

## UNE CARTE SPECIFIQUE POUR ILLUSTRER LES SIGNAUX ALEATOIRE AU GEII DE MARSEILLE PAR Jean Marie Mathieu .

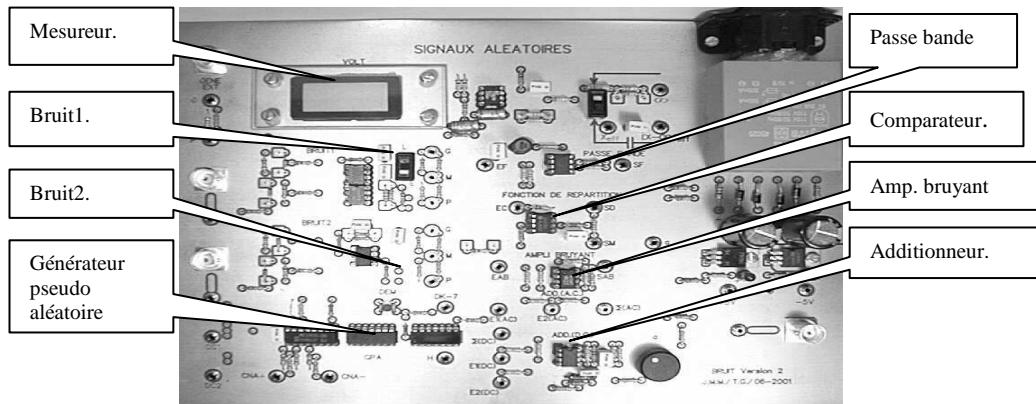
Au département GEII de Marseille, on fait encore des TP réels, avec des mesures réelles, sur des matériels réels. ( en fait la trilogie cours, travaux dirigés et pratique fonctionne toujours pour les deux option EN et RLI ). Les illustrations des principaux thèmes du cours d'électronique se font grâce à des cartes spécifiques ne nécessitant qu'un oscilloscope numérique comme environnement. Le thème choisi est ainsi matérialisé sous forme autonome, peu encombrante, facilement mis en œuvre et transporté selon les besoins des formations. Citons quelques exemples de cartes spécifiques utilisées en deuxième année:

**Signaux numériques et codages.**

**Modulations et architecture IQ.**

**Caractérisation des signaux périodiques et aléatoires, bruit gaussien.**

Cette dernière carte née en 1989, commençant à "rouiller", vient d'être simplifiée, clarifiée et rééditée en 6 exemplaires. Nous allons en décrire sommairement la constitution et les possibilités, elle est le support de deux TP de 4,5h en 2<sup>o</sup> année.

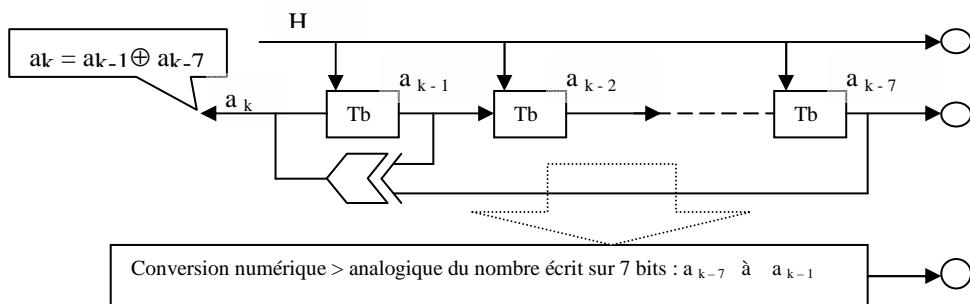


### ***Les fonctions groupées sur la carte signaux périodiques et aléatoires.***

C'est une carte mesurant 25, 20, 5cm, hors tout, directement alimentée sur secteur. Pour les caractéristiques d'ensemble, on note des accès extérieurs par embases BNC, des connections par petits fils bananes de 2mm, des composants CMOS famille HC, des amplificateurs opérationnels à faible tension de déchet alimentés en +5V.

**Mais on y trouve, surtout, les fonctions spécifiques suivantes :**

♥ **Un générateur pseudo aléatoire, GPA,** bâti autour d'un registre à décalage à 7 bits et d'un convertisseur numérique analogique. Il présente des propriétés statistiques simples malgré une apparence chaotique ! ( figures 1, 2, 3 ).



