

An aerial photograph of a residential neighborhood. In the center, there is a large, multi-story building with a red-tiled roof and a blue facade. To the left of this building is a long, low structure with a dark roof. Below the main building is a tennis court with a blue surface. The area is surrounded by lush green trees and several houses with red-tiled roofs. A winding road is visible in the upper left quadrant.

LE BRUIT

DANS LES

COMPOSANTS ELECTRONIQUES

Richard HERMEL LAPP

Ecole d'électronique analogique IN2P3 Fréjus 2014

Sommaire

- ❑ Introduction
- ❑ Sources physiques du bruit
- ❑ Représentation du bruit dans les circuits
- ❑ Facteur de bruit
- ❑ La modélisation du bruit dans les composants
- ❑ Mesure 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.

Quelques 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 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 : $f \ll \frac{kT}{h}$

□ 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

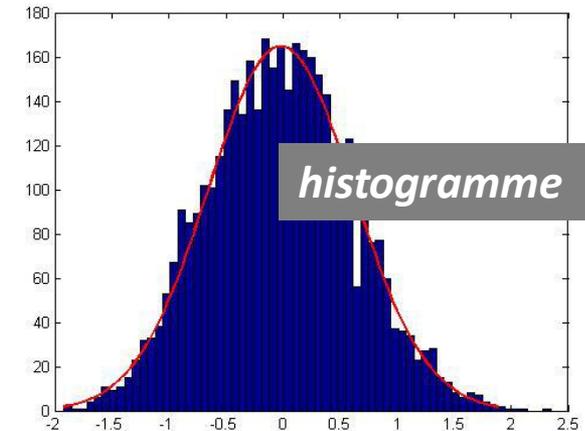
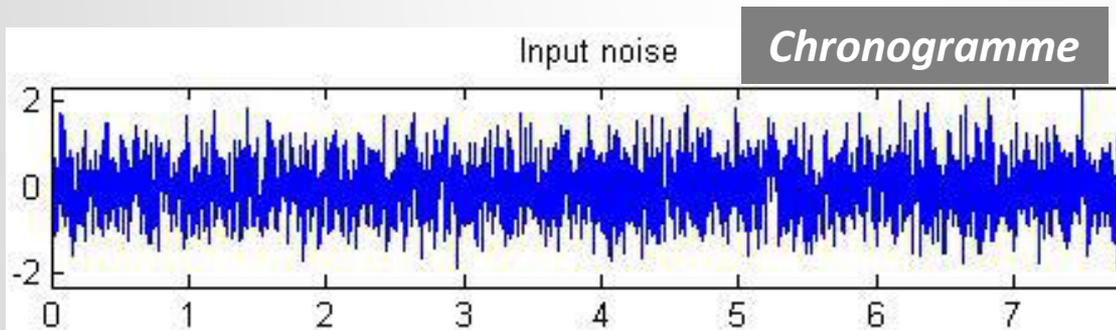
Sommaire

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



- Il est indépendant du courant qui traverse le dispositif

Bruit thermique dans une résistance : bruit Johnson

Agitation thermique



Mouvement aléatoire des porteurs de charge



Tension et courants aléatoires dans la résistance

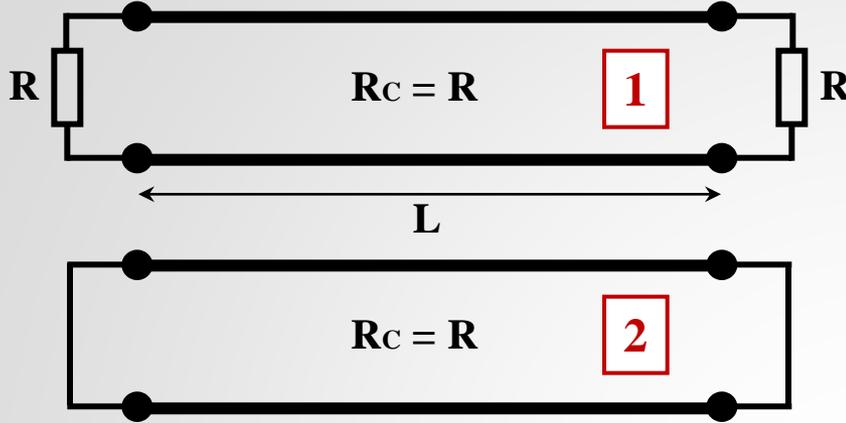


Puissance de bruit disponible dans la résistance dans une
bande de fréquence Δf :

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

**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 d'impédance 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

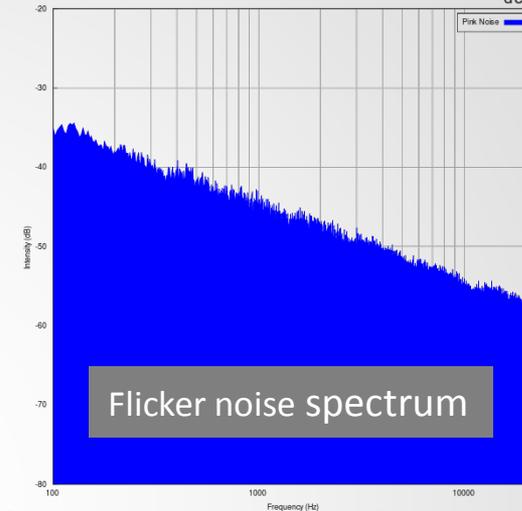
- Le passage du courant à travers la barrière de potentiel d'une jonction PN est dû aux électrons et aux trous qui traversent la zone de charge d'espace.
- Les porteurs sont injectés à des instants aléatoires, la traversée est très rapide, mais le nombre moyen de porteurs qui traversent par unité de 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

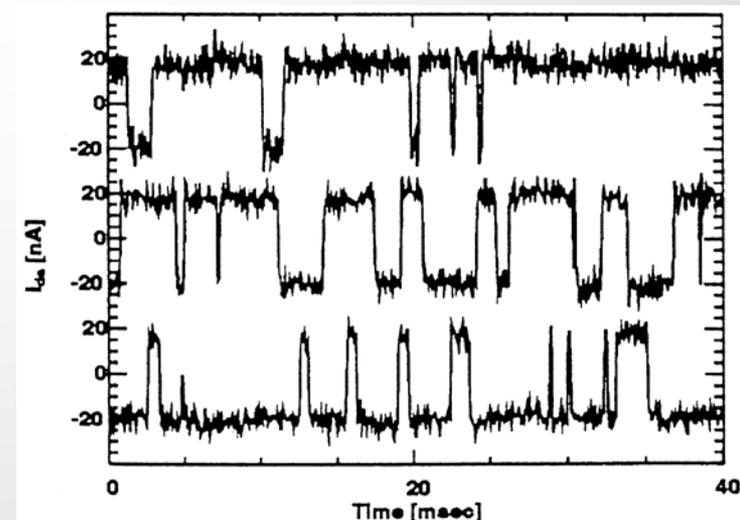
Bruit en $1/f$

- 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

- « pop corn » noise
 - Mêmes causes que le bruit en $1/f$
 - Sensible en audio



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 :

