



**HAL**  
open science

# Bruits en Électronique - Mesures de Bruits

Damien Prêle

► **To cite this version:**

Damien Prêle. Bruits en Électronique - Mesures de Bruits. École d'ingénieur. France. 2021. hal-03767381

**HAL Id: hal-03767381**

**<https://cel.hal.science/hal-03767381>**

Submitted on 1 Sep 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Bruits en Électronique

## *Mesures de Bruits*

Damien PRÊLE

École d'Ingénieur Denis Diderot - 2<sup>e</sup> A - S2 - GP

2 mars 2021



# Plan

## 1 Introduction

- L'amplitude du bruit
- Fonction de transfert
- Source de bruit calibrée

## 2 Méthodes de mesure

- Méthode de la fonction de transfert
- Méthode de la source de bruit calibrée
- Appareils de mesures

## 3 Exemple de mesure

- Banc de mesure
- Pré-amplification
- Mesure



# Amplitude des bruits électroniques

L'amplitude des bruits est difficilement mesurable directement. Un analyseur de spectre comme le HP89410 est caractérisé par un bruit de  $8nV/\sqrt{Hz}$  à  $10kHz$  ; soit un "seuil" de plus (avec le  $1/f$ ) de  $80 nV_{RMS}$  sur  $100 Hz$ .

## Ordre de grandeur des bruits intrinsèques (sur $100 Hz$ et à $300 K$ )

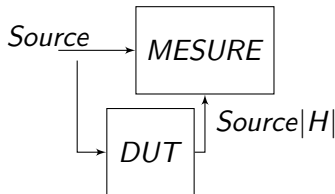
Type de bruit	Sources de bruit	Tension	Courant
Thermique	$R = 1k\Omega$	$40nV_{RMS}$	$40pA_{RMS}$
Grenaille	$Diode _{1mA}$	$4,6nV_{RMS}$	$180pA_{RMS}$
Excès	$R = 1k\Omega _{\frac{NI}{1V} = -20dB}$	$140nV_{RMS}$	$140pA_{RMS}$

Il faut donc nécessairement utiliser un **préamplificateur bas bruit** et savoir soustraire les contributions de la chaîne de mesure. La mesure en valeur RMS prend également en compte la **bande passante** qui est conditionnée par la chaîne de mesure (La fonction de transfert de la chaîne de mesure doit donc également être prise en compte)

Afin de **ramener le bruit en entrée** d'une chaîne de mesure (source équivalente d'entrée) il est indispensable de connaître la **fonction de transfert** de la chaîne de mesure.

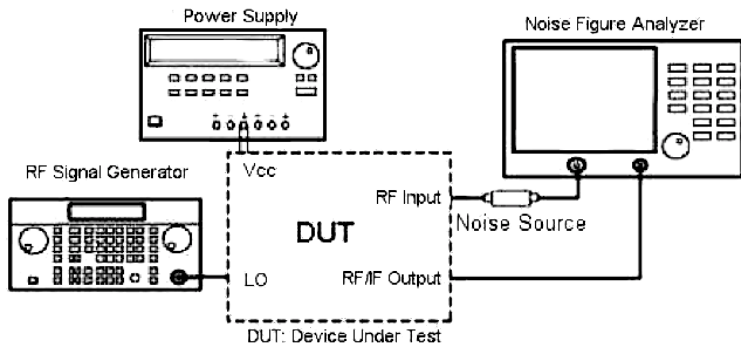
⇒ Pour cela on injecte un signal sinusoïdale (de plus grande amplitude que le bruit) pour déterminer à plusieurs fréquences la fonction de transfert  $|H|$ .

- Soit on connaît précisément le spectre de la source → la mesure du signal de sortie =  $|H| \times$  entrée suffit à déterminer la fonction de transfert  $|H|$  du dispositif étudié (DUT).
- Soit on mesure à la fois l'entrée (source) et la sortie du DUT  
→  $|H| = \frac{\text{sortie}}{\text{entrée}}$



## Mesure de bruit à l'aide de source de bruit

En  $\mu$ Onde, on mesure le bruit d'une chaîne d'amplification en plaçant une source de bruit calibrée en entrée :



Noise Figure Measurement Techniques, <http://www.tutorialsweb.com>

On augmente l'amplitude du bruit jusqu'à doubler la puissance de bruit en sortie.

# Plan : Méthodes de mesure - Source de bruit calibrée

## 1 Introduction

- L'amplitude du bruit
- Fonction de transfert
- Source de bruit calibrée

## 2 Méthodes de mesure

- Méthode de la fonction de transfert
- Méthode de la source de bruit calibrée
- Appareils de mesures

## 3 Exemple de mesure

- Banc de mesure
- Pré-amplification
- Mesure



# Méthodes de mesure de bruit

Il y a donc deux "grandes" méthodes de mesure de bruit:

- **Méthode de la fonction de transfert**

On mesure le bruit de sortie que l'on ramène en entrée après avoir mesuré la fonction de transfert.