**Figure 1: Le schéma de principe du Générateur Pseudo Aléatoire: dit GPA.**

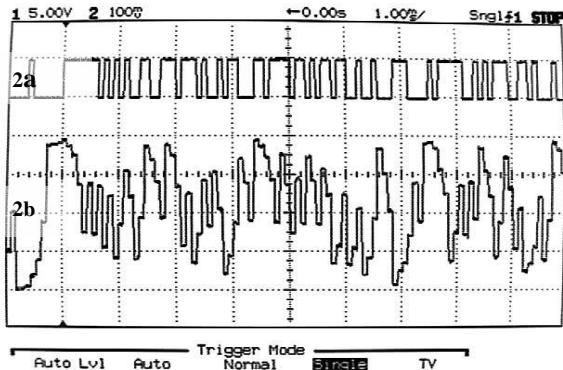


Figure 2a : La suite binaire  $a_k$  à 10kbit/s.  
Figure 2b : le signal après conversion des 7 bits.

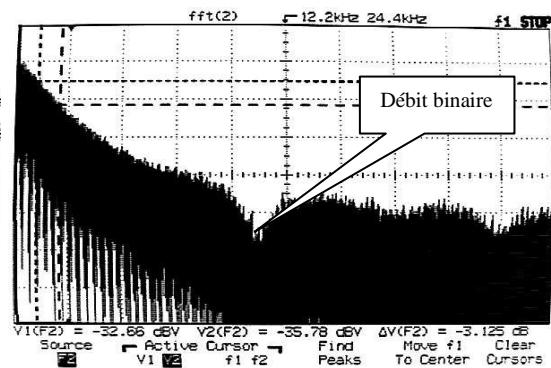


Figure 3 : Le spectre du signal du GPA.

♥ Une source de bruit gaussien centré, BRUIT1, à diodes Zener, qui fournit 3 niveaux ( $\sim 0,3; 0,1; 0,01\text{Veff}$ ) et deux étendues spectrales ( $\sim 5\text{kHz}$  et  $50\text{kHz}$ ). ( figures 4 et 5 )

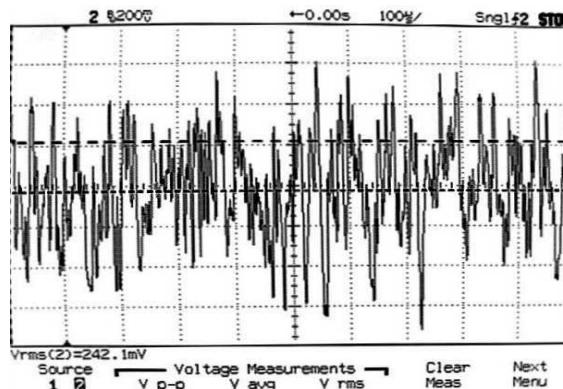


Figure 4 : Le bruit de la source BRUIT1  
( vu sur 1ms, avec un marqueur à la valeur efficace )

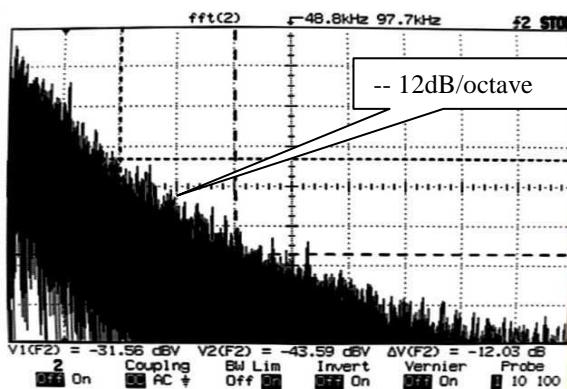


Figure 5 : Le spectre de BRUIT1.

♥ Un générateur de bruit gaussien centré, BRUIT2, construit sur le même principe que BRUIT1, fournissant 3 niveaux ( $\sim 0,3; 0,1; 0,01\text{Veff}$ ) et une étendue spectrale réduite ( $\sim 5\text{kHz}$  ).

♥ Un comparateur à seuil à réglable, suivi d'un moyenneur analogique, donnant l'image de la fonction de répartition  $F_x(a)$  du signal  $x$ , c'est à dire la probabilité  $P(x < a)$ , et permettant le tracé de celle ci.

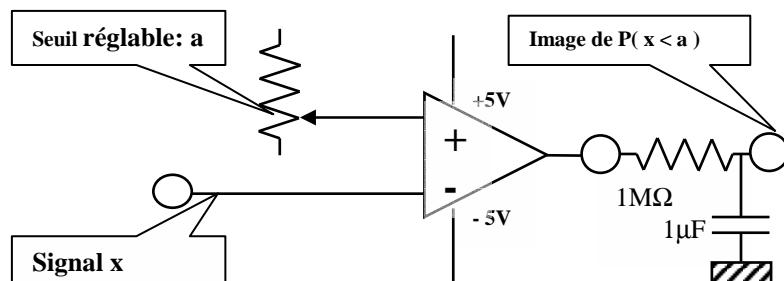


Figure 6 : le comparateur donnant l'image de la probabilité  $P( x < a )$  .

