

# De la sphère de Poincaré aux bits quantiques : le contrôle de la polarisation de la lumière

## 1. Description classique de la polarisation de la lumière

Biréfringence, pouvoir rotatoire et sphère de Poincaré

## 2. Description quantique de la polarisation du photon

Un petit paradoxe...

Superpositions linéaires et interférences

Le qubit (ou bit quantique)

## 3. Vers les applications : cryptographie et calcul quantique

Un peu d'histoire...

Le photon comme vecteur d'information

Manipuler des qubits individuels

# De la sphère de Poincaré aux bits quantiques : le contrôle de la polarisation de la lumière

## 1. Description classique de la polarisation de la lumière

Biréfringence, pouvoir rotatoire et sphère de Poincaré

## 2. Description quantique de la polarisation du photon

Un petit paradoxe...

Superpositions linéaires et interférences

Le qubit (ou bit quantique)

## 3. Vers les applications : cryptographie et calcul quantique

Un peu d'histoire...

Le photon comme vecteur d'information

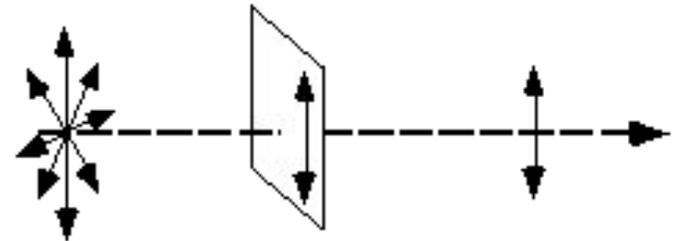
Manipuler des qubits individuels

# POLARISATION DE LA LUMIERE

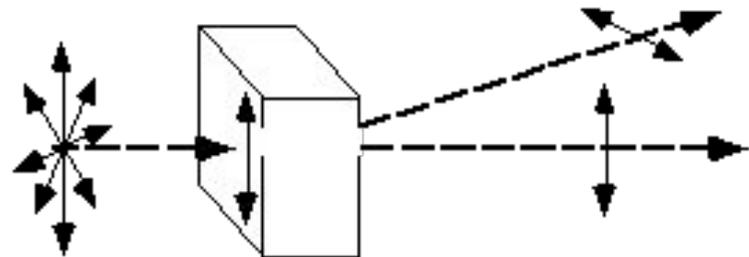
## Equations de Maxwell :

- \* vibration transverse, linéaire ou circulaire
- \* si on met un polariseur, direction de polarisation imposée

Polariseur à une voie ("polaroid") :  
une polarisation est absorbée



Polariseur à 2 voies :  
pas d'absorption, toute la lumière ressort



# POLARISATION DE LA LUMIERE

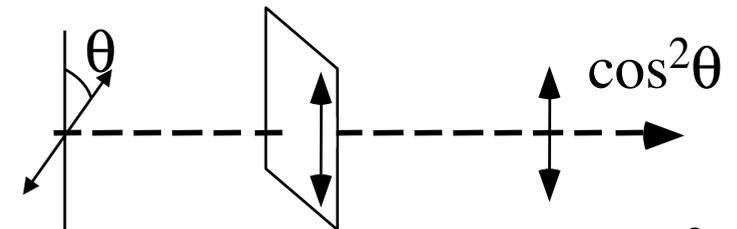
## Equations de Maxwell :

- \* vibration transverse, linéaire ou circulaire
- \* si on met un polariseur, direction de polarisation imposée
- \* 2e polariseur (analyseur) faisant un angle  $\theta$  avec l'analyseur :

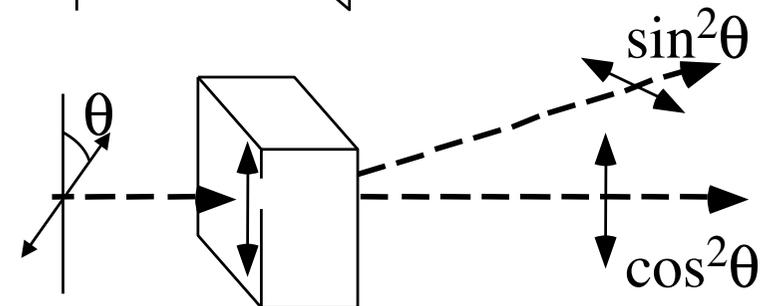
$$\Phi_{\text{transmis}} = \Phi_{\text{incident}} \cos^2(\theta) \quad (\text{Loi de Malus})$$

(transmission nulle si le polariseur et l'analyseur sont orthogonaux)

Polariseur à une voie ("polaroid") :  
une polarisation est absorbée

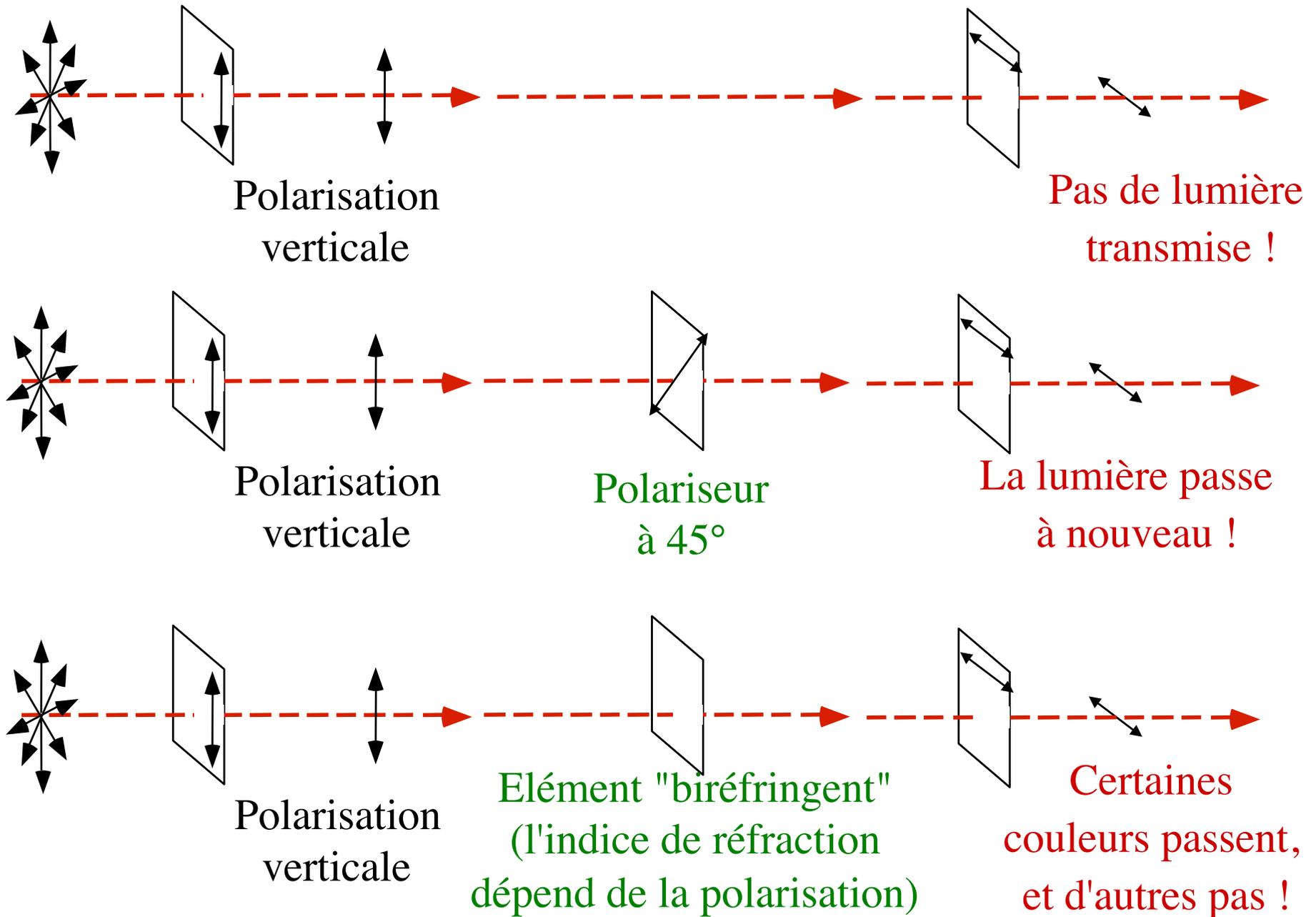


Polariseur à 2 voies :  
pas d'absorption, toute la lumière ressort



Toujours 2 sorties dont les intensités varient en  $\cos^2(\theta)$  et  $\sin^2(\theta)$

# INTERFERENCES EN LUMIERE POLARISEE

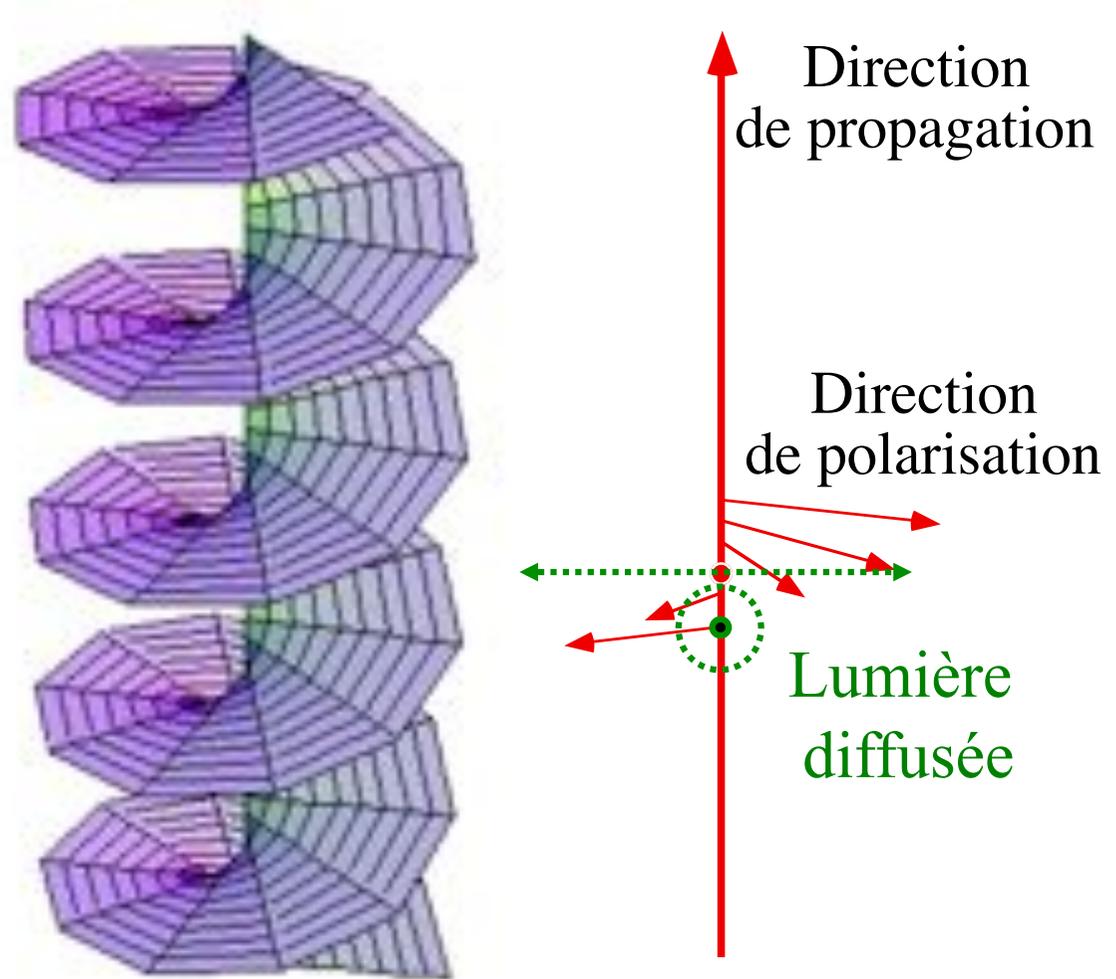


## POUVOIR ROTATOIRE DE L'EAU SUCREE : LA SPIRALE DE LUMIERE

**Dans de l'eau sucrée,  
la polarisation de la  
lumière tourne en  
hélice.**

**On ne voit plus la  
lumière quand la  
direction de la  
polarisation pointe  
dans la direction  
d'observation.**

Remarque : on « voit »  
en fait seulement une  
très faible fraction des  
photons, ceux qui sont  
diffusés par le liquide.



