



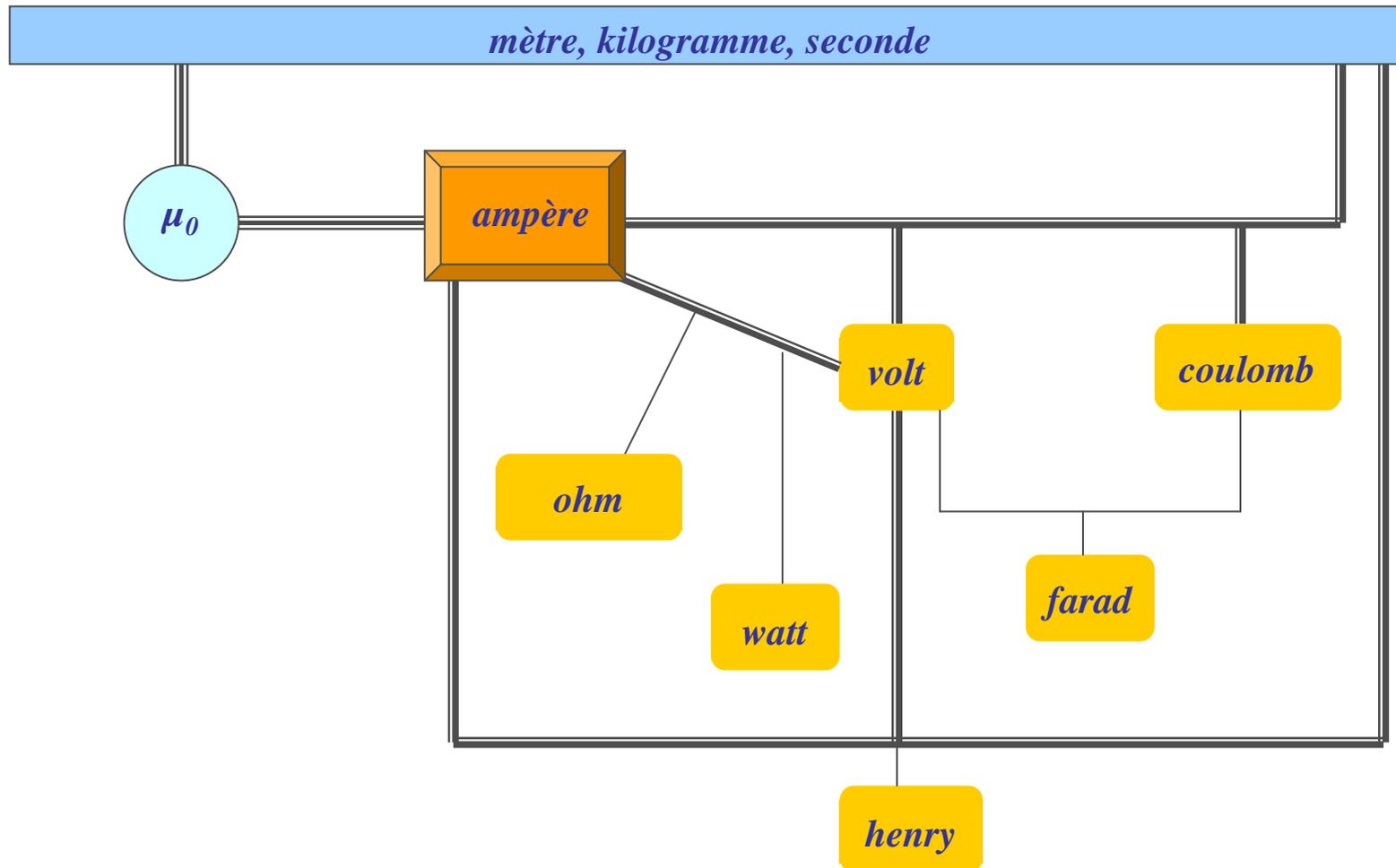
Utilisation du blocage de Coulomb en métrologie électrique fondamentale

