

Manipuler les électrons à l'échelle nanoscopique: vers de nouvelles fonctionnalités électroniques?

Frank Hekking

*Université Joseph Fourier
& Institut Universitaire de France
Laboratoire de Physique et Modélisation
des Milieux Condensés
Maison des Magistères Jean Perrin
CNRS-Grenoble, France*

LPSC Grenoble, le 19 juin 2003

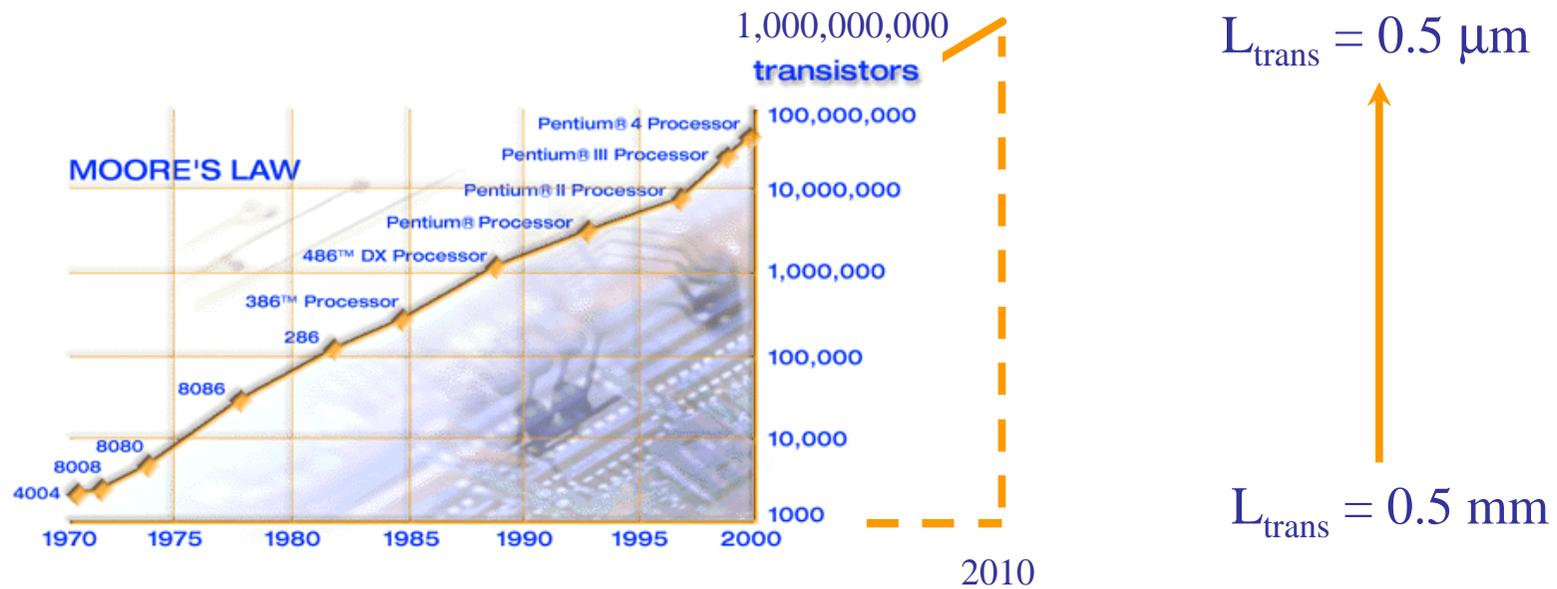
La miniaturisation: la loi de Moore

Intérêts:

- augmenter vitesse
- réduction des pertes

Questions:

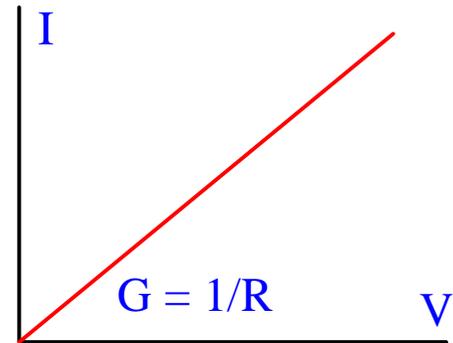
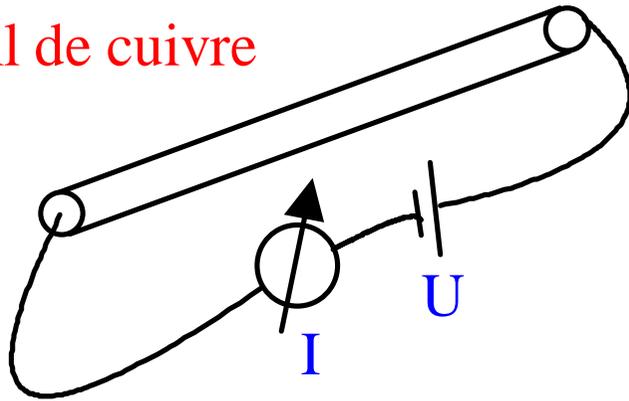
- propriétés physiques?
- nouvelles fonctionnalités?



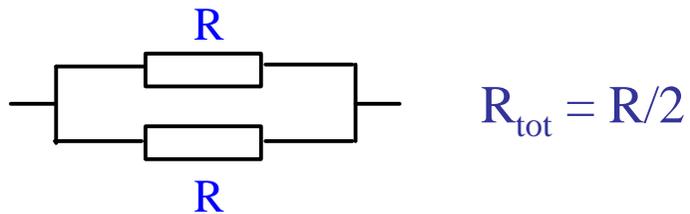
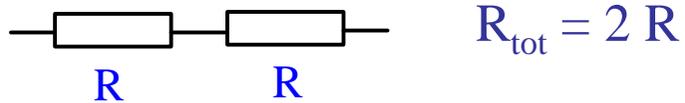
Le monde macroscopique

Le monde macroscopique: la loi d'Ohm

Fil de cuivre



Addition des résistances:



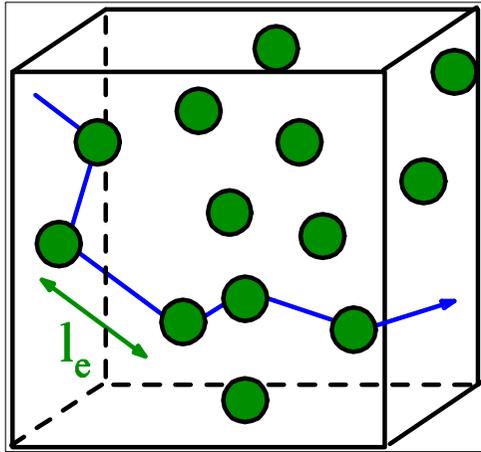
Résistance du fil de cuivre:

$$U = I R$$

R dépend:

- du matériau
- de la géométrie

Théorie de Drude



Effet d'un champ électrique E:

- accélération pendant un temps moyen τ
- quantité de mouvement $\mathbf{p} = m \mathbf{v} = -e \mathbf{E} \tau$
- densité de courant induit $\mathbf{j} = -n e \mathbf{v} = (n e^2 \tau / m) \mathbf{E} = \sigma_D \mathbf{E}$

Temps τ : perte de toute corrélation

La *conductivité de Drude*

$$\sigma_D = \frac{n e^2 \tau}{m}$$

(réponse locale)

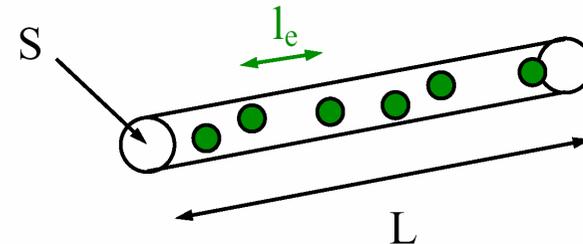
La *conductance*

$$G_0 = \sigma_D \frac{S}{L} = \frac{e^2 l_e k_F^2 S}{h L 6\pi}$$

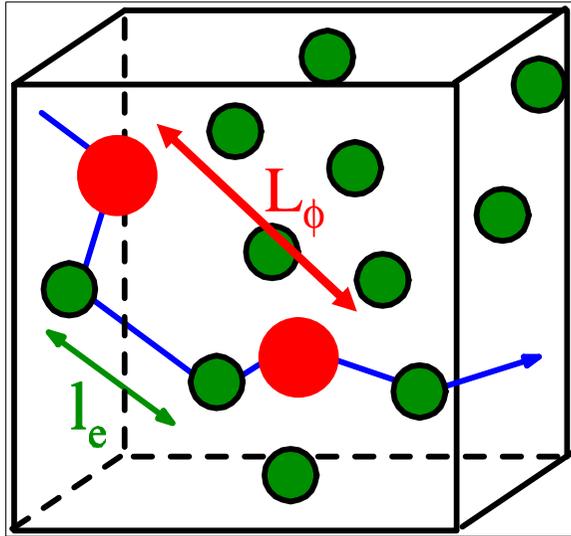
(réponse non-locale)

Le *quantum de conductance* :

$$\frac{e^2}{h} \simeq \frac{1}{26 \text{k}\Omega}$$



Diffusion dans les métaux



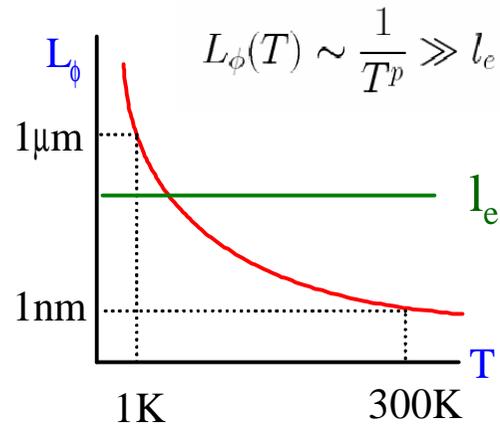
La **diffusion** peut être :

élastique (libre parcours moyen l_e)
 – défauts statiques, surface irrégulière

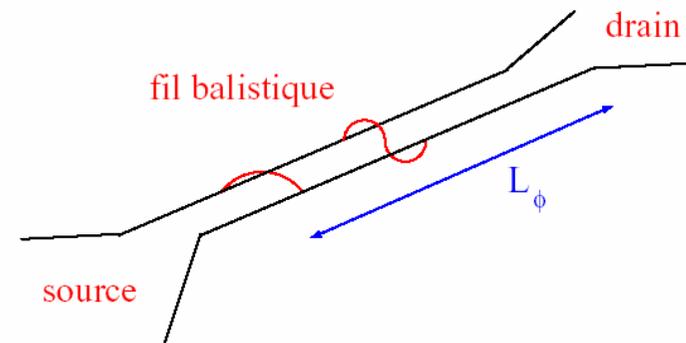
inélastique (libre parcours moyen L_ϕ)
 – bruit, défauts avec une dynamique (**extrinsèque**)
 – phonons, électrons, magnons (**intrinsèque**)

Comment augmenter l'échelle L_ϕ ?

