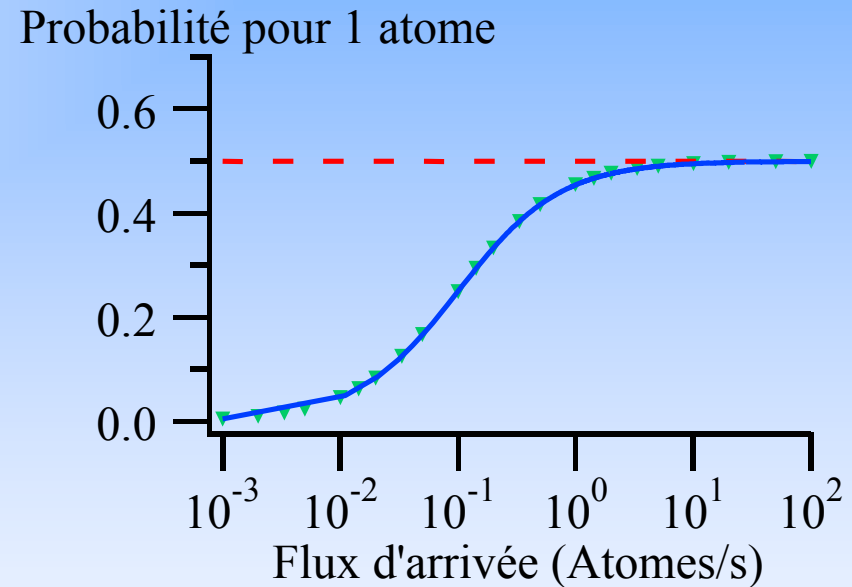
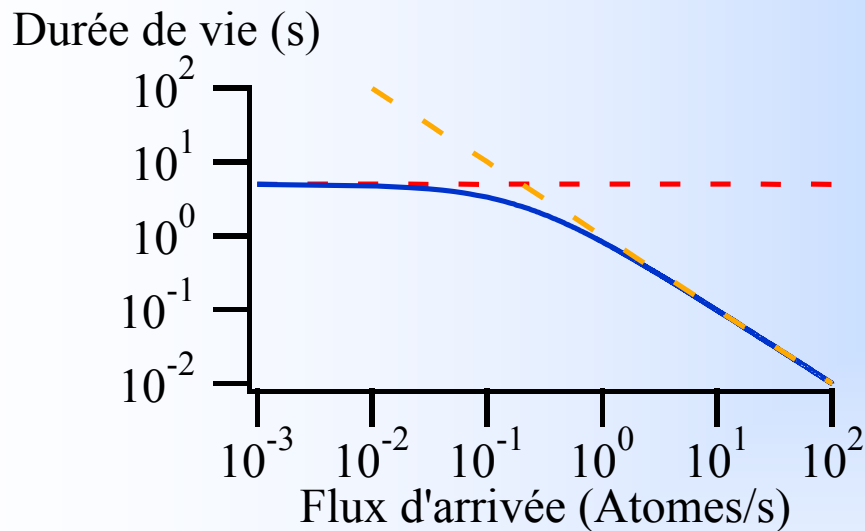
- arrivée d'un atome $\Rightarrow R_0 dt$

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 : $\tau(R_0) = \frac{1}{R_0 + \gamma}$

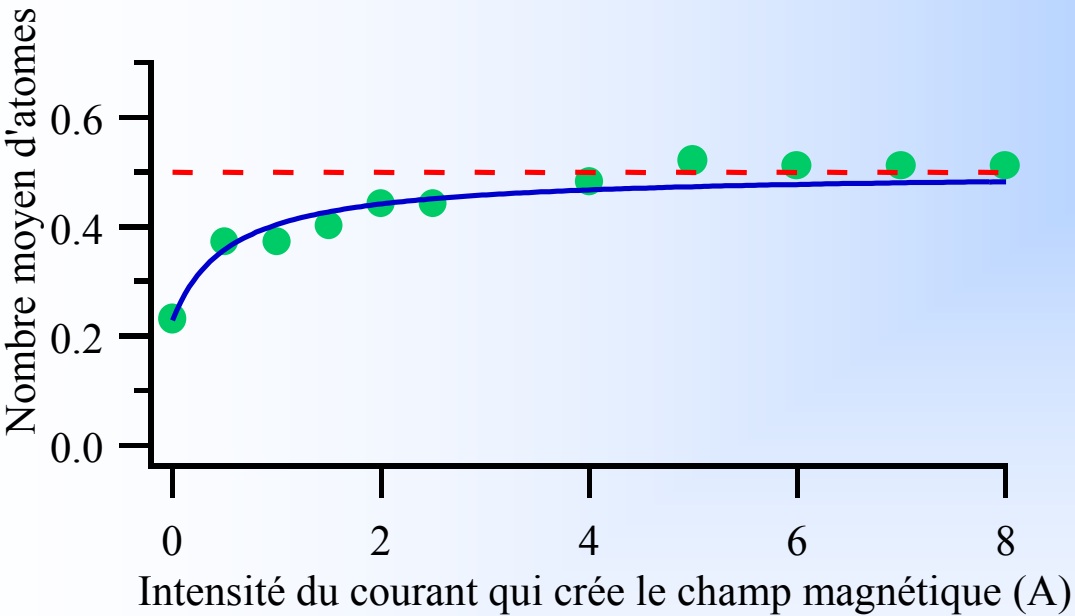
Taux d'occupation : $P_1(R_0) = \frac{1}{2 + \frac{\gamma}{R_0}}$

Quand on augmente R_0 : la durée de vie diminue

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

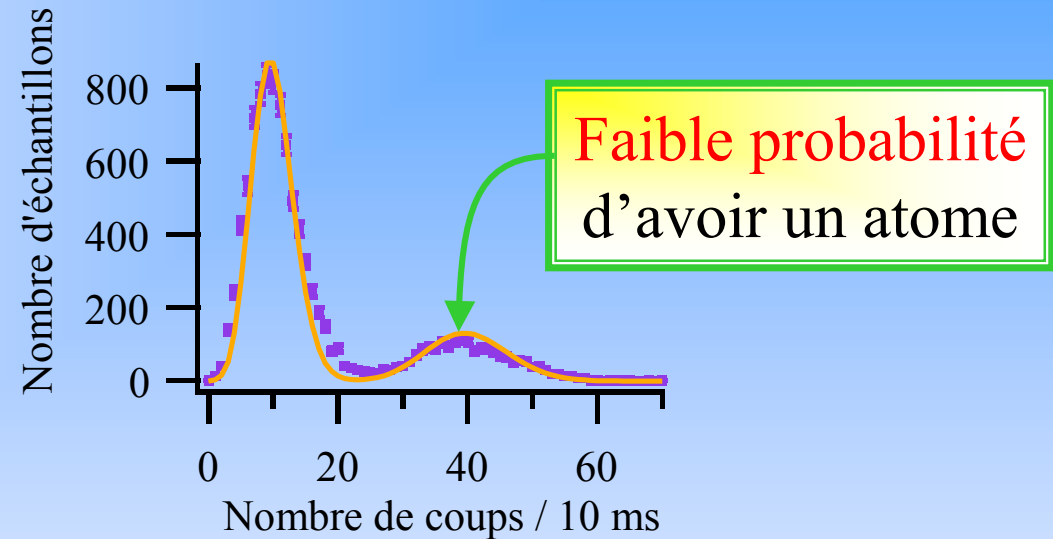
Limitation du nombre d'atomes : Taux d'occupation

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

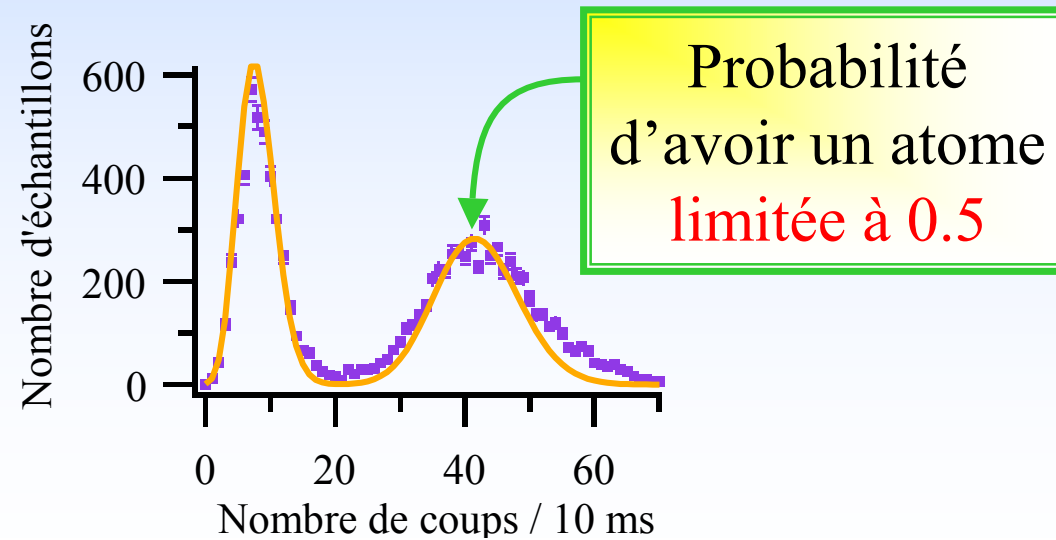


La probabilité de piéger un atome unique **augmente**, mais **ne dépasse jamais 50 %**

