



**LE BRUIT**  
**DANS LES**  
**COMPOSANTS ELECTRONIQUES**

**Richard HERMEL LAPP**

**Ecole d'électronique IN2P3 : Du détecteur à la numérisation**

**Cargèse Mars 2004**

# Sommaire

- **Introduction**
- **Sources physique du bruit**
- **Influence des éléments réactifs**
- **Représentation du bruit dans les amplificateurs, facteur de bruit**
- **Le bruit dans les composants**
- **Ordres de grandeur**

# introduction

- On traitera uniquement les bruits dus à des **fluctuations d'origine physique** :
  - Bruit thermique : résistances
  - Shot noise (bruit de grenaille) : jonctions
  - Bruit « en  $1/f$  » : défauts
- Ce bruit est un phénomène **aléatoire**, on ne s'intéressera qu'à ses **propriétés statistiques** : valeur moyenne, variance, corrélations.
- On peut représenter le bruit électronique par une puissance, une tension, un courant. La **valeur moyenne** du courant et de la tension est **toujours nulle**.

# Définitions

- **Bruit blanc**

Si on connaît la valeur du bruit à un instant  $t$ , il est **impossible de prévoir** quelle sera sa valeur à  $t + \Delta t$ , aussi petit que soit  $\Delta t$ .

- Conséquence :

**Le spectre en fréquence du bruit blanc s'étend jusqu'à l'infini**

- **Densité spectrale**

C'est le spectre en fréquence du bruit. On parle de densité spectrale car on mesure l'énergie contenue dans une petite bande de fréquence  $\Delta f$ . Elle s'exprime en **W Hz<sup>-1</sup>** pour la puissance, en **V Hz<sup>-1/2</sup>** pour la tension et en **A Hz<sup>-1/2</sup>** pour le courant.

La densité spectrale d'un bruit blanc est constante.

- **Bruit RMS**

C'est **l'intégrale de la densité spectrale** sur la bande passante du circuit étudié

# Bruit thermique

- **Il est dû au mouvement aléatoire des porteurs de charge libres causé par l'agitation thermique. On l'observe uniquement dans les dispositifs résistifs.**
- **Ex : résistance, zone neutre des semiconducteurs,...**

# Bruit dans une résistance : bruit Johnson

Agitation thermique



mouvement aléatoire des porteurs de charge



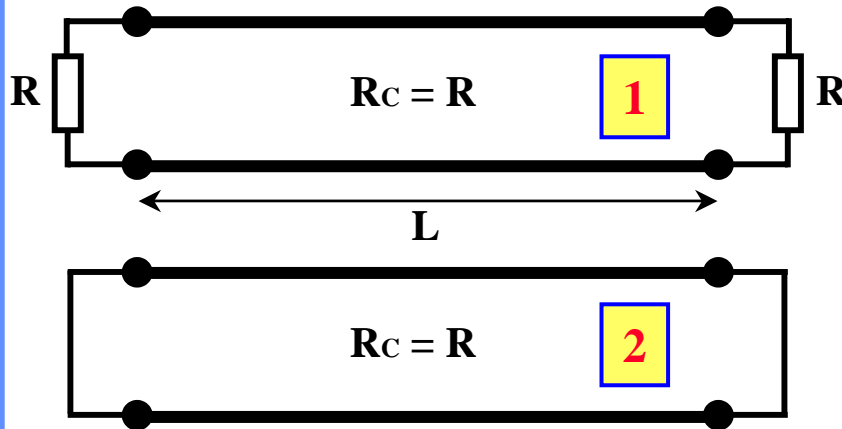
tension et courants aléatoires dans la résistance



Puissance de bruit disponible dans la résistance dans une bande de fréquence  $\Delta f$  :

$$P = kT \Delta f , \quad k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$$

# Bruit dans une résistance : démonstration de Nyquist



## 1<sup>ère</sup> étape :

2 résistances  $R$  sont connectées à une ligne idéale de résistance caractéristique  $R$  et de longueur  $L$ .