- **Méthode de la source de bruit calibrée**

On applique une source de bruit en entrée jusqu'à doubler (en puissance) le bruit de sortie





# Plan : Méthodes de mesure - Méthode de la fonction de transfert

## 1 Introduction

- L'amplitude du bruit
- Fonction de transfert
- Source de bruit calibrée

## 2 Méthodes de mesure

- Méthode de la fonction de transfert
- Méthode de la source de bruit calibrée
- Appareils de mesures


## 3 Exemple de mesure


- Banc de mesure
- Pré-amplification
- Mesure



# Méthode de la fonction de transfert

- 1 Mesure de la **fonction de transfert** :  $|H| = \frac{V_{out}}{V_{in}}$
- 2 Mesure du **bruit en sortie** :  $e_{n_{out}}$
- 3 Calcul du **bruit ramené en entrée**  $e_{n_{in}} = \frac{e_{n_{out}}}{|H|}$

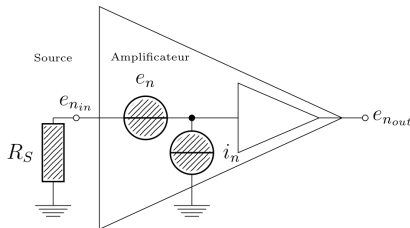
 La fonction de transfert est susceptible de dépendre de l'impédance de source.

 La mesure de tension de bruit nécessite de court-circuiter l'entrée.

- pour cela on utilisera soit une capacité (le shunt n'est alors valable qu'à haute fréquence);
- soit une impédance équivalente à celle de la source (le bruit ramené en entrée ne sera alors ni la source équivalente de tension, ni celle de courant; il faudra également tenir compte du bruit généré par cette impédance.)

# Mesure des sources de bruit ramenées en entrée (1)

Si pour des raisons de fonctionnement (polarisation de l'étage d'entrée) il n'est pas possible de court-circuiter l'entrée ou de la "laisser en l'air", le bruit ramené en entrée combine  $e_n$ ,  $i_n$  ainsi que le bruit de la source  $R_S$  :

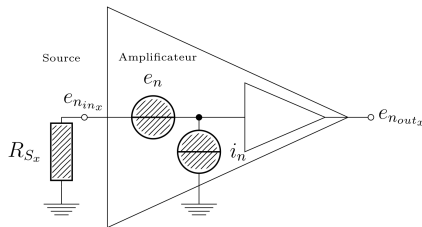


$$e_{n_{in}}^2 = 4k_B TR_S \Delta f + e_n^2 + i_n^2 R_S^2 + \overbrace{2C e_n i_n R_S}^{\text{corrélation}} \quad i_{n_{in}}^2 = \frac{e_{n_{in}}^2}{R_S^2}$$

$e_{n_{in}} = \frac{e_{n_{out}}}{|H|}$  ; On considère l'impédance d'entrée de l'amplificateur  $Z_{in} \gg R_S$  ; C est le facteur de corrélation

## Mesure des sources de bruit ramenées en entrée (2)

Si on place successivement en entrée de l'amplificateur deux résistances de source  $R_{S_x}$  (par exemple  $R_{S_1} = 0\Omega$  et  $R_{S_2} = 1k\Omega$ )



On obtient deux expressions faisant intervenir les sources équivalentes  $e_n$  et  $i_n$ :

$$\begin{cases} e_{n_{in_1}}^2 \approx 4k_B TR_{S_1} \Delta f + e_n^2 + i_n^2 R_{S_1}^2 \\ e_{n_{in_2}}^2 \approx 4k_B TR_{S_2} \Delta f + e_n^2 + i_n^2 R_{S_2}^2 \end{cases}$$

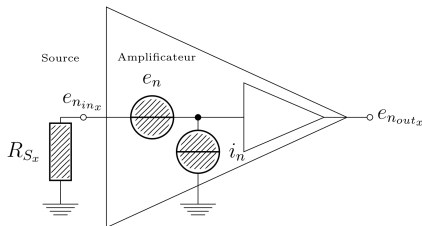
$$e_{n_{in_x}} = \frac{e_{n_{out_x}}}{|H|}$$