A faible taux de chargement :

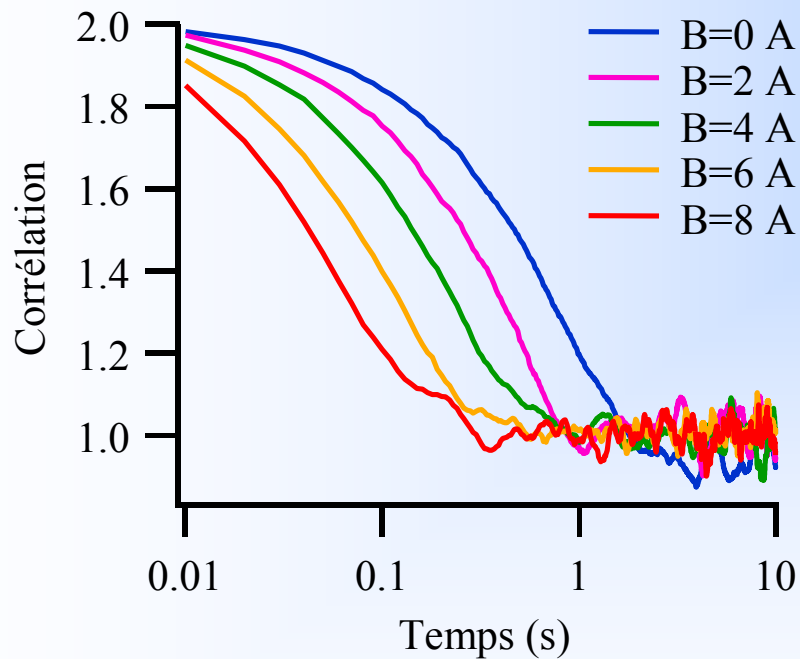


A plus fort taux de chargement :

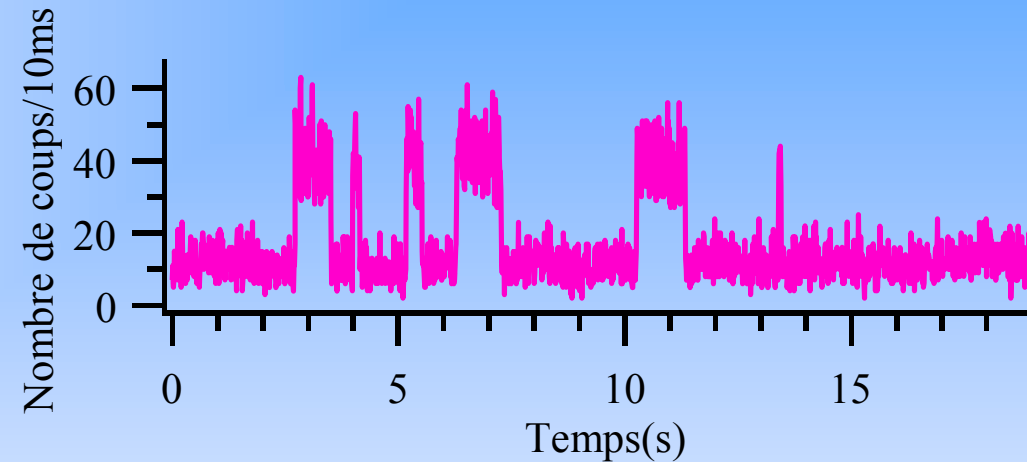


Limitation du nombre d'atomes : Durée de vie

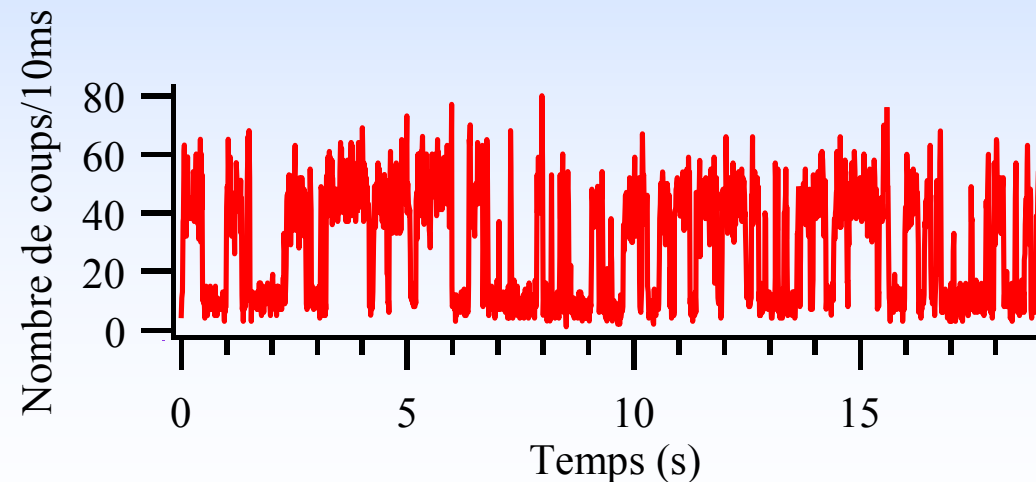
Contrôle du taux de chargement par la densité du piège magnéto-optique :
 => Variation du champ magnétique



A faible taux de chargement :



A plus fort taux de chargement :



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

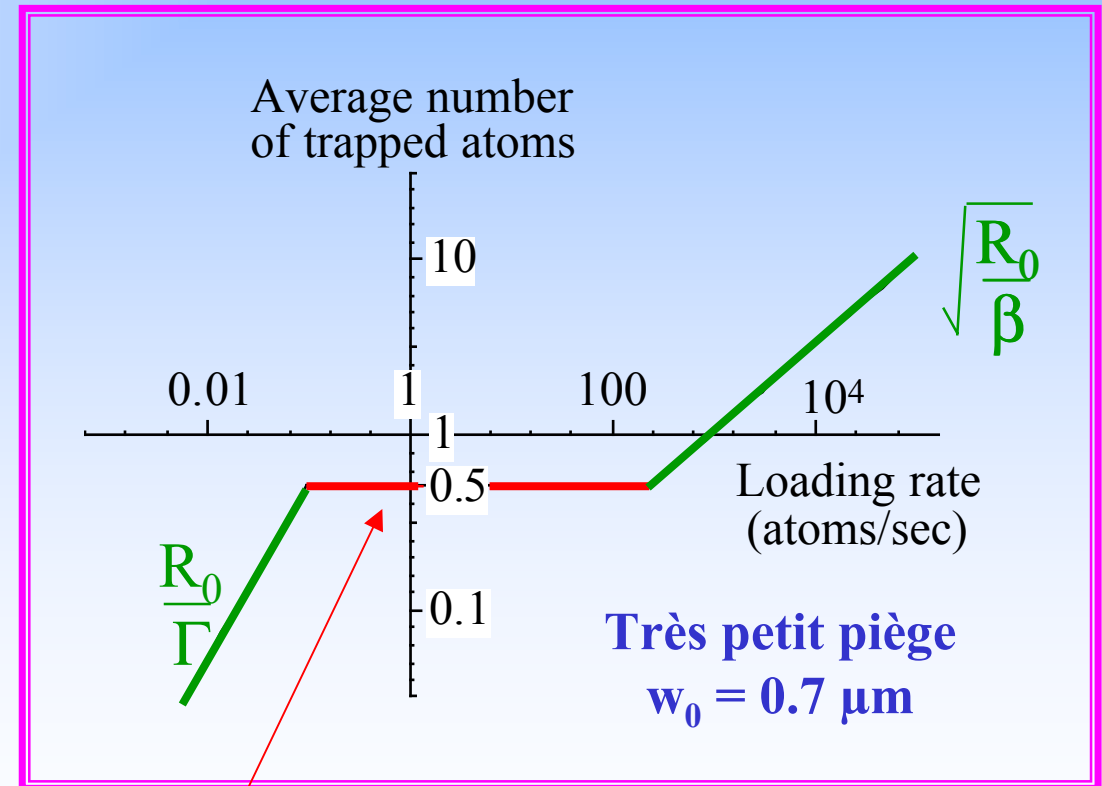
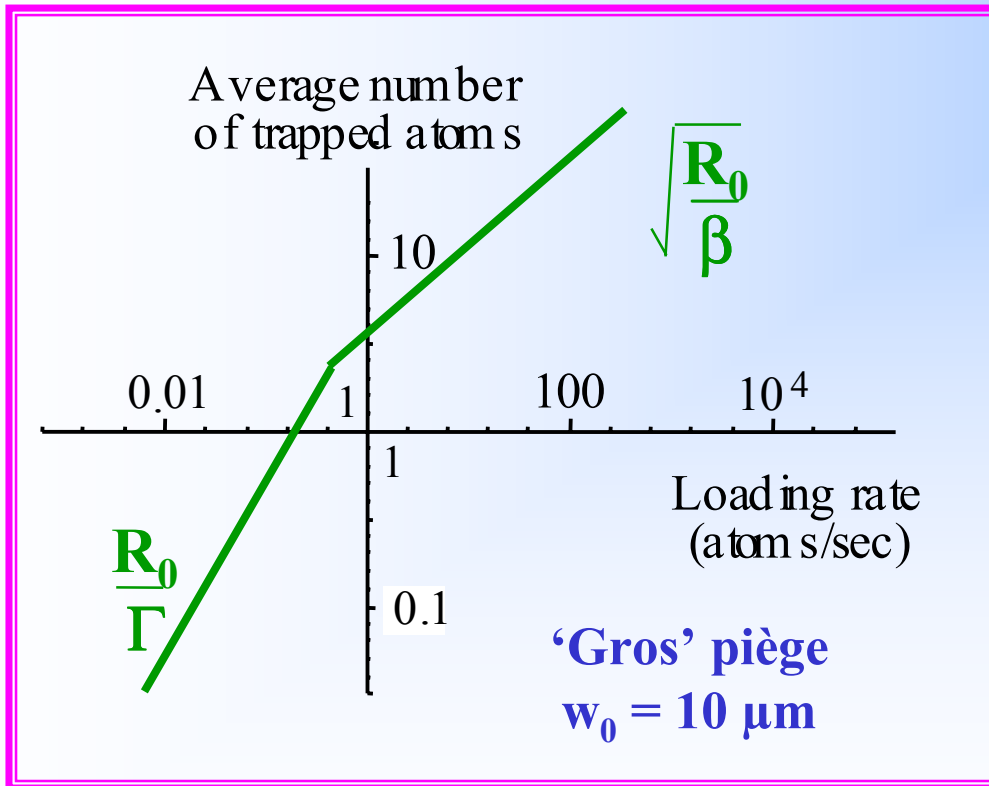
Equation régissant le nombre N d'atomes piégés:

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

R_0 : taux de chargement

Γ : pertes (0.2 s^{-1})

β : collisions (cf. Wieman)



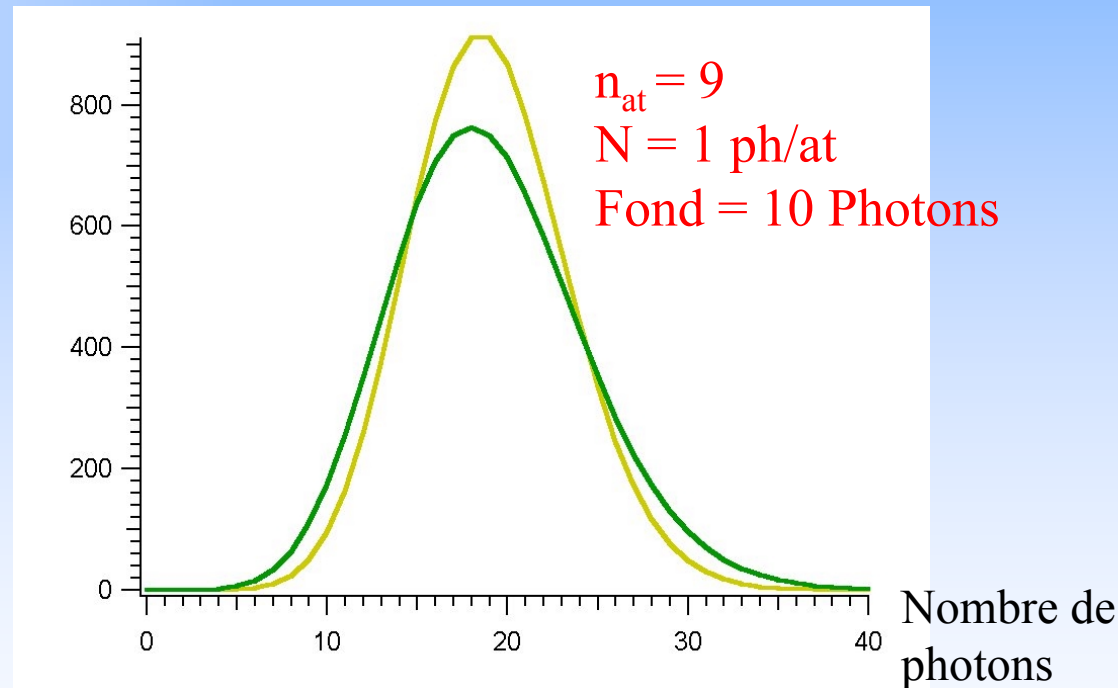
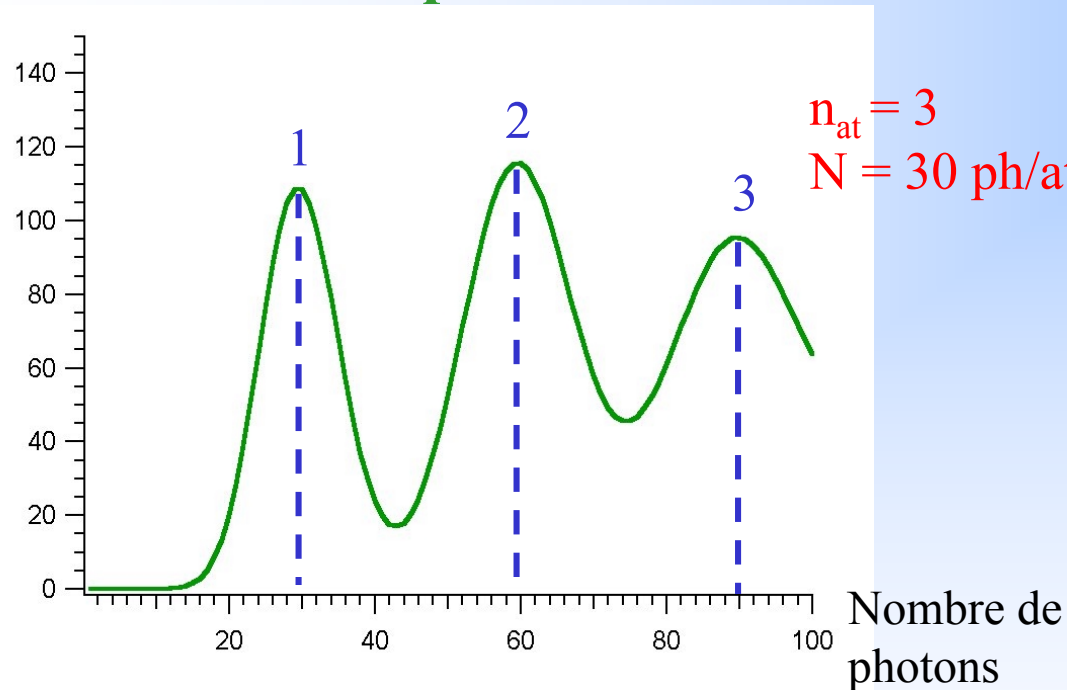
Blocage collisionnel : propriété spécifique des très petits pièges ($< 4 \mu\text{m}$) !

