

# LE BRUIT DANS LES COMPOSANTS ELECTRONIQUES

Richard HERMEL LAPP

Ecole d'électronique analogique IN2P3 : La Londe les Maures Septembre 2008

# Sommaire

- Introduction
- Sources physiques du bruit
- Influence des éléments réactifs
- Représentation du bruit dans les circuits
- Facteur de bruit
- La modélisation du bruit dans les composants
- Mesures du bruit
- Simulations



# introduction

- On traitera uniquement les bruits électroniques dus à des **fluctuations d'origine physique** :
  - Bruit thermique : **éléments dissipatifs : résistances**
  - Shot noise (**bruit de grenaille**) : **jonctions**
  - Bruit « en  $1/f$  » (**flicker noise**) : **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  $\Delta t$ .  
*(La fonction d'autocorrélation est un dirac)*
  - Conséquence :  
**Le spectre en fréquence du bruit blanc s'étend jusqu'à l'infini**
- **Bruit gaussien**
  - La répartition des amplitudes instantanées suit une loi de probabilité normale centrée (gaussienne)
- **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  **$W \text{ Hz}^{-1}$**  pour la puissance, en  **$V \text{ Hz}^{-1/2}$**  pour la tension et en  **$A \text{ Hz}^{-1/2}$**  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



# Sommaire

- Introduction
- Sources physiques du bruit
  - Bruit thermique
  - Shot noise
  - Bruit en  $1/f$
- Influence des éléments réactifs
- Représentation du bruit dans les circuits
- Facteur de bruit
- La modélisation du bruit dans les composants
- Mesures du bruit
- Simulations

# 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 (*rbb' des bipolaires*),...

# Bruit dans une résistance : bruit Johnson

Agitation thermique



Mouvement aléatoire des porteurs de charge



Tension et courants aléatoires dans la résistance



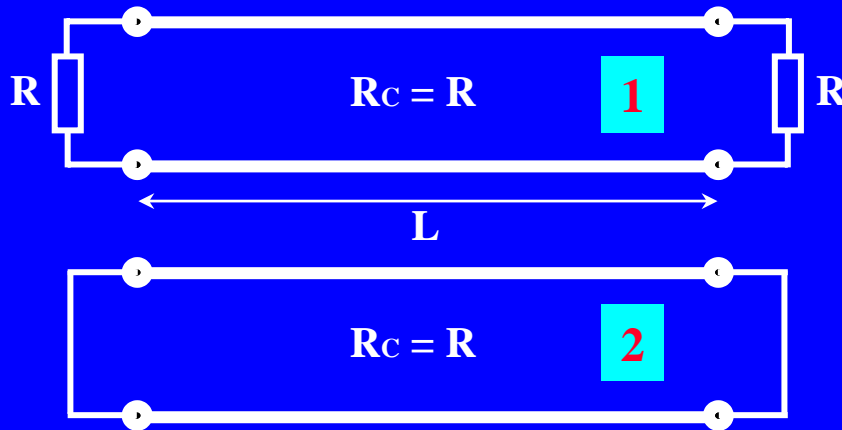
Puissance de bruit disponible dans la résistance  
dans une bande de fréquence  $\Delta f$  :

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

**Attention ! Cette « puissance » ne peut pas être utilisée comme générateur dans un système à l'équilibre thermique !**



# 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**

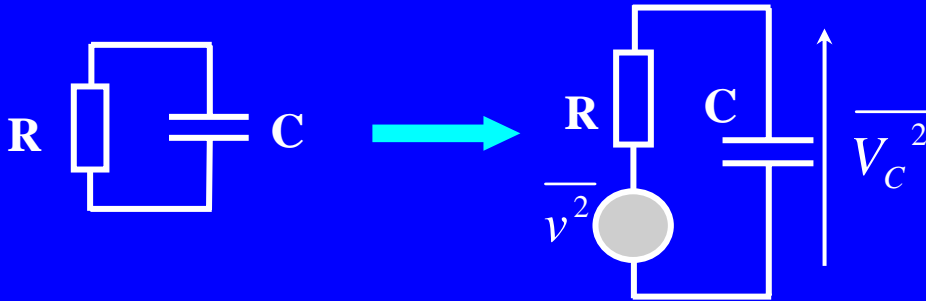
# Sommaire

- Introduction
- Sources physiques du bruit
- **Influence des éléments réactifs**
- Représentation du bruit dans les circuits
- Facteur de bruit
- La modélisation du bruit dans les composants
- Mesures du bruit
- Conclusions



# 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 ni de shot noise** généré dans un condensateur. Mais la **densité spectrale est modifiée** par les éléments réactifs :

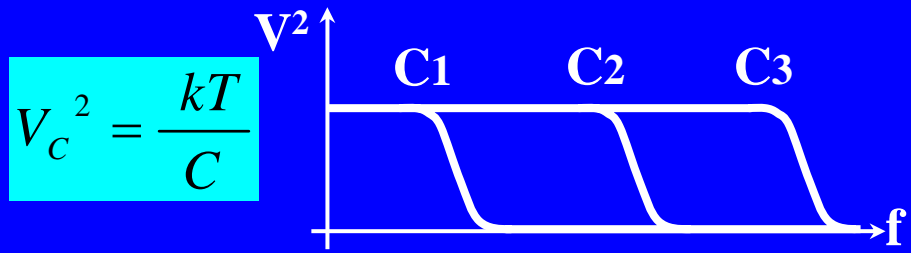


$$dV_C^2 = \frac{4R kT df}{1 + R^2 C^2 \omega^2}$$

En intégrant sur tout le spectre :

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

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.



