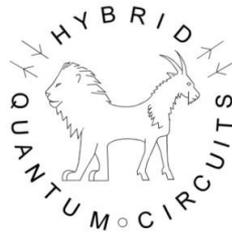




laboratoire pierre aigrain  
électronique et photonique quantiques



**ENS**  
ÉCOLE NORMALE  
SUPÉRIEURE



**SE<sup>2</sup>ND**



# Nanoélectronique quantique

T. Kontos

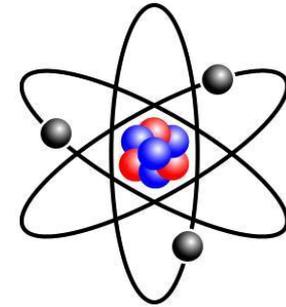
Laboratoire Pierre Aigrain

Email:kontos@lpa.ens.fr

## *Monde macroscopique*

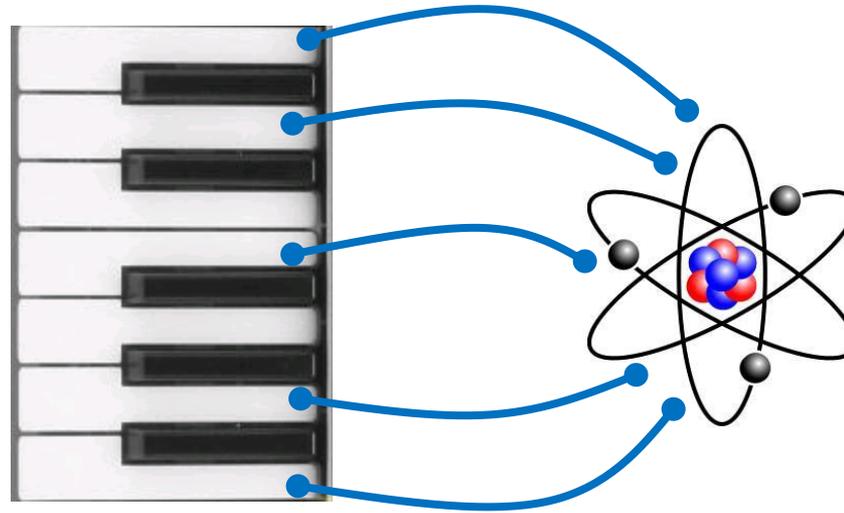


## *Monde microscopique*



- Systèmes macroscopiques (classiques) : propriétés réglables, interface simple
- Systèmes microscopiques (quantiques) : propriétés déterminées par constantes fondamentales

 Frontière entre ces deux mondes ?



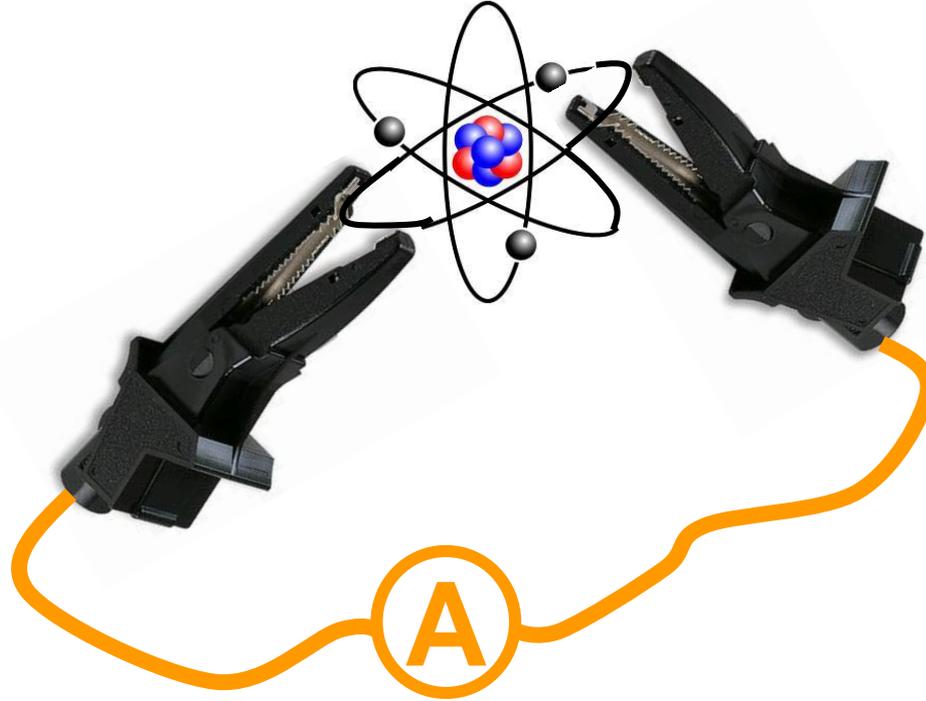
- Est-il possible de combiner modularité du monde macro avec comportement quantique du monde micro ?

Comprendre transition classique /quantique

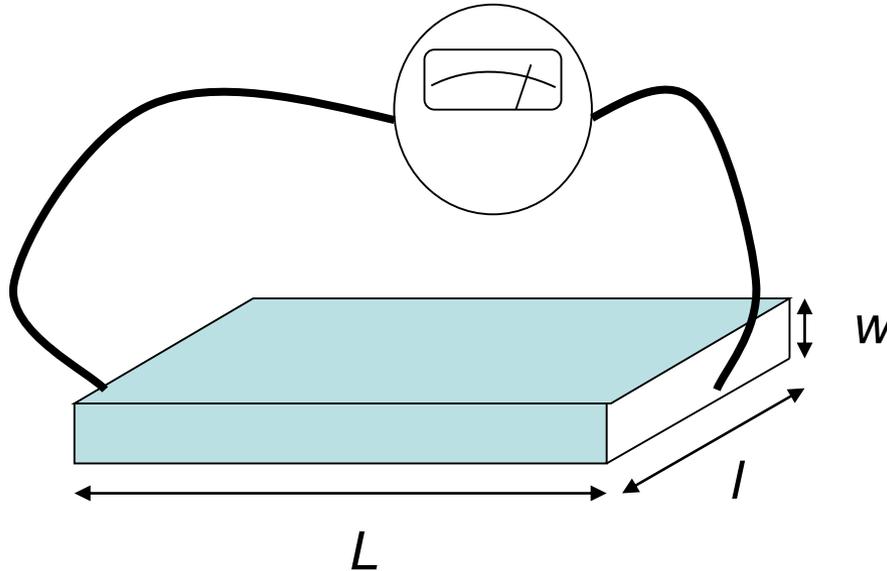
Systèmes modèles pour la physique de la matière condensée

Expériences fondamentales de physique quantique

 Utilisation de nano-circuits pour explorer cette physique



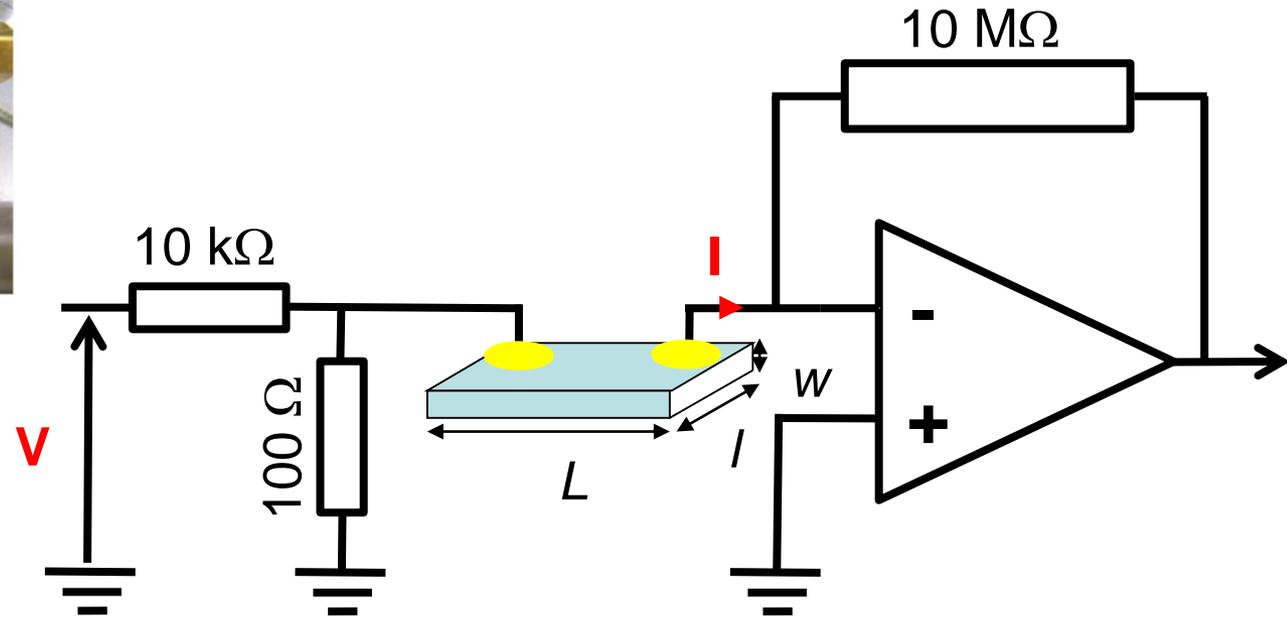
Comment réaliser les pinces crocodile ?