Les résistances échangent de l'énergie par l'intermédiaire de la ligne

## 2<sup>ème</sup> étape :

Les résistances sont remplacées instantanément par des court-circuits parfaits.

L'énergie est conservée et se retrouve sous forme d'ondes stationnaires qui se réfléchissent indéfiniment sur les courts-circuits.

Les fréquences propres sont données par :  $L = n \lambda/2 = n c/2f$

La ligne est un oscillateur harmonique, chaque mode porte une énergie  $kT$

Dans une bande de fréquence  $\Delta f$ , il y a  $\Delta n$  modes avec  $\Delta n = (2L/c) \Delta f$  qui transportent une énergie  $\Delta E = (2L/c) kT \Delta f$ , soit  $(L/c) kT \Delta f$  pour une résistance.

L'énergie fournie par une résistance est dissipée dans l'autre au bout de la ligne au bout du temps  $\tau = L/c$ , d'où la puissance disponible dans une résistance :

$$P = \frac{\Delta E}{\tau} = kT \Delta f$$

C'est un bruit blanc

# Shot noise

- **On l'observe dans les dispositifs parcourus par un courant de valeur moyenne non nulle et lorsque ce courant est produit par le passage de porteurs de charge à des instants aléatoires.**
- **Ex : jonction PN, faisceau lumineux,...**



# Bruit dans une jonction PN

Le passage du courant à travers la barrière de potentiel d'une jonction PN est dû aux électrons et aux trous qui traversent la zone de charge d'espace.

Les porteurs sont injectés à des **instants aléatoires**, la traversée est très rapide, mais le **nombre moyen** de porteurs qui traversent par unité de temps est **constant**, c'est le courant continu. On peut représenter le courant par une **succession d'impulsions arrivant au hasard**.

Ce type de phénomène suit une **loi de probabilité de Poisson**. La variance est égale à la valeur moyenne. Les **fluctuations de puissance** sont proportionnelles au **courant continu** :

$$\overline{i^2} = 2eI_{DC}\Delta f, \quad e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

C'est aussi un bruit blanc

# Bruit en $1 / f$

- **Il est dû à des défauts :**
  - **Impuretés**
  - **Défauts dans un réseau cristallin**
  - **Interface isolant / semi-conducteur**
- **Le bruit en  $1/f$  diminue lorsqu'on améliore la qualité de fabrication des composants**

# Bruit en $1/f$ : expressions

- A chaque défaut est associée une **constante de temps caractéristique** : c'est l'inverse de la fréquence à laquelle un porteur est capturé puis relâché par ce piège.
- **Hypothèse** :
  - Les **constantes de temps** des pièges sont **uniformément réparties**
- **Conséquence** :

La **densité spectrale de puissance** du bruit vaut :