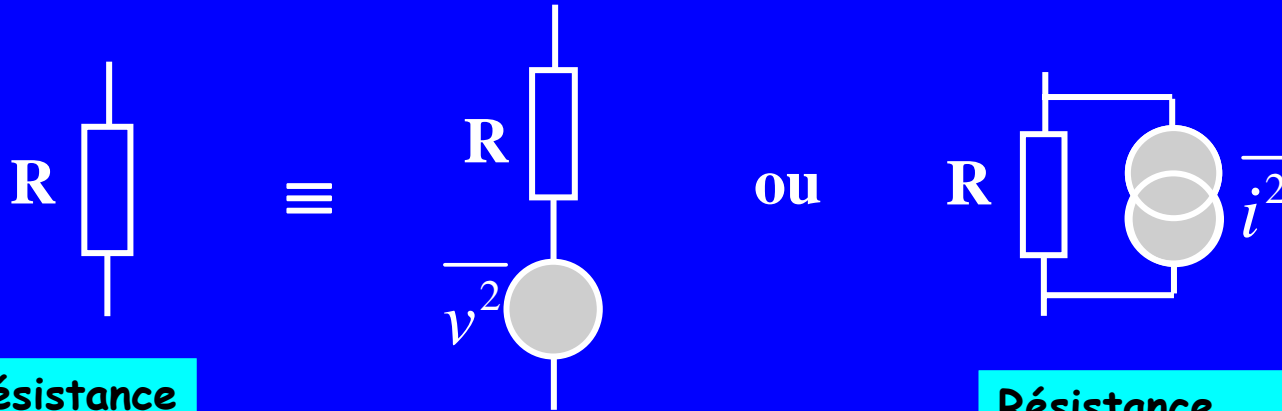
$$V_C^2 = \frac{kT}{C}$$

$$C1 > C2 > C3$$

# Sommaire

- Introduction
- Sources physiques du bruit
- Influence des éléments réactifs
- **Représentation du bruit dans les circuits**
  - Schémas équivalents
  - Composition des sources, corrélations
  - Bruit ramené en entrée
  - Bruit en courant (parallèle), bruit en tension (série)
  - Ordres de grandeur
- Facteur de bruit
- La modélisation du bruit dans les composants
- Mesures du bruit
- Simulations

# Représentation du bruit par des sources



Résistance  
bruyante

Résistance  
non-bruyante  
+ source de tension

Résistance  
non-bruyante  
+ source de courant

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, courants de base et de collecteur dans un transistor bipolaire
  - **Corrélation** si origine physique commune  
Ex : Courants de collecteur et d'émetteur d'un transistor bipolaire
- **Composition des sources**

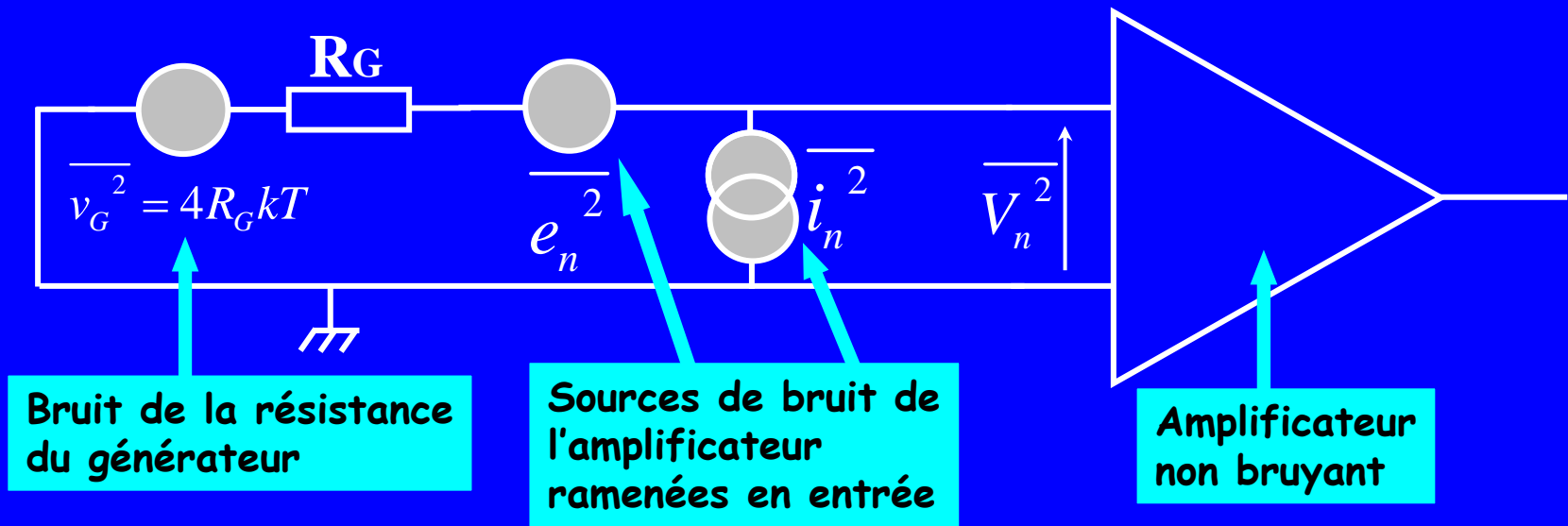
$$\overline{(v_1 + v_2)^2} = \overline{v_1^2 + v_2^2 + 2v_1v_2} = \overline{v_1^2} + \overline{v_2^2} + \overline{2v_1v_2}$$

$$\overline{2v_1v_2} = 0 \quad \text{si les sources ne sont pas corrélées}$$

$$\overline{(v_1 + v_2)^2} = \overline{v_1^2 + v_2^2}$$

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

# Bruit ramené en entrée



Les sources  $e_n^2$  et  $i_n^2$  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 :

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

# Pourquoi 2 sources ?

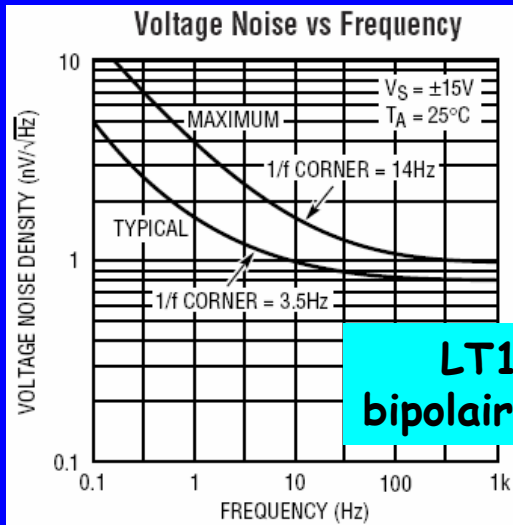
- $e_n^2$  représente le bruit en tension, on l'appelle aussi bruit série.
- $i_n^2$  représente le bruit en courant, on l'appelle aussi bruit parallèle.
- Si on voulait représenter tout le bruit par une seule source ramenée en entrée, elle vaudrait :

