

4^e Ecole d'Automne

Détection de rayonnements à très basse température

Balaruc les Bains du 14 au 20 novembre 1999

Physique et techniques des basses températures
détecteurs cryogéniques, acquisition et traitement des signaux.

LE TRANSISTOR

A UN ELECTRON

PHILIPPE JOYEZ

Le transistor à un électron

P. Joyez
Groupe Quantronique
CEA-Saclay

Principe

Utilisation en électromètre
performances
améliorations

Utilisation en thermomètre

LES ELECTRONS ET L'ELECTRONIQUE

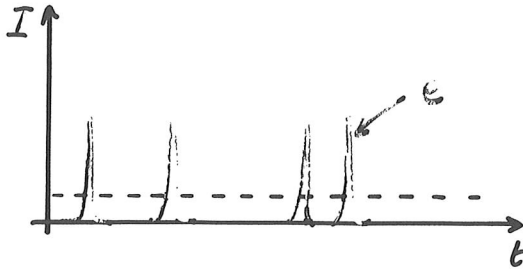
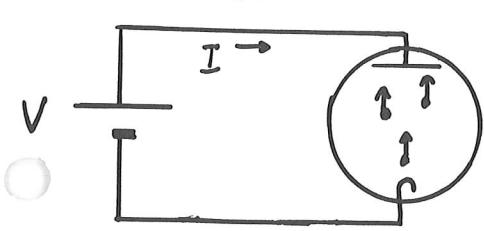
pour une particule isolée
la charge est quantifiée



$$Q = n(-e)$$

(Millikan, 1911)

Bruit de Grenaille dans une diode à vide



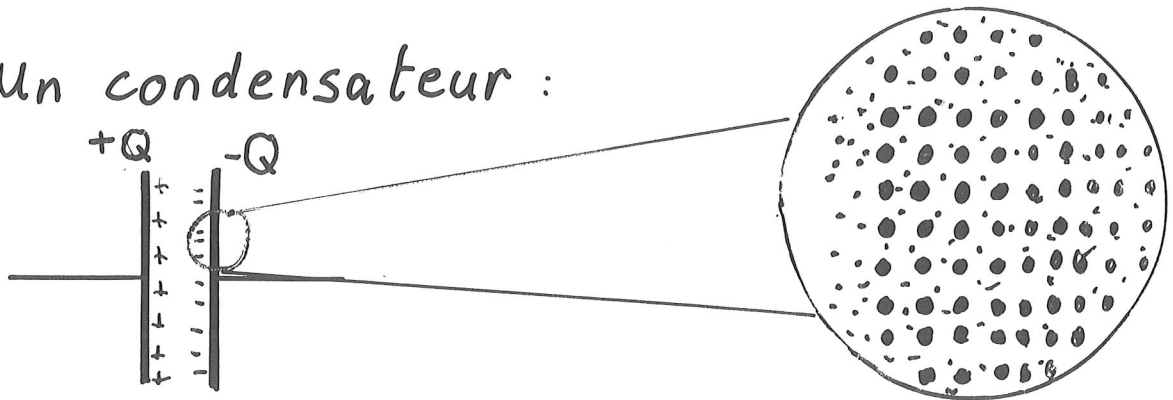
$$S_I = eI$$

(1922)

mais les fluctuations disparaissent pour les fortes densités à cause des corrélations : fluide électronique

→ Dans les dispositifs électroniques usuels les électrons individuels ne peuvent pas être observés.

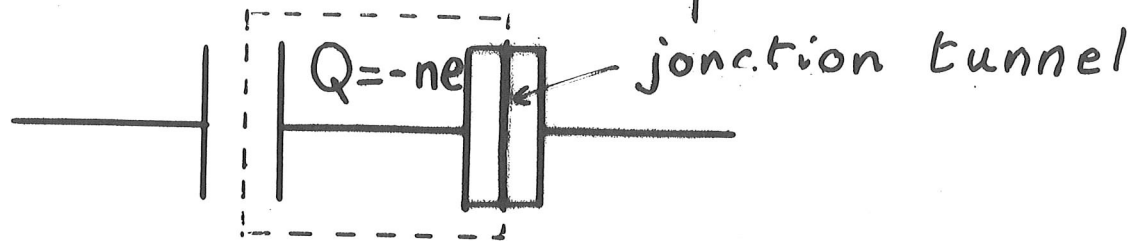
ex: Un condensateur :



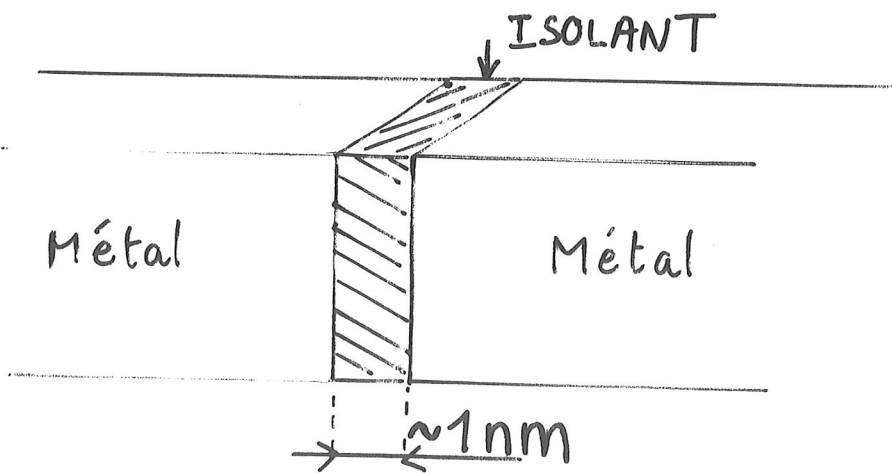
déplacement continu : Q n'est pas quantifiée

Comment observer des effets à 1 électron ?

rompre le fluide électronique...

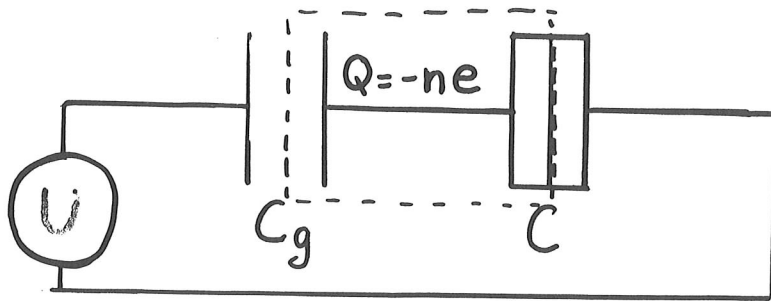


mais permettre le passage des e^-

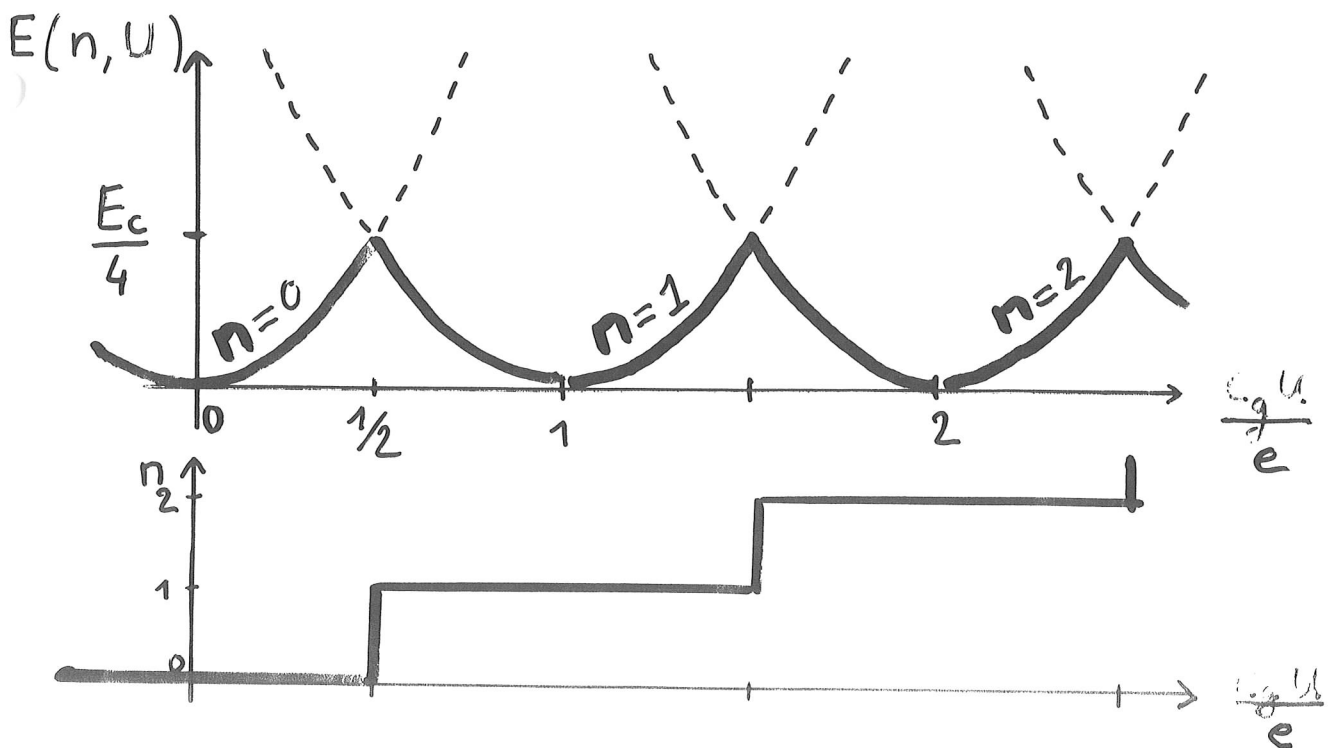


Condition pour que les e^- soient bien localisés : $R_T \gg R_K = \frac{h}{e^2} \approx 25,8 \text{ k}\Omega$

Expérience de base : la boîte à électrons

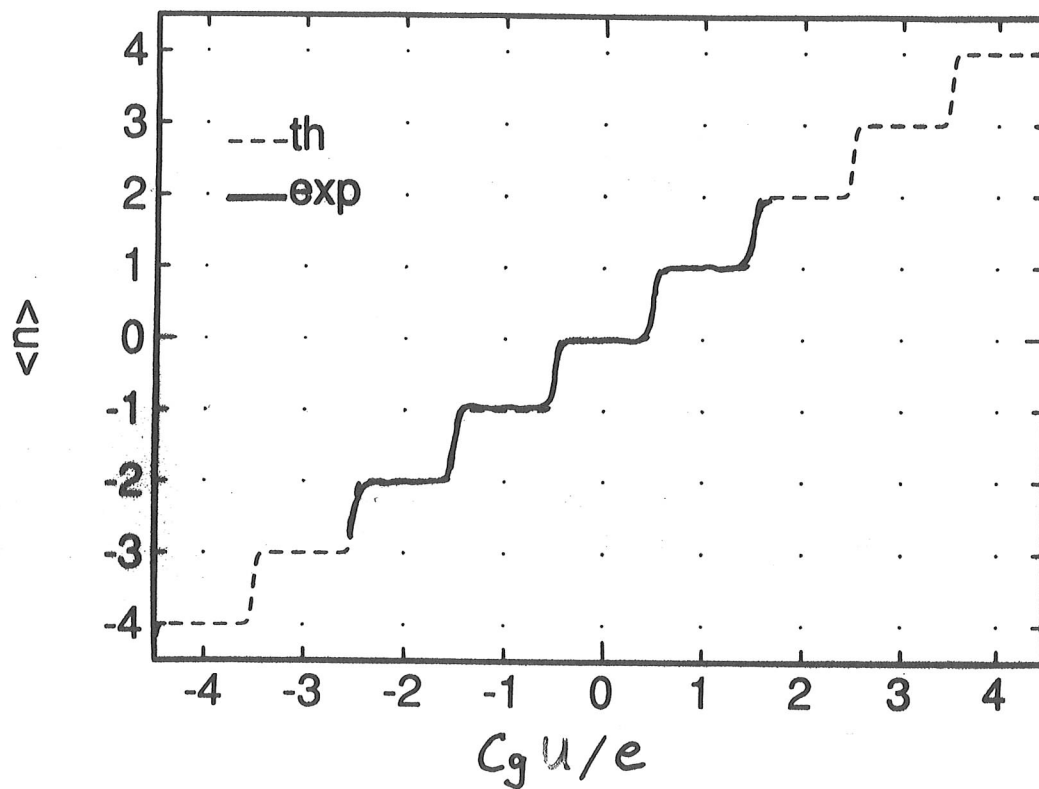


$$E(n, U) = \underbrace{\frac{e^2}{2(C+C_g)}}_{E_c} \times \left(n - \frac{C_g U}{e} \right)^2$$



escalier observable si $kT \ll E_c$

RESULTATS



- la charge de l'île est bien quantifiée.
- la théorie marche
- présence de charges d'offset

Hamp. 1991 - 1994.