1. Baisser la température
 (métaux, semiconducteurs)



2. Fabriquer nanostructures
 (électronique moléculaire, ...)



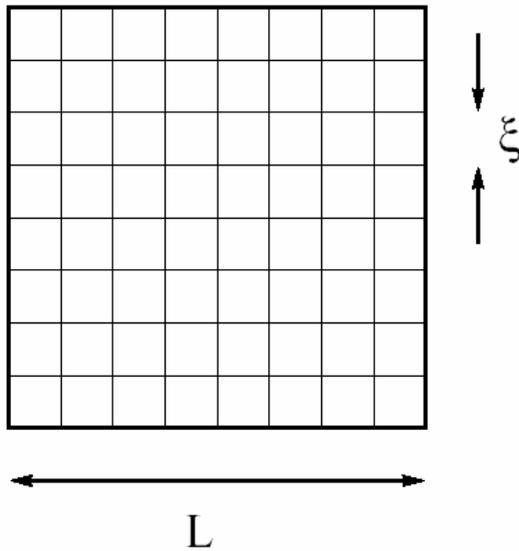
Le monde mésoscopique

Physique mésoscopique (1)

Origine: physique statistique (van Kampen, 1981).

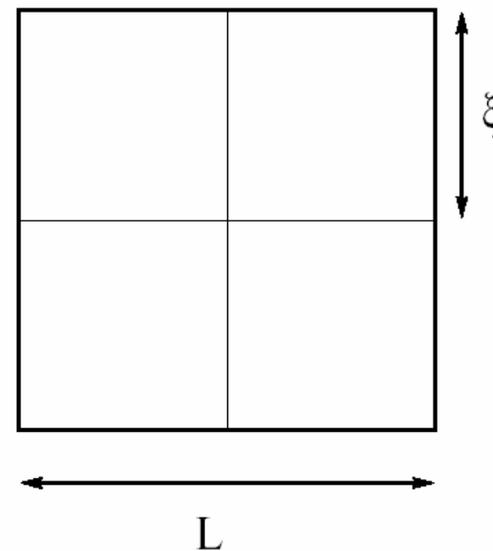
Comportement d'un système critique de taille finie L

loin de la transition:



- $\xi \ll L$
- auto-moyennant
- macroscopique

près de la transition :

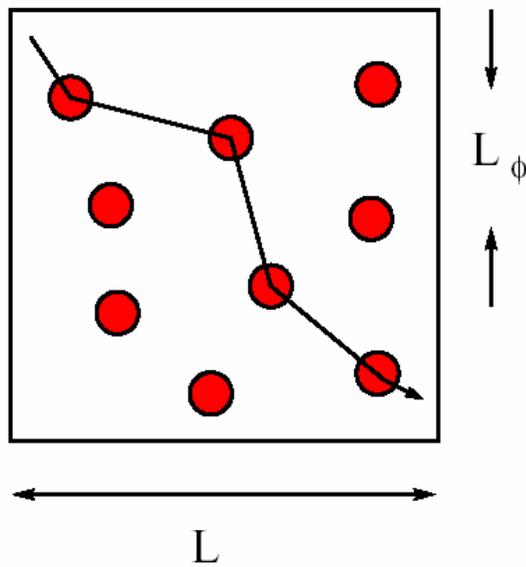


- $\xi \sim [T_c/(T - T_c)]^\nu \sim L$
- grandes fluctuations
- mésoscopique

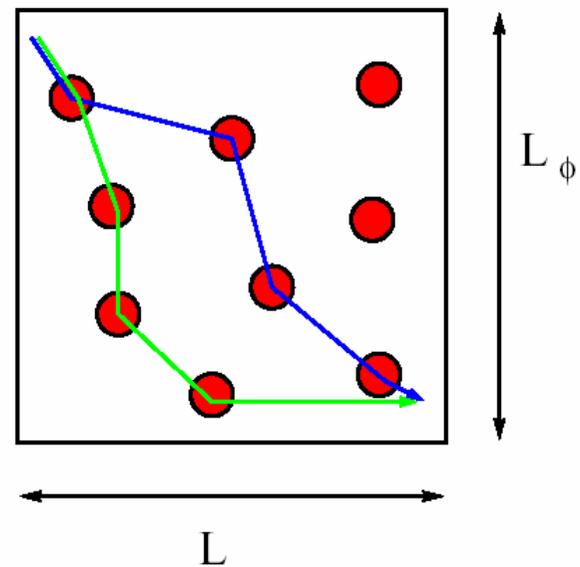
Physique mésoscopique (2)

Ensuite: physique des métaux (Imry, 1986).

Conduction sur l'échelle L_ϕ (cohérence de phase)

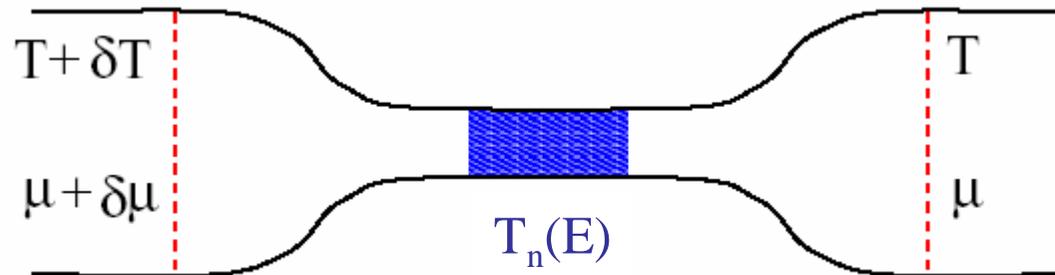


- phase détruite
- transport local
- auto-moyennant



- phase conservée
- transport non-local
- grandes fluctuations

Approche de diffusion de Landauer-Büttiker

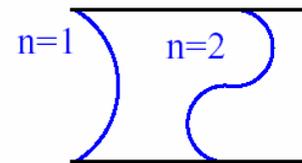


Transport à travers un échantillon mésoscopique :

- *Réservoirs*

- temperature T et potentiel chimique μ
- distribution de Fermi $f(E) = \{ \exp [(E - \mu) / k_B T] + 1 \}^{-1}$
- relaxation complète

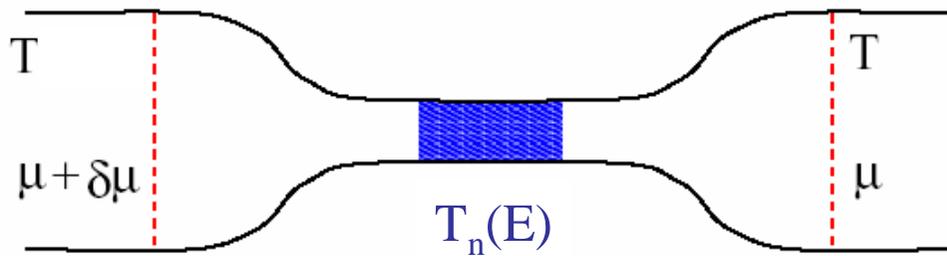
- *Fils quantiques à plusieurs canaux*



- *Echantillon*

- Transmet électrons (énergie E , mode n) avec proba $T_n(E)$ dans un mode quelconque n' : $T_n(E) = \sum_{n'} T_{n,n'}(E)$

Approche de diffusion de Landauer-Büttiker



$$I = I_{lr} - I_{rl}$$

Calcul du courant: $I_{lr} = -e \int dE f_l(E) T_n(E) v_n(E) \rho_n(E)$

$$v_n(E) = \frac{1}{\hbar} \frac{dE_n(k)}{dk}$$

$$\rho_n(E) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{dE_n(k)/dk} = \frac{1}{2\pi\hbar v_n(k)}$$

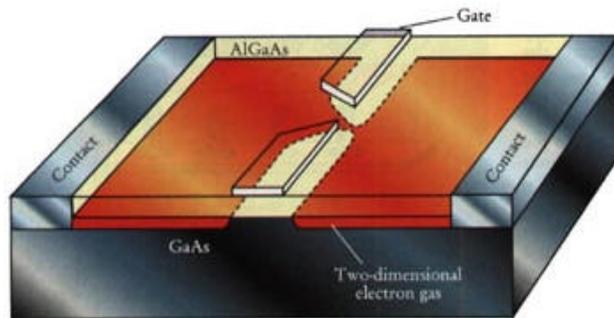
$$I = -\frac{e}{2\pi\hbar} \int dE \sum_n [f_l(E) - f_r(E)] T_n(E)$$

