



LE BRUIT

DANS LES

COMPOSANTS ELECTRONIQUES

Richard HERMEL LAPP

Ecole de microélectronique IN2P3 Porquerolles 2013

Sommaire

- ❑ Introduction
- ❑ Sources physiques du bruit
- ❑ 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, technologie
- ❑ 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.

□ 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 Δt .

(La fonction d'autocorrélation est un dirac)

- Conséquence :

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

(en pratique, jusqu'à $\approx 1\text{THz}$ à la température ambiante)

□ 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 Δf . Elle s'exprime en $\text{W}\cdot\text{Hz}^{-1}$ pour la puissance, en $\text{V}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ pour la tension et en $\text{A}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 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 $1/f$**
- 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 (*r_{bb}' des bipolaires*),...

Bruit thermique dans une résistance : bruit Johnson

Agitation thermique



Mouvement aléatoire des porteurs de charge



Tension et courants aléatoires dans la résistance

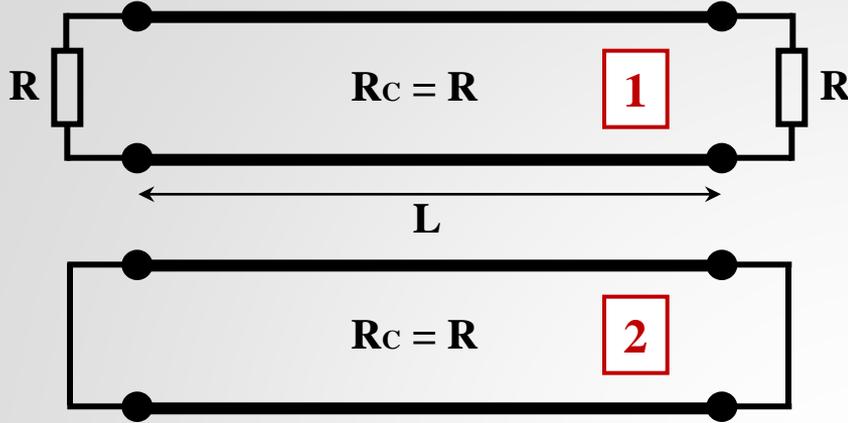


Puissance de bruit disponible dans la résistance dans une
bande de fréquence Δf :

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

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

Bruit thermique dans une résistance : démonstration de Nyquist



1^{ère} 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^{ème} étape :

- Les résistances sont remplacées instantanément par des courts-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 Δf , il y a Δn 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 :

THERMAL AGITATION OF ELECTRIC CHARGE
IN CONDUCTORS*

By H. NYQUIST

ABSTRACT

The electromotive force due to thermal agitation in conductors is calculated by means of principles in thermodynamics and statistical mechanics. The results obtained agree with results obtained experimentally.

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

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 :

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



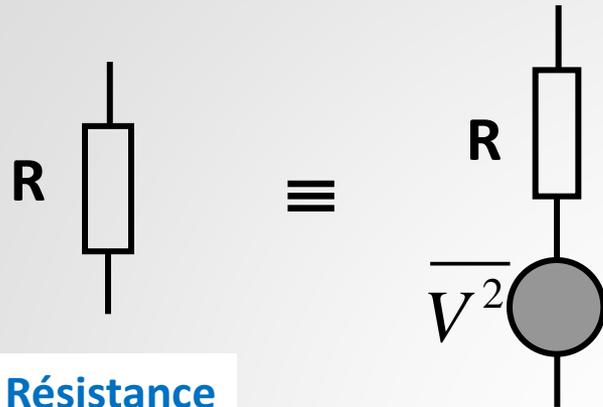
Problème en DC ($f_1 \rightarrow 0$) ?

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

Sommaire

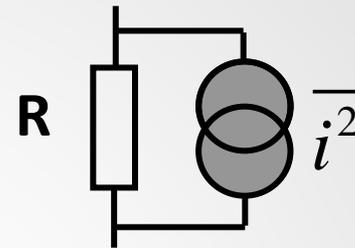
- ❑ Introduction
- ❑ Sources physiques du bruit
- ❑ **Représentation du bruit dans les circuits**
 - ❑ Schémas équivalents
 - ❑ Influence des éléments réactifs
 - ❑ Composition des sources, corrélations
 - ❑ Bruit ramené en entrée
 - ❑ Bruit en courant (parallèle), bruit en tension (série)
 - ❑ Ordres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

Représentation du bruit par des sources



Résistance
bruyante

ou



Résistance
non-bruyante
+ source de courant

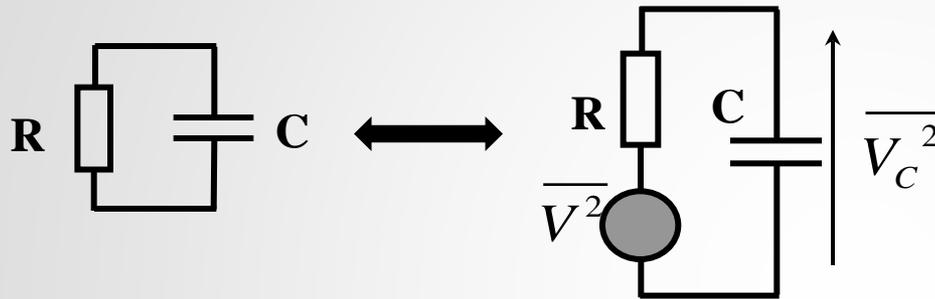
La **puissance disponible** dans une résistance est la **puissance maximale** qu'elle peut fournir à une charge. Pour cela, il faut que la charge soit **adaptée**, c'est à dire égale à la résistance de source.