$$G = \sigma \frac{w \times l}{L}$$

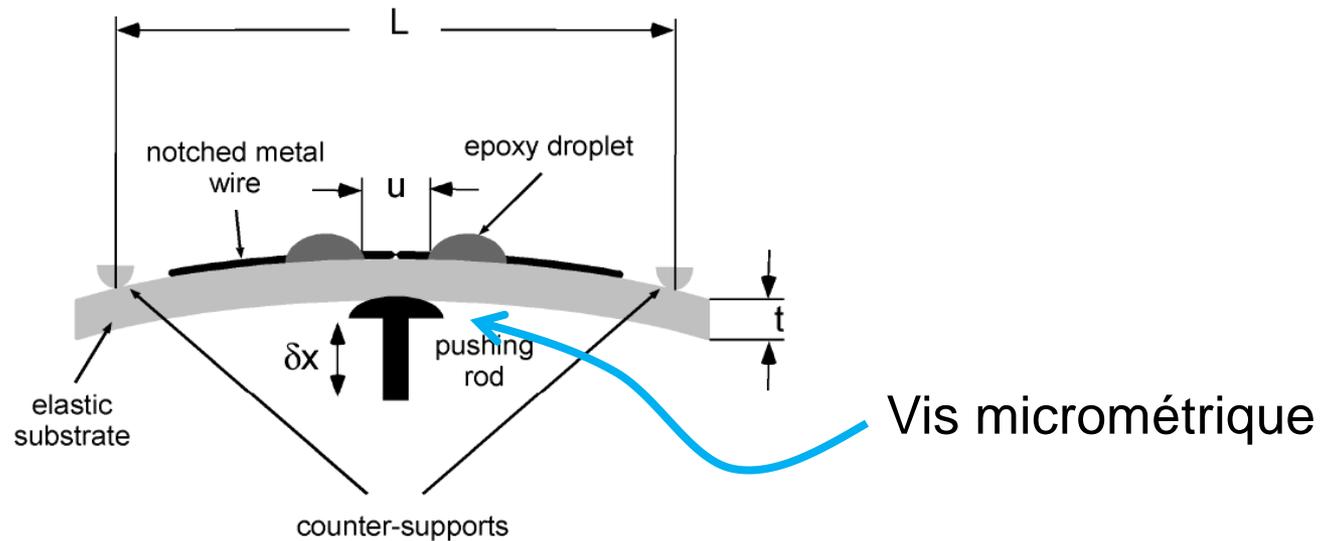
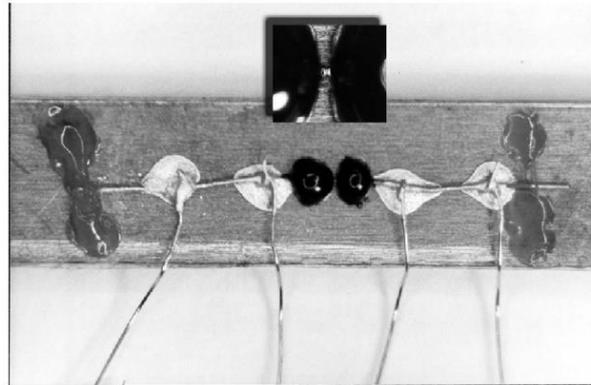
- $\sigma$  est la grandeur intrinsèque.
- $\sigma$  dépend des propriétés du métal...

**➔** Que se passe-t-il lorsque l'on réduit la taille du conducteur ?

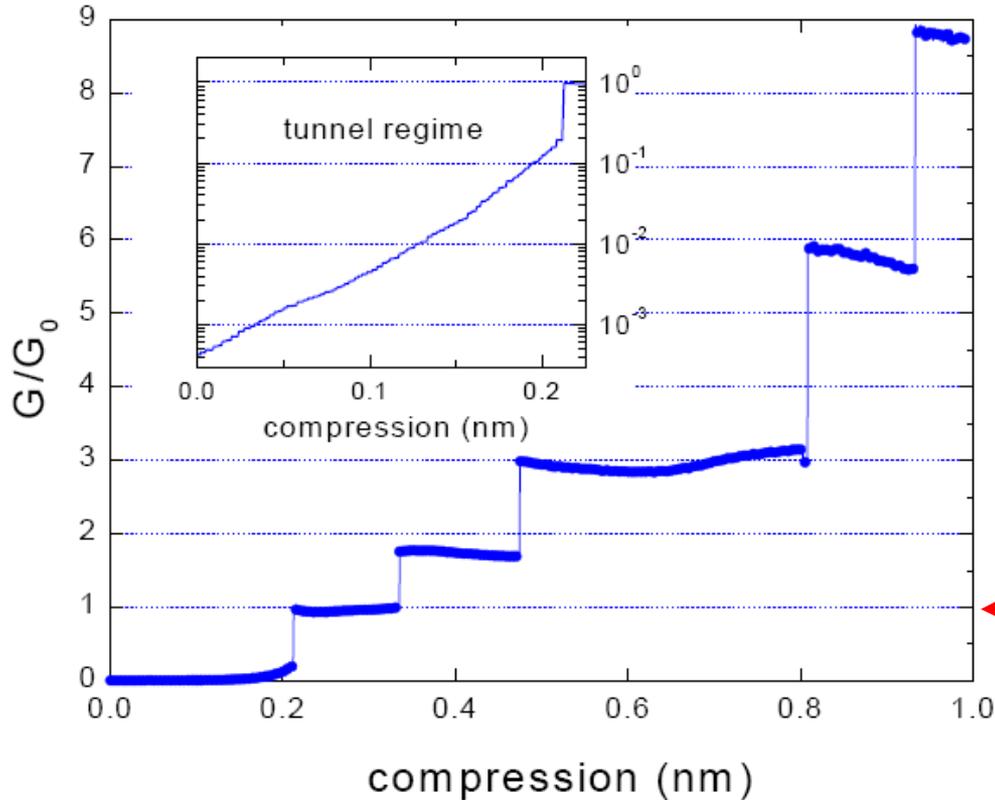


- Montage à ampli opérationnel « simple » (montage transimpédance)
- Mesure jusqu'à 100 fA

## Contacts à partir de fil coupé



- Distance interélectrode  $\delta D = r \delta x$



$$E = h\nu$$

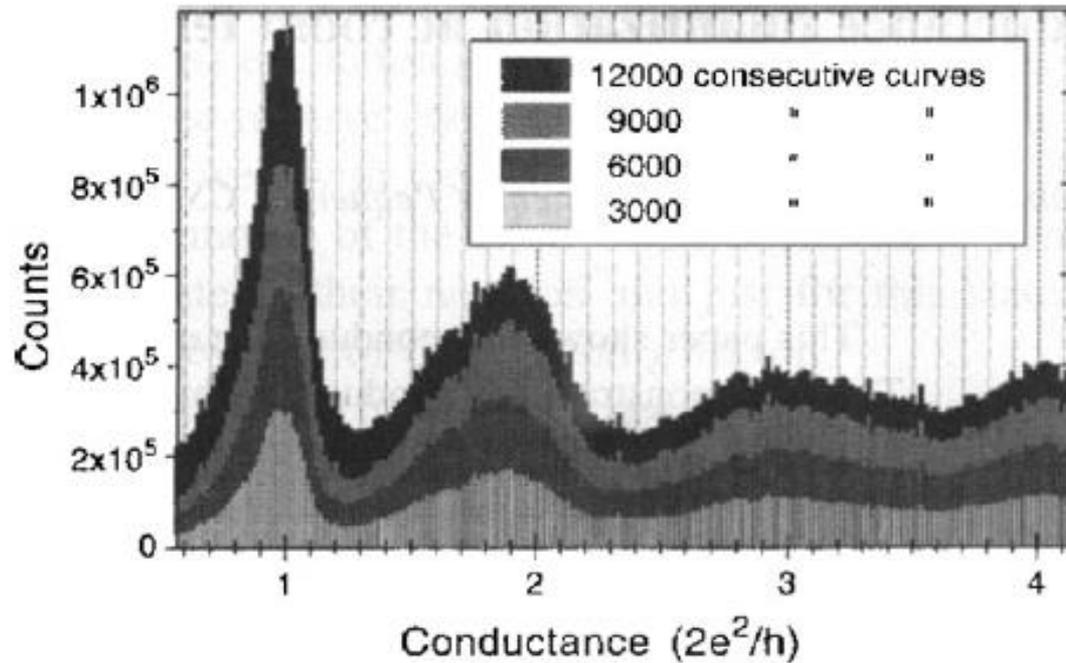
$$eV = h \times \nu$$

$$I = 2 \times e \times \nu = \frac{2e^2}{h} V = G_0 V$$

$$G_0 = 77.48091 \mu S \cong 12.9 k\Omega$$

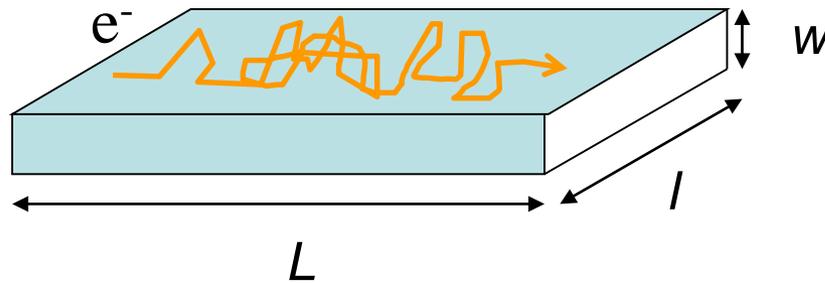
- La conductance du fil varie par palliers et pas linéairement !
- Plateaux de conductance proche de 12.9kΩ

