



Naissance, vie et mort d'un photon...

J.M. Raimond

*Université Pierre et Marie Curie
Laboratoire Kastler Brossel
Département de Physique
Ecole Normale Supérieure*



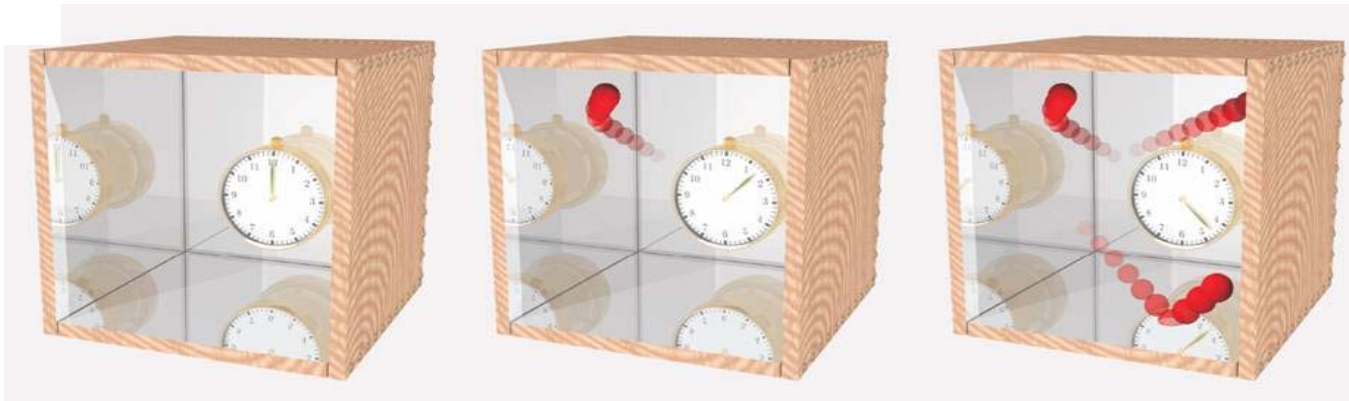
Trapping the light fantastic





Des expériences de pensée réalisées

- Contrôle de systèmes quantiques individuels
 - Prototypes de traitement quantique de l'information
 - Test des processus quantiques fondamentaux
 - Intrication
 - Décohérence
 - Mesure
- Une mesure idéale du nombre de photons dans une 'boite à photons'

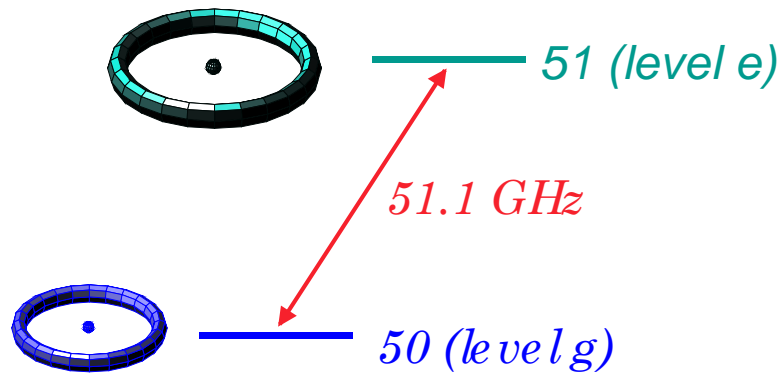


- Sauts quantiques
- Effet Zénon quantique
- Détermination complète de l'état quantique du champ



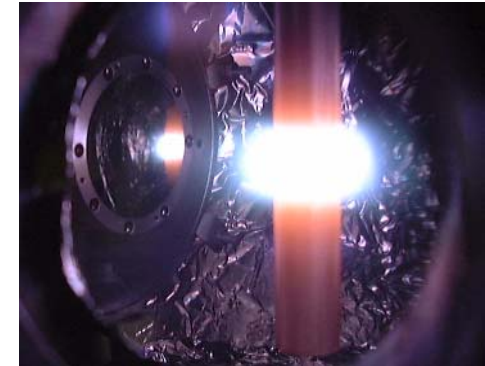
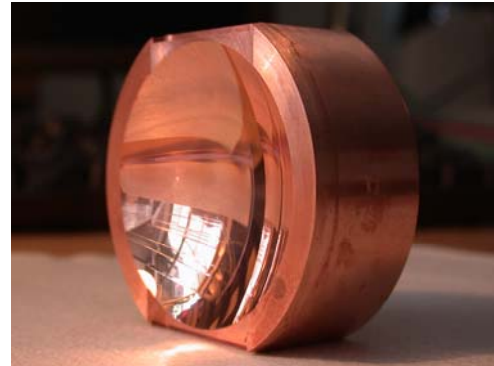
Nos outils

- Atomes de Rydberg circulaires



- Orbite mésoscopique
 - diamètre $0.25 \mu\text{m}$
- Longue durée de vie (30ms)
- Fort couplage au champ
- Accordable par effet Stark
- Détection sélective efficace
- Des niveaux idéaux pour étudier le couplage matière-rayonnement à l'échelle du photon et de l'atome uniques (CQED)

- Cavités supraconductrices

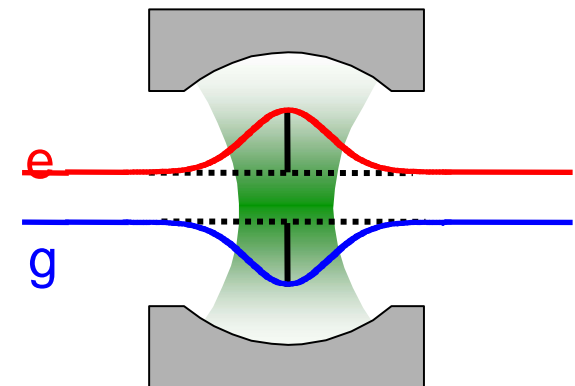
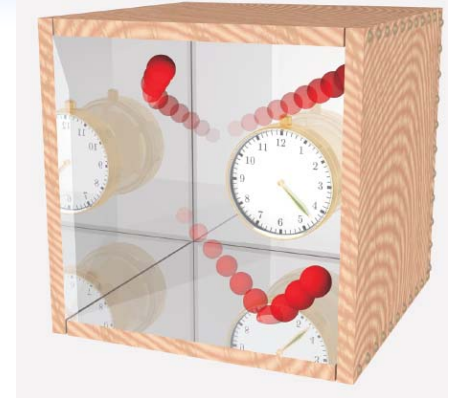


- Fabry Perot
- Niobium sur substrat cuivre
- Finesse $4.6 \cdot 10^9$
- Temps de vie 0.13 s
- Suffisant pour sonder le champ avec des centaines d'atomes