*B. Steck, N. Feltin, L. Devoille,
A. Gonzalez Cano, F. Piquemal*

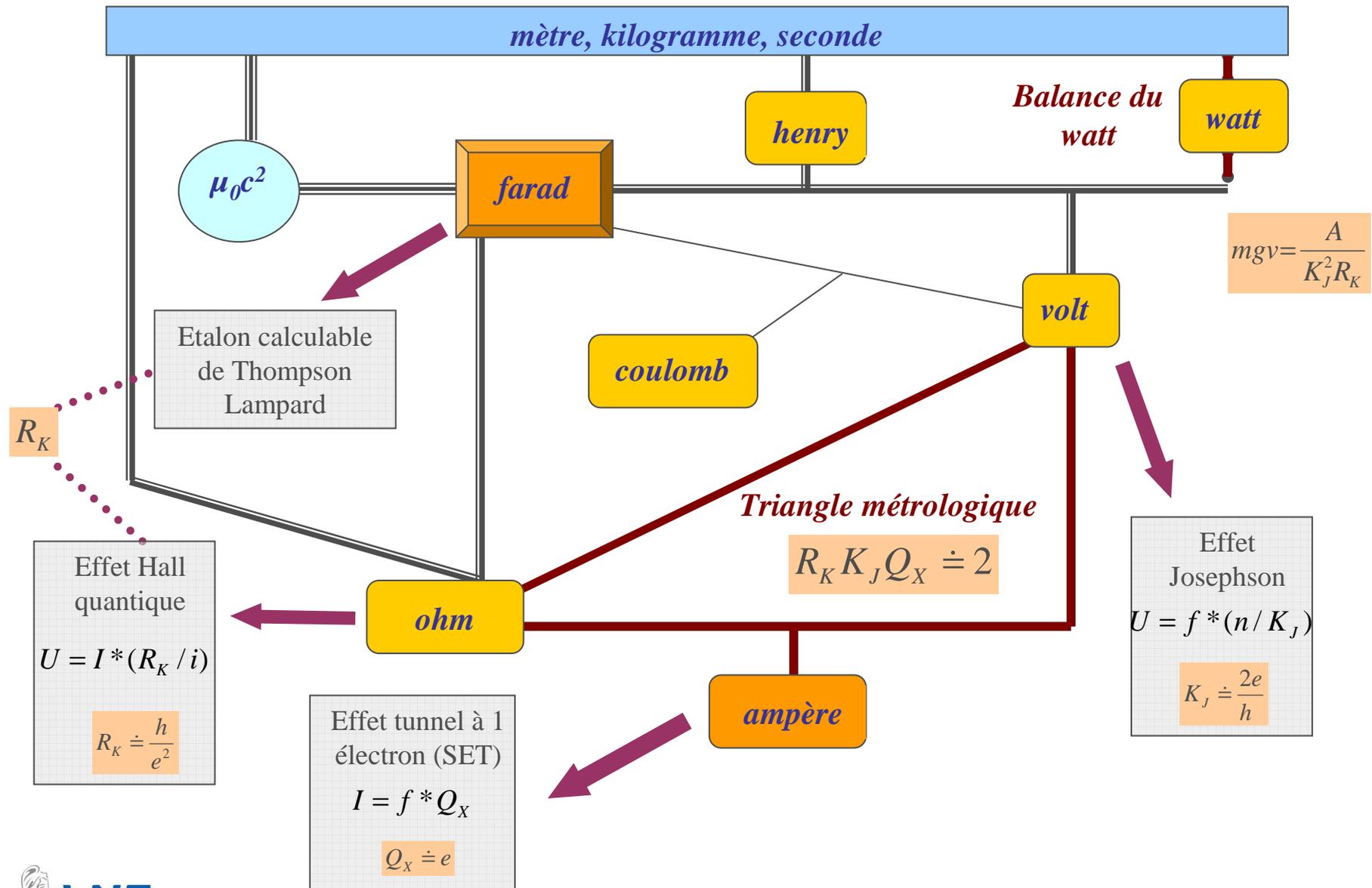
Le système international d'unités SI

Unité	Définition
m	Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299\,792\,458$ de seconde. (17 ^{ème} CGPM, 1983)
kg	Le kg est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme. (3 ^{ème} CGPM, 1901)
s	La seconde est la durée de $9\,192\,631\,770$ périodes de la radiation correspondant à la transition entre les 2 niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133. (13 ^{ème} CGPM, 1967/68)
A	L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placé à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à $2 \cdot 10^{-7}$ newton par mètre de longueur. (9 ^{ème} CGPM, 1948)
K	Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction $1/273.16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau. (10 ^{ème} CGPM, 1954)
mol	<ol style="list-style-type: none">1. La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0.012 kg de carbone 12 ; son symbole est « mol ».2. Lorsqu'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules. (14 ^{ème} CGPM, 1971)
cd	La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ Hz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est $1/683$ watt par stéradian. (16 ^{ème} CGPM, 1979)