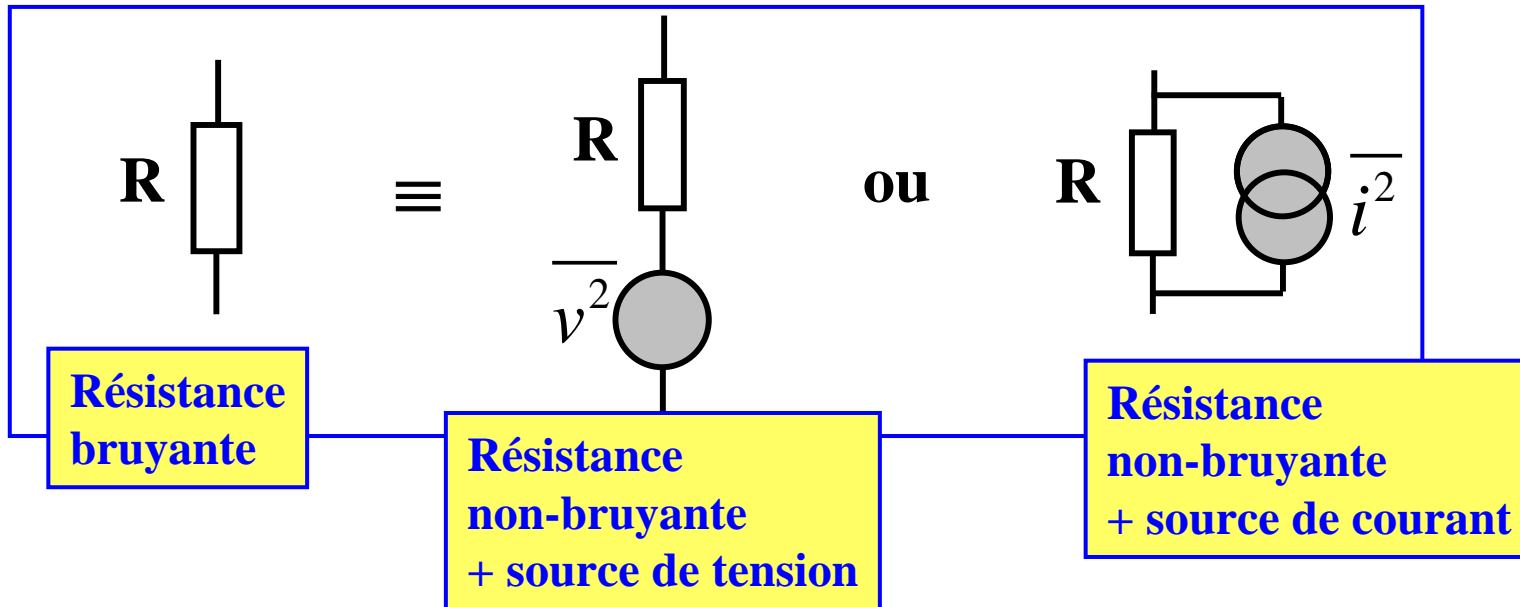
$$S_P(f) = \frac{K}{f}$$

Dans une bande de fréquences comprise entre  $f_1$  et  $f_2$ , la valeur RMS est :

$$\overline{v^2} = \int_{f_1}^{f_2} \frac{K}{f} df = K \operatorname{Log} \left( \frac{f_2}{f_1} \right)$$

**K dépend très fortement de la technologie et est généralement déterminée expérimentalement**

# Représentation du bruit par des sources



La **puissance disponible** dans une résistance est la **puissance maximale** qu'elle peut fournir à une charge. Pour cela, il faut que la charge soit **adaptée**, c'est à dire **égale à la résistance de source**.  
D'où les valeurs des sources :

$$\overline{v^2} = 4RkT \Delta f$$

$$\overline{i^2} = \frac{4}{R} kT \Delta f$$

# Composition des sources, corrélation

- **Corrélation des sources de bruit**
  - Pas de corrélation si les sources sont indépendantes  
Ex : 2 résistances différentes
  - Corrélation si origine physique commune  
Ex : Courants de collecteur et d'émetteur d'un transistor bipolaire
- **Composition des sources**

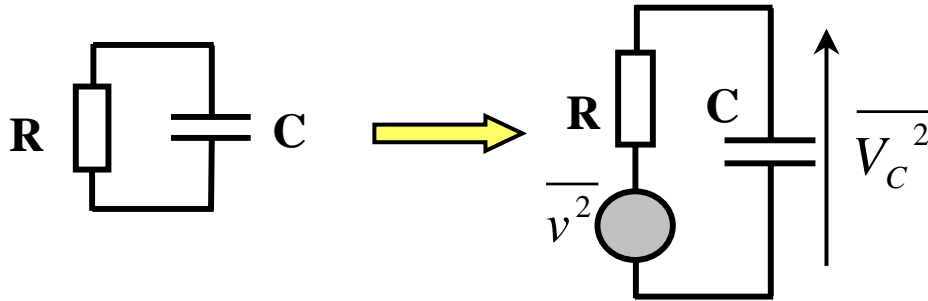
$$\overline{(\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2)^2} = \overline{\mathbf{v}_1^2} + \overline{\mathbf{v}_2^2} + 2\overline{\mathbf{v}_1\mathbf{v}_2} = \overline{\mathbf{v}_1^2} + \overline{\mathbf{v}_2^2} + \overline{2\mathbf{v}_1\mathbf{v}_2}$$

