

*Chaire de Physique quantique. Année 2001-2002. 10<sup>ème</sup> leçon (5 Mars 2002).*

## *Intrication, portes quantiques et complémentarité avec des atomes et des photons en cavité (suite)*

*Nous passons en revue dans cette dernière leçon quelques expériences récentes réalisées avec le montage décrit à la leçon précédente:*

*Intrication de deux atomes,*

*Intrication de deux modes du champ de la cavité,*

*Réalisation d'une porte de phase et détection non destructive d'un photon,*

*Intrication programmée de trois systèmes quantiques,*

*Expériences de complémentarité à la limite classique quantique et de gomme quantique.*

*Ces expériences ont toutes été réalisées avec un système atome-cavité à résonance exacte. D'autres expériences sont faites en régime non résonnant (couplage dispersif atome-cavité):*

*Préparation et détection d'états « chats de Schrödinger du champ »,*

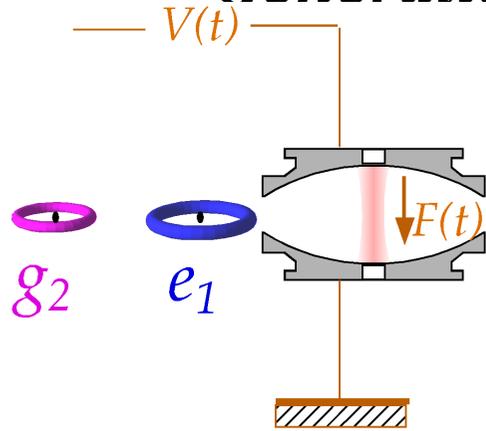
*Expériences de décohérence,*

*Mesure de la fonction de Wigner d'un champ quantique*

*Mesure non destructive de champs contenant plusieurs photons...*

*Ces dernières expériences, dont nous ne donnons ici qu'un rapide aperçu, seront décrites en détail ultérieurement.*

# Génération d'une paire d'atomes intriqués



Un atome préparé dans l'état  $e$ , suivi d'un deuxième préparé dans l'état  $g$  sont envoyés à la suite l'un de l'autre dans la cavité, initialement vide (**0 photon**)

Un champ électrique  $F(t)$  est utilisé pour accorder les transitions des atomes #1 et #2 à résonance avec  $C$  pendant le temps  $t$  nécessaire pour réaliser une impulsion  $\pi/2$  ou  $\pi$ .

Atome #1 :  $\Omega t = \pi/2$

$$|e_1, 0\rangle \cdot |g_2\rangle \longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |e_1, 0\rangle - |g_1, 1\rangle \} \cdot |g_2\rangle$$

**Intrication atome 1 – champ**

Atome #2 :  $\Omega t = \pi$

$$\longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |e_1, g_2\rangle - |g_1, e_2\rangle \} \cdot |0\rangle$$

**Intrication atome 1 – atome 2**

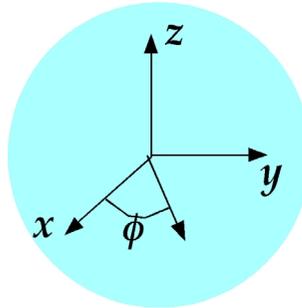
**Atomes intriqués de façon déterministe sans avoir interagi directement entre eux.**

**Le champ a joué le rôle de catalyseur pour l'intrication des atomes**

# La paire d'atomes intriqués correspond à un état singulet de spins

Il prend la même forme dans toutes les bases ( $Oz$ ,  $Ox$  et direction  $\phi$  du plan  $xOy$ )

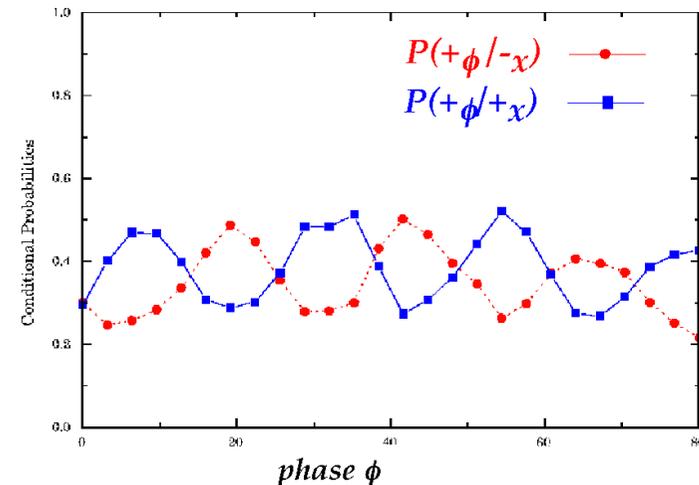
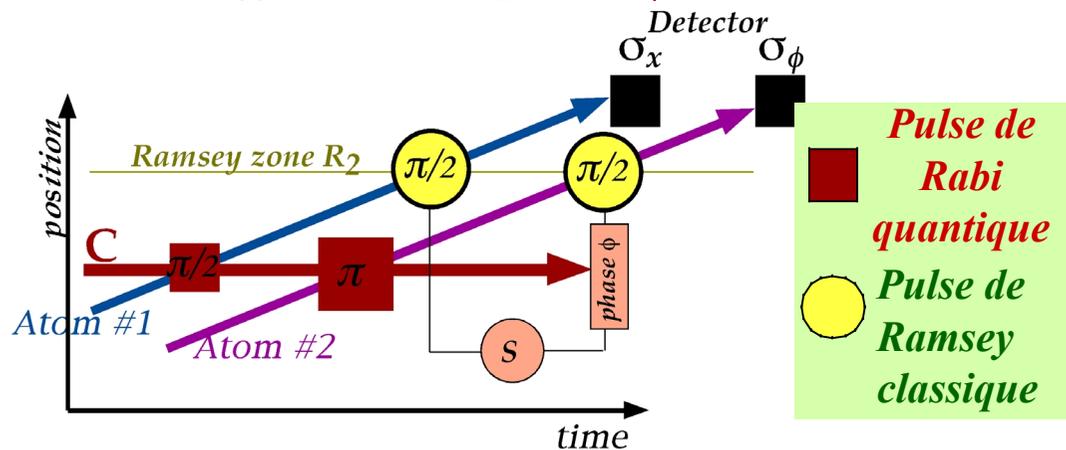
$$\begin{aligned}
 & |e_1, g_2\rangle - |g_1, e_2\rangle \\
 & \left| \begin{array}{c} \uparrow \\ +_z \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} \downarrow \\ -_z \end{array} \right\rangle - \left| \begin{array}{c} \downarrow \\ -_z \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} \uparrow \\ +_z \end{array} \right\rangle \\
 & = \left| \begin{array}{c} \nearrow \\ +_x \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} \nwarrow \\ -_x \end{array} \right\rangle - \left| \begin{array}{c} \swarrow \\ -_x \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} \searrow \\ +_x \end{array} \right\rangle
 \end{aligned}$$