COURS DE PHYSIQUE MATHÉMATIQUE

○ THÉORIE MATHÉMATIQUE

DE

# LA LUMIÈRE

II

Nouvelles études sur la Diffraction. — Théorie de la  
dispersion de Helmholtz

Leçons professées pendant le premier semestre 1891-1892

PAR

H. POINCARÉ, MEMBRE DE L'INSTITUT

ASSISTÉ PAR

M. LAMOTTE et D. HURMUZESCU

Licenciés en sciences

PARIS

GEORGES CARRÉ, ÉDITEUR

58, RUE SAINT-ANDRÉ-DES-ARTS, 58

1892

La théorie de la Lumière a été l'objet de mon enseignement dans le semestre d'hiver 1891-92 ; j'avais traité le même sujet quelques années auparavant dans des leçons qui ont été publiées par les soins de l'Association amicale des élèves et anciens élèves de la Faculté des sciences de Paris.

Mais en revenant, après quatre ans, à l'étude de l'Optique, j'ai eu à traiter un grand nombre de matières nouvelles que le défaut de temps m'avait autrefois contraint à laisser de côté. Je ne citerai que la théorie de Helmholtz, sur la dispersion dont je n'avais pu dire qu'un mot en passant.

D'autre part, dans cet intervalle, la science a progressé, et bien des points de vue se sont modifiés. C'est ainsi, par exemple, que la théorie électromagnétique de Maxwell a conquis une place qu'on lui contestait encore il y a quelques années. Il est difficile aujourd'hui de parler d'Optique en la passant sous silence.

## CHAPITRE XII

### Polarisation rotatoire. — Théorie de M. Mallard

Piles de Reusch. . . . .	275
Mode de représentation des vibrations. . . . .	277
Application. — Rôle des piles de mica. . . . .	285
Notations. . . . .	285
Étude des piles de Reusch. . . . .	287
Cas général . . . . .	292
Hypothèse de M. Quesneville . . . . .	294
Détermination du pouvoir rotatoire et du pouvoir biréfringent d'un paquet . . . . .	295
Variation de phase produite par le passage à travers une pile de lames. . . . .	299
Surface de l'onde dans une pile de lames. . . . .	304

## POLARISATION ROTATOIRE.—THÉORIE DE M. MALLARD

**155.** La théorie que Fresnel a donnée du pouvoir rotatoire n'est pas, à proprement parler, une théorie physique, mais seulement la constatation d'une identité cinématique.

De même les théories d'Airy se réduisent à l'adjonction, aux équations des termes nécessaires pour faire concorder leurs conséquences avec les résultats observés.

Les expériences de Reusch sur les piles de mica ont donné l'idée d'autres théories, en particulier, de celle que nous allons exposer due à M. Mallard.

L'exposé de cette théorie comporte des calculs assez longs, que nous chercherons à simplifier, à l'aide de quelques considérations préliminaires.

**158.** Il nous sera commode dans la suite de remplacer cette représentation plane par une représentation analogue sur la sphère; nous effectuerons cette transformation par une projection stéréographique, le plan des  $(u, v)$  étant le plan du tableau et l'origine  $O$  des coordonnées;  $uv$ , le point de contact de la sphère avec ce plan. Cette projection, comme on le sait, conserve les angles, et les cercles se projettent sur des cercles.

Au point  $M$  du plan correspond le point  $m$  où la droite  $VM$  rencontre la sphère. Nous conviendrons de représenter l'ellipse  $M$  par le point  $m$  (Fig. 42).

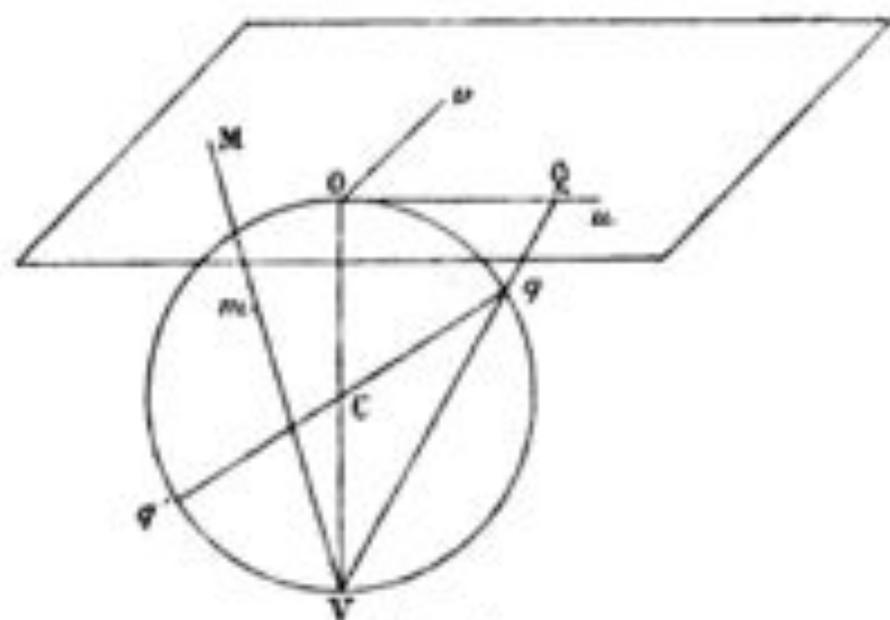


Fig. 42.



# De la sphère de Poincaré aux bits quantiques : le contrôle de la polarisation de la lumière

## 1. Description classique de la polarisation de la lumière

Biréfringence, pouvoir rotatoire et sphère de Poincaré

## 2. Description quantique de la polarisation du photon

Un petit paradoxe...

Superpositions linéaires et interférences

Le qubit (ou bit quantique)

## 3. Vers les applications : cryptographie et calcul quantique

Un peu d'histoire...

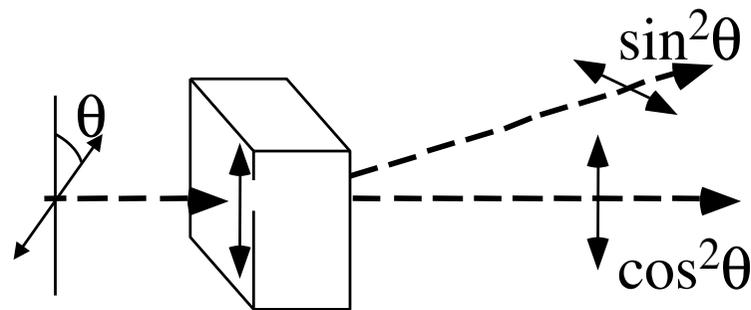
Le photon comme vecteur d'information

Manipuler des qubits individuels

# POLARISATION D'UN PHOTON

Photon : "grain" d'énergie lumineuse,  $E = h \nu \approx 2 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Flux lumineux émis par une lampe 200 W :  $10^{21}$  photons/seconde  
Comment définir l'état de polarisation d'un seul photon ?

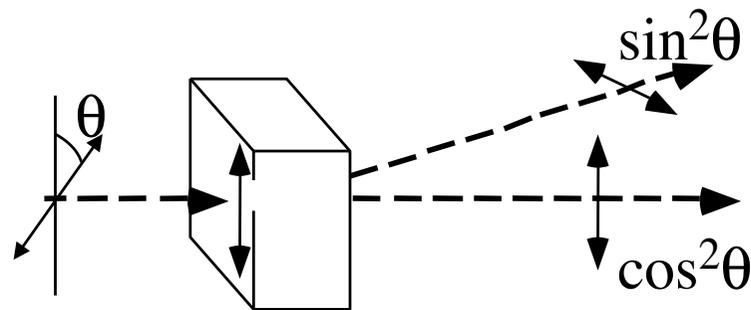


- Si on détecte un photon unique après le polariseur, on ne peut obtenir qu'un des deux résultats (mutuellement exclusifs) "transmis" ou "dévié"
- On dira alors que la polarisation du photon est "horizontale" ou "verticale"
- Si la polarisation initiale du photon est orientée suivant un angle  $\theta$ , les **probabilités** pour que le photon soit transmis ou dévié seront  $\cos^2\theta$  et  $\sin^2\theta$
- Pour un grand nombre de photons, on retrouve bien la loi de Malus !

# POLARISATION D'UN PHOTON

Photon : "grain" d'énergie lumineuse,  $E = h \nu \approx 2 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Flux lumineux émis par une lampe 200 W :  $10^{21}$  photons/seconde  
Comment définir l'état de polarisation d'un seul photon ?



**Différence cruciale entre les comportements classiques et quantiques :**

- Un champ classique incident  $E$  est projeté sur les deux axes du polariseur, et se partage en deux composantes : transmise  $E \cos\theta$ , et déviée  $E \sin\theta$
- Le « champ électrique » d'un photon unique ne se partage pas, mais le photon est transmis ou dévié, avec des probabilités  $\cos^2\theta$  et  $\sin^2\theta$

Pour un grand nombre de photons, le flux obéit bien à la loi de Malus !

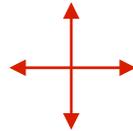
# POLARISATION D'UN PHOTON

Photon : "grain" d'énergie lumineuse,  $E = h \nu \approx 2 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Flux lumineux émis par une lampe 200 W :  $10^{21}$  photons/seconde  
Comment définir l'état de polarisation d'un seul photon ?