Filiation des unités électriques



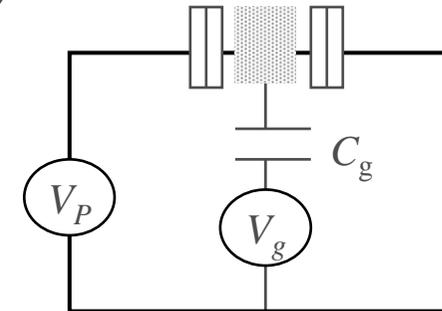
Réalisation des unités électriques



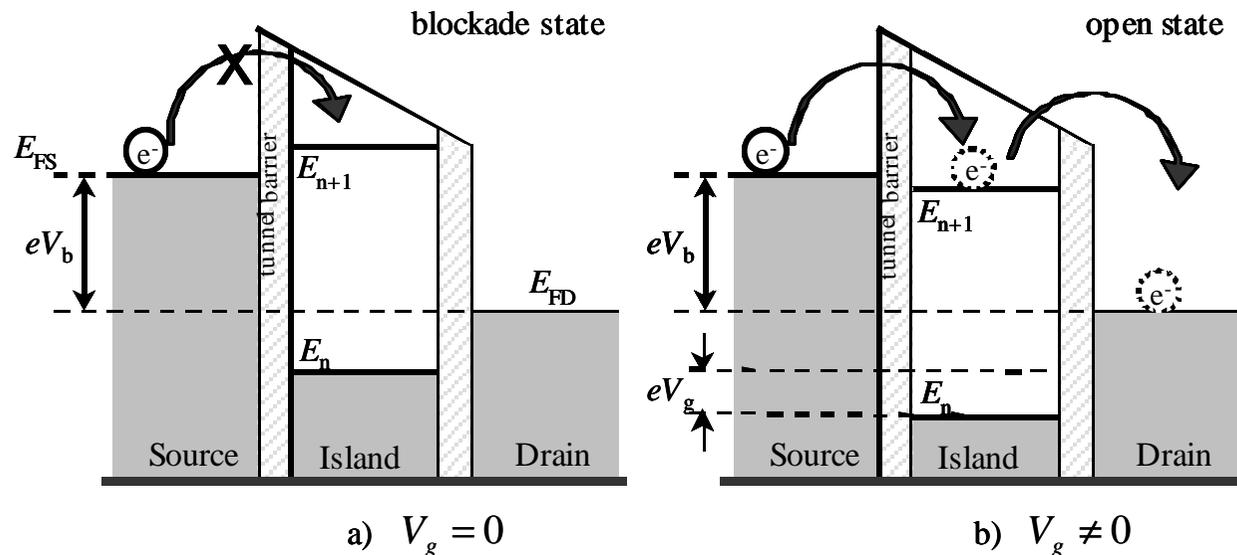
Le blocage de Coulomb

- Apparaît lorsqu'on isole une partie (îlot) d'un circuit électrique à l'aide de jonctions tunnel (R_T , C_J)

Sur l'îlot, l'ajout ou le retrait d'un électron nécessite une variation d'énergie de $e^2/2C_\Sigma$ (énergie de Coulomb : E_C)



- On a blocage si : $E_C \gg k_B T$ (et $V_P < e/C_\Sigma$)
- Possibilité de contrôle du passage des électrons via une électrode de grille



La pompe à électrons

Dispositif comprenant :

N jonctions tunnel (R_T, C_j)

N-1 îlots couplés capacitivement (C_g) à N-1 lignes de polarisation

$n_1 \dots n_N$: degrés de liberté discrets de charge

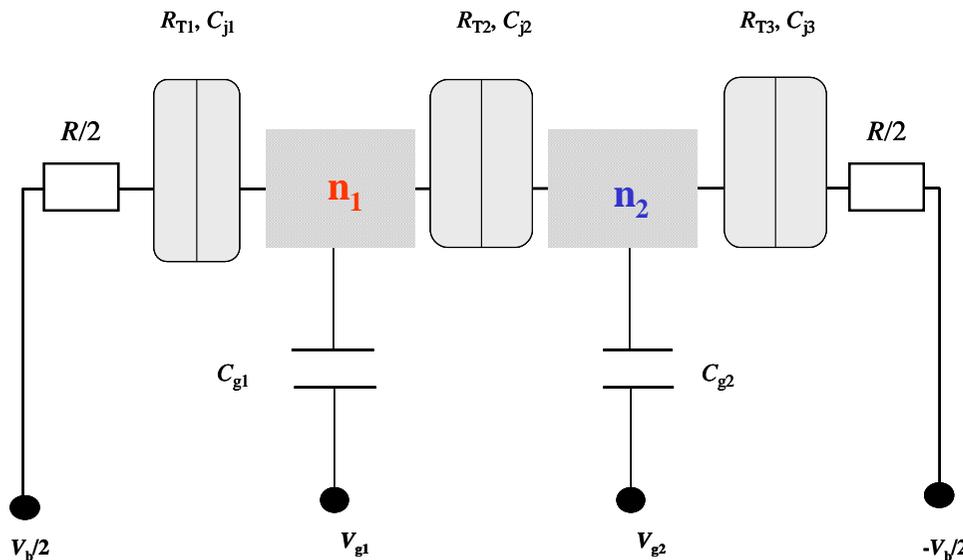
Ordres de grandeur

$$I_{\text{SET}} = 10 \text{ pA} \Leftrightarrow f_{\text{pompage}} = 60 \text{ MHz}$$