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



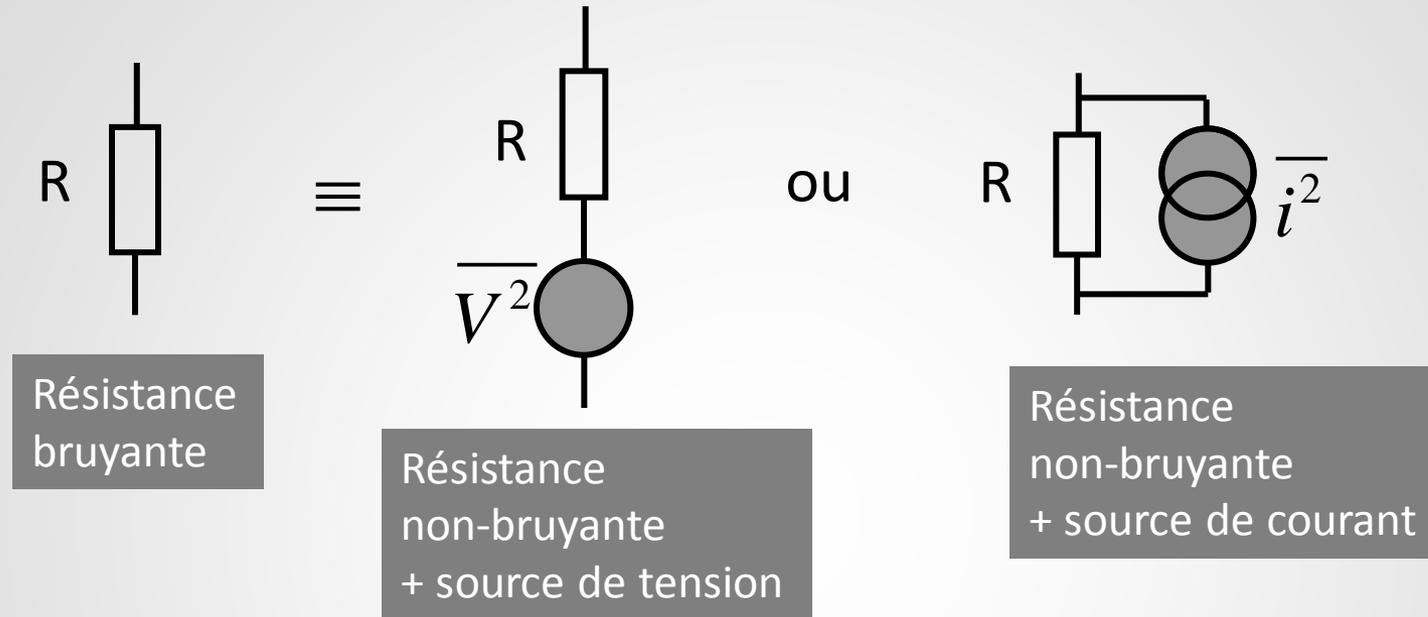
Problème en DC ($f_1 \rightarrow 0$) ?

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

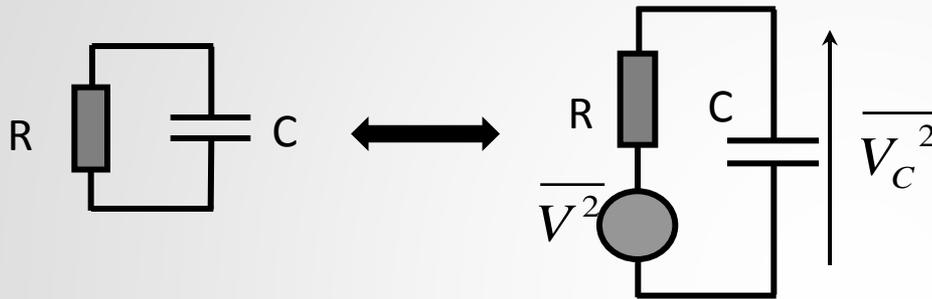


La **puissance disponible** dans une résistance est la puissance **maximale** qu'elle peut fournir à une charge. Pour cela, il faut que la charge soit **adaptée**, c'est à dire égale à la résistance de source.
D'où les valeurs des sources :

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

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

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 :

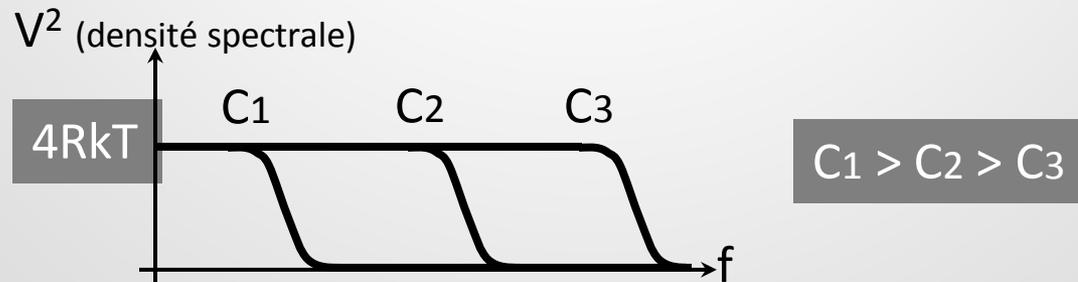


$$dV_C^2 = \frac{4R kT df}{1 + R^2 C^2 \omega^2}$$

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.



□ 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

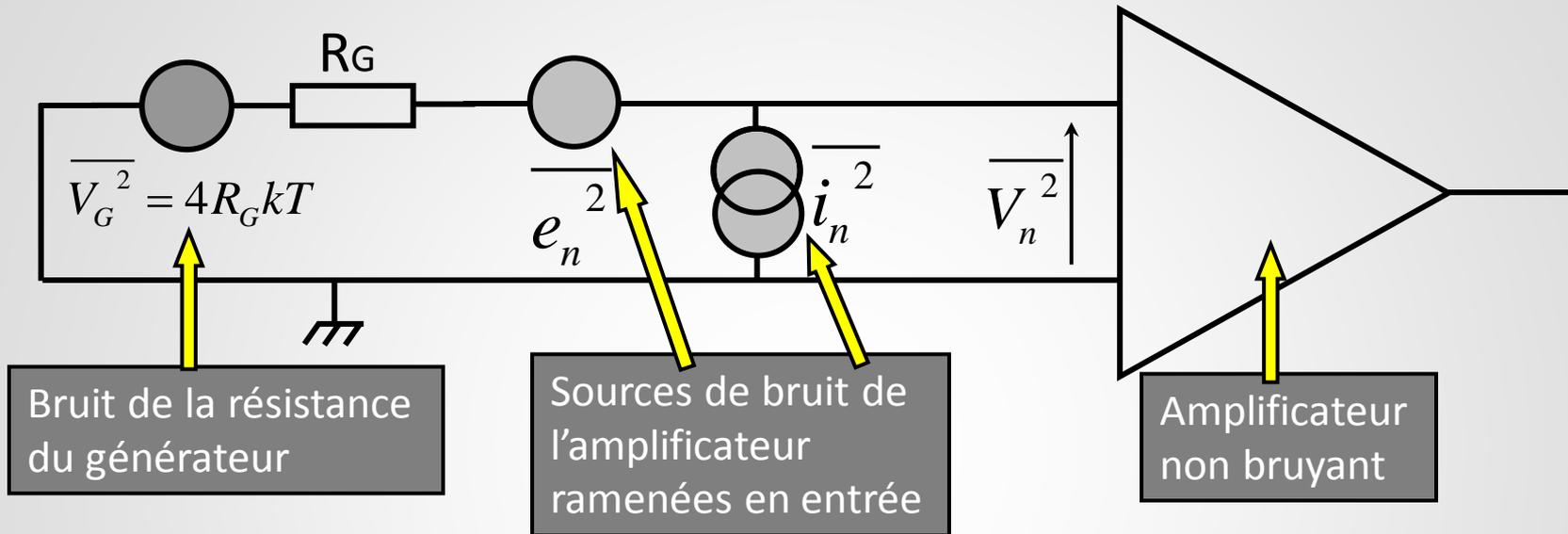
□ Composition des sources : Ex : sources de tension