Une mesure QND du nombre de photons

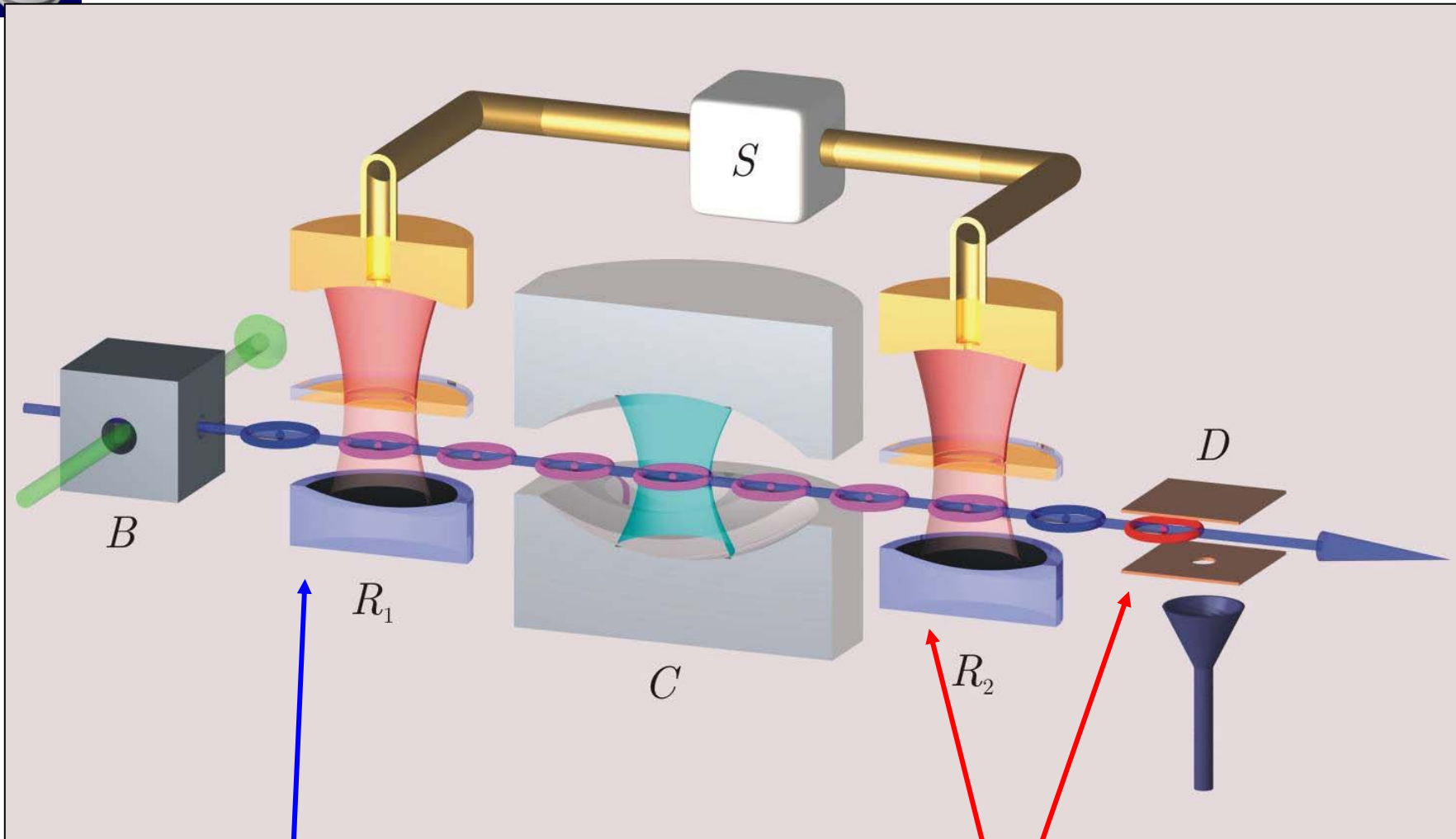
- Comment 'voir' un photon sans l'absorber ?
 - Interaction non-resonante (dispersive)
 - Pas d'échange d'énergie
 - Pas d'émission ou d'absorption
 - Déplacements lumineux
- Niveaux atomiques déplacés par le champ
 - Déphasage d'une cohérence e/g proportionnel au nombre n de photons



- Notre atome est une horloge qui indique n sans le modifier



Dispositif expérimental



Préparation
d'une superposition
cohérente e/g

Lecture de l'état
atomique

Interféromètre atomique de Ramsey



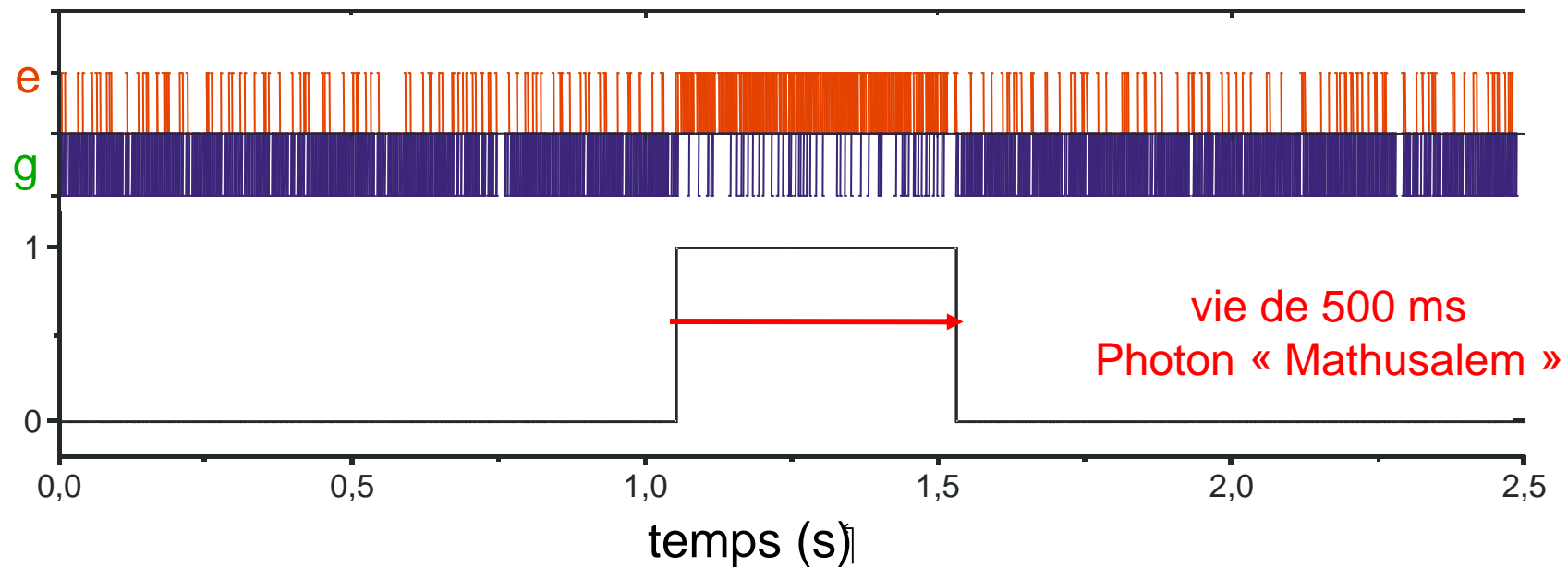
Une situation simple

- Champ contenant Zéro ou un photon
 - Champ thermique résiduel à 0.8 K. 0.05 photons en moyenne*
- Déphasage de la cohérence atomique de π par photon
 - Deux états atomiques orthogonaux à la sortie de la cavité
 - Détection finale
 - Atome dans g si la cavité est vide
 - Atome dans e si elle contient un photon
 - NB: l'énergie est fournie à l'atome par les champs classiques
 - Le nombre de photons ne change pas
 - Le photon est encore là s'il est détecté



Naissance, vie et mort d'un photon

Champ thermique résiduel $T=0.8\text{ K}$ $n_{\text{th}}=0.05$



Gleyzes et al, Nature, **446**, 297 (2007)