Conductance: $\mu_l = \mu_r + eV = E_F + eV$

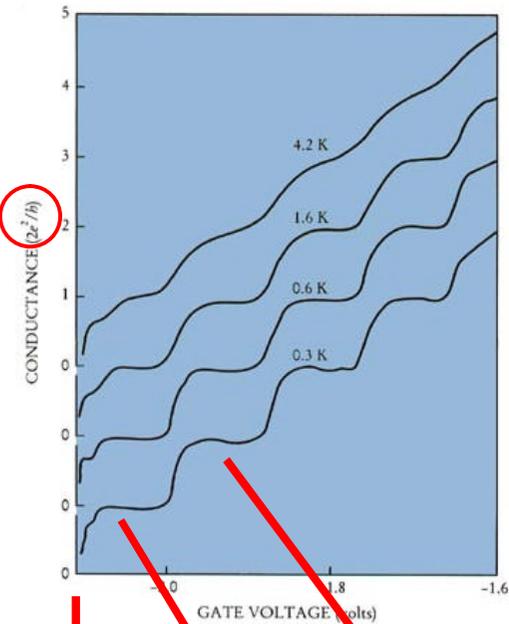
$$I = \frac{e^2}{2\pi\hbar} V \sum_n T_n(E_F) = GV, \quad G = \frac{e^2}{2\pi\hbar} \sum_n T_n(E_F) \quad (\text{Formule de Landauer})$$

Transport balistique: contact ponctuel quantique

Van Wees et al. 1988

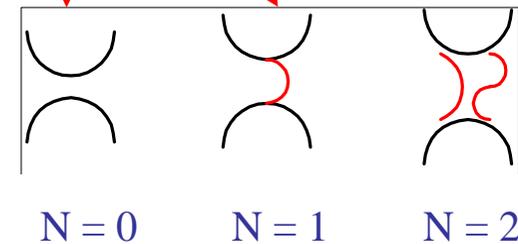
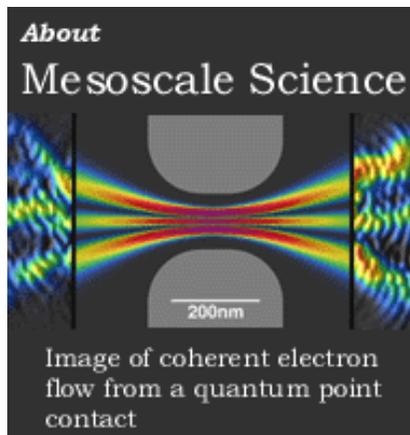


unités $2 e^2/h$:
facteur 2 pour le spin



Quantification de la conductance

$$G = \frac{e^2}{2\pi\hbar} \sum_n T_n(E_F) = N \frac{e^2}{h}$$



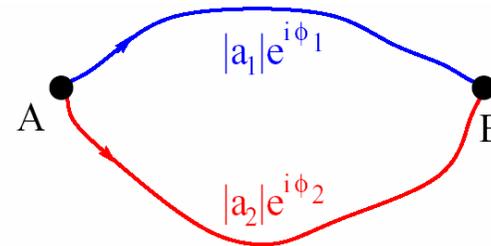
Transport diffusif: faible désordre

Approximation quasi-classique

$$k_F \gg \Delta k \sim 1/\Delta x \gg 1/l_e$$

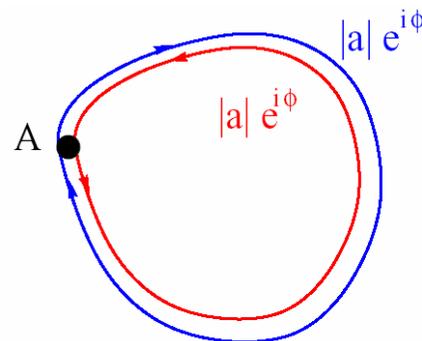
$k_F l_e \gg 1 \rightarrow$ trajectoires classiques
phases quantiques

Interférences entre chemins :



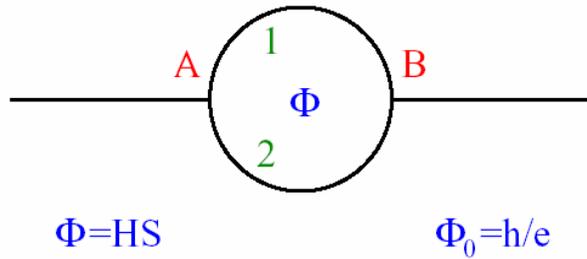
$$T_{AB} = |a_1 + a_2|^2 = \underbrace{|a_1|^2 + |a_2|^2}_{T_{AB}^{\text{class}}} + \underbrace{2|a_1||a_2|\cos(\phi_1 - \phi_2)}_{d T_{AB}^{\text{int}}}$$

Trajectoires fermées :



$$T_{AA} = 4|a|^2 = 2T_{AA}^{\text{class}}$$

Anneau mésoscopique

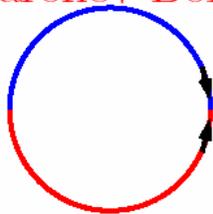


Phase quantique

$$\phi_{1,2} = \pm \int_A^B \vec{A} \cdot d\vec{l} = \pm \pi \Phi / \Phi_0$$

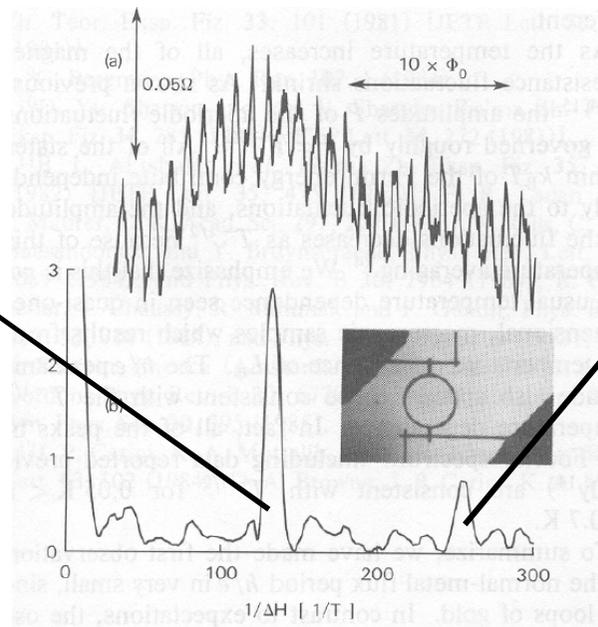
Washburn et al. 1985

Effet Aharonov-Bohm

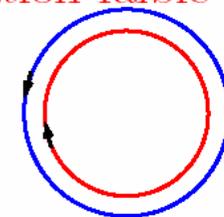


$$dT_{AB}^{int} \sim \cos 2\pi\Phi/\Phi_0$$

Période h/e



Localisation faible

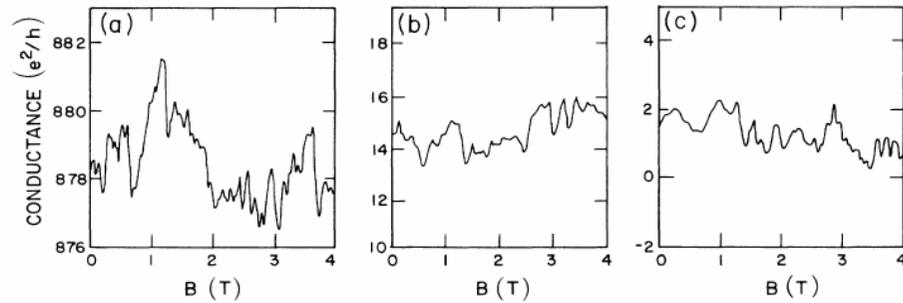
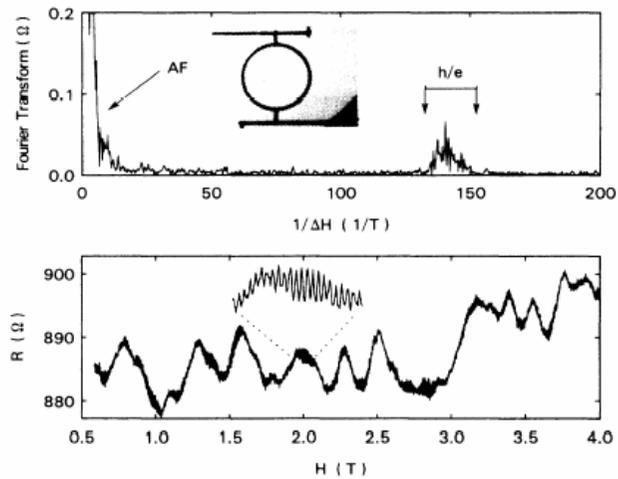