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

$2\overline{V_1V_2} = 0$ 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 :

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

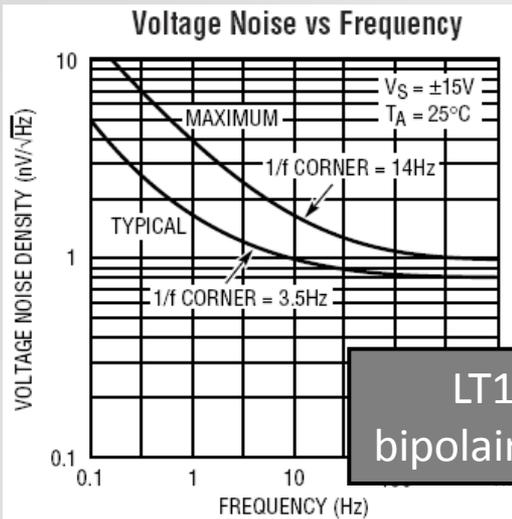
Pourquoi 2 sources ?

- 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 :

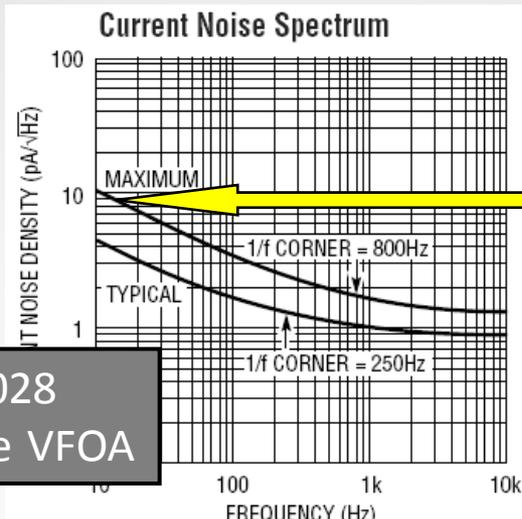
$$\overline{V_{n_{eq}}^2} = \overline{e_n^2} + R_G^2 \overline{i_n^2}$$

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

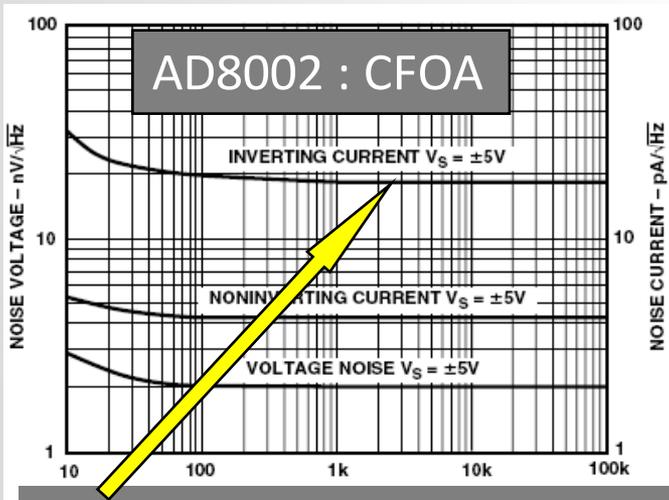
Ordres de grandeur



LT1028
bipolaire VFOA

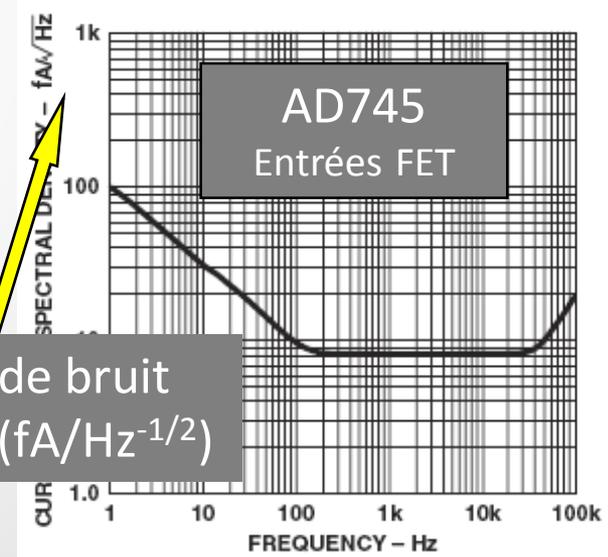


Courant de bruit élevé à cause du courant de base de l'étage d'entrée



Amplificateurs opérationnels commerciaux

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



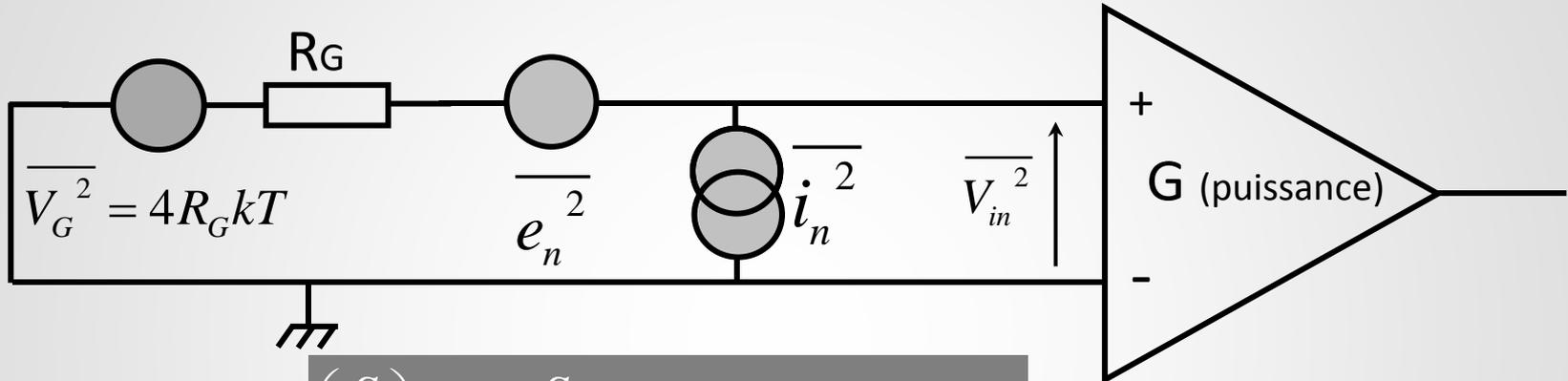
Courant de bruit très faible ($fA/Hz^{-1/2}$)