Incertitude relative de 10^{-8}

\Rightarrow Incertitude absolue de 0.1 aA

i.e. on peut « rater » **6 électrons/s**



$$\begin{cases} V_{g1} = V_{g1DC} + A \cos(\omega t) \\ V_{g2} = V_{g2DC} + A \cos(\omega t + \varphi) \end{cases}$$

$$I = e.f$$



AnimPompe.exe

La pompe à électrons

■ 3 grandes causes d'erreur :

✓ Effet thermique

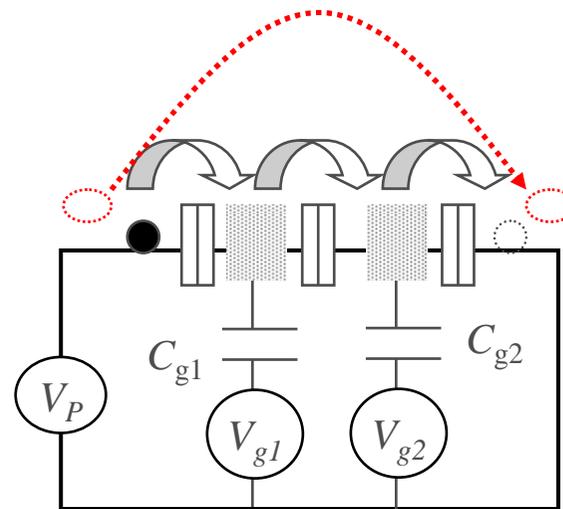
Il s'agit de l'influence de la température. Les calculs théoriques étant faits à 0 K

✓ Effet de fréquence

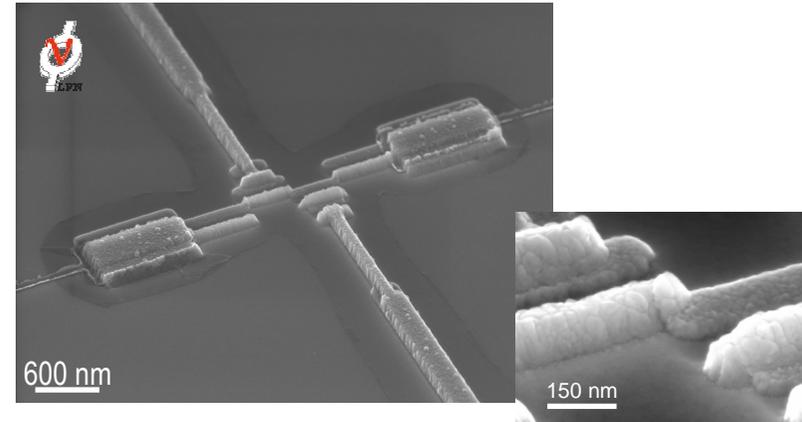
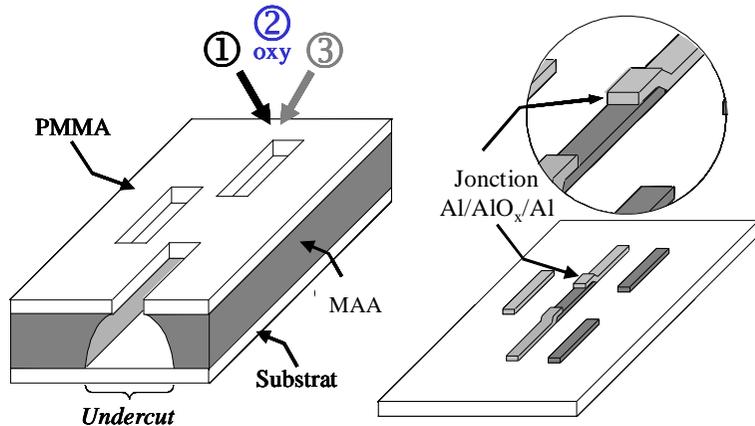
D'une part en augmentant la fréquence, on peut « rater » des électrons, d'autre part, des phénomènes de cotunneling d'ordre supérieur interviennent.

✓ Effet de cotunneling

Il s'agit du passage simultané et quantiquement cohérent de n électrons à travers n jonctions d'un circuit à plusieurs jonctions.



La pompe à électrons : échantillons



(à gauche) Principe de la métallisation sous angles à travers un masque suspendu pour réaliser une jonction tunnel métal/isolant/métal,

(à droite) lignes d'aluminium après deux évaporations à travers le même masque, une étape d'oxydation est appliquée entre les deux métallisations pour obtenir une jonction tunnel à l'endroit où il y a recouvrement.