## Mesure des sources de bruit ramenées en entrée (3)

$$\left\{ \begin{array}{l} e_n^2 \approx e_{n_{in1}}^2 - 4k_B TR_{S_1} \Delta f - i_n^2 R_{S_1}^2 \approx e_{n_{in2}}^2 - 4k_B TR_{S_2} \Delta f - i_n^2 R_{S_2}^2 \\ i_n^2 \approx \frac{e_{n_{in1}}^2 - 4k_B TR_{S_1} \Delta f - e_n^2}{R_{S_1}^2} \approx \frac{e_{n_{in2}}^2 - 4k_B TR_{S_2} \Delta f - e_n^2}{R_{S_2}^2} \\ e_n^2 \approx e_{n_{in1}}^2 - 4k_B TR_{S_1} \Delta f - \frac{e_{n_{in2}}^2 - 4k_B TR_{S_2} \Delta f - e_n^2}{R_{S_2}^2} R_{S_1}^2 \\ i_n^2 \approx \frac{e_{n_{in1}}^2 - 4k_B TR_{S_1} \Delta f - e_{n_{in2}}^2 + 4k_B TR_{S_2} \Delta f + i_n^2 R_{S_2}^2}{R_{S_1}^2} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} e_n^2 \left( 1 - \frac{R_{S_1}^2}{R_{S_2}^2} \right) \approx e_{n_{in1}}^2 - \frac{R_{S_1}^2}{R_{S_2}^2} e_{n_{in2}}^2 - 4k_B TR_{S_1} \Delta f \left( 1 - \frac{R_{S_1}}{R_{S_2}} \right) \\ i_n^2 \left( R_{S_1}^2 - R_{S_2}^2 \right) \approx e_{n_{in1}}^2 - e_{n_{in2}}^2 - 4k_B T \Delta f (R_{S_1} - R_{S_2}) \end{array} \right.$$

## Mesure des sources de bruit ramenées en entrée (4)



$$\left\{ \begin{array}{l} e_n^2 \approx \left| \frac{R_{S_1}^2 e_{n_{in_2}}^2 - R_{S_2}^2 e_{n_{in_1}}^2 - 4k_B T R_{S_1} R_{S_2} \Delta f (R_{S_1} - R_{S_2})}{(R_{S_1}^2 - R_{S_2}^2)} \right| \\ i_n^2 \approx \left| \frac{e_{n_{in_1}}^2 - e_{n_{in_2}}^2 - 4k_B T \Delta f (R_{S_1} - R_{S_2})}{(R_{S_1}^2 - R_{S_2}^2)} \right| \end{array} \right.$$

# Plan : Méthodes de mesure - **Méthode de la source de bruit calibrée**

## 1 Introduction

- L'amplitude du bruit
- Fonction de transfert
- Source de bruit calibrée

## 2 Méthodes de mesure

- Méthode de la fonction de transfert
- **Méthode de la source de bruit calibrée**
- Appareils de mesures

## 3 Exemple de mesure

- Banc de mesure
- Pré-amplification
- Mesure



# Méthode de la source de bruit calibrée (1)

- 1 Mesure du **bruit en sortie** en l'absence de source:  $e_{n_{out_0}}$
  - 2 Mesure du **bruit en sortie** avec un générateur de bruit en entrée:  $e_{n_{out_n}}$
  - 3 Ajustement de l'amplitude de la source calibrée jusqu'au **doublement du bruit de sortie**  $e_{n_{out_n}}^2 = 2 \times e_{n_{out_0}}^2$
- ☞ Il n'y a qu'une mesure "relative (avec/sans source)" de bruit de sortie à faire
- ☞ La valeur du bruit ramené en entrée est directement l'amplitude de la source



## Méthode de la source de bruit calibrée (2)

Ajustement de l'amplitude de la source de bruit calibrée ( $e_{n_S}$ ) placée en entrée de la chaîne d'amplification  $|H|$  afin d'obtenir le doublement (en puissance) du bruit de sortie :

$$e_{n_{out}}^2 = |H|^2 \left( \overbrace{e_{n_{in}}^2 + e_{n_S}^2}^{e_{n_{in0}}^2} \right) = 2 \times |H|^2 \left( \overbrace{e_{n_{in}}^2 + 0}^{e_{n_{in0}}^2} \right)$$

→ **L'amplitude de la source calibrée est alors égale à la source de bruit ramenée en entrée :**

$$e_{n_{in}} = e_{n_S}$$

→ **La fonction de transfert  $|H|$  peut également être retrouvée :**

$$|H|^2 = \frac{e_{n_{outn}}^2 - e_{n_{out0}}^2}{e_{n_S}^2}$$

# Plan : Méthodes de mesure - Appareils de mesures

## 1 Introduction

- L'amplitude du bruit
- Fonction de transfert
- Source de bruit calibrée

## 2 Méthodes de mesure

- Méthode de la fonction de transfert
- Méthode de la source de bruit calibrée
- Appareils de mesures

## 3 Exemple de mesure

- Banc de mesure
- Pré-amplification
- Mesure



## Utilisation d'un pré-amplificateur

- **Etude du bruit d'un amplificateur à fort gain :**  
**L'amplificateur fait lui-même office de pré-amplificateur** et la mesure de bruit s'effectue à sa sortie.
- **Etude du bruit d'un composant, d'un détecteur ou d'un amplificateur bas bruit à faible gain :**  
L'amplitude des signaux mesurés est alors du même ordre de grandeur que la limite de détection des appareils de mesure.  
→ l'utilisation d'un **pré-amplificateur bas bruit est alors nécessaire pour élever l'amplitude des bruits à un niveau mesurable.**

☞ Il faut alors déterminer les contributions en bruit apportées par le pré-amplificateur.