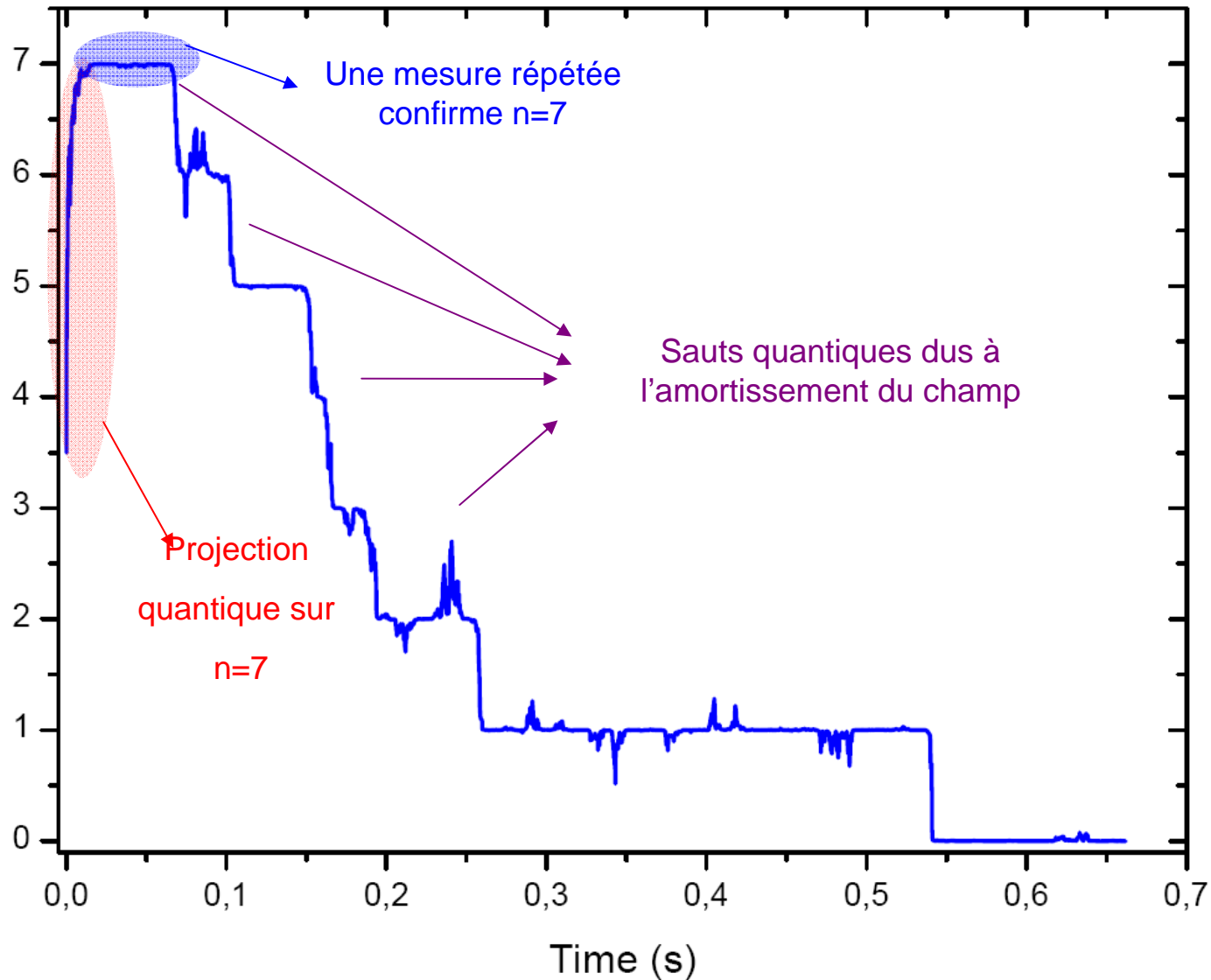


Compter jusqu'à 7 ?

- Déphasage par photon de $\pi/4$
 - 8 états atomiques non orthogonaux correspondant aux nombres de photons de 0 à 7
- Un atome ne suffit pas
 - Impossibilité de mesurer l'état quantique d'un atome unique
 - Impossibilité de compter de 0 à 7 avec un bit !
- Exploiter l'information fournie par N atomes
 - Interaction QND: les atomes ne changent pas le nombre de photons
 - En pratique, 110 atomes détectés en 26 ms



Une trajectoire quantique



C. Guerlin et al, Nature, **448**, 889



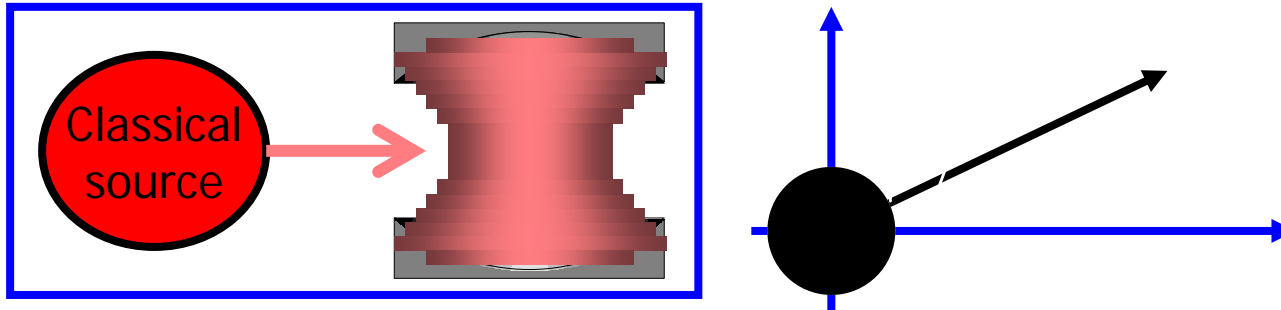
Effet Zénon quantique

- “A watched kettle never boils”
 - Évolution cohérente d’un système et mesures fréquemment répétées
 - Évolution par sauts quantiques entre états propres de l’observable mesurée
 - Une évolution beaucoup plus lente qu’en l’absence de mesures
 - Pas d’évolution du tout à la limite de mesures répétées infiniment rapidement
 - Pas d’effet Zénon pour les processus de relaxation incohérents
 - Mesure n’affecte pas la relaxation de la cavité

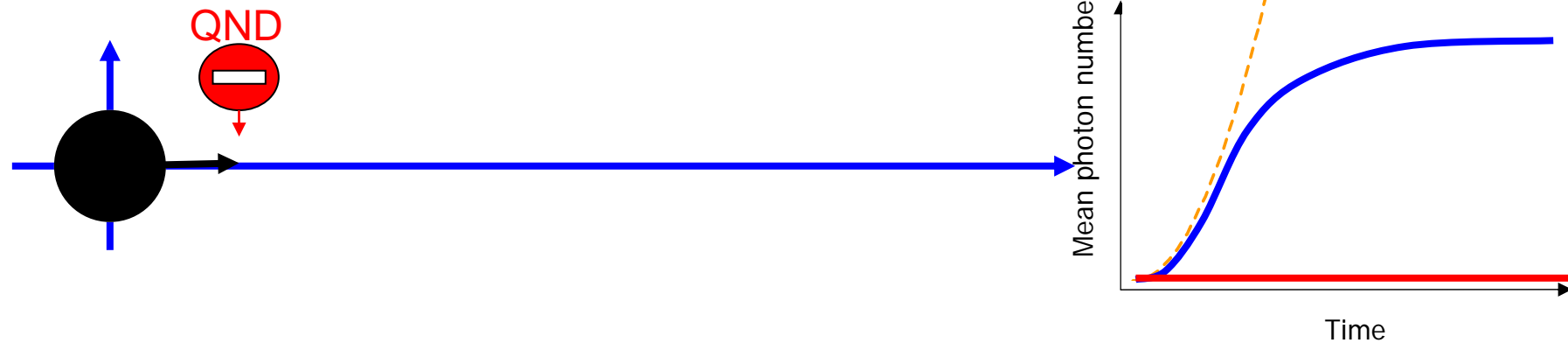


Effet Zénon quantique

- Évolution cohérente: injection d'un champ par une source classique



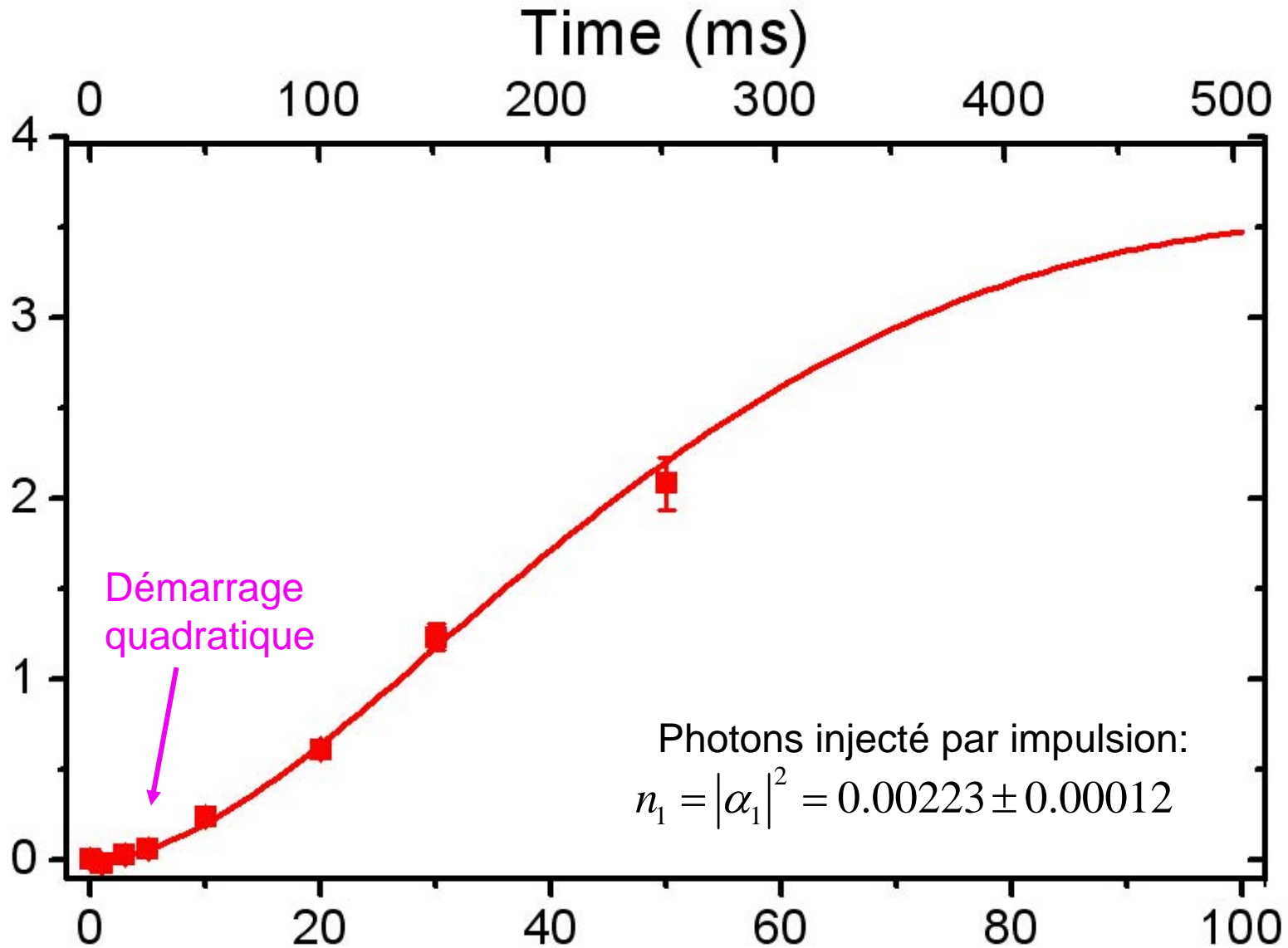
–Injection répétée d'impulsions cohérentes en phase: amplitude finale varie linéairement avec le nombre d'injections
(le nombre de photons varie quadratiquement).