Expérience de "tri" par la polarisation :

\* orientations  $0^\circ$  ou  $90^\circ$  : 2 sortes de photons (mutuellement exclusifs)  
"vertical" : v et "horizontal" : h



\* mais on a aussi  $45^\circ$  et  $135^\circ$  : 2 sortes de photons (mutuellement exclusifs)  
"oblique droit" : d et "oblique gauche" : g



Raisonnement "classique" : 2 propriétés différentes, par exemple :

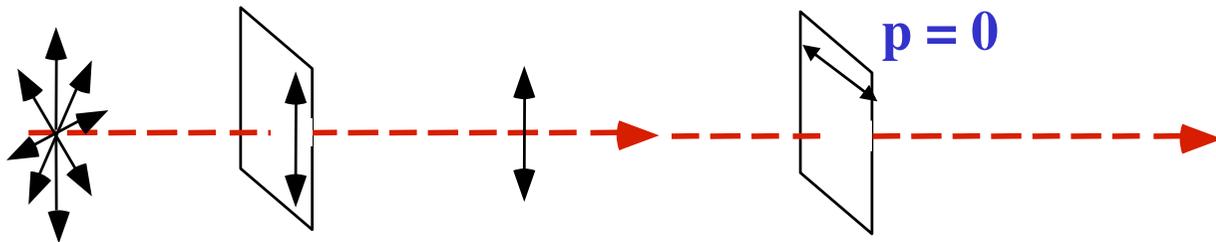
\* homme : h ou femme : v

\* blond : d ou brun : g

**Test expérimental ?**

# RAISONNEMENT CLASSIQUE : « MELANGE STATISTIQUE »

\* homme : h ou femme: v  
\* blond : d ou brun : g

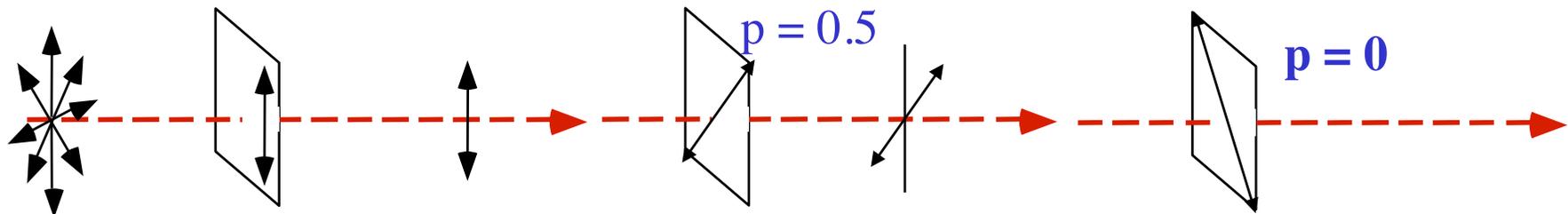


v : femme

les femmes ne sont  
pas des hommes !

# RAISONNEMENT CLASSIQUE : « MELANGE STATISTIQUE »

\* homme : h ou femme: v  
\* blond : d ou brun : g



v : femme

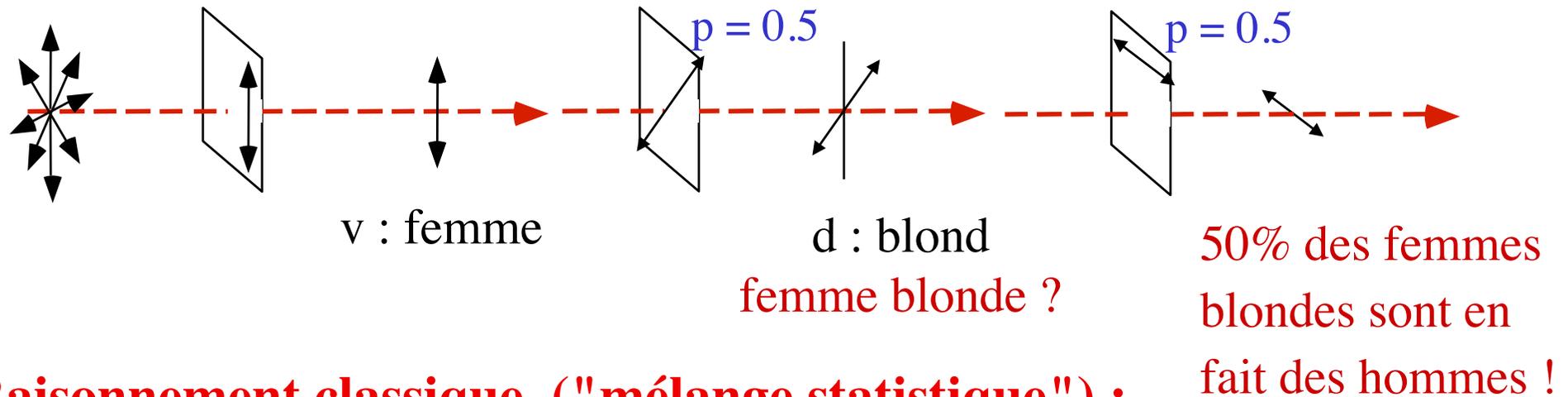
d : blond

femme blonde ?

les femmes  
blondes ne sont  
pas brunes !

# RAISONNEMENT CLASSIQUE : « MELANGE STATISTIQUE »

\* homme : h ou femme: v  
\* blond : d ou brun : g



**Raisonnement classique ("mélange statistique") :**

On trie en 4 catégories v&d, v&g, h&d, h&g

**Test :** on prépare v, puis d  $\rightarrow$  tri des photons v&d ?

Mesure de h : la moitié des photons v&d sont devenus h !

La préparation de d a fait "oublier" celle de v !

**Le "mélange statistique" est en conflit avec l'expérience !**

# MODELE QUANTIQUE DE LA POLARISATION DU PHOTON

Mesures de polarisation :

on prépare **h** (ou **v**) et on mesure **h** (ou **v**) : tous les photons passent

on prépare **h** (ou **v**) et on mesure **v** (ou **h**) : aucun photon ne passe

-> états propres orthogonaux  $|h\rangle$  ou  $|v\rangle$

vecteurs dans l'espace des états de polarisation (espace de Hilbert)

même raisonnement avec **g** et **d** :

-> états propres orthogonaux  $|g\rangle$  ou  $|d\rangle$

vecteurs dans l'espace des états de polarisation (espace de Hilbert)

on prépare **h** (ou **v**) et on mesure **g** : la moitié passe -> état  $|g\rangle$

on prépare **h** (ou **v**) et on mesure **d** : la moitié passe -> état  $|d\rangle$

on prépare **g** (ou **d**) et on mesure **v** : la moitié passe -> état  $|v\rangle$

on prépare **g** (ou **d**) et on mesure **h** : la moitié passe -> état  $|h\rangle$

**Comment relier les états  $|h\rangle$ ,  $|v\rangle$  et les états  $|g\rangle$ ,  $|d\rangle$  ?**

# MELANGE STATISTIQUE ET SUPERPOSITION LINEAIRE

Raisonnement quantique ("superposition linéaire") :

$$\begin{aligned} |d\rangle &= (|v\rangle + |h\rangle) / \sqrt{2}, & |v\rangle &= (|d\rangle + |g\rangle) / \sqrt{2} \\ |g\rangle &= (|v\rangle - |h\rangle) / \sqrt{2}, & |h\rangle &= (|d\rangle - |g\rangle) / \sqrt{2} \end{aligned}$$

**Test :**

on prépare  $|v\rangle = (|d\rangle + |g\rangle) / \sqrt{2}$ ,



projection sur l'état propre !

puis  $|d\rangle = (|v\rangle + |h\rangle) / \sqrt{2}$

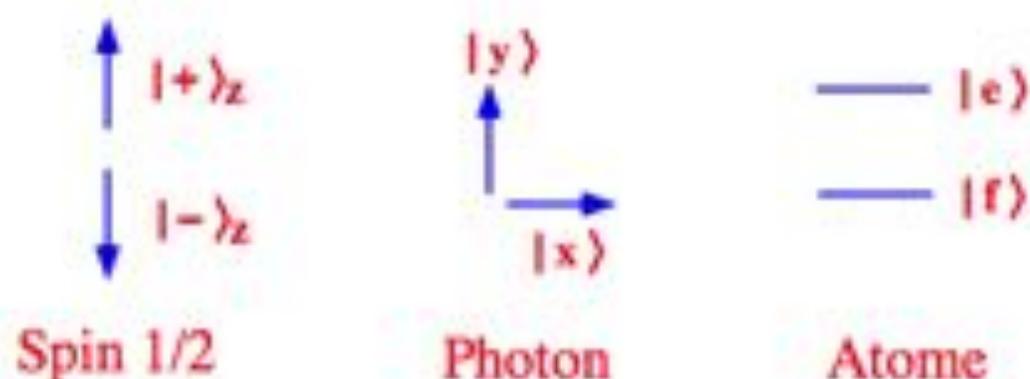
Pour l'état d :  $P(d) = 1$        $P(g) = 0$        $|d\rangle$  et  $|g\rangle$  orthogonaux