Contact en Au



- 'Quantification' moyenne de la conductance

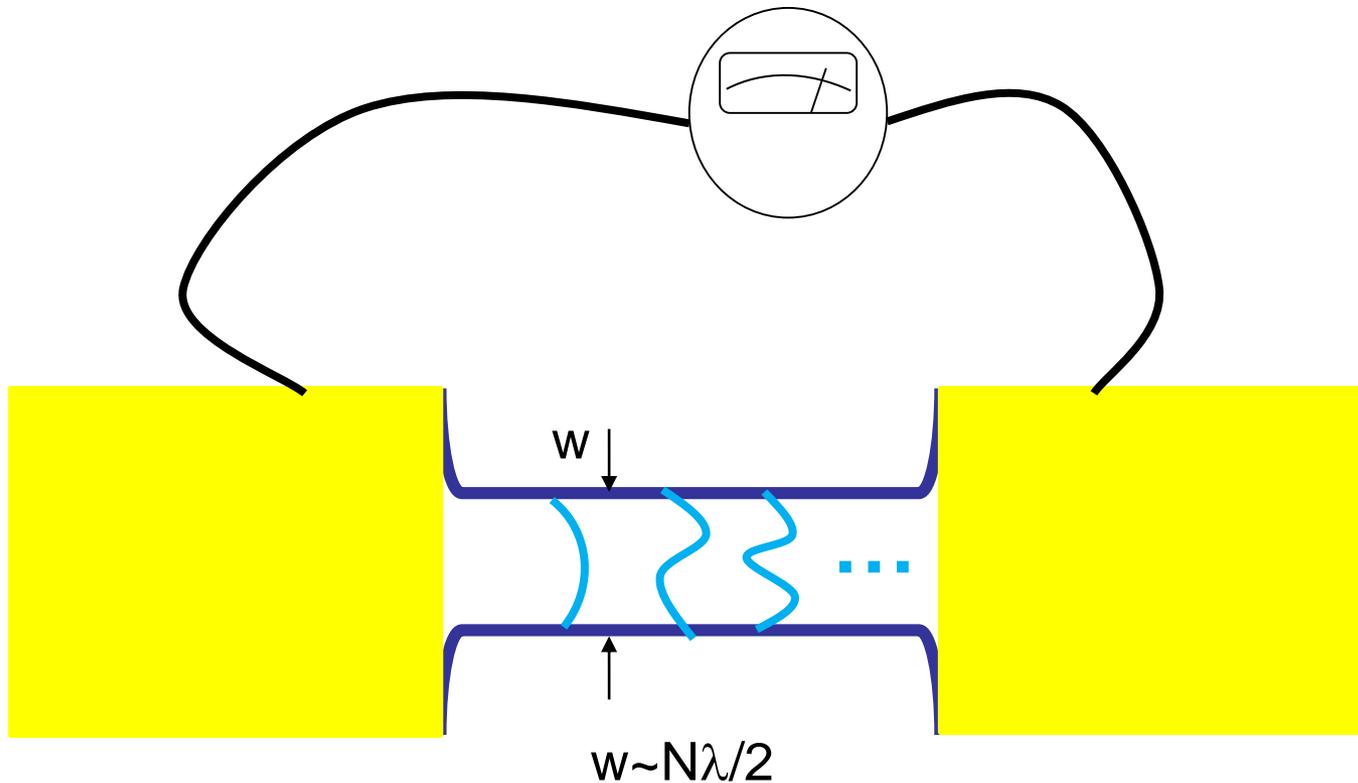
➔ Origine de cette quantification ?



$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e\vec{E} - \frac{m\vec{v}}{\tau} + \quad \vec{j} = -ne\vec{v} \quad \Rightarrow \quad \vec{j} = \frac{ne^2\tau}{m} \vec{E} \quad \sigma$$

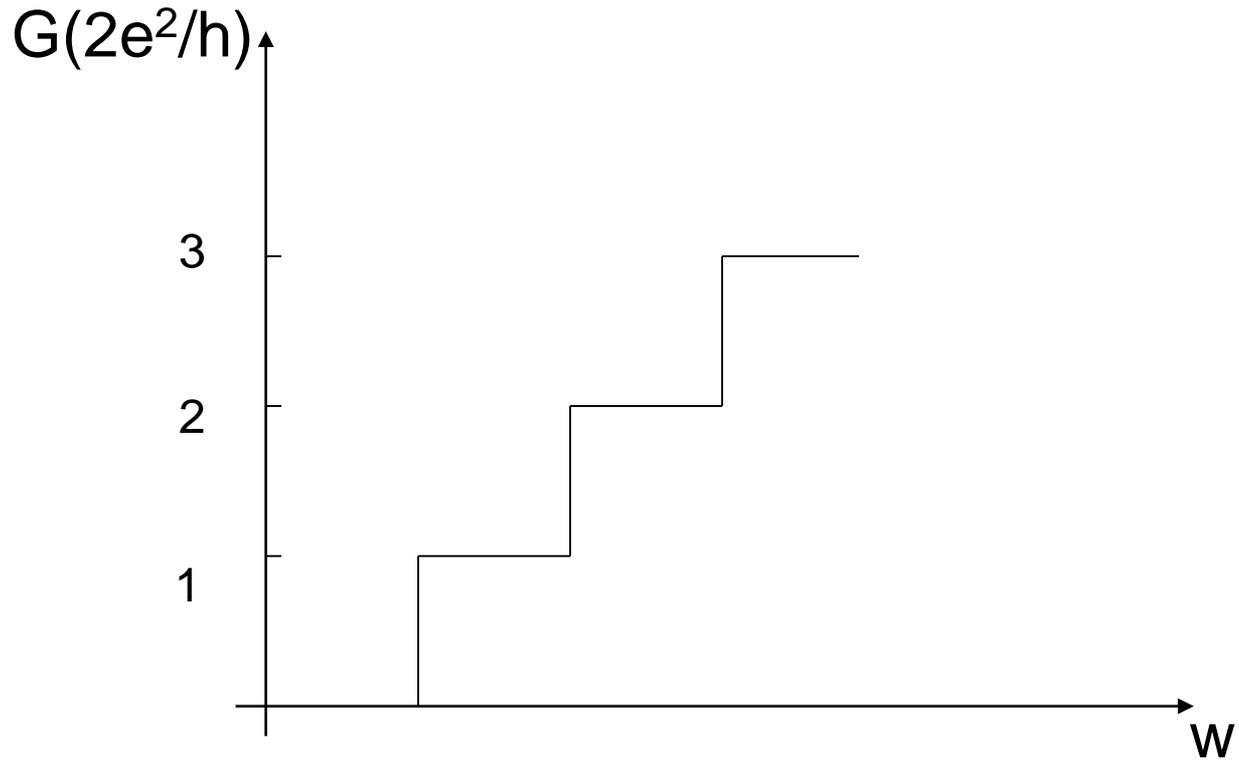
A red arrow points from the symbol  $\sigma$  to the coefficient  $\frac{ne^2\tau}{m}$  in the final equation.

- Equation du mouvement des électrons dans champ électrique
- Loi d'Ohm
- Conductivité limitée par collision, densité etc...



- Phénomène similaire à la corde vibrante... ondes électroniques « attachées » aux bords de la constriction.
- Seulement certains « modes » électroniques peuvent passer