D'où les valeurs des sources :

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

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

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 :

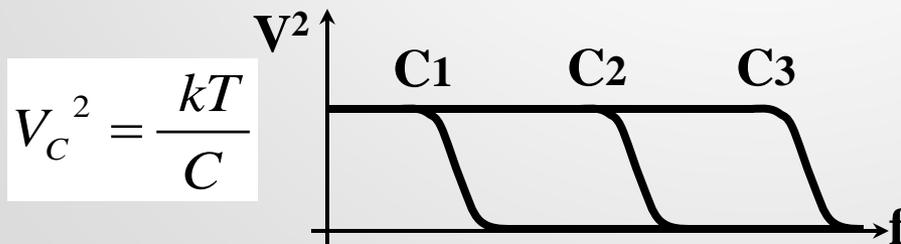


$$dV_C^2 = \frac{4R kT df}{1 + R^2 C^2 \omega^2}$$

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.



$$C_1 > C_2 > C_3$$

❑ 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

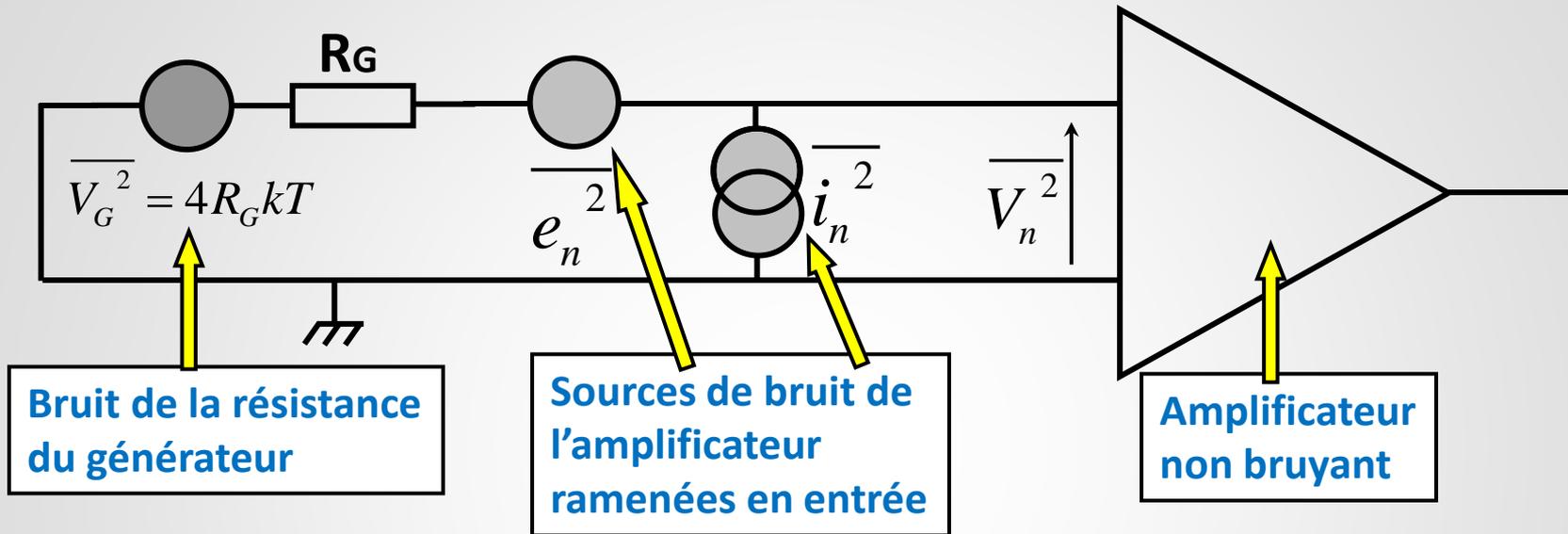
❑ Composition des sources : Ex : sources de tension

$$\overline{(V_1 + V_2)^2} = \overline{V_1^2} + \overline{V_2^2} + 2\overline{V_1V_2} = \overline{V_1^2} + \overline{V_2^2} + 2\overline{V_1V_2}$$

$$\overline{2V_1V_2} = 0 \text{ si les sources ne sont pas corrélées, et } \overline{(V_1 + V_2)^2} = \overline{V_1^2} + \overline{V_2^2}$$

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

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 amplitudes :

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

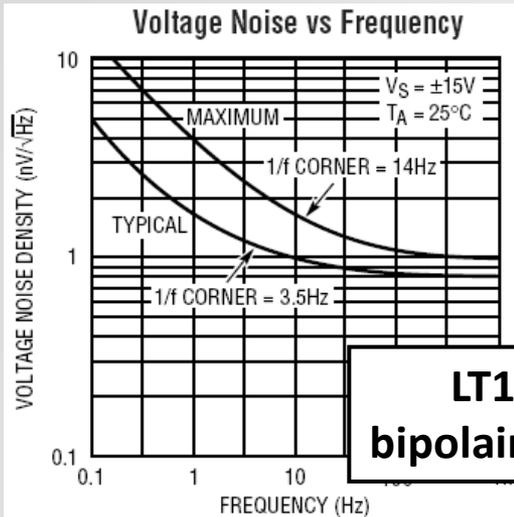
Pourquoi 2 sources ?

- 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 :

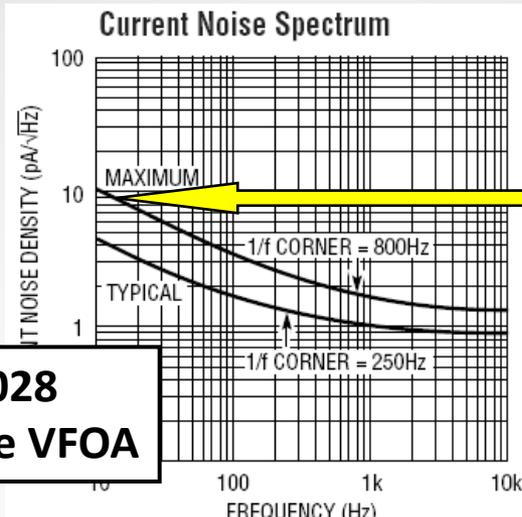
$$\overline{V_{n\ eq}^2} = \overline{e_n^2} + R_G^2 \overline{i_n^2}$$