$2\overline{\mathbf{v}_1\mathbf{v}_2} = 0$  si les sources ne sont pas corrélées

**Seules les densités spectrales et les valeurs RMS  
ont un sens pour le bruit**

# Influence des éléments réactifs

Le courant qui traverse un condensateur ne provient pas d'un mouvement de porteurs de charges, il n'y a pas de bruit thermique généré dans un condensateur. Mais la densité spectrale est modifiée par les éléments réactifs :

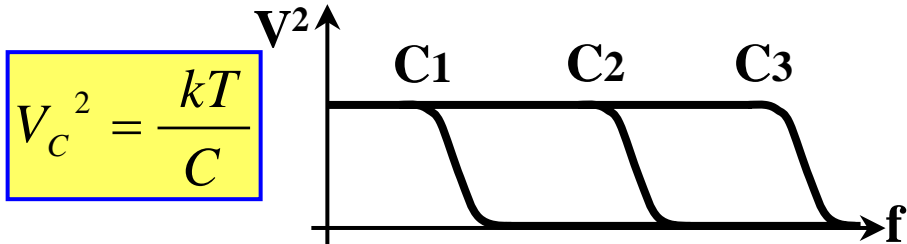


$$dV_C^2 = \frac{4R kT df}{1 + R^2 C^2 \omega^2}$$

En intégrant sur tout le spectre :

$$V_C^2 = \frac{2R kT}{\pi} \int_0^\infty \frac{1}{1 + R^2 C^2 \omega^2} d\omega = \frac{2 kT}{\pi C} \int_0^\infty \frac{1}{1 + u^2} du = \frac{kT}{C}$$

Bien que le bruit soit généré dans la résistance, sa valeur RMS ne dépend pas de la valeur de la résistance mais seulement de celle de la capacité.

