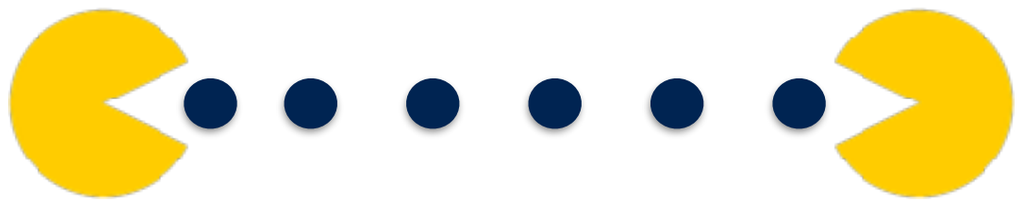
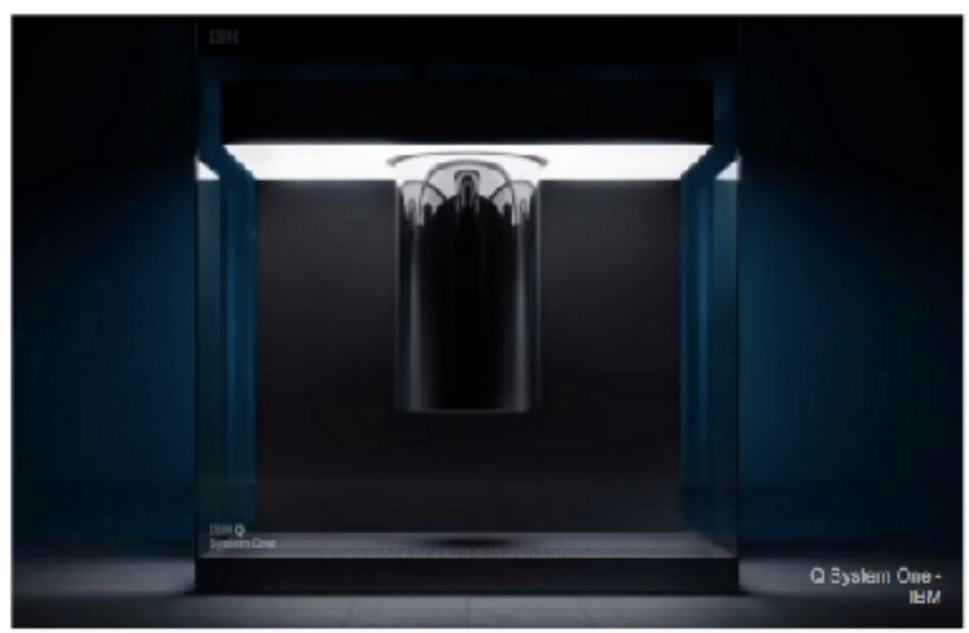
Des photons pour l'information quantique



Pérola Milman (MPQ)
Florent Baboux (MPQ)
Loïc Lanco (C2N)



Nos ordinateurs sont fabuleux...
...mais ils ont des limitations intrinsèques

il y a des problèmes qui peuvent être résolu de façon efficace
par des machines à calculer classiques et d'autres non

Efficace: les ressources (temps, espace, énergie...) augmentent de façon **non-exponentielle** avec la taille du problème.

Pas d'algorithme efficace -> Problème difficile

Exemple (on le pense): la factorisation

D'autres problèmes de nos ordinateurs

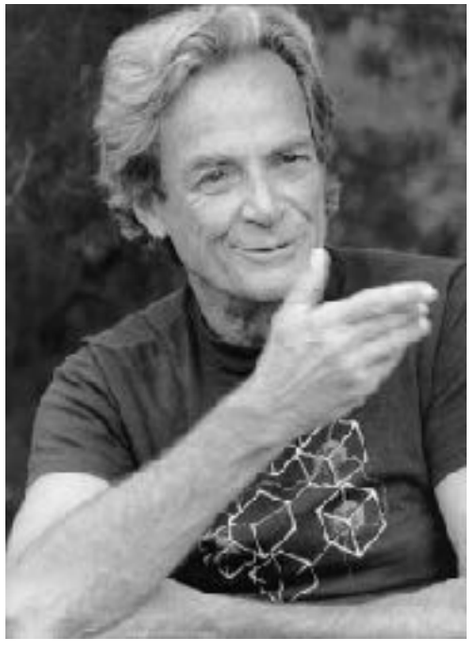
Simulation de certains systèmes physiques complexes

Encryptage de données inconditionnellement sûre

Peut-on inventer une machine qui résolve ces problèmes (ou au moins une partie) ?

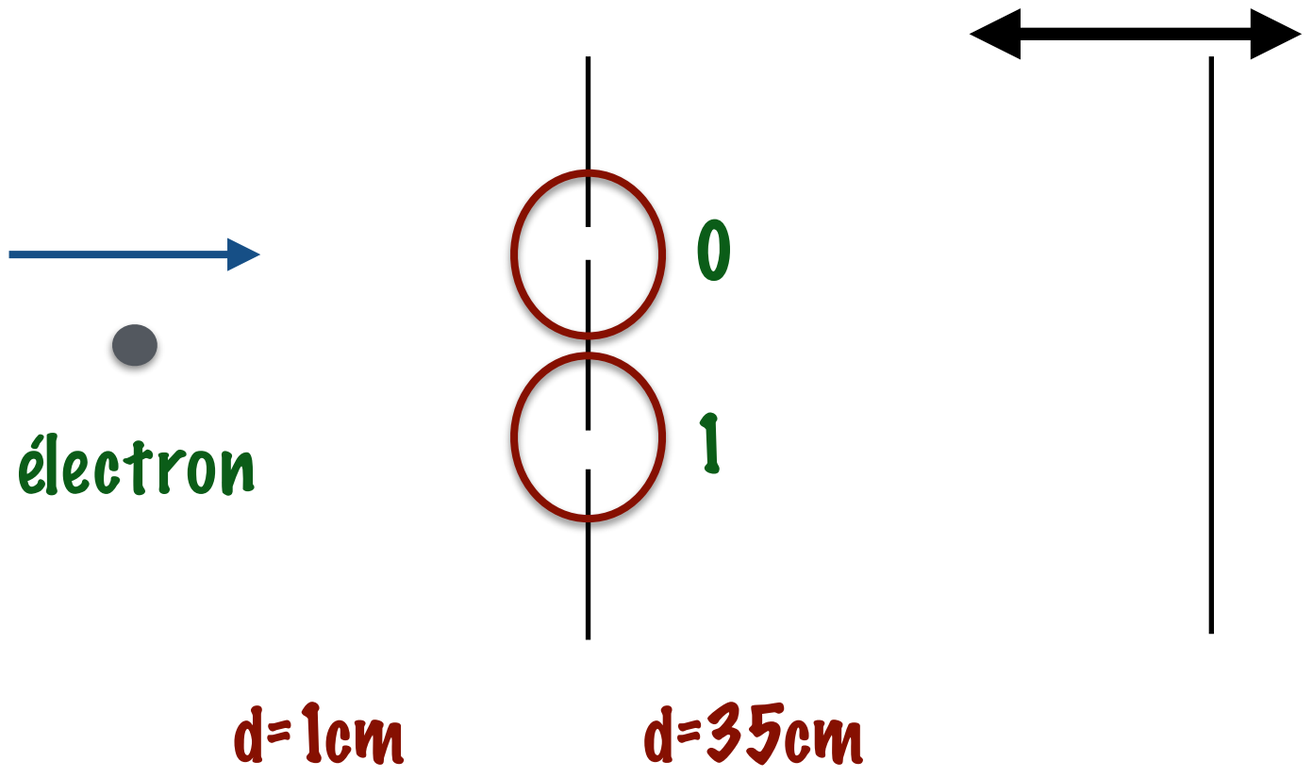
Utilisation des principes de la physique quantique pour le calcul, la simulation et la transmission d'information

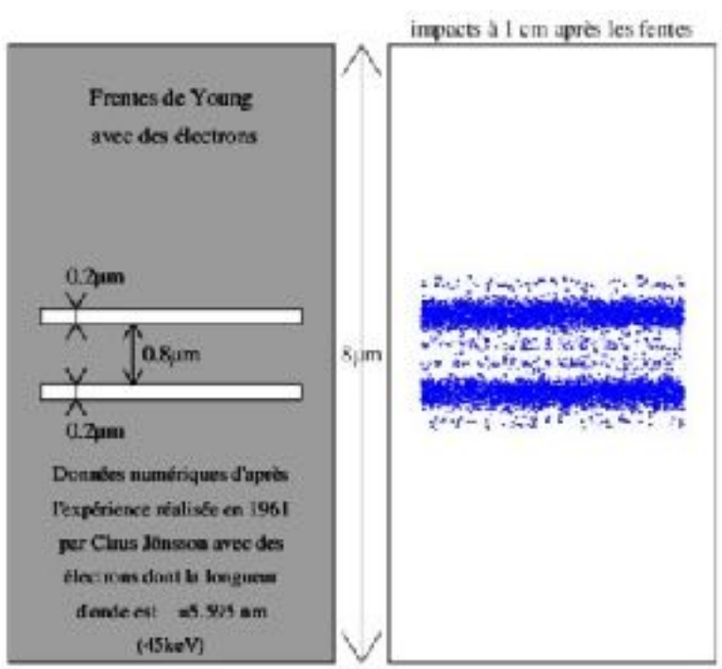
Peter Shor



Richard P. Feynman (1918-1988)

L'expérience de Young



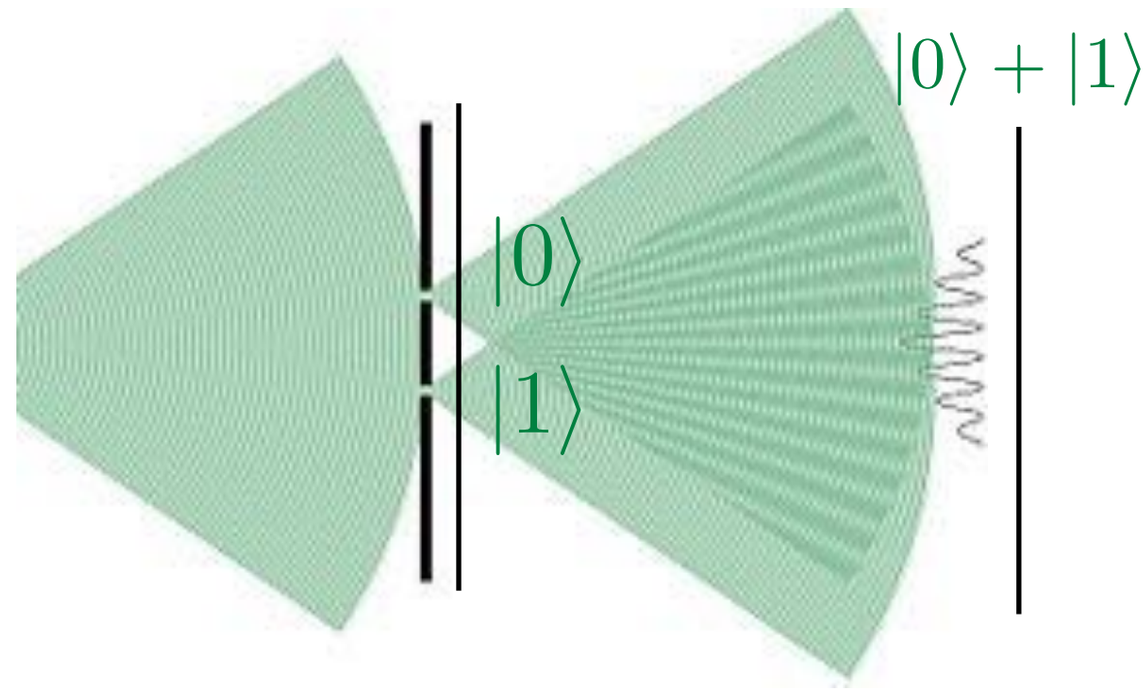


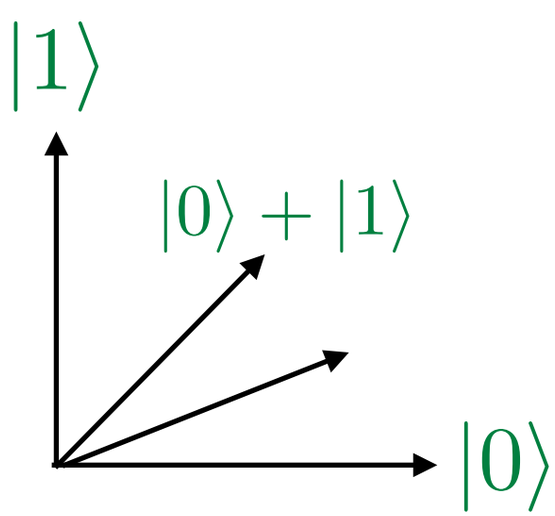
Comment comprendre cela?