Sommaire

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

Facteur de bruit : définition

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



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

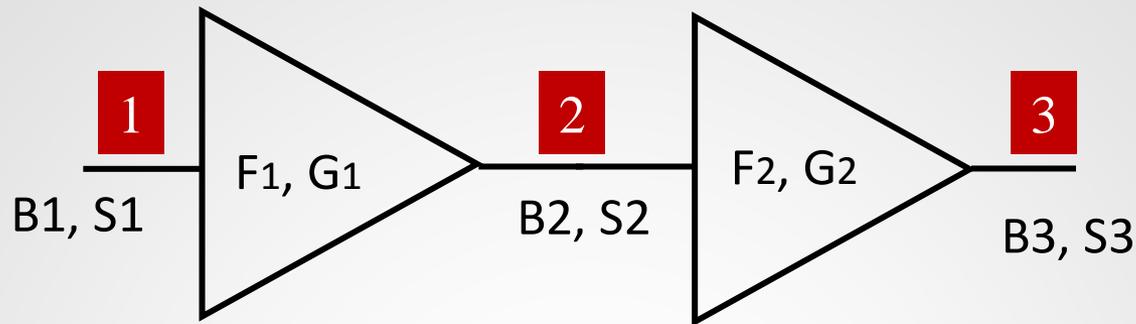
$$\left(\frac{S}{B}\right)_e = \frac{S_e}{4kTR_G}$$

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

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

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

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

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

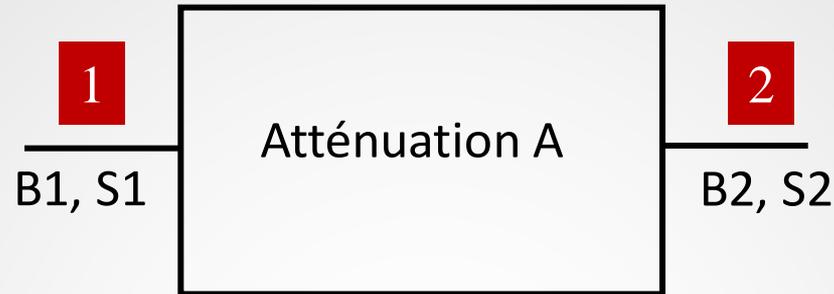
$$F = \frac{\left(\frac{S}{B}\right)_1}{\left(\frac{S}{B}\right)_3} = \frac{S_1}{B_G} \frac{[F_1 G_1 + (F_2 - 1)] G_2 B_G}{G_1 G_2 S_1} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1}$$

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

$$S_2 = S_1 / A$$

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

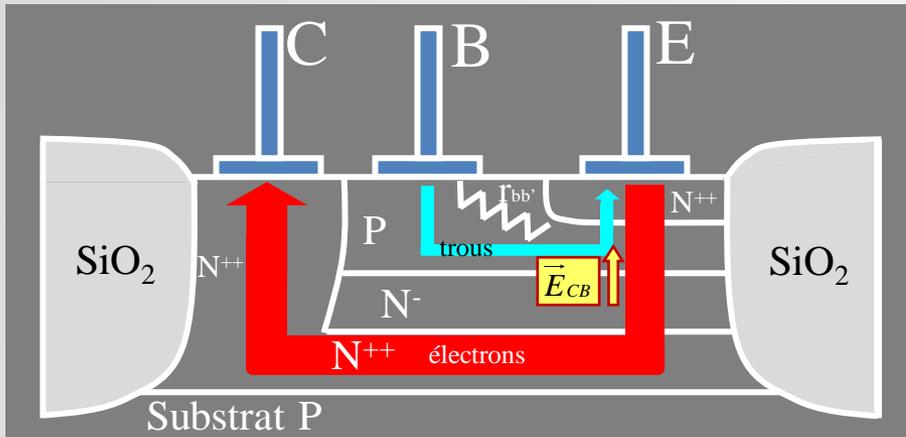
Le facteur de bruit d'un atténuateur est égal à son atténuation

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

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

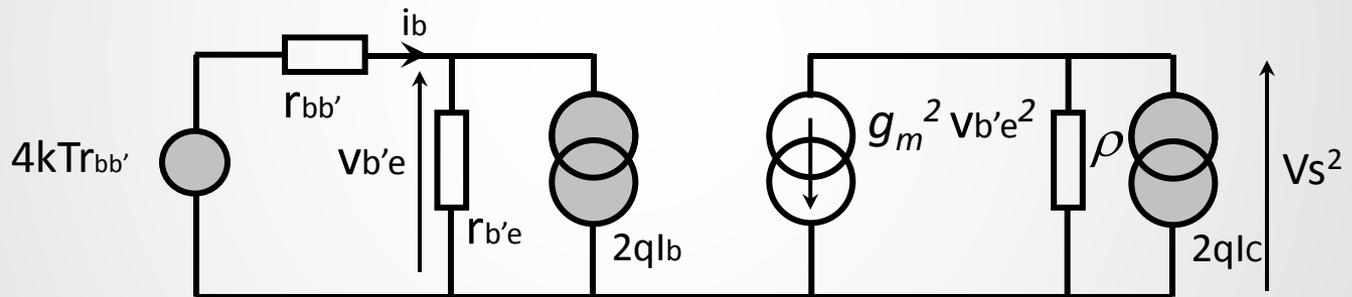
Sommaire

- ❑ 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 :

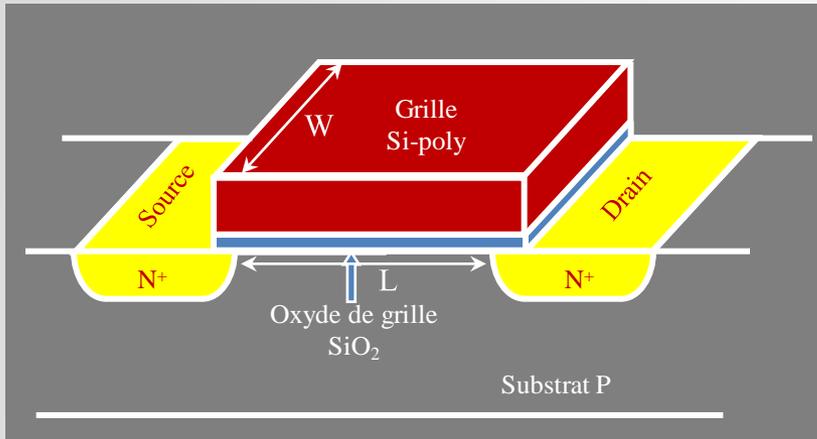
- Le bruit thermique de la résistance d'accès à la base : $r_{bb'}$
- Le shot noise du courant de base
- Le shot noise du courant collecteur