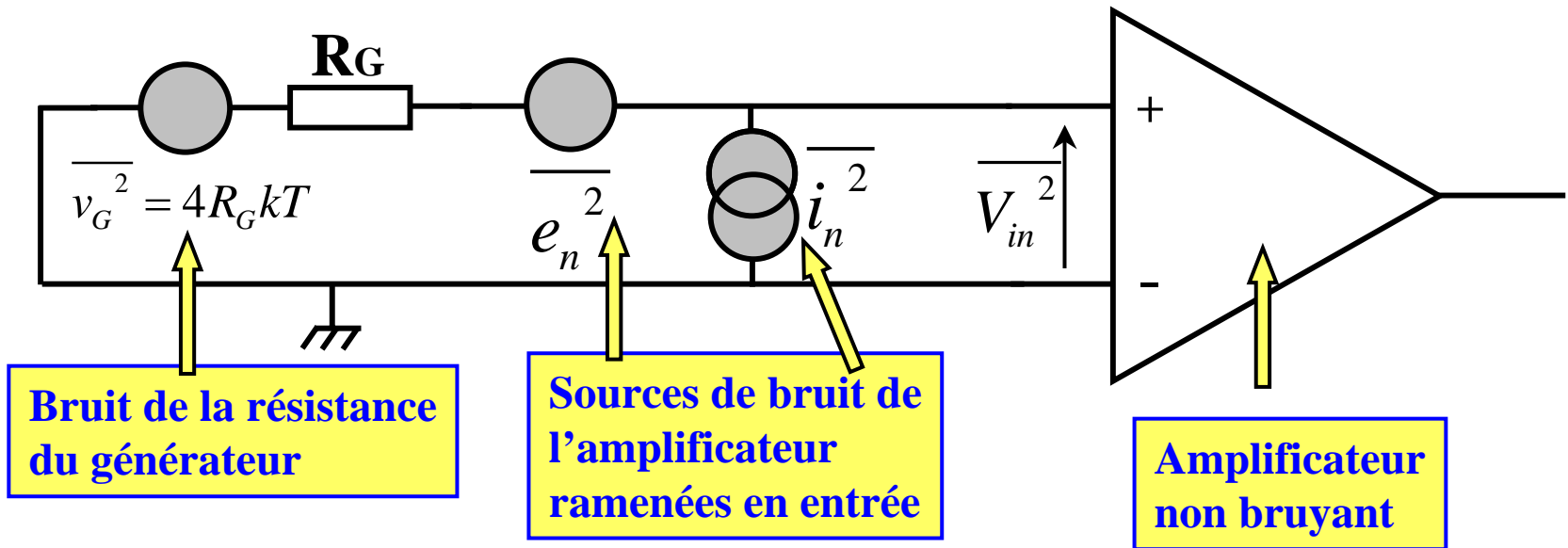


$$C1 > C2 > C3$$

# Bruit dans les amplificateurs

- **Bruit ramené en entrée**
- **Bruit en courant (parallèle)**
- **Bruit en tension (série)**
- **Impédance de source**

# Bruit ramené en entrée



Les sources  $\overline{e_n^2}$  et  $\overline{i_n^2}$  représentent les sources de **bruit internes de l'amplificateur**. Le bruit peut alors être traité comme du signal à condition de considérer les valeurs RMS et non les valeurs efficaces :

$$\overline{V_{in}^2} = 4R_G kT + \overline{e_n^2} + R_G^2 \overline{i_n^2}$$

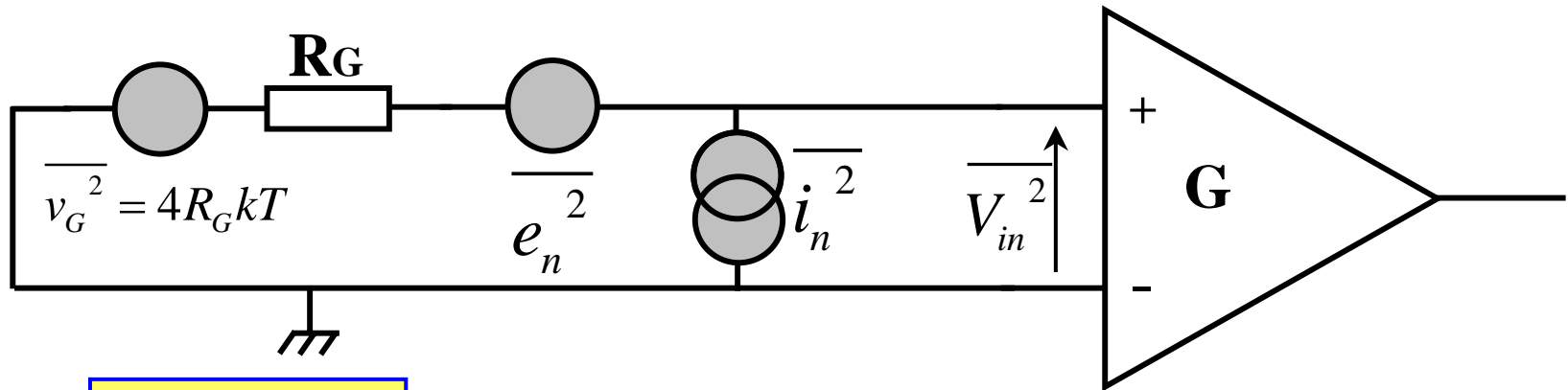


# Pourquoi 2 sources ?

- $e_n^2$  représente le **bruit en tension**, on l'appelle aussi **bruit série**.
- $i_n^2$  représente le **bruit en courant**, on l'appelle aussi **bruit parallèle**.
- Si on voulait représenter tout le bruit par une seule source ramenée en entrée, elle vaudrait :  $\overline{V_{in\ eq}^2} = \overline{e_n^2} + R_G^2 \overline{i_n^2}$ , qui dépend de la résistance du générateur. On évite cette difficulté en séparant en 2 sources.