Si l'atome #1 est mesuré avec le spin  $+_x$  le long de  $Ox$ , l'atome #2 est trouvé avec le spin  $-_x$

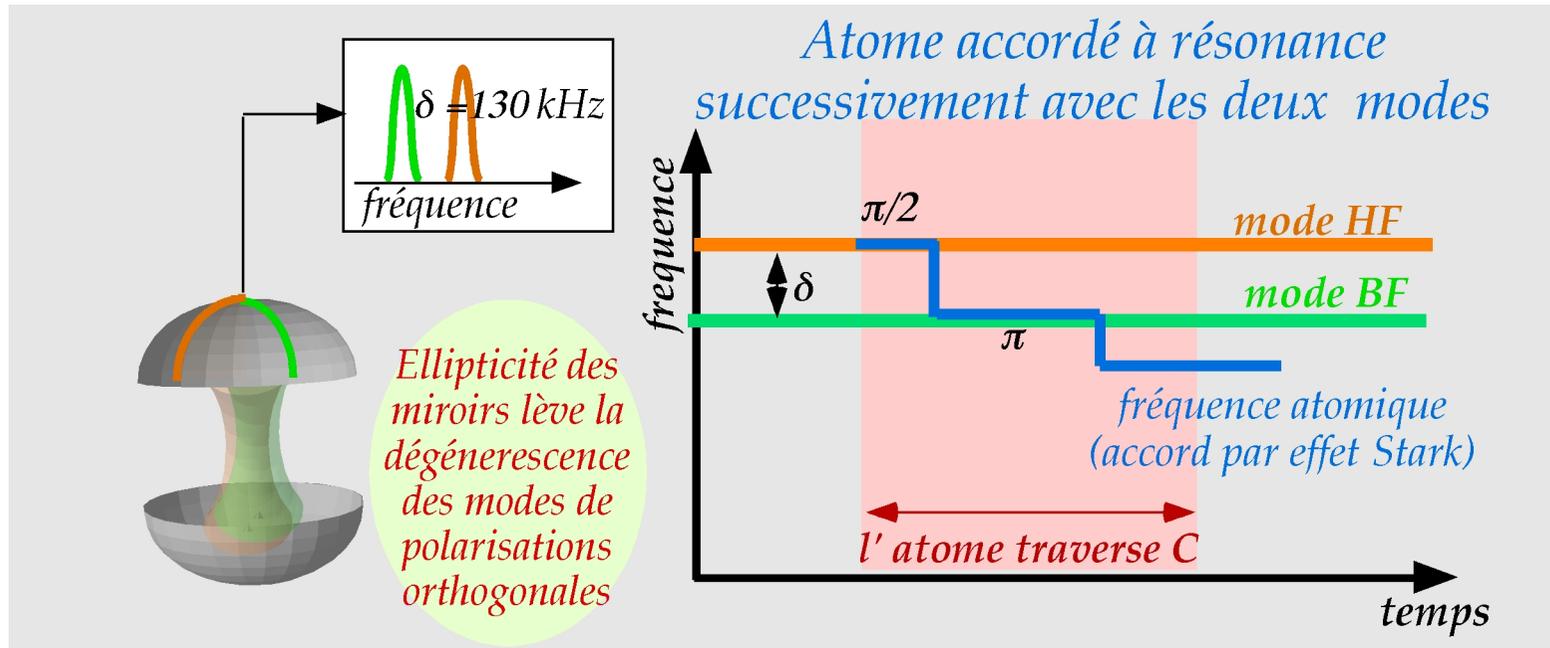
La probabilité jointe de trouver l'atome 1 dans l'état  $+_x$  et l'atome 2 dans l'état  $+_\phi$  présente une modulation quand la phase  $\phi$  est variée

Détection du « spin transverse » en appliquant des impulsions  $\pi/2$  avec une différence de phase  $\phi$  sur les deux atomes après leur traversée de C



Modulations analogues aux franges de Ramsey, mais pulses appliqués à des atomes différents: La paire se comporte comme un système quantique unique

# Intrication de deux modes du champ: un photon « partagé » de façon cohérente entre deux oscillateurs



*Au lieu d'utiliser un photon pour intriquer deux atomes, utiliser un atome pour intriquer deux modes*

Pulse Rabi  $\pi/2$

$$|e, 0_{HF}, 0_{BF}\rangle \rightarrow |e, 0_{HF}, 0_{BF}\rangle - |g, 1_{HF}, 0_{BF}\rangle$$

Pulse Rabi  $\pi$

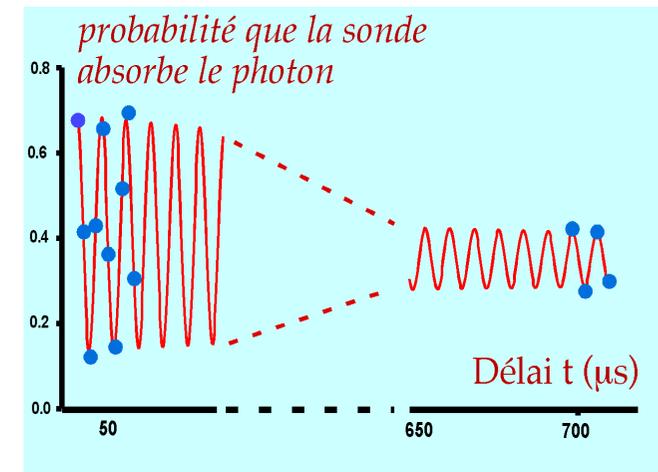
$$|g\rangle \rightarrow [|0_{HF}, 1_{BF}\rangle + |1_{HF}, 0_{BF}\rangle]$$