Ordres de grandeur

Fonctionnement à T ambiante ?

$$E_c \gg 3000 \text{ K} \leftrightarrow C \leq 10^{-19} \text{ F} \leftrightarrow \text{échelle moléculaire}$$

Gamme accessible par micro-fabrication ?

$$100 \times 100 \text{ nm} \leftrightarrow C \sim 10^{-15} \text{ F} \leftrightarrow E_c \sim 1 \text{ K} \quad (\Rightarrow \text{dilution})$$

2 technologies

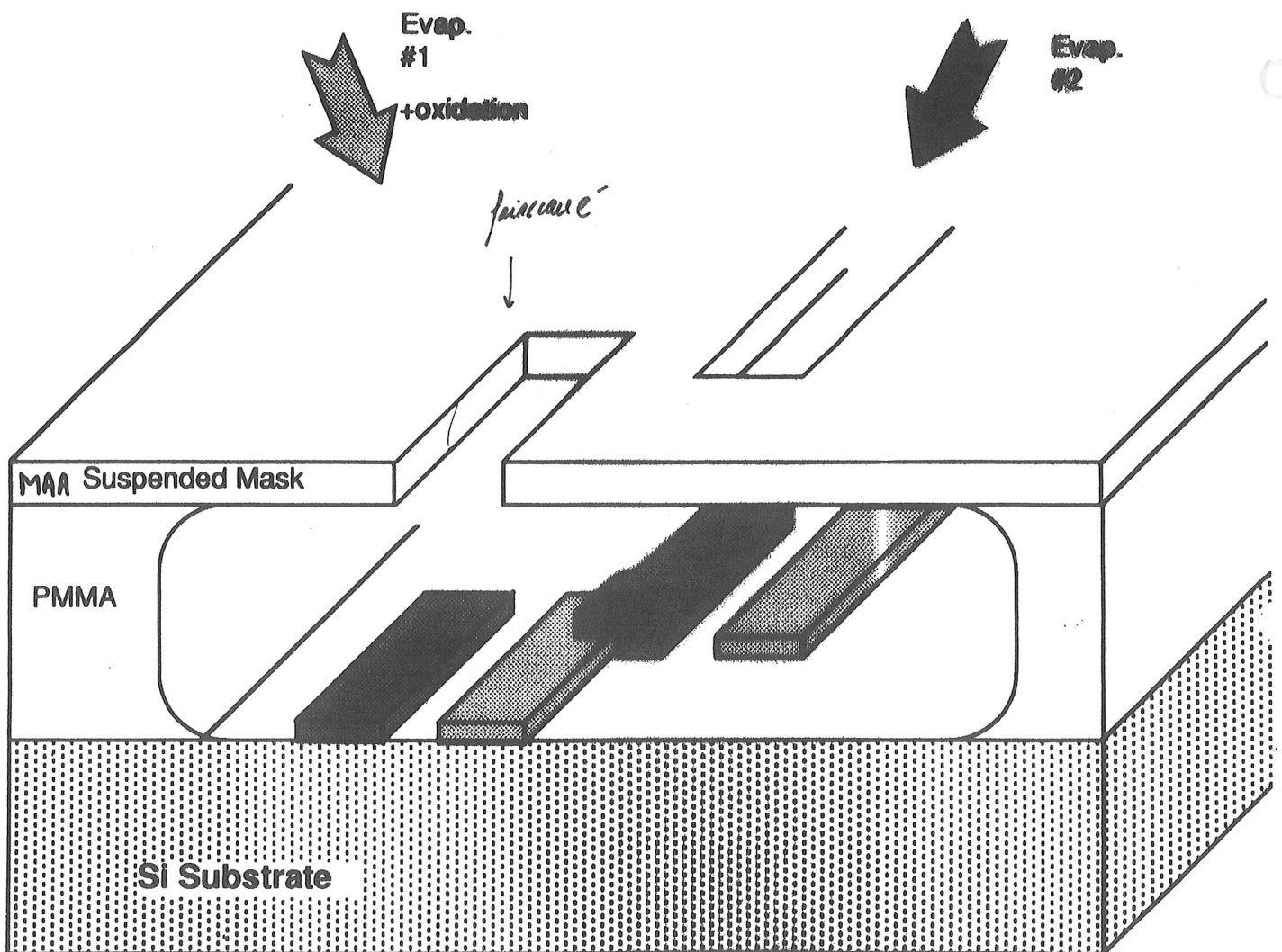
↓
métallique

cf. Gaas en 2D.

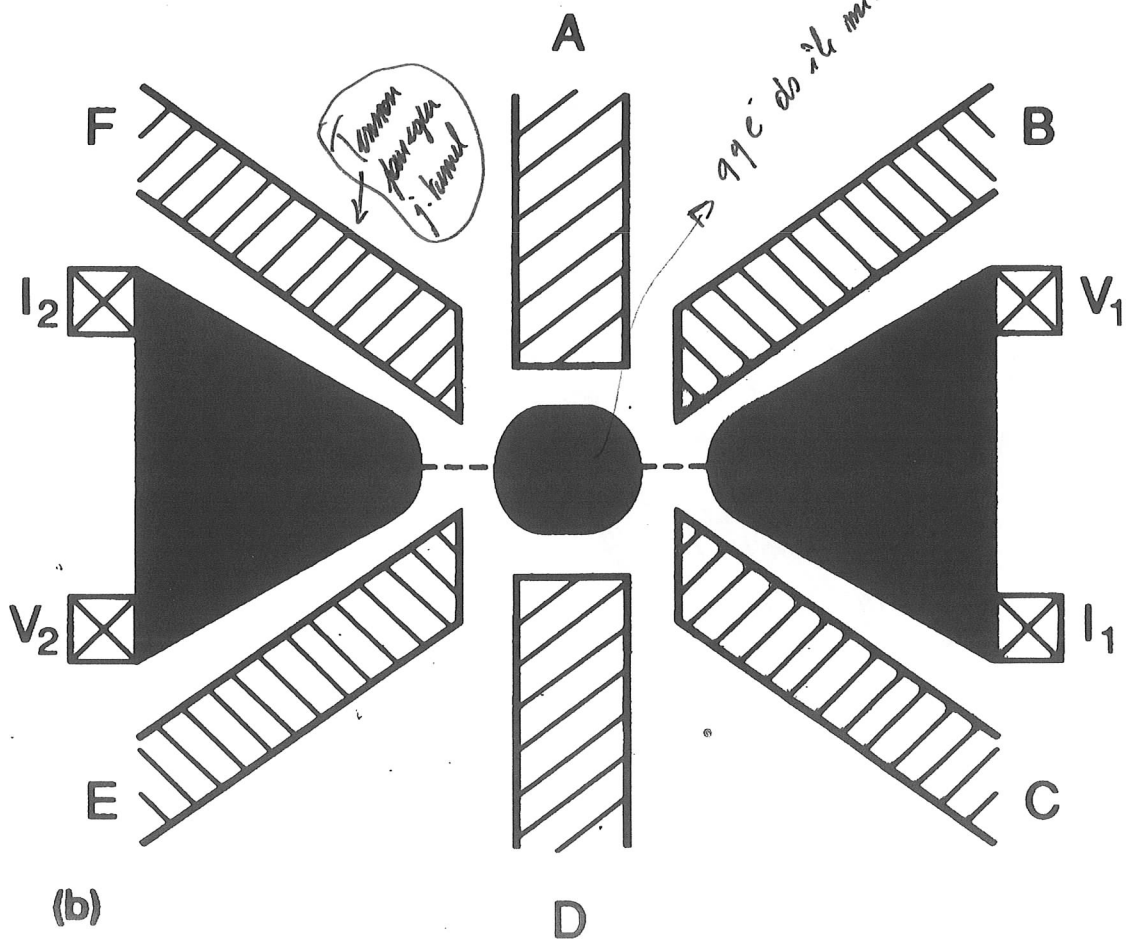
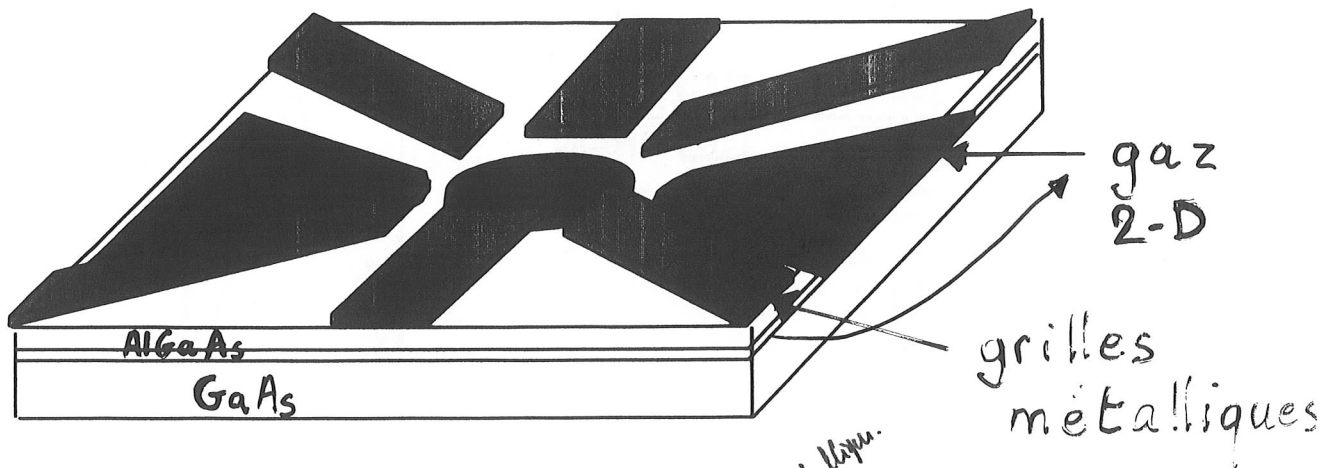
↓
2DEG.