$$\overline{V_{n \text{ eq}}^2} = \overline{e_n^2} + R_G^2 \overline{i_n^2}$$

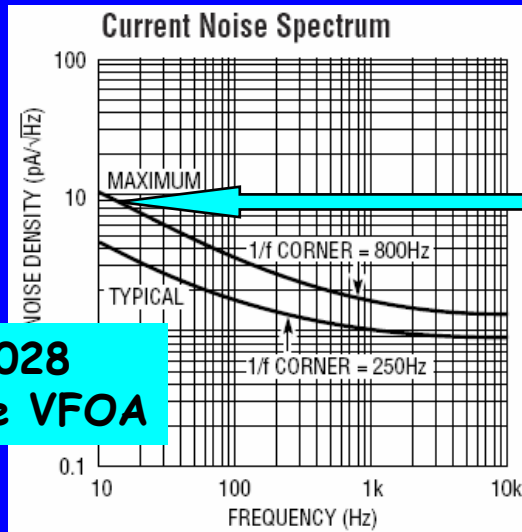
valeur qui dépend de la résistance du générateur. On évite cette difficulté en séparant en 2 sources.



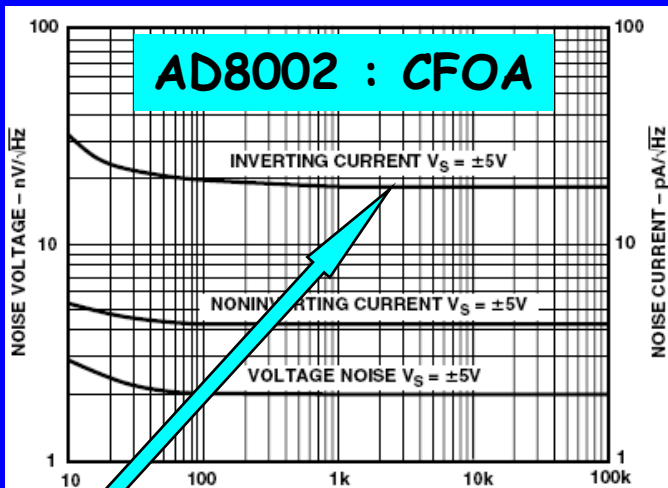
# Ordres de grandeur



**LT1028  
bipolaire VFOA**

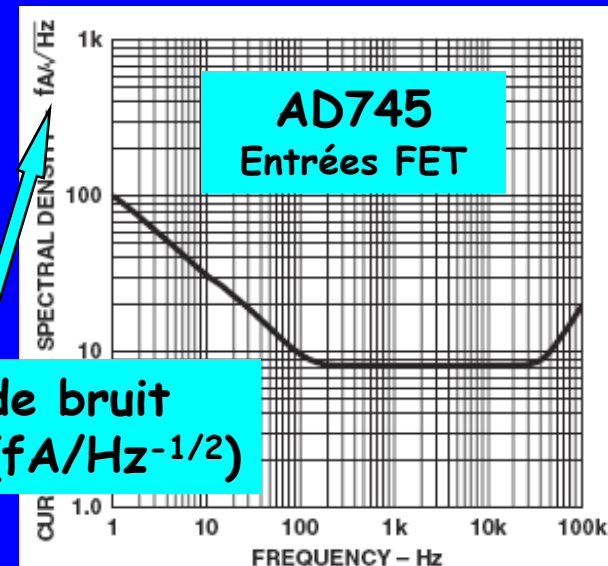


**Courant de bruit élevé à cause du courant de base de l'étage d'entrée**



**Amplificateurs Opérationnels commerciaux**

**Courant de bruit élevé sur l'entrée « - » (émetteur)**



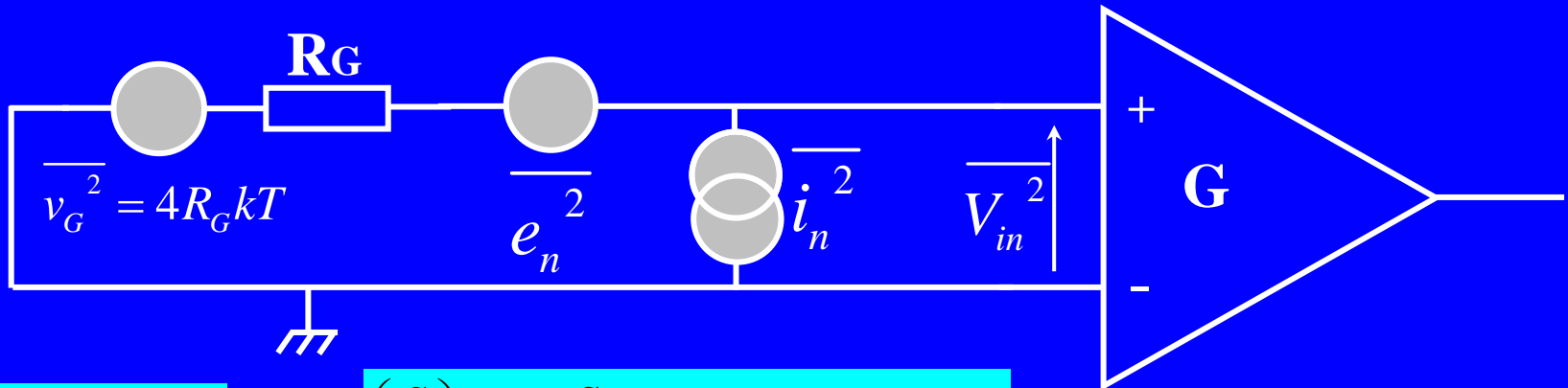
**Courant de bruit très faible (fA/Hz<sup>-1/2</sup>)**

# Sommaire

- Introduction
- Sources physiques du bruit
- Influence des éléments réactifs
- Représentation du bruit dans les circuits
- **Facteur de bruit**
  - Quadripôles en cascade
  - Atténuateurs
- La modélisation du bruit dans les composants
- Mesures du bruit
- Simulations