$$T_{AA} \sim \cos 4\pi\Phi/\Phi_0$$

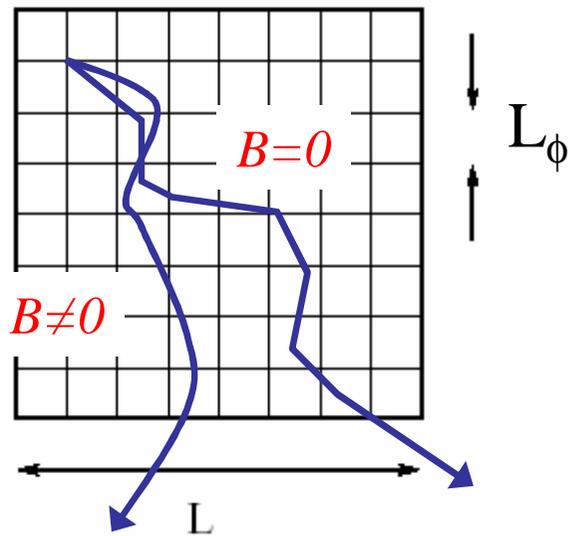
Période $h/2e$

Manipulation de la *phase* des électrons

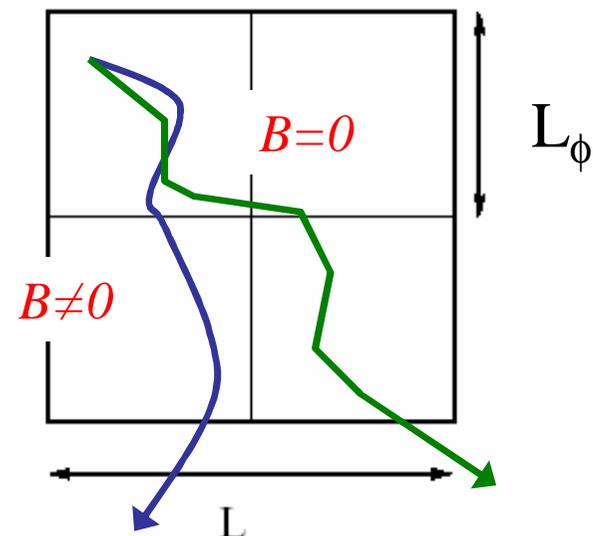
Fluctuations universelles de la conductance



*amplitude universelle $\sim e^2/h$,
indépendant de l'échantillon*



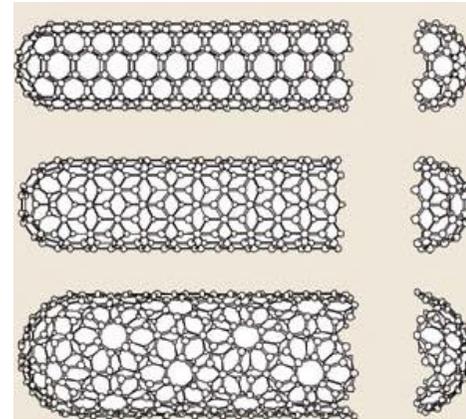
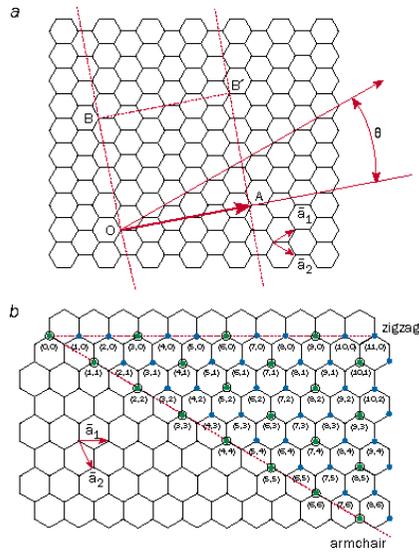
*Auto-moyennage:
trajectoires « identiques »*



*Fluctuations importantes:
trajectoires « différentes »*

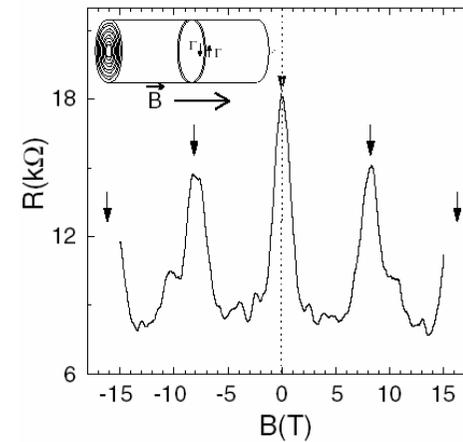
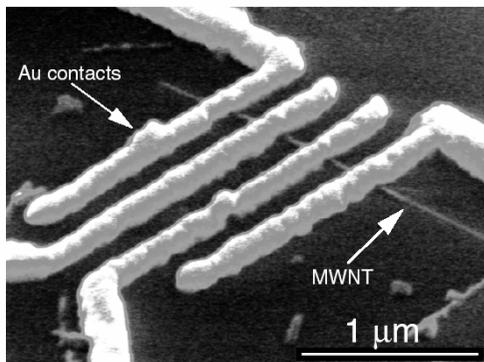
Les nanotubes de carbone

A partir d'une couche de graphène ...

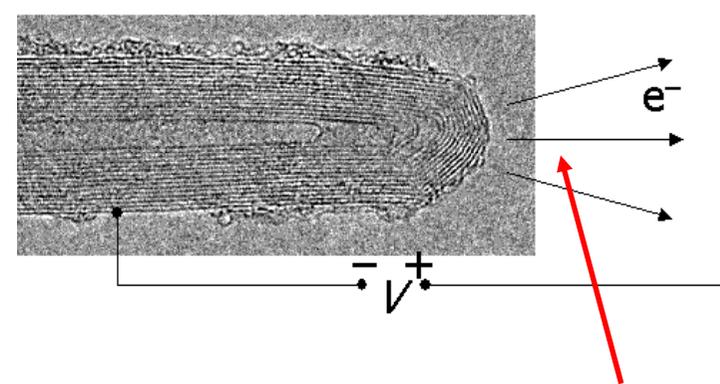
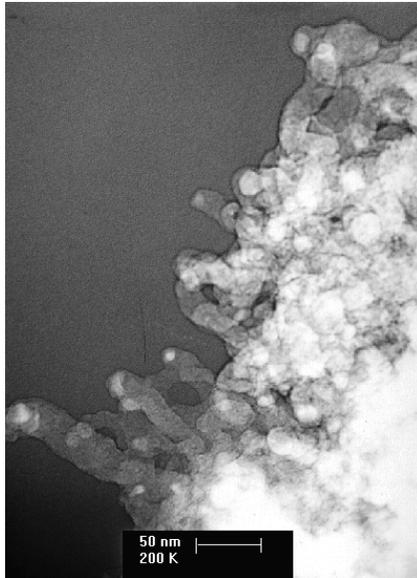


... vers un conducteur mésoscopique ...

Schönenberger et al. 1999

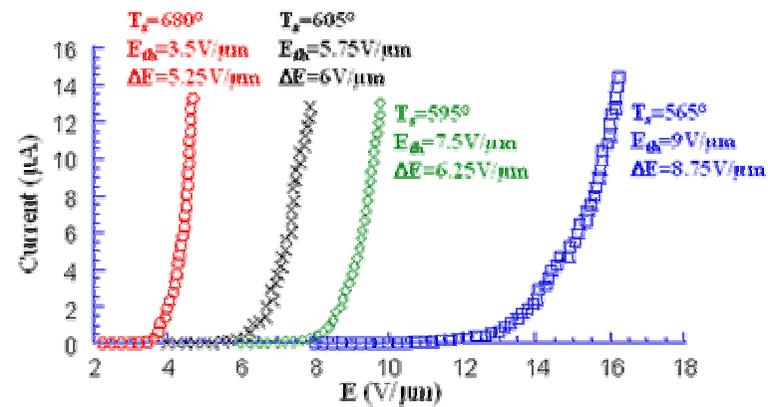


... ou plutôt l'émission d'électrons?

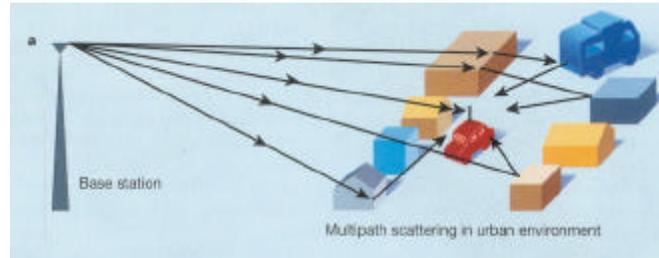


*Concentration forte de lignes
de champ électrique*

A.M Bonnot, LEPES



Communication dans un monde désordonné



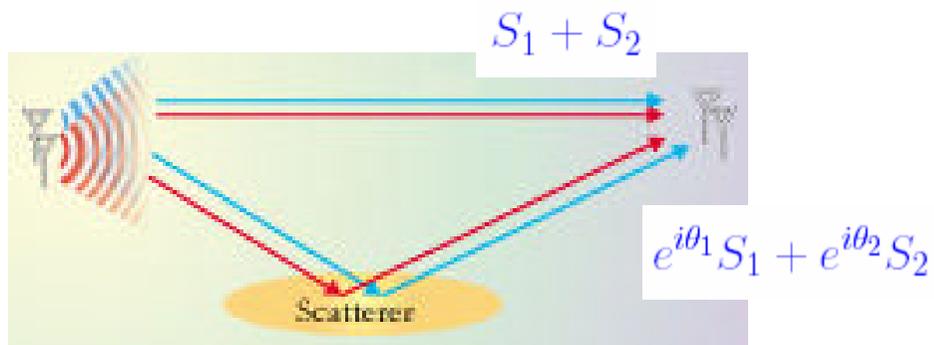
Capacitance de Shannon

rapport signal/bruit

$$I = \log \left(1 + \frac{S}{N} \right) \text{ bits s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$$