FABRICATION OF NANOSCALE JUNCTIONS

THE SHADOW MASK TECHNIQUE



Circuits semi-conducteurs

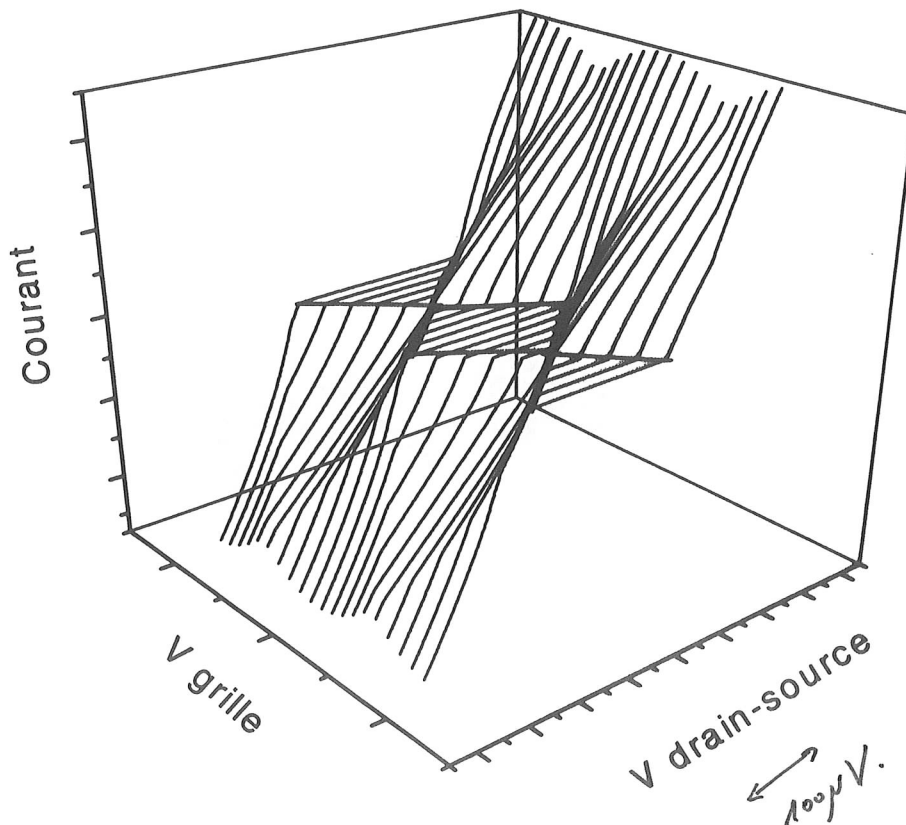
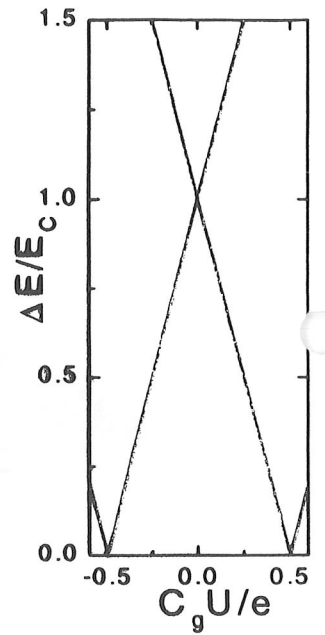
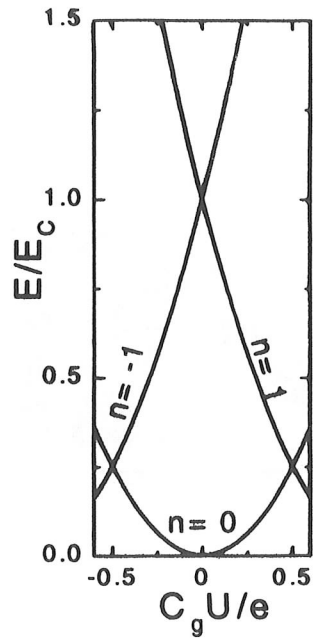
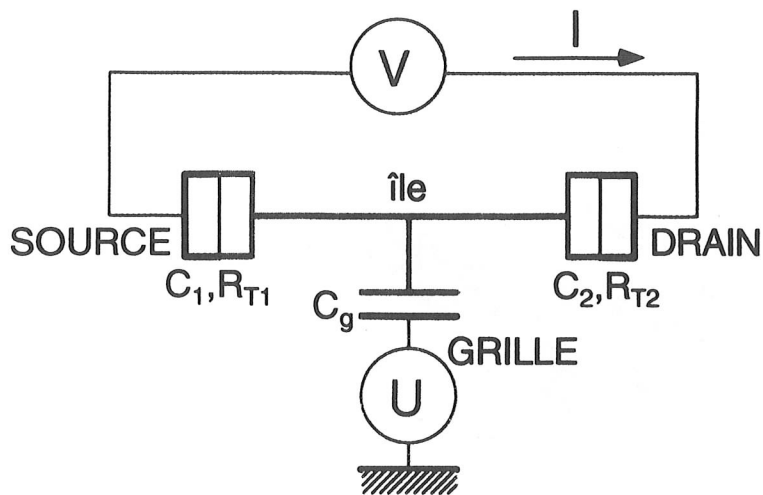


• jonctions réglables

• quantique

LE TRANSISTOR A 1 ELECTRON

une boîte à électrons avec 2 jonctions



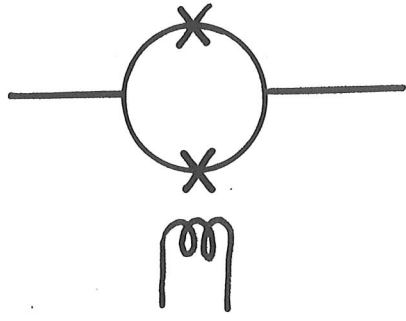
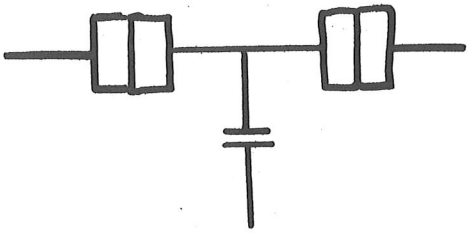
Dualité avec le SQUID d.c.

CHARGES

FLUXONS

SET

SQUID



île
jonctions série

boucle
jonctions //

modulation en charge
période e

modulation en flux
periode $\Phi_0 = h/2e$

entrée haute
impédance (capa)
transfo de charge!

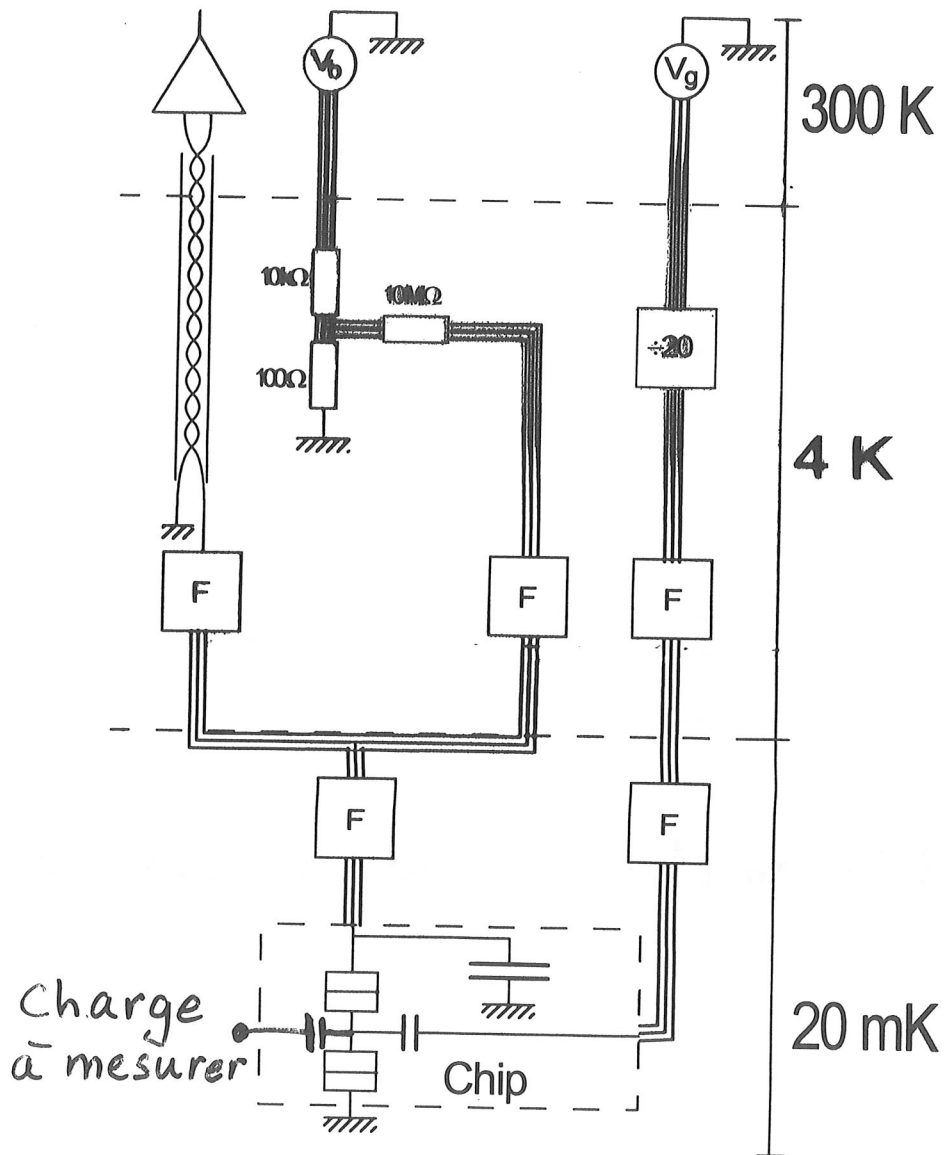
entrée basse
impédance (transfo)
 \Rightarrow adaptation d'impédance.

sortie haute
impédance
($Z_s \gg 2R_T$ $R_T \gg k\Omega$)

sortie basse impéd.
(Supra)

on peut faire un \ominus capacitif.
mais pas \otimes

IMPLEMENTATION TYPIQUE



excellente sensibilité $\ll e$

mais :