# Facteur de bruit

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



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

$$\left(\frac{S}{B}\right)_e = \frac{S_e}{4kTR_G}$$

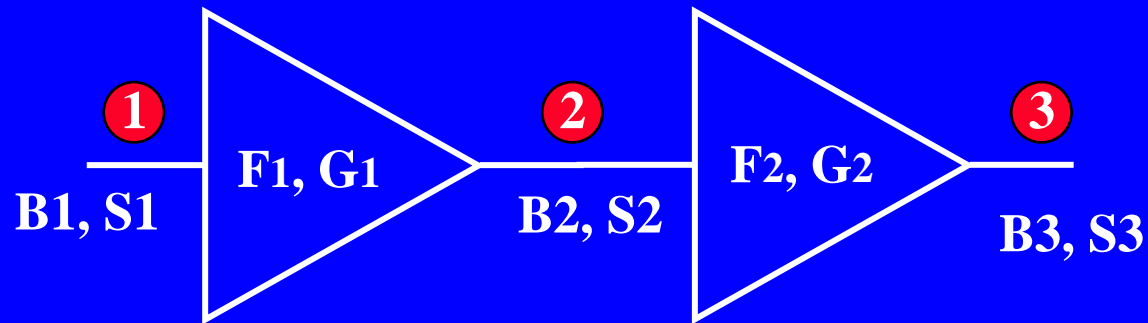
$$\left(\frac{S}{B}\right)_s = \frac{GS_e}{G(4kTR_G + e_n^2 + R_G^2 i_n^2)}$$

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

La puissance de bruit ramenée en entrée dû à l'amplificateur seul vaut :

$$(F - 1)kT = (F - 1)B_G$$

# Facteur de bruit : amplificateurs en cascade



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

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

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

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

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

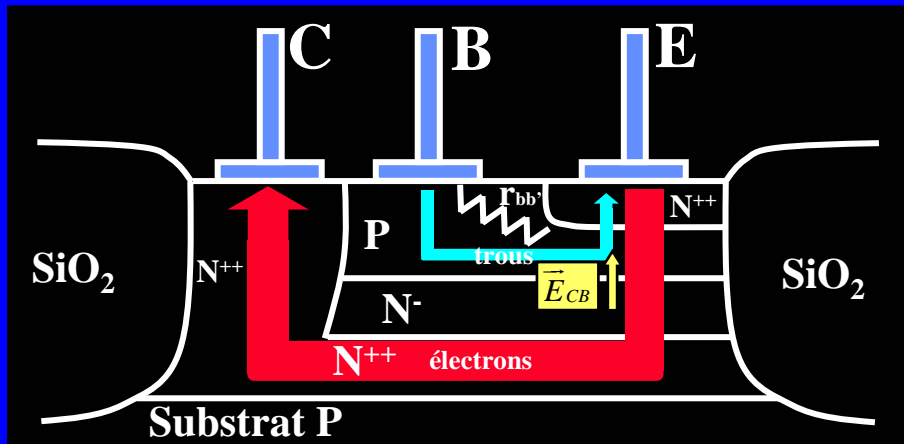
*Le facteur de bruit s'exprime souvent en décibels :  $F_{dB} = 10 \log_{10} F$*

# Sommaire

- Introduction
- Sources physiques du bruit
- Influence des éléments réactifs
- Représentation du bruit dans les circuits
- Facteur de bruit
- **La modélisation du bruit dans les composants**
  - Transistors bipolaires
  - Transistors MOS
- Mesures du bruit
- Simulations

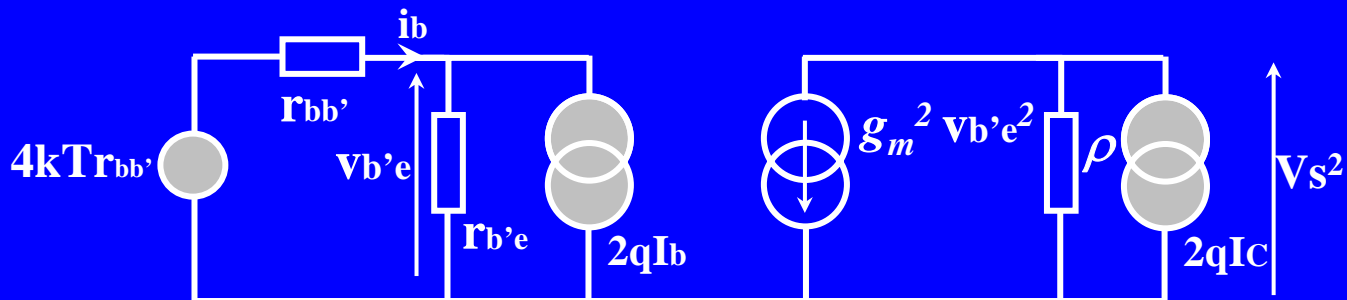


# Bruit dans les transistors bipolaires



3 sources de bruit principales dans le transistor bipolaire :

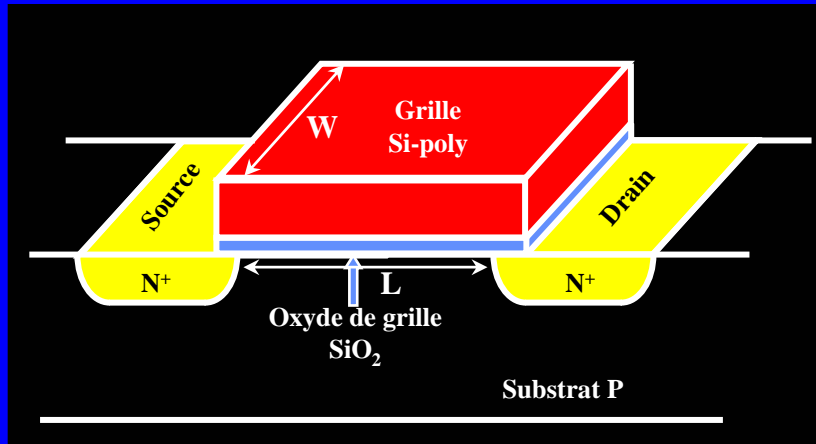
- Le bruit thermique de la résistance d'accès à la base :  $r_{bb'}$
- Le shot noise du courant de base
- Le shot noise du courant collecteur