Intrication entre deux modes du champ

évolution

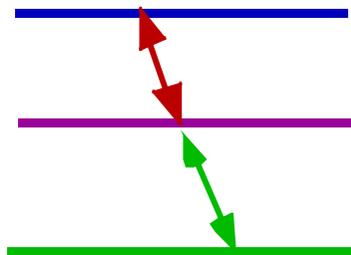
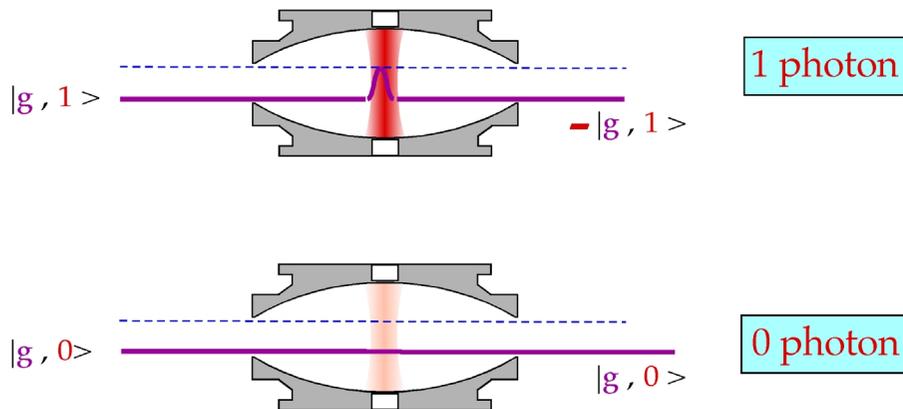
$$|0_{HF}, 1_{BF}\rangle + e^{-i\delta t} |1_{HF}, 0_{BF}\rangle$$

Intrication lue par un atome sonde subissant les opérations dans l'ordre inverse après un délai  $t$



## Le pulse de Rabi $2\pi$ et la porte de phase à deux qubits

$$\Omega t = 2\pi \longrightarrow \cos(\Omega t/2) = -1$$



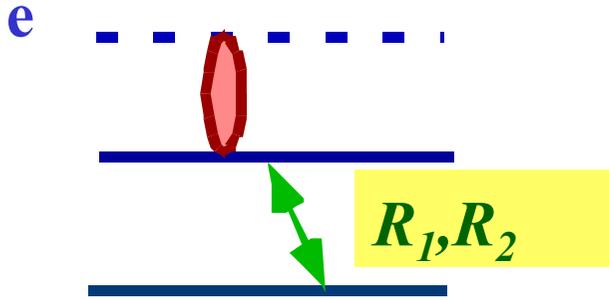
*Cavité résonnante sur la transition e-g*

*L'atome, initialement dans  $g$  effectue une **oscillation de Rabi  $2\pi$**  dans le champ d'un photon et revient dans  $g$ .*

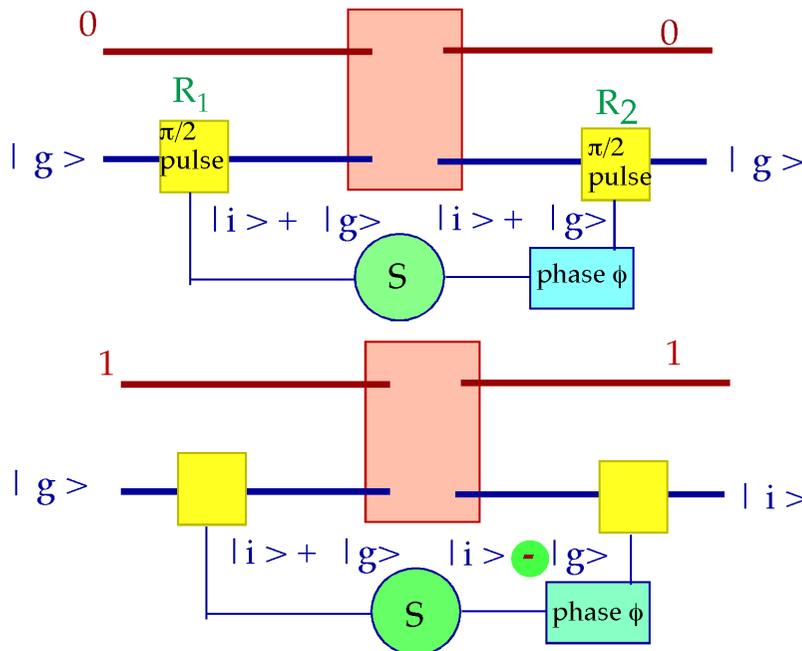
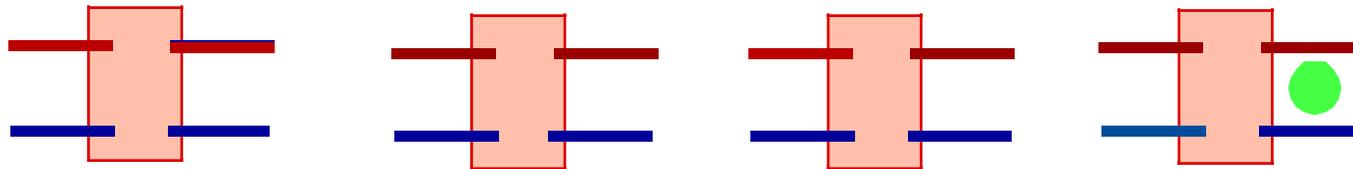
*Le photon change de  $\pi$  la phase de l'amplitude de l'atome dans  $g$ , sans être absorbé. Le processus réalise une porte de phase à deux qubits: le bit source est le champ (0 ou 1 photon pour état 0 et 1 respectivement) et le bit cible est l'atome ( $g$  est l'état 1 et un troisième état  $i$  (état circulaire de nombre quantique 49) est l'état 0).*

*Le déphasage relatif entre  $g$  et  $i$  est mesuré à l'aide d'un interféromètre de Ramsey fonctionnant sur la transition  $g-i$ : la phase des franges renseigne sur le déphasage induit par le photon qui fait tourner l'atome sur la transition  $g-e$ .*