Résultats expérimentaux : taux de chargement élevé

Nombre fixe de n_{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

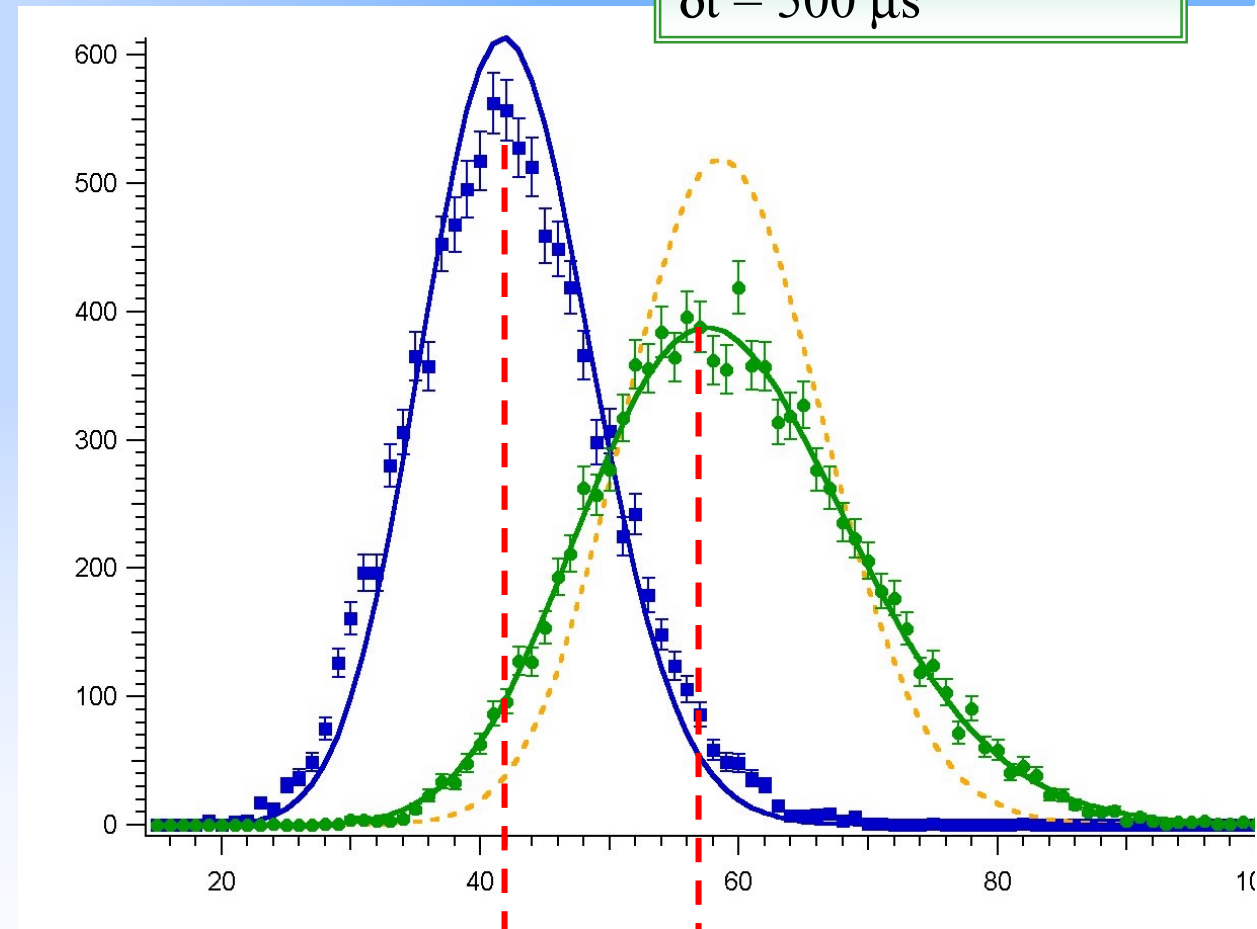
Désaccord avec une loi de Poisson

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

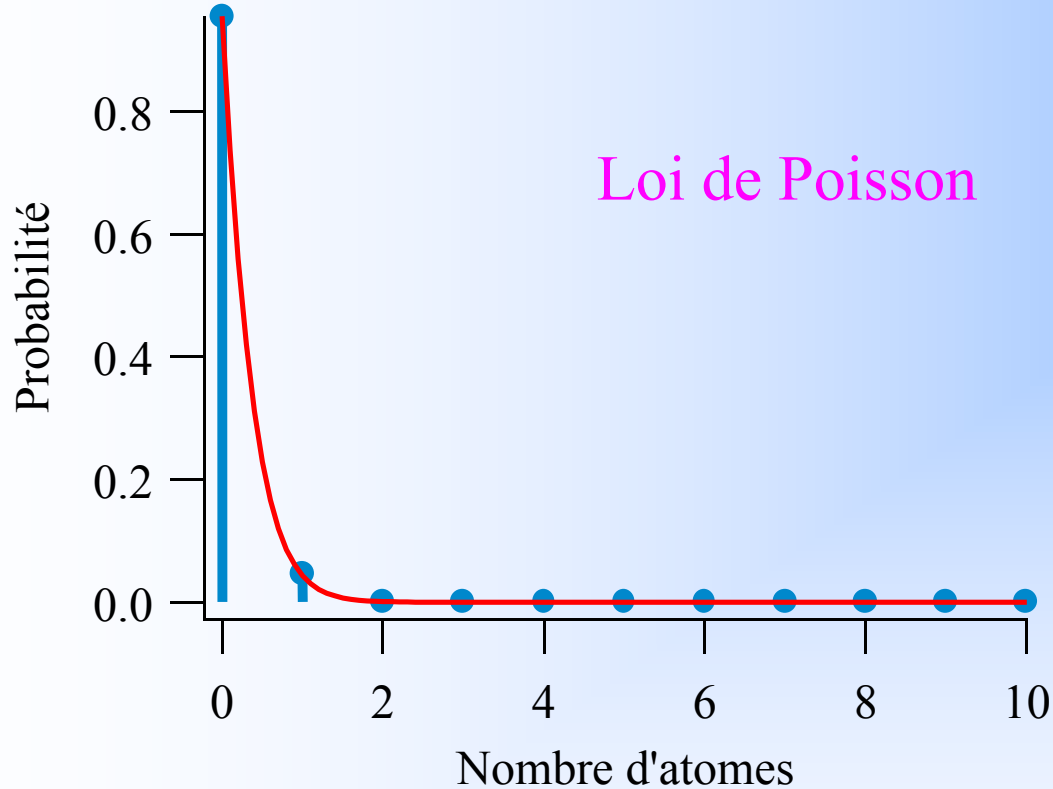
Plus de 10 atomes dans le piège !

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



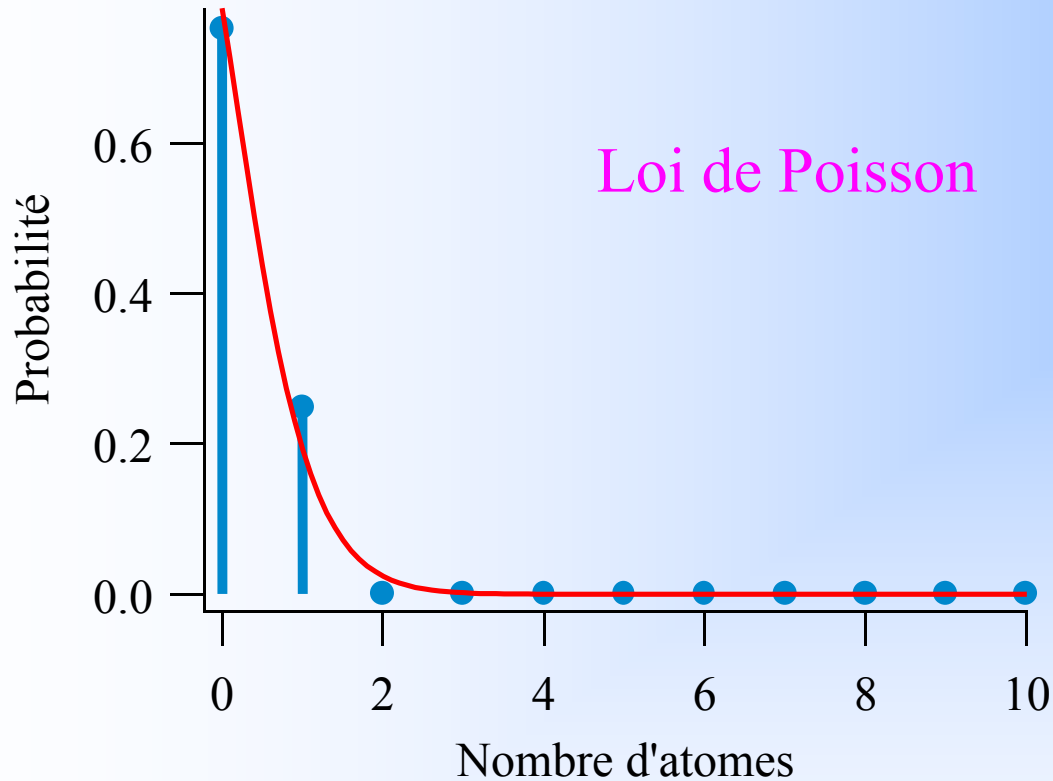
$$R_0 = 0.01 \text{ Atome/s}$$

- **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 γ)
 - * 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