Principe de l'expérience: Mesure QND du nombre de photons entre deux injections de champ



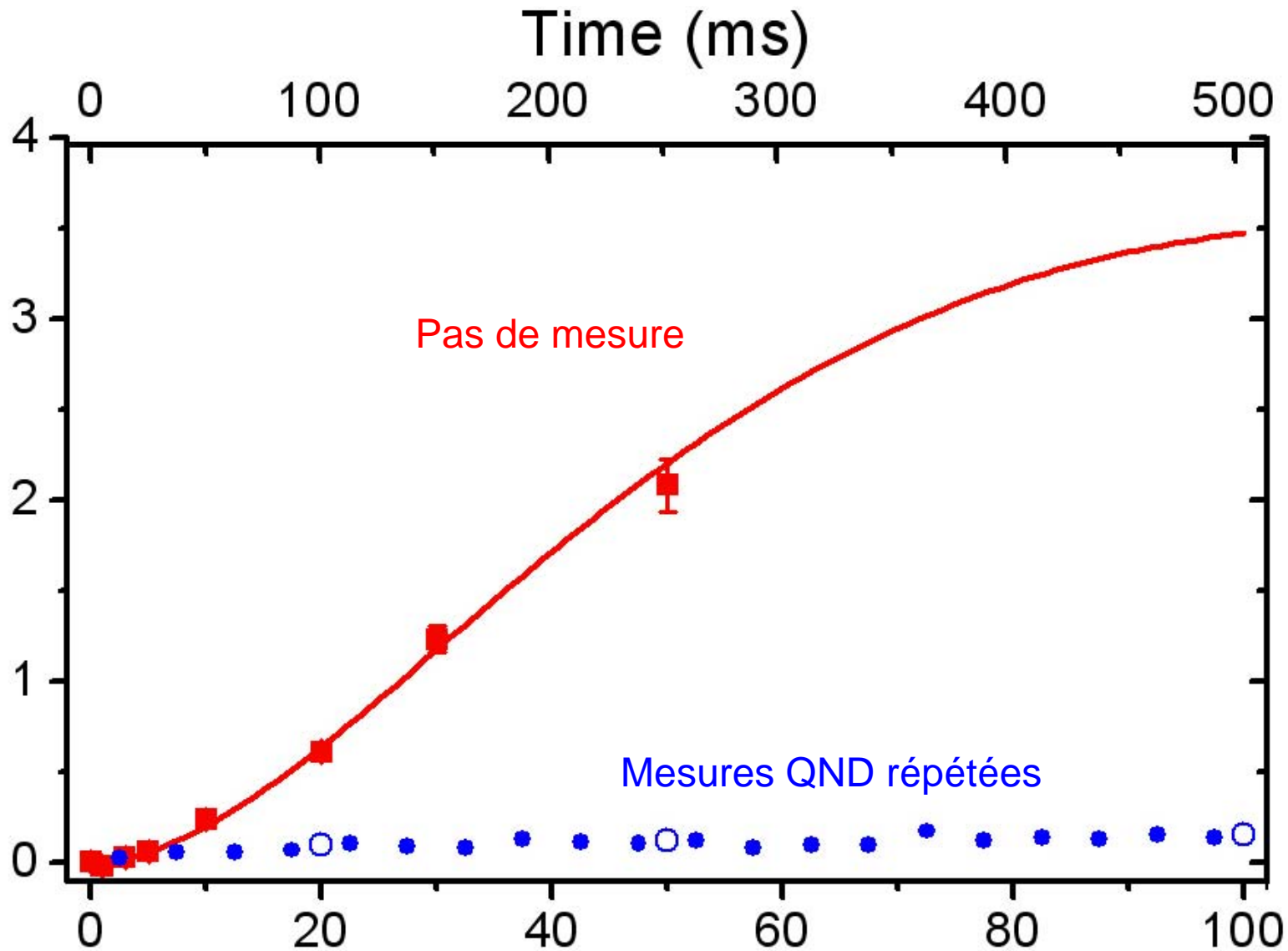
Croissance d'un champ cohérent





Croissance inhibée

J. Bernu et al, PRL, soumis





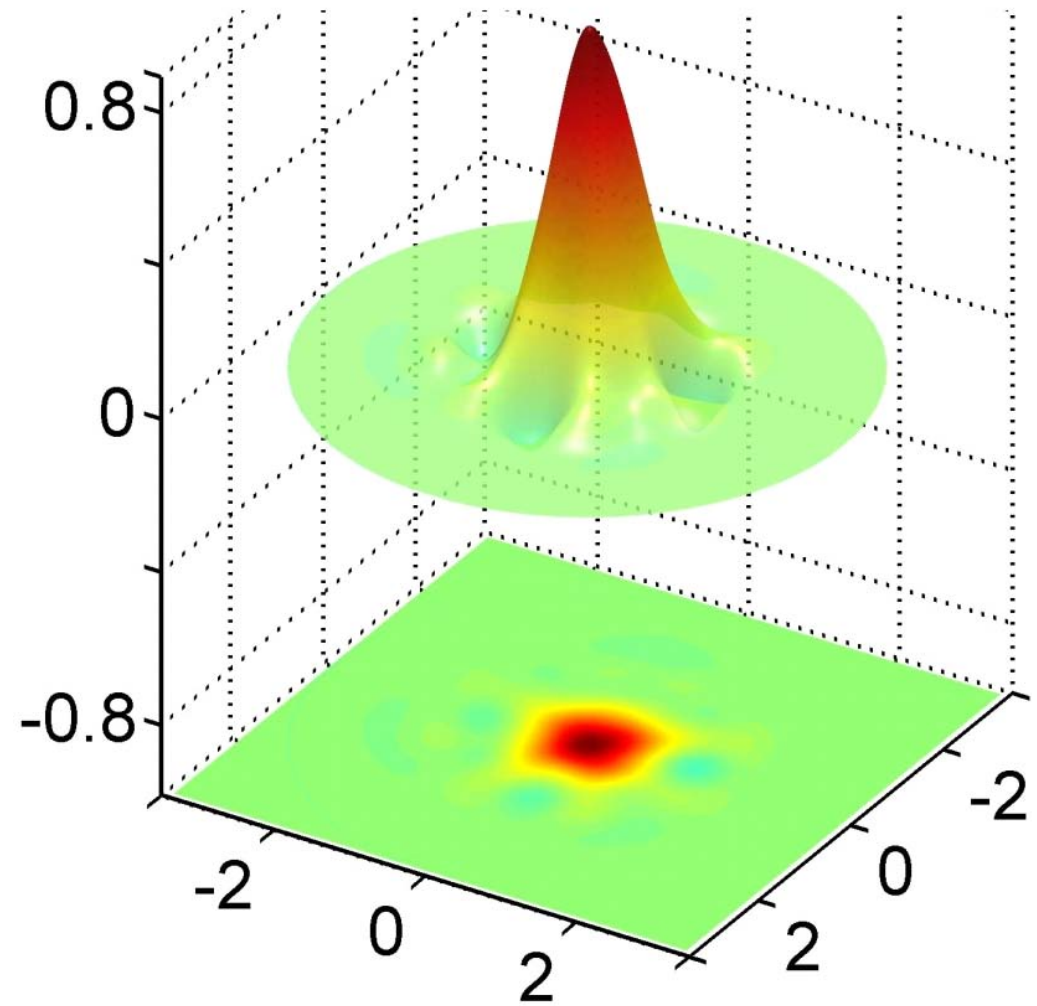
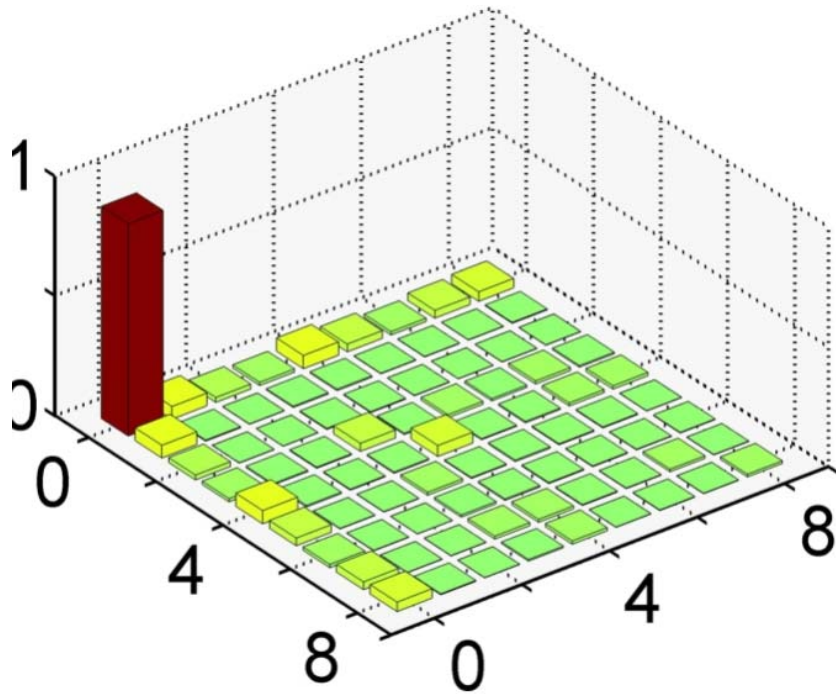
Mesurer l'état quantique du champ

- **Mesure QND du nombre de photons**
 - Ensemble de systèmes dans le même état: détermination de la distribution du nombre de photons
 - **Pas d'information sur les cohérences** (éléments non-diagonaux de la matrice densité)