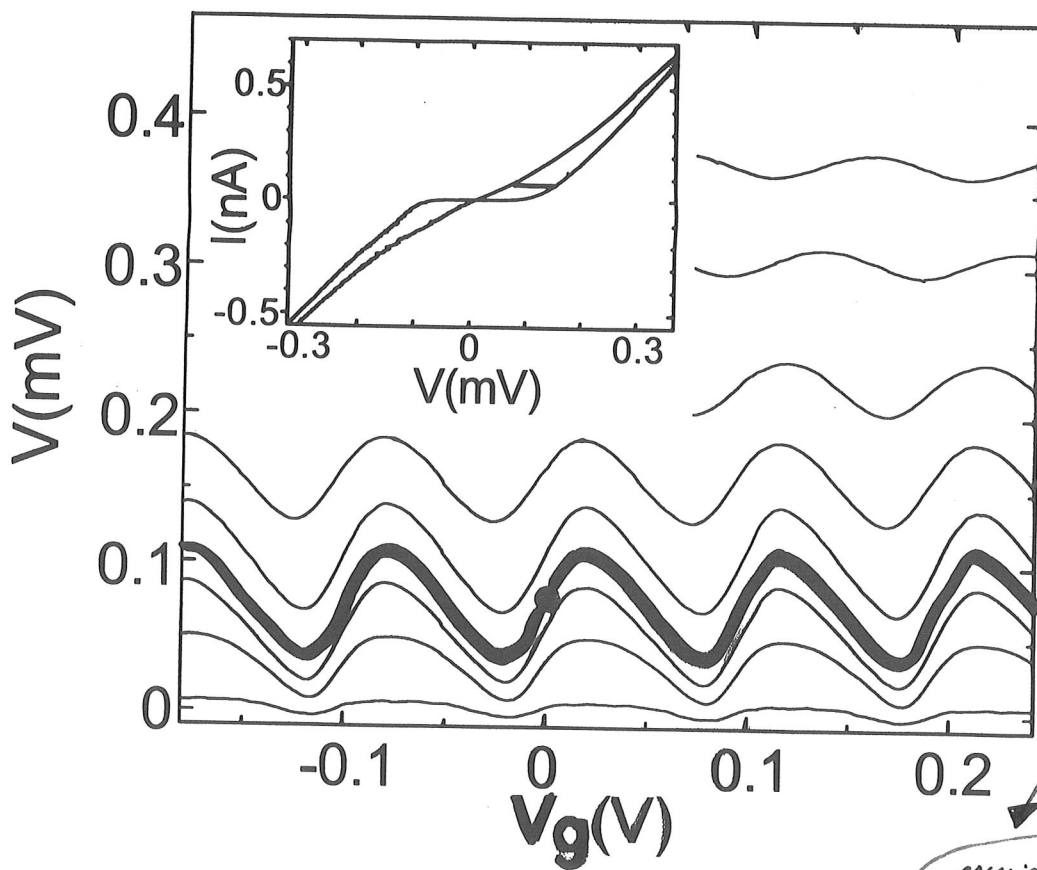
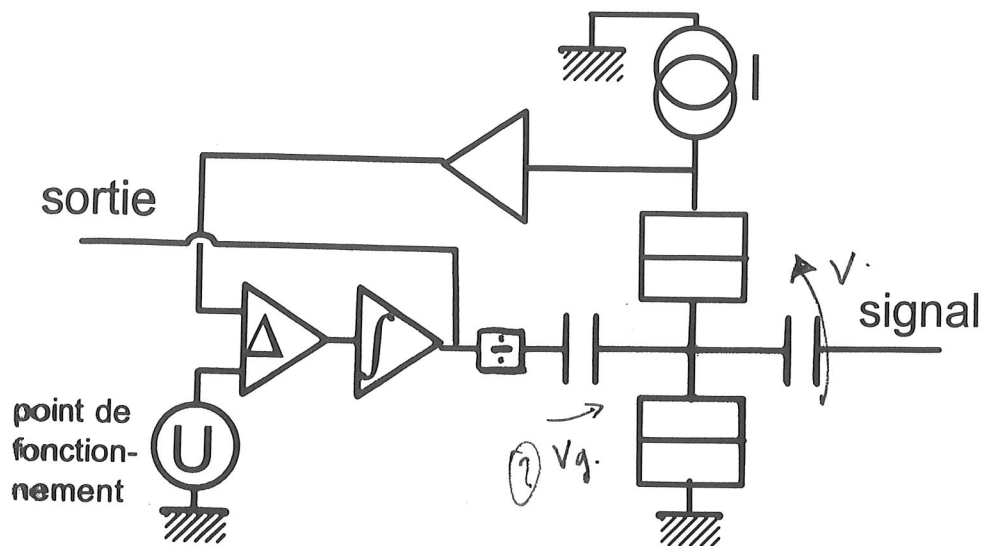
- Bande passante

$$f_c \sim (R_T C_{tot})^{-1} \lesssim \text{kHz}$$

- Bruit et dérive

- réponse non linéaire

Linéarisation



excitons du pt de l'électron

Sensibilité - Bruit

sources de bruit

- Montage (Filtres, ampli, ...) O.K.

- Intrinsèque : Bruit de Grenaille
(shot noise)

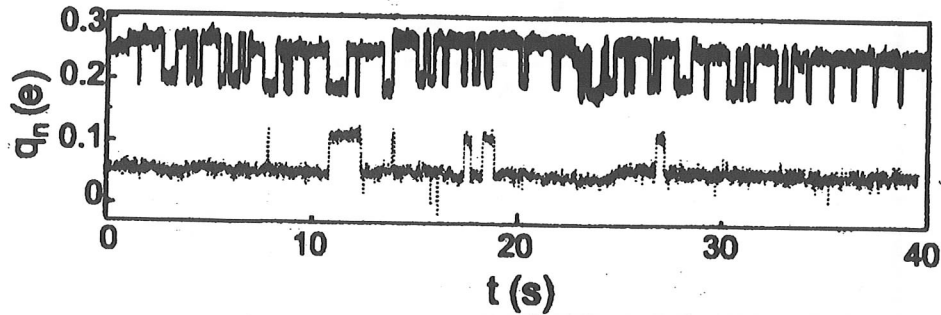
bruit blanc $q_N \sim \sqrt{2R_T C} e / \sqrt{Hz} \sim 10^{-5} e / \sqrt{Hz}$
@ 1 nA

- Extrinsèque : Charges fluctuantes

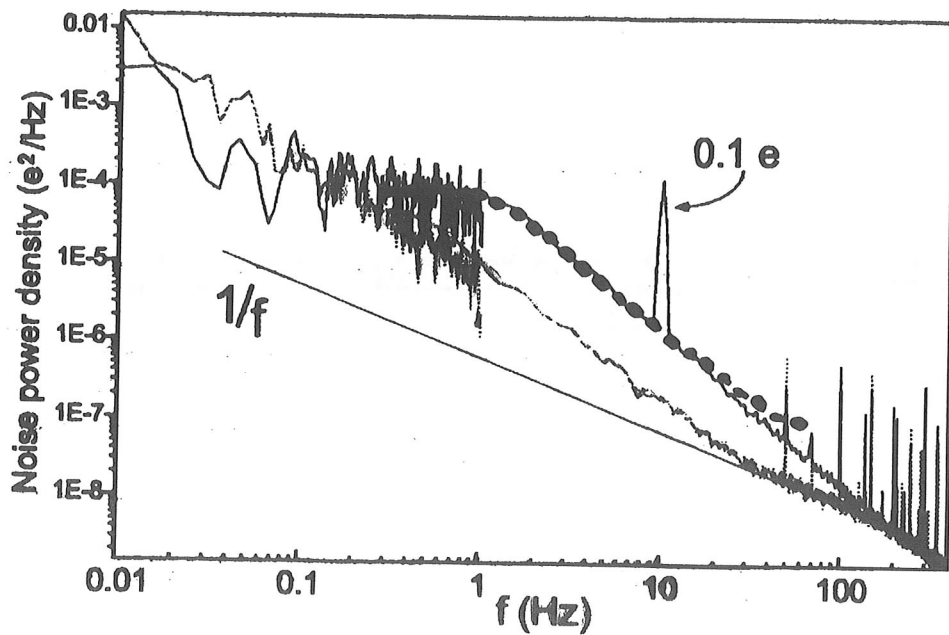
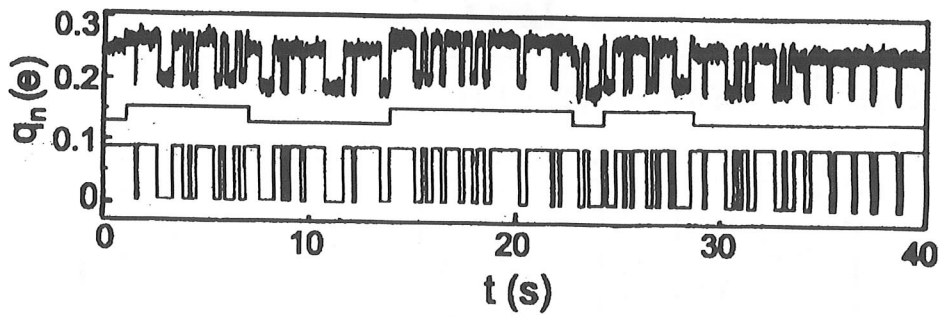
→ bruit en $1/f$ habituellement dominant

Charges parasites fluctuantes

Bruit "télégraphique"

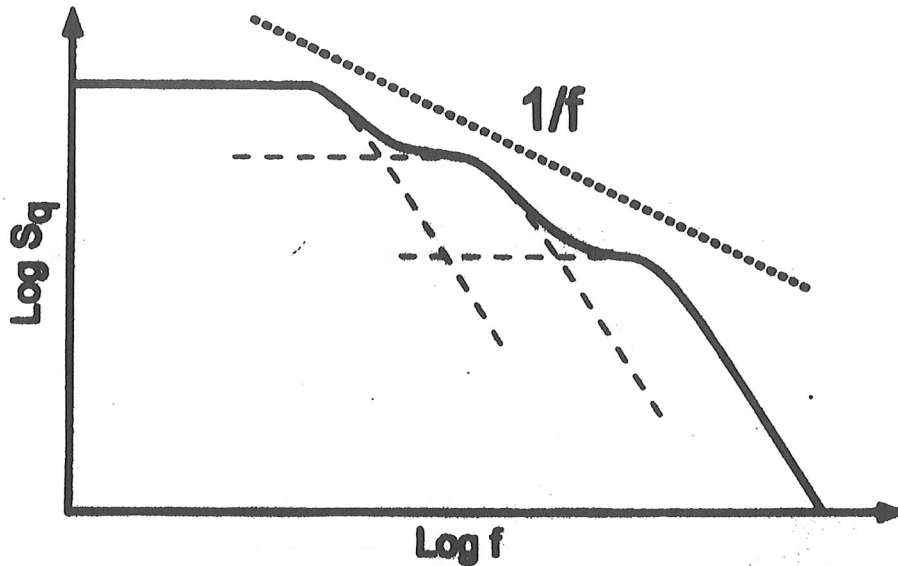


← 2 jours après...