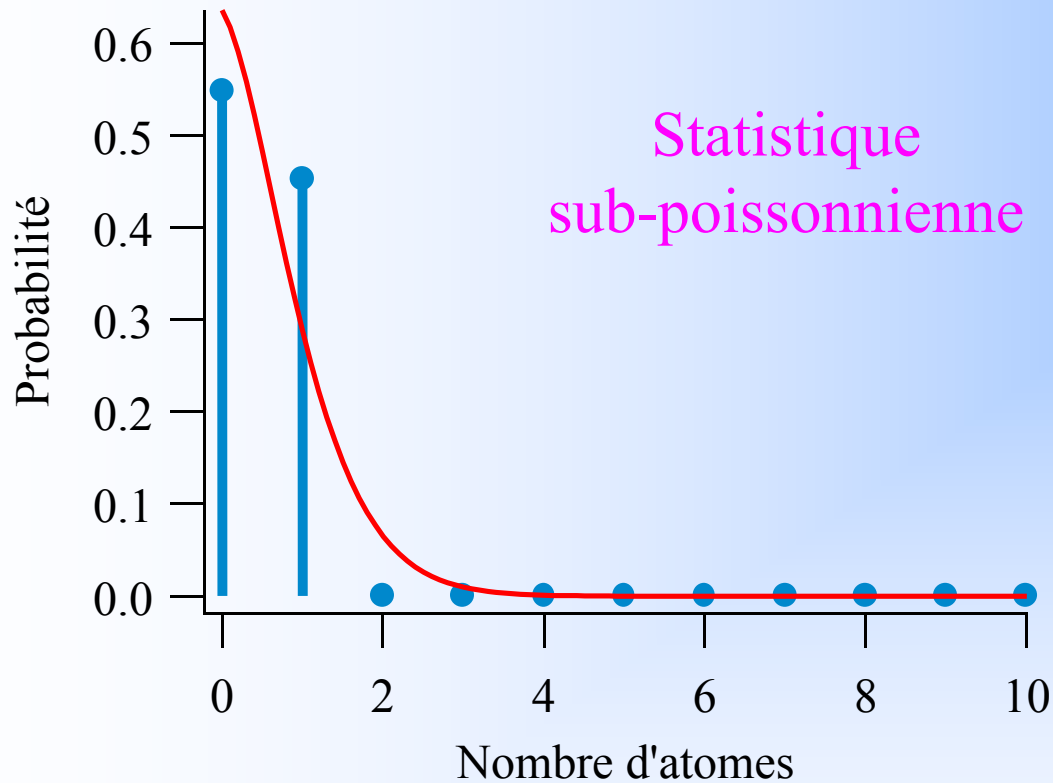


$$R_0 = 0.1 \text{ Atome/s}$$

- **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

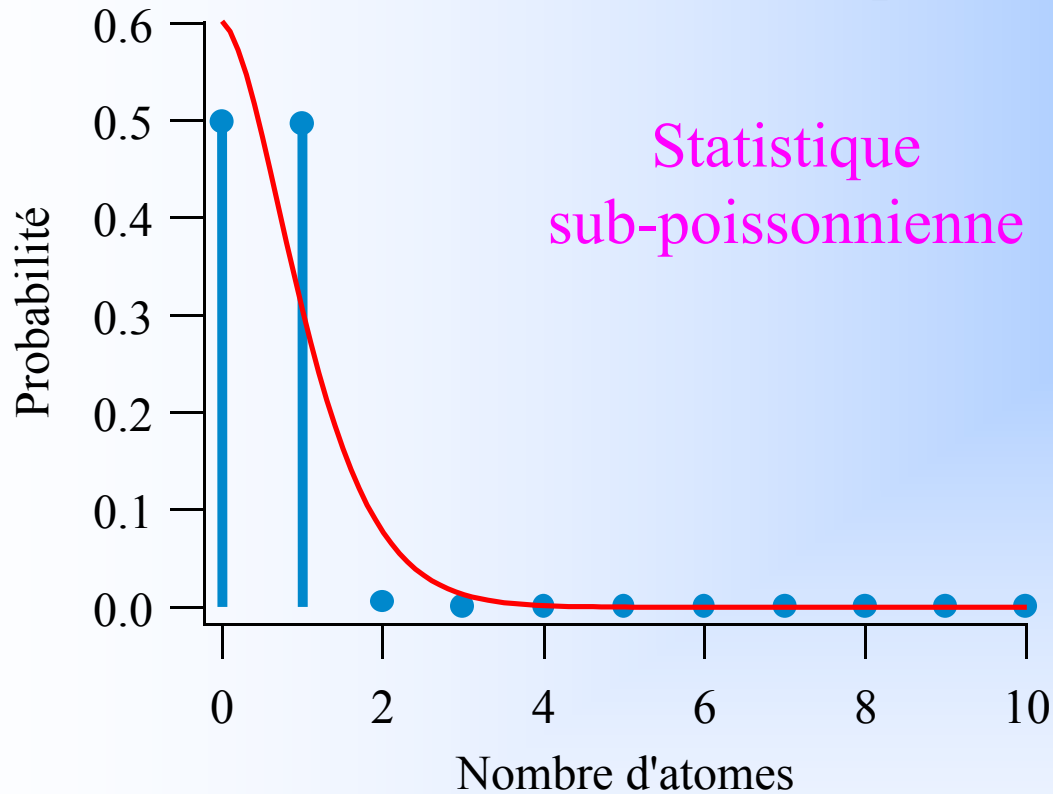


$$R_0 = 1 \text{ Atome/s}$$

- 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

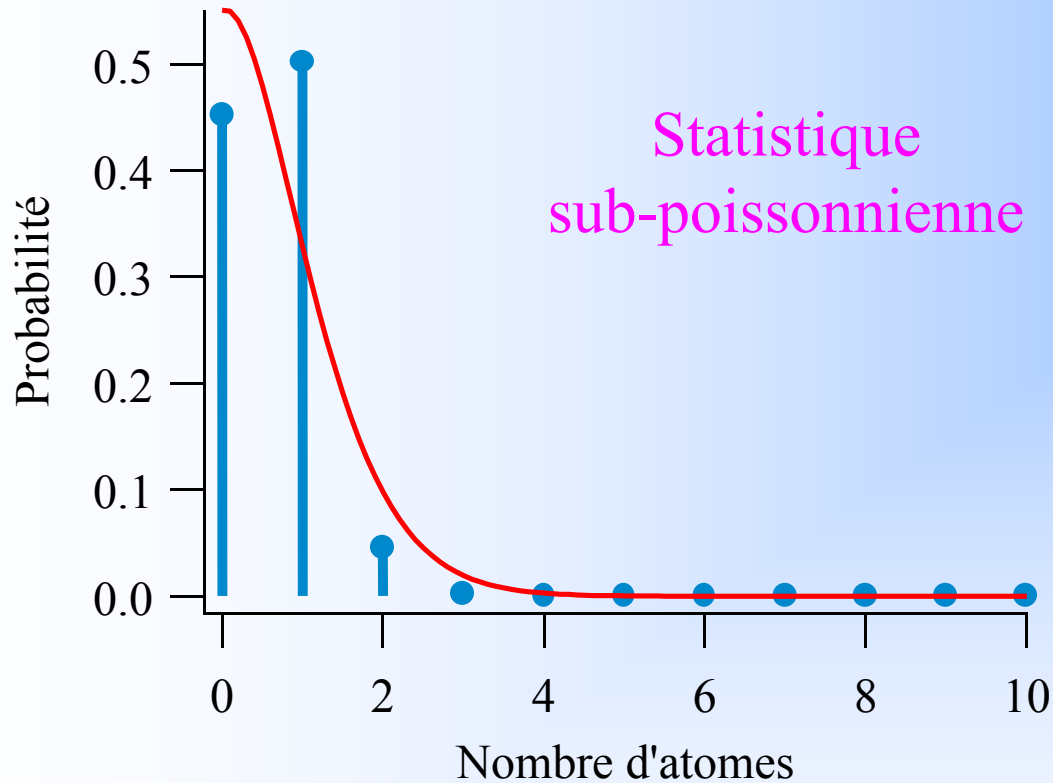


$$R_0 = 10 \text{ Atomes/s}$$

- 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

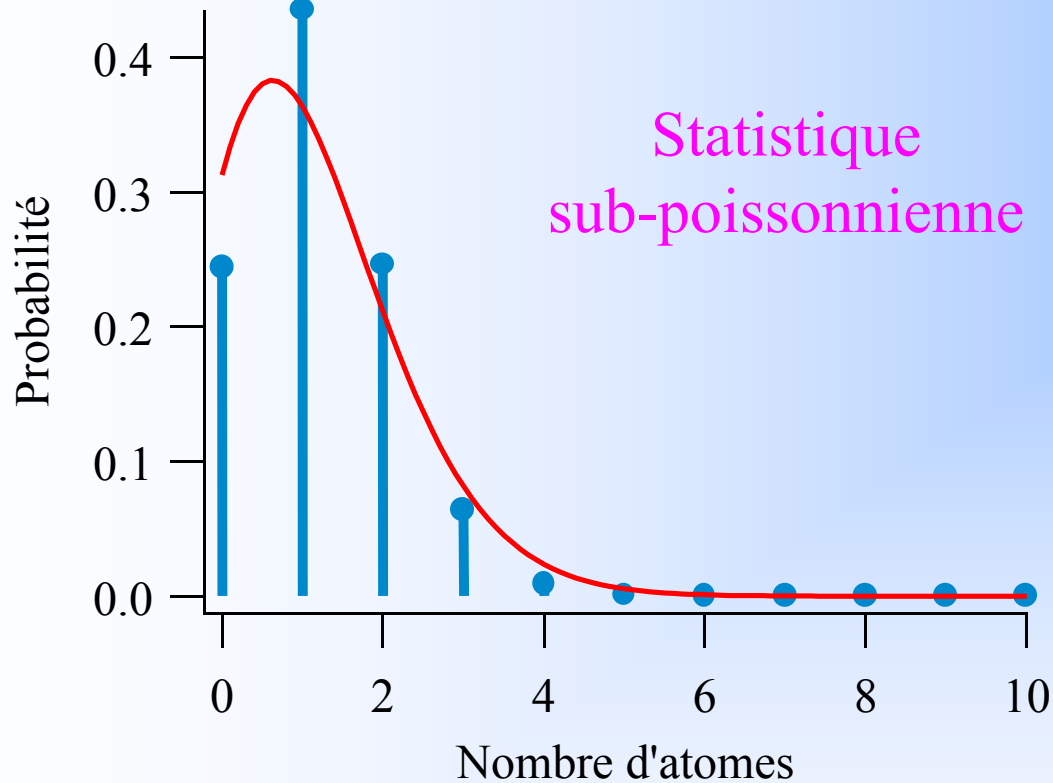


$$R_0 = 100 \text{ Atomes/s}$$