- **Déplacement du champ**
 - Injection d'une amplitude cohérente α
 - Transformation connue de la matrice densité
 - **Mélange éléments diagonaux et non diagonaux**
- **Mesure pour un grand nombre d'amplitudes réparties dans le plan**
 - Détermination de la matrice densité qui
 - S'accorde au mieux avec les données
 - Est d'entropie maximale (pas d'autre information que les mesures)
 - Principe Maximum Entropy
 - **Reconstruction complète de l'état quantique du champ**



Etats de Fock

- $n=0$

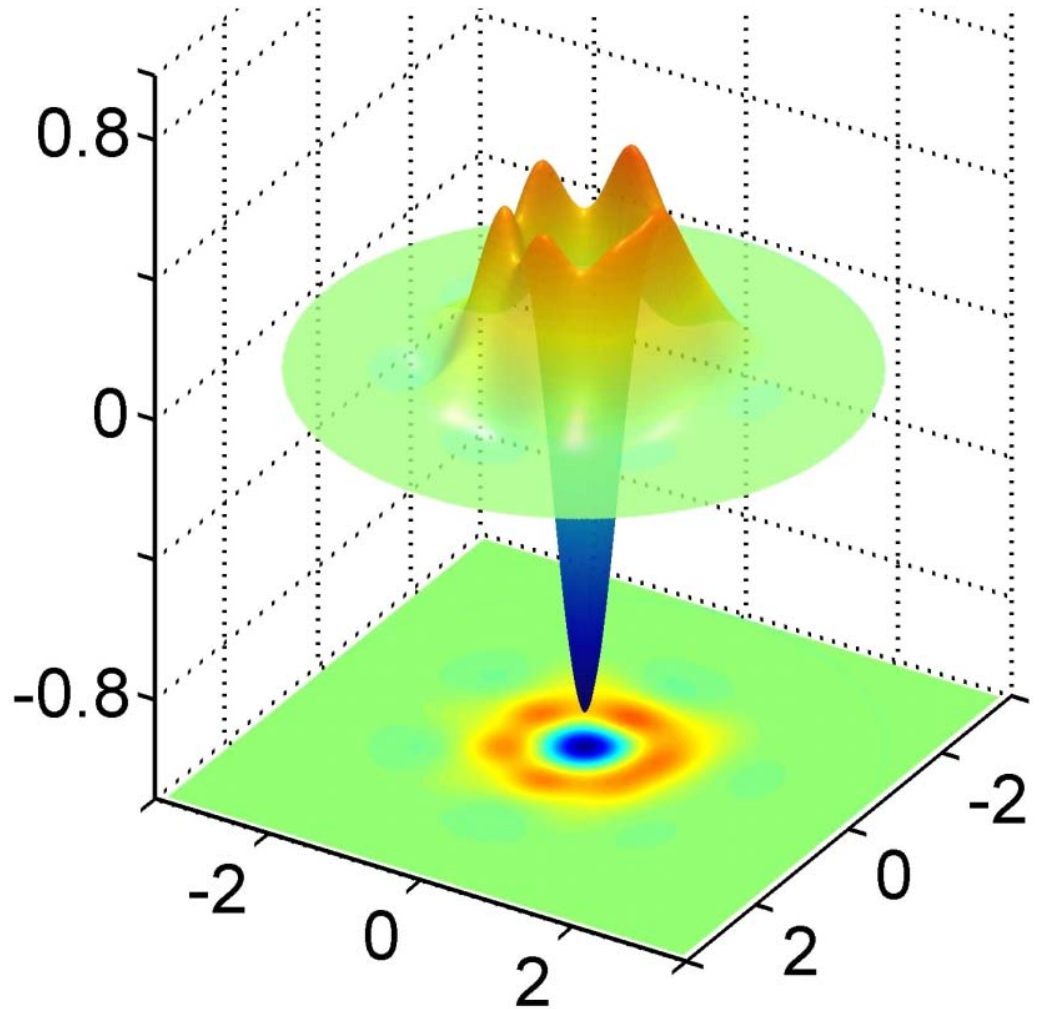
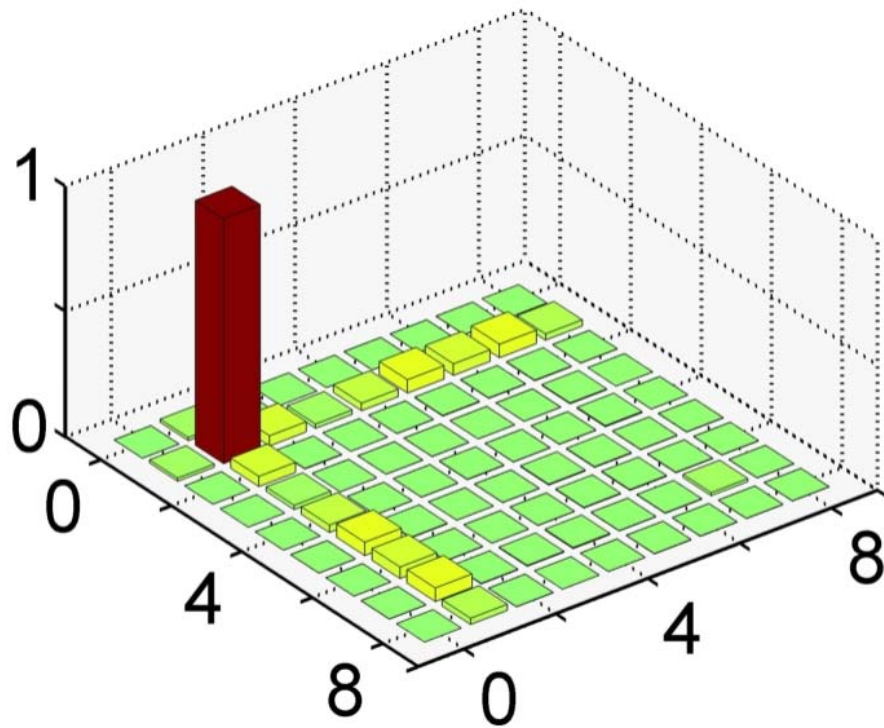