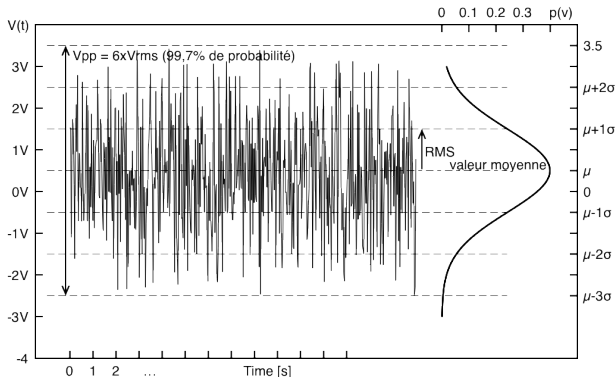
Idéalement, ces contributions doivent être négligeables devant le bruit mesuré

→ le pré-amplificateur n'apporte alors qu'un gain.



# Mesure de bruit à l'oscilloscope


Il est possible d'évaluer l'amplitude du bruit à l'aide d'un oscilloscope. Pour cela il faut avoir une idée des **propriétés statistiques du bruit mesuré**. Dans le cas d'un **bruit blanc gaussien**, l'amplitude crête à crête mesurée à l'oscilloscope est de l'ordre de 5 à 6 fois l'amplitude efficace :



Il faut connaître  $\Delta f$  sur laquelle s'effectue la mesure pour remonter à la DSP de bruit

# Mesure crête à crête à l'oscilloscope

- 1 Mesure de l'**amplitude crête à crête**:  $V_{pp}$
- 2 Calcul de la **valeur efficace**:  $V_{RMS} \approx \frac{V_{pp}}{6}$
- 3 Estimation de la **bande équivalente de bruit**:  $\Delta f \approx \frac{\pi}{2} \times f_c$
- 4 Calcul de la **DSP** de bruit:  $\sqrt{S_v} \approx \frac{V_{RMS}}{\sqrt{\Delta f}}$

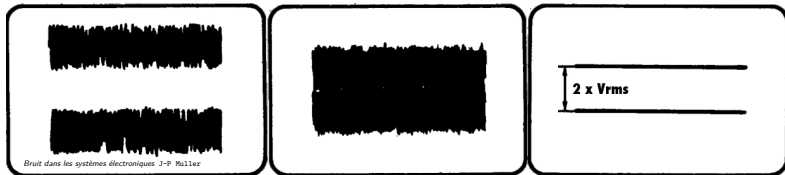
🔗 Sur un oscilloscope à **tube cathodique** il faut augmenter l'intensité au maximum pour estimer correctement l'amplitude crête à crête. 

🔗 Sur un oscilloscope "**numérique**" l'amplitude crête à crête peut être directement mesurée par l'appareil.

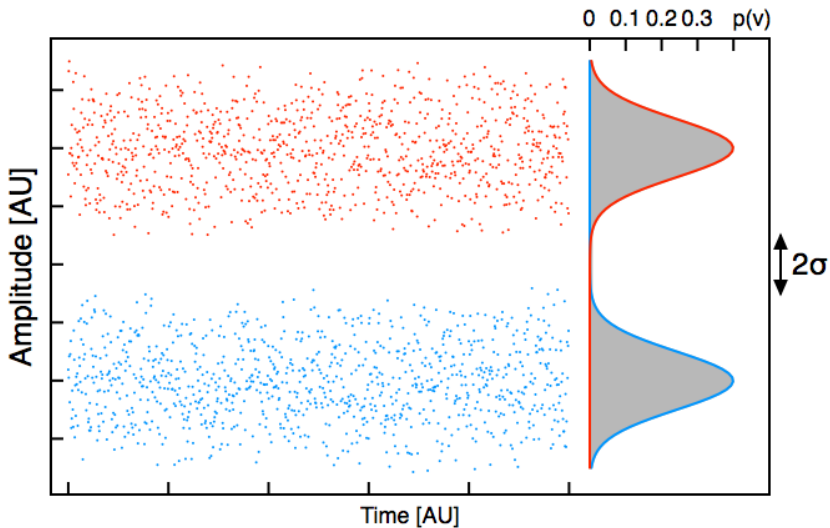
# Mesure tangentielle à l'oscilloscope

- 1 On applique le **même bruit sur deux entrées** d'un oscilloscope (les deux entrées ont le même calibre).
- 2 On **rapproche les deux traces jusqu'à les confondre** (disparition de la "bande" entre les traces).
- 3 On **débranche les deux entrées** (ou on se met en mode "GND").