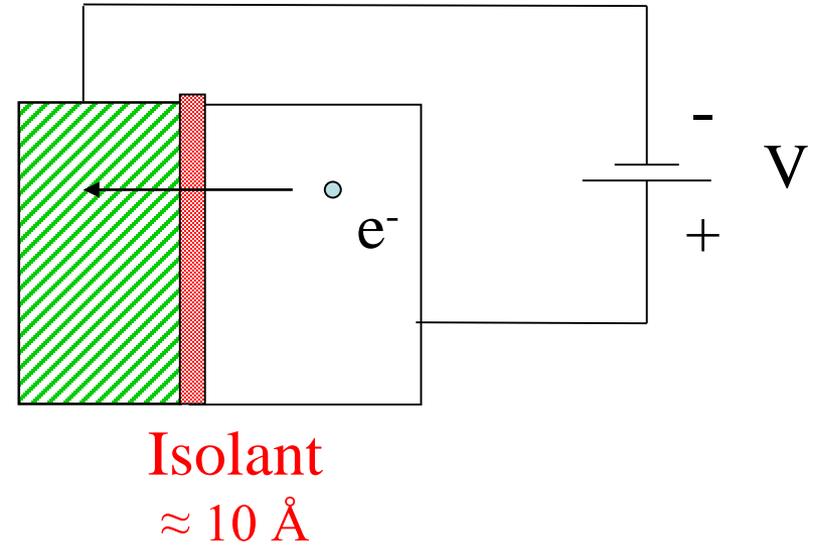
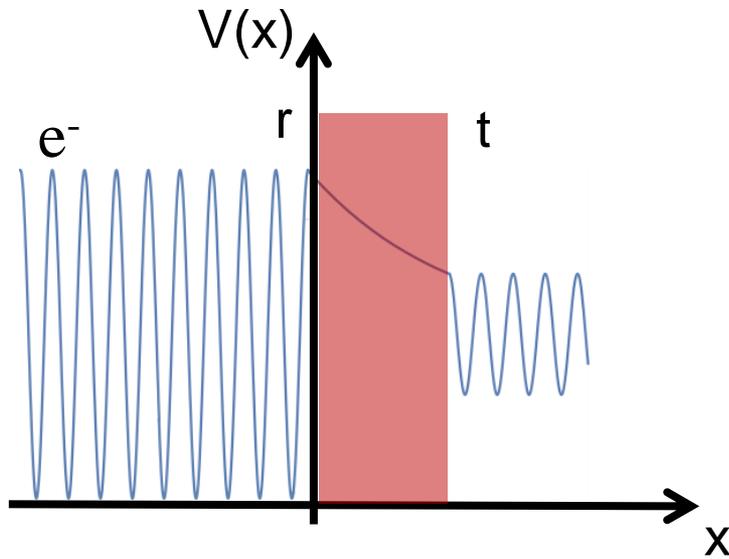
 Quantification de la conductance.



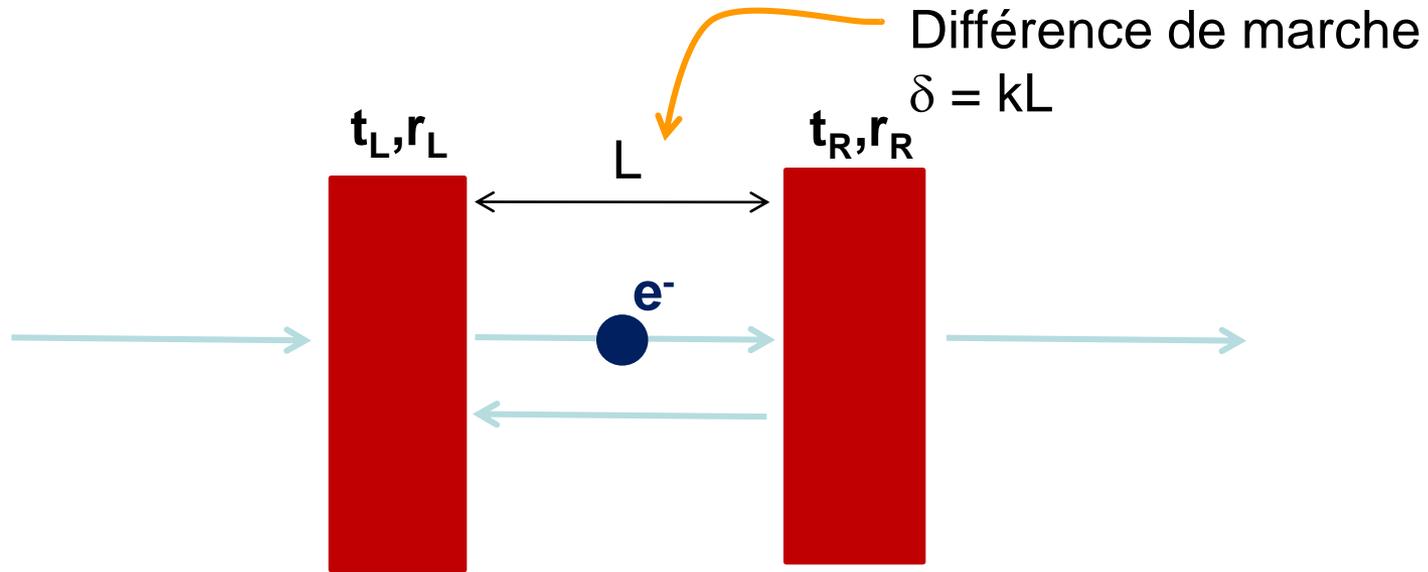
Le nombre de modes augmente un par un quand  $w$  augmente



$G$  augmente par unité de quantum de conductance



- Nature ondulatoire des électrons encore !
- Courant électrique à travers un isolant !



*Interféromètre de Fabry-Perot électronique*

$$T = t_L \exp(i\delta) t_R + t_L \exp(i\delta) r_R \exp(i\delta) r_L \exp(i\delta) t_R + \dots = t_L \exp(i\delta) t_R / (1 - r_L r_R \exp(2i\delta))$$

- Quantification unidimensionnelle dans le cas présent
- Résonances dans la transmission (courant de probabilité) reflètent le spectre