Mesure :  $P(h) = 1/2$        $P(v) = 1/2$       **ça marche !**

**IL FAUT UNE SUPERPOSITION LINEAIRE D'ETATS !**

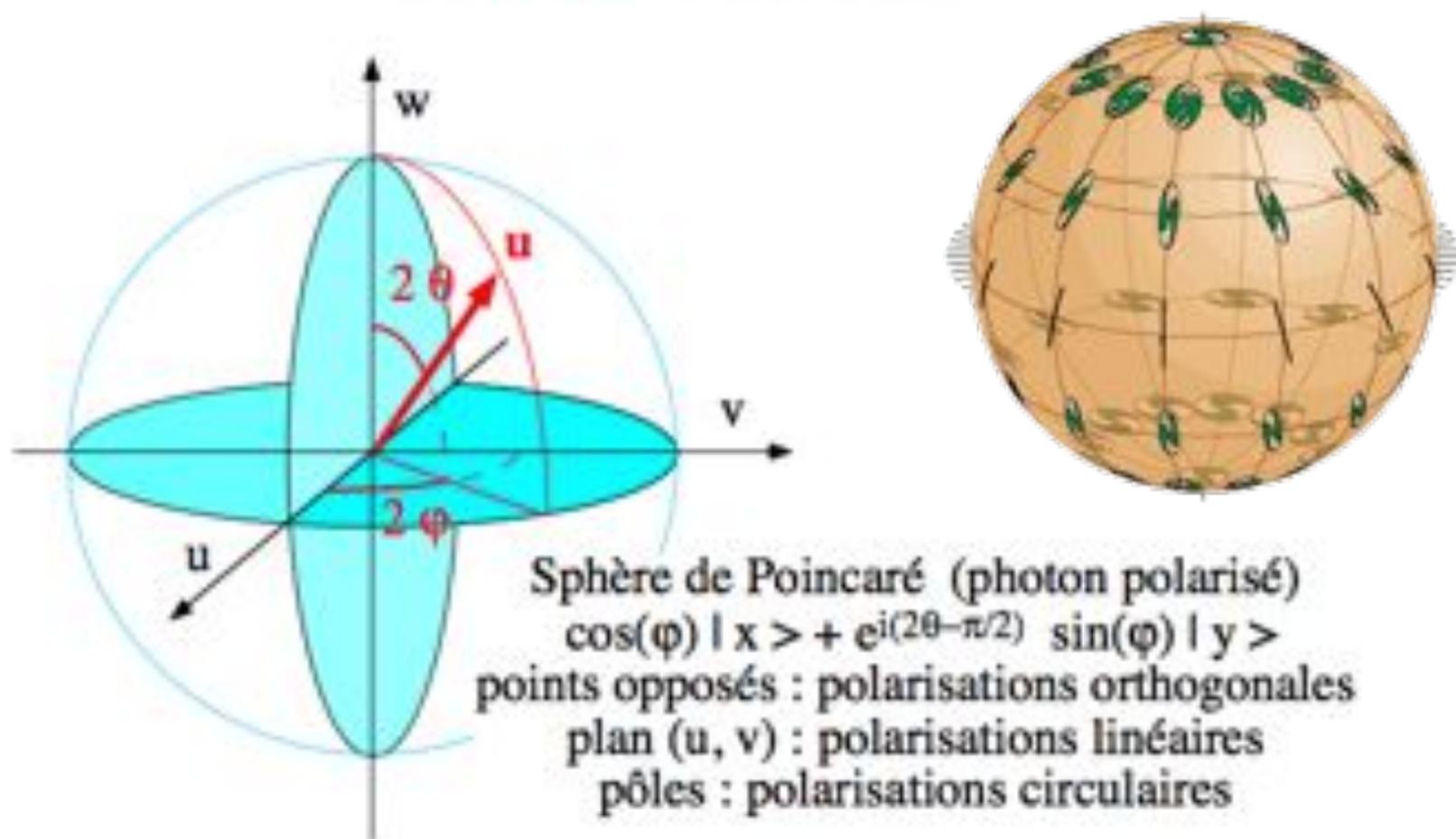
## Exemple d'espaces des états de dimension deux.

- \* Particule de spin  $1/2$
- \* Photon polarisé : états de polarisation linéaires ou circulaires; structure mathématique très proche de celle du spin  $1/2$  (facteur 2...).
- \* Atome "à deux niveaux" (attention ! émission spontanée).



Ces systèmes sont des réalisations de la notion de "bit quantique" (qubit).

## Sphère de Poincaré



Si on a des photons polarisés au lieu de spins  $1/2$ , la sphère de Bloch est remplacée par la sphère de Poincaré. Phénomènes très similaires (qubits !).

# De la sphère de Poincaré aux bits quantiques : le contrôle de la polarisation de la lumière

## 1. Description classique de la polarisation de la lumière

Biréfringence, pouvoir rotatoire et sphère de Poincaré

## 2. Description quantique de la polarisation du photon

Un petit paradoxe...

Superpositions linéaires et interférences

Le qubit (ou bit quantique)

## 3. Vers les applications : cryptographie et calcul quantique

Un peu d'histoire...

Le photon comme vecteur d'information

Manipuler des qubits individuels

# Information Quantique

Point de vue apparu à la fin du 20e siècle (1984-1994) :  
Peut-on utiliser le photon (et les objets quantiques en général)  
pour transmettre ou traiter plus efficacement l'information ?  
« Information quantique »

Deux grandes applications activement étudiées :

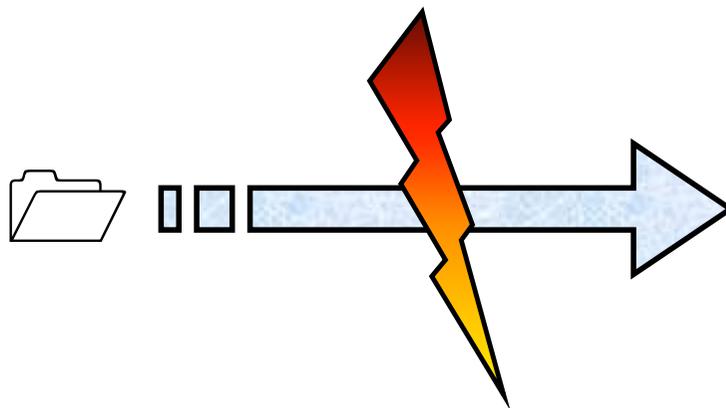
1. **La cryptographie quantique**  
distribution quantique de clé secrète (1984).
2. **Le calcul quantique**  
accélération exponentielle de  
certains algorithmes (Shor 1994).

# Les personnages

Eve



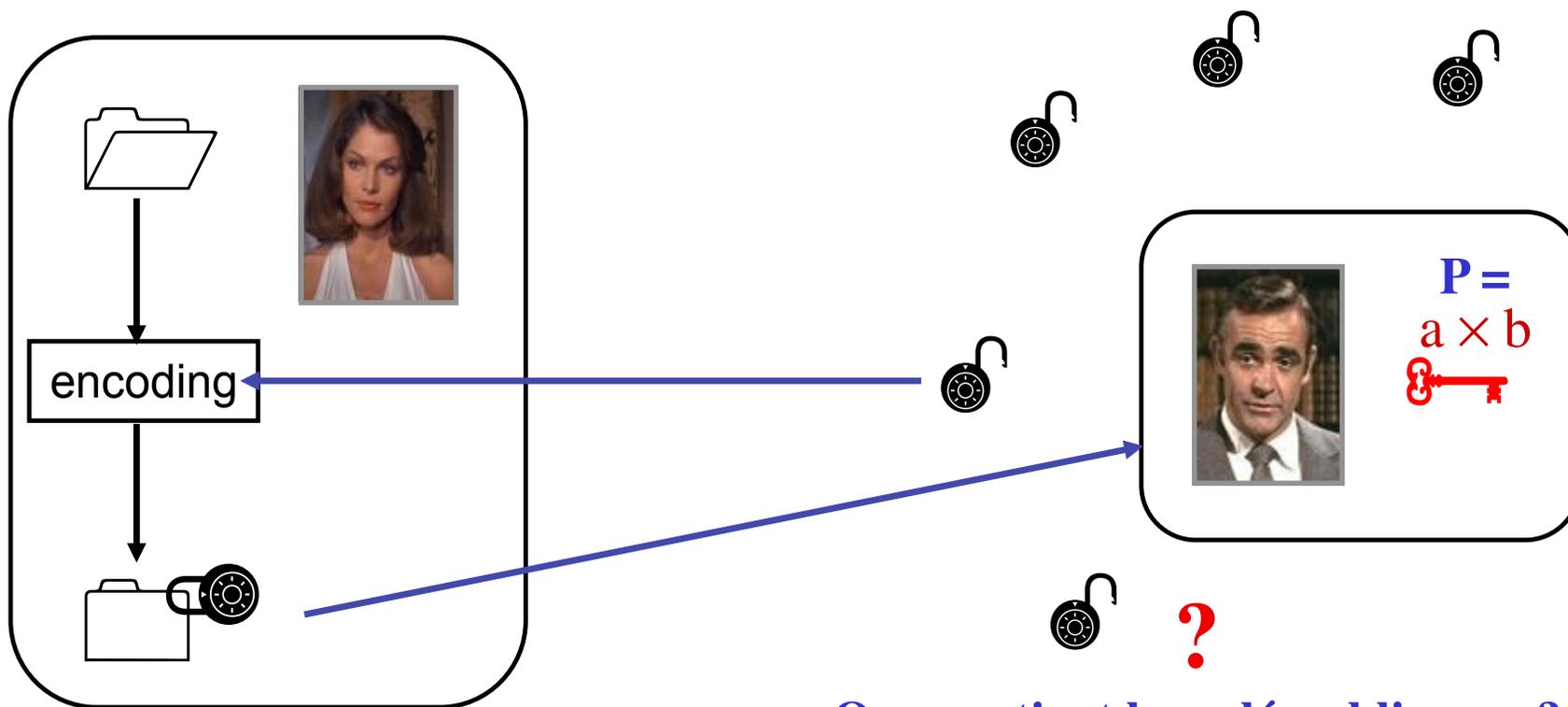
Alice



Bob

# Cryptographie à clé publique

Rivest, Shamir et Adelman (RSA, 1978)



Que contient la « clé publique » ?  
le produit  $P$  de deux grands nombres :  
très difficile à factoriser !

# CRYPTOGRAPHIE A CLEF PUBLIQUE

## - Problèmes :

\* Il existe de nombreux cas particuliers où il est possible de factoriser  $p$  la factorisation peut être effectuée facilement si  $a$  et  $b$  sont mal choisis

--> "recommandations" pour le choix des nombres premiers  $a$  et  $b$

\* **Pas de preuve absolue de sécurité** : la méthode reste potentiellement vulnérable si de meilleurs algorithmes sont découverts

## - Article de Peter Shor (1994) :

Un « ordinateur quantique » est capable de factoriser le produit de deux Nombres premiers en un temps polynomial ! **Grand retentissement**

**Durée de calcul avec meilleur algorithme classique connu :**

$$T_{cl}[n] = \text{Exp}[1.9 \text{Log}[n]^{1/3} \text{Log}[\text{Log}[n]]^{2/3}]$$