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

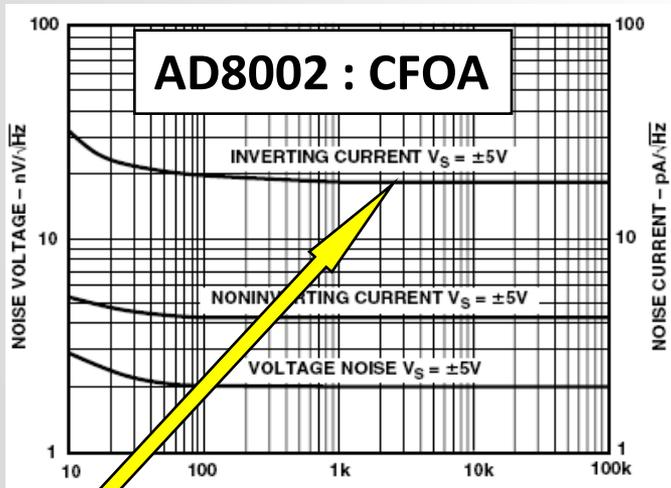
Ordres de grandeur



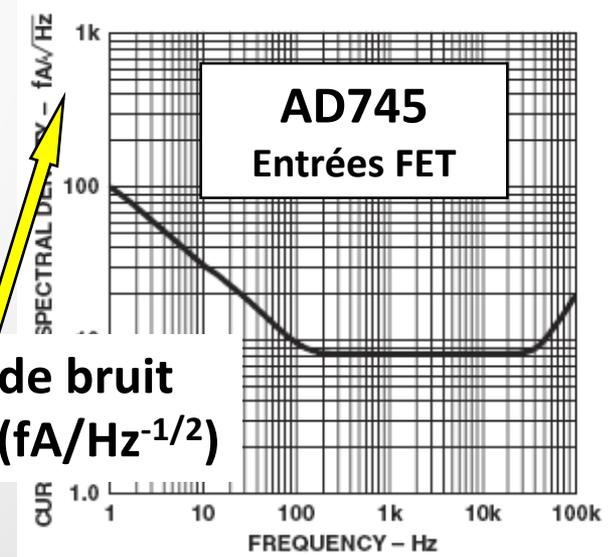
LT1028
bipolaire VFOA



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



Amplificateurs opérationnels commerciaux



Courant de bruit très faible (fA/Hz^{-1/2})

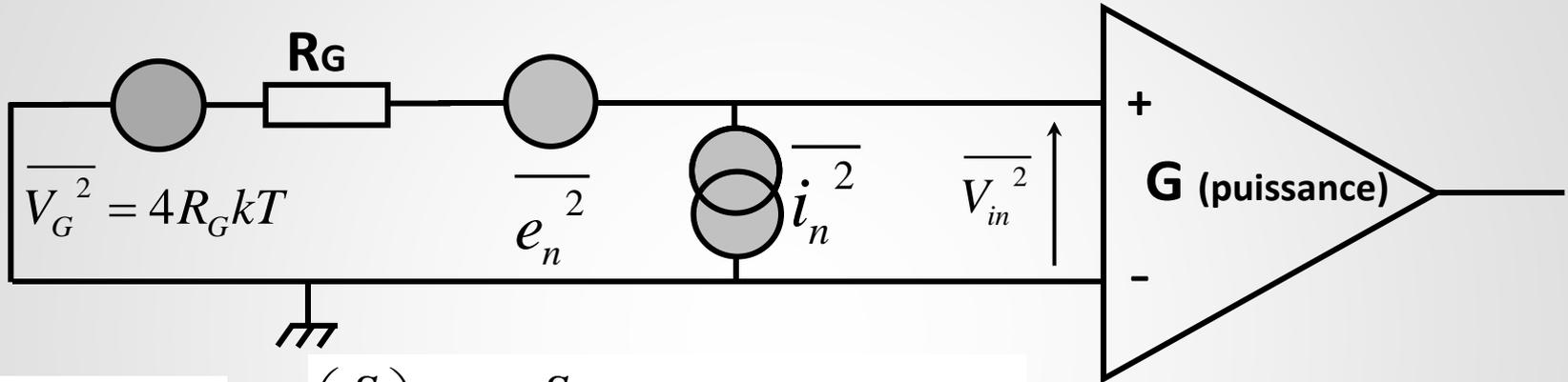
Courant de bruit élevé sur l'entrée « - » (émetteur)

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.



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

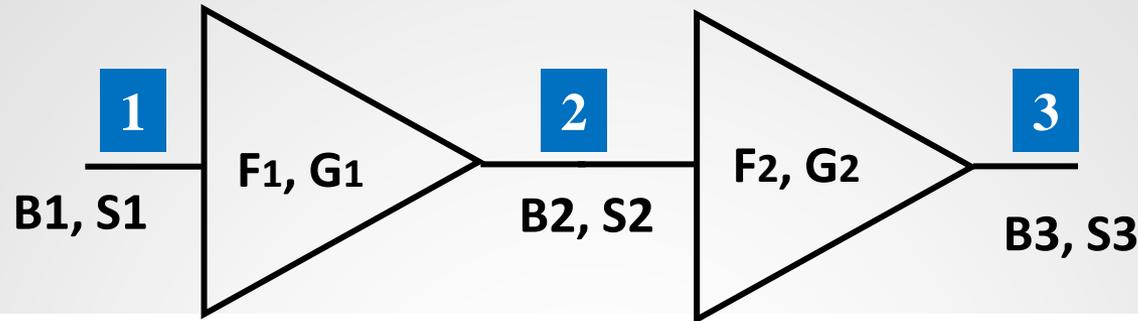
$$\left(\frac{S}{B}\right)_e = \frac{S_e}{4kTR_G}$$