- 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

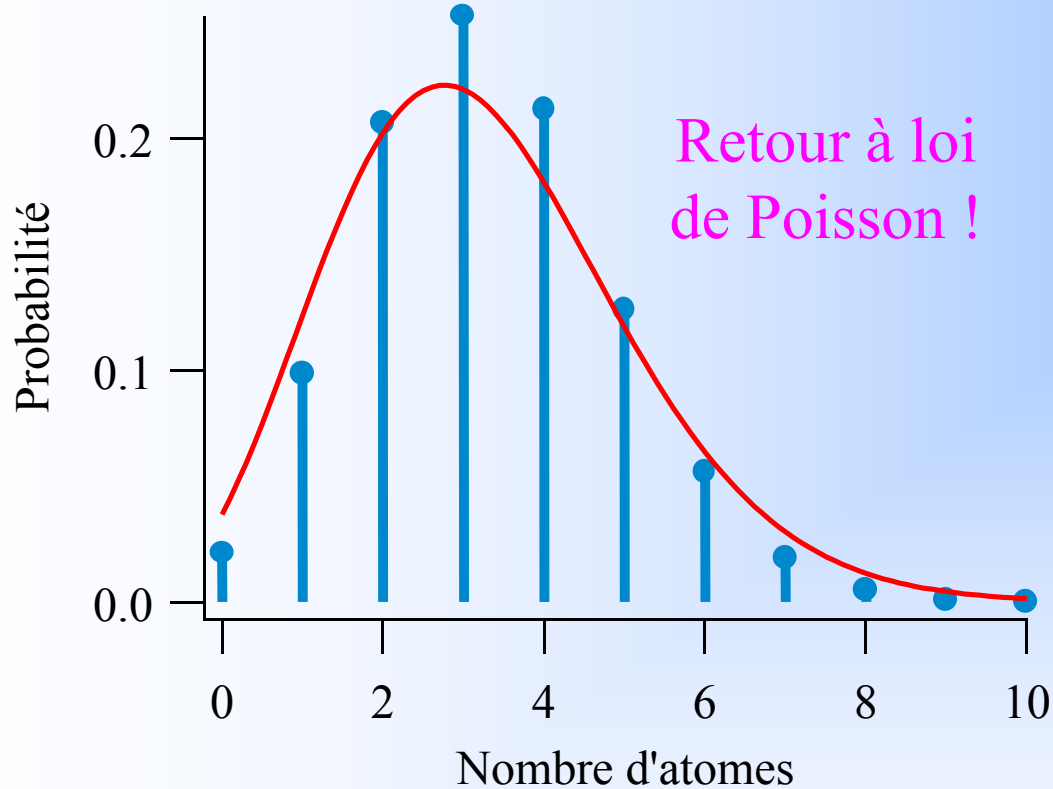


$$R_0 = 1000 \text{ Atomes/s}$$

- 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}

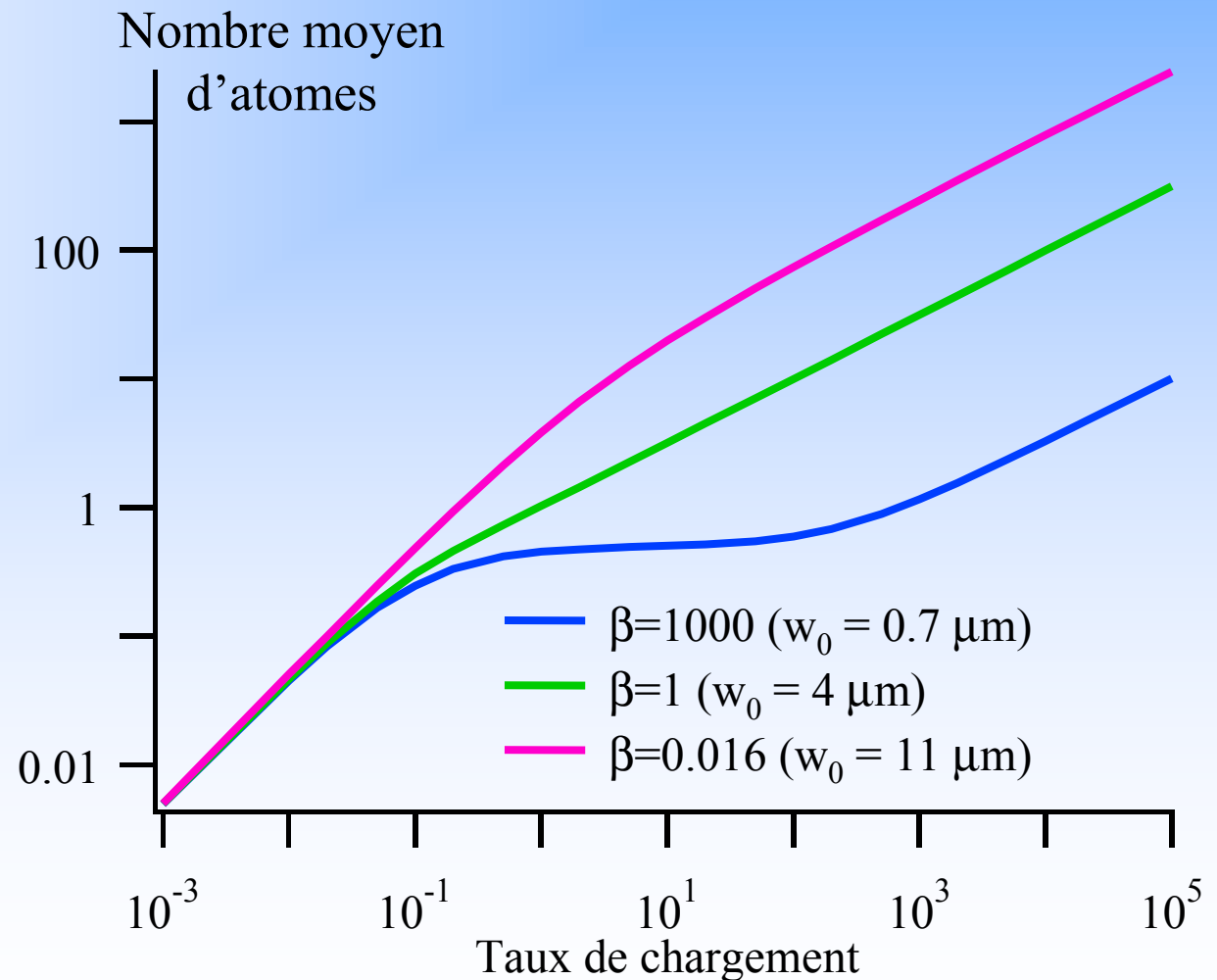
Etude des collisions : Importance du volume

Le taux de collisions β , 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

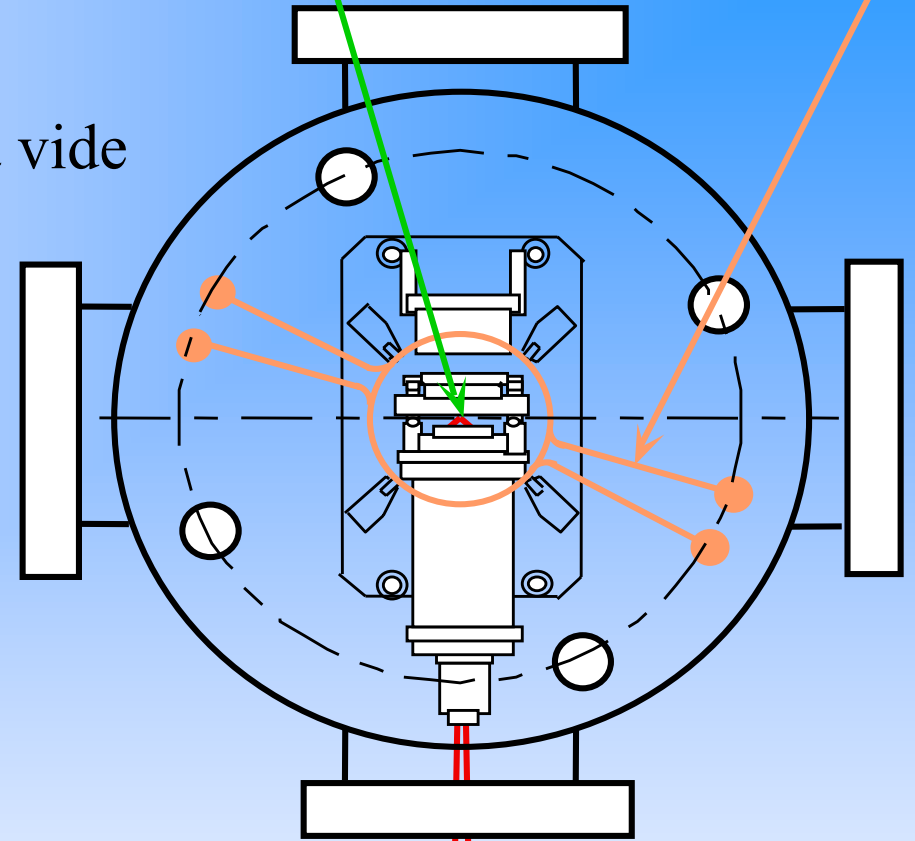
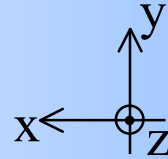
Double piège pour deux atomes :