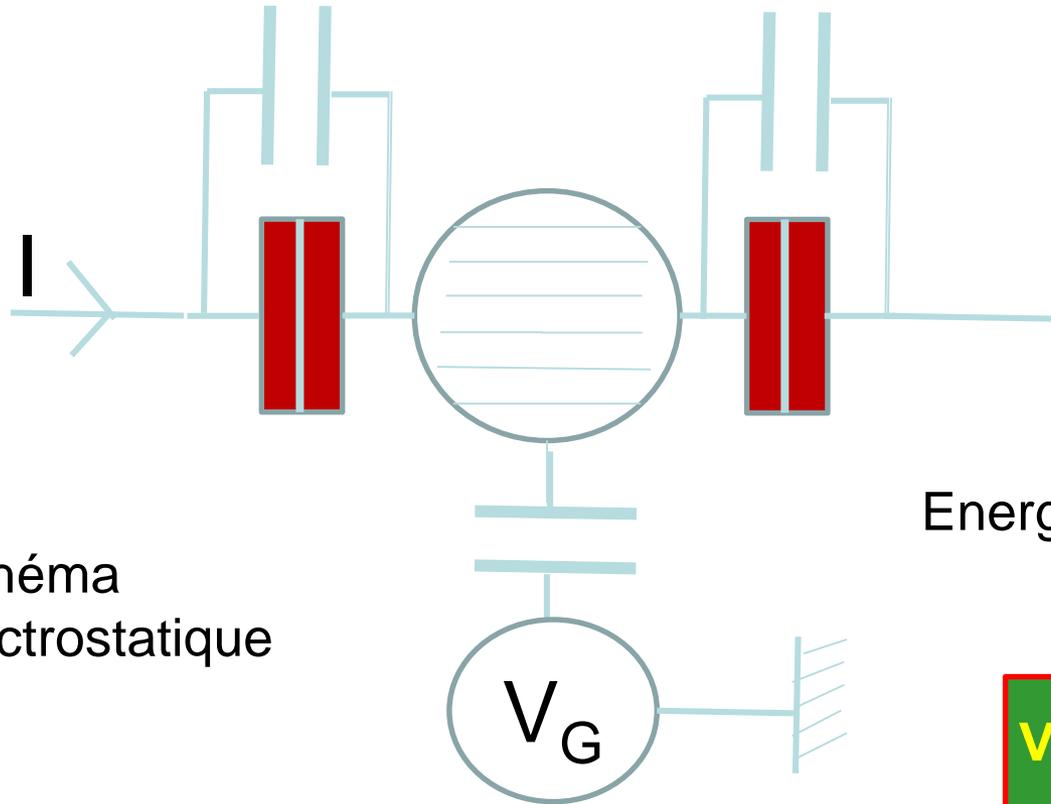


Schéma électrostatique

Conservation de l'énergie

$$p = \hbar k$$

$$\hbar^2 k^2 / 2m - \alpha e V_G = \text{cste}$$

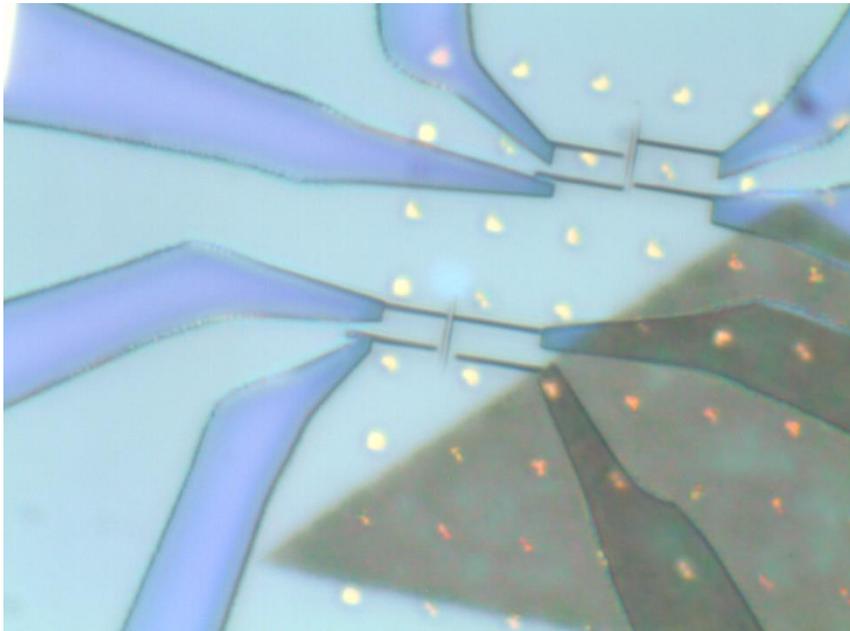
Energie cinétique

Energie potentielle

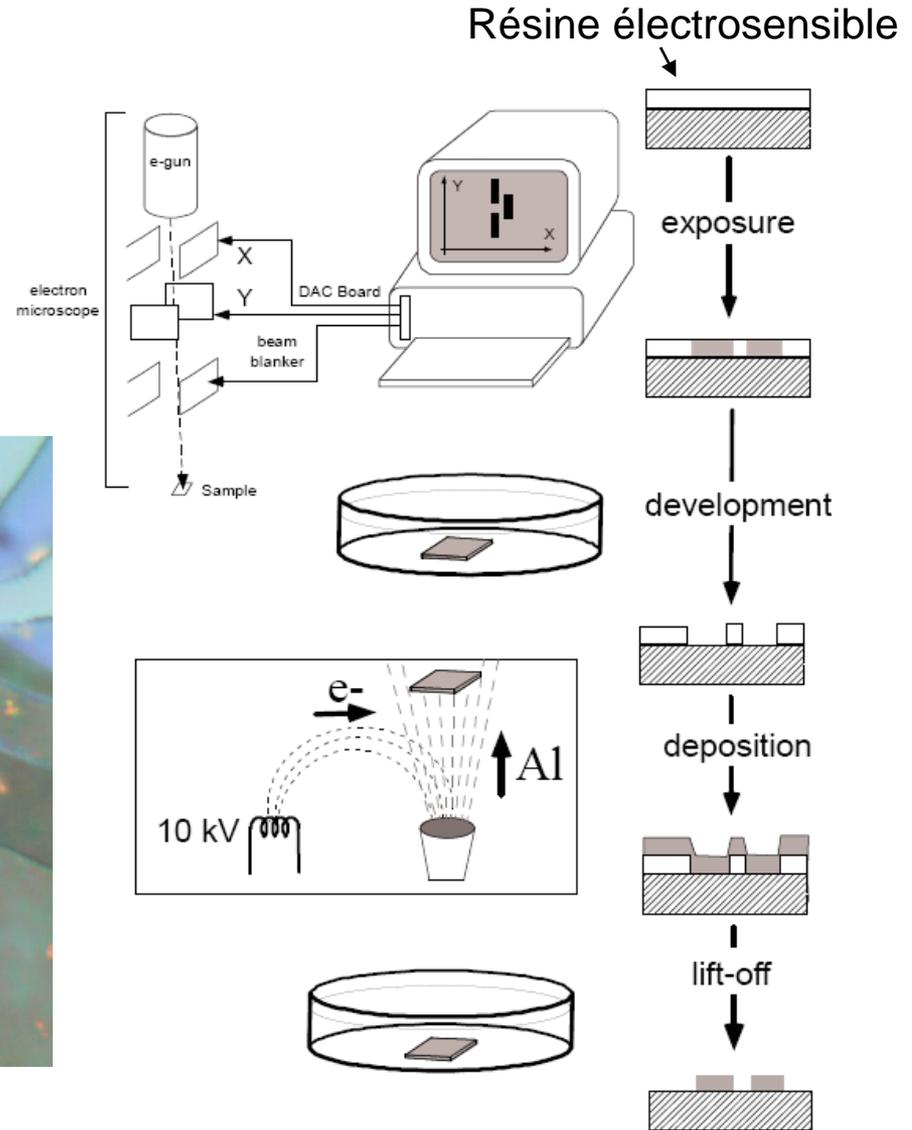
**Vecteur d'onde accordable !**

- Capacité totale  $C \sim 1\text{fF} - 10\text{aF}$   
 → Effets de charge importants ( $e^2/2C \sim k_B \times 1 - 100\text{K}$ )
- Contrôle du vecteur d'onde électronique par  $V_G$   
 → « Transistor à effet de champ atomique »

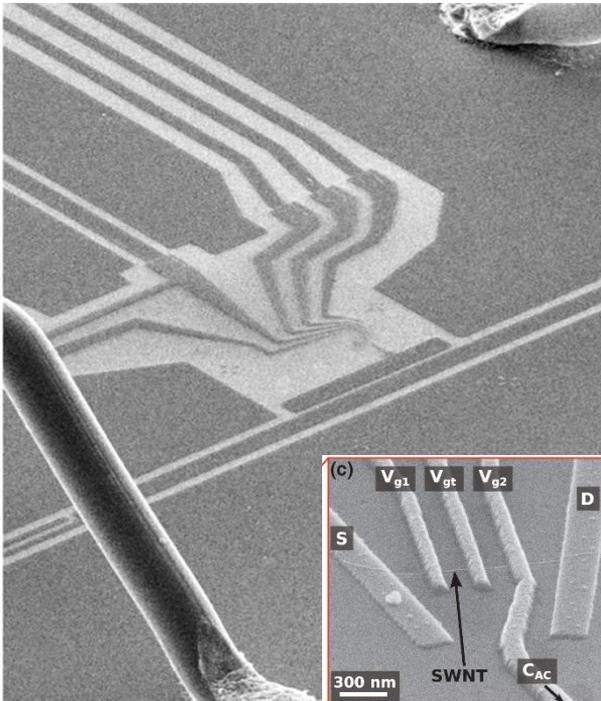
- Microscopie électronique à balayage.
- Canon à électron sous vide.