*On réalise ainsi une mesure non destructive du photon dans C!*

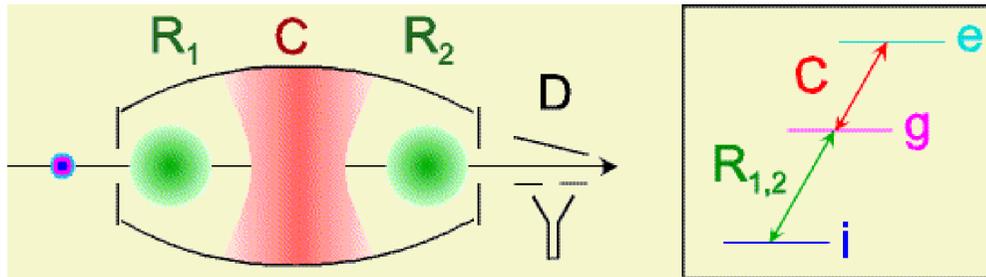


## De la porte de phase à la porte C-NOT



*Comment transformer une porte de phase à deux qubits en porte C-NOT: appliquer au qubit cible deux pulses  $\pi/2$  avant et après la porte (équivalent à des transformations de Hadamard): si **0 photon**, **g** reste **g**, mais si **1 photon** dans **C**, **g** devient **i**. Le photon est toujours là. Dynamique d'une porte C-NOT et mesure non destructive du champ: l'atome est un mètre qui mesure sans le détruire le champ ( $0 \rightarrow g$  ;  $1 \rightarrow i$ )*

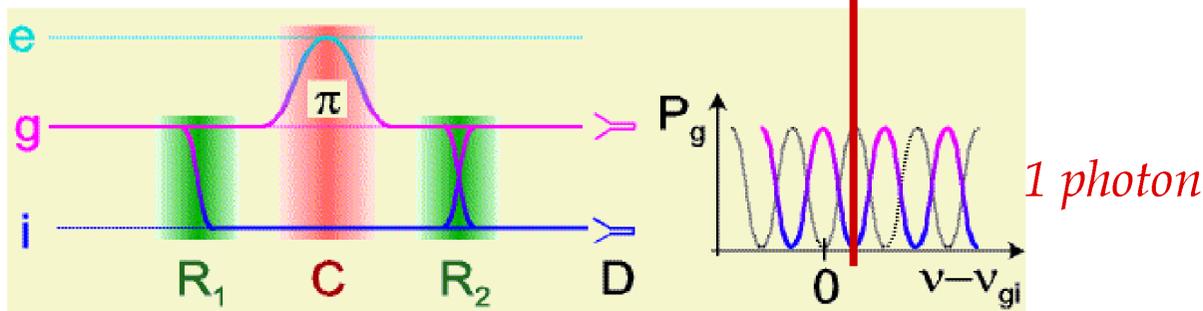
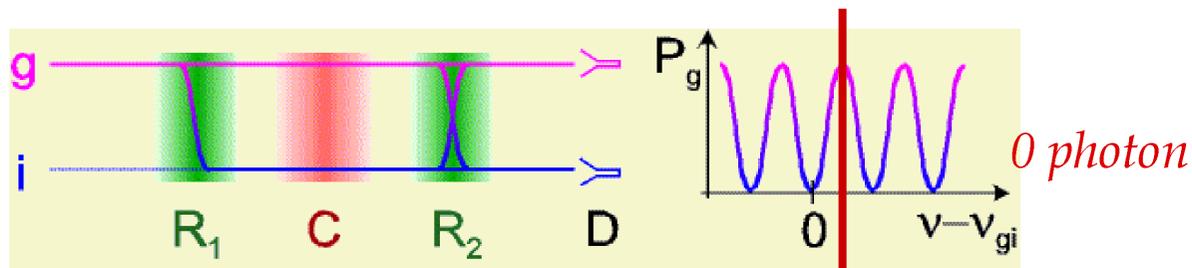
# Détection non destructive de photon et porte C-NOT vue comme un processus interférométrique de Ramsey



L'atome suit deux chemins qui interfèrent entre  $R_1$  et  $R_2$ .

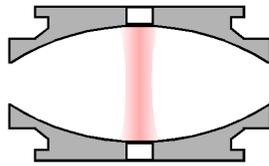
S'il y a un photon dans C, l'amplitude du chemin associé à  $g$  est déphasée de  $\pi$  par rapport au chemin associé à  $i$  et les franges de Ramsey traduisent ce déphasage.

En ajustant la fréquence de  $R_1$ - $R_2$  pour se trouver à un extremum des franges, on corrèle en principe parfaitement l'état



# Une expérience à deux atomes: émission et lecture non destructive d'un photon

Atome #1  
(Source)

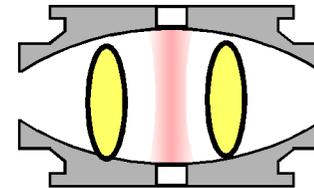


Pulse de Rabi  
 $\pi/2$  sur atome 1

$$(1/\sqrt{2}) \{ |e_1, 0\rangle - |g_1, 1\rangle \}$$

Le premier atome (« source ») émet avec une probabilité de 50% un photon dans C. la détection ultérieure de l'atome projette le champ dans 0 ou 1.

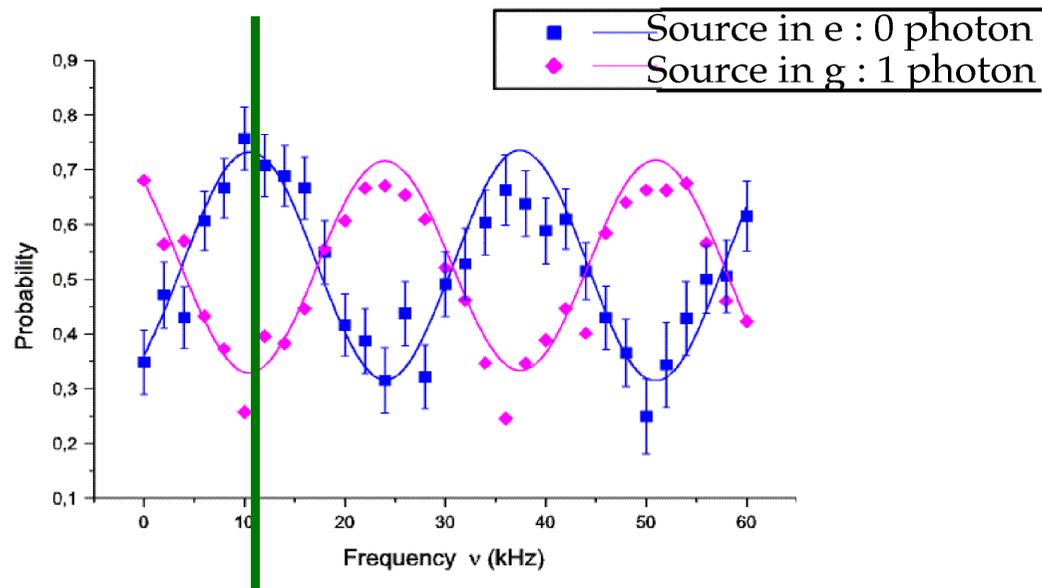
Atome #2  
(QND  
mètre)