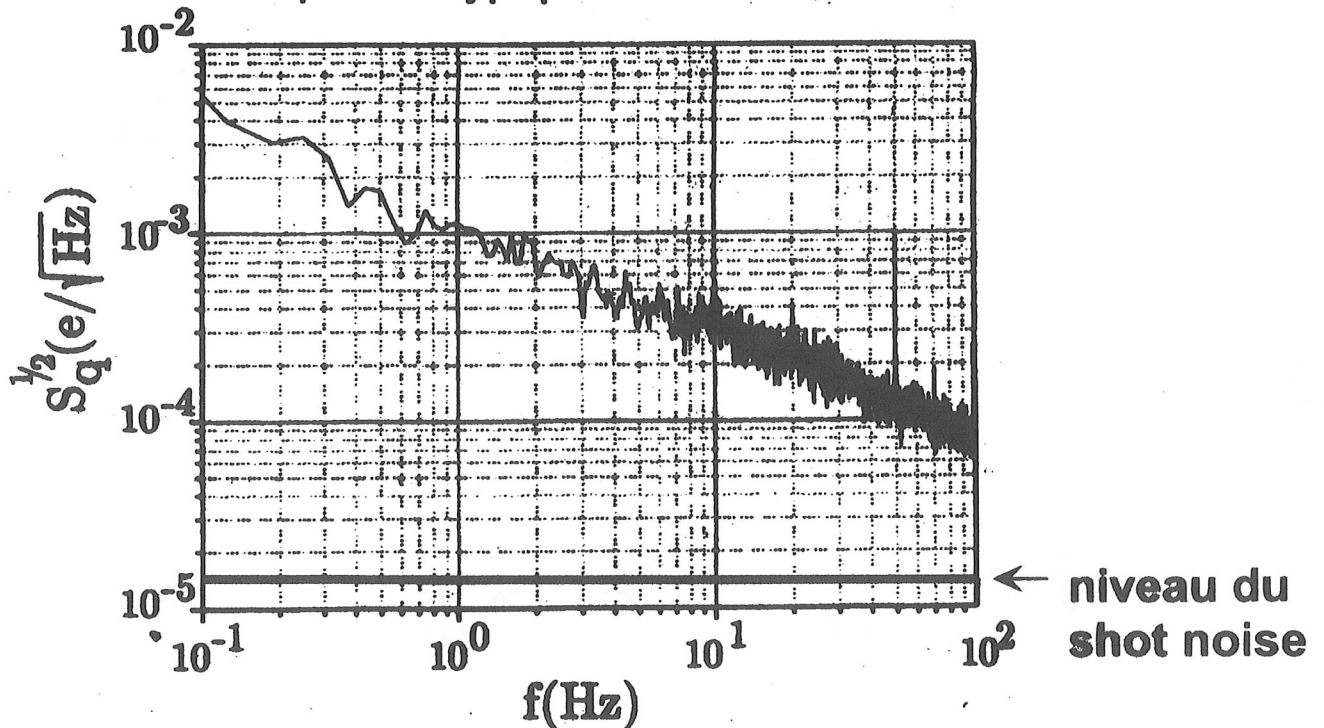


Fluctuateurs et bruit en 1/f

plusieurs fluctuateurs



spectre basse fréquence typique



- Source de bruit mal connue
- Intégration inefficace *car 1/f!*

*impédance acoustique.
système à 2 masses f . de bruit spécifique?*

SET + HEMT

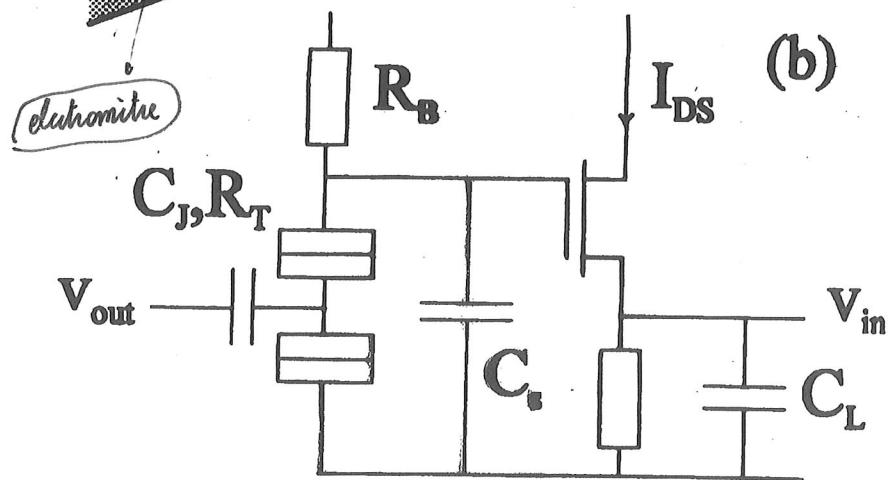
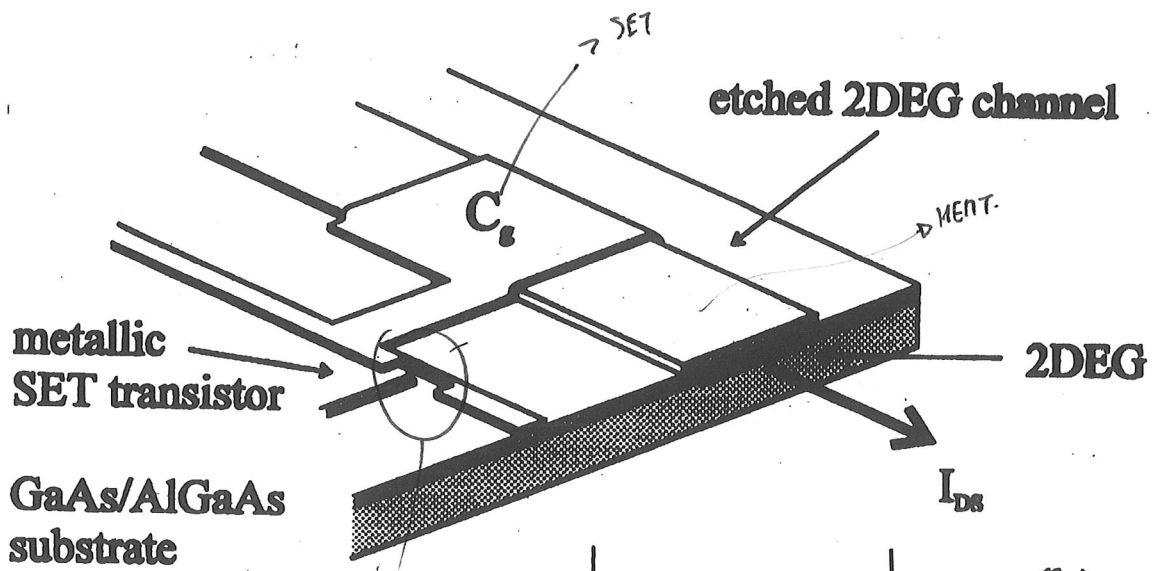
Augmenter la B.P.

Univ. Delft (N.L.)

Visscher et coll.

Univ. Charmers (S)

Pelterson et coll.



- B.P. 1 MHz (→ 10 MHz?)

• Difficultés

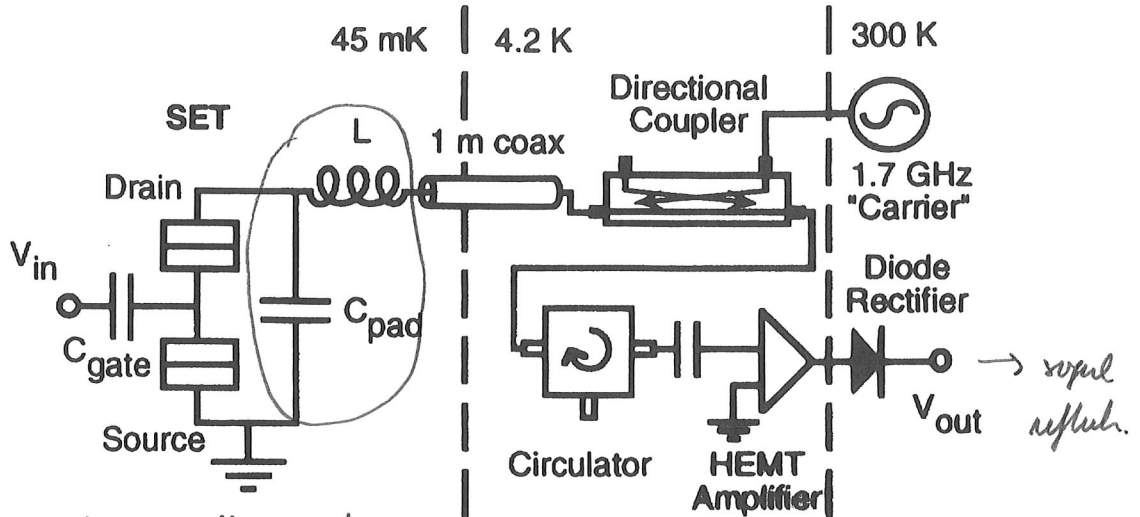
- fabrication

- dissipation (μW)

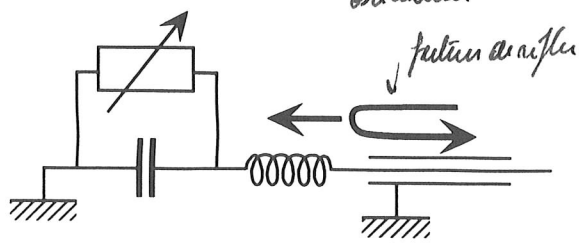
LE "RF-SET"

Schoelkopf et coll. Yale Univ. (E.U.)
 Wahlgren et coll. Chalmers Univ. (S)

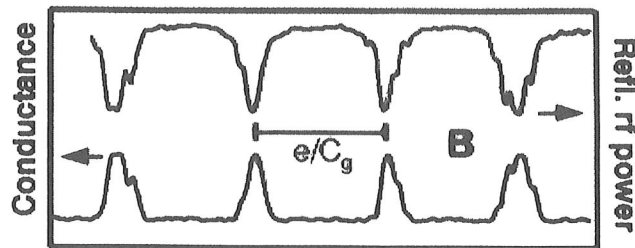
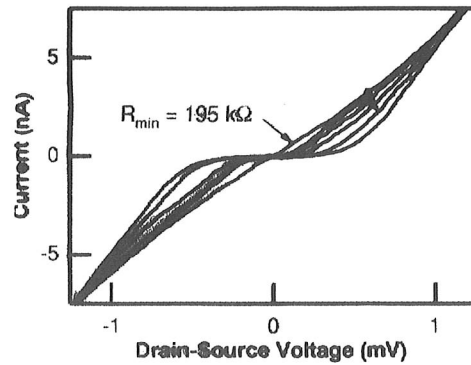
Transf. impedance par circuit résonnant



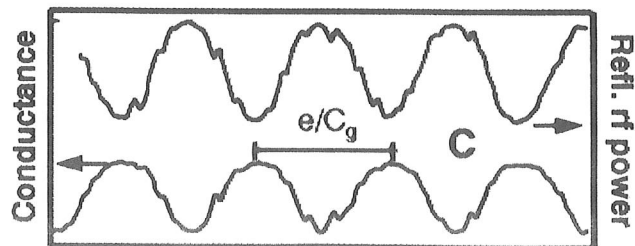
Resonance visible → emit. oscillation



mesure amplitude du signal refléchi

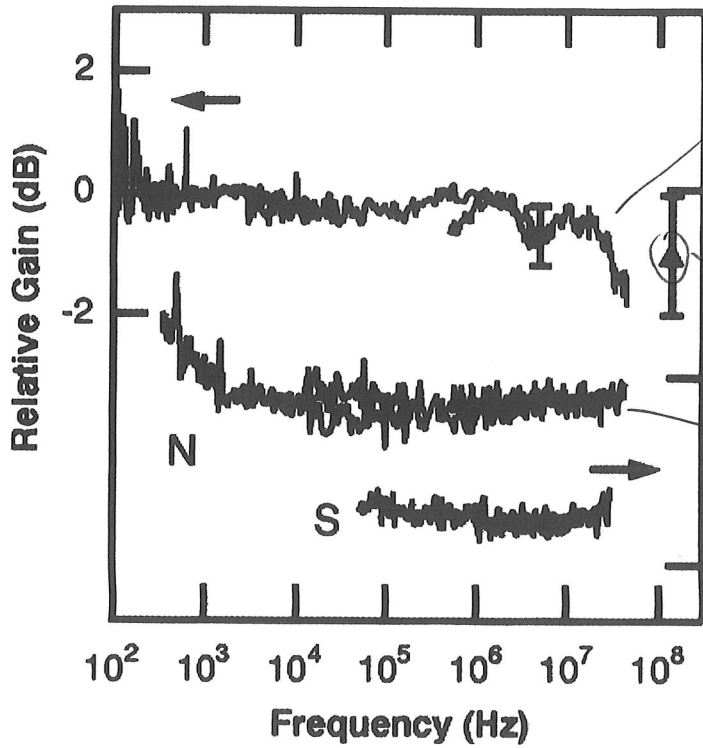


Gate Voltage



Gate Voltage

Performance du "RF-SET"