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

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

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

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



$B_1 = B_G = kT$: 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^{er} étage a un grand gain et un bruit faible, le 2^{ème} étage ne contribue pas de façon significative au bruit total

**Généralisation à n étages :
Formule de Friis**

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}$$

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

$$S_2 = S_1 / A$$

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

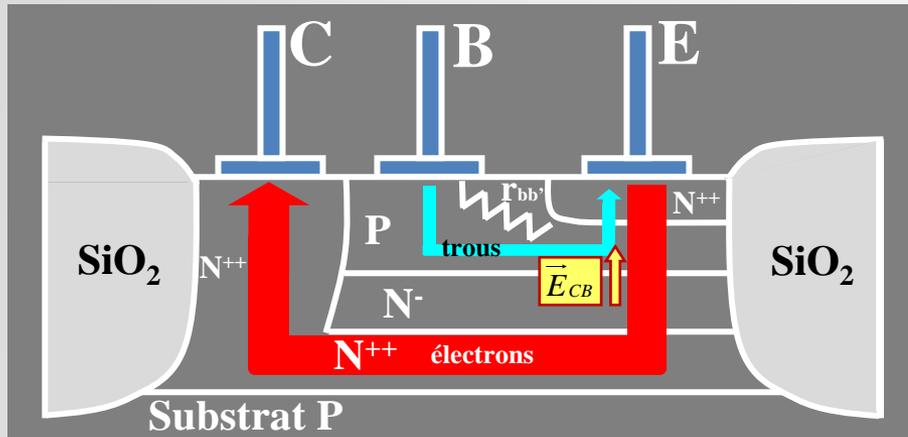
Le facteur de bruit d'un atténuateur est égal à son atténuation

On trouve souvent le facteur de bruit exprimé en décibels : $F_{dB} = 10 \log_{10} F$

*en anglais : $F = \text{Noise factor (linéaire)}$
 $NF = \text{Noise figure} = 10 \log_{10} F \text{ (dB)}$*

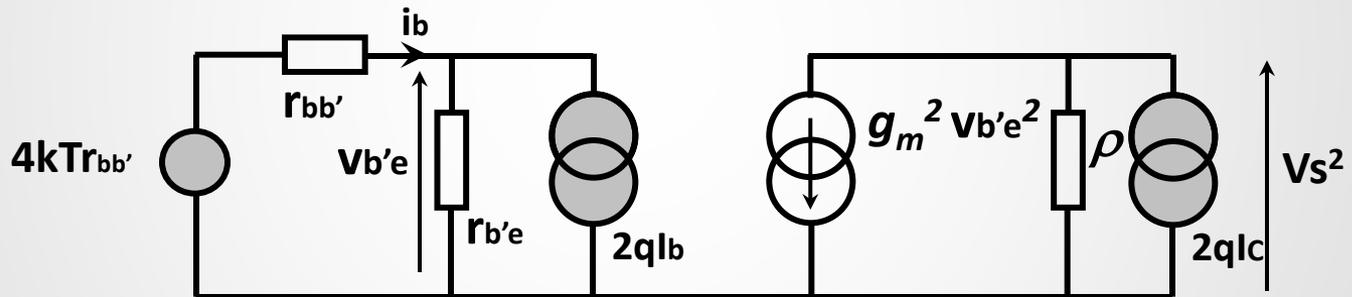
Sommaire

- ❑ 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



3 sources de bruit principales dans le transistor bipolaire :

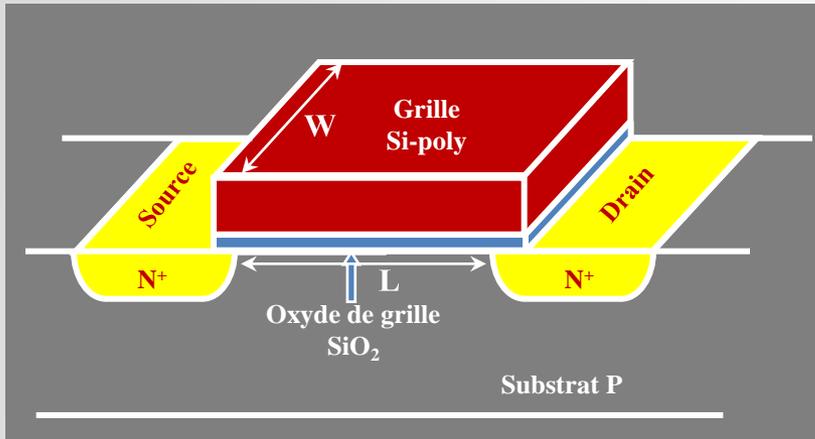
- Le bruit thermique de la résistance d'accès à la base : $r_{bb'}$
- Le shot noise du courant de base
- Le shot noise du courant collecteur