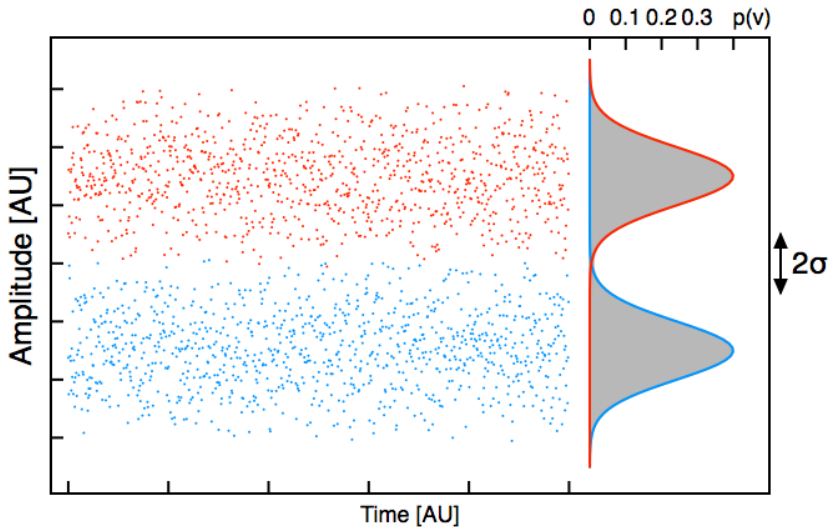
On mesure deux fois la valeur RMS entre les deux traces :



# Mesure tangentielle

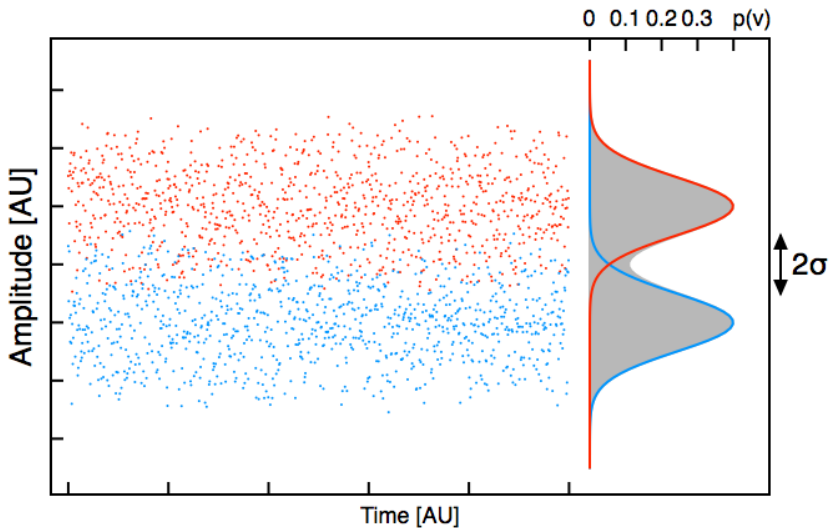


# Mesure tangentielle

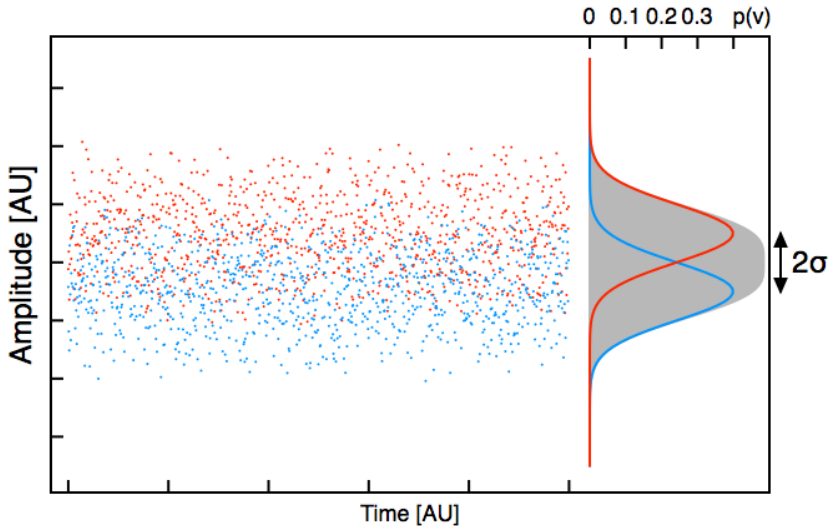




# Mesure tangentielle



# Mesure tangentielle



# Analyseur de spectre

L'analyseur de spectre permet de mesurer le bruit directement en terme de DSP, en tension ou en puissance. Il faut définir 3 paramètres pour effectuer une mesure de bruit:

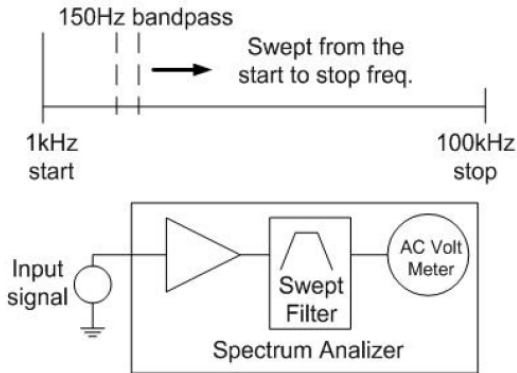
- 1 **Tune** - *frequency*  
Fréquence centrale autour de laquelle effectuer la mesure.
- 2 **Zoom** - *SPAN*  
Bande de fréquence sur laquelle effectuer la mesure.
- 3 **Boom** - *amplitude*  
Calibre en amplitude du signal à analyser.

La résolution fréquentielle (RBW) de l'analyse sera d'autant plus fine que le SPAN sera étroit.



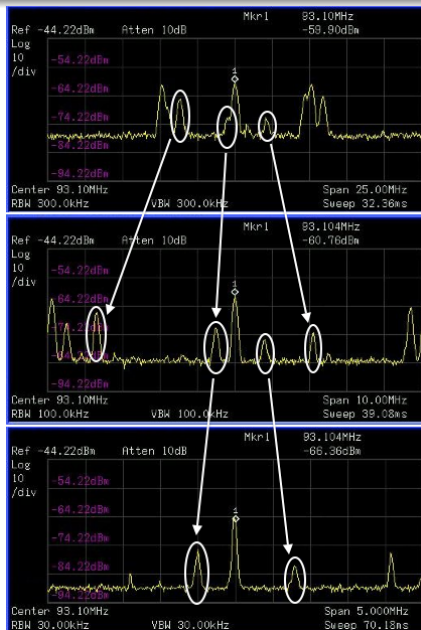
## Principe de l'analyse spectrale

Chaque mesure de bruit est faite sur une bande de fréquence (résolution spectrale) :  $RBW$ . Ce filtre passe-bande joue le rôle de bande équivalente de bruit  $\Delta f$  pour la mesure harmonique du spectre.



Analysis and measurement of intrinsic noise in Aop - Introduction to noise measurement A. Ray





Au fur et à mesure que l'on diminue le SPAN, on peut affiner la résolution spectrale (RBW). Cela permet de :

- Dissocier des raies spectrales proches
- Diminuer le bruit plancher

cette diminution permet de faire apparaître des raies qui étaient noyées dans le bruit plancher

En contrepartie, la diminution de la RBW augmente considérablement la durée de la mesure.

## Conversion dBm $\rightarrow$ V

De plus en plus d'appareils de mesure imposent une adaptation  $50\Omega$  et ne donnent les **niveaux de bruit qu'en dBm**.

$$\text{Bruit}[dBm] = 10 \log \frac{\text{Bruit}[W]}{1mW} \rightarrow \text{Bruit}[W] = 10^{\frac{\text{Bruit}[dBm]}{10}} \times 1mW$$

Cas d'une adaptation  $50\Omega$  :  $\text{Bruit}[V] = \sqrt{50\Omega \times \text{Bruit}[W]}$

$$\text{Bruit}[V] = \sqrt{10^{\frac{\text{Bruit}[dBm]}{10}} \times 1mW \times 50\Omega}$$

Bruit [dBm]	Bruit [W]	Bruit $_{/50\Omega}$ [V]
0	1mW	224mV
-30	1 $\mu$ W	7mV
-60	1nW	224 $\mu$ V
-90	1pW	7 $\mu$ V
-120	1fW	224nV
-150	1aW	7nV
-173	$5 \cdot 10^{-21} W \approx k_B T \Delta f$	$500pV \approx \sqrt{k_B T \Delta f R_0}$ *

\* Seul la moitié de la puissance de bruit disponible est transmise

## Conversion "RMS" → "DSP"

**Le niveau de bruit affiché sur un analyseur de spectre est inversement proportionnel à la résolution spectrale (RBW).**