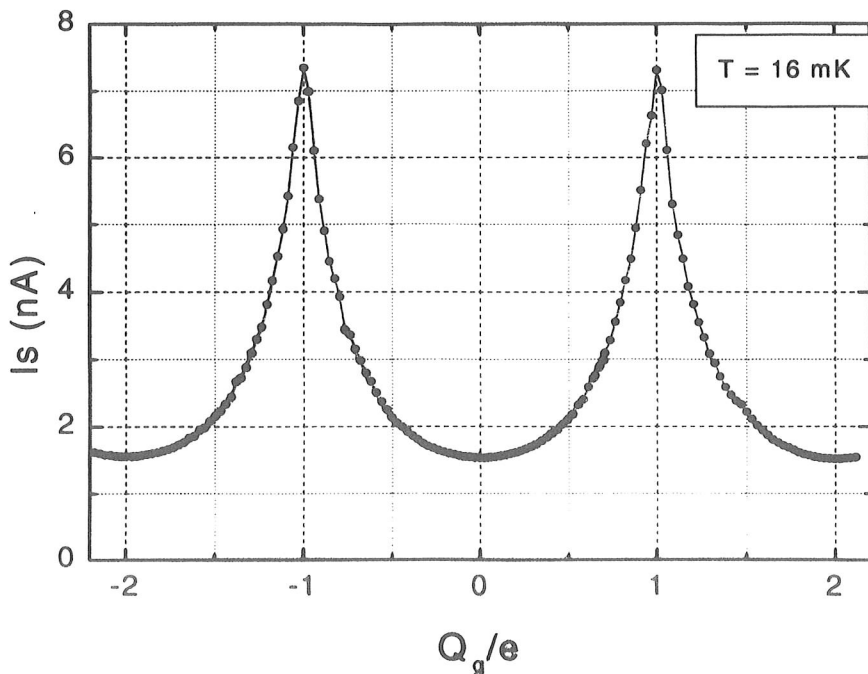
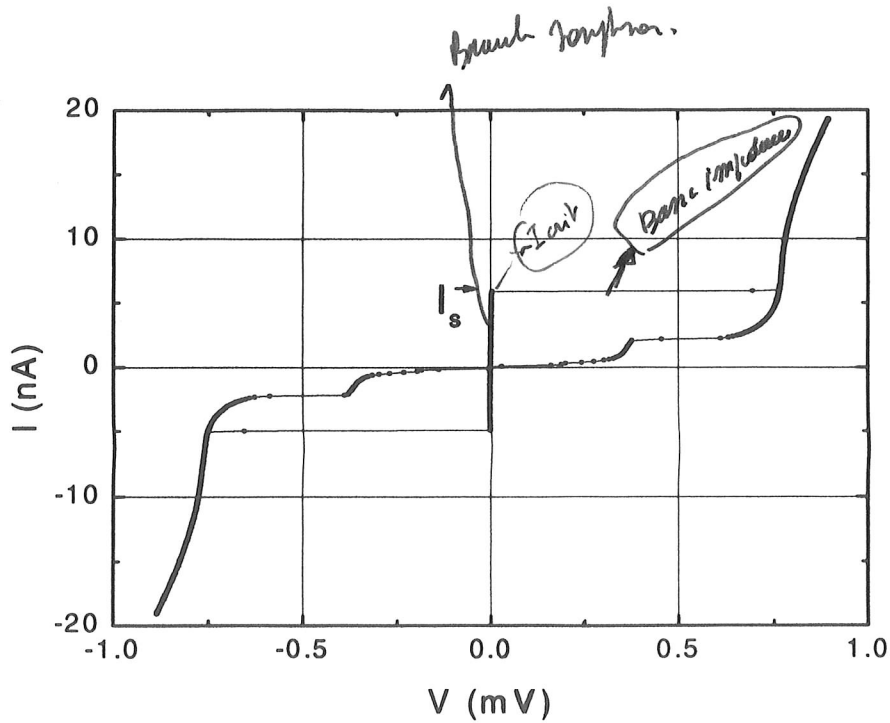
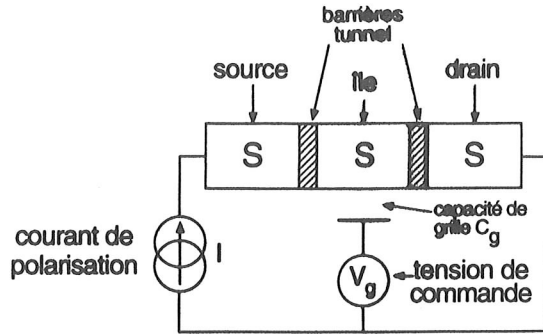
RF-SET: BP → 100 MHz → 1 GHz ?

meilleures performances publiées

bruit en retour?

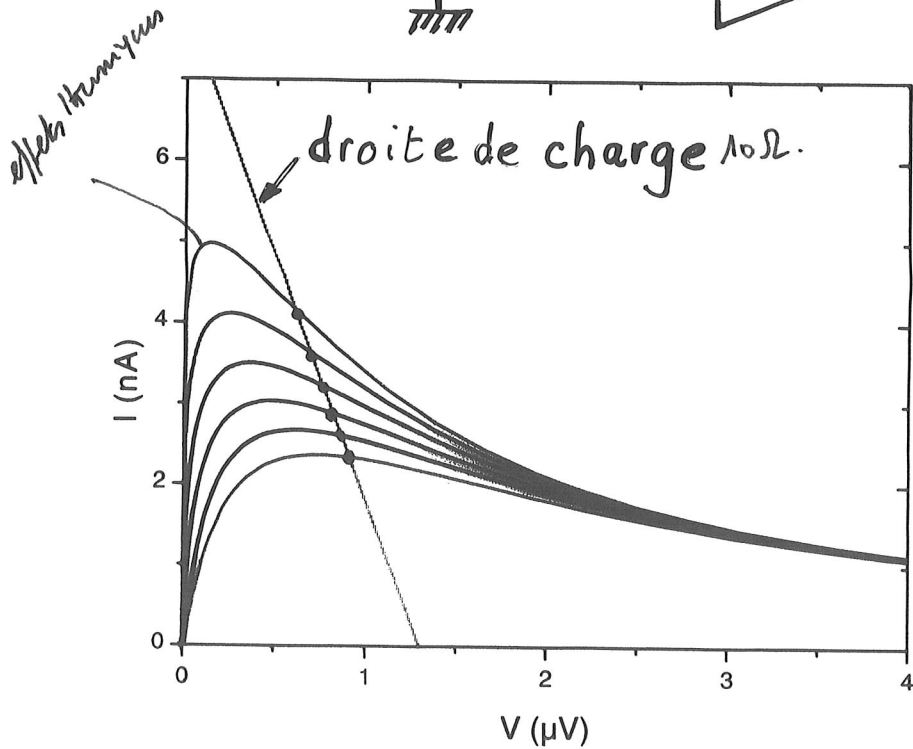
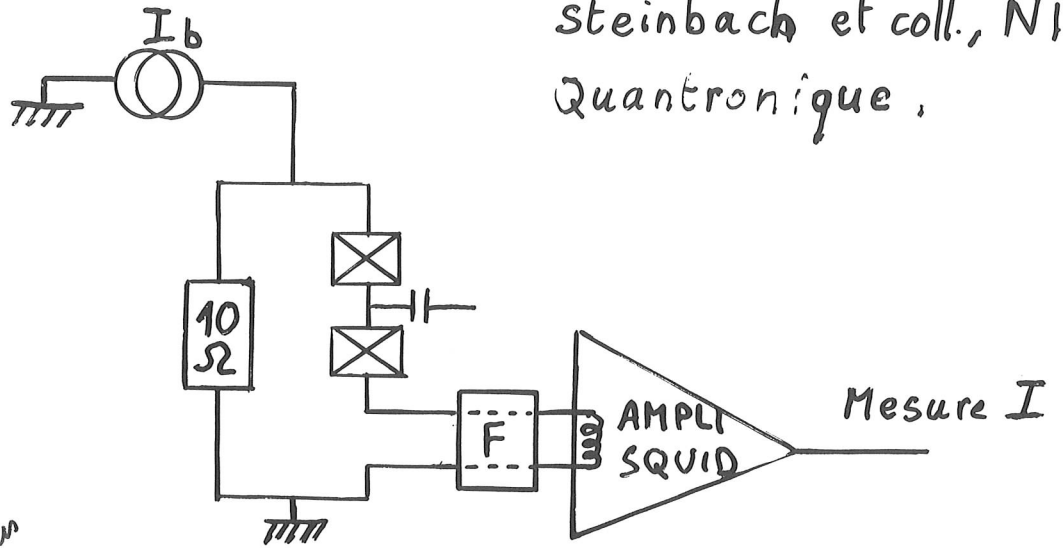
Le SET supraconducteur

amélioration BP avec SET supra.



modulés par tension de grille V_g . ici $2e$ (pour Cooper).

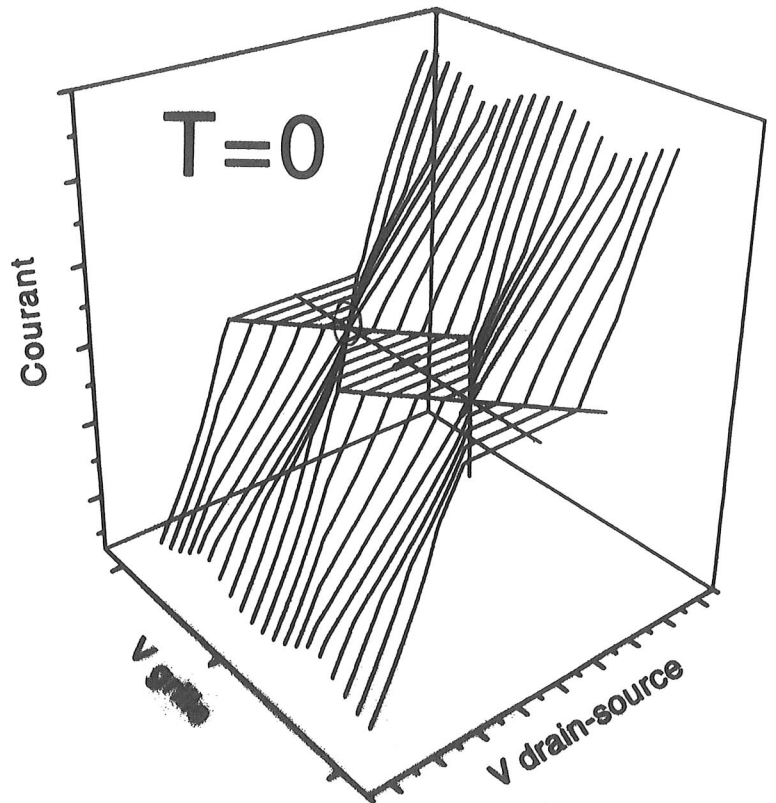
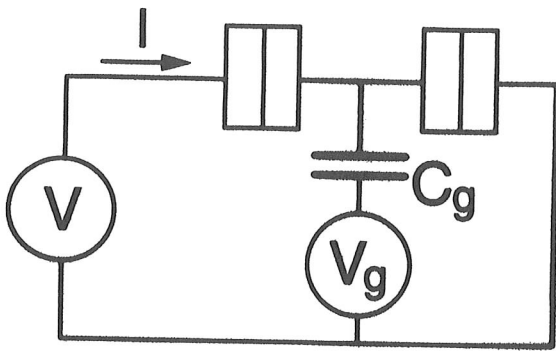
SET supra et SQUID



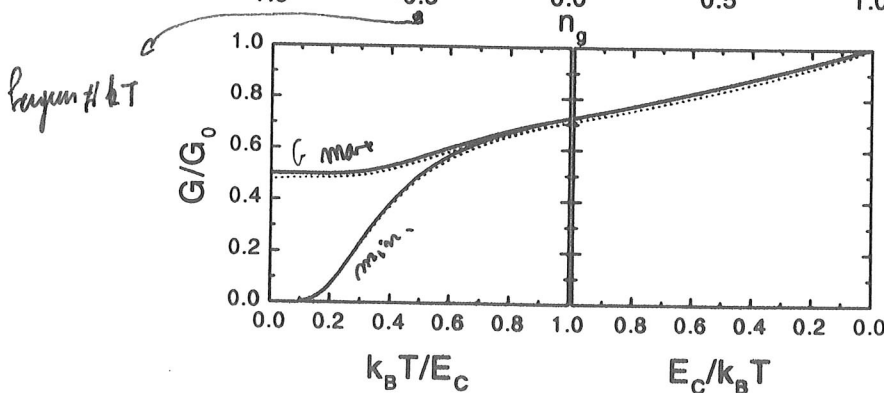
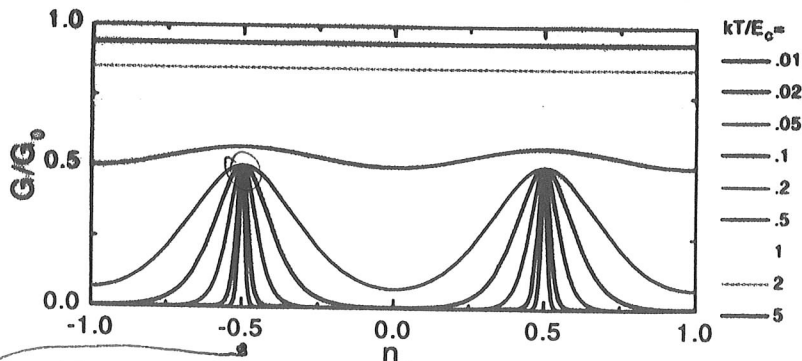
avantages:

- basse impédance (BP \nearrow 100 MHz)
- spectre de bruit non blanc
- pas de porteuse (moins de bruit en retour)

Dépendance en Température



conductance en fonction de T

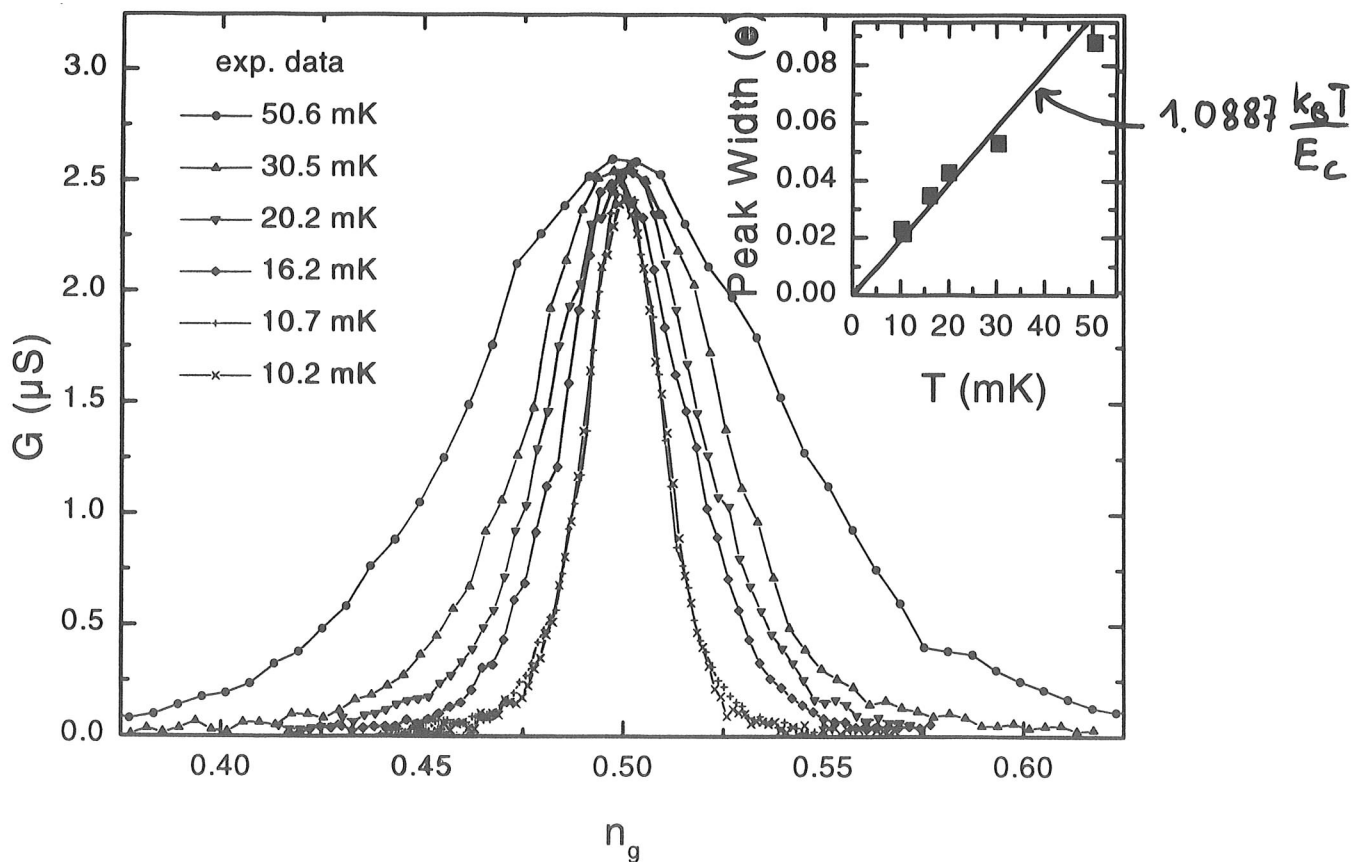
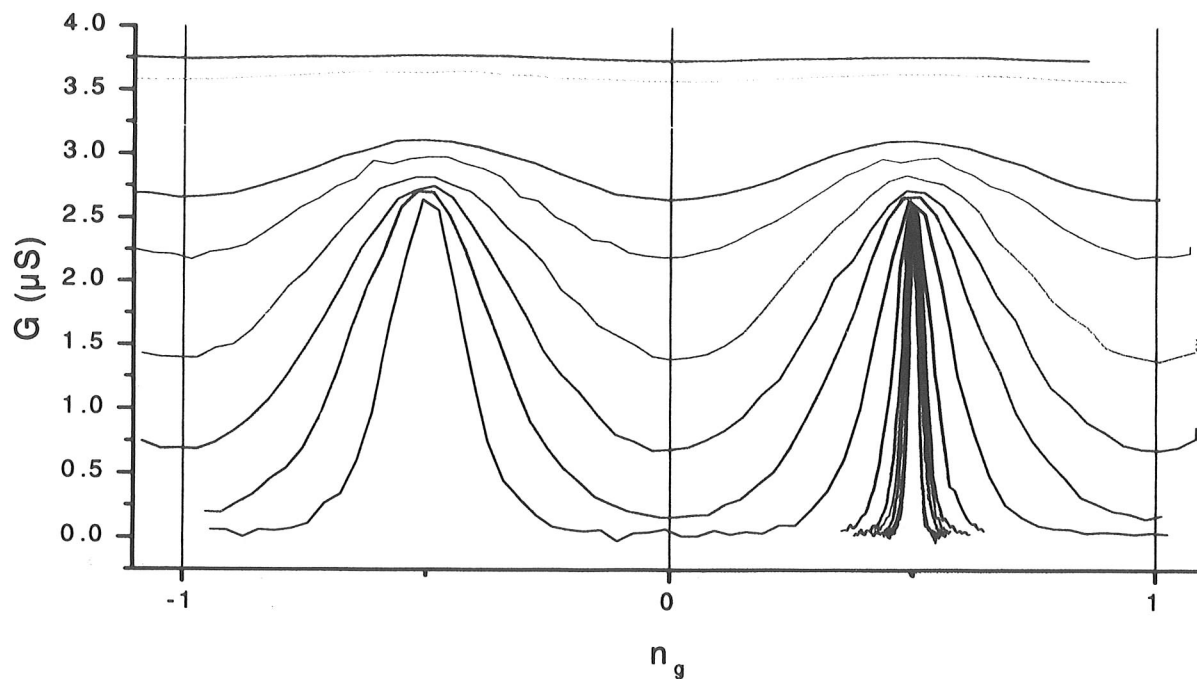


- à basse T: largeur des pics de conductance $\propto T$
- à haute T: plus d'effet de grille $I(V, T)$

\hookrightarrow par quoi caller? $G(T)$

$$G \propto \frac{1}{T}$$

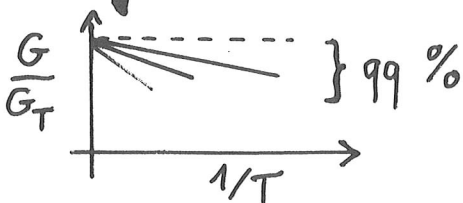
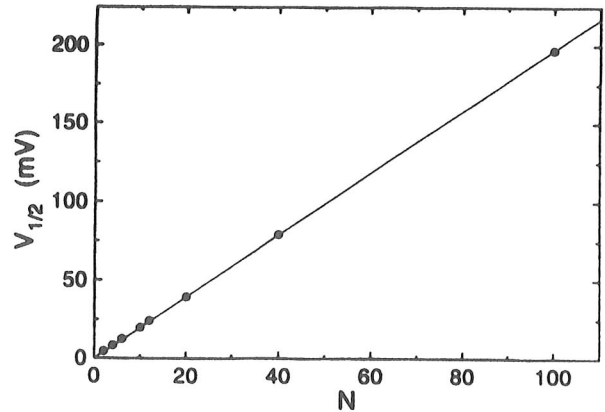
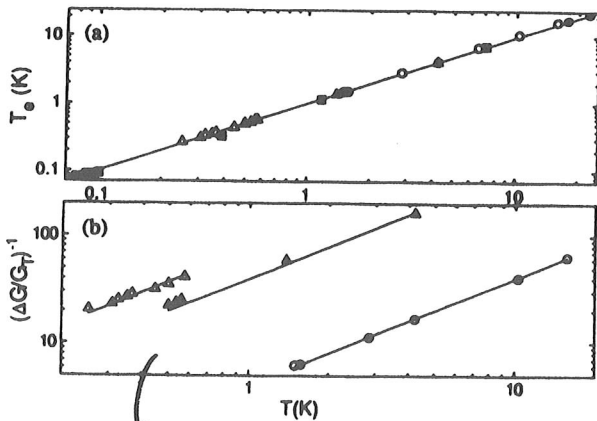
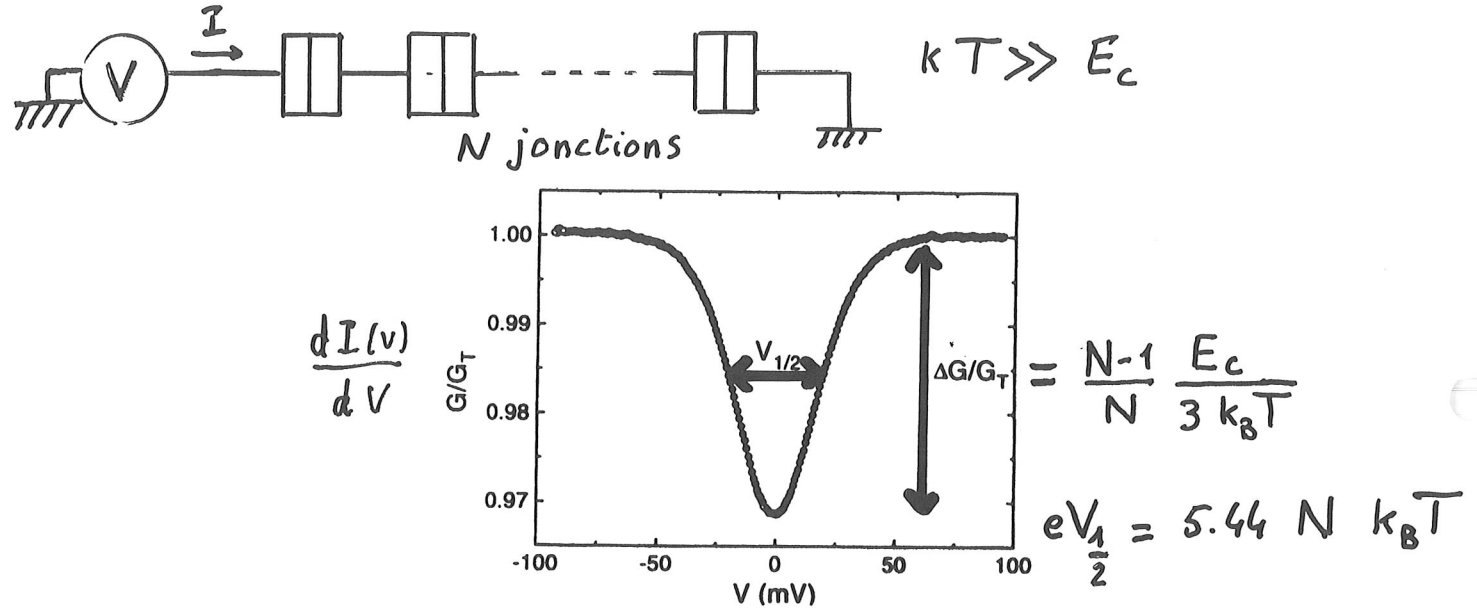
Exemple de mesure de conductance