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

PMO & Piège Dipolaire

Bobines

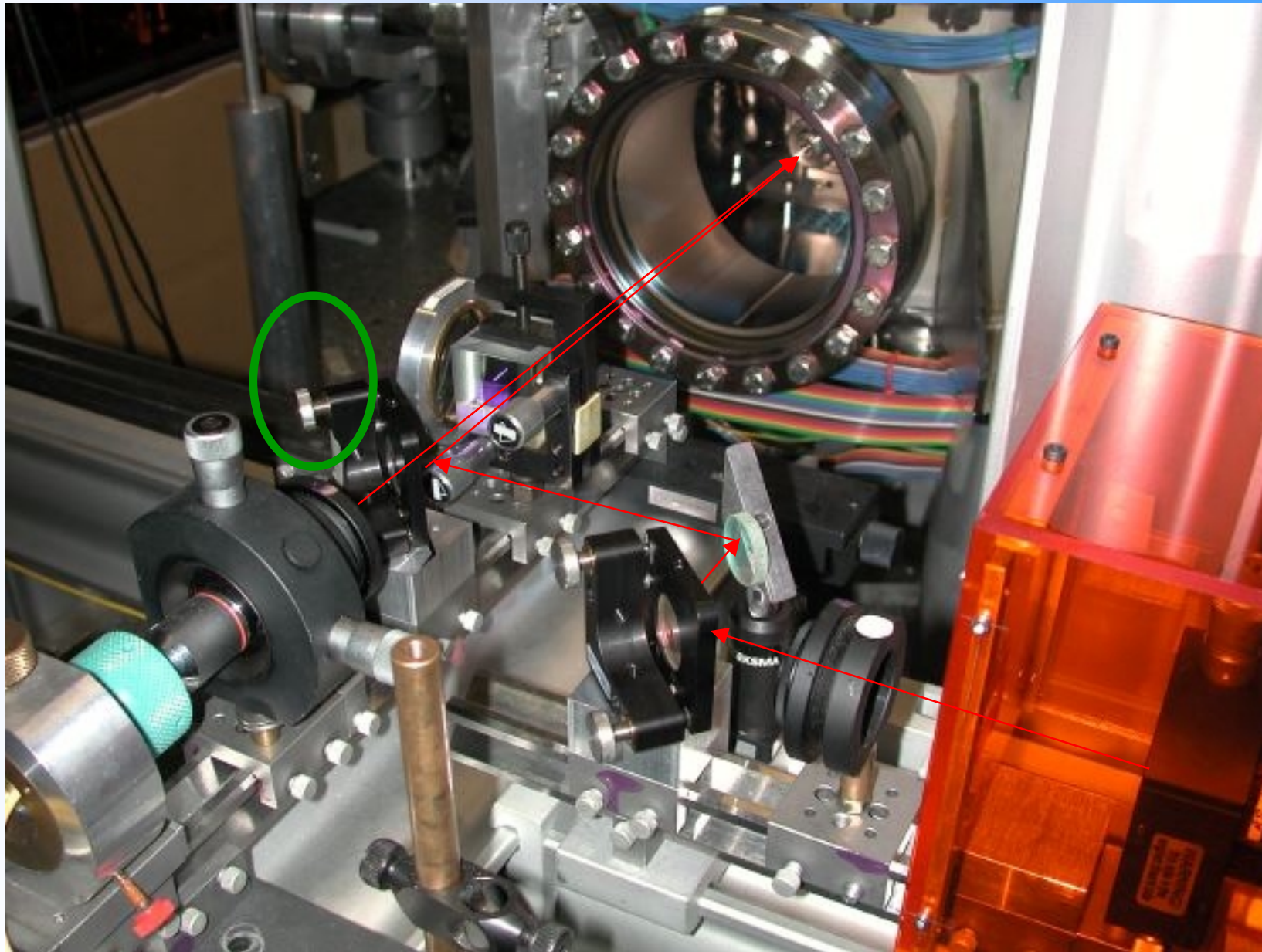
Chambre à vide



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

Lame semi réfléchissante
Contrôle de la distance

Deuxième faisceau piège



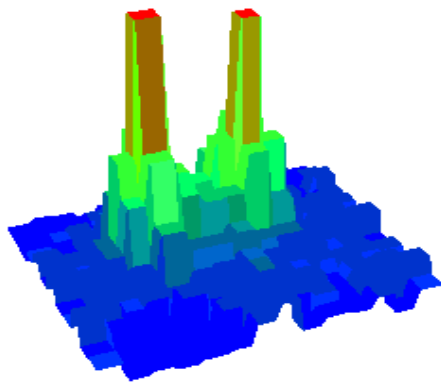
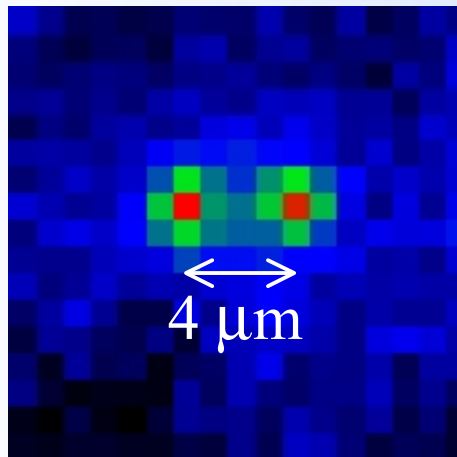
Sortie
fibre
optique

Sortie
fibre
optique

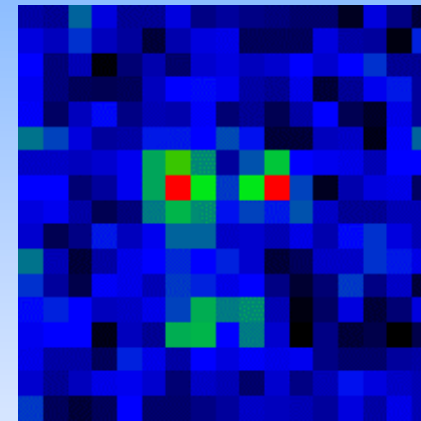
Tweezers optiques

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 :



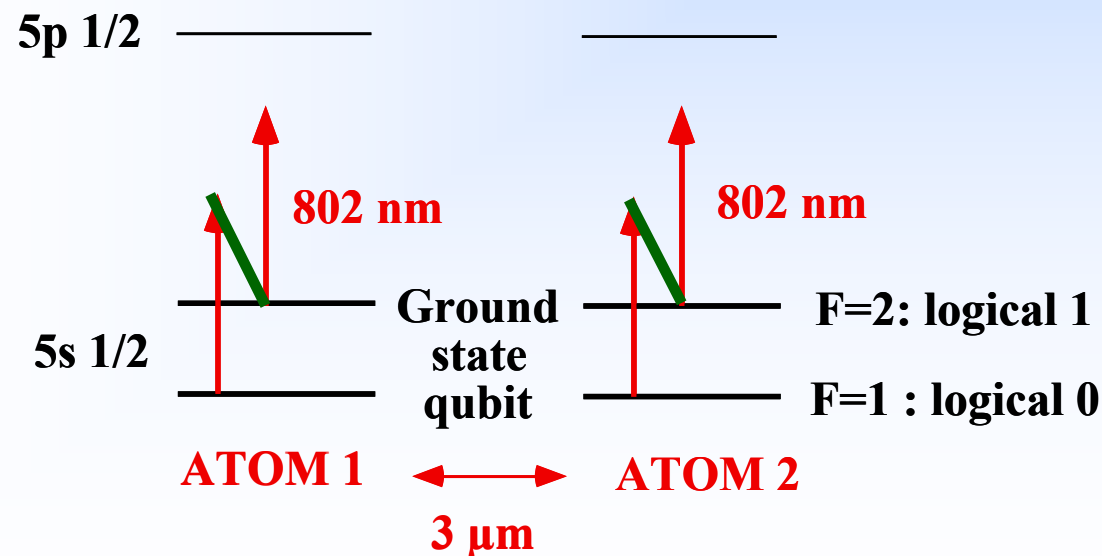
QuickTime™ et un décompresseur
GIF sont requis pour visualiser
cette image.

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)