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

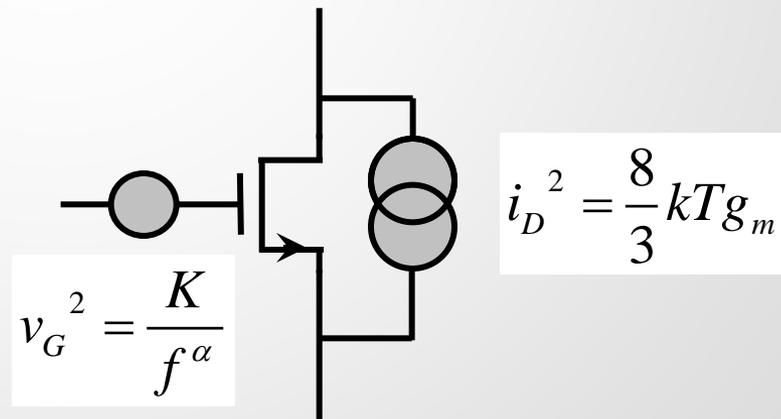
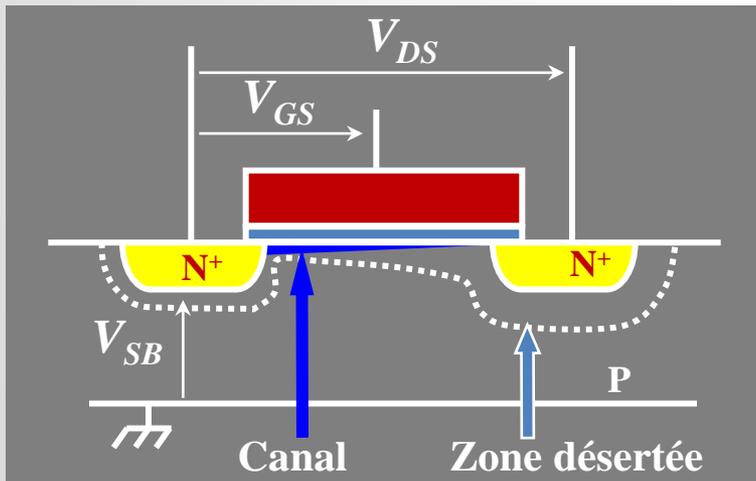
$$V_S^2 = \left\{ 2qI_C + \left[4kTr_{bb'} \left(\frac{r_{b'e}}{r_{bb'} + r_{b'e}} \right)^2 + 2qI_B (r_{bb'} // r_{b'e})^2 \right] g_m^2 \right\} \rho^2$$

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**

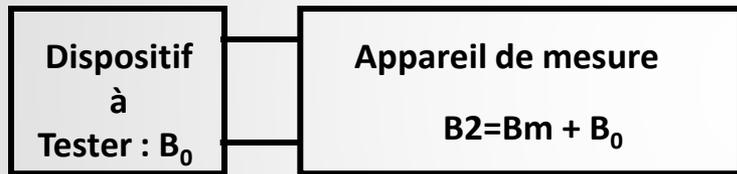
L'appareil de mesure donne la puissance de bruit ramenée à son entrée

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

1

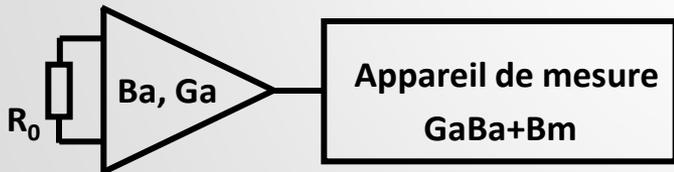


2



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

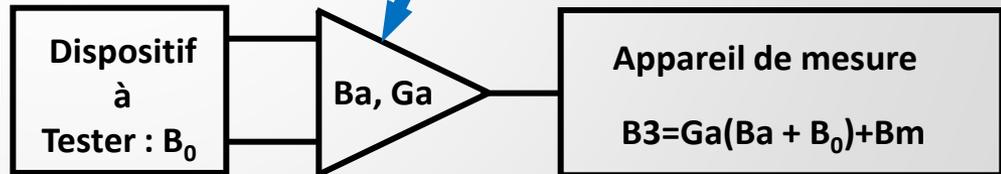
3a



Ampli bas bruit et grand gain

Mesure de B_a

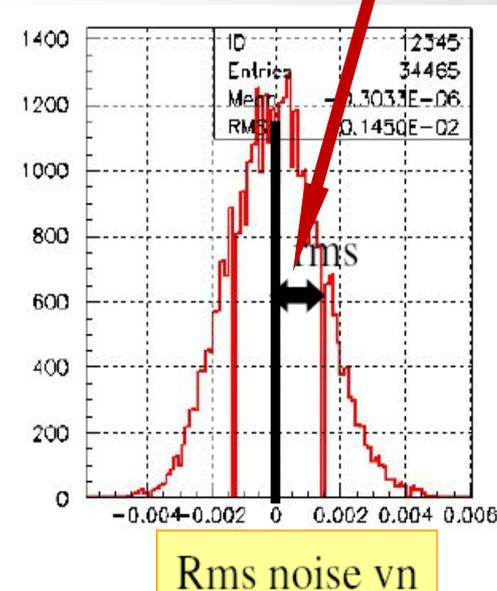
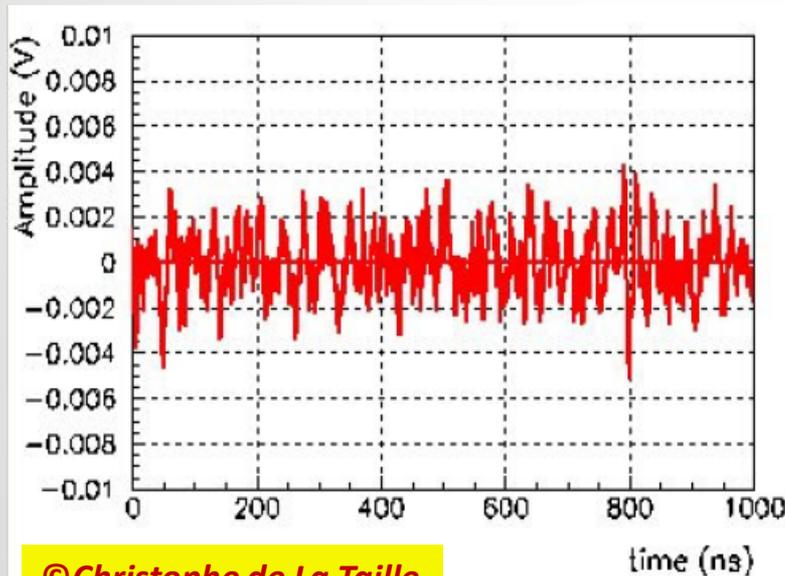
3b