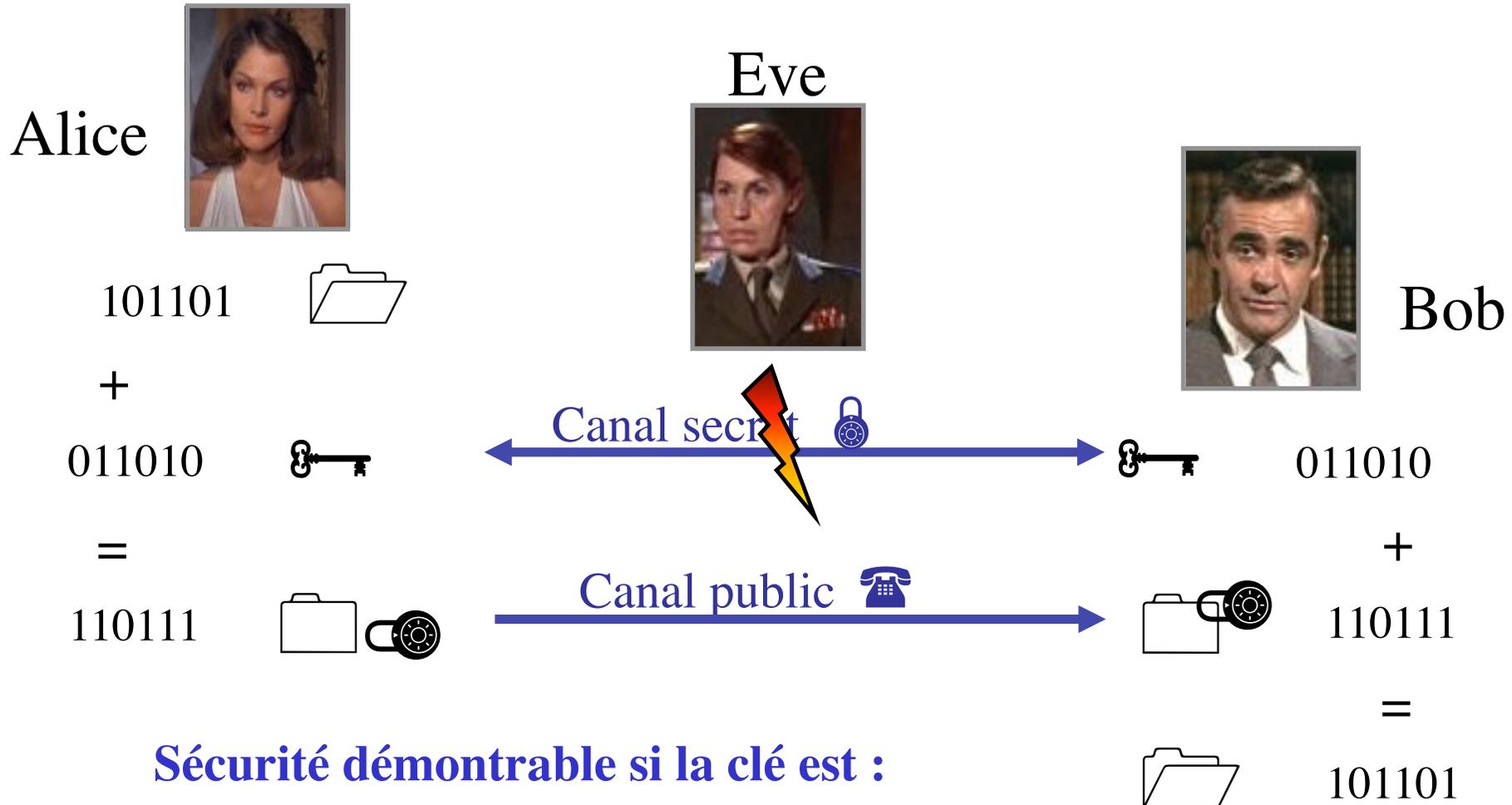
$$T_{cl}[2^{1024}] / T_{cl}[2^{512}] = 6.2 \cdot 10^6$$

**Durée de calcul avec l'algorithme de Shor :**

$$T_{shor}[n] = \text{Log}[n]^3$$

$$T_{shor}[2^{1024}] / T_{shor}[2^{512}] = 8$$

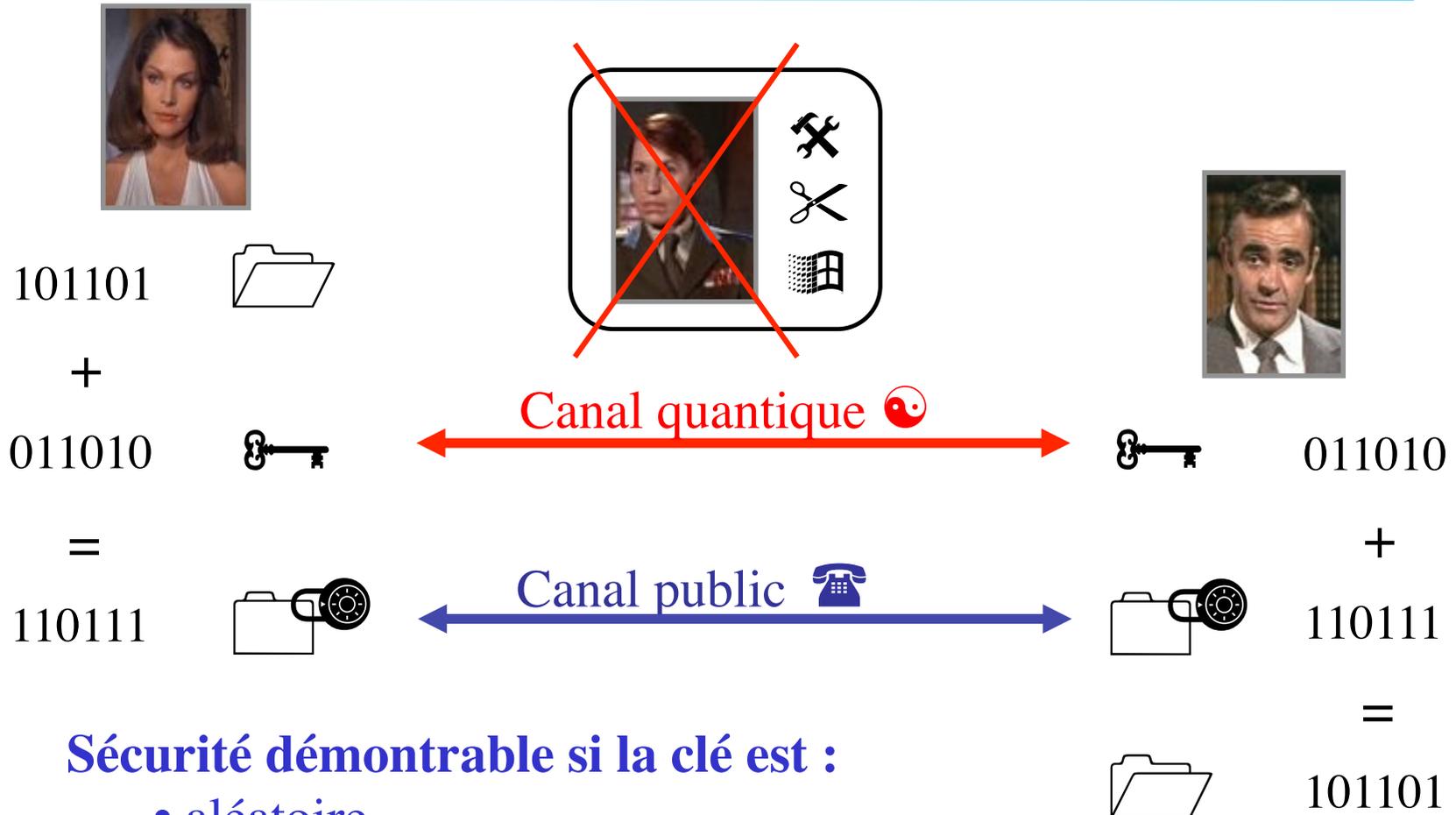
# Cryptographie à clé secrète : one-time pad (G. Vernam, 1917)



**Sécurité démontrable si la clé est :**

- aléatoire
- aussi longue que le message
- utilisée une seule fois (Shannon)

# Cryptographie **Quantique** à clé secrète : Bennett-Brassard (1984)



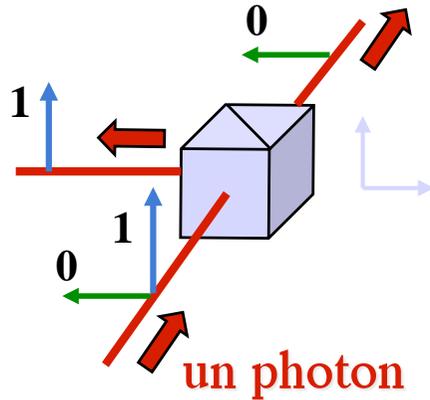
**Sécurité démontrable si la clé est :**

- aléatoire
- aussi longue que le message
- utilisée une seule fois (Shannon)

**• inconnue d'Eve : Lois Quantiques !**

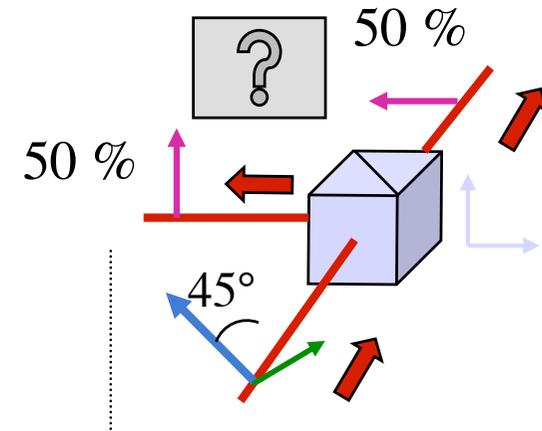
# Polarisation d'un Photon Unique

Codage de bits (0 ou 1)  
sur la polarisation  
d'un photon

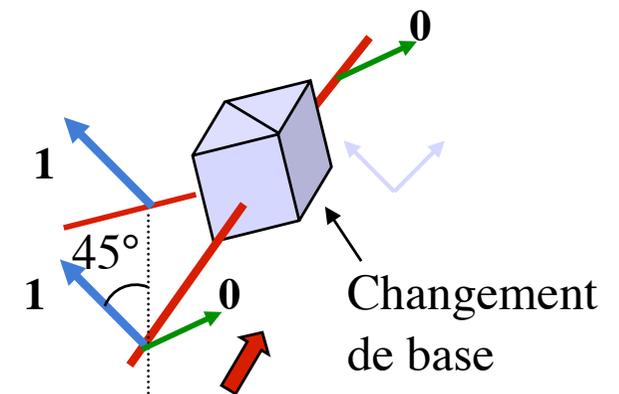


Résultat déterminé

On extrait une information  
si et seulement si la base  
de l'émetteur (codage)  
et du récepteur (détection)  
sont identiques !