$F=0.89$



Etats de Fock

- $n=1$

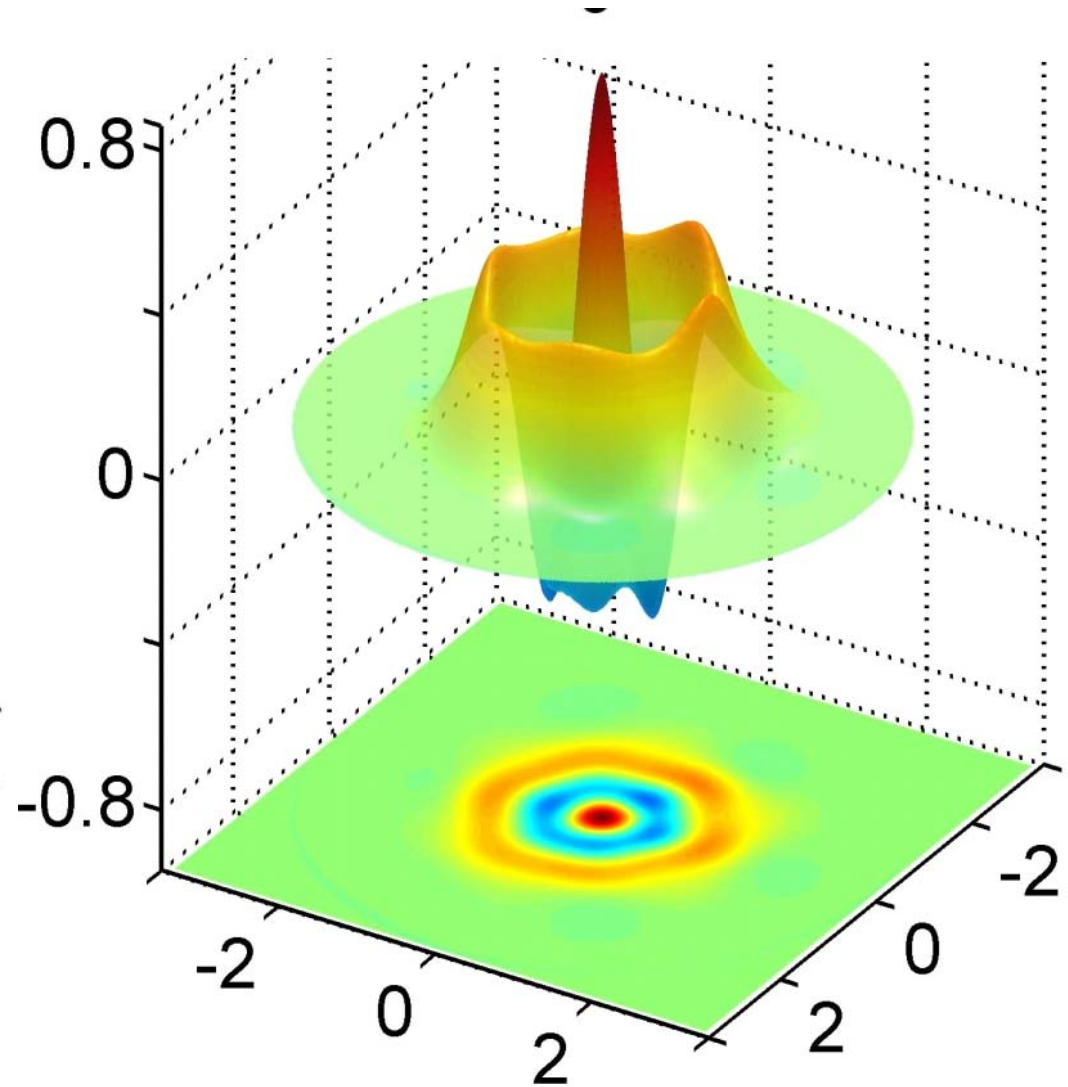
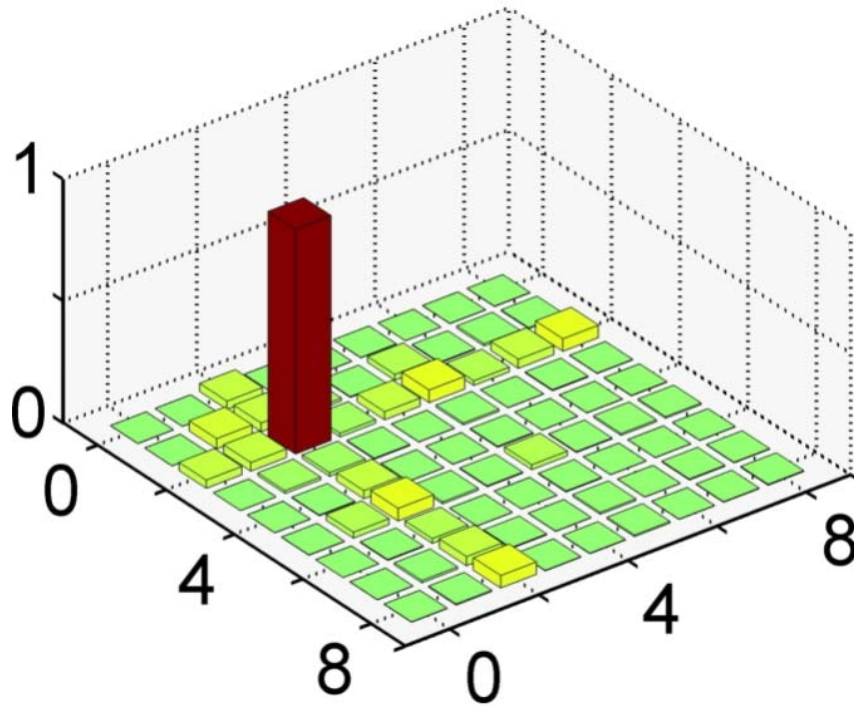