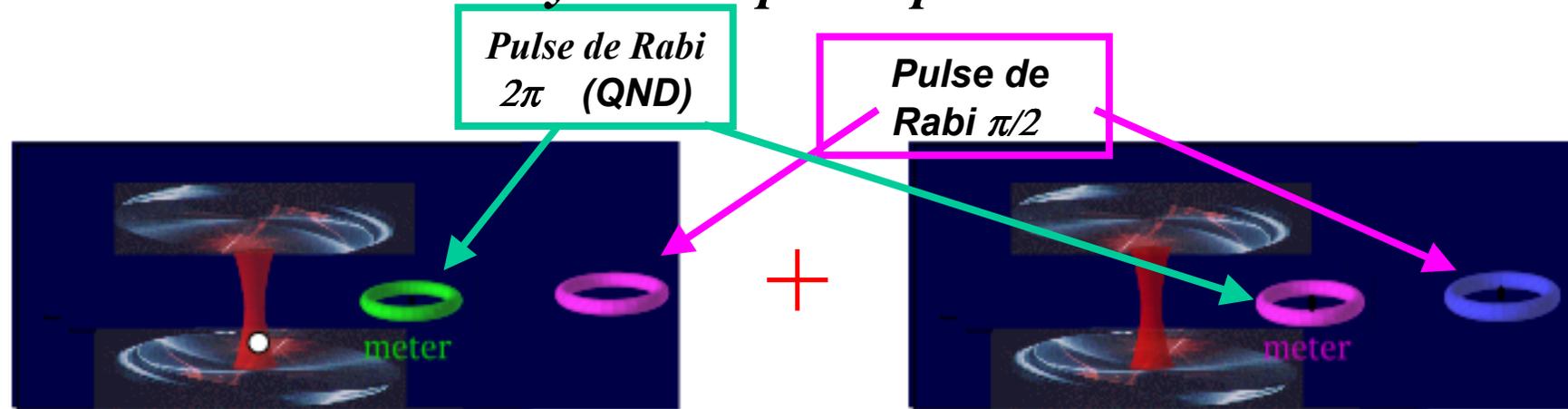
Pulse de Rabi  
 $2\pi$  sur atome 2



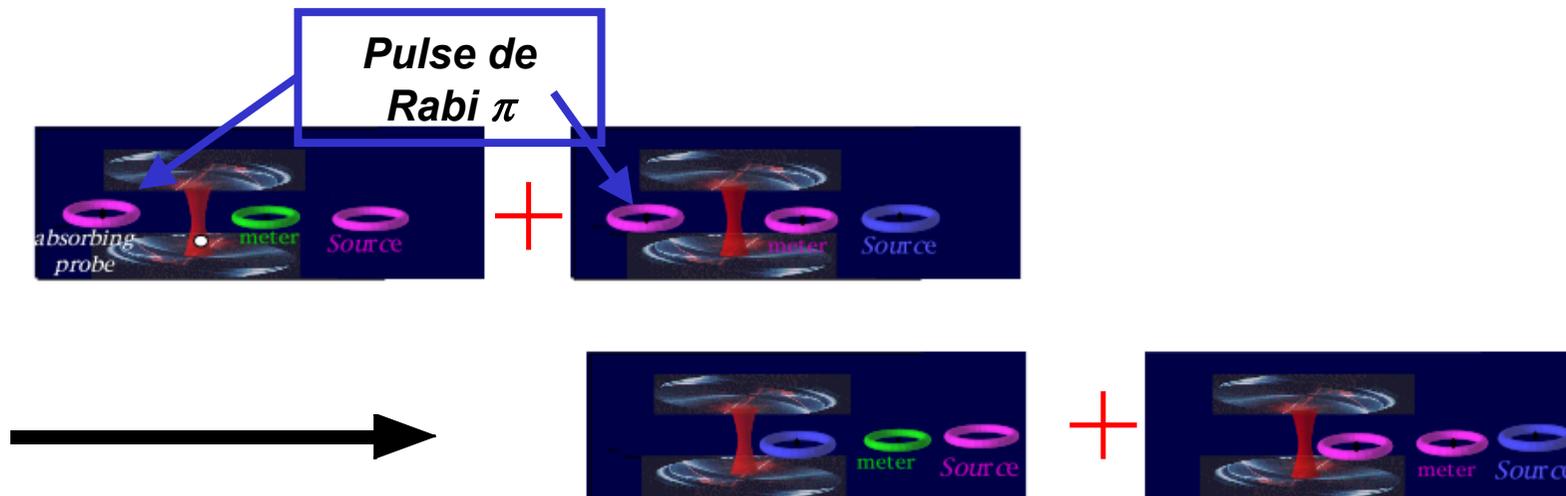
Le second atome (mètre) « lit » le nombre de photons par interférométrie de Ramsey.



# Combinaison de pulses de Rabi et intrication programmée de trois systèmes quantiques.



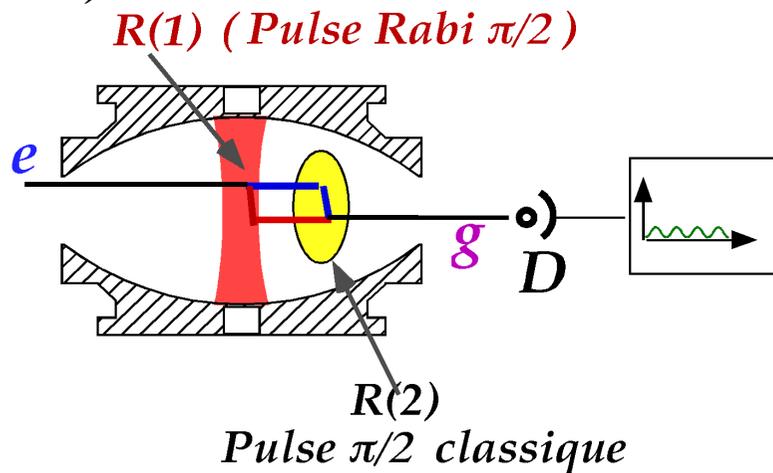
*Le premier atome prépare un photon avec une probabilité de 50% (pulse  $\pi/2$ ) et le second atome le lit par méthode QND (pulse  $2\pi$ )*