# Facteur de bruit

Le facteur de bruit est une mesure de la dégradation du rapport signal à bruit dans un système.



$$F = \frac{\left(\frac{S}{B}\right)_e}{\left(\frac{S}{B}\right)_s}$$

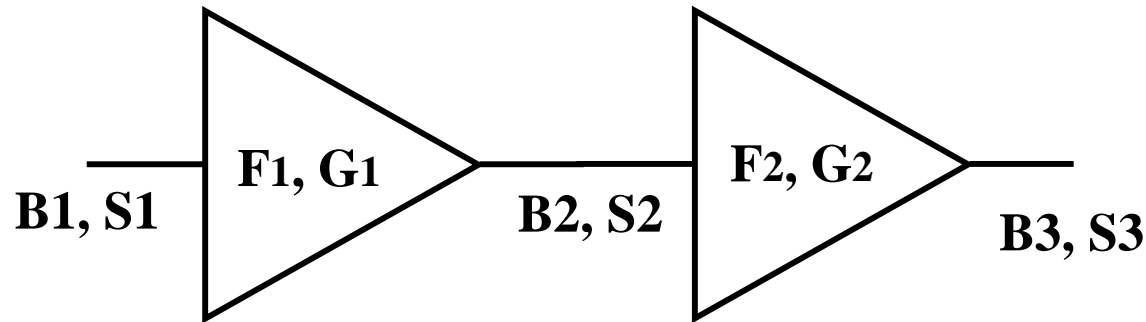
$$\left(\frac{S}{B}\right)_e = \frac{S_e}{4kTR_G}, \quad \left(\frac{S}{B}\right)_s = \frac{GS_e}{G(4kTR_G + e_n^2 + R_G^2 i_n^2)}$$

$$F = 1 + \frac{e_n^2 + R_G^2 i_n^2}{4kTR_G}$$

Le bruit ramené en entrée dû à l'amplificateur seul vaut :

$$(F - 1)4kTR_G = (F - 1)B_G$$

# Facteur de bruit : amplificateurs en cascade



$B_1 = B_G = kT$  : densité spectrale de puissance de bruit de la résistance du générateur

$B_2 = (B_G + (F_1 - 1) B_G)G_1 = F_1 G_1 B_G$

$B_3 = (B_2 + (F_2 - 1) B_G)G_2 = (F_1 G_1 B_G + (F_2 - 1) B_G)G_2 = (F_1 G_1 + (F_2 - 1)) G_2 B_G$

$$F = \frac{\left(\frac{S}{B}\right)_1}{\left(\frac{S}{B}\right)_3} = \frac{S_1 \left[ F_1 G_1 + (F_2 - 1) \right] G_2 B_G}{B_G G_1 G_2 S_1} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1}$$

**Si le 1<sup>er</sup> étage a un grand gain et un bruit faible, le 2<sup>ème</sup> étage ne contribue pas de façon significative au bruit total**

# Facteur de bruit : atténuateurs



$$B_1 = B_G = kT$$

$B_2 = B_1$  : un atténuateur est passif et n'a pas de sources internes de bruit

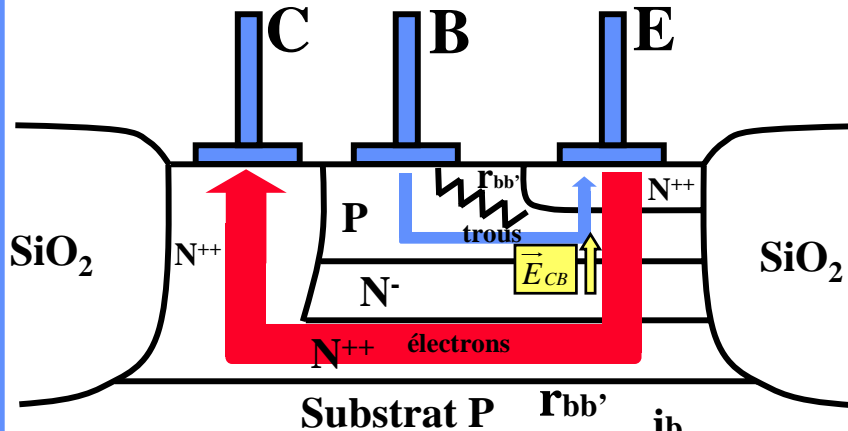
$$S_2 = S_1 / A$$

$$F_{att} = \frac{\left(\frac{S}{B}\right)_1}{\left(\frac{S}{B}\right)_2} = \frac{S_1}{B_G} \frac{B_G}{\frac{S_1}{A}} = A$$