Des bits classiques aux qubits (bits quantiques)

Bits

0 et 1





Des "bits quantiques" (qubits) qui peuvent être dans différents états (fentes) à la fois

Les qubits sont manipulés par de portes logiques quantiques

Des portes universelles combinées permettent la réalisation de tout calcul quantique

Hadamard

$$|1\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$

$$|0\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$$

CNOT

$$|0\rangle|0\rangle \rightarrow |0\rangle|0\rangle$$

$$|0\rangle|1\rangle \rightarrow |0\rangle|1\rangle$$

$$|1\rangle|0\rangle \rightarrow |1\rangle|1\rangle$$

$$|1\rangle|1\rangle \rightarrow |1\rangle|0\rangle$$

Exploits du calcul quantique

La factorisation devient un problème facile (prouvé)

Réalisation de simulateurs quantiques

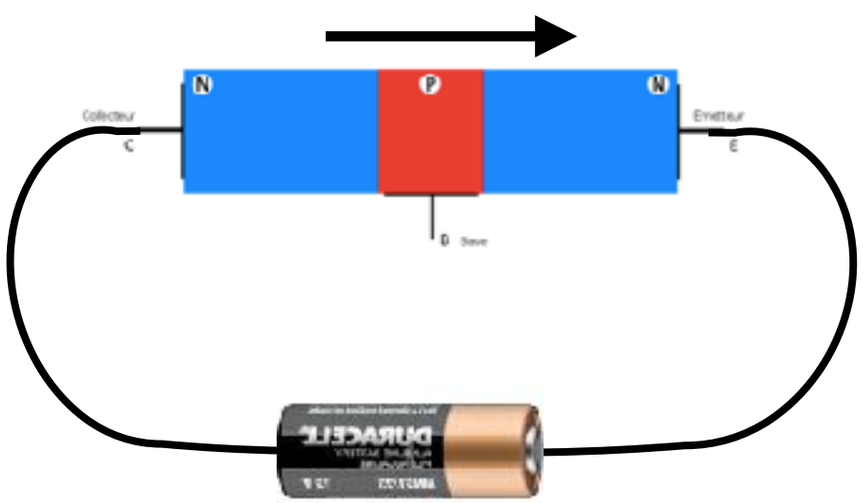
Certains problèmes d'échantillonnage deviennent faciles

Protocoles de communication inconditionnellement sûrs basés sur une propriété physique: l'intrication

Comment réaliser un ordinateur quantique?

ordinateurs classiques

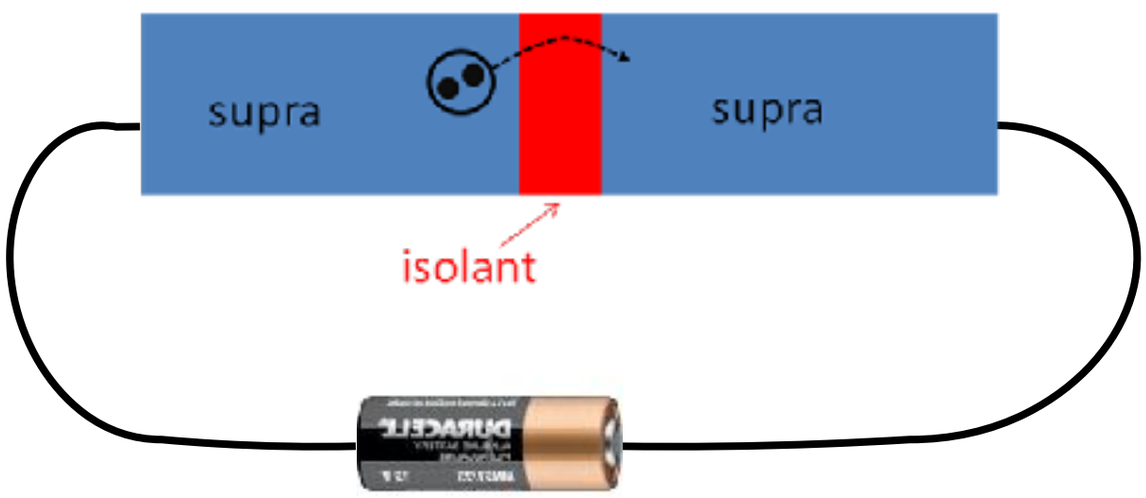
0 ou 1



circuits supraconducteurs (T proche de - 272°C)

$|1\rangle$ les paires de électron traversent la barrière

$|0\rangle$ pas de courant

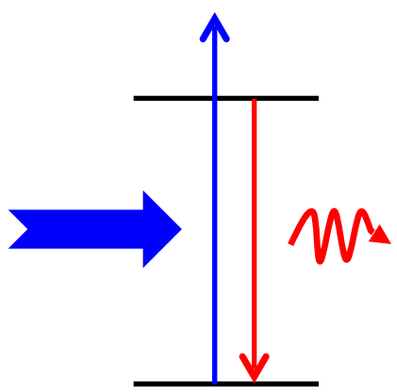


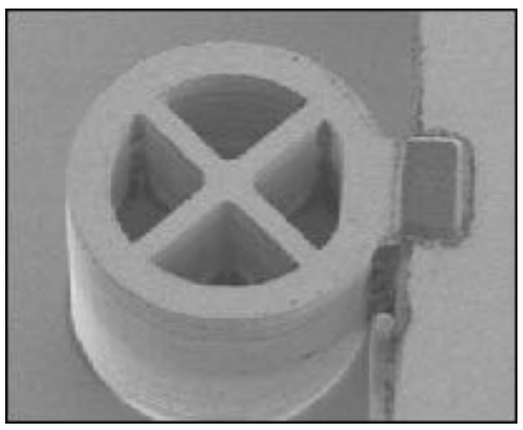
Des circuits à baisse température avec des propriétés quantiques

Des qubits photoniques

Systèmes à 2 niveaux
=> Photons uniques

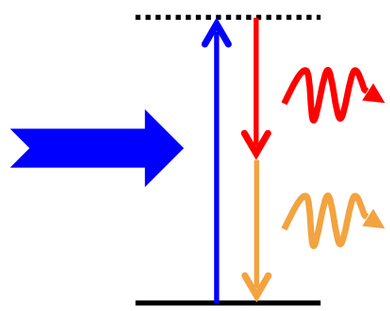
Boites quantiques,
défauts dans diamant, etc.

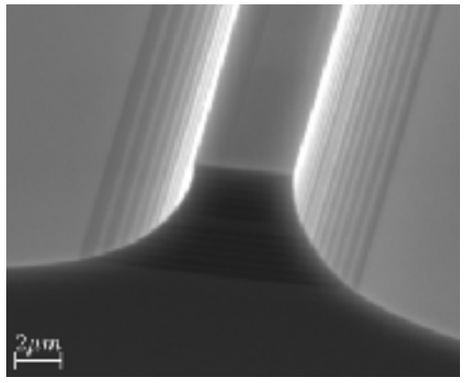




Processus optique non-linéaire
=> Paires de photons

Matériaux diélectriques (LN, KTP…)
ou semiconducteurs (GaAs, Si…)





2e partie :

Circuits photoniques quantiques

Florent Baboux, Maria Amanti, Sara Ducci

Doctorants : Saverio Francesconi, Félicien Appas, Jérémie Schuhmann

Journée de l'UFR – 25 juin 2019

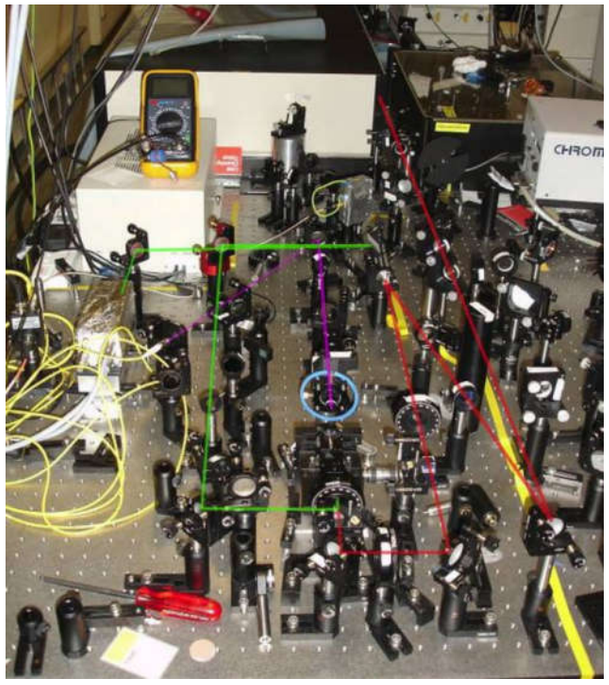
Faire tenir un labo d'optique quantique sur une puce?

Génération d'états quantiques → **Manipulation**

Massif

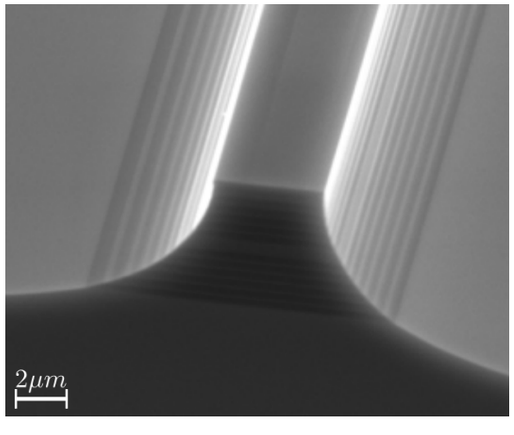
Taille ~ 5 cm

Taille ~ 1 m



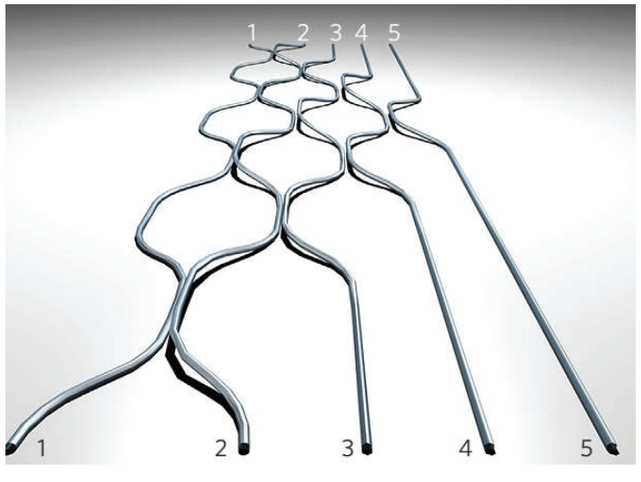
Intégré

5 µm



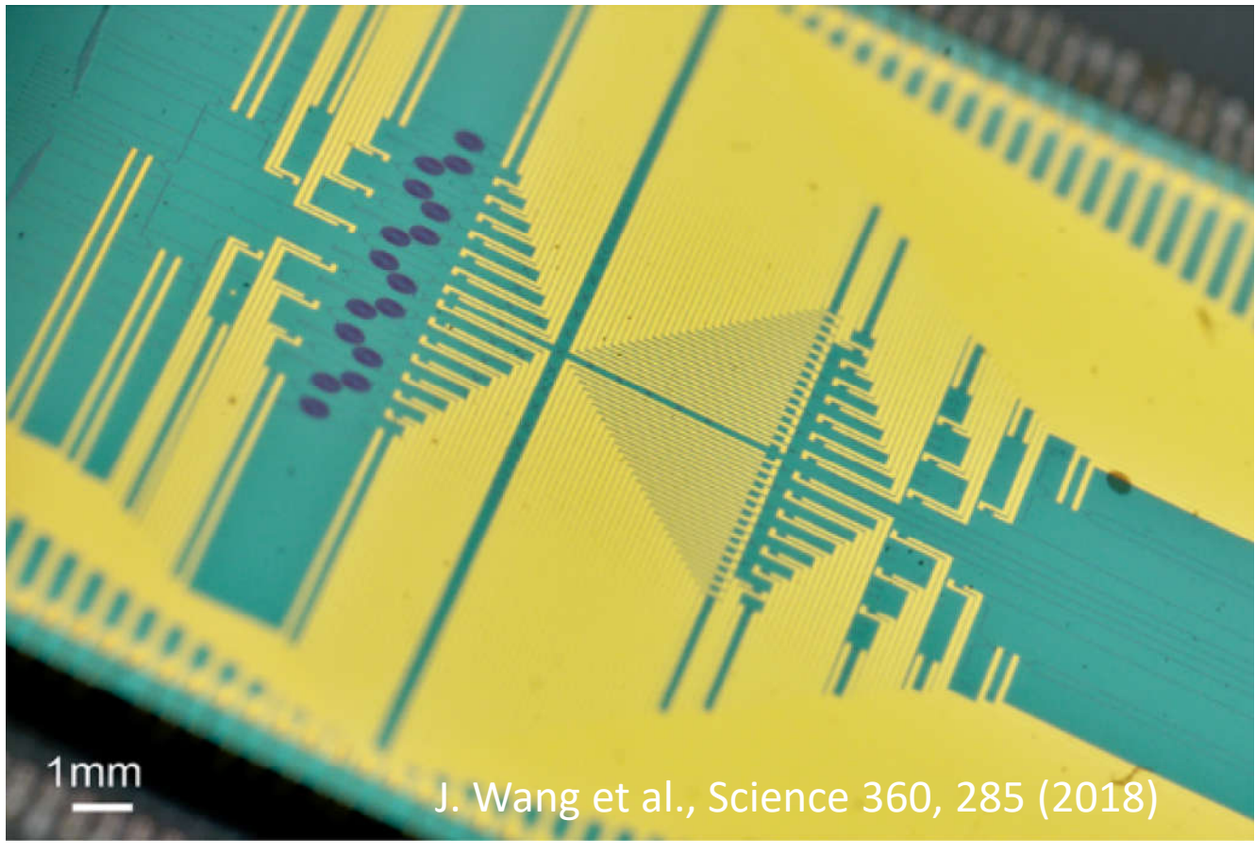
Guide d'ondes

50 µm



Réseau de guides d'ondes avec coupleurs, contrôleurs de polarisation…

Faire tenir un labo d'optique quantique sur une puce?