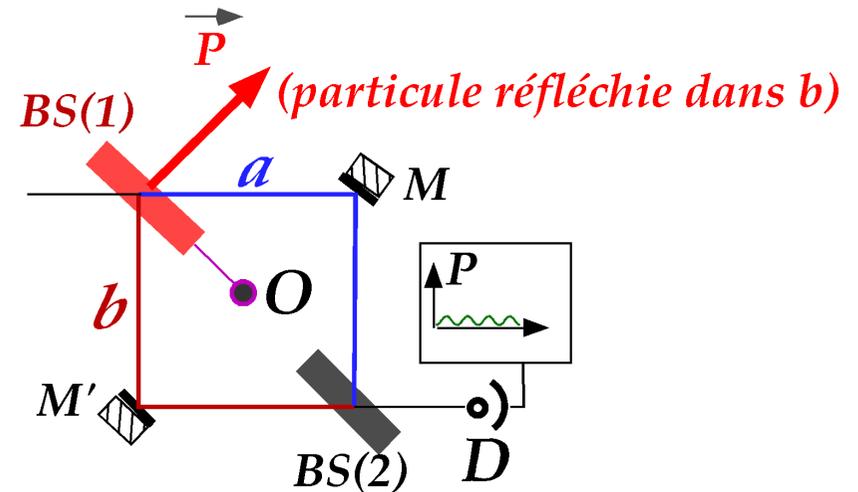
*Un troisième atome absorbe le photon (pulse  $\pi$ ) ce qui produit des corrélations non locales à trois atomes!*

# Une expérience de complémentarité à la limite classique-quantique

(d'après propositions de Englert et al, *Appl.PhysB.54*, 366 (1992) et Zheng, *Opt. Comm.173*, 265 (2000)).



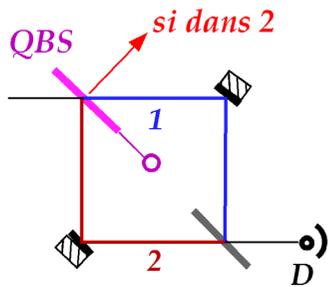
Expérience de Ramsey avec **une zone quantique** et une zone classique



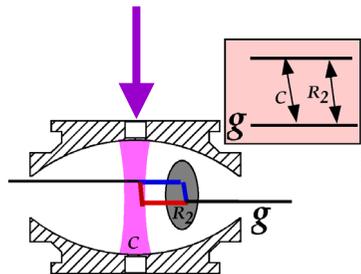
Analogie avec un interféromètre de Mach-Zehnder ayant une **lame séparatrice microscopique** et une lame classique

Le « recul » de la lame séparatrice qui « encaisse » **un photon** (dans le cas de Ramsey) ou **une unité d'impulsion** (dans le cas du Mach-Zehnder) crée une intrication entre la particule et l'interféromètre détruisant les franges. De l'information sur le « chemin suivi » s'inscrit en effet dans l'interféromètre (voir leçon n° 3). Les franges réapparaissent progressivement lorsque la lame microscopique évolue vers le macroscopique (par augmentation du nombre de photon (Ramsey) ou par augmentation de sa masse (Mach-Zehnder)). Expérience très difficile à faire avec un vrai Mach-Zehnder, mais possible en électrodynamique en cavité....

# Intrication et complémentarité dans les deux interféromètres



Mach-Zehnder



Ramsey

*Le champ cohérent de C est injecté par un guide d'onde, ajusté pour faire toujours un pulse  $\pi/2$*

$$|\psi_i\rangle \cdot |\Psi_{BS}(0)\rangle \longrightarrow$$

$$(1/\sqrt{2}) [ |\psi_1\rangle \cdot |\Psi_{BS}(1)\rangle + |\psi_2\rangle \cdot |\Psi_{BS}(2)\rangle ]$$

Séparatrice BS quantique:

$$\langle \Psi_{BS}(2) | \Psi_{BS}(1) \rangle = 0$$

Intrication entre la particule et BS

PAS DE FRANGES

Séparatrice classique:

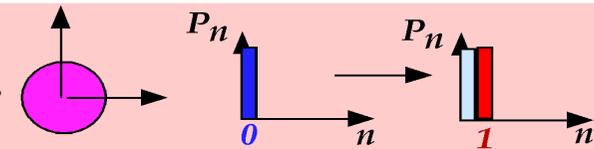
$$\langle \Psi_{BS}(2) | \Psi_{BS}(1) \rangle = 1$$

Pas d'intrication

FRANGES VISIBLES

Dans l'interféromètre de Ramsey, BS est un petit champ cohérent

limite quantique ( $n=0$ ):

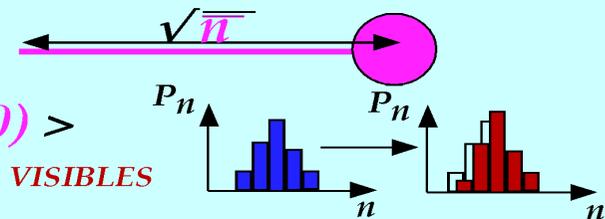


$$\langle 1 | 0 \rangle = 0$$

Intrication Maximale

PAS DE FRANGES

limite classique ( $\bar{n} \gg 1$ ):



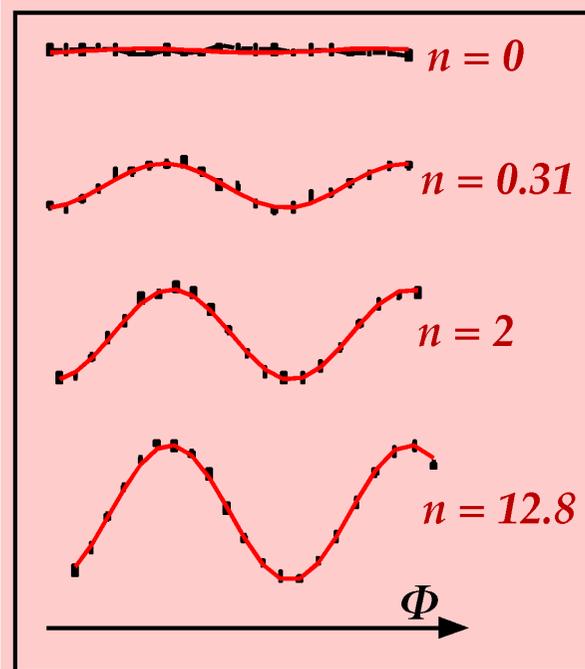
$$|\alpha_e\rangle \cong |\alpha_g\rangle \cong |\alpha(0)\rangle$$