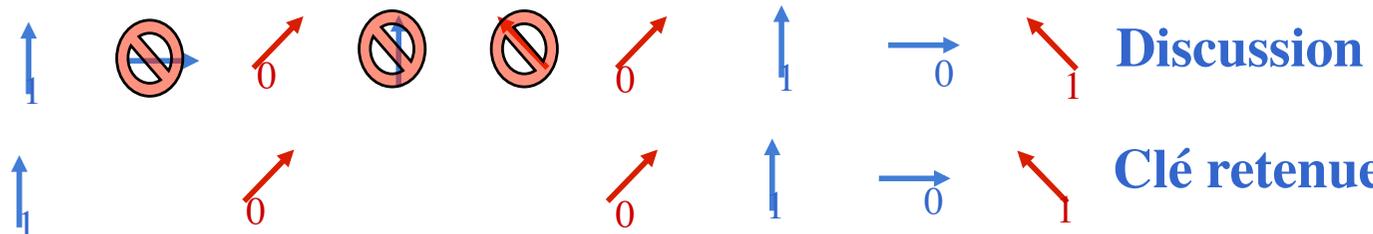
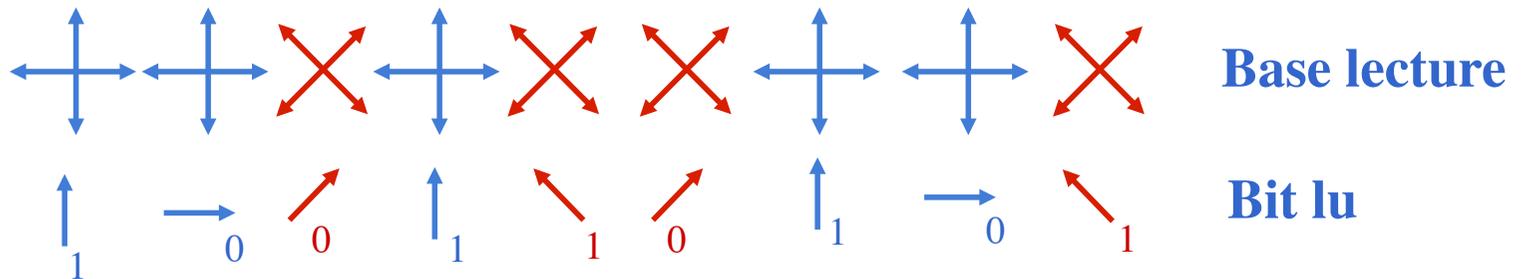
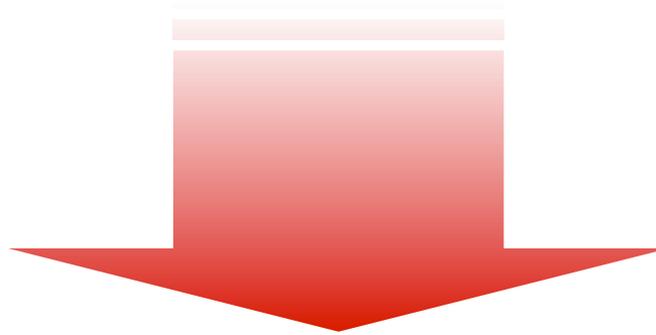
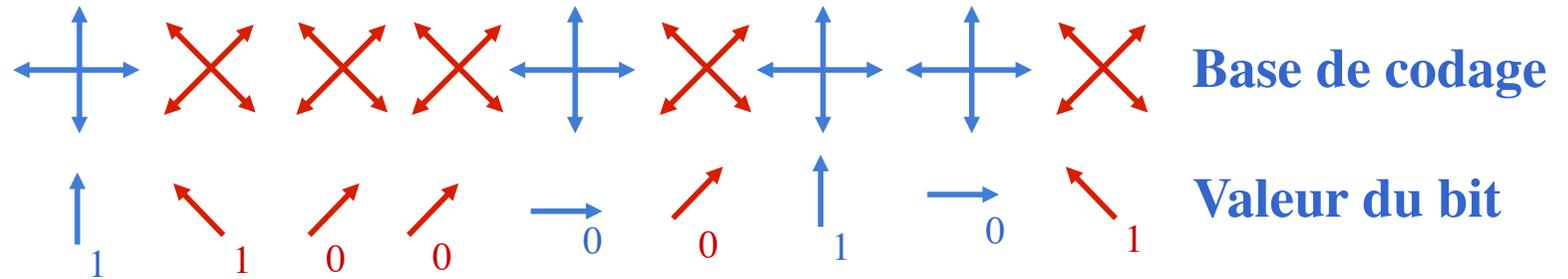


Résultat aléatoire

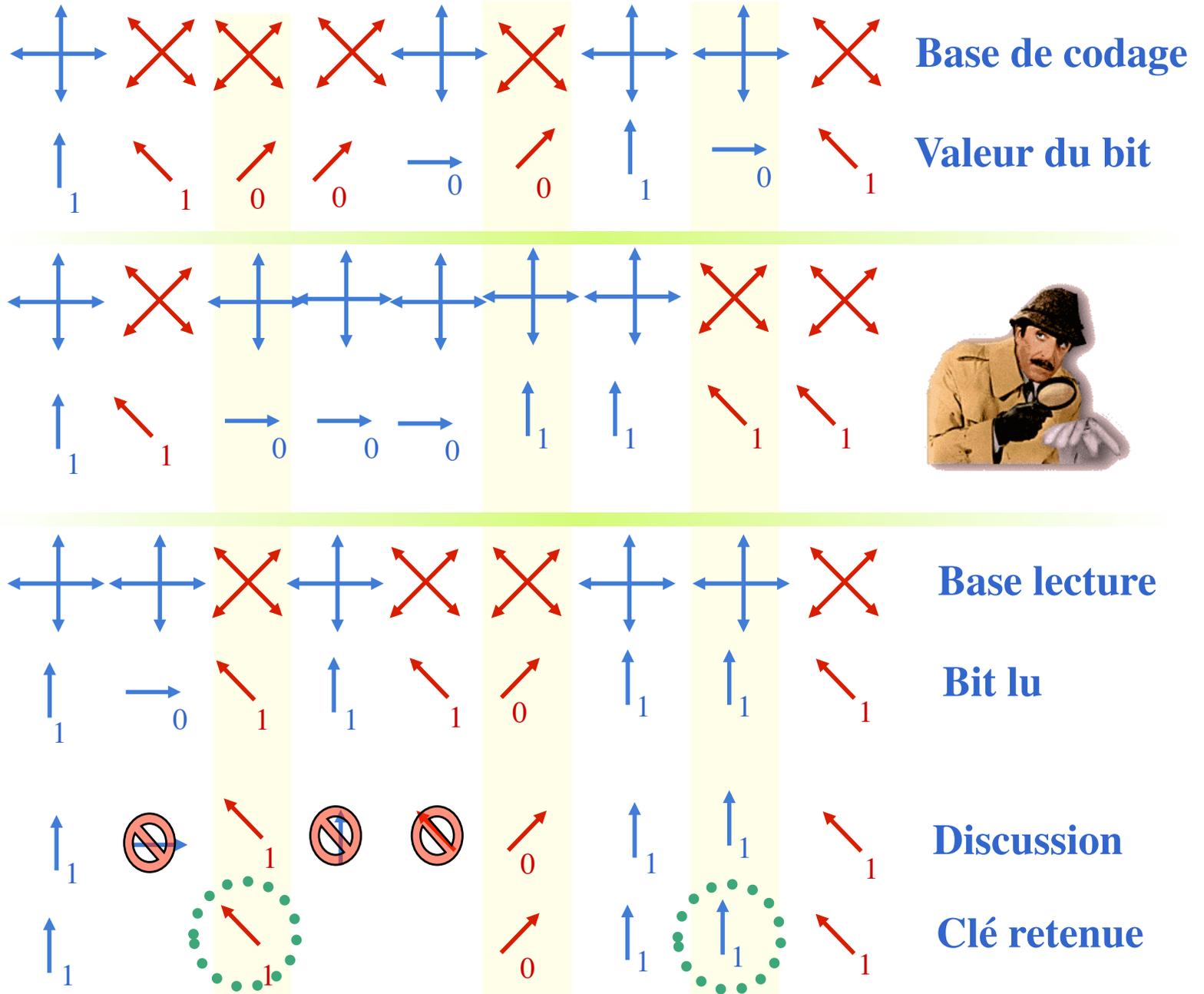


Résultat déterminé

# Protocole « BB84 » (Bennett et Brassard, 1984)



# Protocole « BB84 » (Bennett et Brassard, 1984)



# LA CRYPTOGRAPHIE QUANTIQUE : PRINCIPE

(Charles Bennett et Gilles Brassard, 1984)

**Point fondamental (« avantage quantique ») : plus Eve acquiert d'information, plus elle crée d'erreurs dans la transmission.**

On peut montrer qu'en mesurant le taux d'erreurs (ce qui se fait en comparant publiquement une fraction de la clé) Alice et Bob peuvent borner supérieurement la quantité d'information connue d'Eve.

- Alice et Bob peuvent alors utiliser des algorithmes classiques pour corriger les erreurs, et pour **produire une clé (plus petite) totalement inconnue d'Eve** . La longueur de la clé produite est d'autant plus petite que le taux d'erreur initial est plus grand (maximum tolérable : 11% !).

**-> Alice et Bob disposent d'une clé sans erreurs et totalement sûre**

# CRYPTOGRAPHIE QUANTIQUE : QUESTIONS...

(C. Bennett et G. Brassard, 1984)

## 1. Si Bob révèle la base qu'il a utilisée, pourquoi Eve a-t-elle moins d'information que Bob ?

Parce qu'elle doit faire une mesure « au moment où le photon passe », et qu'à ce moment là elle ne connaît pas la base commune utilisée par Alice et Bob (cette information arrive trop tard pour elle !). **Dans ces conditions, plus Eve acquiert d'information, plus elle crée d'erreurs dans la ligne !**

## 2. Comment Alice et Bob évaluent-ils les erreurs ?

Après l'échange initial, Alice and Bob mesurent le taux d'erreur en comparant publiquement une partie (choisie aléatoirement) des bits échangés  
-> **Borne supérieure de l'information connue d'Eve (essentiel !)**

## 3. Quel est le rôle des erreurs ? (il y a toujours des erreurs !)

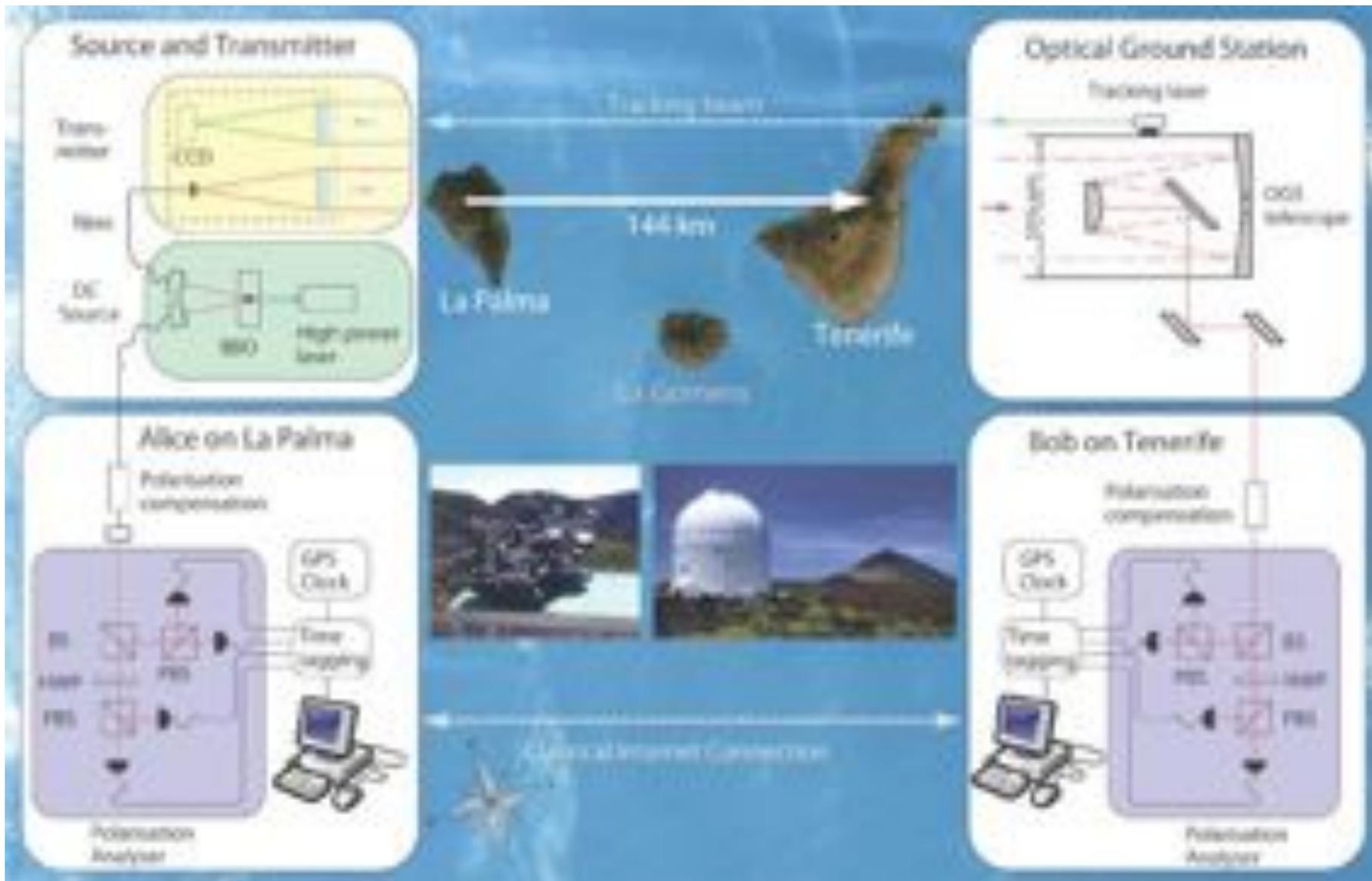
Alice et Bob « traitent » leur données avant utilisation, et la clé finale est toujours sans erreur et parfaitement sûre. Les erreurs réduisent la taille de clé, mais n'affectent pas sa confidentialité : plus il y a d'erreurs, plus la clé finale est petite, mais sa sécurité n'est jamais compromise.