La DSP de bruit peut être obtenue par simple division de la puissance de bruit par la RBW:

$$\text{Bruit}[dBm/Hz] = \text{Bruit}[dBm] - 10 \log(RBW)$$

$$\text{Bruit}[W/Hz] = \frac{\text{Bruit}[W]}{RBW}$$

$$\text{Bruit}[V/\sqrt{Hz}] = \frac{\text{Bruit}[V]}{\sqrt{RBW}}$$

# Plan : Exemple de mesure - Appareils de mesures

## 1 Introduction

- L'amplitude du bruit
- Fonction de transfert
- Source de bruit calibrée

## 2 Méthodes de mesure

- Méthode de la fonction de transfert
- Méthode de la source de bruit calibrée
- Appareils de mesures

## 3 Exemple de mesure

- Banc de mesure
- Pré-amplification
- Mesure

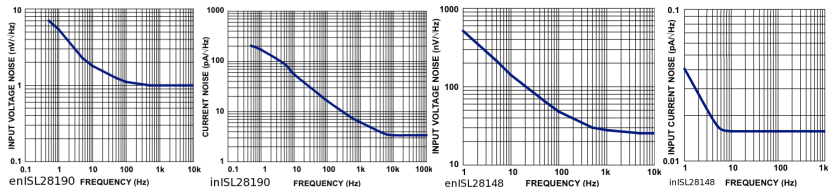




# Exemples d'amplificateurs bas bruit $\triangleleft$

Soit deux amplificateurs bas bruit : un à entrée bipolaire *ISL28190* et l'autre à entrée MOS *ISL28148*

Ils sont donnés par le fabriquant pour avoir un bruit de  $e_n|_{28190} = 1nV/\sqrt{Hz}$  et  $i_n|_{28148} = 16fA/\sqrt{Hz}$



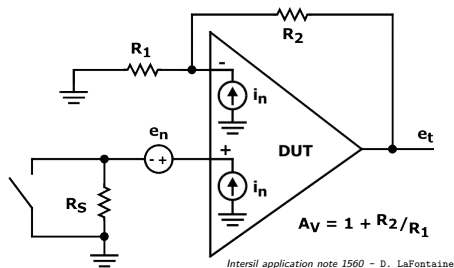
Intersil ISL28190 & ISL28148 datasheet

On cherche à mesurer le bruit ramené en entrée tel qu'il est donné sur la data-sheet :

- 1 Mesure de la source équivalente de bruit ramenée en entrée  $e_n$
- 2 Mesure de la source équivalente de bruit ramenée en entrée  $i_n$

# Montage non-inverseur

- Les Aop (DUT) sont montés en non-inverseur avec
- soit une résistance de source  $R_S$ ,
  - soit un court-circuit :



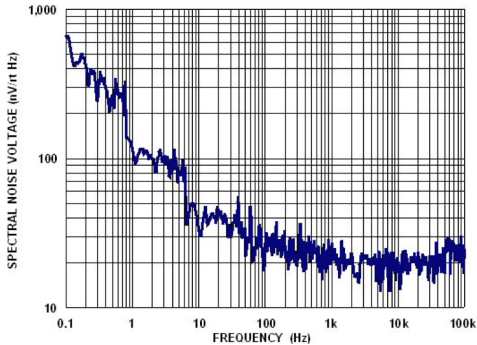
$$R_2 = 10R_1 \quad \rightarrow \quad A_V = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 11 \quad \rightarrow \quad e_t = A_V e_n$$

( $\approx 11nV/\sqrt{Hz}$  pour l'ISL28190)

# Appareils de mesure



On dispose d'un analyseur de spectre HP35670A dont la tension de bruit d'entrée est de  $20\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  avec une forte remontée à basse fréquence :



*Intersil application note 1560 - D. LaFontaine*



# Plan : Exemple de mesure - Pré-amplification

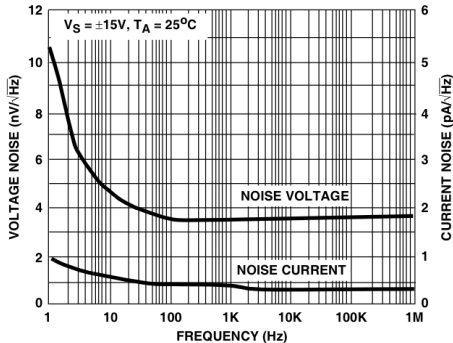
- 1 Introduction
  - L'amplitude du bruit
  - Fonction de transfert
  - Source de bruit calibrée
- 2 Méthodes de mesure
  - Méthode de la fonction de transfert
  - Méthode de la source de bruit calibrée
  - Appareils de mesures
- 3 Exemple de mesure
  - Banc de mesure
  - Pré-amplification
  - Mesure



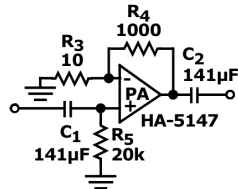
# Pre-amplificateur

On utilise un pre-amplificateur pour "augmenter" le bruit vis-à-vis de l'analyseur.