Pas d'intrication

FRANGES VISIBLES

$$|e\rangle \cdot |\alpha(0)\rangle \longrightarrow (1/\sqrt{2}) [ |e\rangle + |g\rangle ] |\alpha(0)\rangle$$

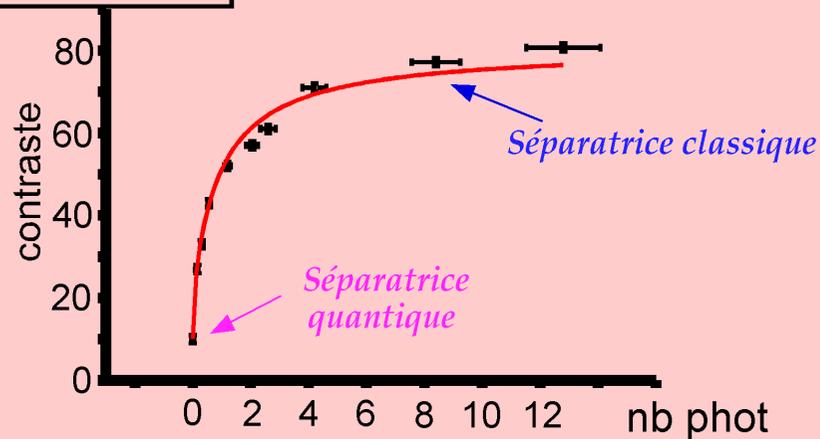
*Les franges apparaissent progressivement lorsque l'interféromètre devient de plus en plus « classique »*



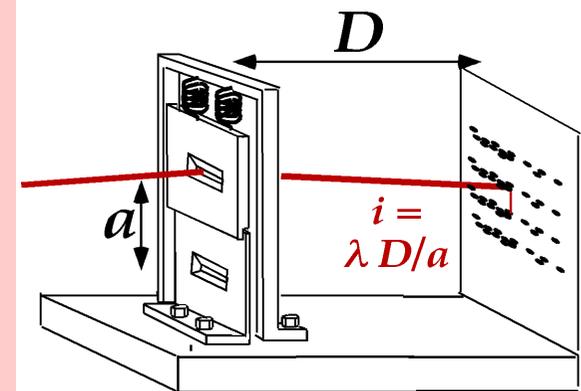
*R<sub>1</sub> réalisé avec un petit champ cohérent dont le nombre de photon moyen n peut être varié*

*n déterminé de façon indépendante par une calibration basée sur la mesure de déplacements dispersifs des franges*

*contraste des franges*  
 $|\langle \alpha_g / \alpha_e \rangle|$



*Une version « réelle » de l'expérience de pensée de Bohr sur l'interféromètre de Young avec une fente quantique*



# Une expérience de gomme quantique: nouvel aperçu sur EPR

Atome #1 (particule interférente)

Pas de franges car info sur le chemin stockée dans le champ

Vide (Séparatrice quantique)

séparatrice classique

Décteur

$|e_1, 0\rangle - |g_1, 1\rangle$  Atome#1 subit un pulse Rabi  $\pi/2$  dans C: info. wp sur le chemin stockée dans champ

Atome #2 (gomme quantique)

Atome #1 (particule interférente)

signal sur atome#1 corrélé à l'état détecté sur atome#2

Vide (séparatrice quantique)

séparatrice classique

Décteur

2 dans e

2 dans g

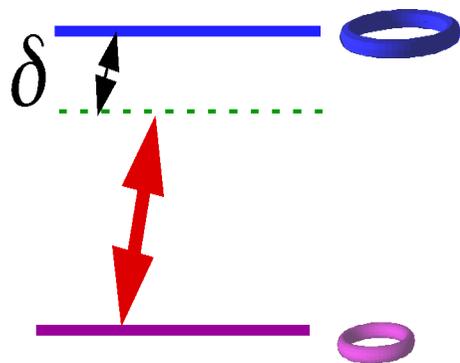
$\{|e_1, g_2\rangle - |g_1, e_2\rangle\} |0\rangle$

Atome#2 initialement dans g subit un pulse de Rabi  $\pi$  dans C et absorbe le champ: l'info.wp est transférée à l'atome#2 (paire EPR 1-2)

La séparatrice classique (zone  $R_2$ ), en mélangeant  $e_2$  et  $g_2$  « efface » l'info wp: après détection de l'atome #2 dans  $e$  ou  $g$ , on ne sait plus par quel chemin l'atome #1 a traversé l'interféromètre: la probabilité de détecter l'atome #1 en  $e$ , corrélée au résultat de la détection de l'atome#2 présente des franges de phases opposées (suivant que l'atome#2 est en  $e$  ou  $g$ ). Voir leçon 3.

## *L 'intrication non-résonnante (couplage atome-cavité dispersif)*

*Les expériences qui viennent d'être décrites reposent sur un couplage résonnant atome-cavité, l'intrication résultant alors d'un échange réel d'énergie entre les deux systèmes (pulses de Rabi de durée variable). Il est également possible de réaliser de l'intrication dans des conditions de couplage non-résonnant (désaccord de fréquence  $\delta > \Omega$  entre atome et mode de la cavité). L'atome et le champ ne peuvent alors plus échanger réellement d'énergie. L'atome et le mode de la cavité voient alors leurs fréquences modifiées sous l'effet de transitions virtuelles (déplacements lumineux pour l'atome, effet d'indice atomique pour la cavité).*