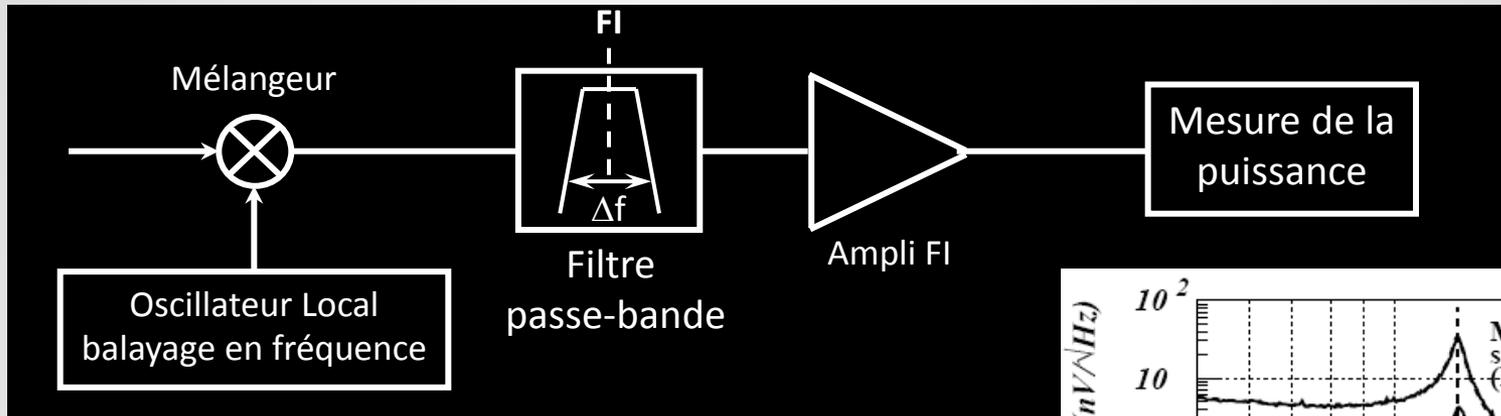
$$B_0 = (B_3 - B_1) / (G_a - B_a)$$

Mesure du bruit RMS

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

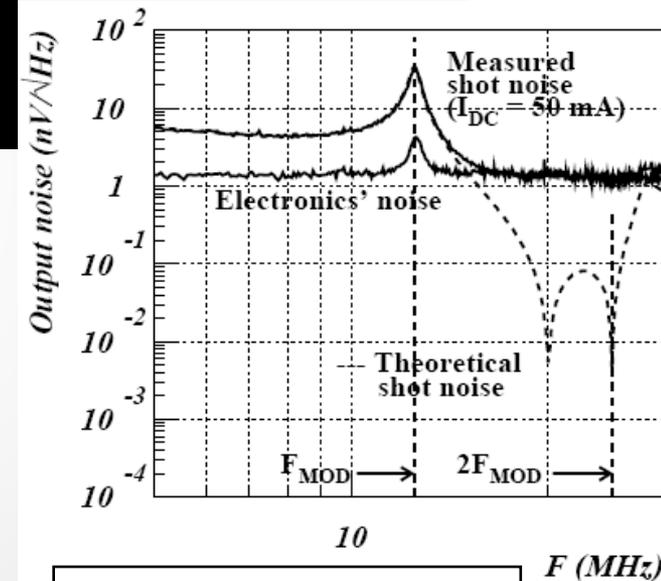


□ Appareil de mesure : Analyseur de spectre



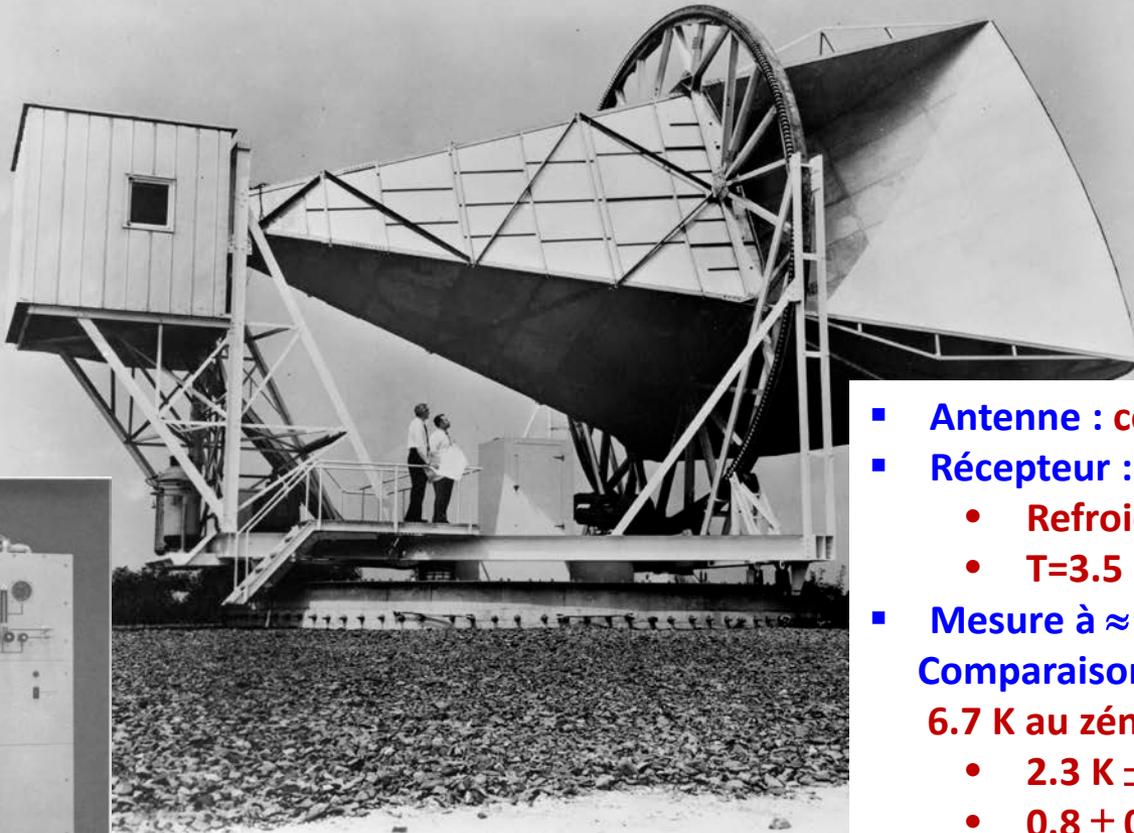
- On balaye en fréquence la bande à analyser à l'aide de l'oscillateur local
- La fréquence intermédiaire FI est fixe
- La largeur de bande Δf est ajustable
- L'analyseur donne la puissance dans la bande Δf pour chaque fréquence