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

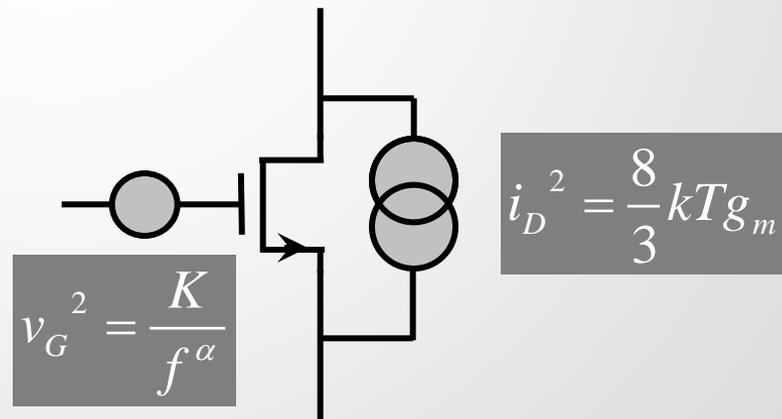
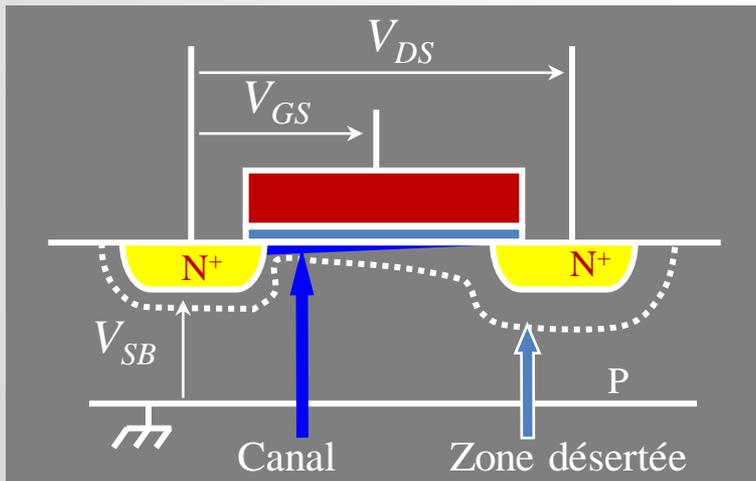
$$V_S^2 = \left\{ 2qI_C + \left[4kTr_{bb'} \left(\frac{r_{b'e}}{r_{bb'} + r_{b'e}} \right)^2 + 2qI_B (r_{bb'} // r_{b'e})^2 \right] g_m^2 \right\} \rho^2$$

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

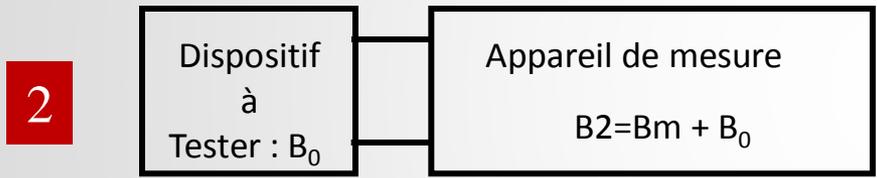
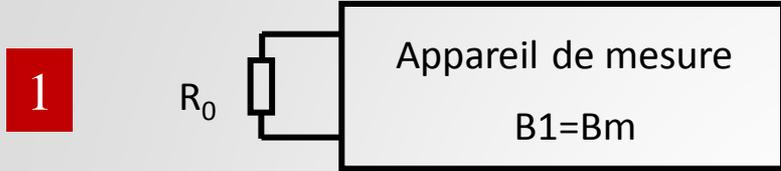


Sommaire

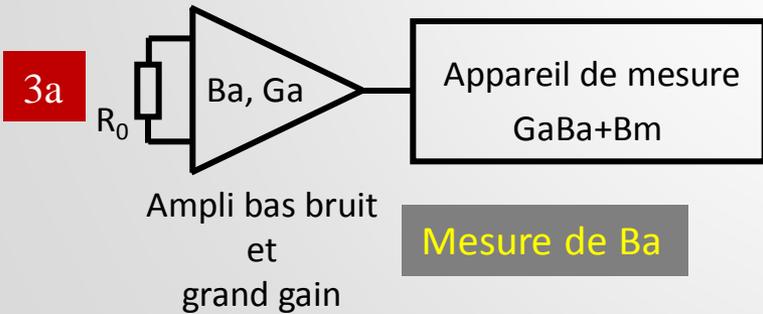
- ❑ Introduction
- ❑ Sources physiques du bruit
- ❑ Influence des éléments réactifs
- ❑ Représentation du bruit dans les circuits
- ❑ Facteur de bruit
- ❑ La modélisation du bruit dans les composants
- ❑ **Mesures du bruit**
 - ❑ Résolution
 - ❑ Mesure RMS
 - ❑ Mesure des densités spectrales
- ❑ Simulations

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**



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



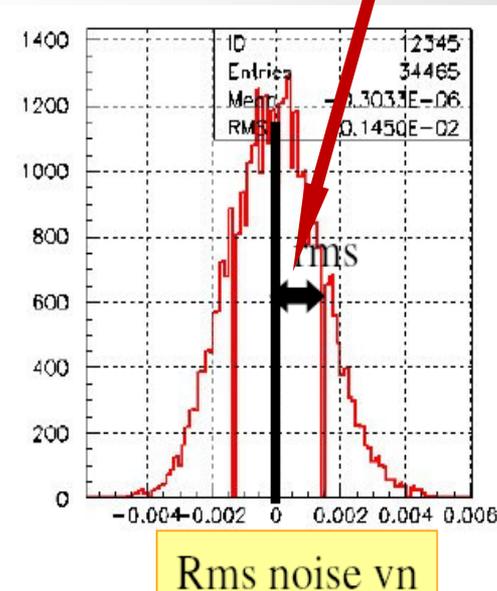
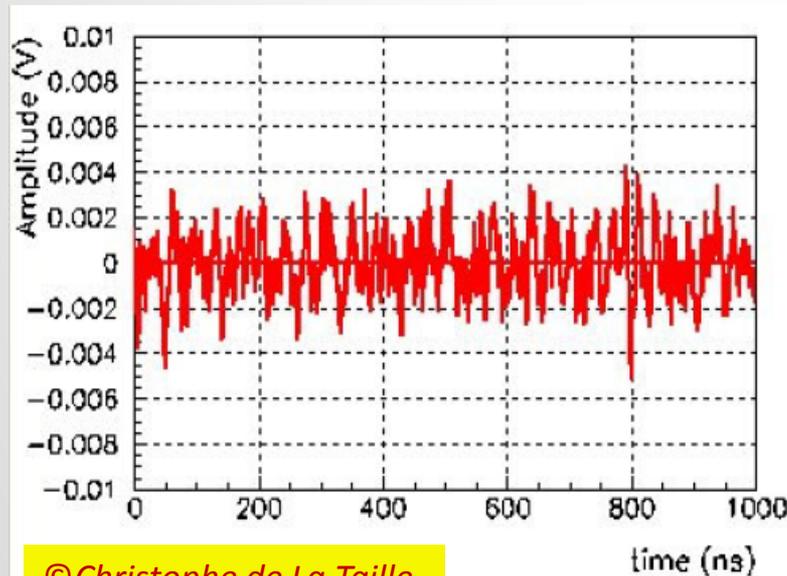
Mesure de Ba