Le facteur de bruit d'un atténuateur est égal à son atténuation

Le facteur de bruit s'exprime souvent en décibels :  $F_{dB} = 10 \log_{10} F$

# Bruit dans les transistors bipolaires

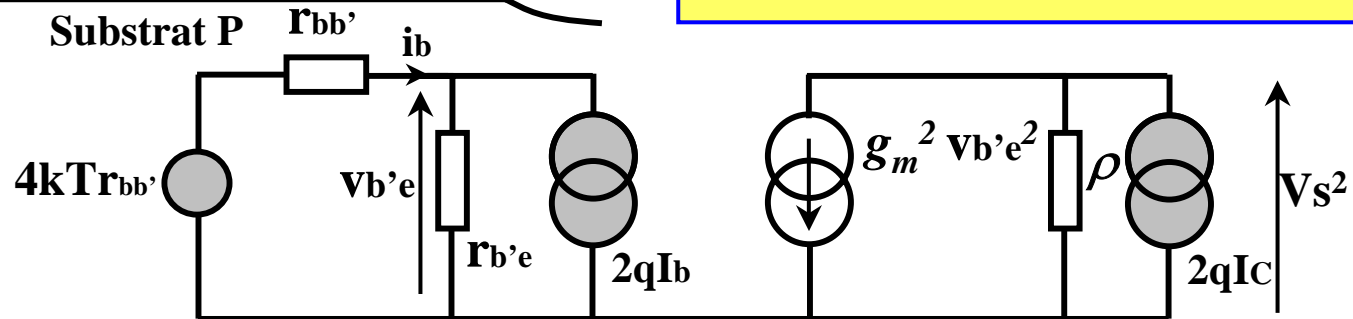


**3 sources de bruit principales dans le transistor bipolaire :**

Le bruit thermique de la résistance d'accès à la base :  $r_{bb'}$

Le shot noise du courant de base

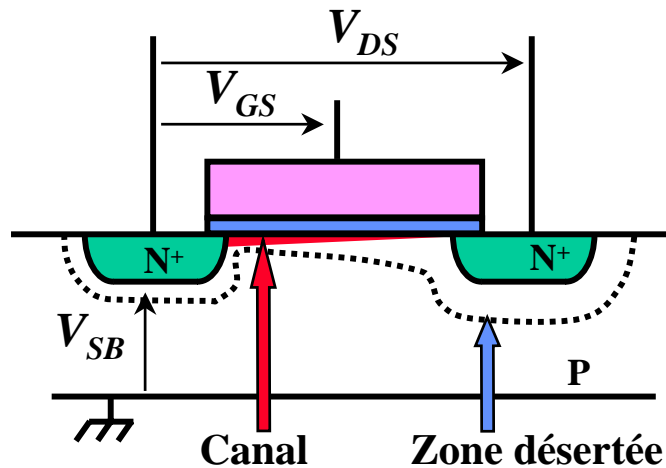
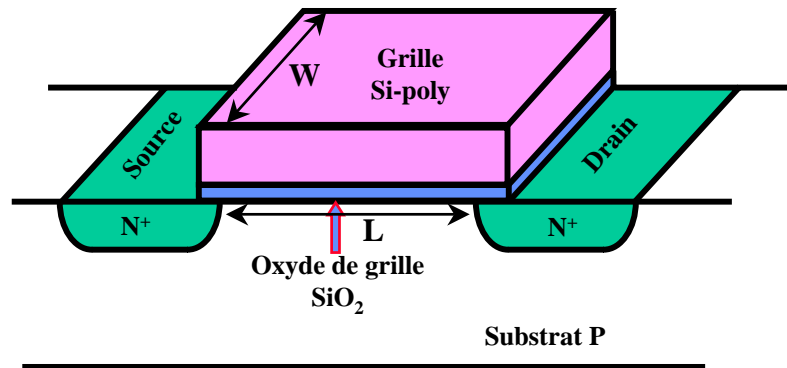
Le shot noise du courant collecteur