- 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

<http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1965ApJ...142..419P>

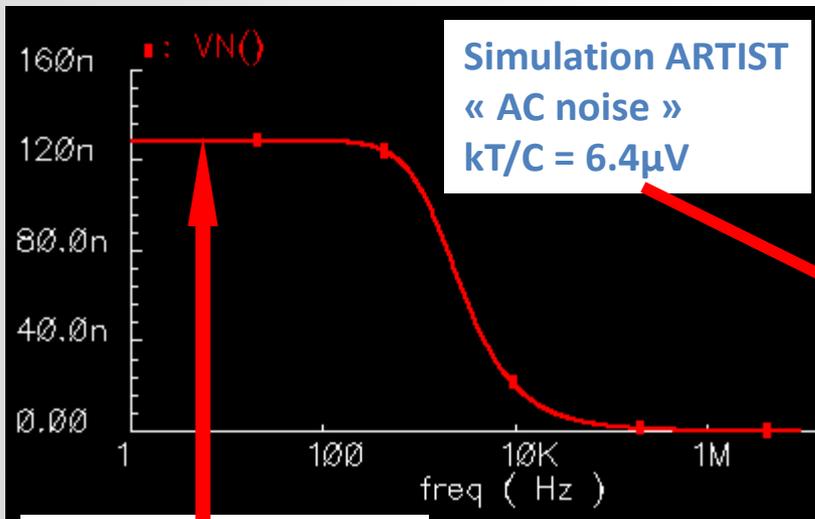
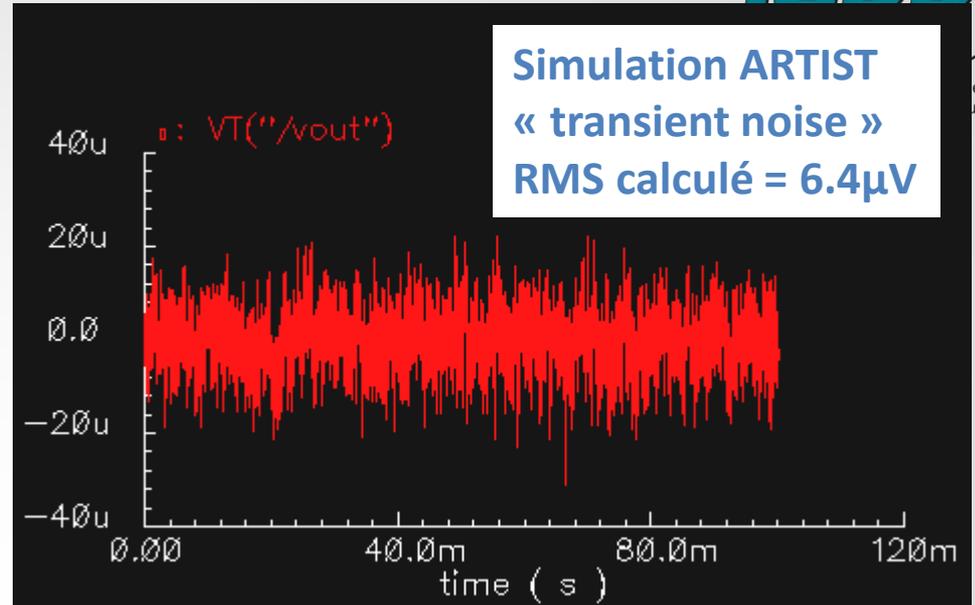
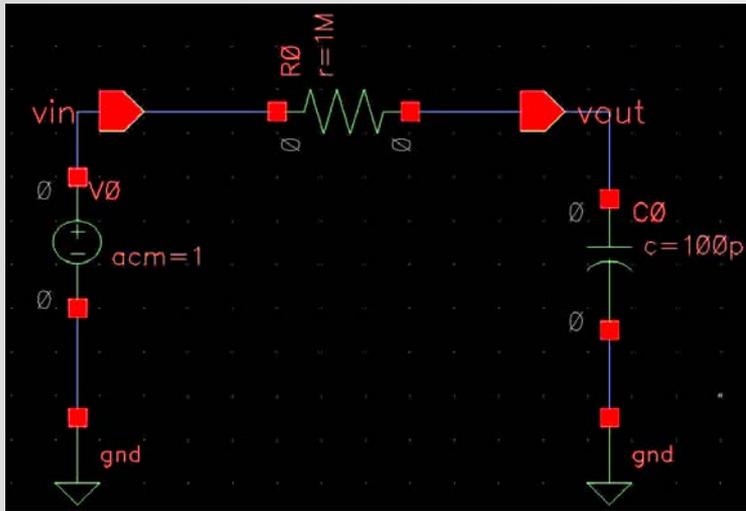


récepteur

- **Antenne : cornet 37 m², gain 43.3 dB / 1.2°**
- **Récepteur : Maser à rubis :**
 - Refroidi à l'hélium à 4.2 K
 - T=3.5 K, F=0.05 dB @ 4.17 GHz
- **Mesure à ≈ 4 GHz :**
Comparaison antenne / charge de référence :
6.7 K au zénith dont :
 - 2.3 K ± 0.3K : absorption atmosphérique
 - 0.8 ± 0.4K : pertes ohmiques
 - Lobes secondaires : < 0.1K
- **Résultat : 3.5 K ± 1.0 K en excès**
Isotrope, non polarisé et Indépendant de la saison (07/64 → 04/65)