## Questions...

Comment mettre en œuvre en pratique un système de distribution quantique de clé secrète ?

# Cryptographie quantique aux Canaries...

Free-Space distribution of entanglement and single photons over 144 km,  
R. Ursin et al, Nature Physics 3, 481 - 486 (2007)



## Potentiel industriel à moyen et long terme ?

\* Actuellement 2 startups commercialisent des systèmes (fibres optiques, 50 km)



The key to future-proof confidentiality

**IdQuantique**  
(Genève)

A Quantum Leap For Cryptography

The image shows a black, rack-mounted hardware device with a small screen and several ports on the front panel. The IdQuantique logo is visible in the top left corner of the image area.



MagiQ Technologies  
Quantum Information Solutions for the Real World.

Products & Solutions Research About MagiQ Press & Events Funding Partners

MagiQ Technologies Secures Two Major Accolades [More...](#)

Quantum Cryptography Gets Practical [More...](#)

Presenting MagiQ QPN Security Gateway(TM): Future-Proof, Unbreakable Encryption. [More...](#)

Presenting the first commercial quantum cryptography solutions.

MagiQ QPN QPN detachable

QPN Research QPN detachable

**MagiQ Technologies**  
(New York)

The image is a screenshot of the MagiQ Technologies website. It features a blue header with the company name and tagline. Below the header is a navigation menu. The main content area includes several news items and a central graphic showing two pieces of hardware. The text 'Presenting the first commercial quantum cryptography solutions.' is prominently displayed.

\* Intense activité aux USA (surtout militaire) et au Japon (NEC, Fujitsu...)

\* « Projet Intégré » Européen **SECOQC** :



« Secure Communication based on Quantum Cryptography ».

... démonstration d'un réseau quantique crypté (Vienne, octobre 2008)

## Questions...

- \* La cryptographie quantique progresse régulièrement
  - des systèmes sont disponibles commercialement
  - défi actuel : mise en œuvre et évaluation en réseau
  
- \* Qu'en est-il du calcul quantique ?

## QUBITS

**Bit Classique :** 2 états 0 et 1

**Bit Quantique :** 2 états  $|0\rangle$  and  $|1\rangle$ , et superpositions linéaires :

$$|\psi\rangle = \cos(\theta) e^{i\varphi} |0\rangle + \sin(\theta) e^{-i\varphi} |1\rangle$$

**Exemples simples :**

**Photon polarisé**



**"Photon partagé"**



-> très utile pour la cryptographie quantique

## CALCUL QUANTIQUE : REGISTRES

**Equivalent à un calculateur classique "analogique" ? : non !**

N bits prenant les valeurs 0 et 1

**Registre :**  $\boxed{\varepsilon(1) \mid \varepsilon(2) \mid \varepsilon(3) \mid \varepsilon(4) \mid \dots \mid \varepsilon(N)}$  ( $\varepsilon=0$  ou 1)

Etat d'un calculateur analogique classique : N variables continues  $\varepsilon(i)$

Etat possible du calculateur :  $|\varepsilon(1), \varepsilon(2), \varepsilon(3), \varepsilon(4), \dots, \varepsilon(N)\rangle$  ( $\varepsilon=0$  ou 1)

**Etat général du calculateur** :  $\sum c_x |\varepsilon(1), \varepsilon(2), \varepsilon(3), \varepsilon(4), \dots, \varepsilon(N)\rangle$

Etat du calculateur quantique :  $2^N$  variables complexes continues  $c_x$  !!!

**Les états du calculateur appartiennent à un espace de dimension  $2^N$**

**La plupart de ces états sont "intriqués" (perte d'individualité des qubits)**

## CALCUL QUANTIQUE : REGISTRES

Etat général du calculateur :  $\sum c_x | \epsilon(1), \epsilon(2), \epsilon(3), \epsilon(4) \dots \epsilon(N) \rangle$

( **superposition linéaire de tous les états possibles du registre** )

- Le calcul va impliquer l'ensemble des  $2^N$  états  $| \epsilon(1) \dots \epsilon(N) \rangle$

-> "**parallélisme quantique**"

- Lorsque l'état du calculateur est "observé", **un état binaire** est détecté (les probabilités des autres s'annulent : "réduction du paquet d'onde")

-> on conserve les **avantages d'un calcul binaire**.

**Mélange très original d'ingrédients binaires et analogiques !**

**"Les portes peuvent être ouvertes et fermées en même temps"**

## LE CALCUL QUANTIQUE

L'ordinateur quantique peut effectuer certains calculs très efficacement...

- algorithme de factorisation (Shor 1994) : gain exponentiel
- algorithme de tri (Grover 1996) : gain quadratique

... mais il est extrêmement difficile à réaliser

- les états de la forme  $\sum c_i |\epsilon(1), \epsilon(2), \epsilon(3), \epsilon(4) \dots \epsilon(N)\rangle$  avec N grand sont très sensibles aux interactions avec l'environnement : "décohérence"
- l'interaction des "qubits" entre eux et avec l'extérieur doit être parfaitement contrôlée, pour éviter la décohérence tout en effectuant des calculs

Quelques résultats encourageants ...

- tout calcul peut s'effectuer à partir d'opérations logiques à 1 ou 2 qubits
- il est possible de concevoir des "codes correcteurs d'erreurs" quantiques

# ORDINATEUR QUANTIQUE DANS DU SILICIUM

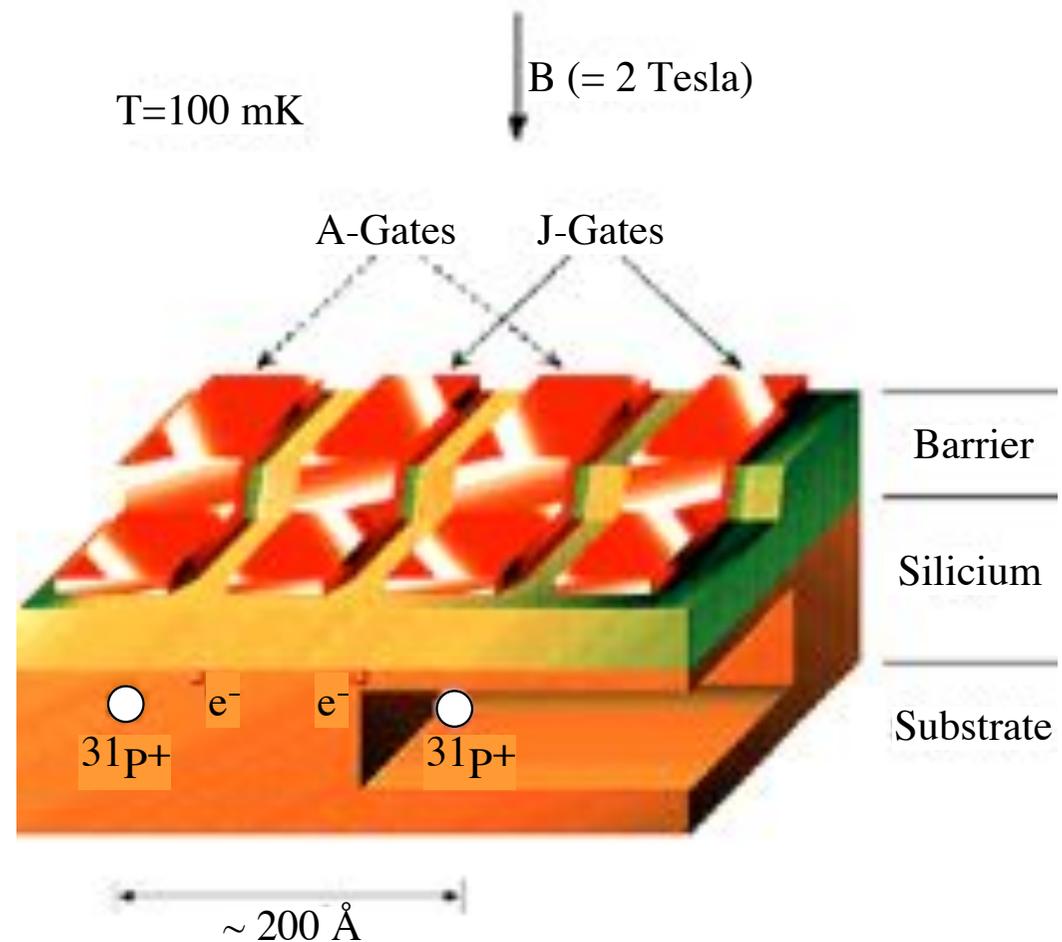
Qubit : moment magnétique  
d'atomes de phosphore  
implantés individuellement  
sous des électrodes