Dépendance logarithmique: augmenter I difficile

Se servir du désordre avec plusieurs antennes

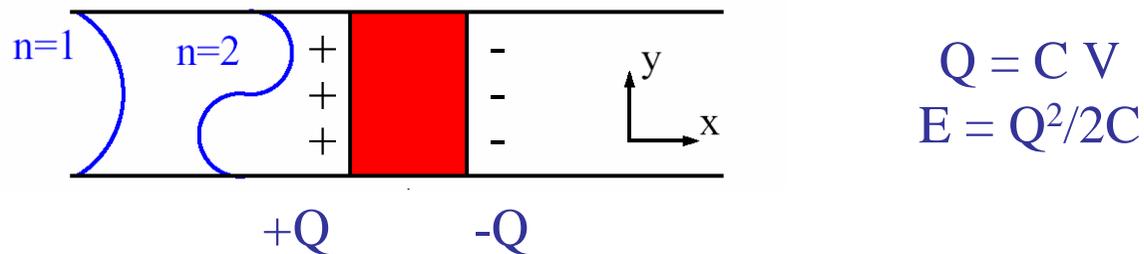


$$I \sim M_T \log \left(1 + \frac{SM_R/M_T}{N} \right) \text{ bits s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$$

*Les interactions
Coulombiennes*

Interactions entre électrons: effets de charge et blocage de Coulomb

Junction tunnel: capacitance nanoscopique si $G \ll e^2 / h$



Changement d'énergie suite à un passage par effet tunnel

$$Q \rightarrow Q - e \rightarrow 10^{-19} \text{ C}$$

$$\Delta E = \frac{(Q - e)^2}{2C} - \frac{Q^2}{2C} = -eQ/C + e^2/2C < 0$$

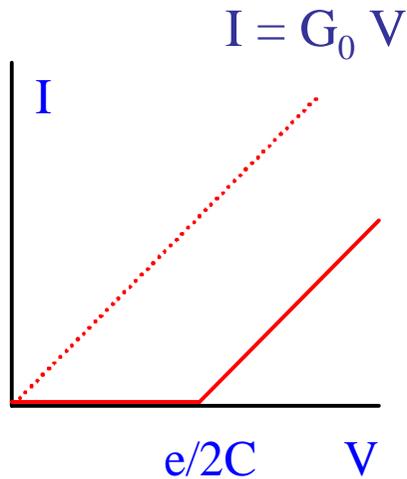
$$eQ/C = eV > e^2/2C = E_C$$

$$C \sim 1 \text{ fF} - 1 \text{ aF}$$

$$E_C \sim 1 \text{ K} - 100 \text{ K}$$

Passage par effet tunnel supprimé pour $eV < E_C$: blocage de Coulomb

Blocage de Coulomb: renormalisation du coefficient de transmission



$$T_{\text{el}} \longrightarrow T_{\text{el},0} h(E)$$

transmission non-renormalisée

$$h(E) = \begin{cases} 0 & \text{si } E < E_C \\ 1 & \text{si } E > E_C \end{cases}$$

Conditions:

- énergies faibles $k_B T, eV, \dots \ll E_C$

- relaxation faible de charge: $RC = C/G \gg \hbar/E_C \longrightarrow G \ll e^2/h$

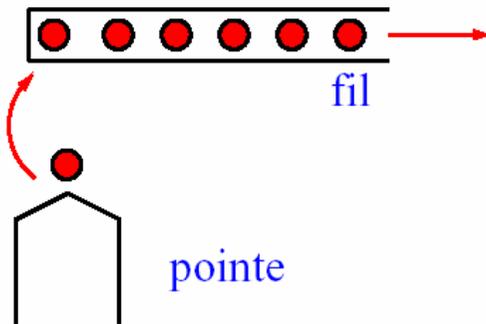
- évènements tunnel rares \longrightarrow *bonne barrière tunnel*

- dynamique lente dans les fils de mesure \longrightarrow *difficile à réaliser!*