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

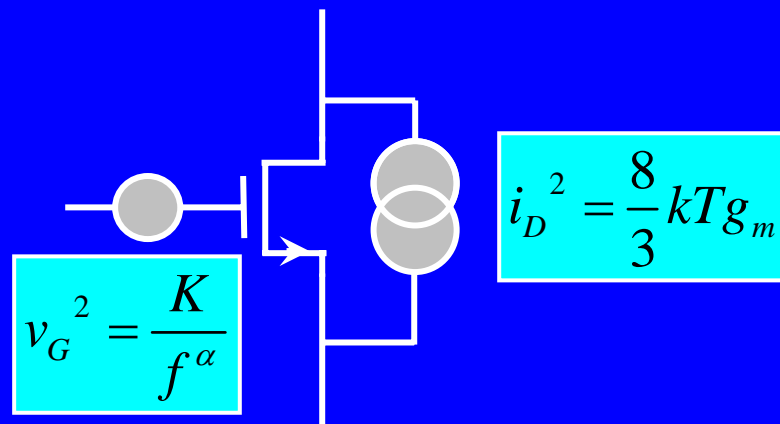
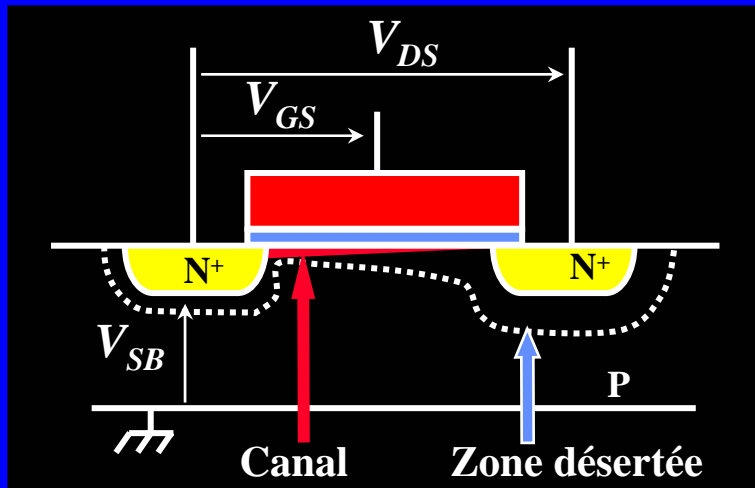
$$V_S^2 = \left\{ 2qI_C + \left[ 4kTr_{bb'} \left( \frac{r_{b'e}}{r_{bb'} + r_{b'e}} \right)^2 + 2qI_B (r_{bb'} // r_{b'e})^2 \right] g_m^2 \right\} \rho^2$$

# 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



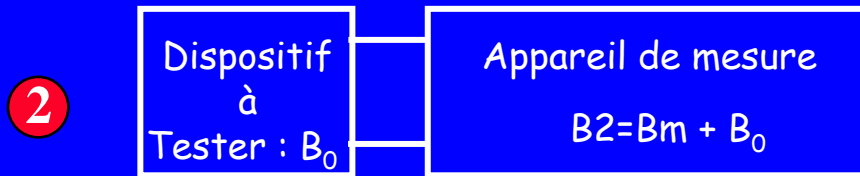
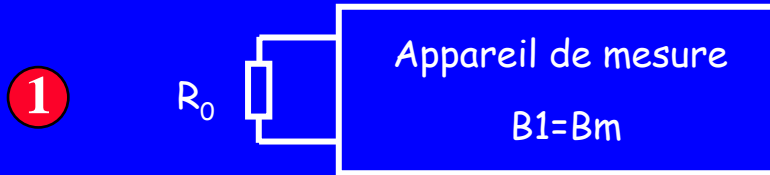
# Sommaire

- Introduction
- Sources physiques du bruit
- Influence des éléments réactifs
- Représentation du bruit dans les circuits
- Facteur de bruit
- La modélisation du bruit dans les composants
- **Mesures du bruit**
  - Résolution
  - Mesure RMS
  - Mesure des densités spectrales
- Simulations

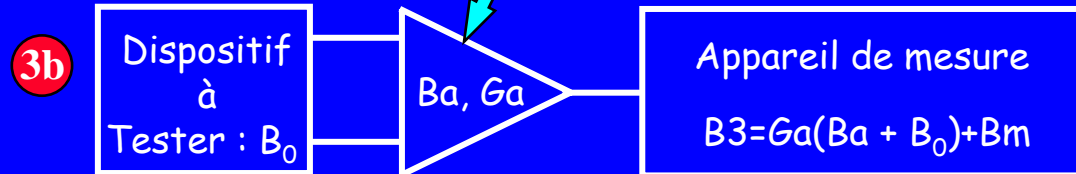
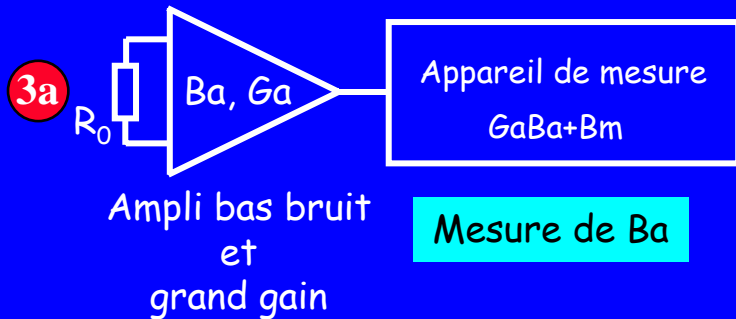
# Résolution, bruit de l'appareil de mesure

L'appareil de mesure donne la puissance de bruit ramenée à son entrée

**Attention !** Les tensions et les courants doivent s'ajouter ou se retrancher **quadratiquement**



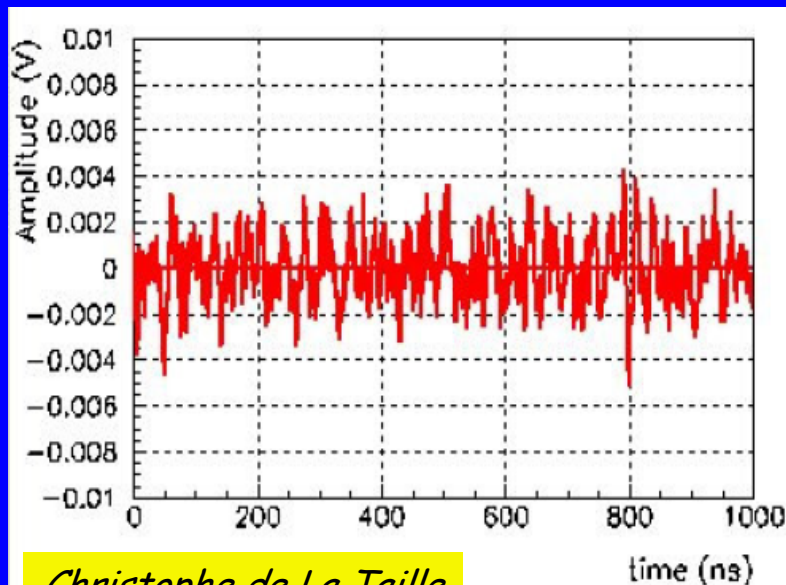
$B_0$  : Bruit du dispositif à tester  
 $Bm$  : Bruit de l'appareil de mesure  
**Si  $Bm > B_0$ , il est impossible de mesurer correctement  $B_0$**   
Il faut ajouter un ampli qui « masque » le bruit de l'appareil de mesure