Les résistances  $r_{b'e}$  et  $\rho$  ne sont pas bruyantes : ce sont des résistances dynamiques

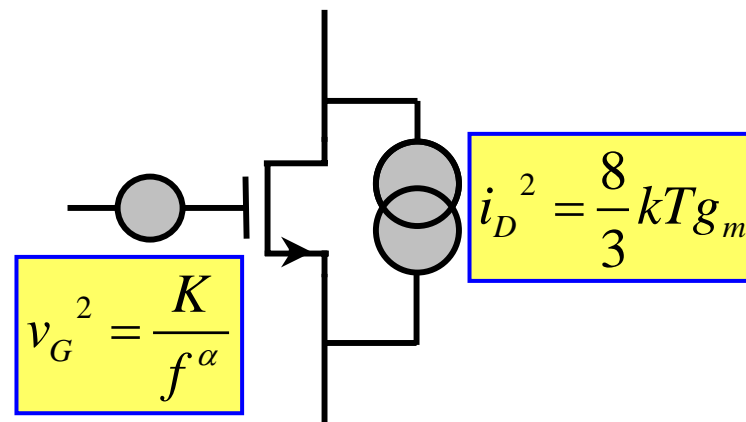
$$V_s^2 = \left\{ 2qI_C + \left[ 4kTr_{bb'} \left( \frac{r_{b'e}}{r_{bb'} + r_{b'e}} \right)^2 + 2qI_B (r_{bb'} // r_{b'e})^2 \right] g_m^2 \right\} \rho^2$$

# Bruit dans les transistors MOS



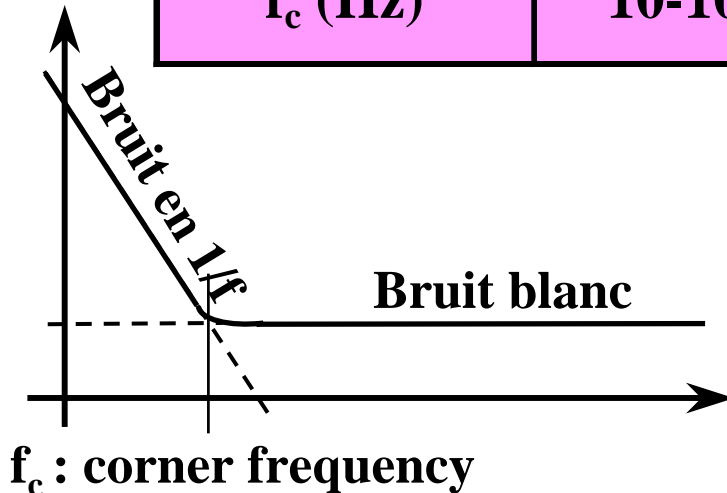
**2 sources principales de bruit dans un transistor MOS :**

- Le canal d'un transistor MOS se comporte comme une résistance. Il génère donc du bruit thermique. On représente ce bruit par un courant entre drain et source
- Le bruit en 1/f : on le représente par une source de tension en série avec la grille



# Ordres de grandeur

Technologie	Bipolaire	JFET	NMOS	PMOS
$e_n$ (nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ )	0.5	0.3	5**	8**
$i_n$ (pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ )	0.5 - 5	0.005	0	0
$f_c$ (Hz)	10-10k	1k	40k**	6k**



Valeurs typiques dépendant  
des polarisations  
\*\* valeurs mesurées sur la  
Technologie AMS BiCMOS 0.8 $\mu$