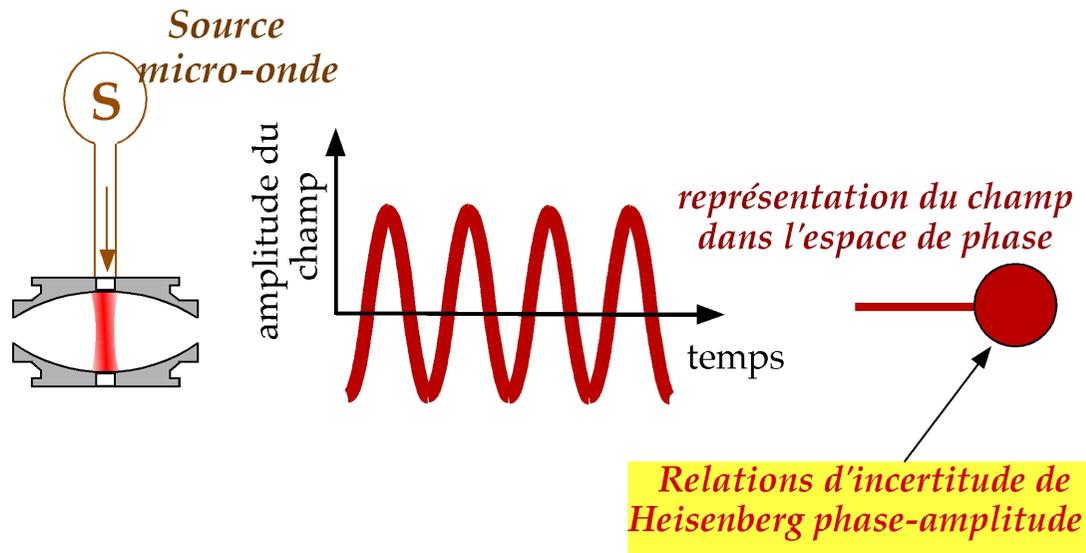


*Il s'agit ici d'un effet d'indice quantique, un seul atome suffisant à modifier de plusieurs kHz la fréquence de la cavité. Cet effet dépend enfin de l'état interne de l'atome: il prend des signes opposés suivant que l'atome est dans le niveau e ou g de la transition quasi-résonnante avec C. Si l'atome est dans une superposition de ces deux états, la cavité se trouve prendre deux fréquences différentes à la fois, une situation qui conduit à des formes nouvelles d'intrication, dites « dispersives » (parce que liées à des effets d'indice de réfraction dépendant de la fréquence)*

*On crée ainsi des états « chats de Schrödinger » du champ et on étudie leur décohérence. On peut également utiliser les effets dispersifs pour mesurer de façon non destructive des champs contenant plus d'un photon. Ces expériences de décohérence et de mesure quantique seront décrites dans des cours ultérieurs.*

# Principe des expériences de « chat de Schrödinger »

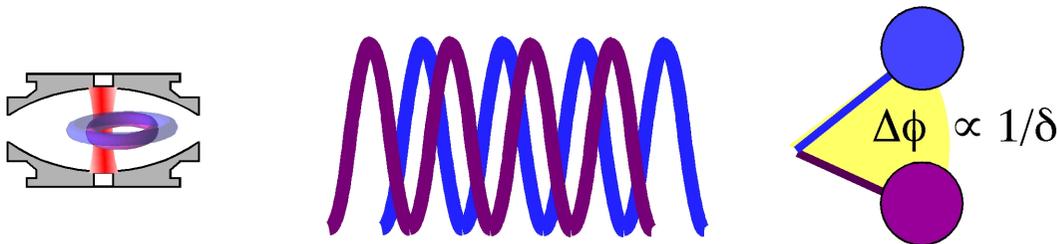
1. S crée un champ cohérent dans C d' amplitude et phase définies



*Deux états du champ*  
*« macroscopiquement*  
*différents » intriqués*  
*à deux états*  
*atomiques: c'est*  
*maintenant le champ*  
*qui joue le rôle de*  
*mètre mesurant*  
*l'atome:*

*une situation de*  
*pré-mesure à la*  
*chat de*  
*Schrödinger*

2. Un atome non-résonnant préparé dans une state superposition d'états déphase le champ, lui donnant deux phases différentes à la fois



# Références sur les expériences d'électrodynamique quantique en cavité

## *Bases théoriques:*

*S.Haroche, Les Houches session LIII, North Holland, Amsterdam (1992)*

*S.Haroche et J.M.Raimond, dans « Cavity Quantum Electrodynamics, Berman éditeur, Acad. Press (1994)*

## *Revue générale des expériences récentes et description détaillée du montage:*

*J.M.Raimond, M.Brune et S.Haroche, Reviews of Modern Physics, 73, p565 (2001).*

## *Expériences d'intrication quantique:*

*E.Hagley et al, Phys.Rev.Lett. 79, 1 (1997)*

*(intrication de deux atomes)*

*S.Osnaghi et al, Phys.Rev.Lett. 87, 037902 (2001)*

*(intrication par collision de deux atomes)*

*A.Rauschenbeutel et al, Science, 288, 2024 (2000)*

*(intrication de trois systèmes)*

*A.Rauschenbeutel et al, Phys.Rev.A, 64, 050301-1 (2001)*

*(intrication de deux modes du champ)*

## *Portes logiques et mesure non-destructive d'un photon:*

*A.Rauschenbeutel et al, Phys.Rev.Lett. 83, 5166 (1999)*

*(Porte de phase)*

*G.Noguès et al, Nature 400, 239 (1999).*

*(mesure non-destructive de photon et porte C-NOT)*

## *Expérience de complémentarité:*

*P.Bertet et al, Nature, Nature, 411, 166 (2001)*

## *Expérience du Chat de Schrödinger:*

*M.Brune et al, Phys.Rev.Lett. 77, 4887 (1996)*

*S.Haroche, Physics Today, Juillet 1997*

*(description simplifiée de l'expérience)*

---

**Groupe Electrodynamique en Cavité de l'ENS (atomes de Rydberg):J.M.Raimond,M.Brune,G.Noguès, S.H.**

**Thésitifs actuels:** P.Bertet, S.Osnaghi, A.Auffevès, P.Maioli, P.Hyafil, T.Meunier, J.Mozeley;

**Postdoc:** P.Milman; **Thésitifs passés:** F.Bernardot, P.Nussenzevig, A.Maali, X.Maître, J.Dreyer, P.Domokos

**G.Noguès, A.Rauschenbeutel, Postdocs passés:** F.Schmidt-Kaler, C.Wunderlich, E.Hagley.

**Collaboration avec** L.Davidovich, N.Zagury (Rio de Janeiro)