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**



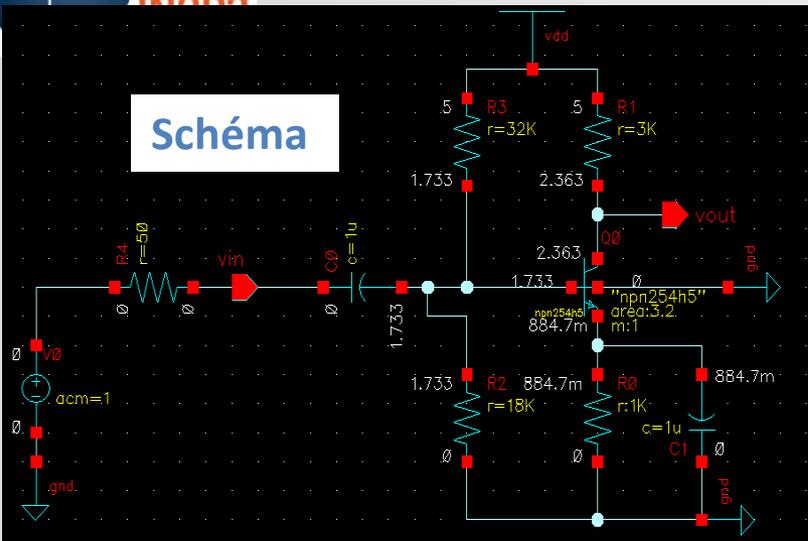
- ❑ La simulation « transient noise » est utile pour les systèmes non linéaires ou échantillonnés
- ❑ C'est une simulation longue : 15s CPU contre 90ms pour AC pour un simple RC !

Results Display Window

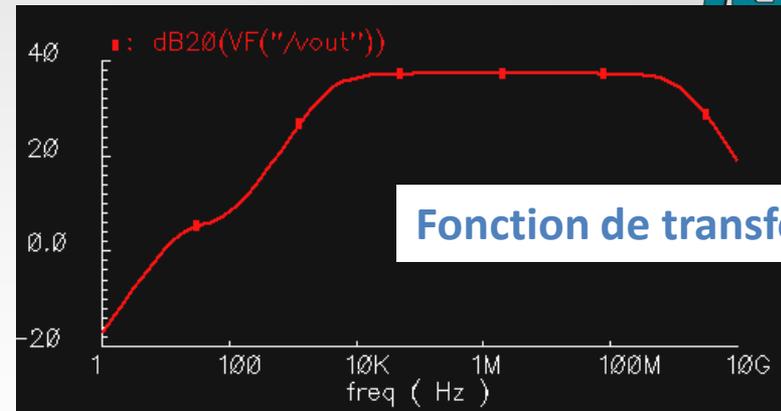
Device	Param	Noise Contribution	% Of Total
/R0	rn	6.43895e-06	100.00
/R0	fn	U	0.00

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

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



Schéma



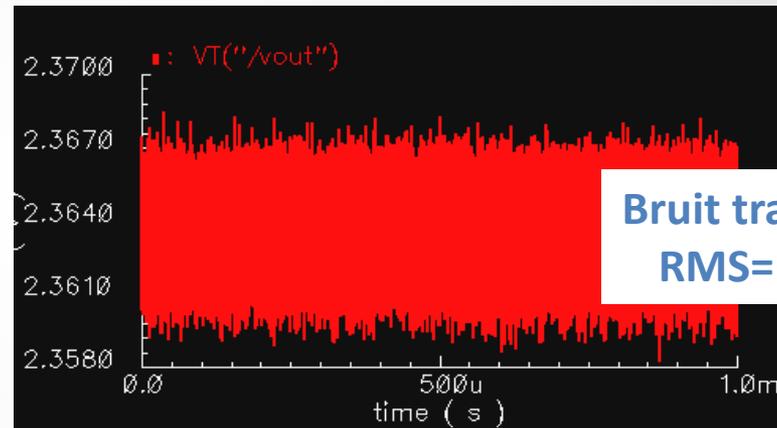
Fonction de transfert

Results Display Window

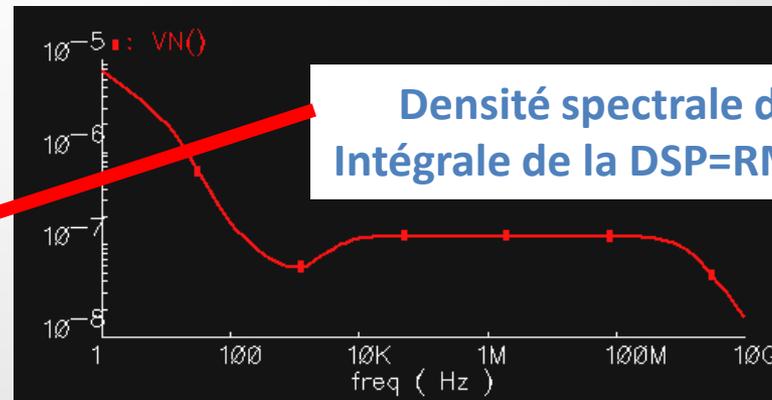
Device	Param	Noise Contribution	% Of Total
/Q0	rbi	0.000856333	48.60
/R4	rn	0.000667536	29.53
/Q0	itzf	0.000428428	12.16
/Q0	rbx	0.000258015	4.41
/Q0	re	0.000227711	3.44
/Q0	ibe	0.000145417	1.40
/R1	rn	7.00595e-05	0.33
/R2	rn	3.51828e-05	0.08
/R3	rn	2.63871e-05	0.05
/Q0	fn	7.93402e-06	0.00
/R0	rn	8.62909e-07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



Bruit transitoire
RMS=1.2mV



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

Questions ?

-
-
-
-
-
- ...