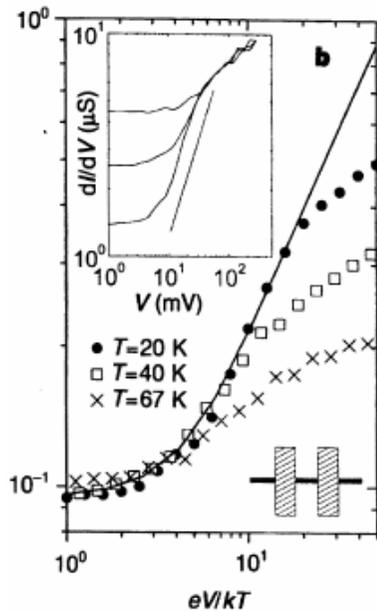
Fonction $h(E)$ élargie

Anomalie tunnel dans les nanotubes

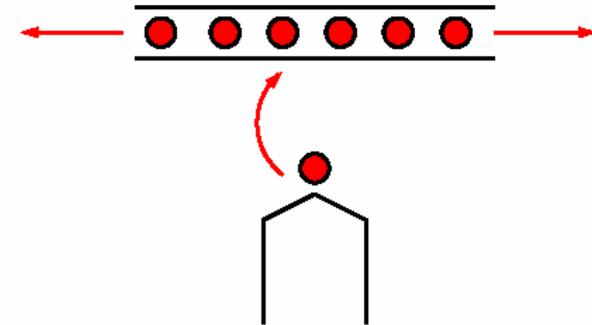
- Au bout



$$a = (1/g - 1)/4$$



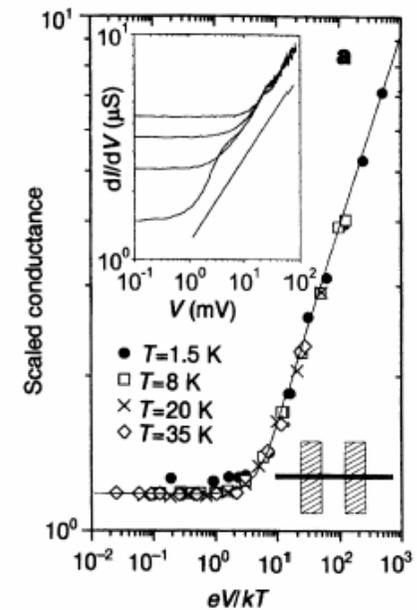
- Au milieu



$$G \sim T_{el}(E) = T_{el,0} h(E)$$

$$h(E) \sim E^\alpha$$

$$a = (1/g + g - 2)/8$$



Paramètre g : relaxation de charge dans le nanotube: $g < 1$

Bockrath et al. 1999

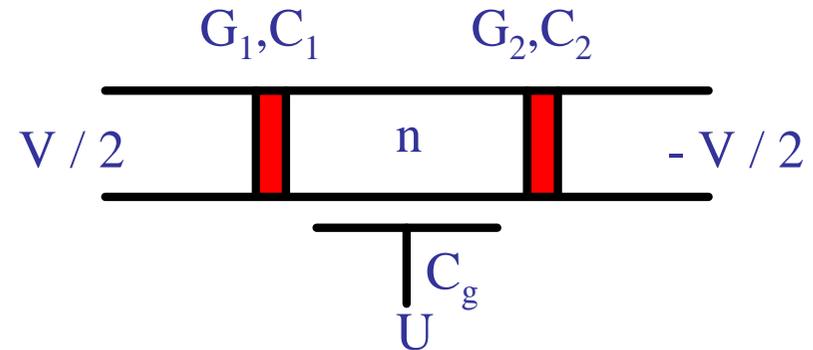
Transistor à un électron

Fulton & Dolan 1987

Systeme à 2 barrières, tel que

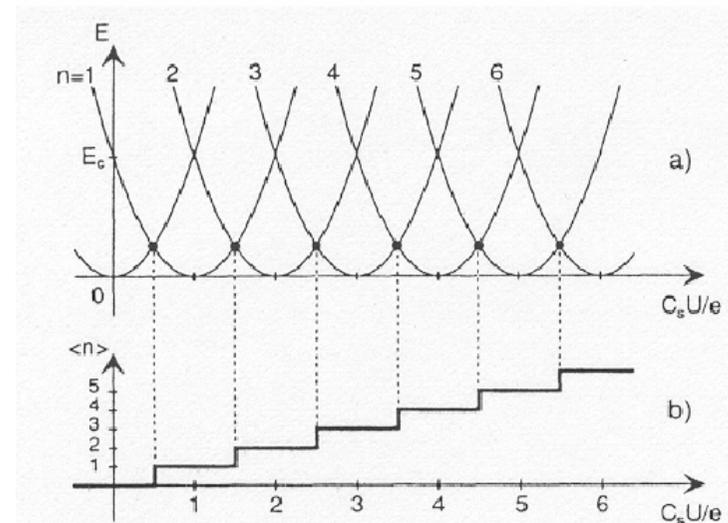
$$G_1, G_2 \ll e^2/h$$

$$k_B T, eV \ll E_{C\Sigma} = e^2/2C_\Sigma, C_\Sigma = C_1 + C_2 + C_g$$

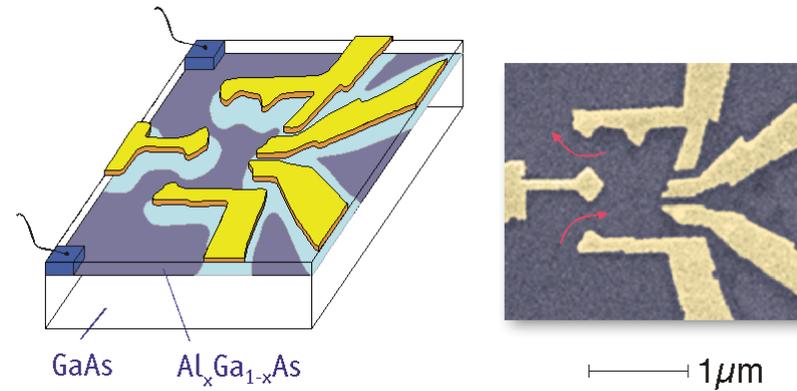


Energie électrostatique pour n électrons dans l'îlot

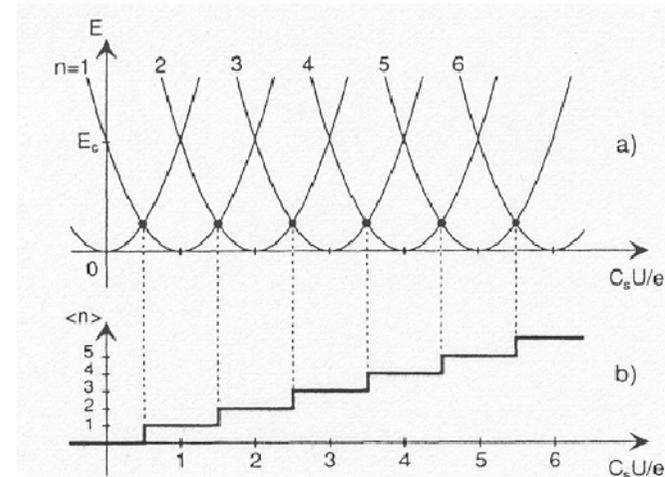
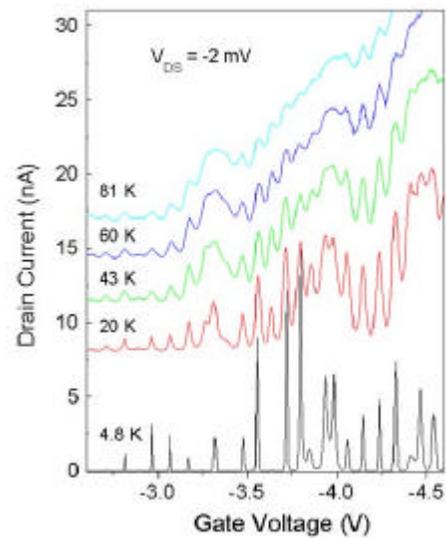
$$E = E_{C\Sigma} (n - C_g U / e)^2$$



Le blocage de Coulomb: manipuler les électrons un par un



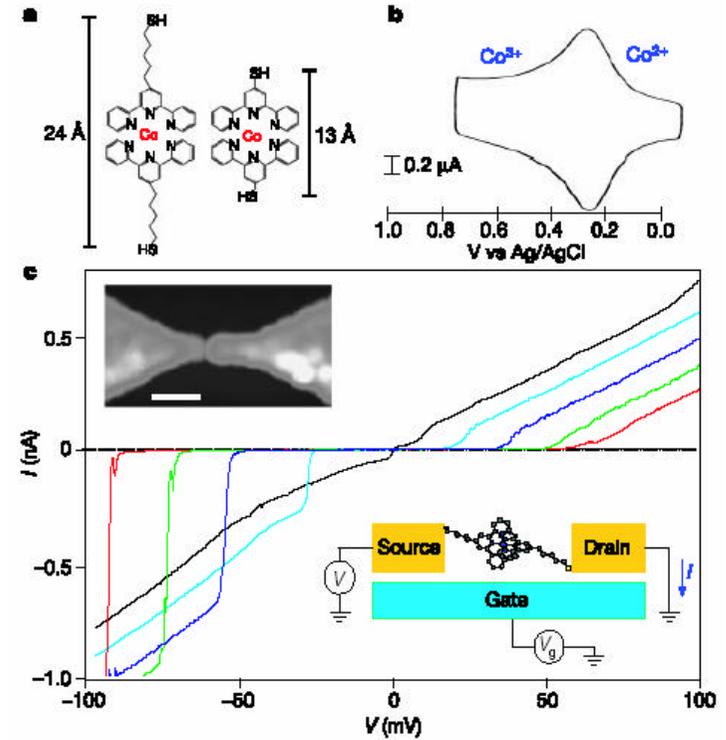
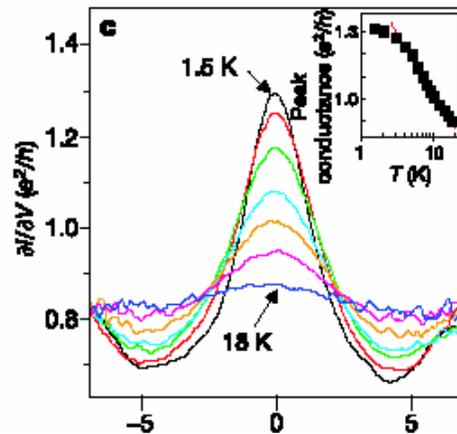
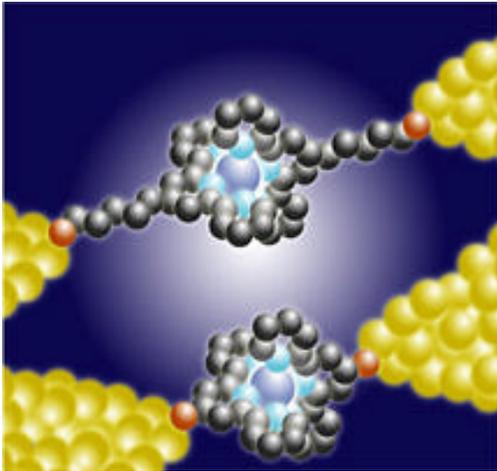
Temperature Dependence



Manipulation de la *charge* des électrons

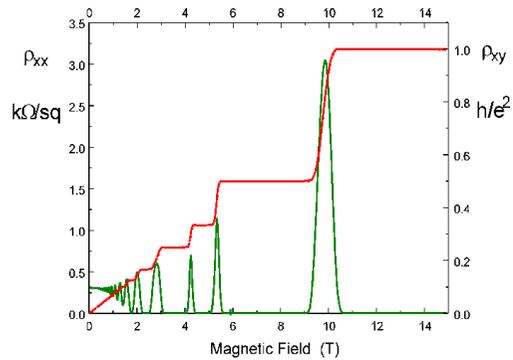
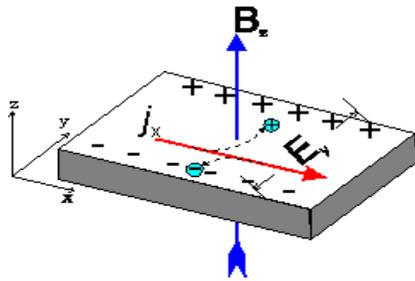


L'électronique moléculaire: vers le plus petit transistor du monde...

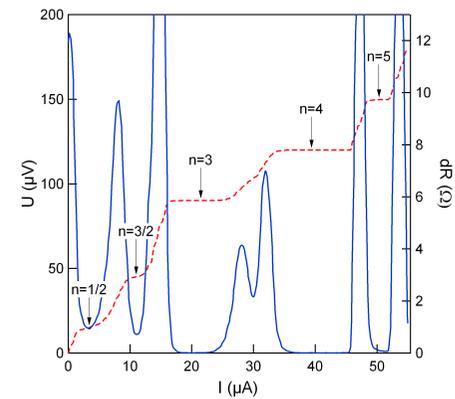
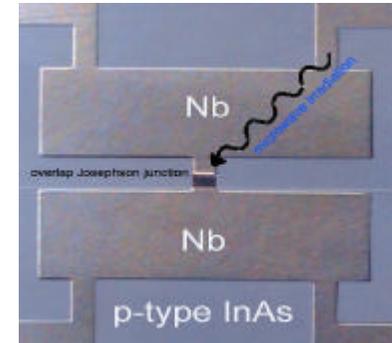
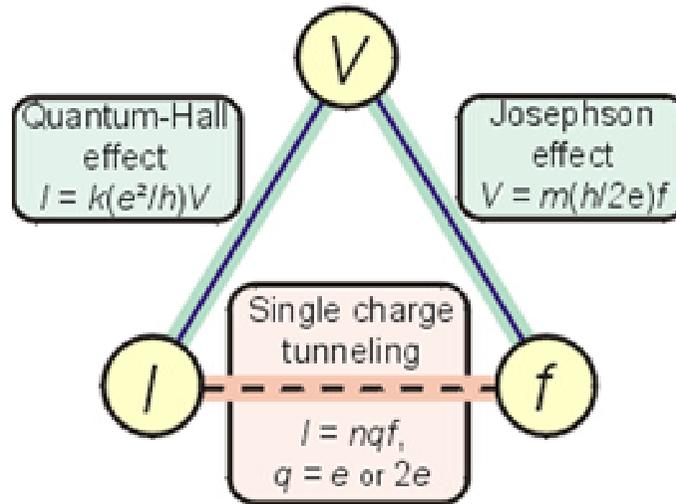


(Park *et al.*, Nature '02)

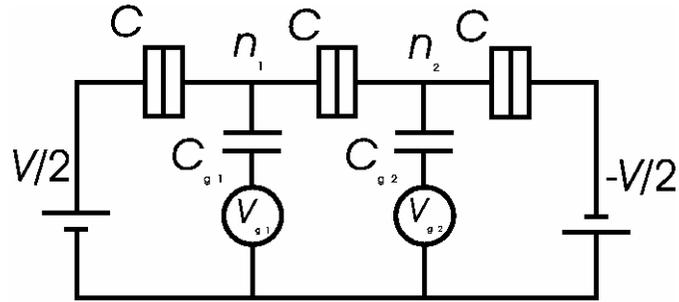
Les standards quantiques: le triangle métrologique