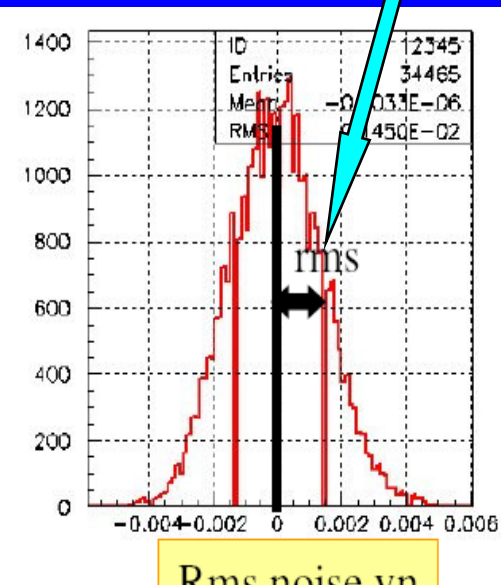
$$B_0 = (B3 - B1) / Ga - Ba$$

# Mesure du bruit RMS

- Bruit supposé Gaussien
- Appareil de mesure : Oscilloscope ou ADC
- Mesure : Histogramme + fit avec une gaussienne :  $\sigma =$  bruit RMS
- Précautions : Mesurer aussi le signal !



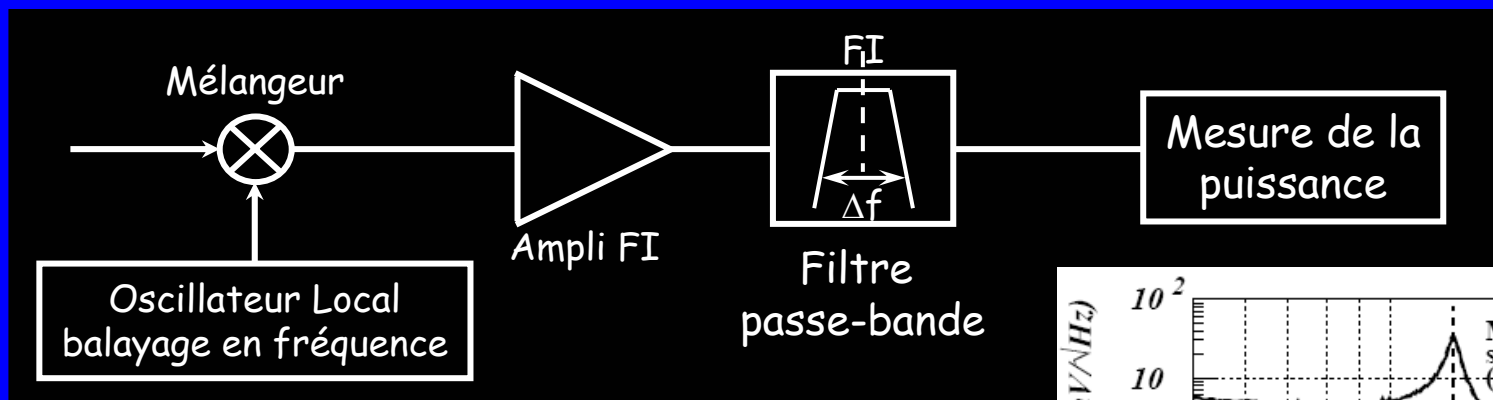
Christophe de La Taille



Rms noise vn

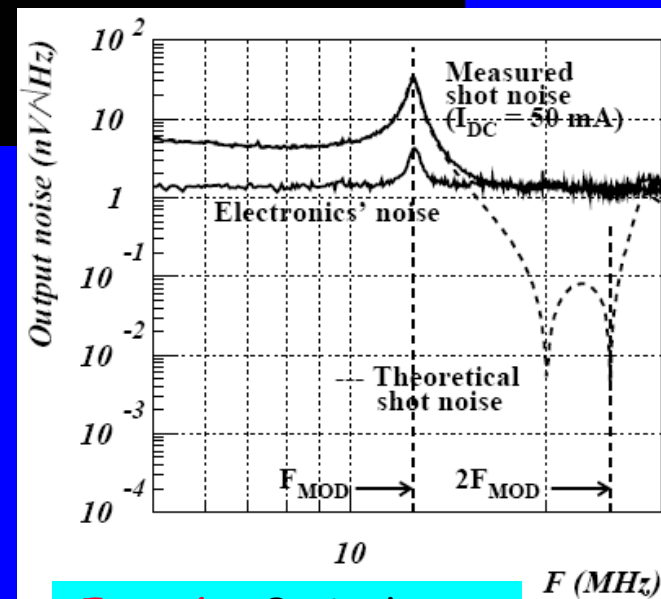
# Mesure des densités spectrales

- Appareil de mesure : Analyseur de spectre



- On balaye en fréquence la bande à analyser à l'aide de l'oscillateur local
- La fréquence intermédiaire FI est fixe
- La largeur de bande  $\Delta f$  est ajustable
- L'analyseur donne la puissance dans la bande  $\Delta f$  pour chaque fréquence

- L'analyseur de spectre est un appareil bruyant ( $en \approx 20 \text{ nVHz}^{-1/2} \Leftrightarrow F \approx 27 \text{ dB}$ )
- On utilise un ampli bas bruit : 40dB,  $1 \text{ nVHz}^{-1/2}$