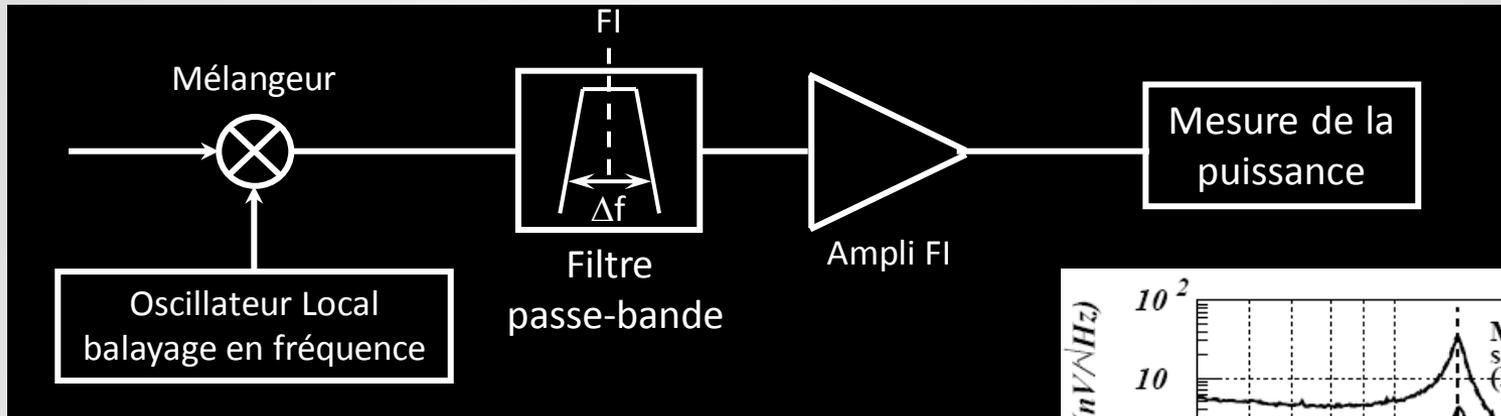
$$B_0 = (B3 - B1) / Ga - Ba$$

Mesure du bruit RMS

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

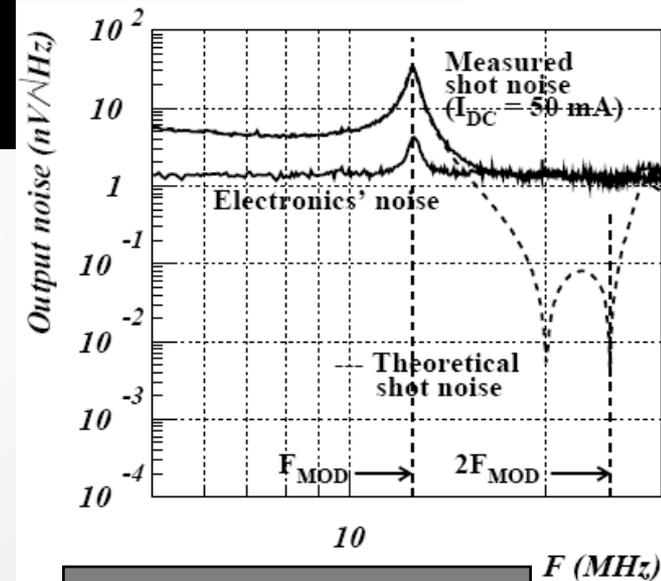


□ Appareil de mesure : Analyseur de spectre



- 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

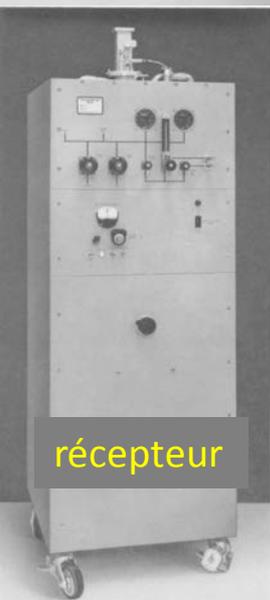
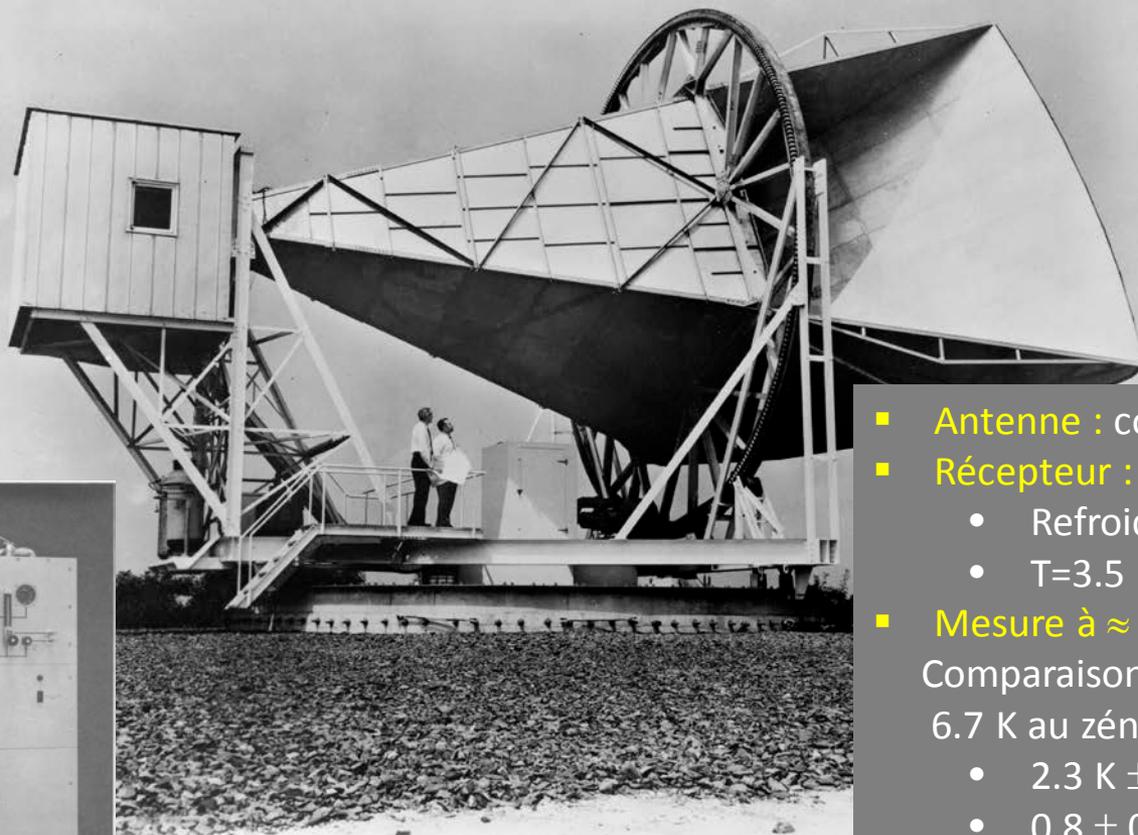
- L'analyseur de spectre est un appareil bruyant ($\text{en} \approx 20 \text{ nVHz}^{-1/2} \Leftrightarrow F \approx 27 \text{ dB}$)
- On utilise un ampli bas bruit : $G \approx 40 \text{ dB}$, $\sqrt{\text{en}^2} \approx 1 \text{ nVHz}^{-1/2}$