The Metrology Triangle



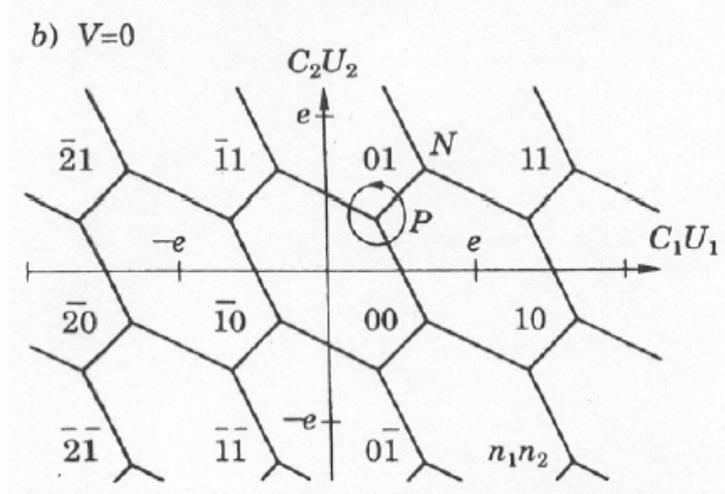
Pompe à trois jonctions tunnel



Blocage de Coulomb: conductance tunnel faible

n_1 et n_2 manipulés par les tensions de grille

Configurations de charge : minimaliser l'énergie électrostatique

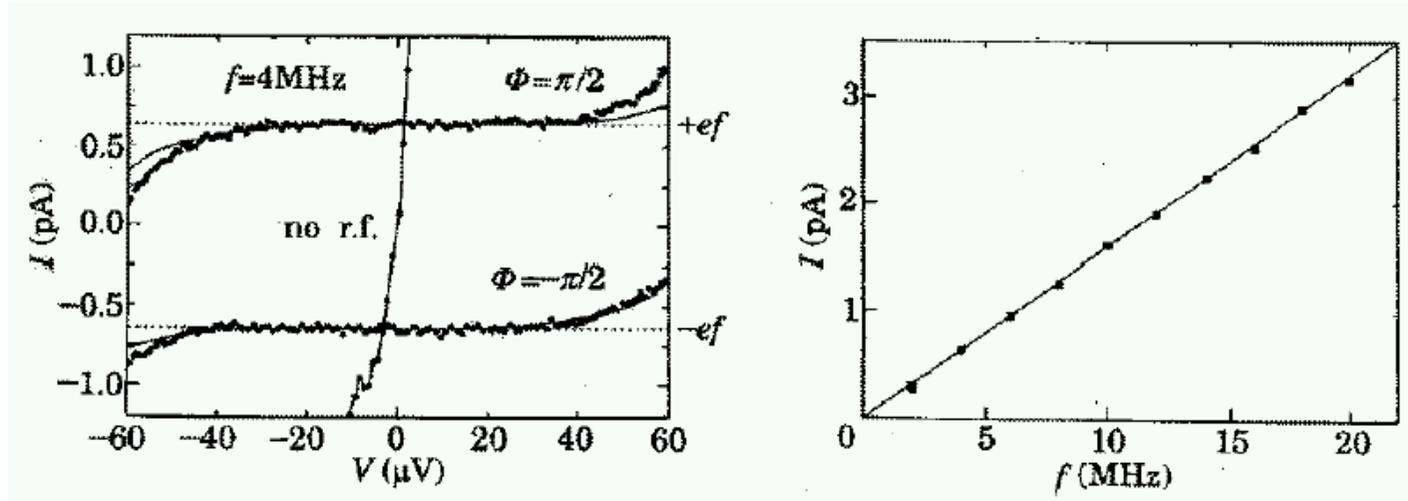


Idée centrale: transfert de charge contrôlé en manipulant les tensions de grille

$$I = ef$$

Expérience

Pothier et al. '92

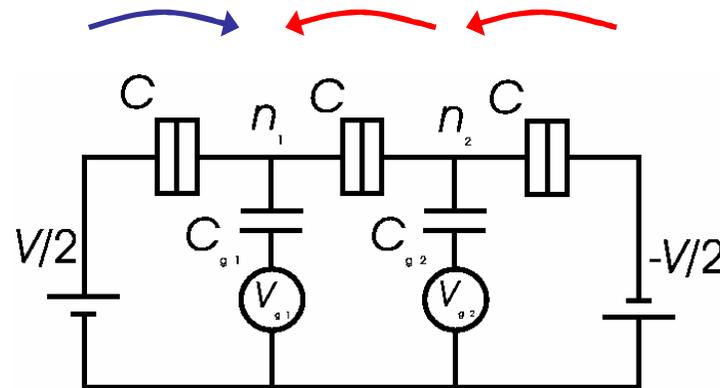


- $f \sim 10 \text{ MHz}$
- $I \sim 1 \text{ pA}$
- $\delta I/I \sim 0.01$

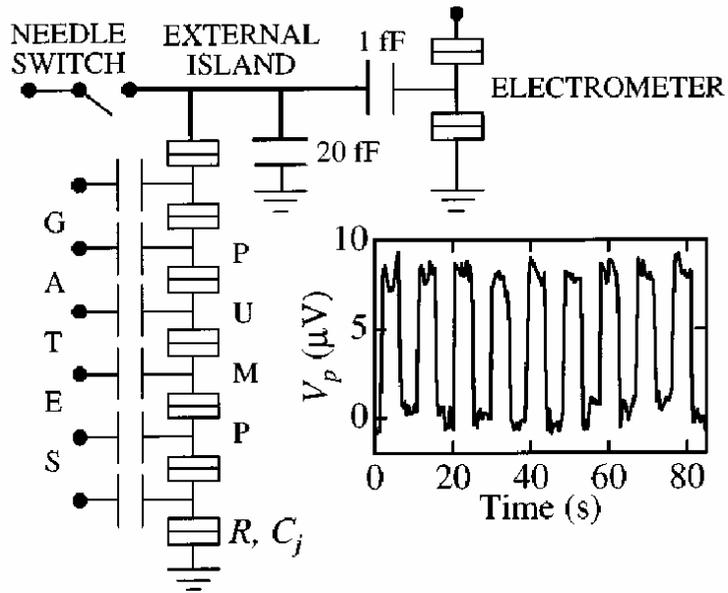
Déviations dues aux effets tunnel à plusieurs électrons

Processus direct

Processus au deuxième ordre



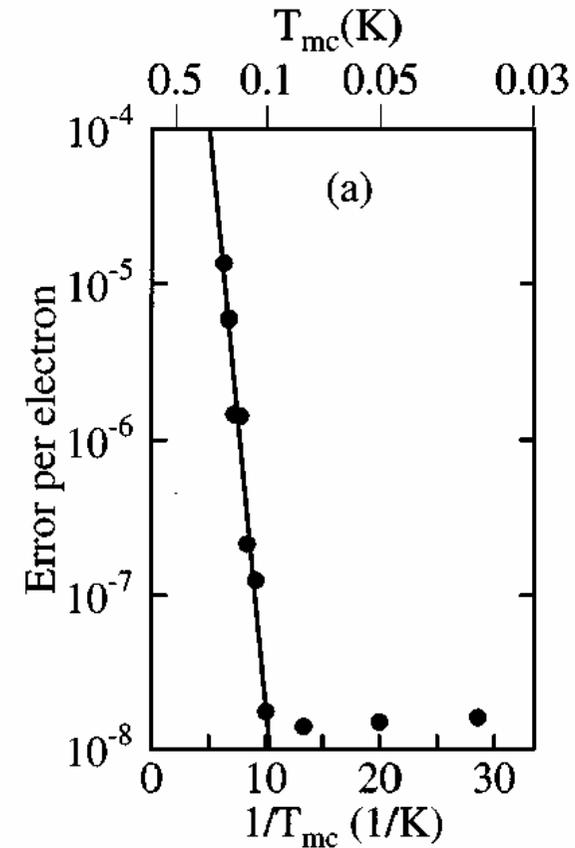
Pompe métrologique



Keller et al. '96 (NIST)

Idée: réduire nombre de passages multiples en utilisant plusieurs jonctions tunnel

Vers la manipulation d'un électron à la fois avec une précision de 10^{-8}

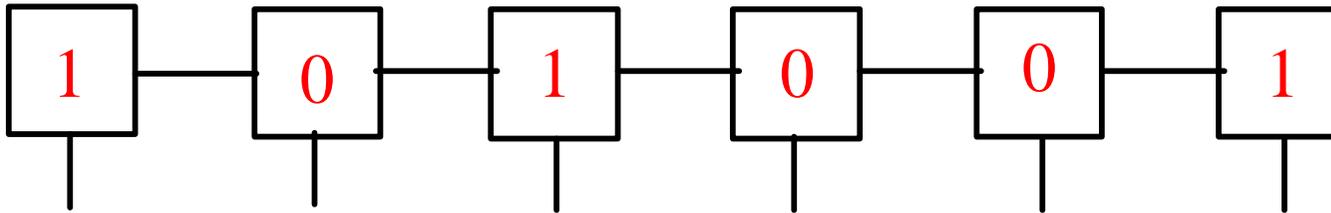


L'information classique

Le bit classique: un système physique à 2 états



L'ordinateur classique: ensemble de bits classiques manipulés par des portes logiques



Problème: factorisation en nombres premiers (exemple: $15 = 3 * 5$)

10 très rapide
 10^{130} 42 jours
 10^{260} impossible

(principe de la cryptographie)

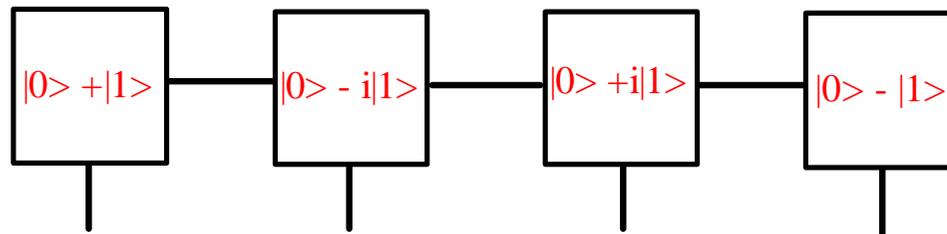
L'information quantique et le bit quantique

Le bit quantique: un système à 2 états, qui est à la fois dans $|0\rangle$ et $|1\rangle$

$$|0\rangle + |1\rangle$$

$$|0\rangle - |1\rangle$$

L'ordinateur quantique: ensemble de bits quantiques, manipulés par des portes logiques (quantiques)



2^N à la fois = parallélisme massif!