"A" : contrôle d'un qubit

"J" : couplage de 2 qubits

\* **Techniquement faisable**

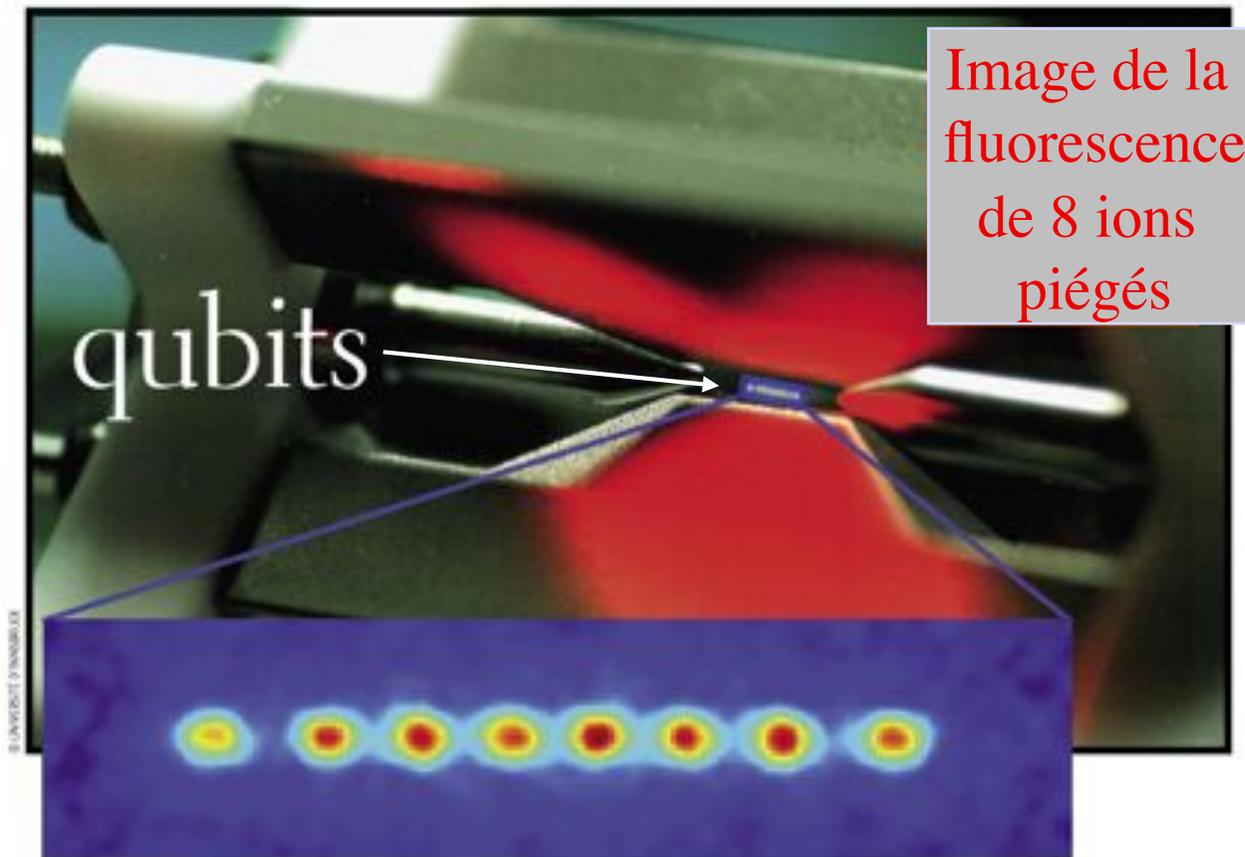
\* **Décohérence ???**



B. E. Kane, "A silicon-based nuclear spin quantum computer",  
Nature, Vol. 393, p. 133, 1998

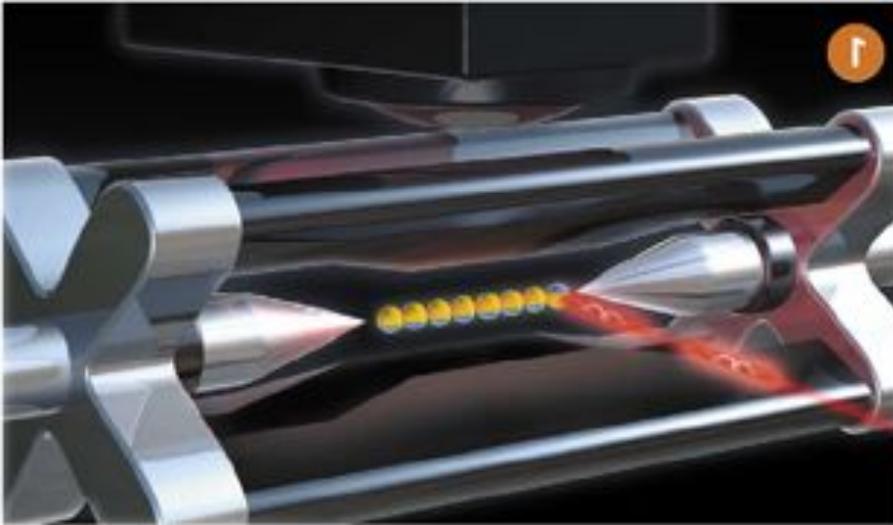
## PIEGES IONIQUES LINEAIRES

- \* Confinement par des champs électromagnétiques : « chaîne » d'ions piégés
- \* Refroidissement laser : ions dans l'état fondamental du piège harmonique



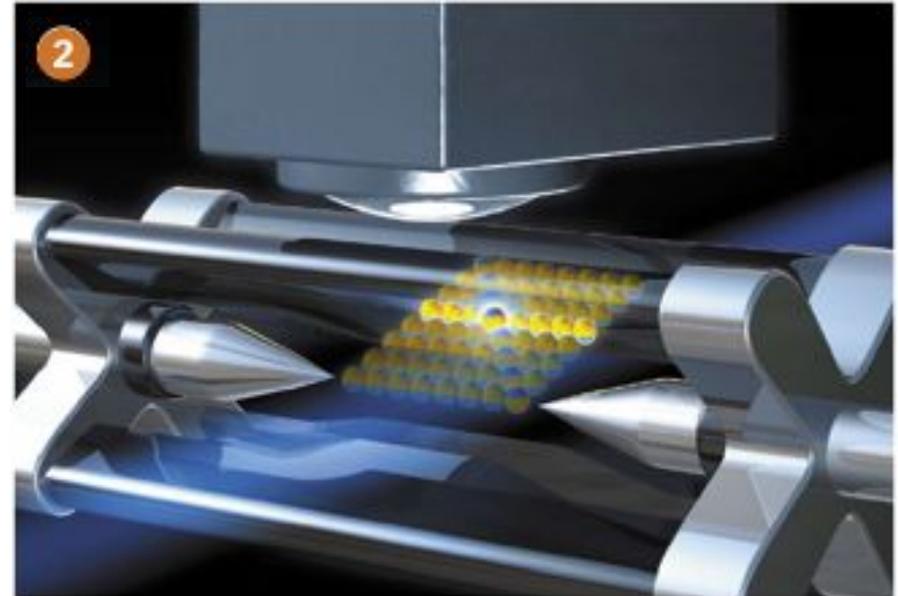
**Ions isolés  
dans le vide :  
décohérence  
beaucoup plus  
faible que dans  
un solide...**

## « Octet Quantique » (Innsbruck, 2005)



**Registre quantique de 8 qubits**

**Contrôle du « calcul »  
effectué en appliquant des  
faisceaux lasers**



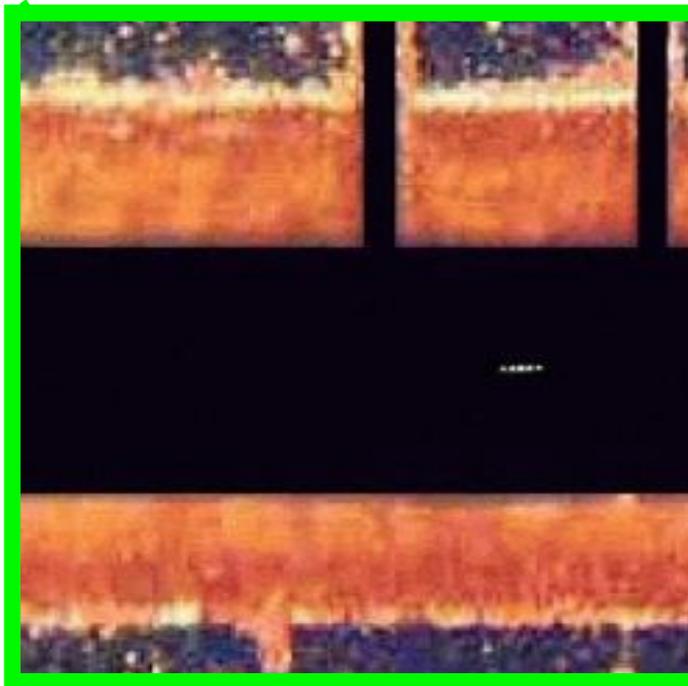
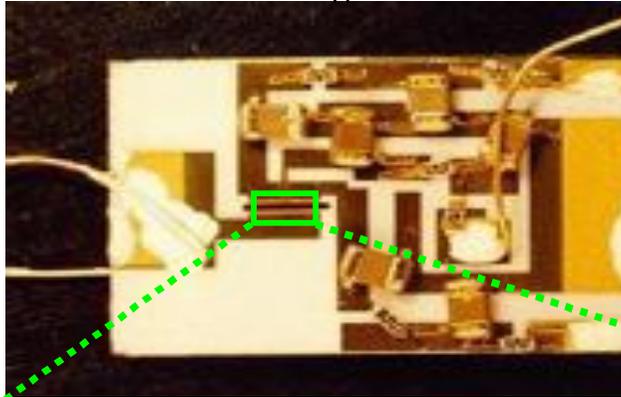
**Préparation et lecture de l'état:**

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{8}} ( |10000000\rangle + |01000000\rangle + |00100000\rangle + |00010000\rangle + |00001000\rangle + |00000100\rangle + |00000010\rangle + |00000001\rangle )$$

**... Difficile à dessiner !**

# « CCD quantique »

C. Kielpinski, C. Monroe, D. Wineland, Nature v. 417, p. 709, 2002



The Nobel Prize in Physics 2012  
Serge Haroche, David J. Wineland

The Nobel Prize in Physics 2012

Serge Haroche

David J. Wineland



Photo: © CNRS  
Photographie/Christophe Lelievre

Serge Haroche

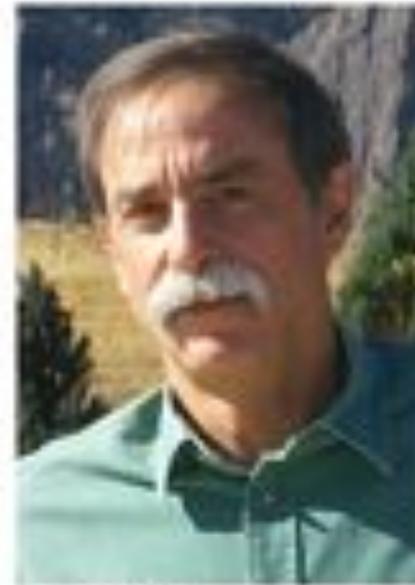


Photo: © NIST

David J. Wineland

The Nobel Prize in Physics 2012 was awarded jointly to Serge Haroche and David J. Wineland "for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems"