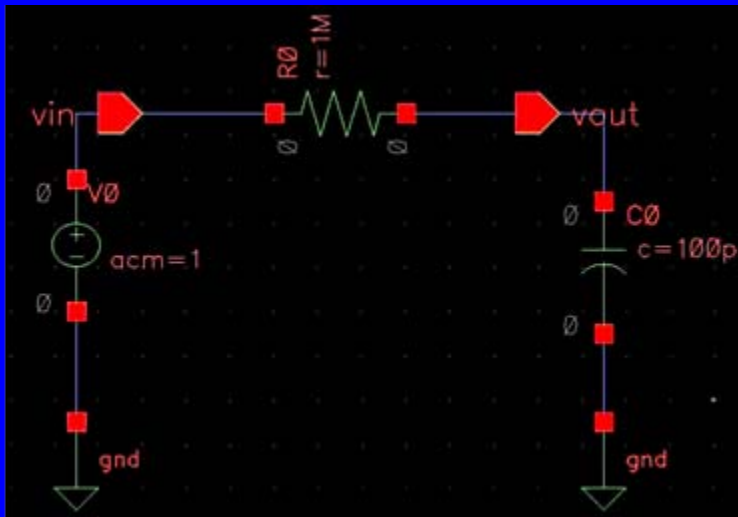
**Exemple :** Bruit des préamplis des photodiodes VIRGO



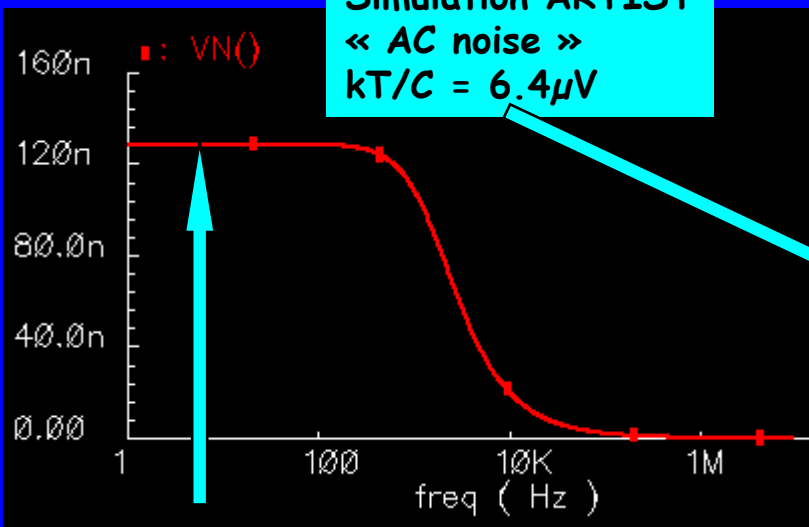
# Sommaire

- Introduction
- Sources physiques du bruit
- Influence des éléments réactifs
- Représentation du bruit dans les circuits
- Facteur de bruit
- La modélisation du bruit dans les composants
- Mesures du bruit
- **Simulations**
  - Principes
  - Exemple

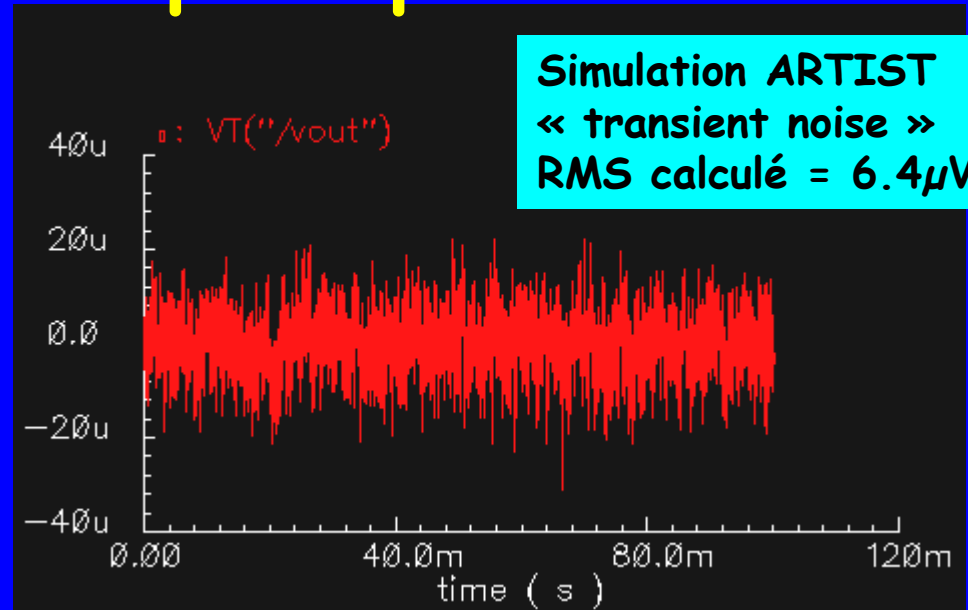
# Simulations : principes



Simulation ARTIST  
« AC noise »  
 $kT/C = 6.4\mu V$



$$4RkT = 129nV/Hz^{1/2}$$



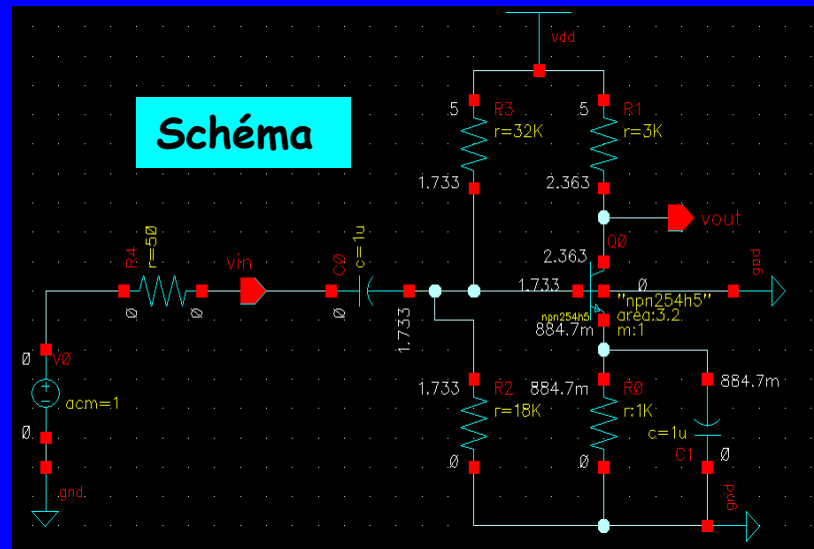
Simulation ARTIST  
« transient noise »  
RMS calculé =  $6.4\mu V$

- ❑ La simulation « transient noise » est utile pour les systèmes non linéaires ou échantillonnés
- ❑ C'est une simulation longue : 64s CPU contre 174ms pour AC pour un simple RC !