Exemple : Bruit des préamplis des photodiodes VIRGO

Découverte du CMB (A. Penzias et R. Wilson 1965 → Nobel 1978)

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

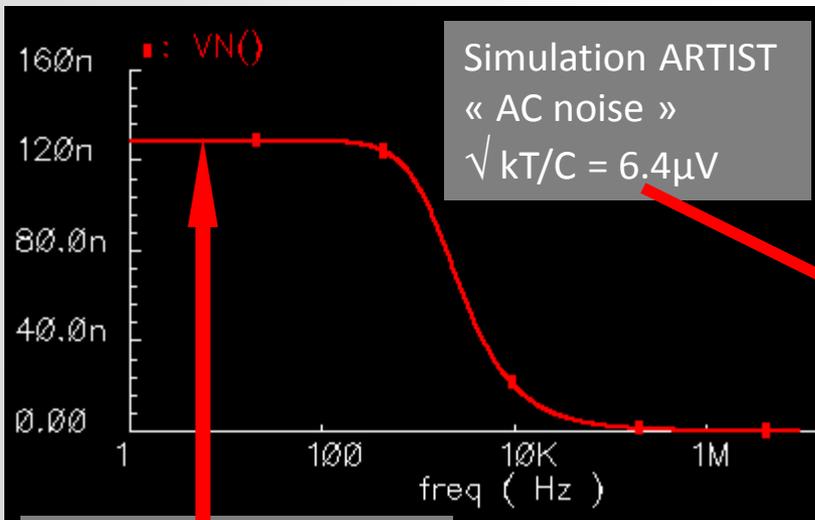
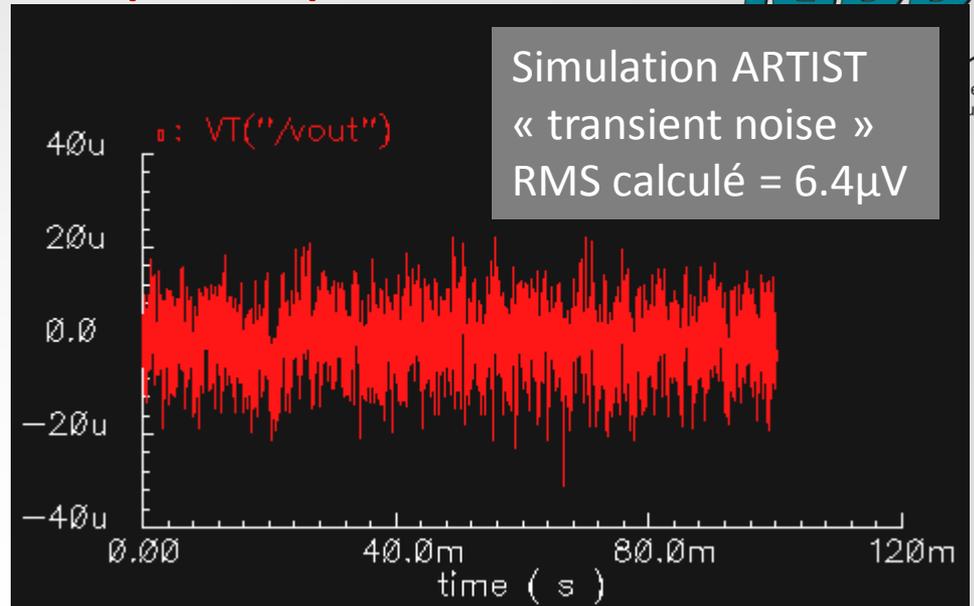
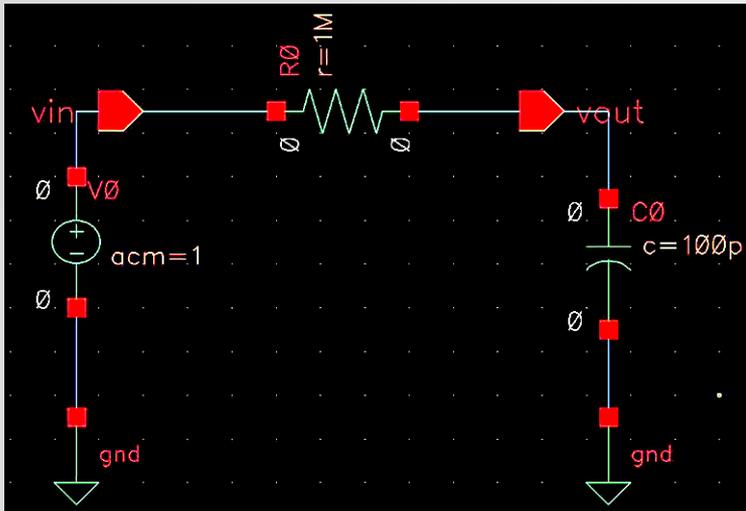


récepteur

- **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
 - ❑ Exemples



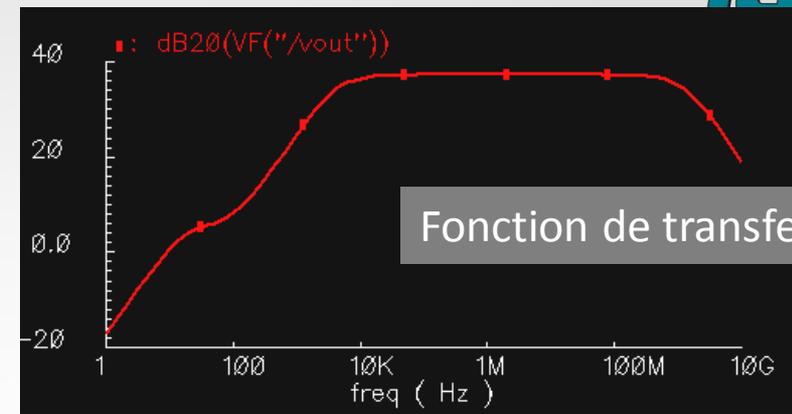
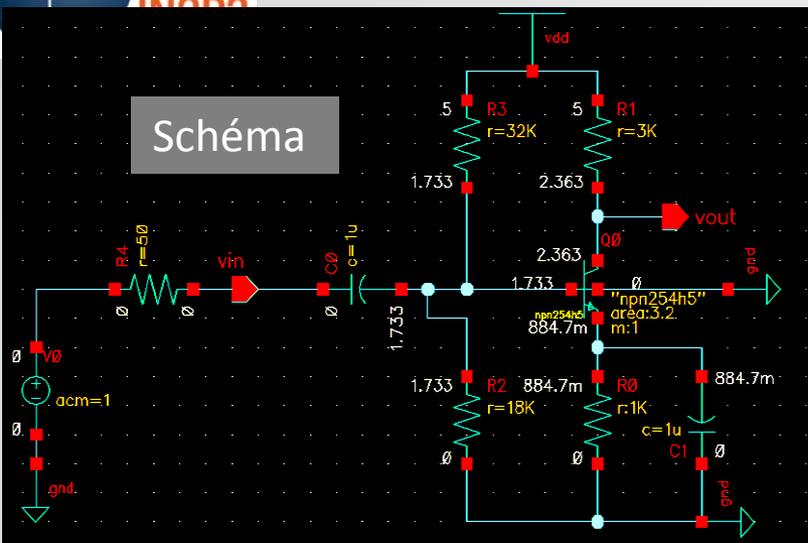
- La simulation « transient noise » est utile pour les systèmes non linéaires ou échantillonnés
- C'est une simulation longue : 15s CPU contre 90ms pour AC pour un simple RC !