J. Wang et al., Science 360, 285 (2018)

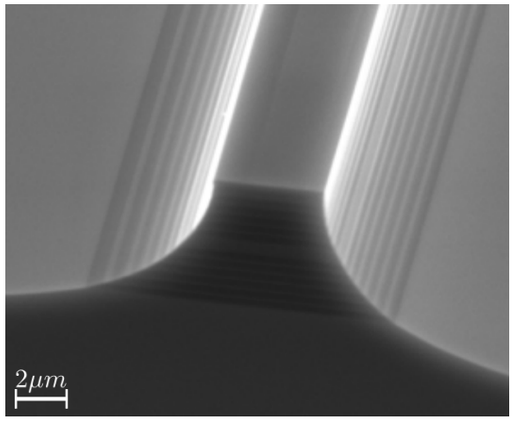
« Circuit photonique Quantique »

Avantages :

- stabilité
- compacité

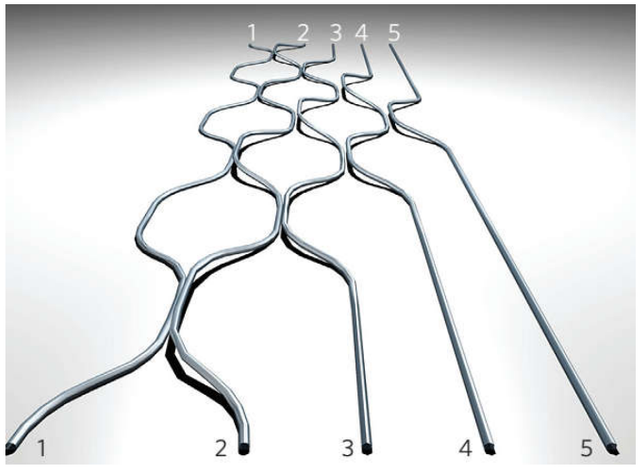
Intégré

5 µm



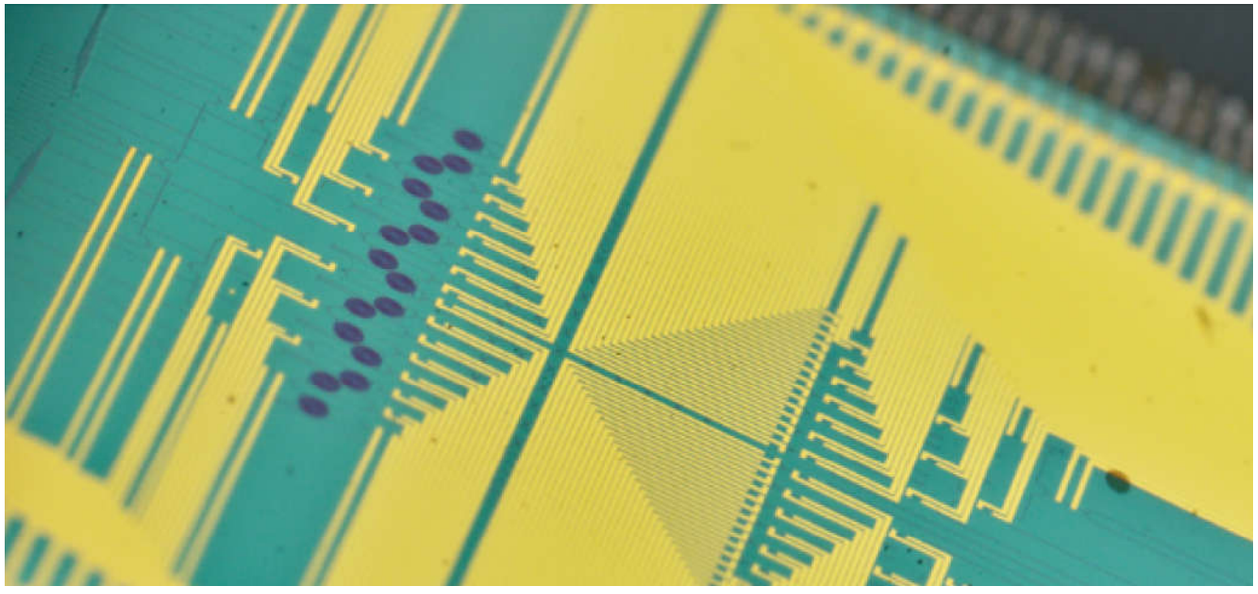
Guide d'ondes

50 µm



Réseau de guides d'ondes avec coupleurs, contrôleurs de polarisation…

Faire tenir un labo d'optique quantique sur une puce?



« Circuit photonique Quantique »

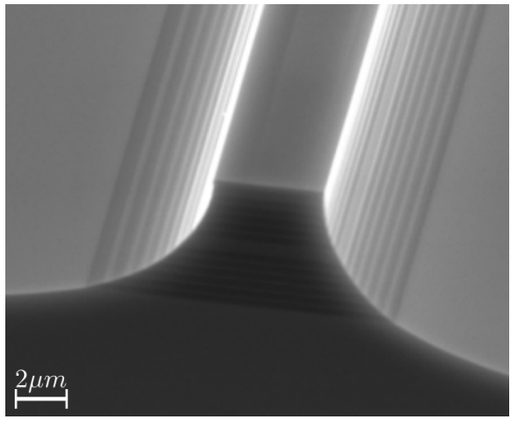
Avantages :

- stabilité
- compacité

Intégration d'une source de photons et d'une lame séparatrice sur une puce GaAs

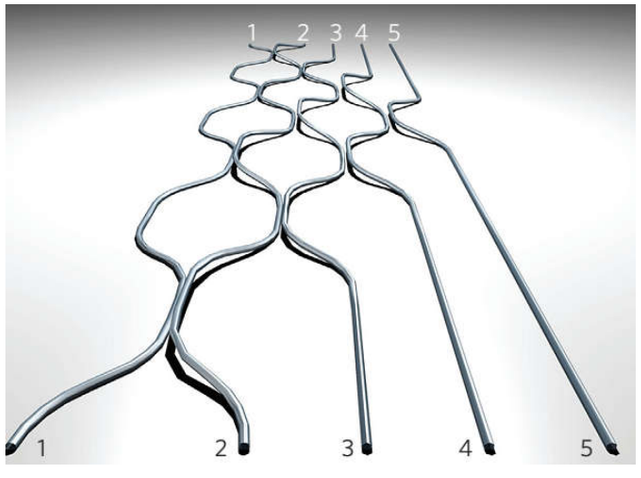
Intégré

5 µm



Guide d'ondes

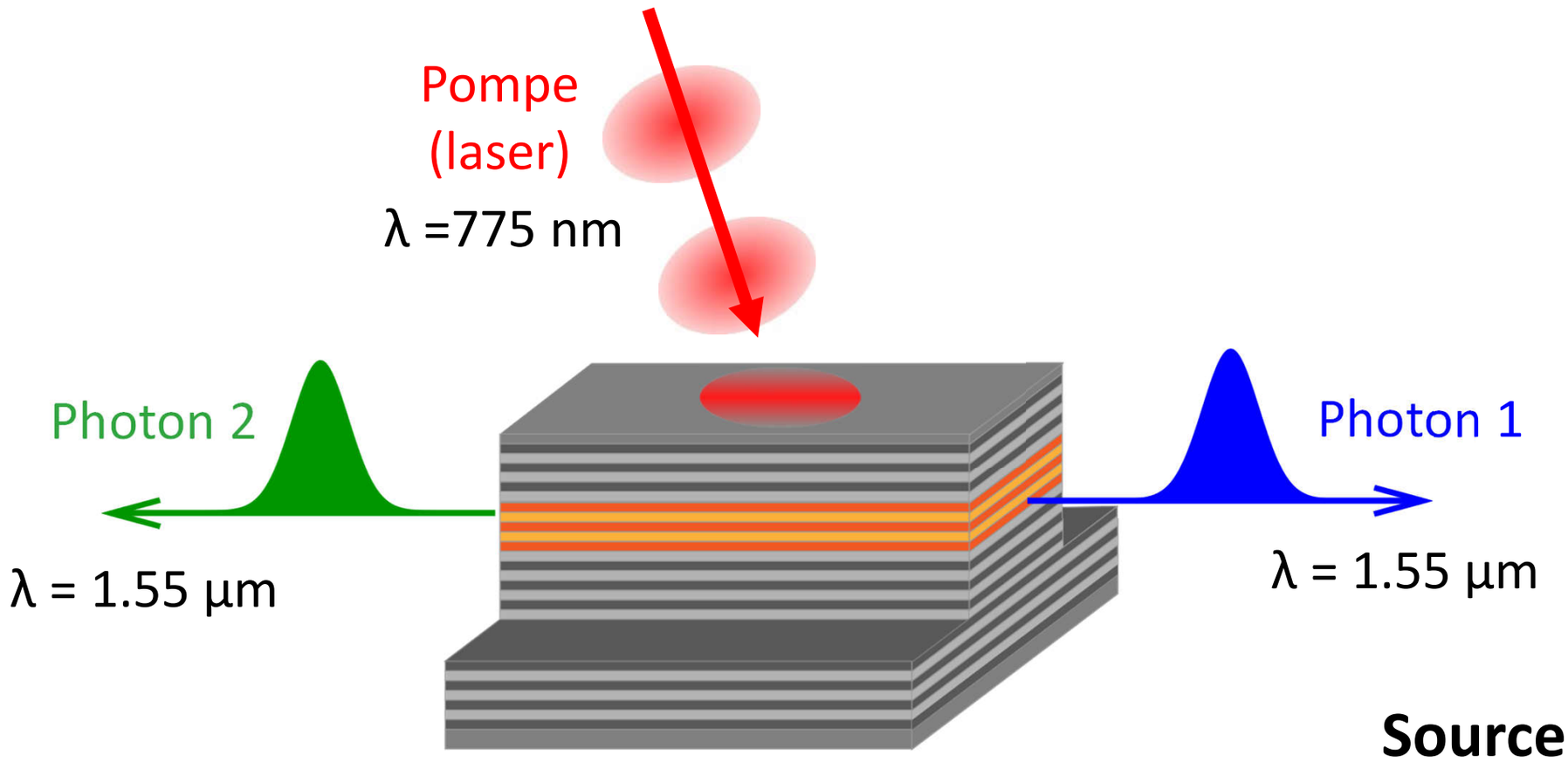
50 µm



Réseau de guides d'ondes avec coupleurs, contrôleurs de polarisation…

Conversion paramétrique spontanée

Conversion paramétrique spontanée dans un guide d'onde non-linéaire :

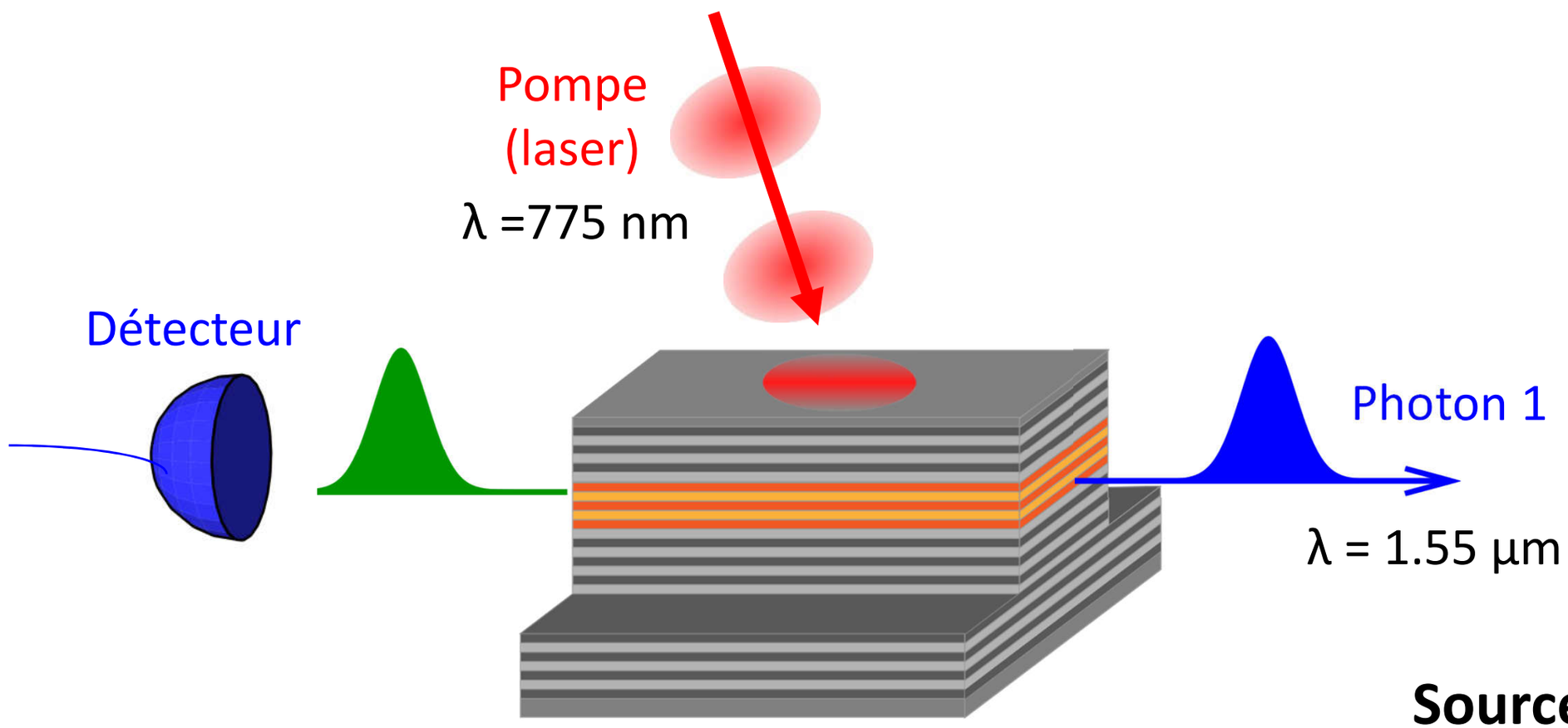


Source de
paires de photons

Epitaxie : A. Lemaître (C2N)
Gravure : S. Suffit, P. Filloux (MPQ)

Conversion paramétrique spontanée

Conversion paramétrique spontanée dans un guide d'onde non-linéaire :