F=0.98



Etats de Fock

- $n=2$

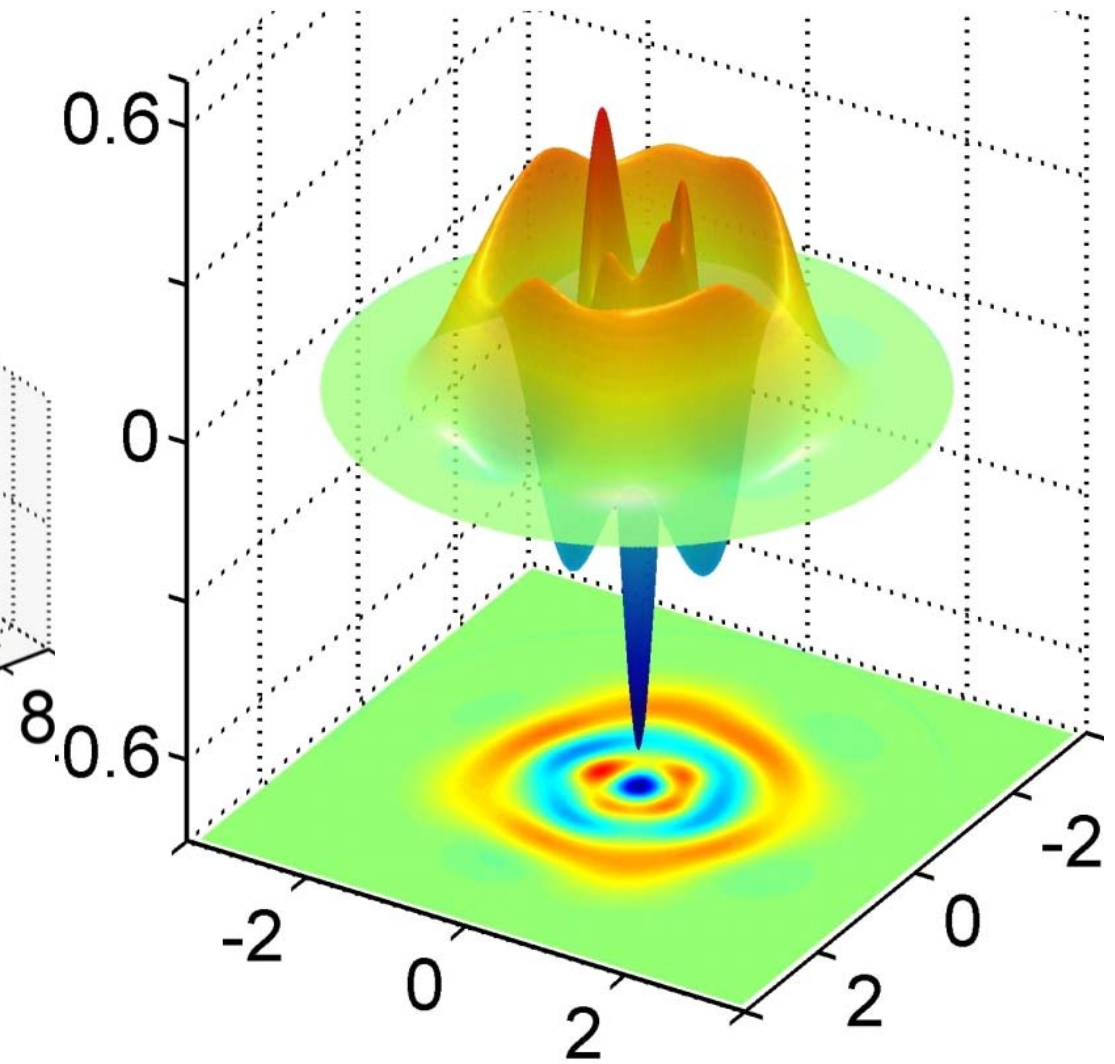
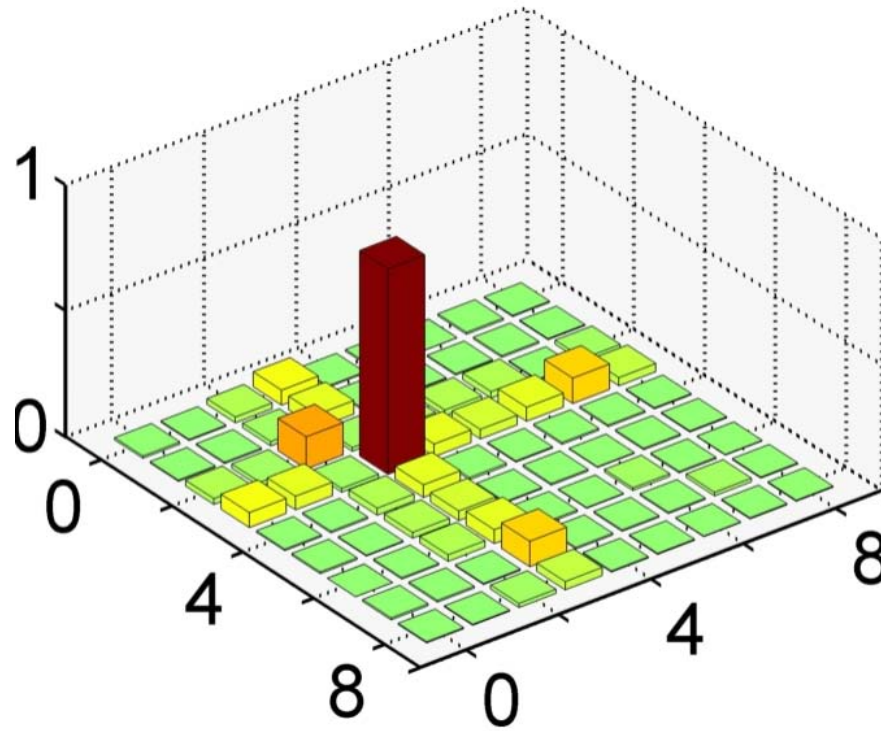


$F=0.92$



Etats de Fock

- $n=3$

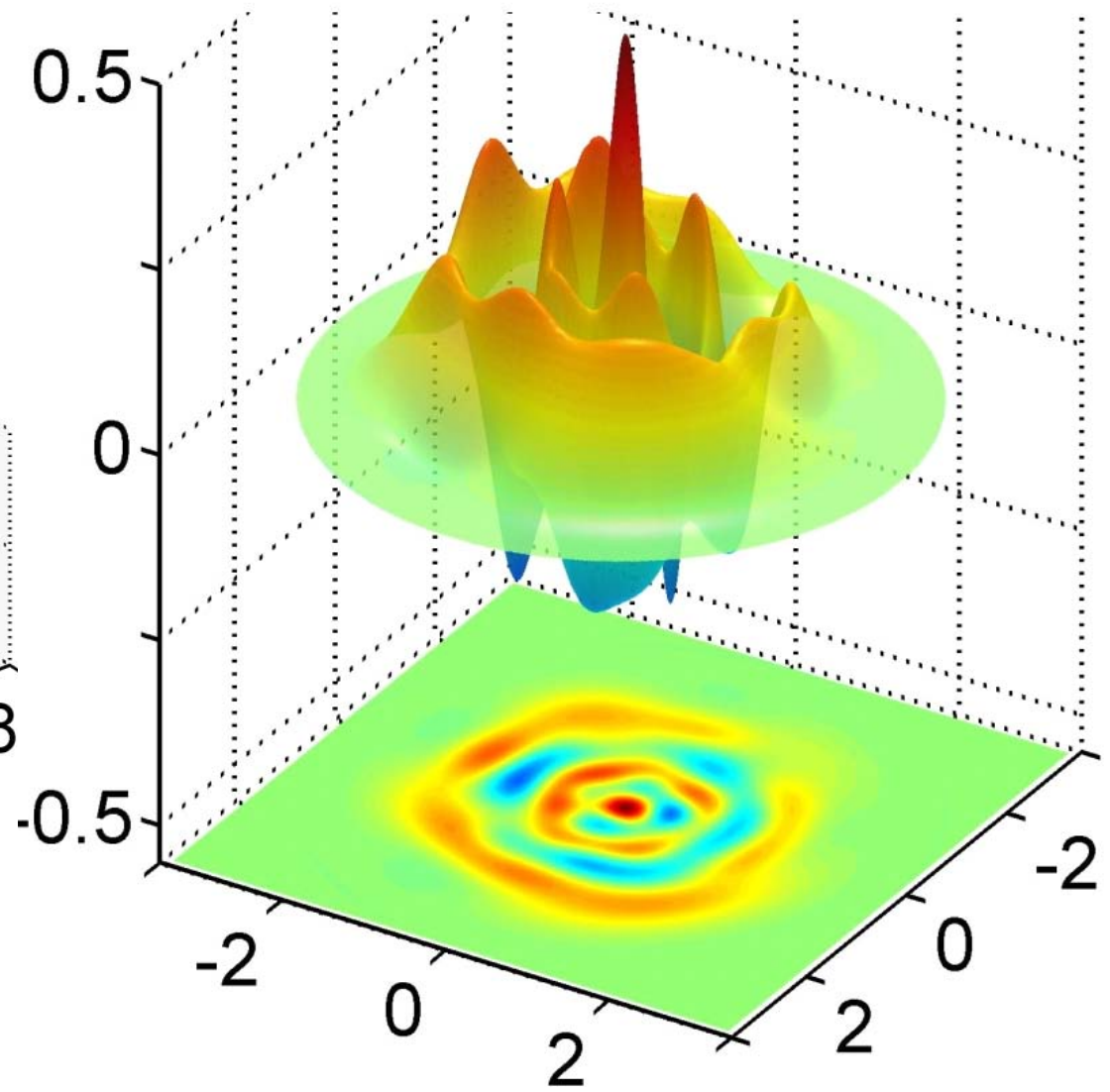
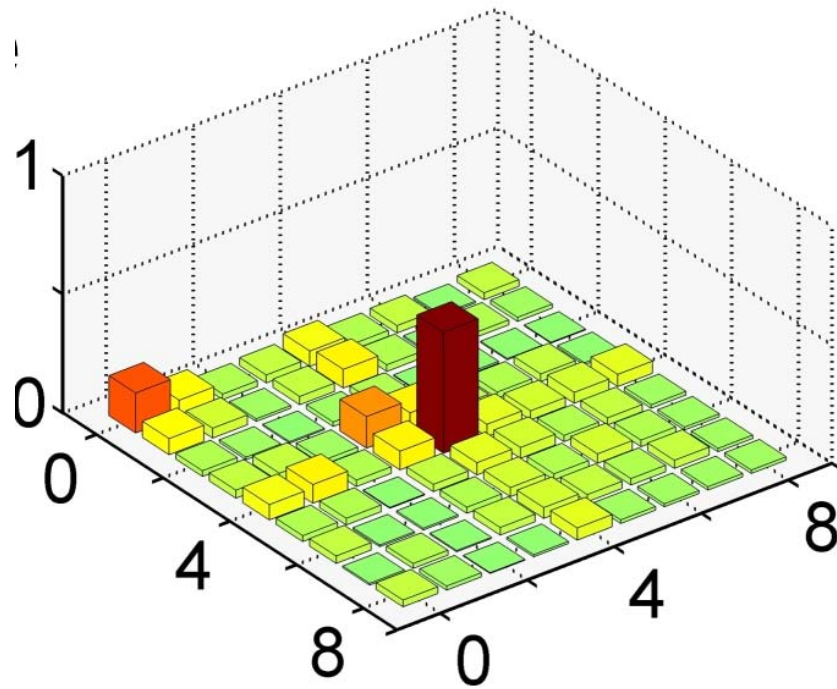