Image MEB d'une R-pompe à 3 jonctions (LPN)

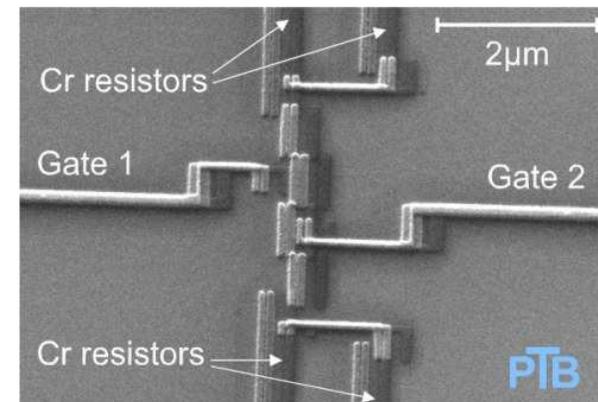


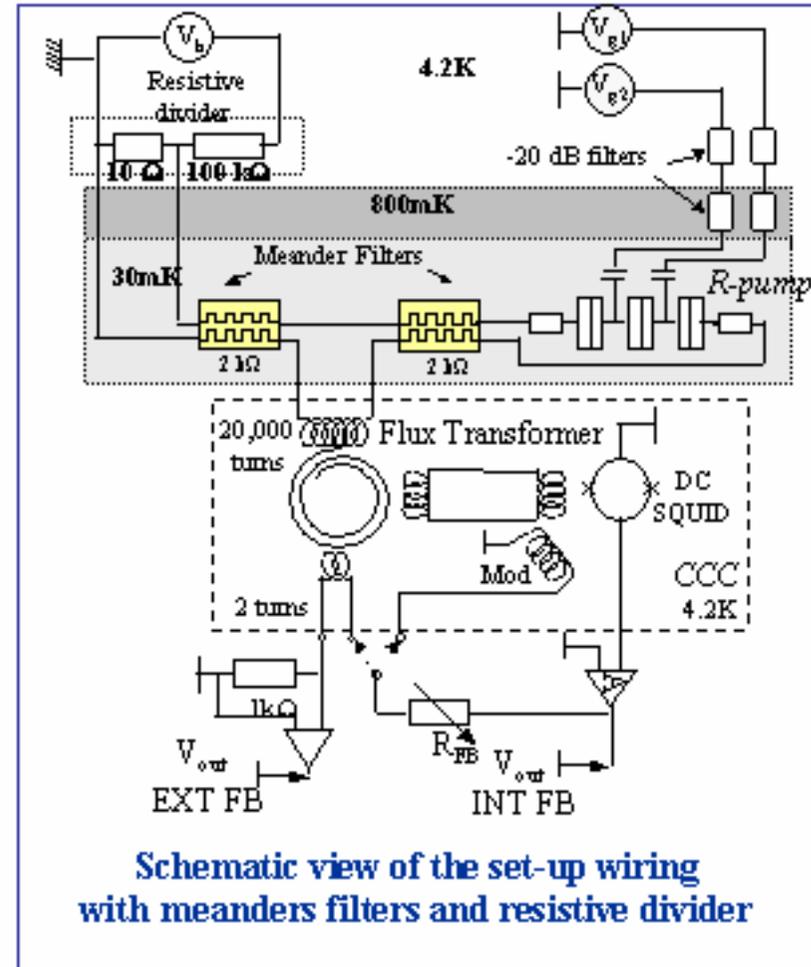
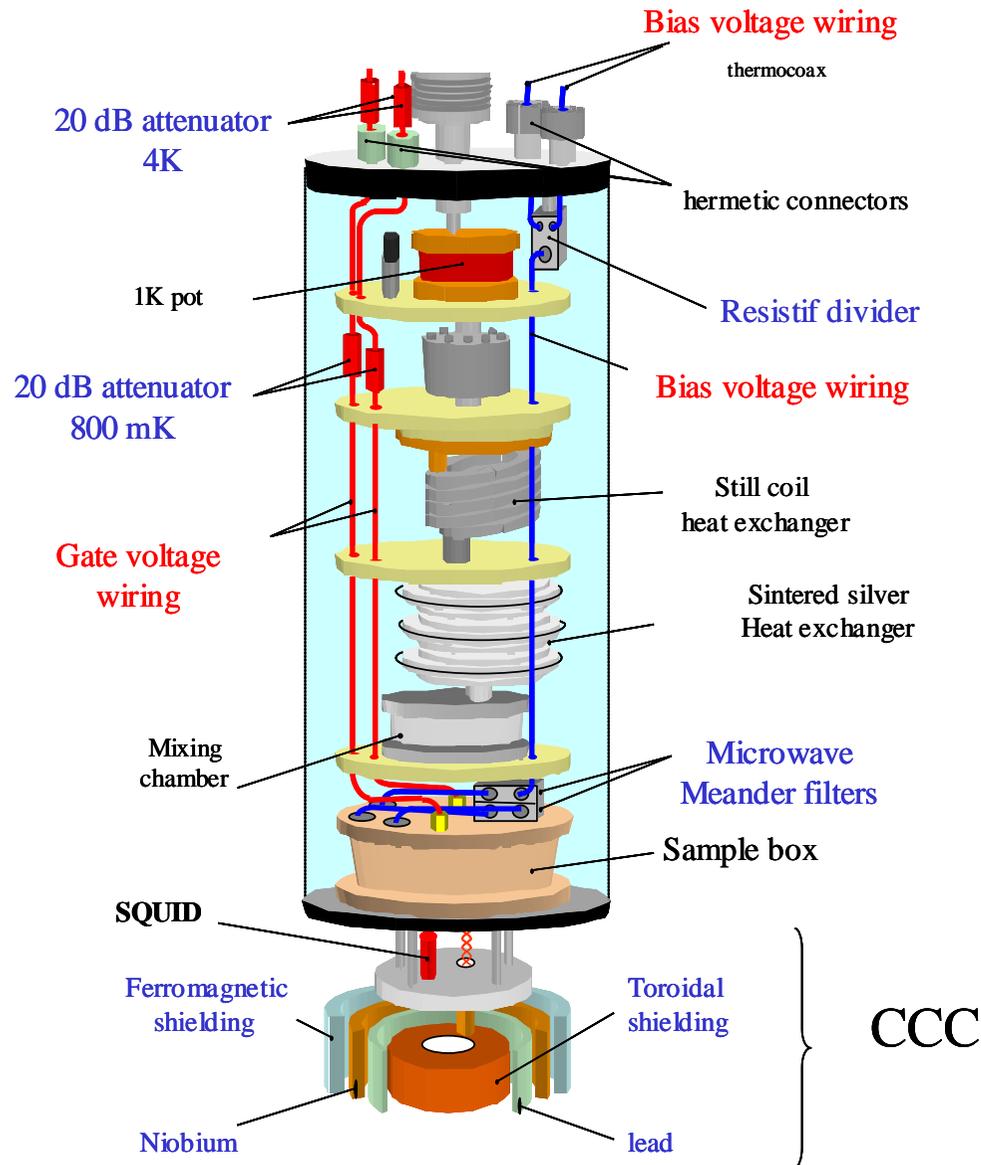
Image MEB d'une R-pompe à 3 jonctions de la PTB (projet COUNT)