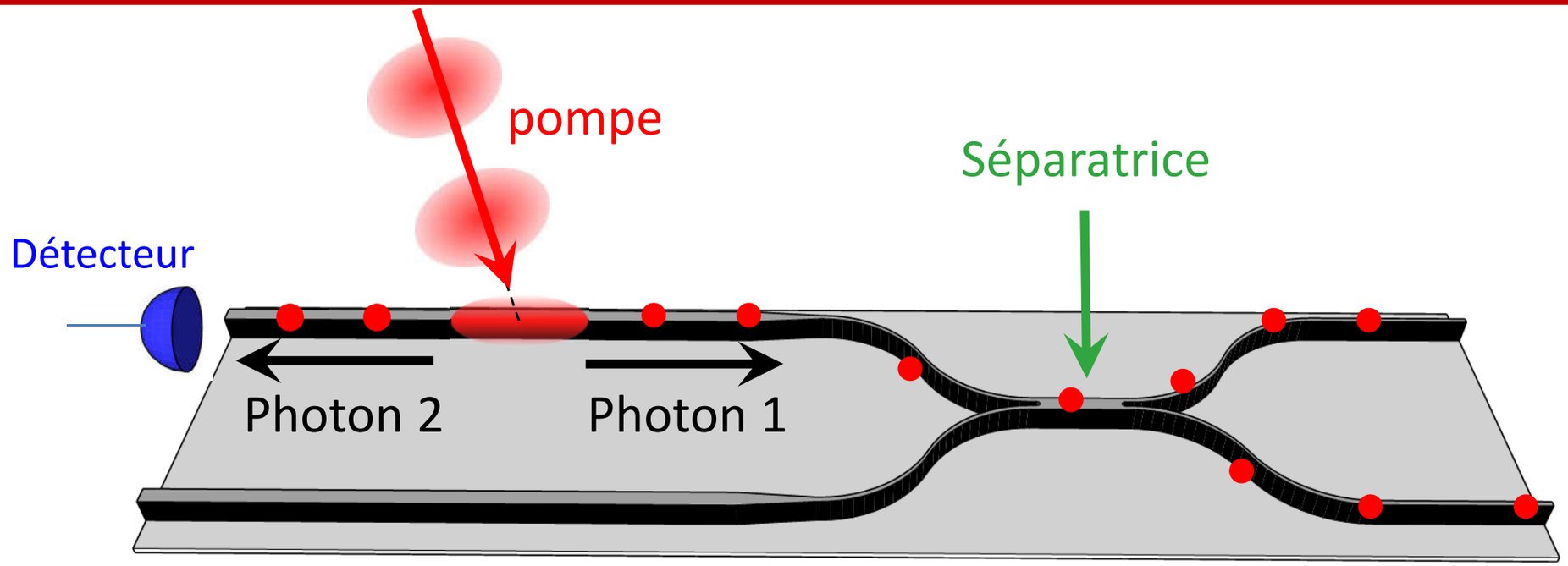


Guide d'onde AlGaAs

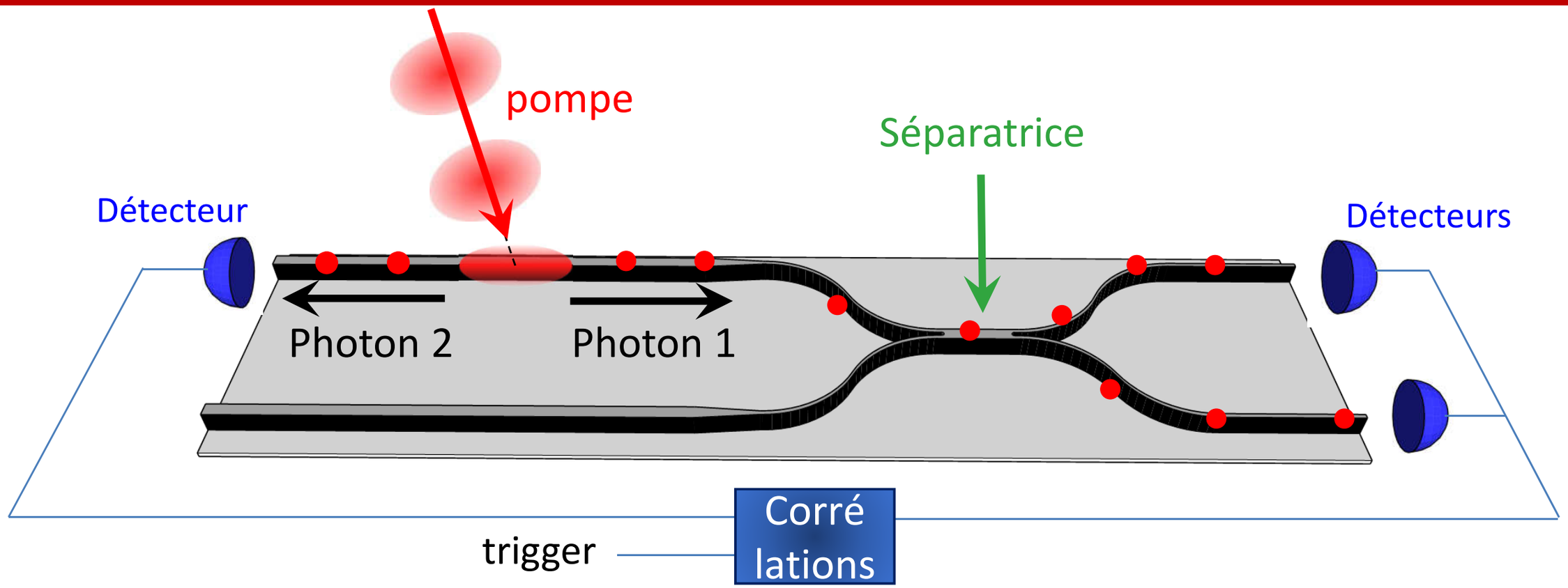
Source de photons uniques annoncés

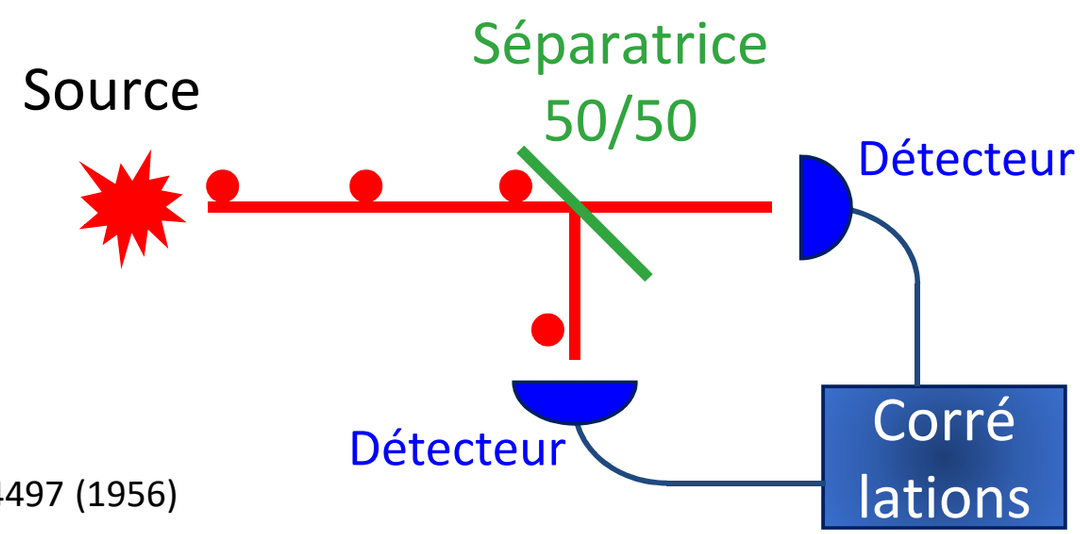
Epitaxie : A. Lemaître (C2N)
Gravure : S. Suffit, P. Filloux (MPQ)

Design du circuit photonique



Expérience de « Hanbury Brown & Twiss » intégrée



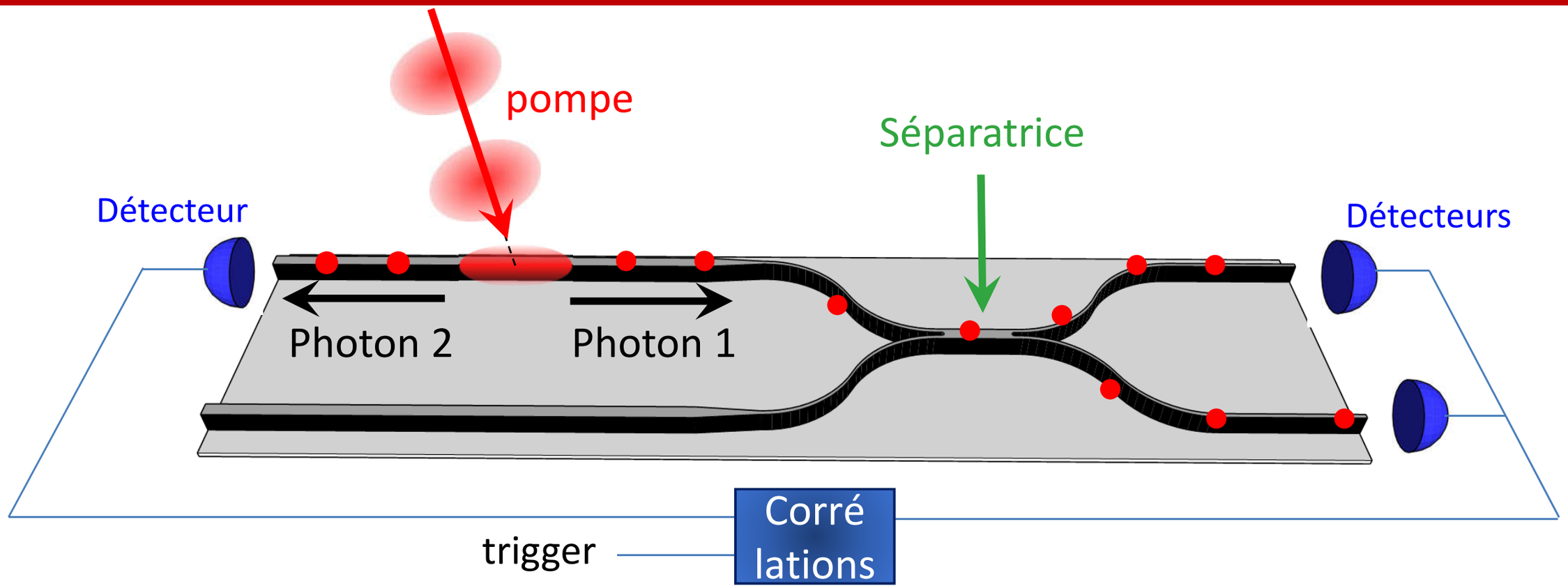


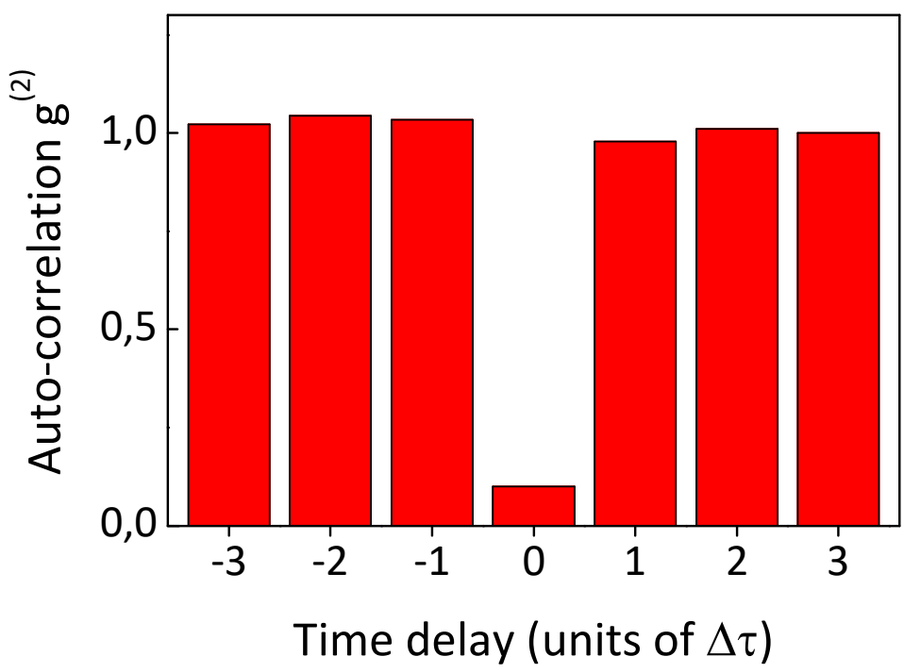
Mesure de la fonction de corrélation temporelle $g^{(2)}(\tau)$

Hanbury Brown & Twiss, Nature 177, 4497 (1956)