Thermométrie par réseaux de jonctions

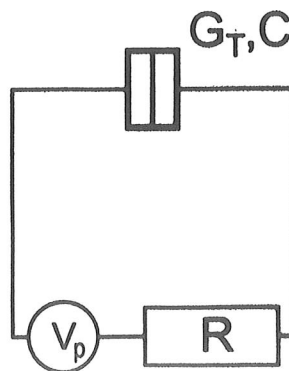
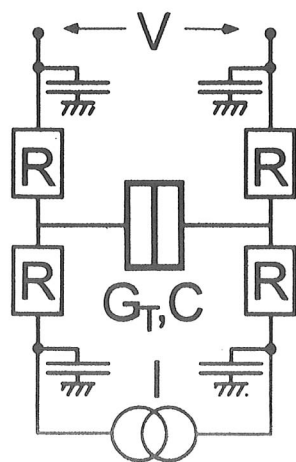
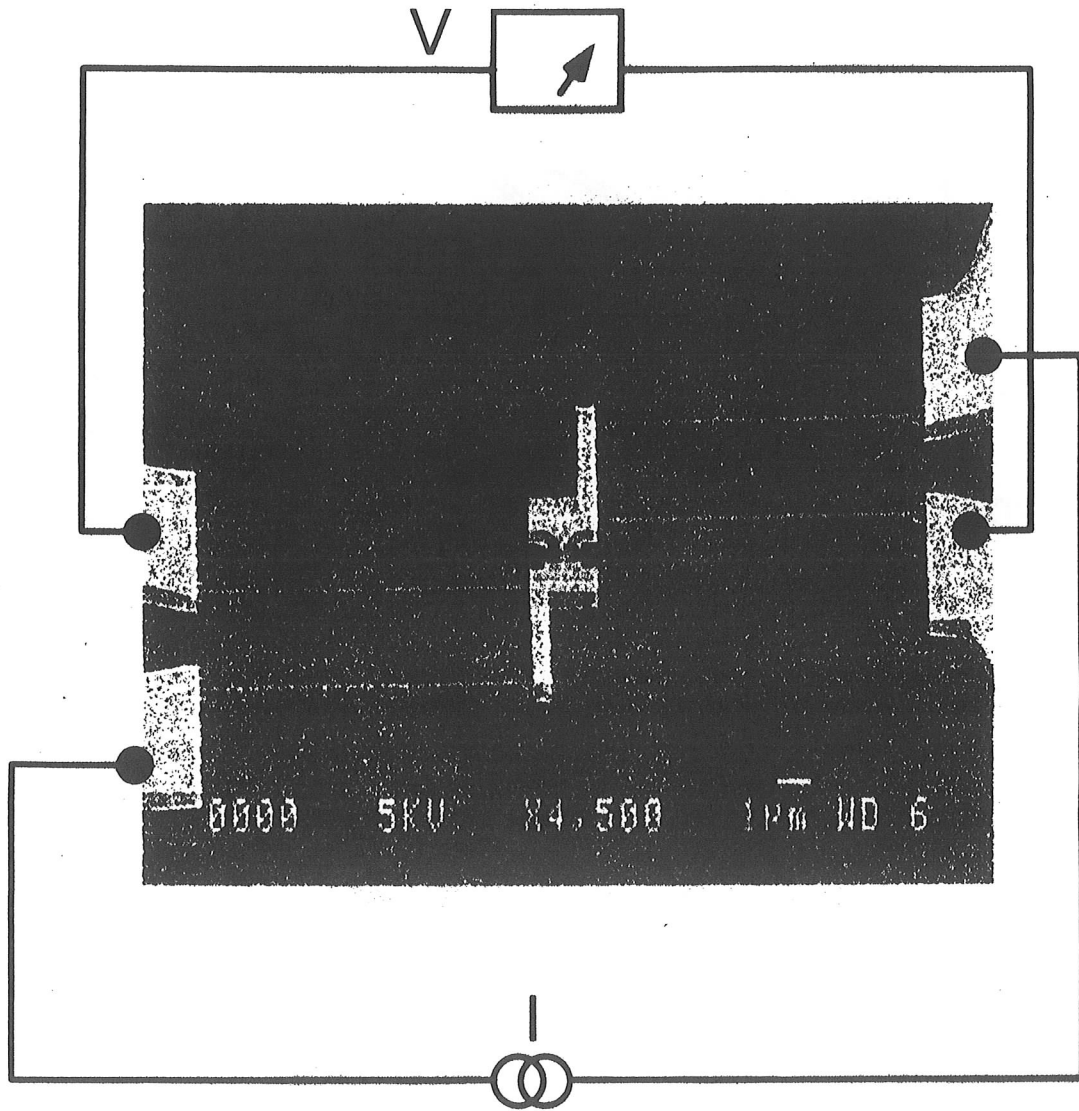
Pekola et coll. Univ. Jyväskylä (F)

à haute température le blocage de coulomb est perturbatif

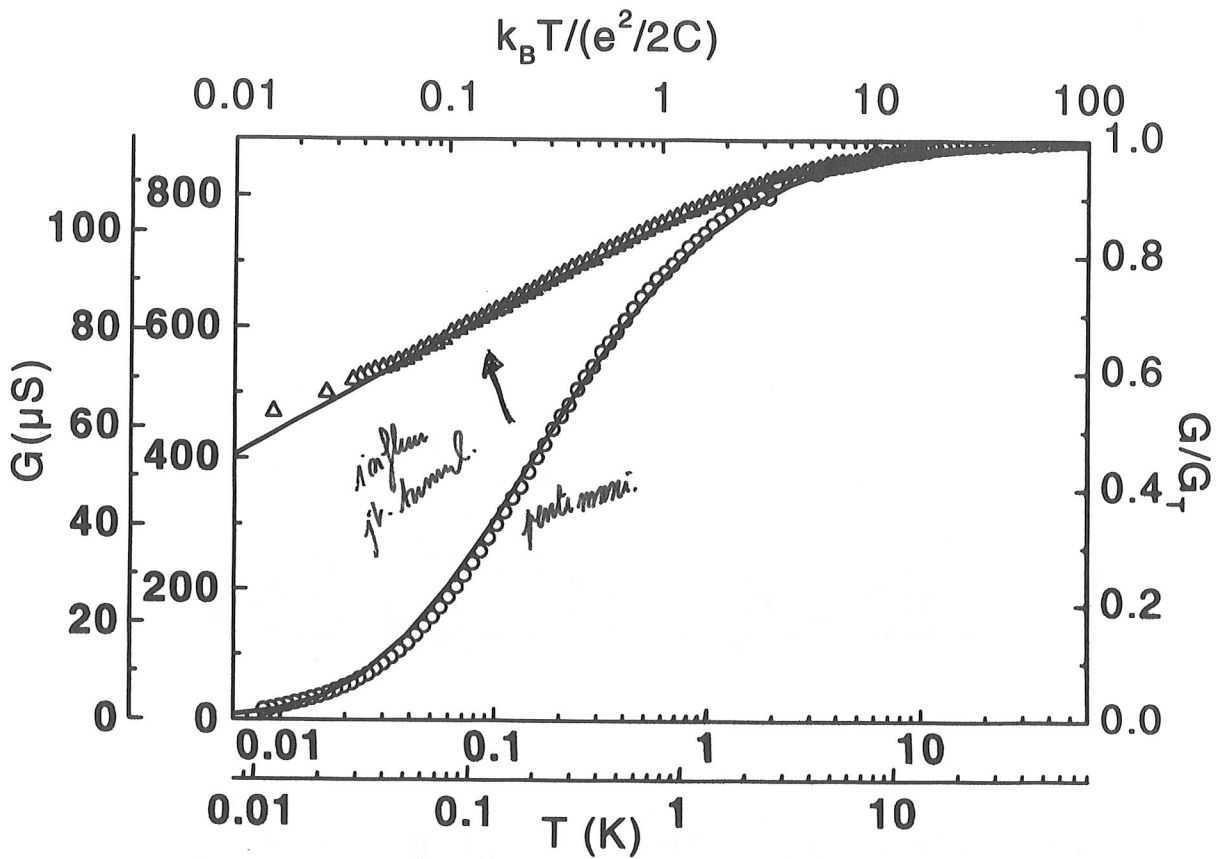


- + Thermomètre primaire (mais: erreur systématique?)
- ++ Auto-calibration en thermomètre secondaire
- ++ Gamme réglable ($\sim 1\text{K} \rightarrow 100\text{K}$)
- + Insensible au champ magnétique
- Mesure de ϵ

Mesure 4 fils de la conductance d'une jonction dans un environnement résistif



mesures



calibration à haute température

compatible pont thermométrique standard

gamme réglable

pas d'effet de champ magnétique

Conclusions

électrométrie: super-performant !

mais:

- nécessite basse T et filtrage
- large BP difficile mais faisable
- problème $1/f$ + *abuseu haute Q* \Rightarrow pas equ. au Squid.

$$10^{-2} \frac{e}{h} F \cdot T$$
$$10^{-4} \frac{e}{h} \text{ mais } \downarrow$$

Thermométrie:

- dépendance en T calculable
- gamme ajustable
- pas d'effet de champ
- mise en œuvre \pm facile
- durabilité?

Bibliographie

NB: cette bibliographie est volontairement restreinte à quelques références qui servent de point d'entrée au sujet traité. Elle ne prétend pas être exhaustive, et ne fait donc pas justice à tous ceux qui ont contribué à la compréhension du fonctionnement du SET.

Effets de charge

Single charge tunneling, H. Grabert and M. Devoret Eds., Plenum (1992).

Bruit dans le SET.

V. Bouchiat, thesis, University of Paris VI (1997).

Wolf-H et al. IEEE-Tr-Inst. Meas. 46, 306 (1997)

RF-SET

R. J. Schoelkopf, et al., Science 280, 1238 (1998).

SET+HEMT

J. Petersson, et al., Phys. Rev. B 53, 13272 (1996) .

E. H. Visscher, et al., Appl. Phys. Lett. 68, 2014 (1996).

SET Supra

A. Zorin et al., Applied-Superconductivity 6, 453 (1998).

exemples d'applications en électrométrie

un détecteur de photons (réalisation)

A. N. Cleland et al, Appl. Phys. Lett. 61, 2820 (1992)

un détecteur de photons (projet)

R. Schoelkopf IEEE-Tr. Applied-Superconductivity.2935 (1999)

détecteur de particule (étude)

V. Bouchiat et al. Hyperfine-Interactions. 109, 345 (1997).

Thermométrie

réseaux:

J.P. Kauppinen et al. Review of Scientific Instruments 69, 4166 (1998).

jonction unique:

P. Joyez et al., Phys. Rev. Lett. 80, 1956 (1998).

100 pV 1 nA :
SQUID NIST 100 nHz