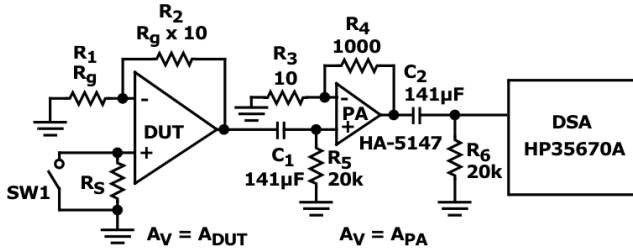
On choisit l'Aop HA-5147 qui possède une grande bande passante (120MHz) pour ne pas modifier "la forme" du bruit du DUT. Sa tension de bruit d'entrée est de plus de  $3nV/\sqrt{Hz}$  mais on le monte en non-inverseur avec un **gain de 101**.



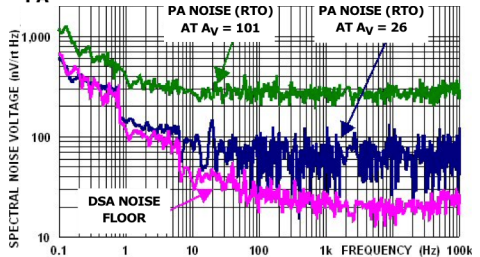
Intersil HA-5147 datasheet & application note 1560



# Chaîne de mesure: "Amélioration du bruit de l'analyseur"



- DUT : *ISL28190* ou *ISL28148*
- PA : *HA-5147*



Intersil application note 1560 - D. LaFontaine

RTO : *Referenced To the Output*



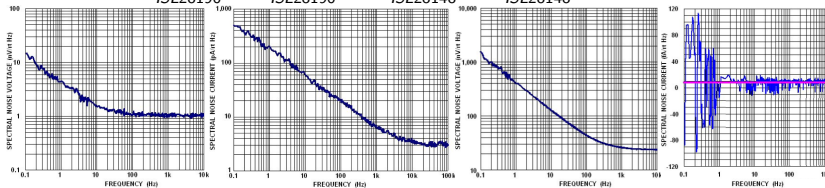
# Plan : Exemple de mesure - Mesure

- 1 Introduction
  - L'amplitude du bruit
  - Fonction de transfert
  - Source de bruit calibrée
- 2 Méthodes de mesure
  - Méthode de la fonction de transfert
  - Méthode de la source de bruit calibrée
  - Appareils de mesures
- 3 Exemple de mesure
  - Banc de mesure
  - Pré-amplification
  - Mesure

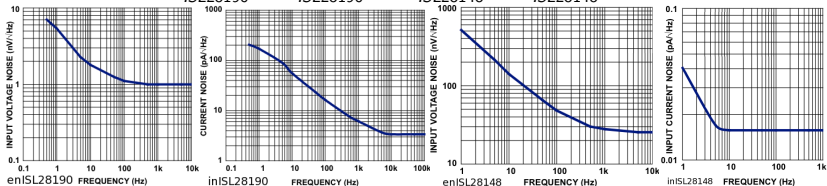


# Mesure vs datasheet des Aop ISL28190 et 28148

Mesures :  $e_{n_{ISL28190}}$  ;  $i_{n_{ISL28190}}$  ;  $e_{n_{ISL28148}}$  ;  $i_{n_{ISL28148}}$



Datasheet :  $e_{n_{ISL28190}}$  ;  $i_{n_{ISL28190}}$  ;  $e_{n_{ISL28148}}$  ;  $i_{n_{ISL28148}}$



Intersil ISL28190 & ISL28148 datasheet & Intersil application note 1560 - D. LaFontaine

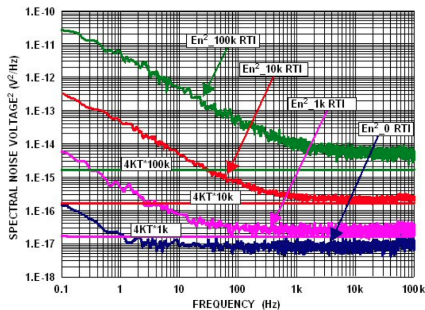




# Utilisation de la chaîne de mesure pour la caractérisation du HA-5147

On utilise un autre Aop HA-5147 en guise de DUT et on mesure le bruit ramené en entrée pour différentes valeurs de résistances de source  $R_S$ :

$$S_v \approx 4k_B TR_S + e_{n_{HA5147}}^2 + i_{n_{HA5147}}^2 R_S^2$$



Intersil application note 1560 - D. LaFontaine

$$i_{n_{HA5147}} \approx \sqrt{\frac{S_v - 4k_B TR_S + e_{n_{HA5147}}^2}{R_S^2}}$$