Results Display Window

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

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



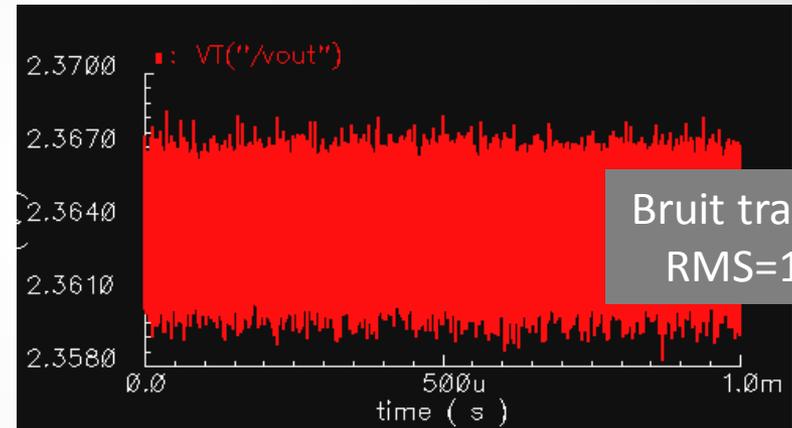
Fonction de transfert

Results Display Window

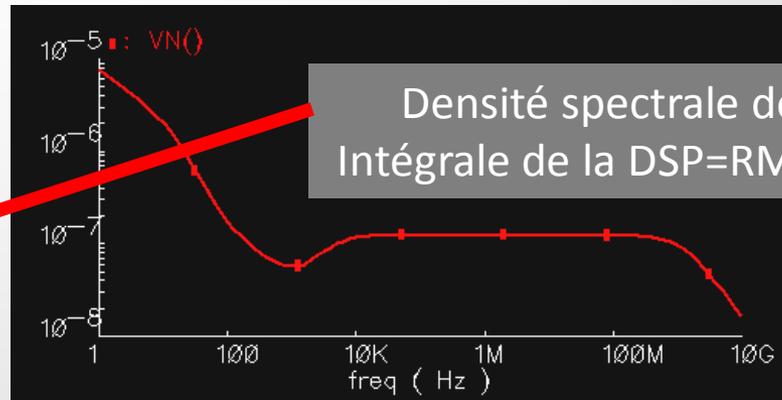
Device	Param	Noise Contribution	% Of Total
/Q0	rbi	0.000856333	48.60
/R4	rn	0.000667536	29.53
/Q0	itzf	0.000428428	12.16
/Q0	rbx	0.000258015	4.41
/Q0	re	0.000227711	3.44
/Q0	ibe	0.000145417	1.40
/R1	rn	7.00595e-05	0.33
/R2	rn	3.51828e-05	0.08
/R3	rn	2.63871e-05	0.05
/Q0	fn	7.93402e-06	0.00
/R0	rn	8.62909e-07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

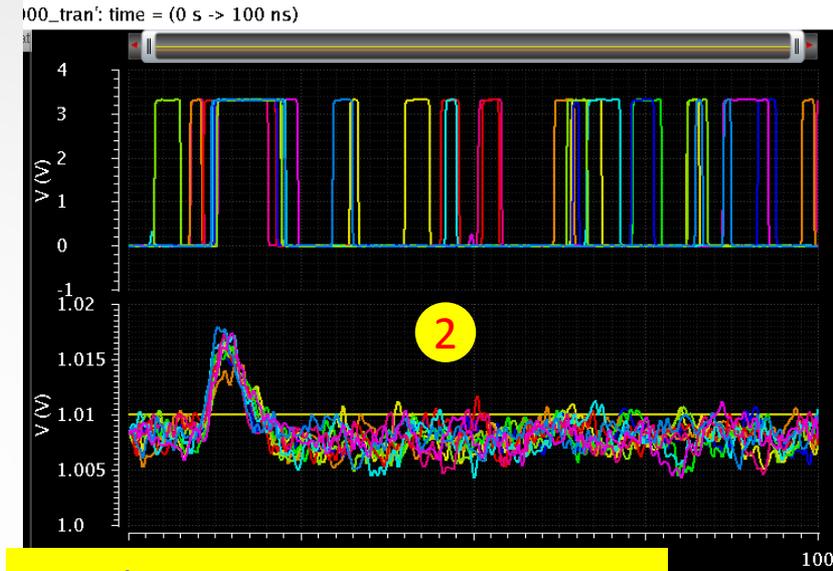
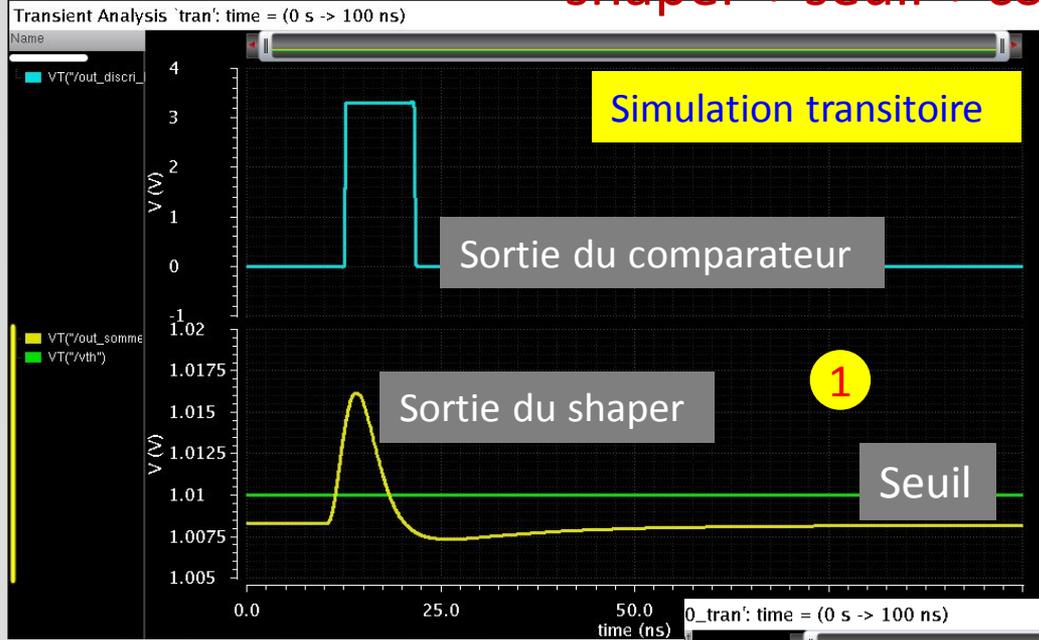


Bruit transitoire
RMS=1.2mV



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

Intérêt de la simulation « transient noise » : shaper + seuil + comparateur



Simulations « transient noise »

- 1 la sortie du comparateur est (apparemment) correcte
- 2 même seuil qu'en 1 : les faux déclenchements apparaissent
- 3 en augmentant le seuil : 100% de déclenchements
- 4 seuil trop haut : 30% de coups ratés