$F=0.82$



Etats de Fock

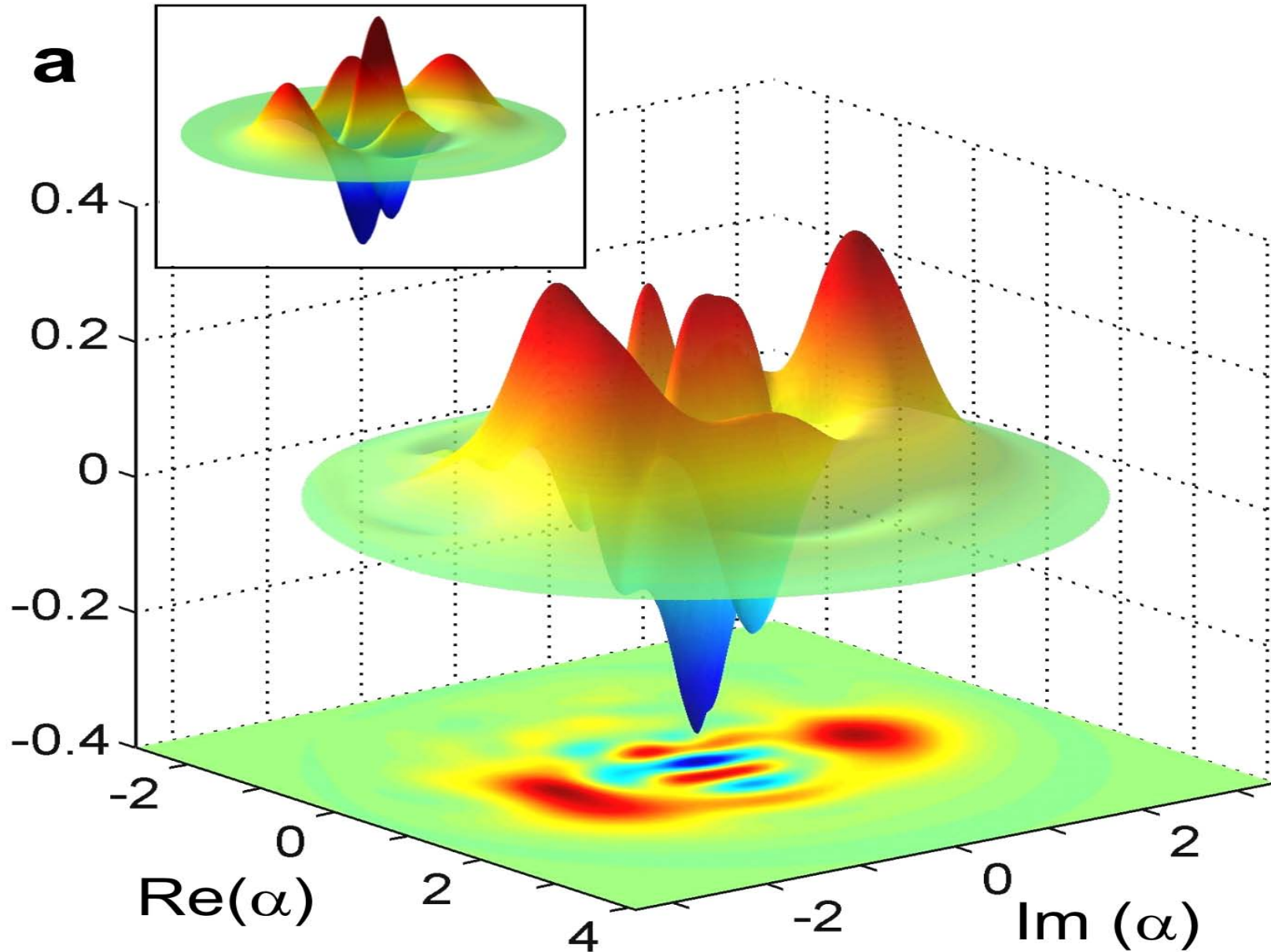
- $n=4$



$F=0.51$



Instantané d'un chat de Schrödinger



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



Conclusion et perspectives

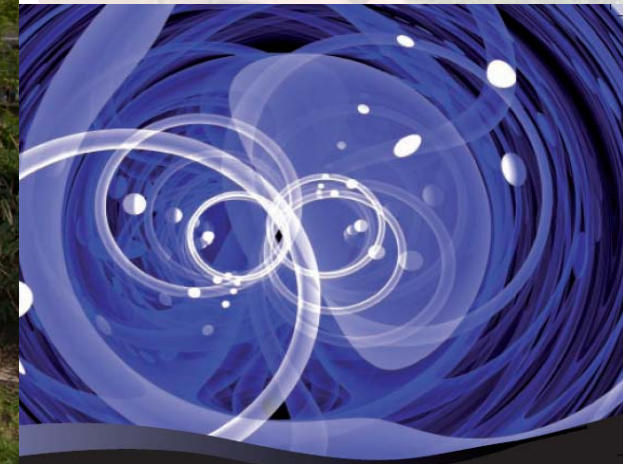
- Réalisation d'une mesure idéale du nombre de photons
 - une illustration directe des postulats de la mesure
 - un seul quantum contrôle l'état de centaines d'atomes
 - prometteur pour le traitement quantique de l'information
 - préparation d'états non-classiques du champ
 - états de Fock à grand nombre de photons
 - Observation de l'effet Zénon quantique
 - Mesure directe de la fonction de Wigner du champ
 - Accès à l'état quantique complet
 - Études quantitatives de la décohérence
- Perspectives
 - Rétroaction quantique
 - Utiliser l'information de la mesure pour rétroagir sur l'état du champ
 - Une expérience à deux cavités
 - Des chats de Schrödinger non locaux

Notre équipe

- Permanents:
 - S. Haroche, M. Brune, G. Nogues, JM Raimond
- Electrodynamique en cavité
 - S. Kuhr, I. Dotsenko
 - S. Gleyzes, C. Sayrin
- Puces à atomes
 - A. Lupascu
 - T. Nirrengart
- www.cqed.org
- €€:
 - JST (ICORP)
 - EC (Conquest, Qgates, Scala)
 - CNRS
 - UMPC
 - IUF
 - CdF



C. Sayrin



Exploring the Quantum

Atoms, Cavities, and Photons

Serge Haroche and
Jean-Michel Raimond

OXFORD GRADUATE TEXTS