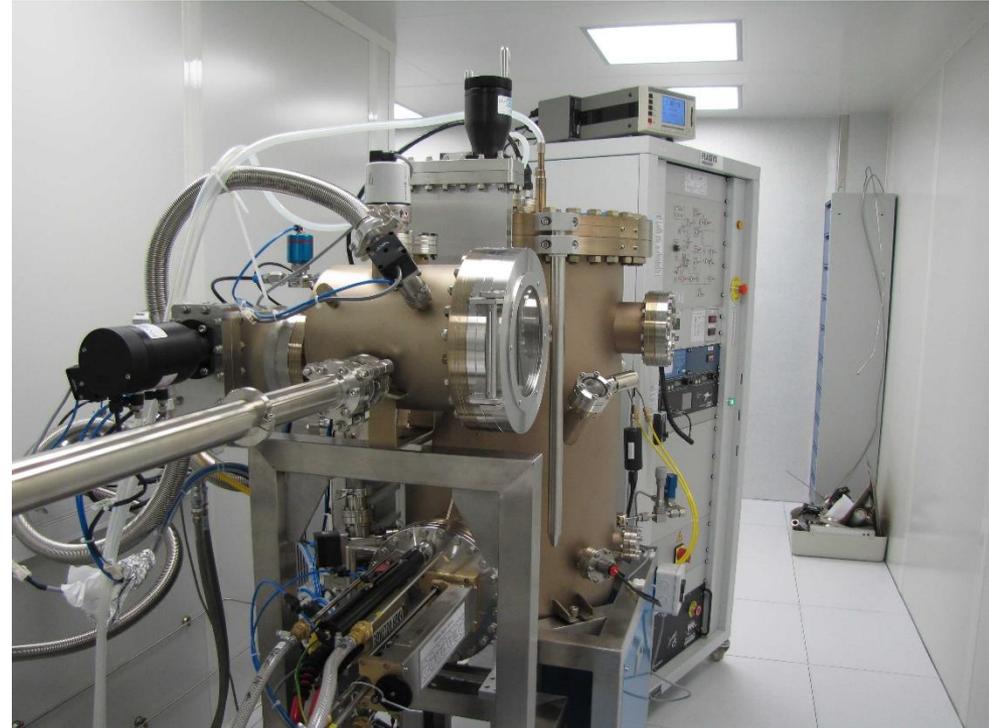
Lithographie avant lift-off



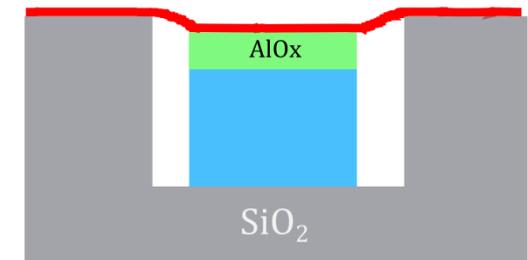
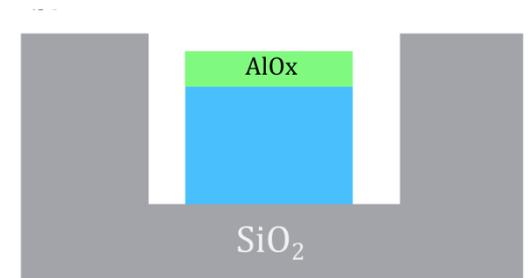
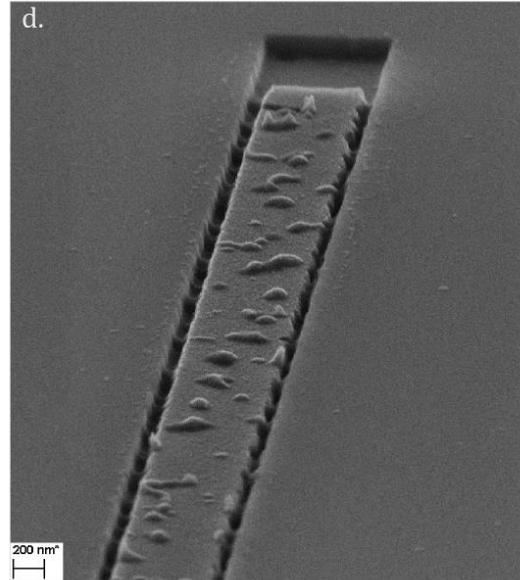
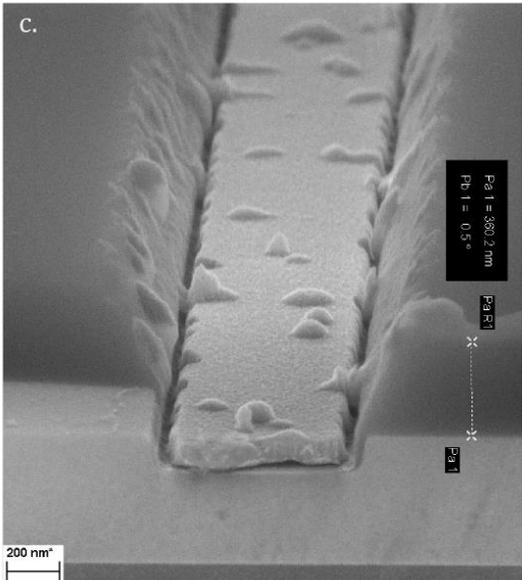
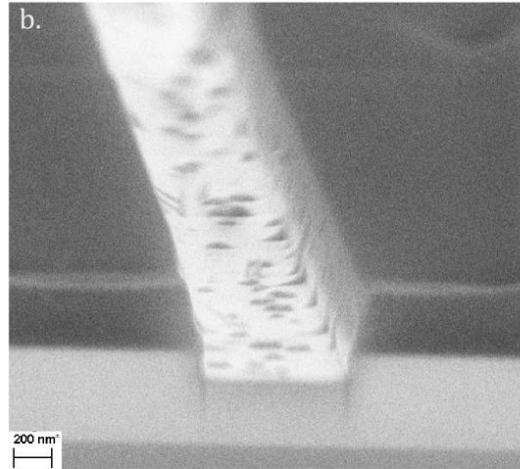
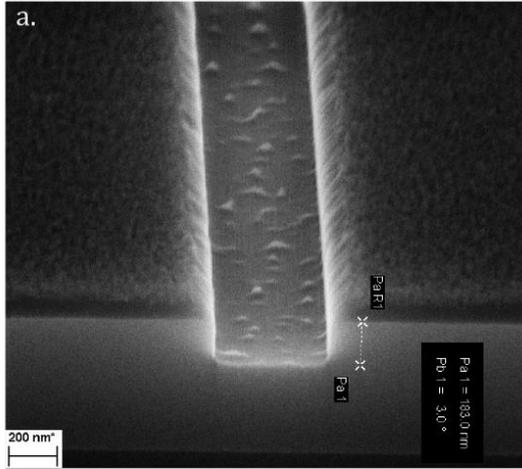
- Microscopie électronique à balayage.
- Canon à électron sous vide.

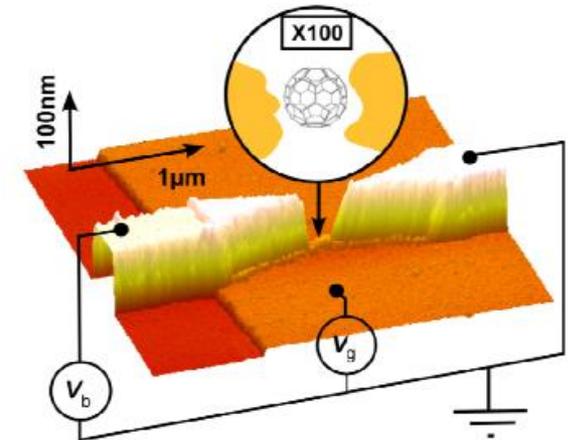
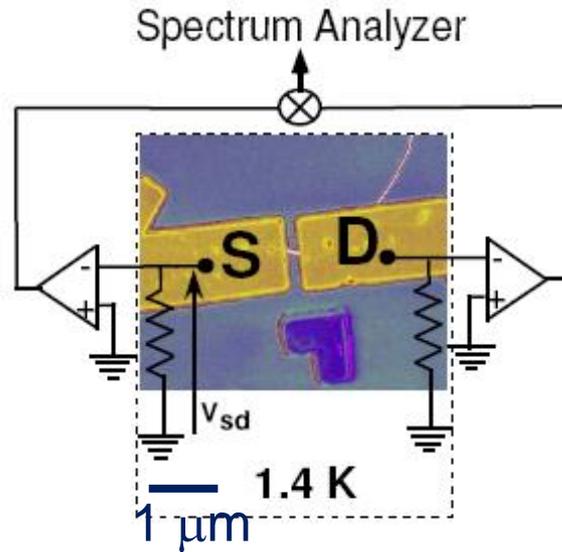
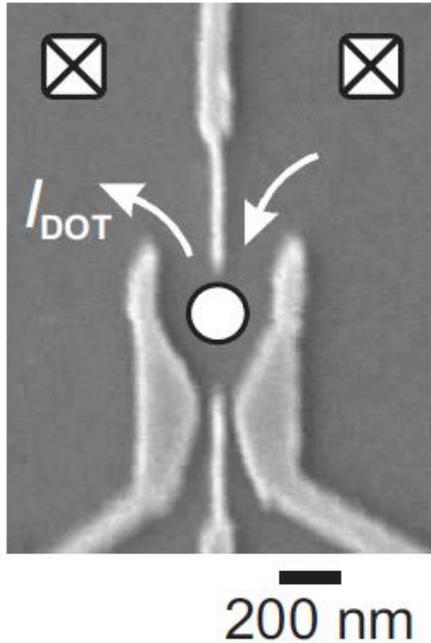