Ordres de grandeur

Pour une jonction de $80\text{nm} \times 80\text{nm} \times 2\text{nm}$

$\Rightarrow C_j = 280 \text{ aF}$ et $T_C = 1.1 \text{ K}$

Montage expérimental



Meander filters supplied by CEA (Saclay)

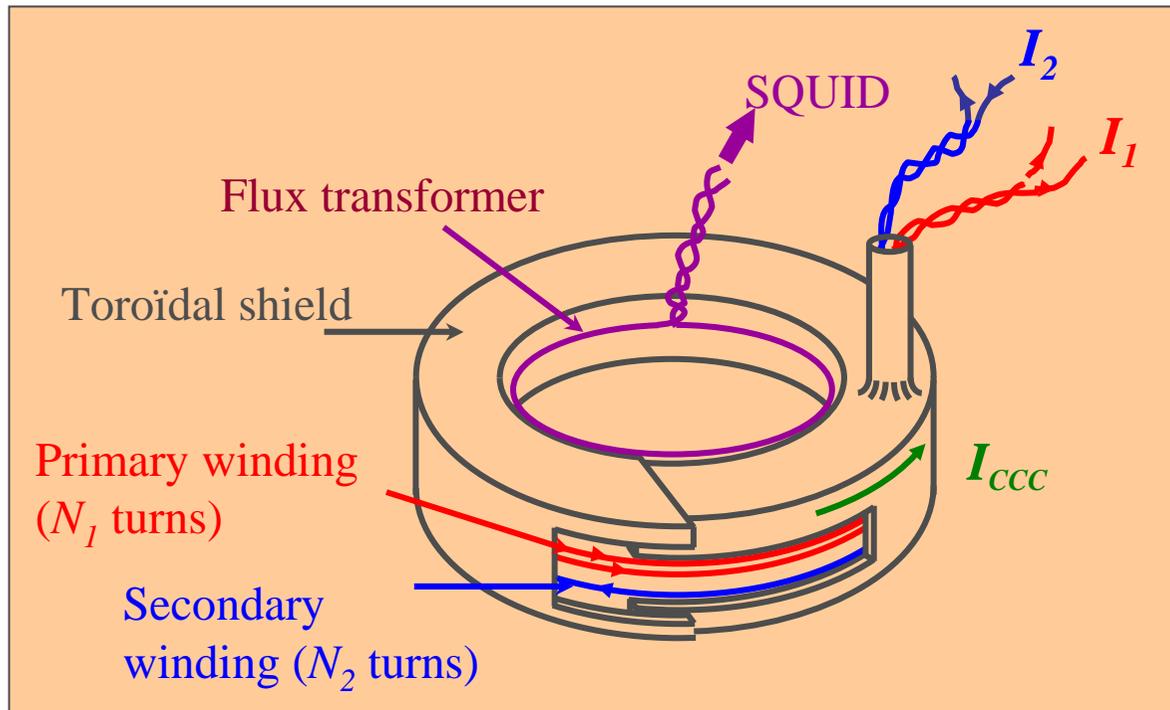
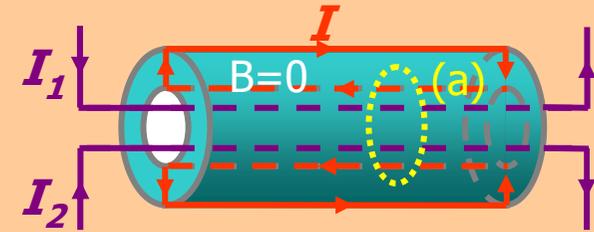
CCC