Pour une source de photons uniques idéale $g^{(2)}(0) = 0$

Expérience de « Hanbury Brown & Twiss » intégrée

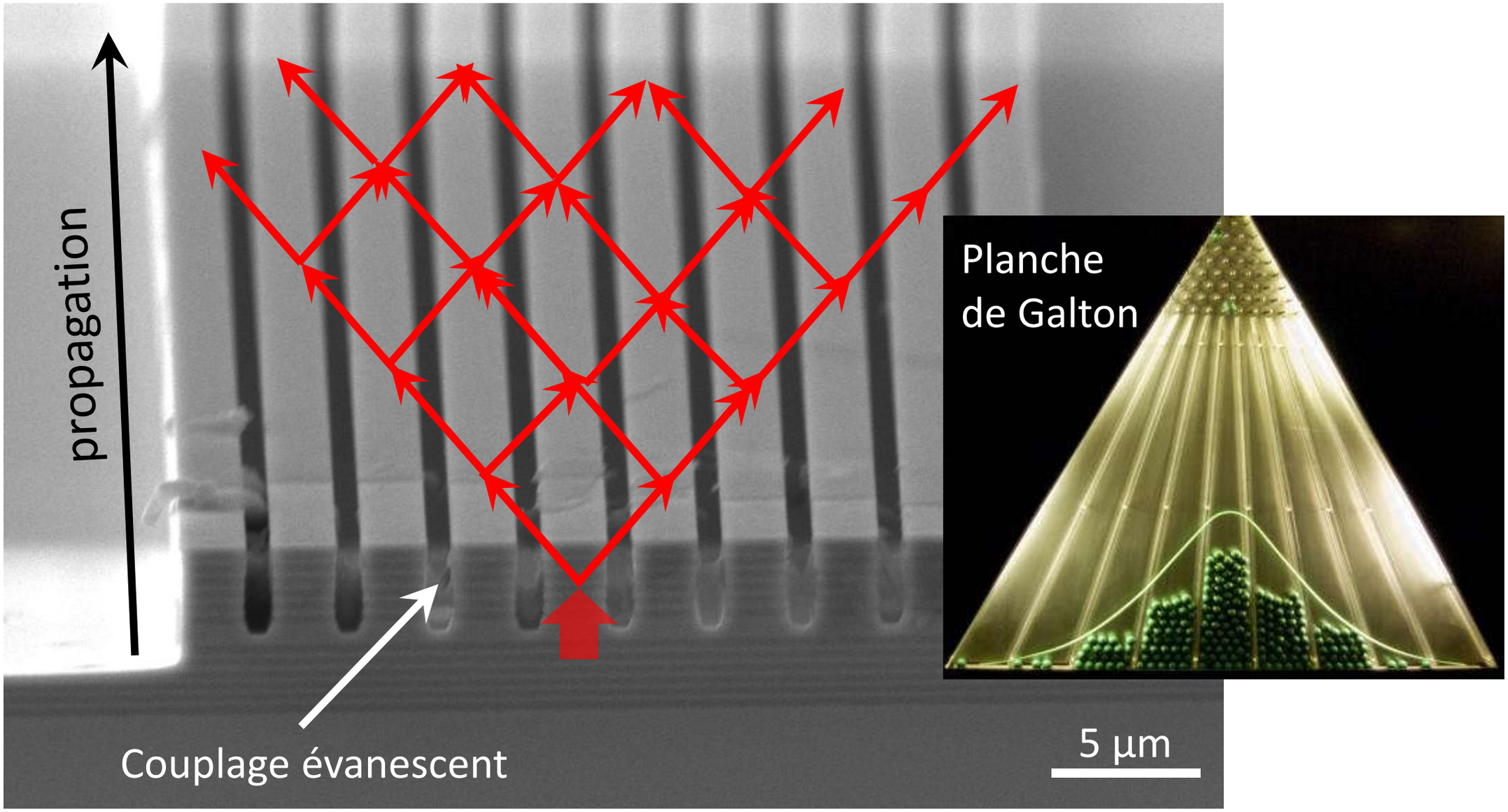




$$g^{(2)}(0) = 0.10 \pm 0.02 \quad \ll 1$$

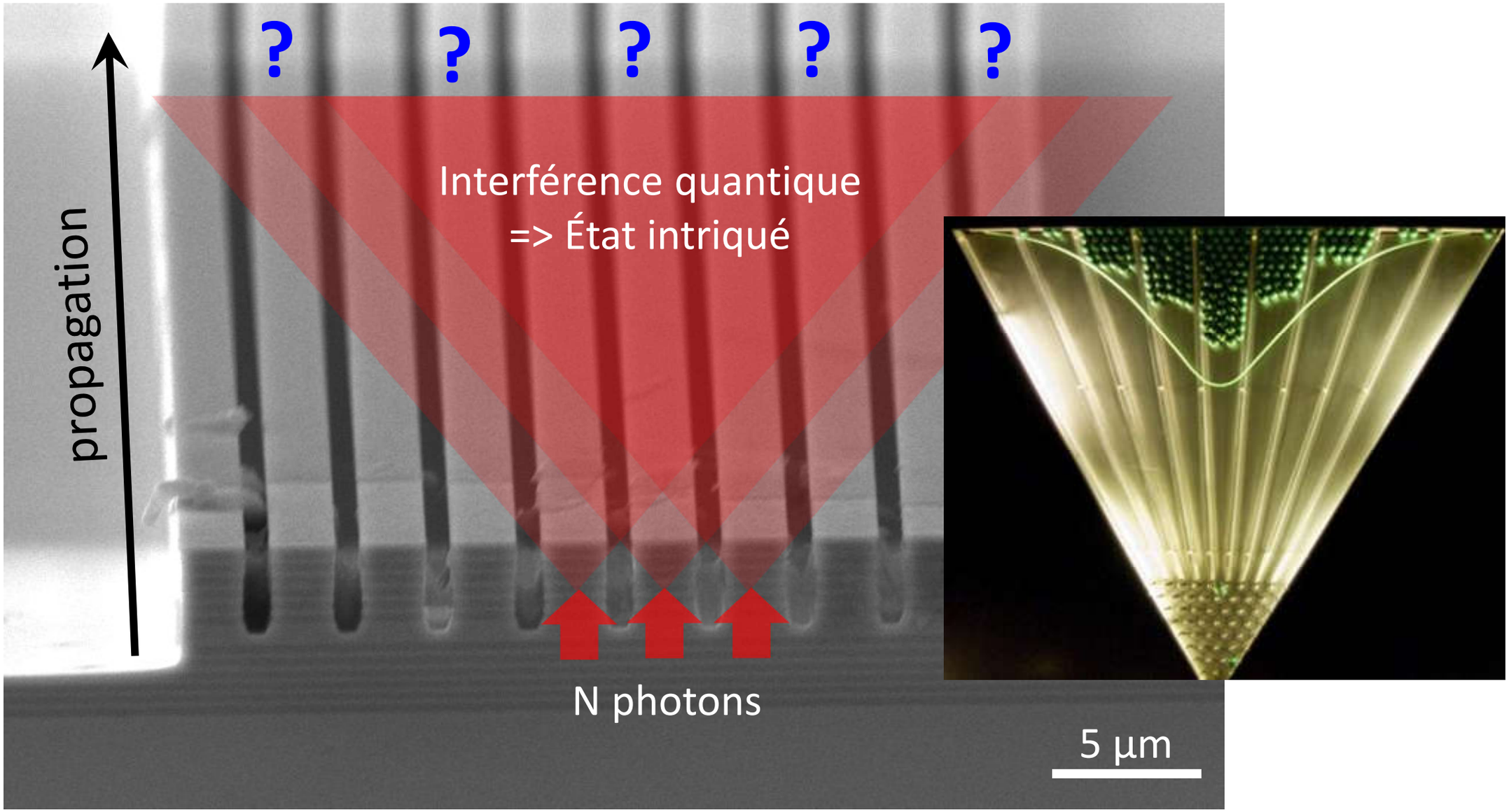
J. Belhassen et al.,
Appl. Phys. Lett. 112, 071105 (2018)

Réseaux de guides d'ondes pour l'information quantique



Marches au hasard **quantiques**

Réseaux de guides d'ondes pour l'information quantique



Marches au hasard **quantiques**

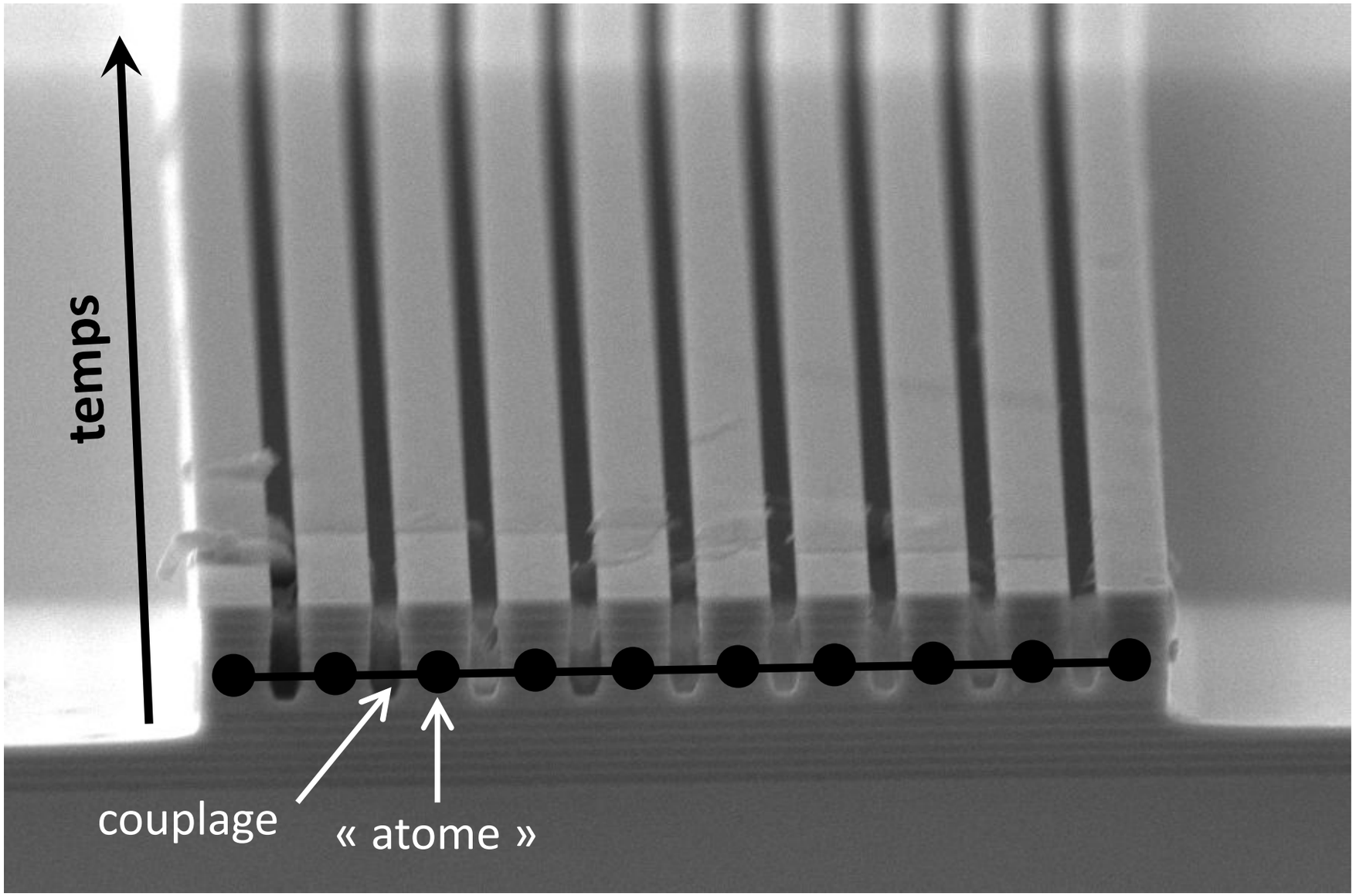
Si N grand, distribution de probabilité en sortie ? ⇒ « Boson Sampling »

⇒ Simulateur quantique

J. B. Spring et al., Science 339, 798 (2013)

Réseaux de guides d'ondes pour l'information quantique

Analogie avec matière condensée :

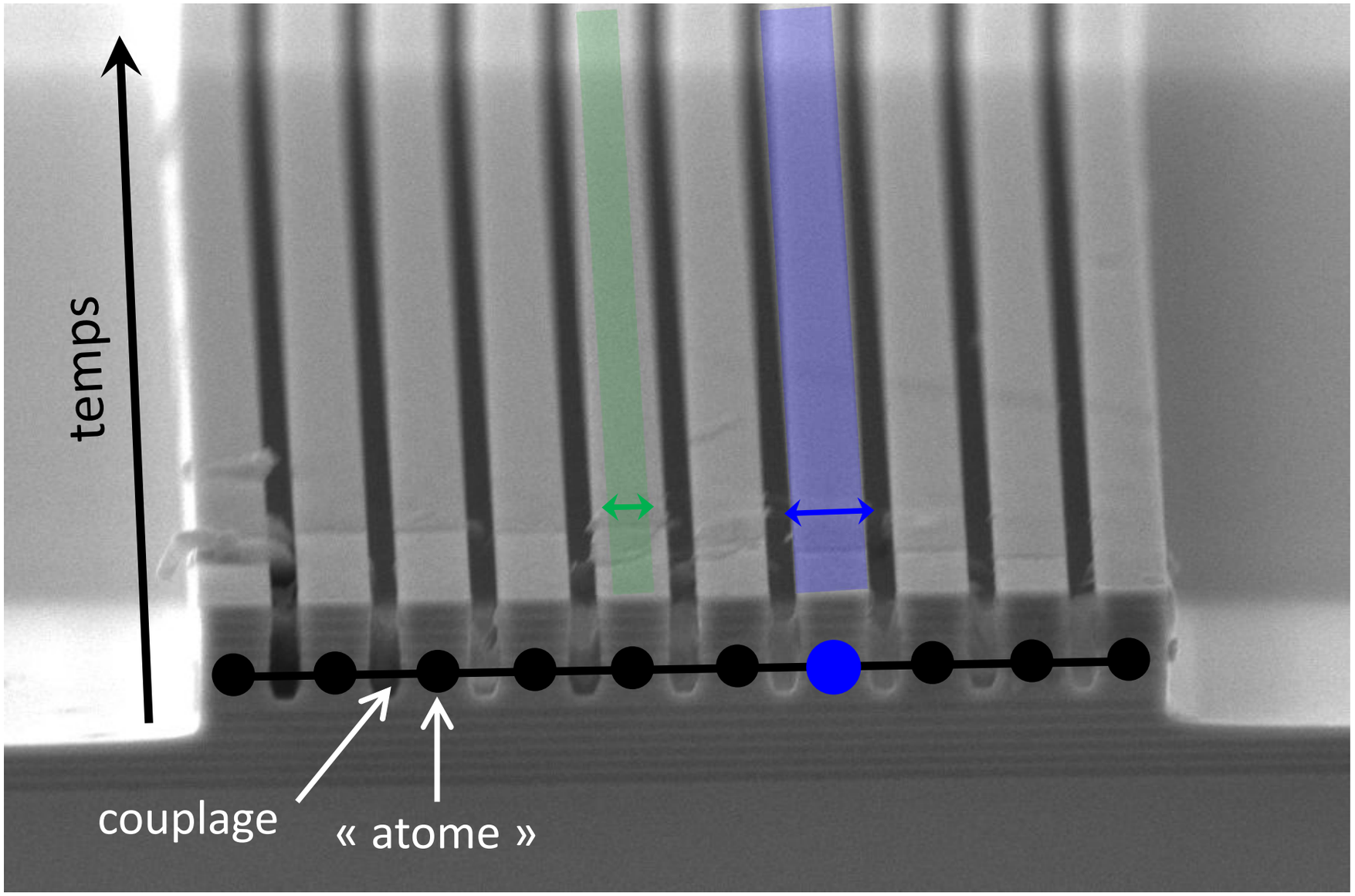


Cristal 1D – Modèle de liaisons fortes

Ingénierie du Hamiltonien (sites et couplages)