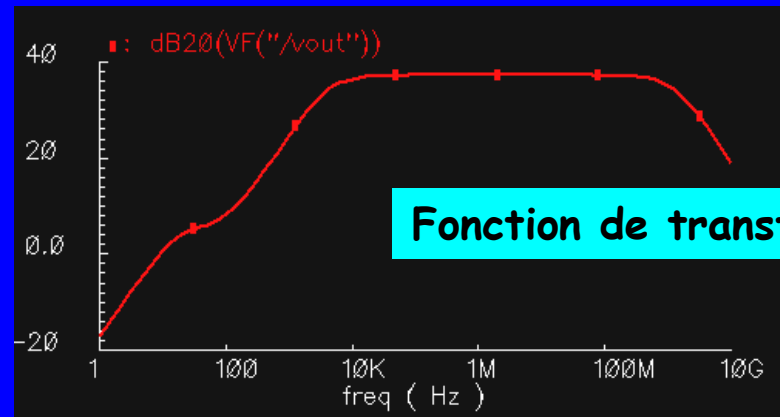
| Results Display Window                                       |             |                    |            |
|--|-------------|--------------------|------------|
| Window   | Expressions | Info               |            |
| Device   | Param       | Noise Contribution | % Of Total |
| /R0  | rn          | 6.43895e-06        | 100.00     |
| /R0  | fn          | 0                  | 0.00       |
| Integrated Noise Summary (in V) Sorted By Noise Contributors |             |                    |            |
| Total Summarized Noise = 6.43895e-06                         |             |                    |            |
| Total Input Referred Noise = 0.00128747                      |             |                    |            |
| The above noise summary info is for noise data               |             |                    |            |

# Simulations : exemple : émetteur commun

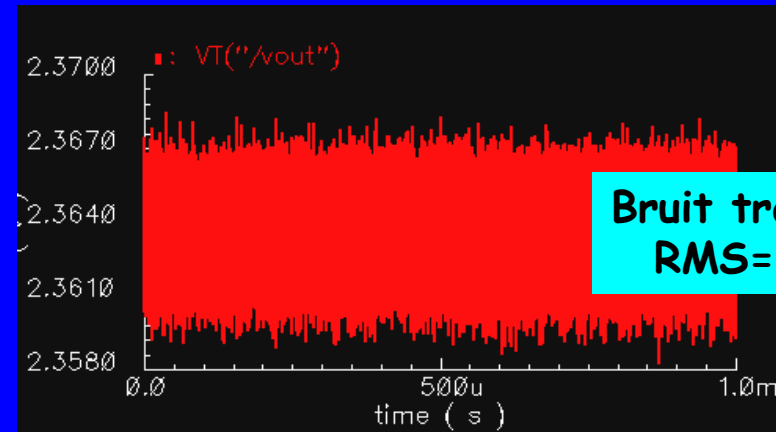
Schéma



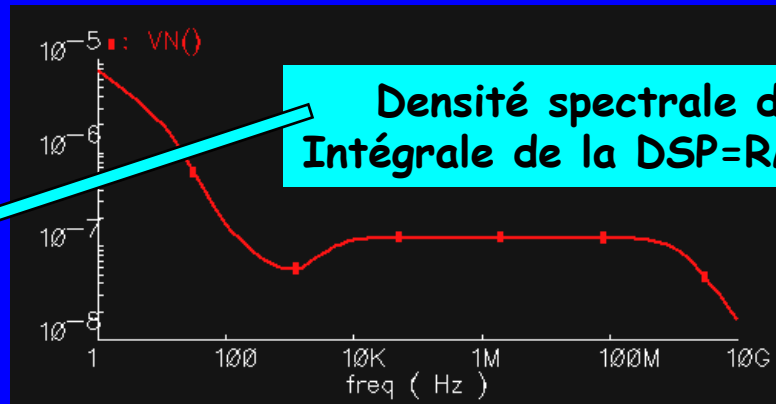
Fonction de transfert



Bruit transitoire  
RMS=1.2mV



Densité spectrale de bruit  
Intégrale de la DSP=RMS=1.2mV



Results Display Window

| Device | Param | Noise Contribution | % Of Total |
|--------|-------|--------------------|------------|
| /Q0    | rbi   | 0.000856333        | 48.60      |
| /R4    | rn    | 0.000667536        | 29.53      |
| /Q0    | itzf  | 0.000428428        | 12.16      |
| /Q0    | rbx   | 0.000258015        | 4.41       |
| /Q0    | re    | 0.000227711        | 3.44       |
| /Q0    | ibe   | 0.000145417        | 1.40       |
| /R1    | rn    | 7.00595e-05        | 0.33       |
| /R2    | rn    | 3.51828e-05        | 0.08       |
| /R3    | rn    | 2.63871e-05        | 0.05       |
| /Q0    | fn    | 7.93402e-06        | 0.00       |
| /R0    | rn    | 8.62909e-07        | 0.00       |
| /Q0    | rcx   | 3.91489e-07        | 0.00       |
| /Q0    | rci   | 1.53437e-07        | 0.00       |
| /Q0    | ibep  | 1.02982e-12        | 0.00       |
| /Q0    | frp   | 9.16621e-15        | 0.00       |
| /R4    | fn    | 0                  | 0.00       |
| /R3    | fn    | 0                  | 0.00       |
| /R2    | fn    | 0                  | 0.00       |
| /R1    | fn    | 0                  | 0.00       |
| /R0    | fn    | 0                  | 0.00       |
| /Q0    | ibex  | 0                  | 0.00       |
| /Q0    | frx   | 0                  | 0.00       |
| /Q0    | iccp  | 0                  | 0.00       |

Integrated Noise Summary (in V) Sorted By Noise Contributors  
 Total Summarized Noise = 0.00122839  
 Total Input Referred Noise = 1.67527e-05  
 The above noise summary info is for noise data

Liste des sources  
contribuant au bruit

# Questions ?