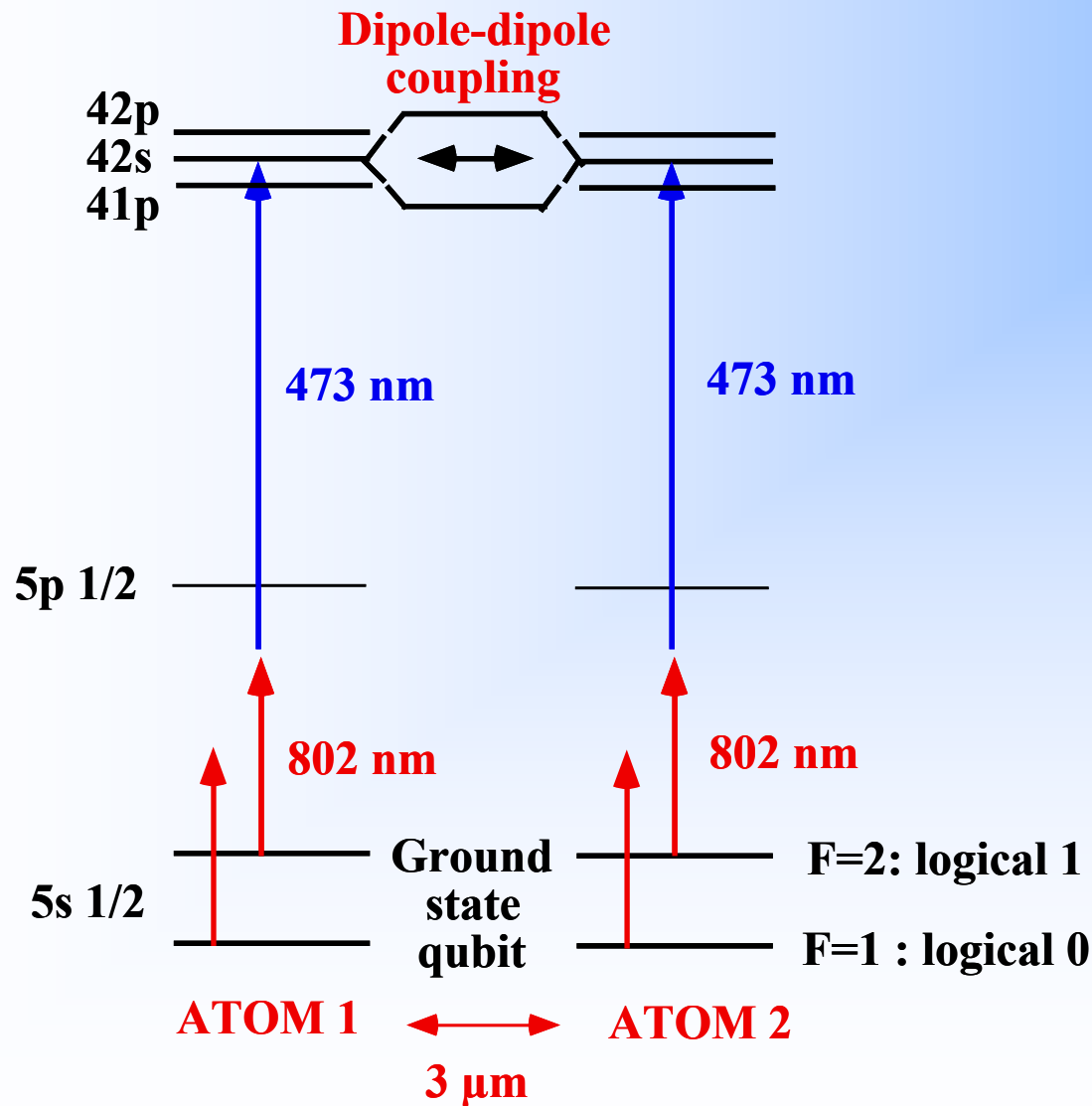
Opérations à un qubit :

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 2π 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 $1/r^3$)...

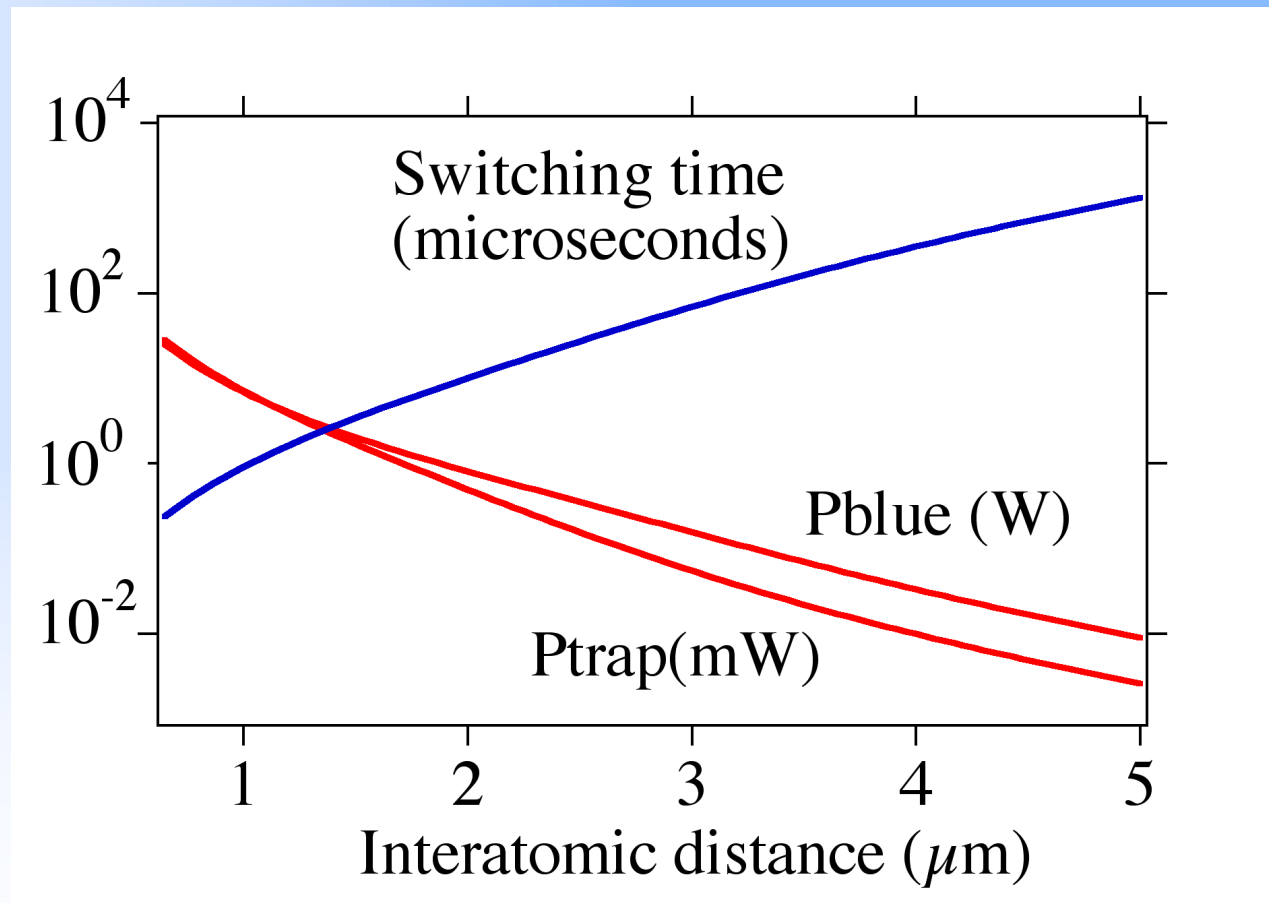
- | | | |
|--|----|--|
| - Fort couplage dipole-dipole
0.3 μm
commutation en 10 ns | ou | adressage de chaque atome
3 μm
commutation en 10 μs |
| - Excitation résonnante
petit $\Omega_{2\text{-photon}}$ (auto-tr.)
très sensible à Δr | ou | excitation non-résonnante
grand $\Omega_{2\text{-photon}}$ (lasers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

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

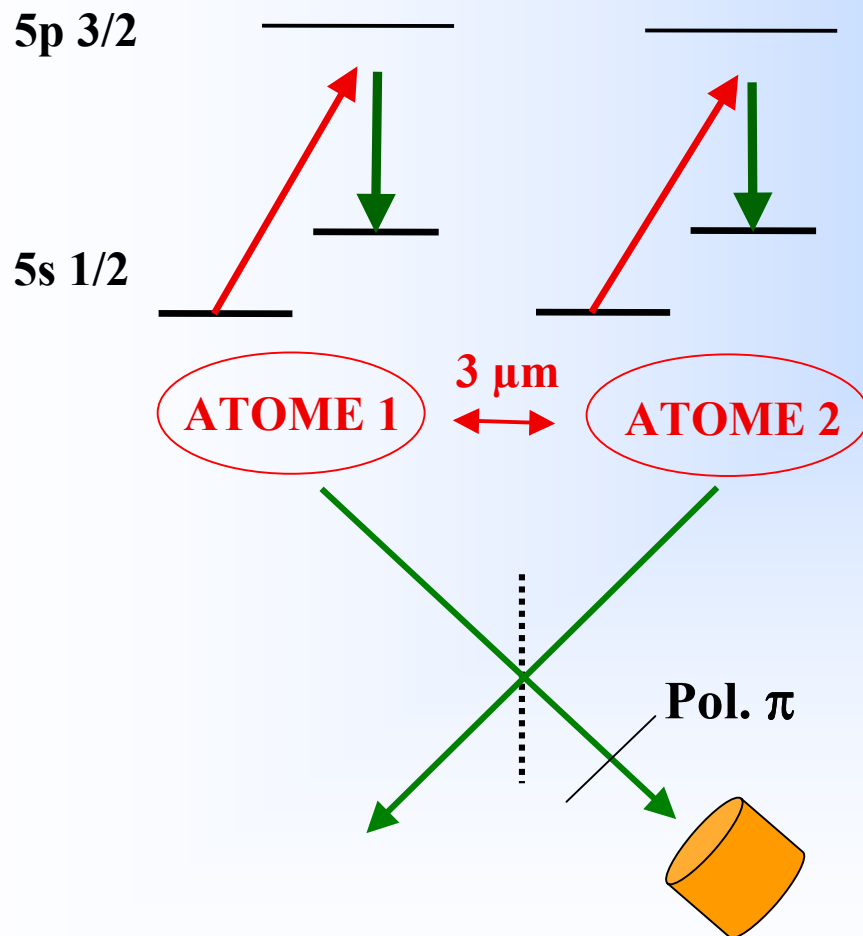
Conditions optimisées :

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 π)

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 φ 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

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...