Réseaux de guides d'ondes pour l'information quantique

Analogie avec matière condensée :

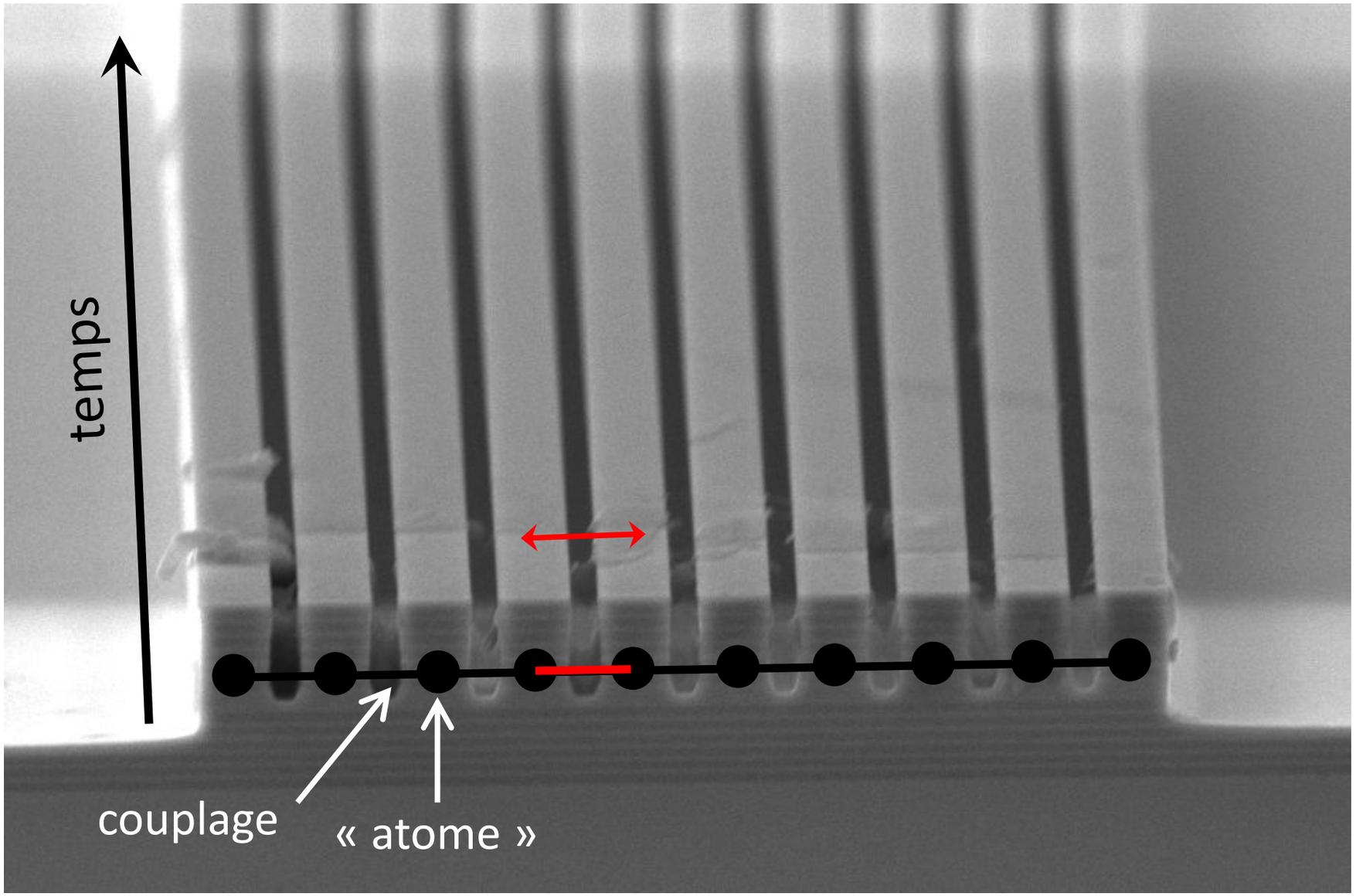


Cristal 1D – Modèle de liaisons fortes

Ingénierie du Hamiltonien (**sites** et couplages)

Réseaux de guides d'ondes pour l'information quantique

Analogie avec matière condensée :

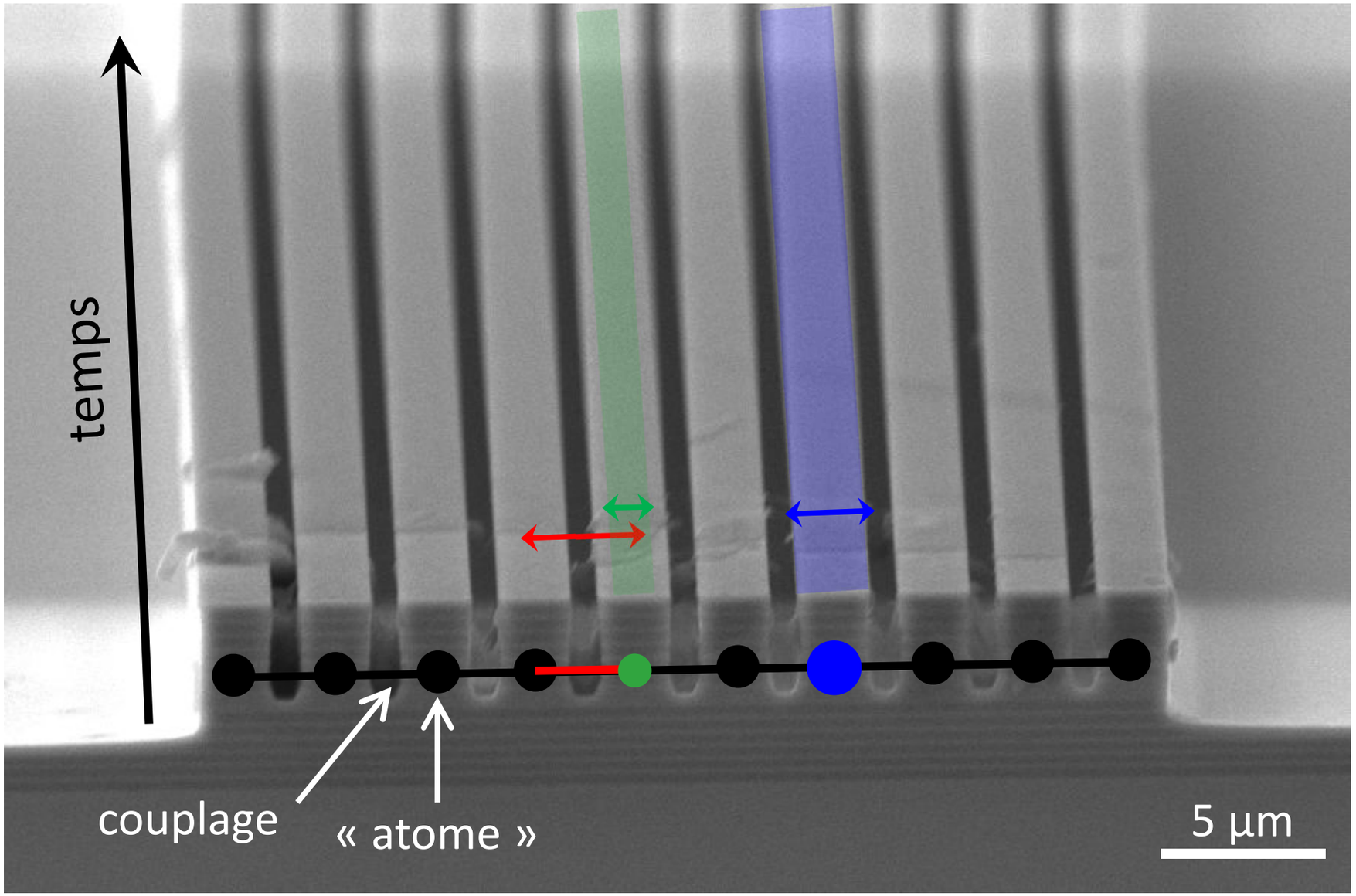


Cristal 1D – Modèle de liaisons fortes

Ingénierie du Hamiltonien (sites et **couplages**)

Réseaux de guides d'ondes pour l'information quantique

Analogie avec matière condensée :



Cristal 1D – Modèle de liaisons fortes

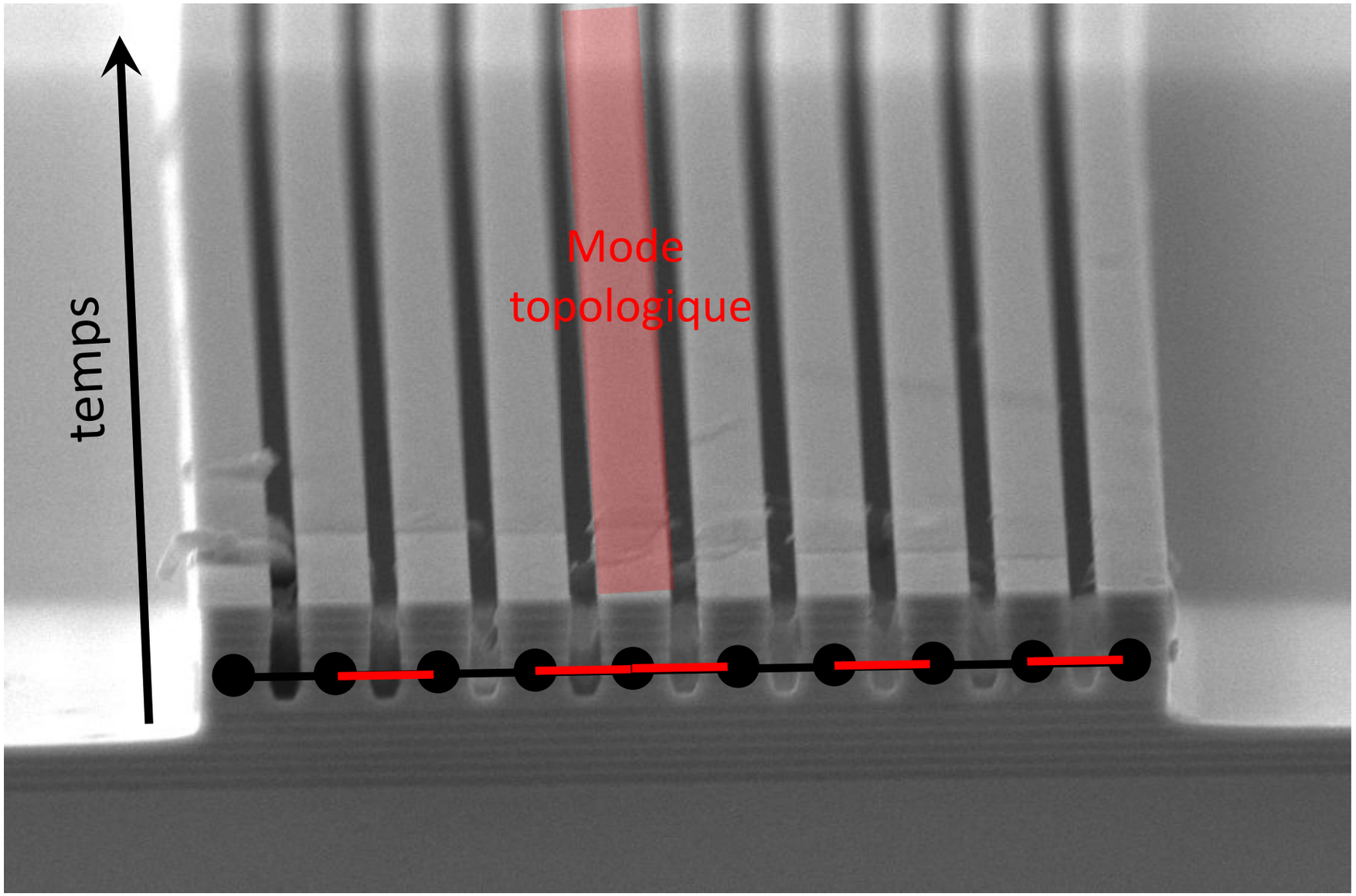
Ingénierie du Hamiltonien (sites et couplages)

Désordre ⇒ Localisation d'Anderson d'un état multi-particules

A. Crespi et al., Nature Photonics 7, 322 (2013)

Réseaux de guides d'ondes pour l'information quantique

Analogie avec matière condensée :



Cristal 1D – Modèle de liaisons fortes

Ingénierie du Hamiltonien (sites et couplages)

Modèle SSH ⇒ Protection topologique d'états quantiques ?

A. Blanco-Redondo et al., Phys. Rev. Lett. 116, 163901 (2016)
P. St-Jean et al., Nature Photonics 11, 651 (2017)

3e partie :
Photons et atomes artificiels

Loïc Lanco

Maître de conferences à l'Université de Paris

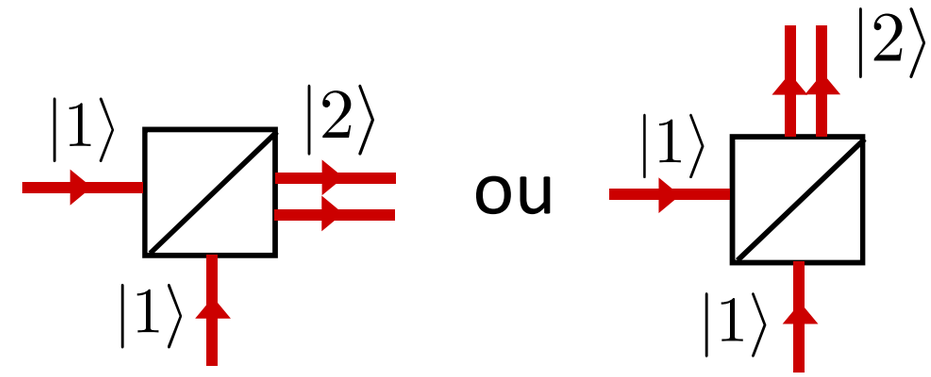
Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies (C2N)

Membre de l'Institut Universitaire de France

Des interactions *photon-photon*?