Problème: factorisation en nombres premiers:

10 très rapide

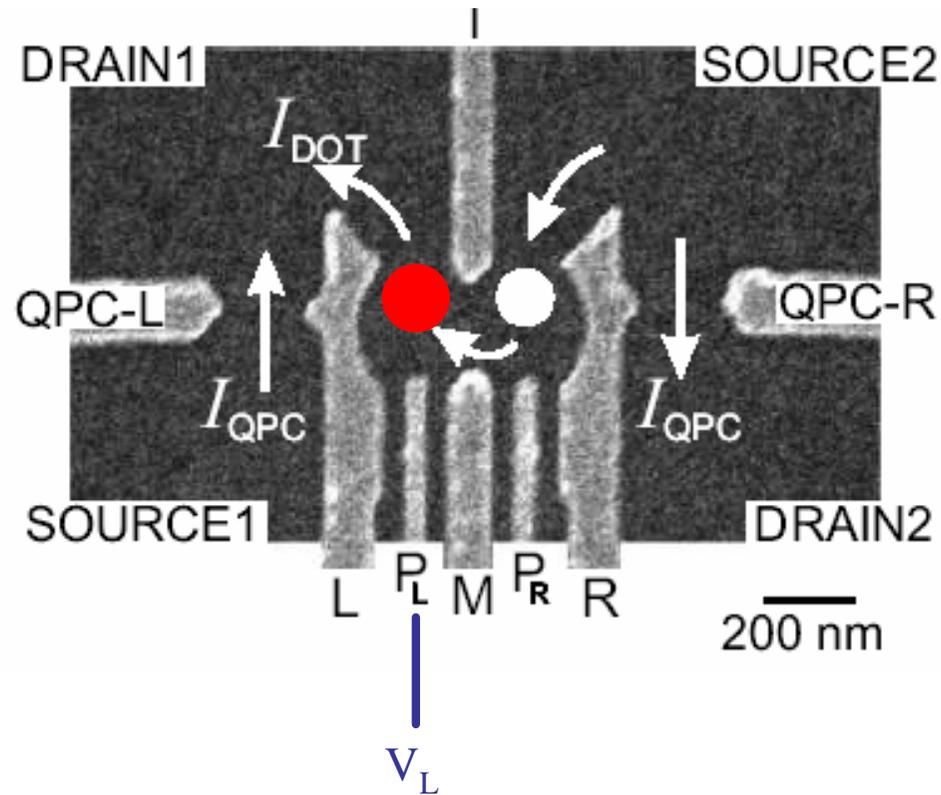
10^{130} 7 heures

10^{260} 2.5 jours

(principe de la cryptographie cassé!)

Manipuler la charge et la phase: vers l'ordinateur quantique?

Deux points quantiques comme un bit quantique (Vandersypen *et al.* '02)

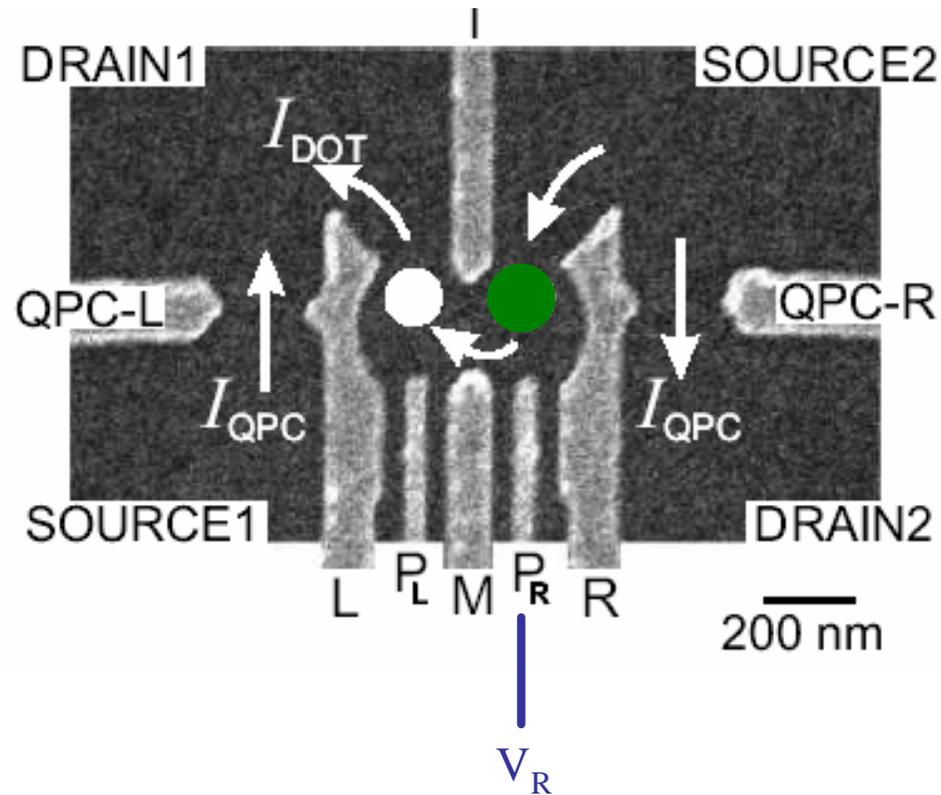


Manipuler la charge ...

$$|\Psi\rangle = |L\rangle$$

Manipuler la charge et la phase: vers l'ordinateur quantique?

Deux points quantiques comme un bit quantique (Vandersypen *et al.* '02)

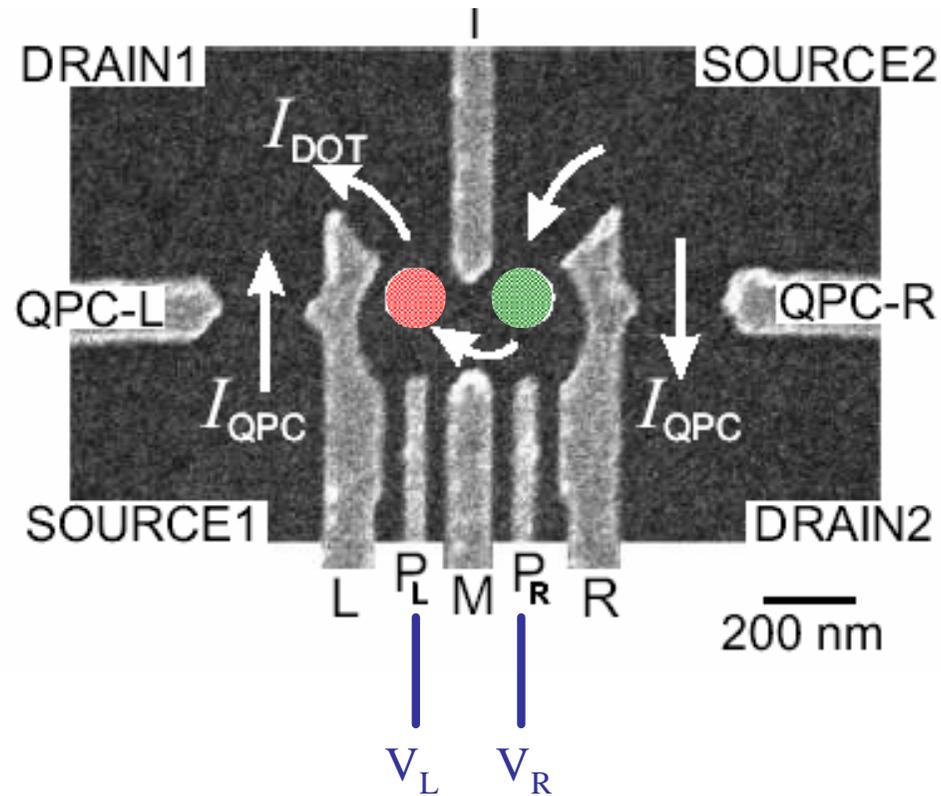


Manipuler la charge ...

$$|\Psi\rangle = |\mathbf{R}\rangle$$

Manipuler la charge et la phase: vers l'ordinateur quantique?

Deux points quantiques comme un bit quantique (Vandersypen *et al.* '02)



Manipuler la charge ...

$$|\Psi\rangle = \alpha |L\rangle + \beta |R\rangle$$

... et conserver la phase!

Conclusions

Questions:

- propriétés physiques?

très différentes

- nouvelles fonctionnalités?

- prometteur (recherche appliquée): fonctionnalités conventionnelles, parfois basées sur une nouvelle physique

- rêves (recherche fondamentale): fonctionnalités basées sur la mécanique quantique: dispositifs dotés d'une précision ultime

- « nano »: une révolution scientifique?

- ...