Le comparateur cryogénique de courants continus

Principes théoriques :

Théorème d'Ampère : $\oint_{(a)} B \cdot dl = \mu_0 \cdot (I_1 + I_2 - I)$

Effet Meissner : $\oint_{(a)} B \cdot dl = 0$



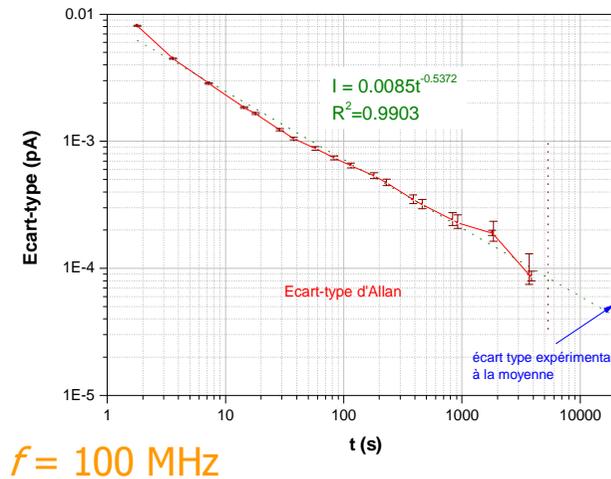
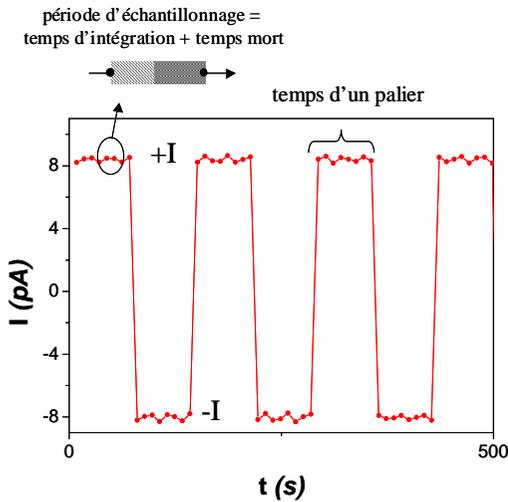
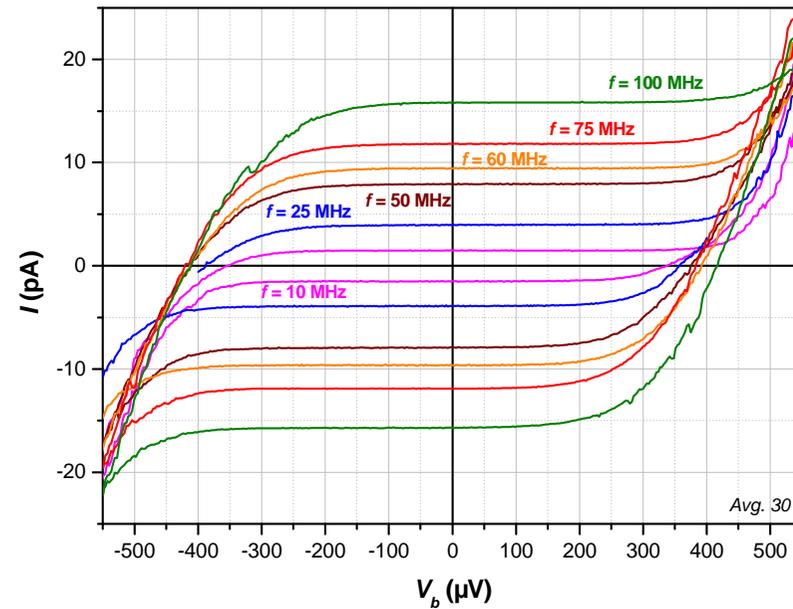
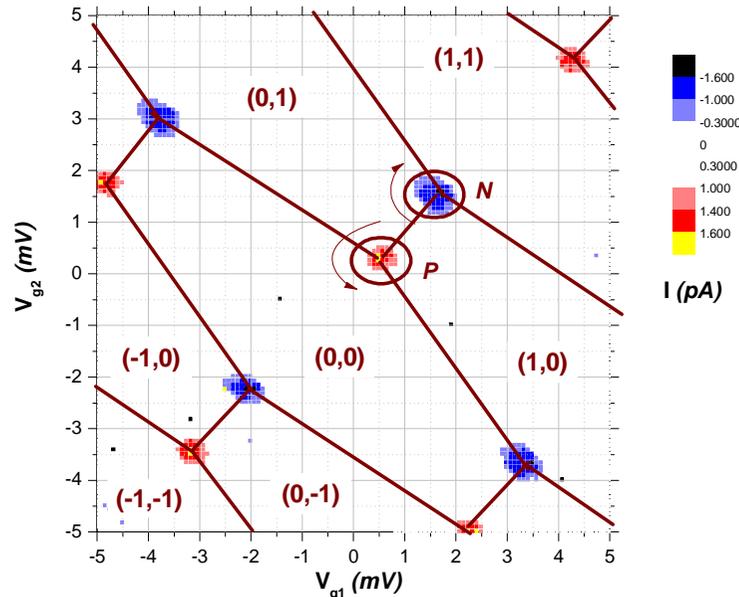
$$I_{ccc} = N_1 I_1 - N_2 I_2$$