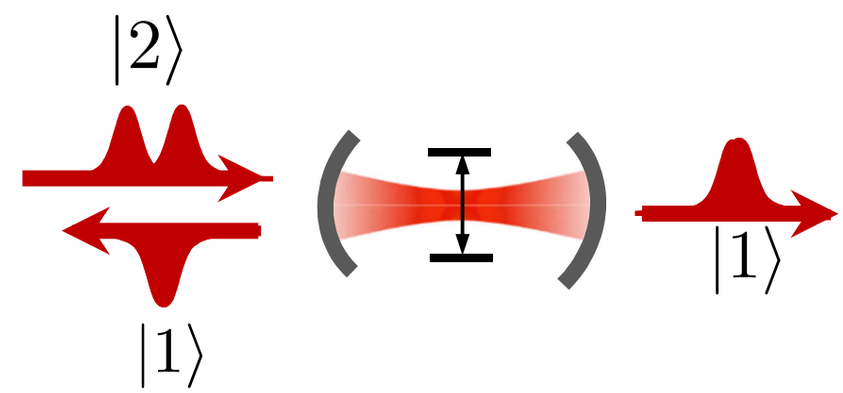
Coalescence des photons?

⇨ Requiert des photons *indiscernables*



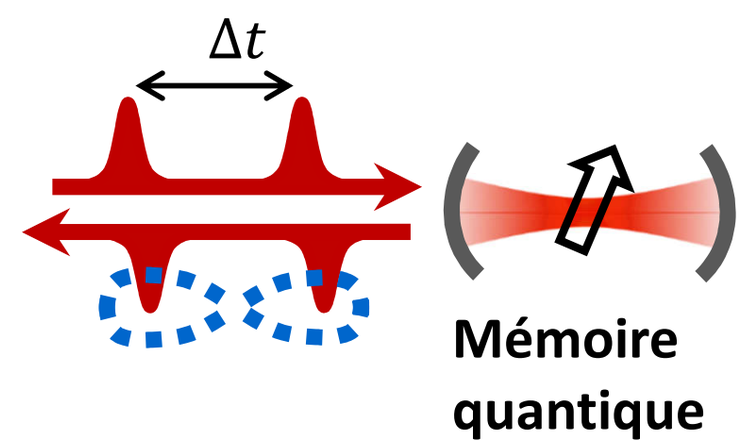
Un routeur à photons uniques?

⇨ Requiert une *nonlinéarité optique géante*

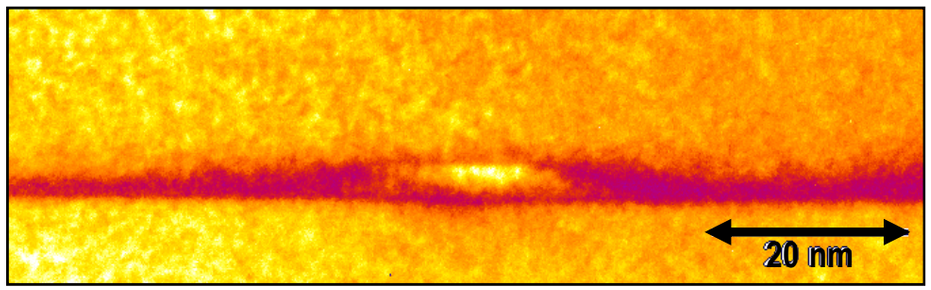


Intriquer des photons via une mémoire quantique?

⇨ Requiert un qubit « *mémoire* »

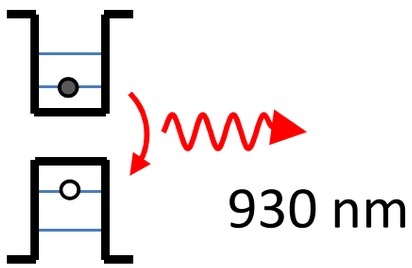


Atome artificiel : les “boîtes quantiques”

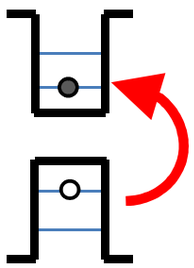


Boîte quantique InAs/GaAs

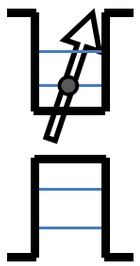
Source de photons uniques



Nonlinéarité à 1 photon

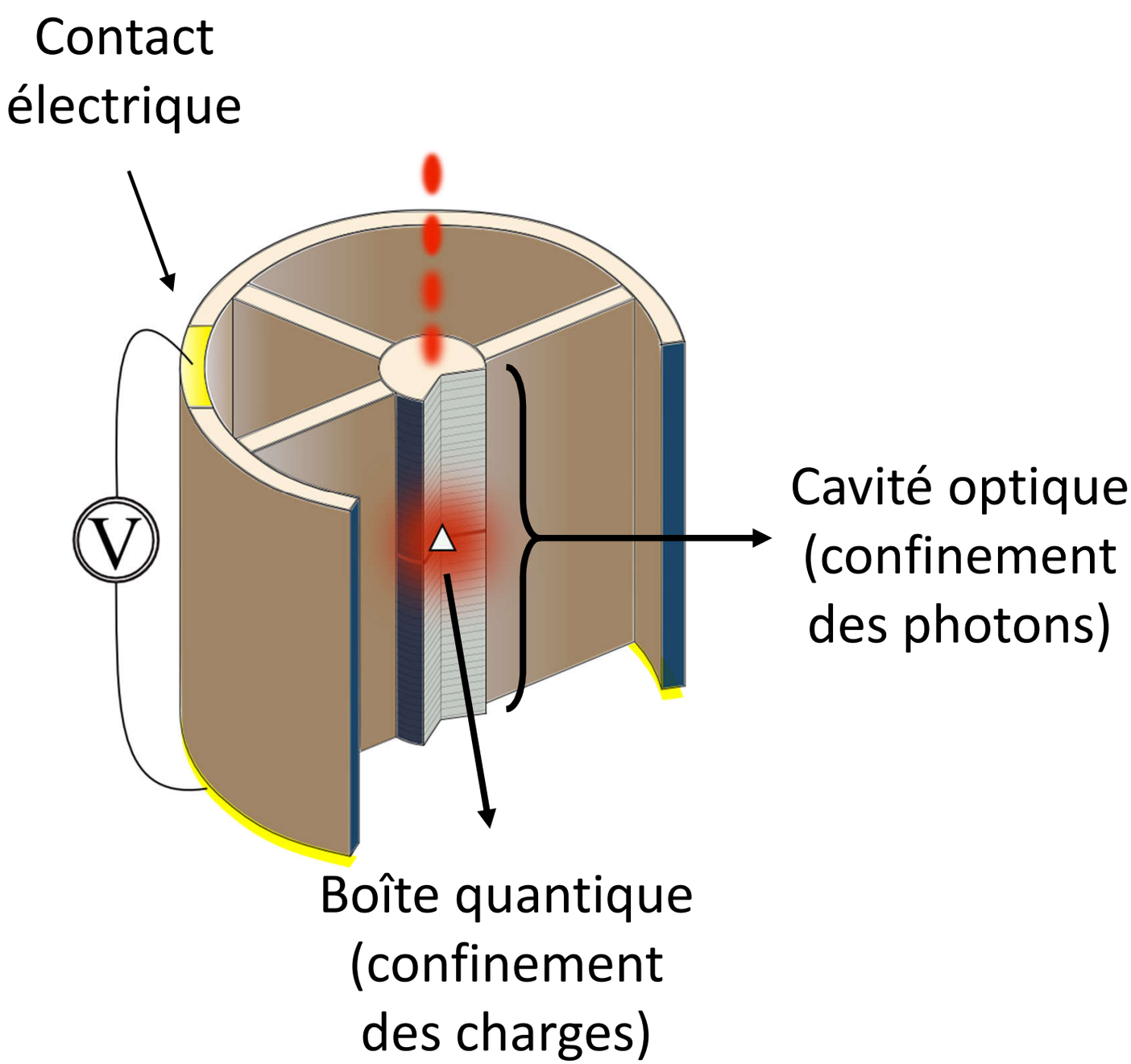


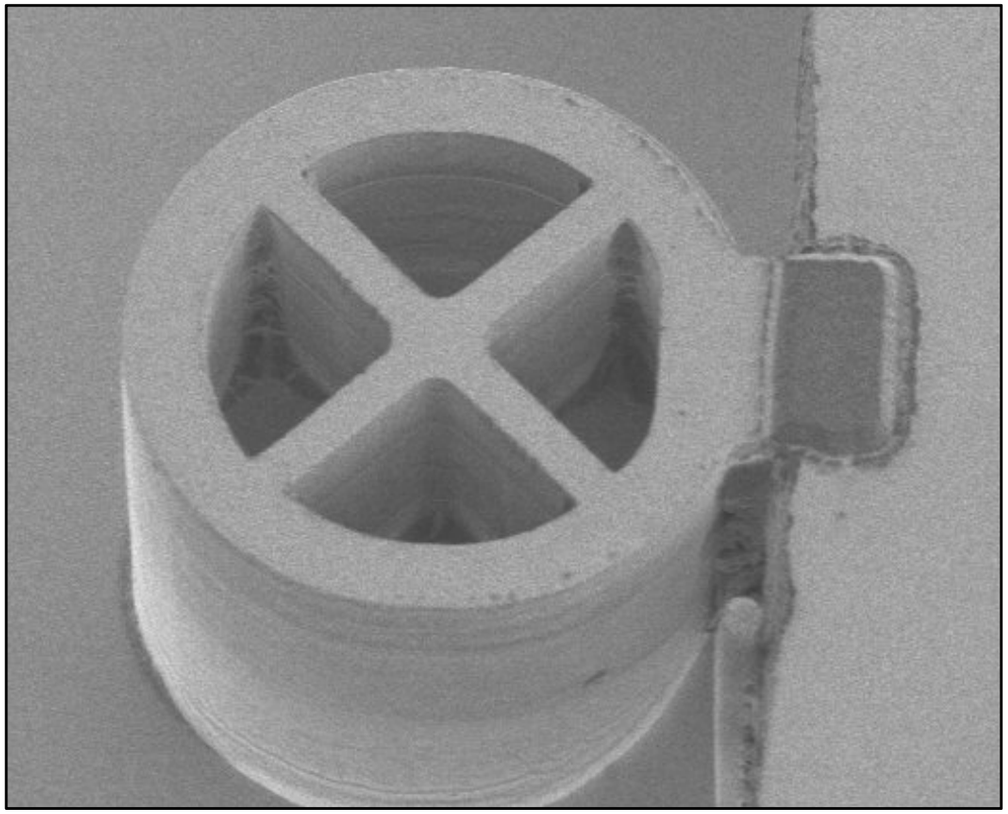
Spin : mémoire quantique

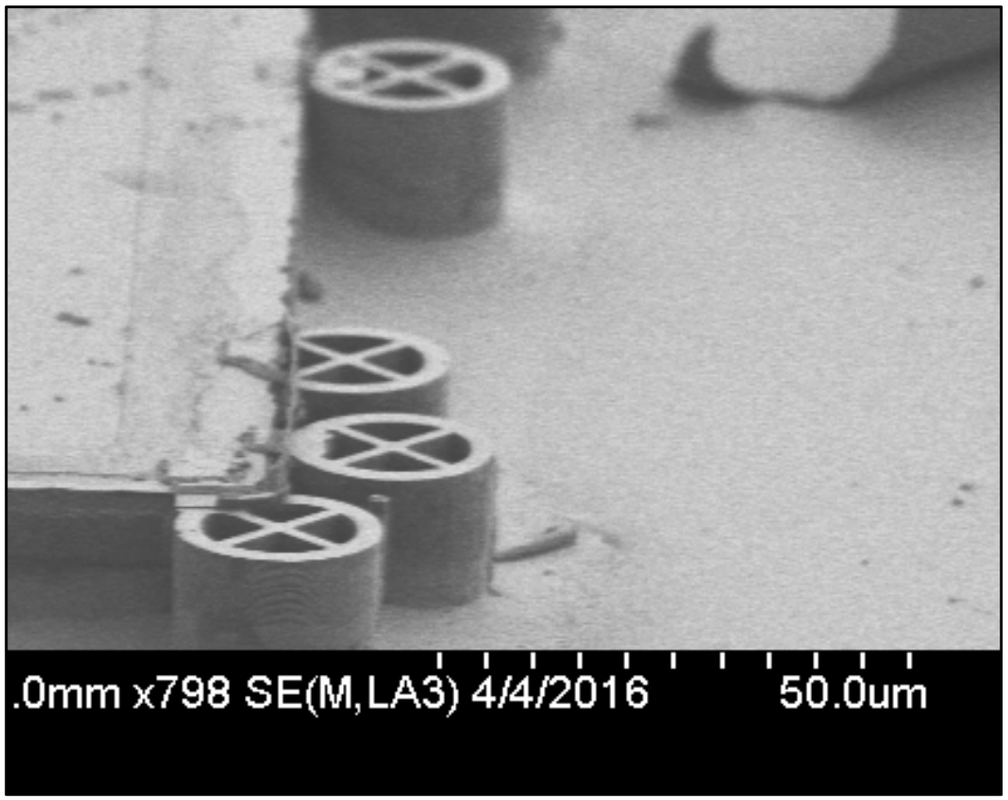


Interface lumière-matière?