Nanocircuits de complexité arbitraire



Machine de dépôt ultra-vide  
 $P \sim 10^{-10}$  mbar

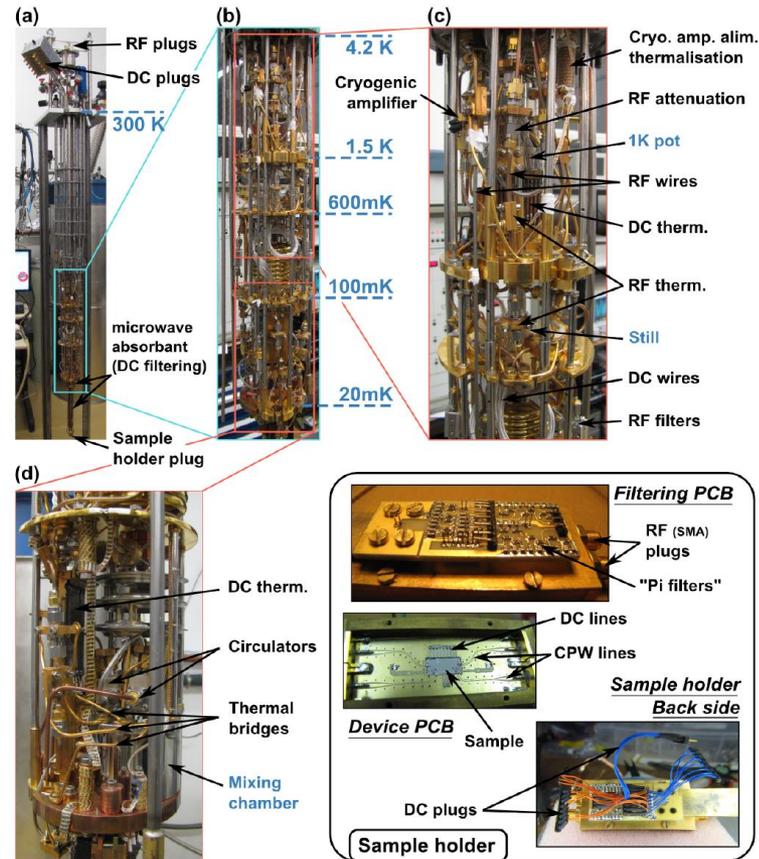




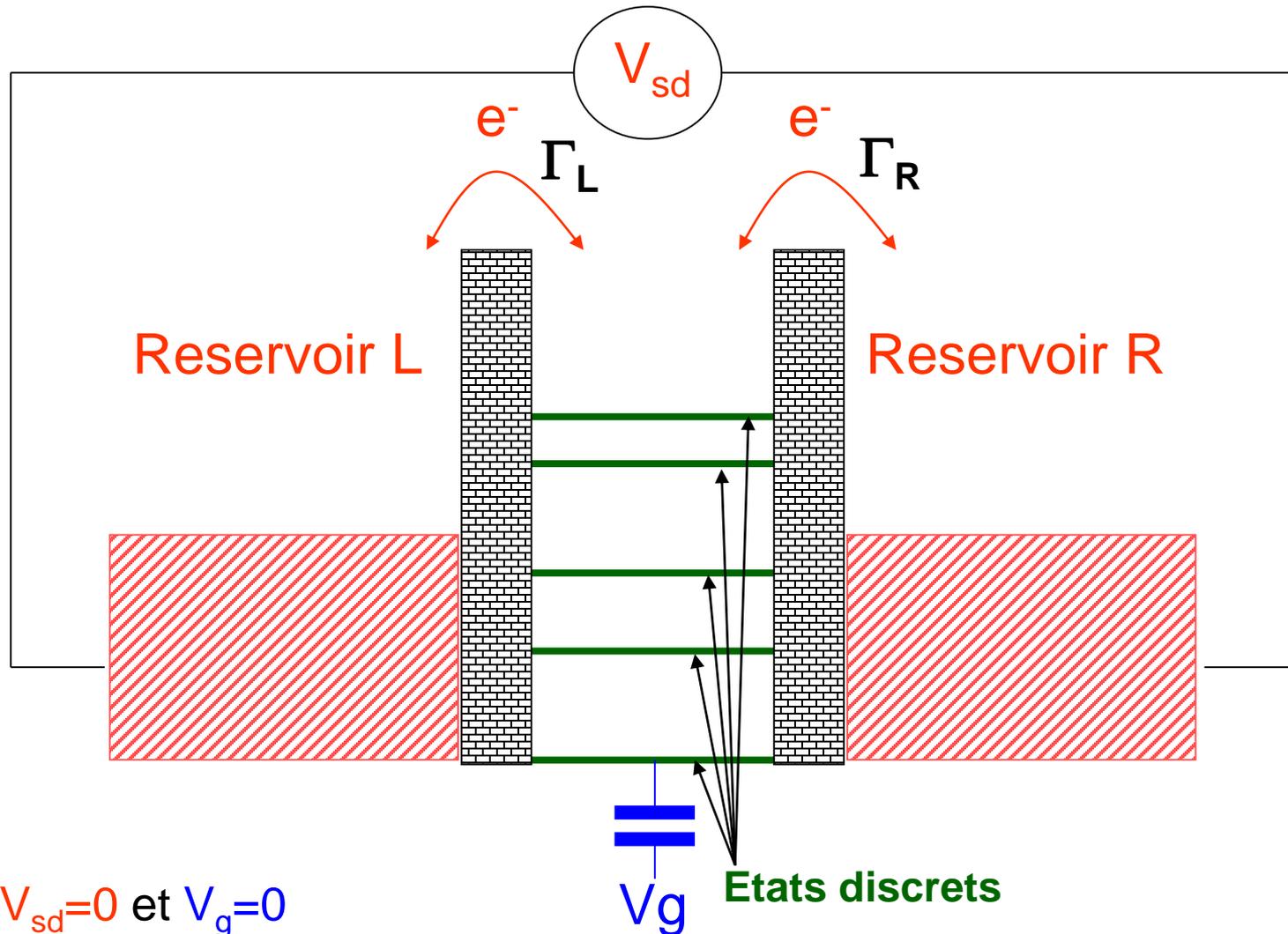
- Gaz bidimensionnel d'électrons
- Confinement 2D électrostatique
- Espacement des niveaux  $\sim 1\text{K}$

- Nanotube de carbone mono paroi
- Confinement 2D naturel (fil quantique)
- Espacement des niveaux  $\sim 10\text{K}$

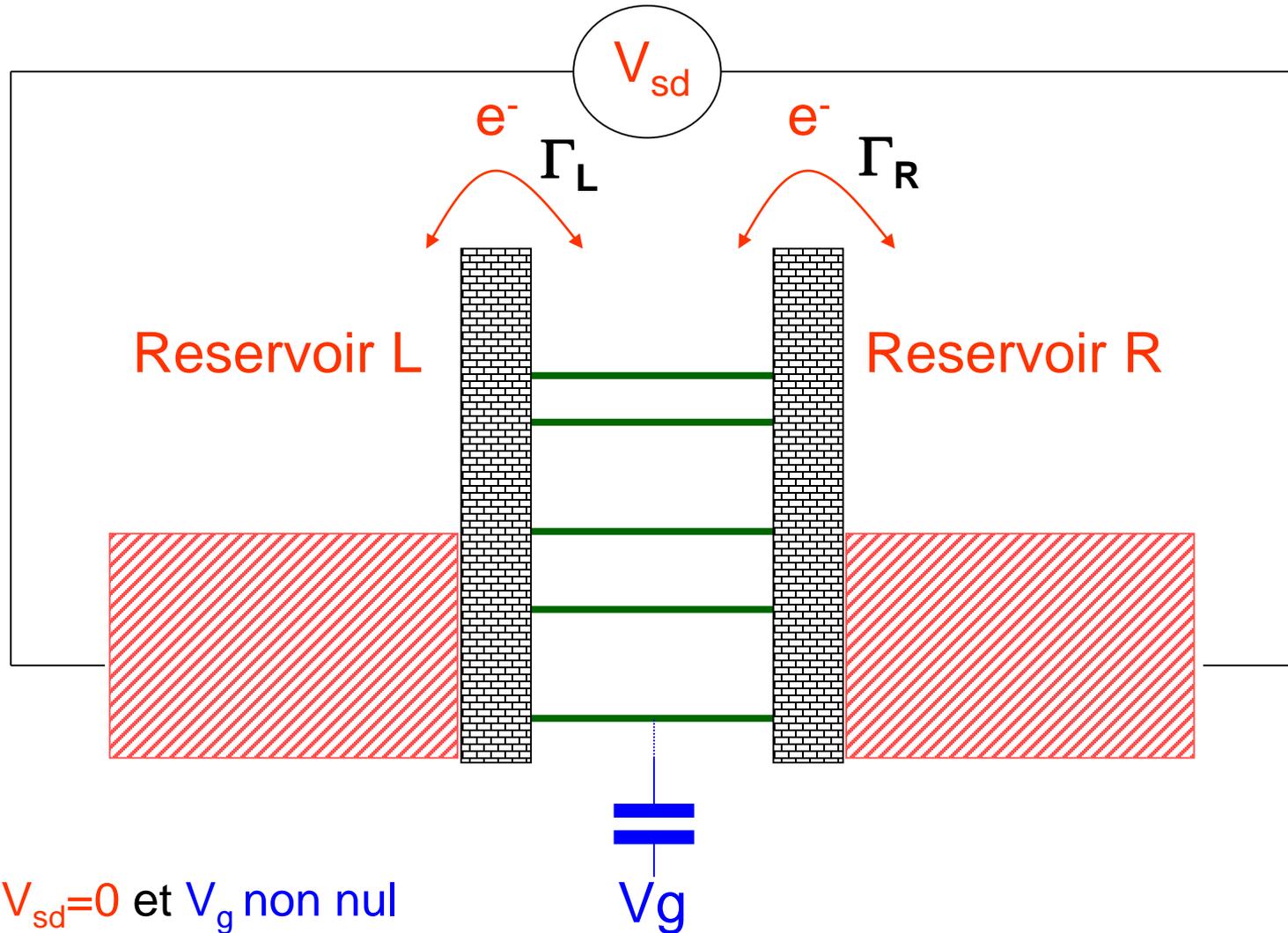
- Molécule de C60
- Confinement 3D naturel
- Espacement des niveaux  $\sim 100\text{K}$