I_2 est ajusté afin d'avoir $I_{ccc} = 0$, soit :

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1$$



Résultats (avec une pompe PTB)



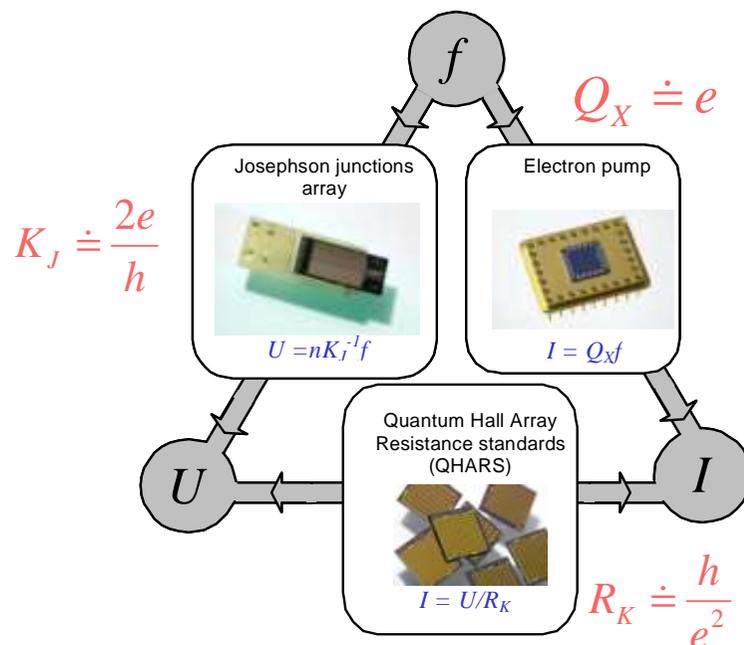
$f = 100 \text{ MHz}$

Résultat exprimé

- Temps de mesure : 6.4 h
- Niveau de bruit blanc : $12.02 \text{ fA/Hz}^{1/2}$
- Incertitude de type A : $6.25 \cdot 10^{-5} \text{ pA}$
- Incertitude relative : $3.9 \cdot 10^{-6}$

Perspectives

- Etude de la valeur de la quantification du courant à différentes fréquences de pompage
- Clôture du triangle métrologique avec une incertitude relative de 10^{-6}



- Etude d'autres dispositifs à blocage de Coulomb permettant de générer des courants plus importants (dispositifs Si)

Bibliographie

■ SI, métrologie

- ✓ *Métrologie fondamentale: unités de base et constantes fondamentales*, Ch. J. Bordé, *C.R. Physique*, **5**, 813 (2004)
- ✓ *Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come*, Mills I.M., et al., *Metrologia*, **42**, 71 (2004)
- ✓ *Fundamental electrical standards and the quantum metrological triangle*, F. Piquemal et al., *C.R. Physique*, **5**, 857 (2004)

■ Blocage de Coulomb et pompe à électrons

- ✓ *Coulomb blockade of single electron tunneling and coherent oscillations in small tunnel junctions*, D.V. Averin and K.K. Likharev, *J. Low Temp. Phys.*, **62**, 345 (1986)
- ✓ *Single charge tunneling*, edited by H. Grabert and M.H. Devoret, *Plenum Press* (1992)
- ✓ *Un nouvel outil pour la métrologie électrique : le dispositif à un électron*, N. Feltin et al., *Revue française de métrologie*, **2005-2**, 11 (2005).

■ 4C

- ✓ *SQUIDs for Standards and Metrology*, J. Gallop and F. Piquemal, in *SQUIDs Handbook vol.2*, Wiley-VCH, ch. 9 (2006)