Interface lumière-matière : boîte quantique + cavité

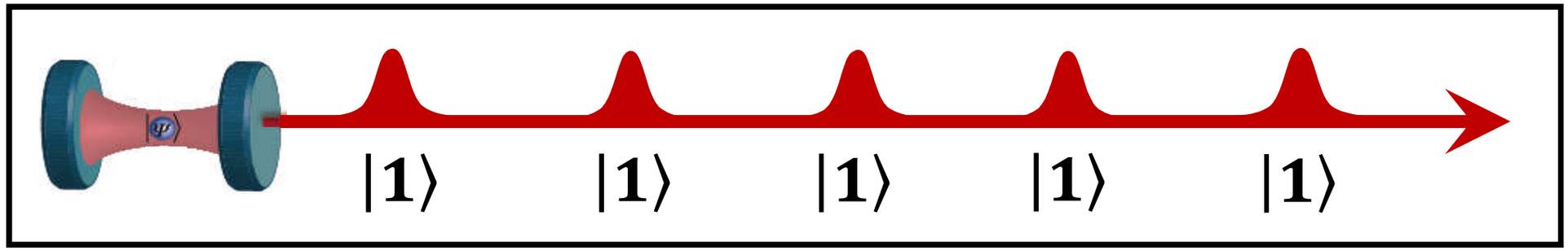






Nowak et al, Nature Communications 5, 3240 (2014)
Somaschi et al, Nature Photonics 10, 340 (2016)

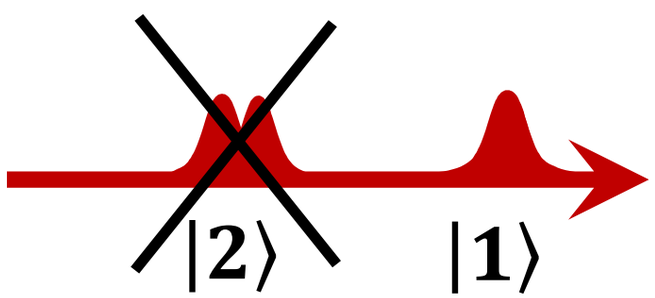
Une source de photons uniques et indiscernables



Objectif:

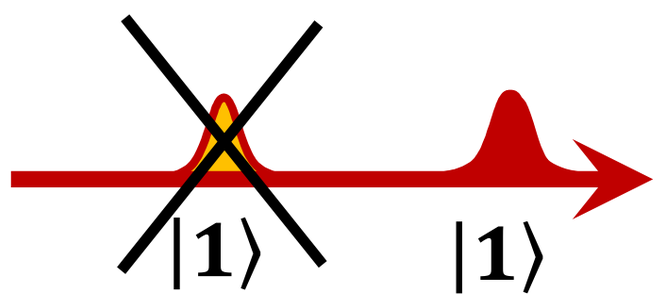
Des photons **uniques**, aux propriétés **identiques**, et émis **à la demande**

Pureté



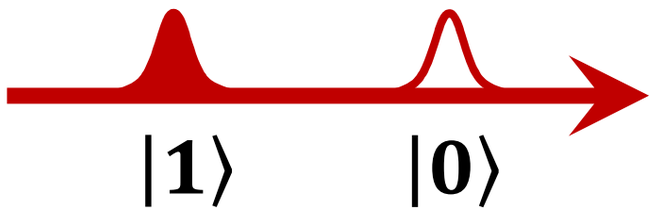
~ 99.7%

Indiscernabilité



~ 99.8%

Efficacité



~ 16%

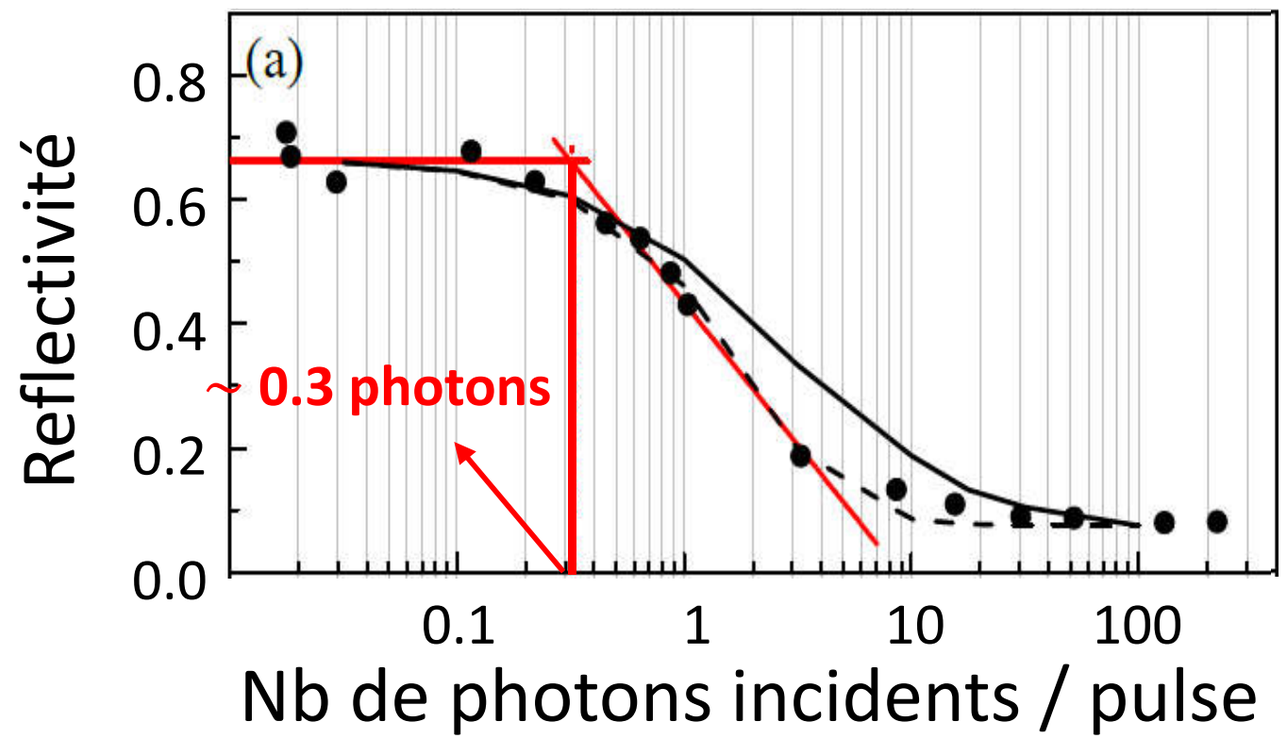
Somaschi et al,
Nature Photonics 10, 340 (2016)

Start-up créée en 2017: QUANDELA

Nonlinéarité optique à 1 photon?

Photons incidents

Photons réfléchis



Nonlinéarité optique à 0.3 photons/pulse

(précédent record en 2012: 8 photons/pulse)

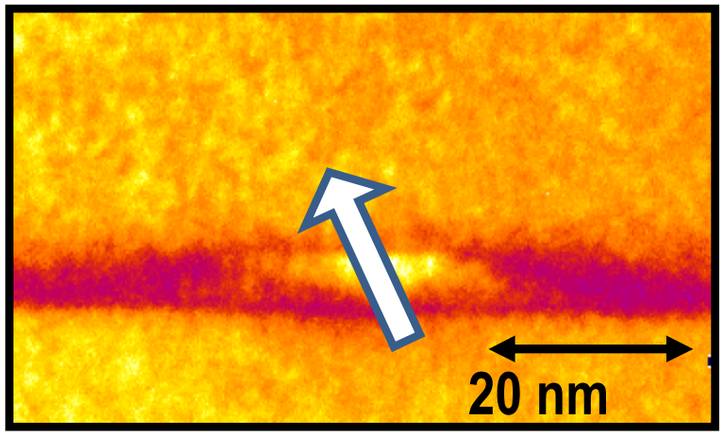
Mesures de la statistique des photons:

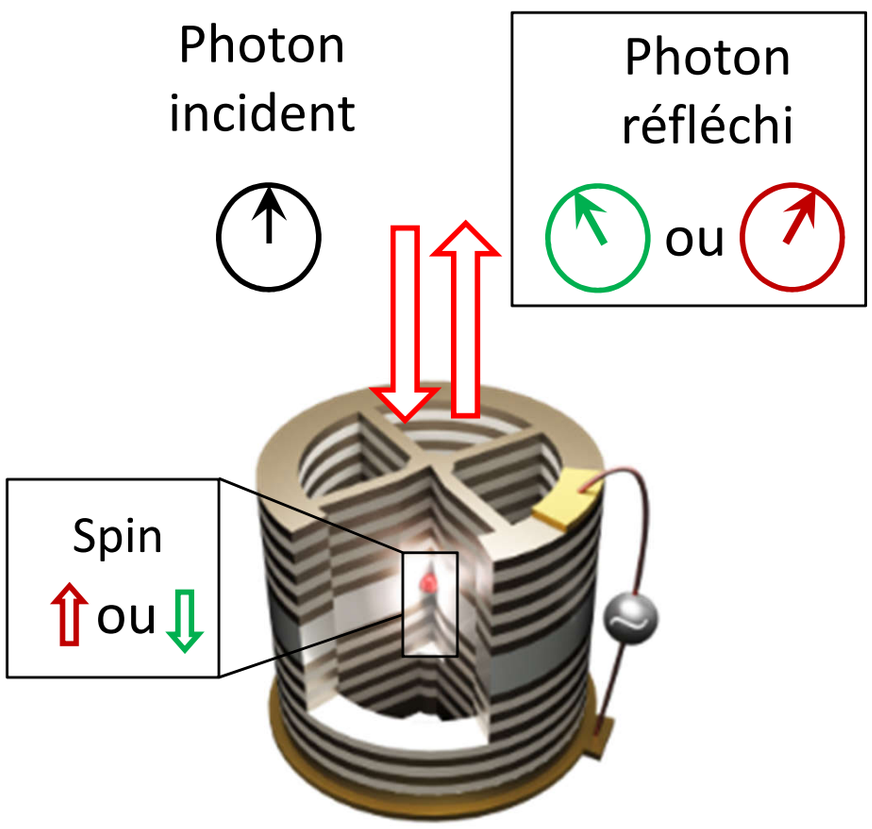
- 1er photon fortement réfléchi
- 2nd et 3ème photons très peu réfléchis

De Santis et al,
Nature Nanotechnology 12, 663 (2017)

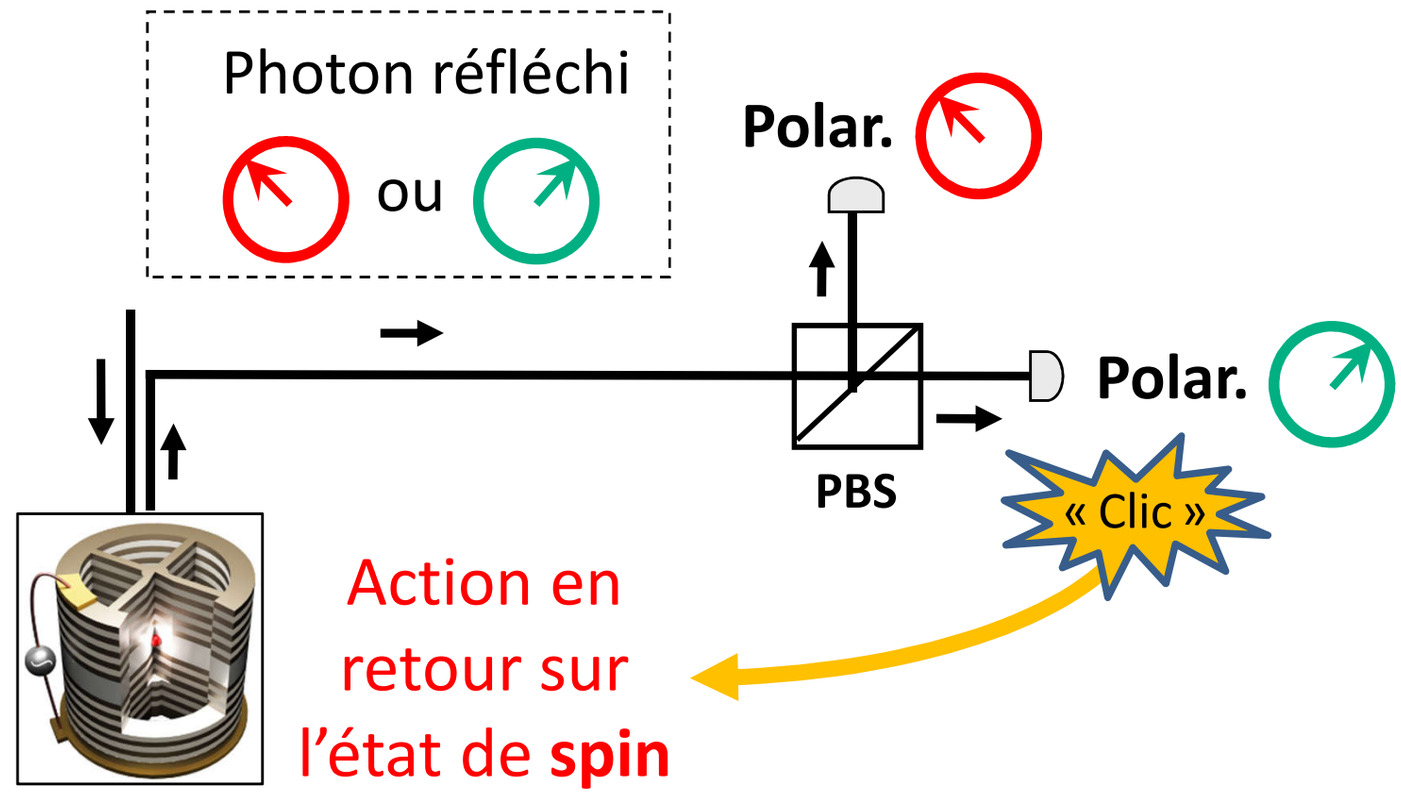
Interface spin-photon

Boîte quantique **+ spin**





Résultat récent : action en retour induite sur un spin par un unique photon détecté



Perspectives

- Portes logiques quantiques
- Etats quantiques intriqués à N photons

Arnold et al,
Nature Communications 6, 6236 (2015)

MERCI POUR VOTRE ATTENTION !