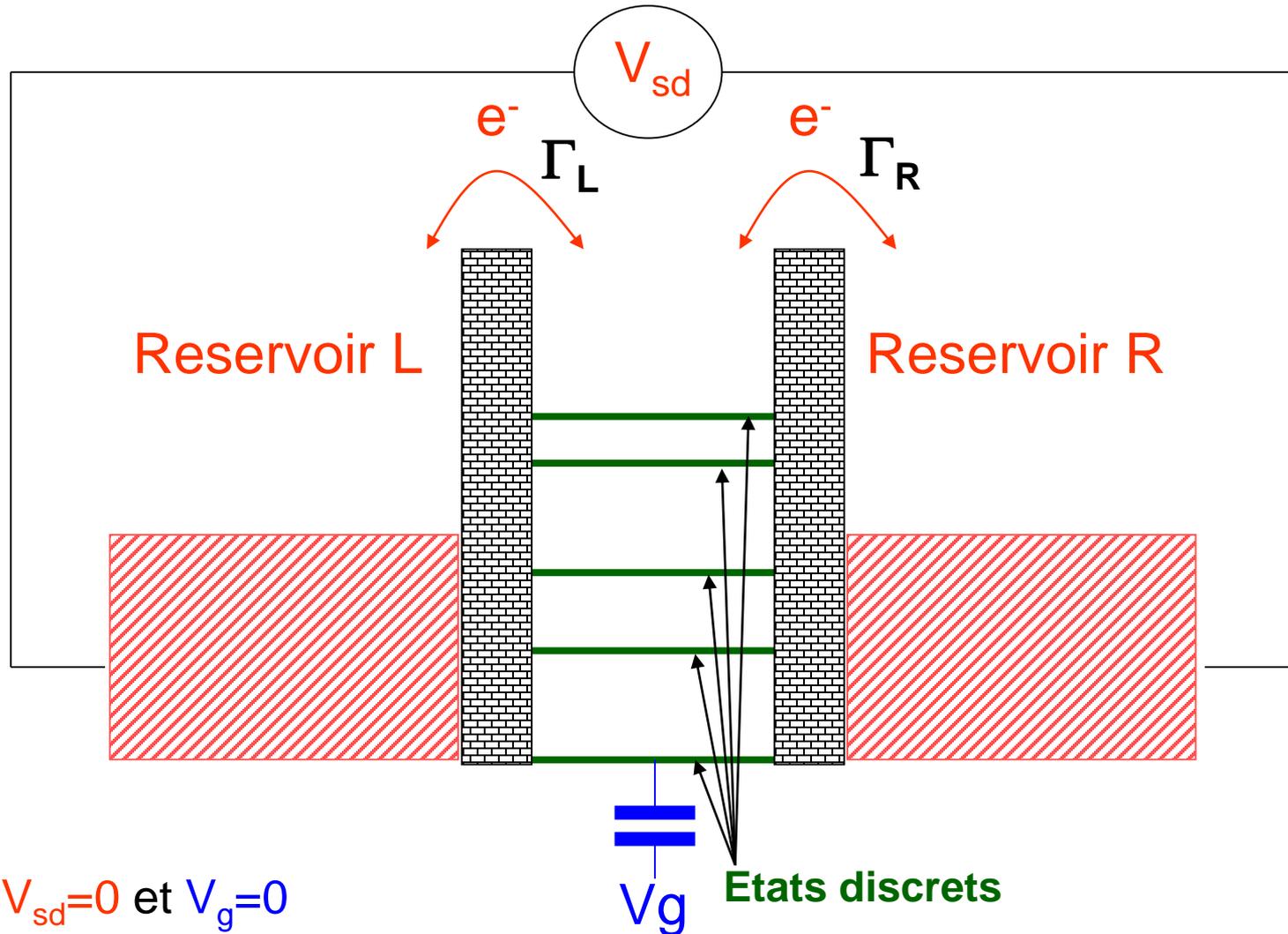
- Mesures à très basse température (20 mK)
- Utilisation de fluide cryogéniques (N<sub>2</sub>, He)



- $V_{sd}=0$  et  $V_g=0$

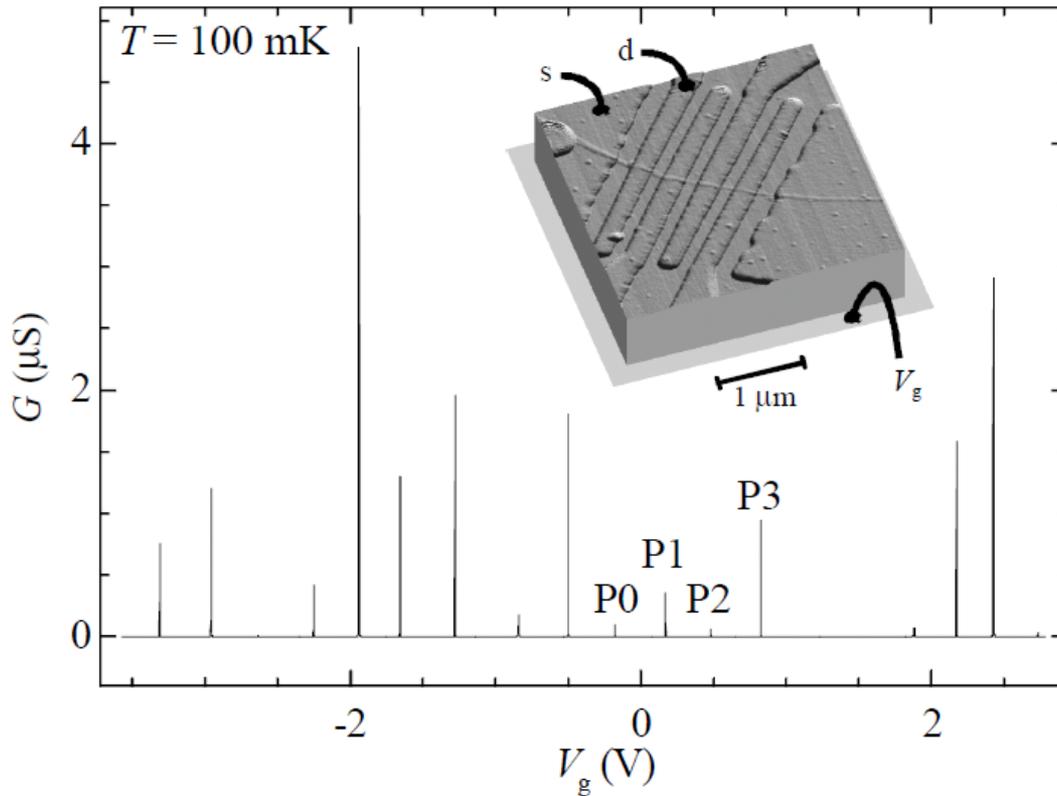


- $V_{sd}=0$  et  $V_g$  non nul



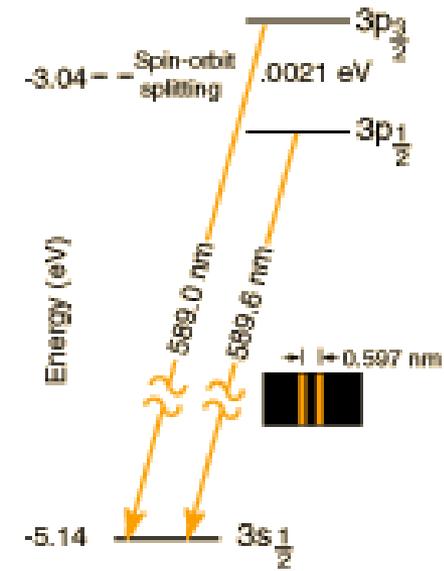
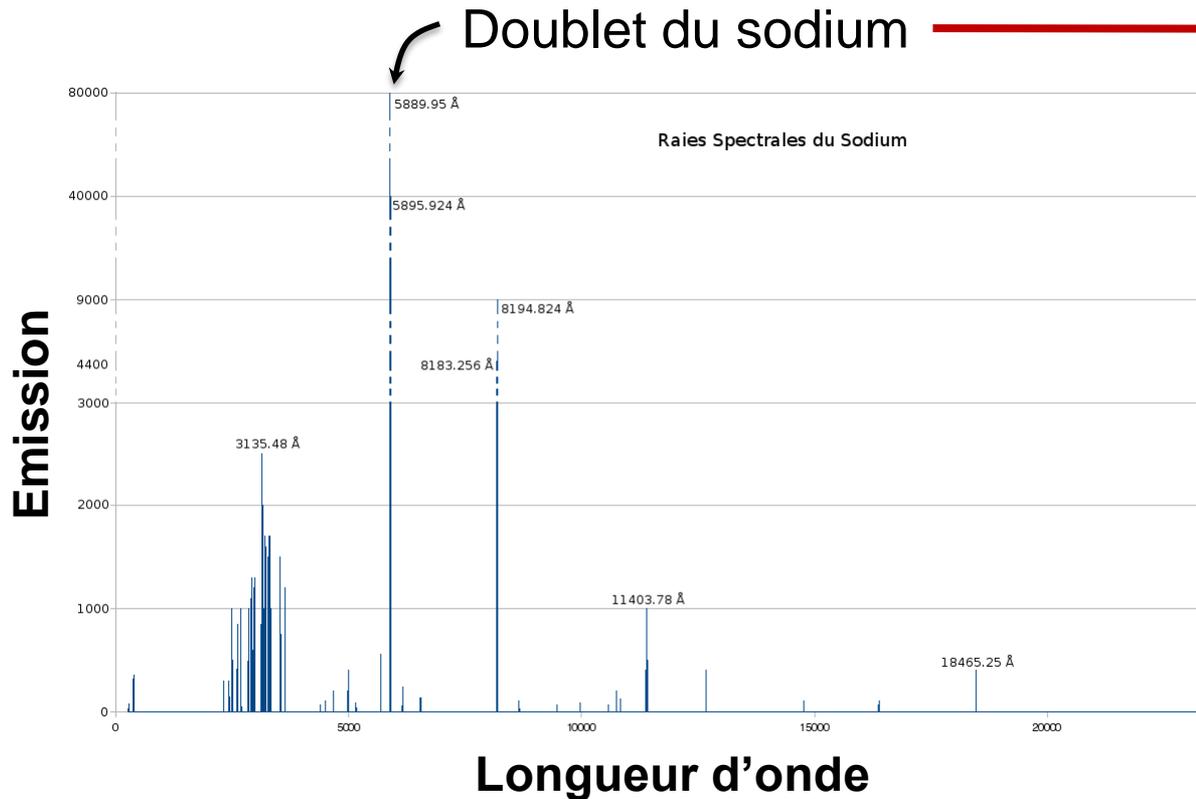
- $V_{sd}=0$  et  $V_g=0$

D. Cobden et al Phys. Rev. Lett. (1998)



Courant de l'ordre de 10 pA

- Grande ressemblance avec spectre d'un atome !
- Spectres très varié (régularité, espacement des niveaux...)
- Accès à un phénomène quantique avec une pile et un voltmètre.



- Atomes caractérisés par un spectre discret