♥ Un filtre passe bande de fréquence centrale 5kHz, permettant d'observer et de modéliser le bruit à bande étroite. ( figures 7, 8 ).

Il permet également l'extraction d'un signal noyé dans le bruit, et de quantifier le rapport signal à bruit C/N avant et après le filtre.

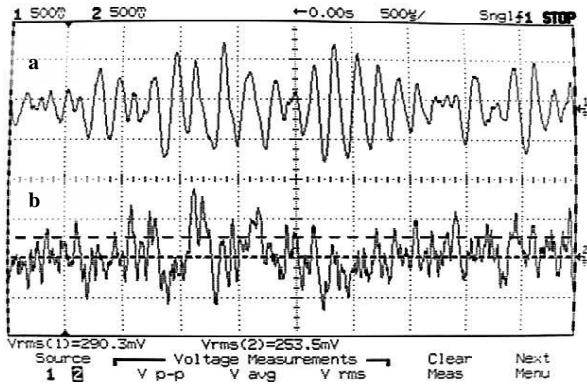


Figure 7a : Le bruit à bande étroite.

Figure 7b : Le même non filtré.

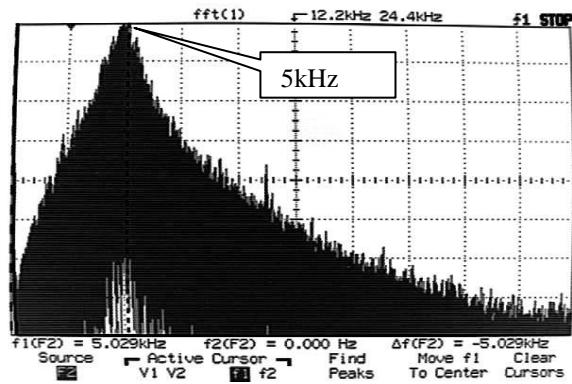


Figure 8 : L'image de la densité spectrale du bruit à bande étroite autour de 5kHz.

♥ Un mesureur universel affichant en Volts, l'écart type, la valeur efficace, la moyenne. ( figure 9 ).

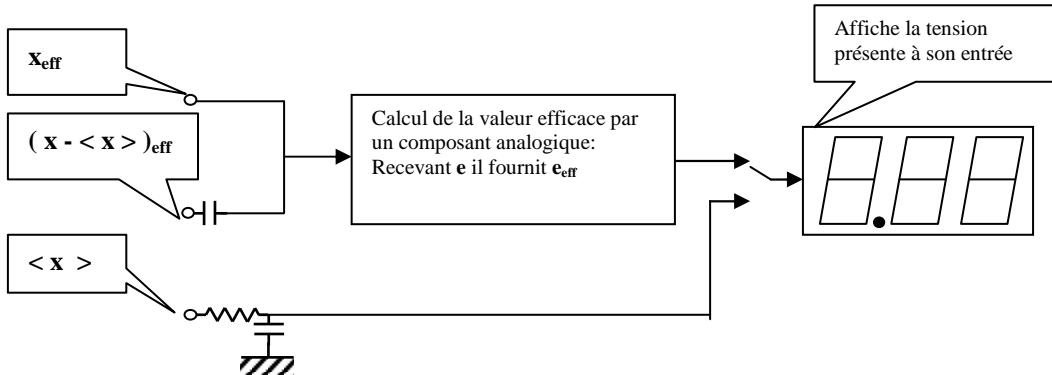


Figure 9 : Principe du "mesureur" de la plaque.

### Les thèmes illustrés qualitativement ou quantitativement sur la carte.

Avec les fonctions décrites ci dessus, on peut vérifier la caractérisation classique des signaux, ainsi que la caractérisation par le spectre, puis la description statistique, on peut concrétiser la notion de corrélation entre signaux aléatoires, enfin on peut montrer l'extraction du signal noyé dans le bruit et estimer le facteur de bruit F.

#### ♣ La caractérisation "classique":

Les trois caractéristiques classiques d'un signal  $x(t)$  : la moyenne  $\langle x \rangle$ ; la valeur efficace  $x_{\text{eff}}$ ; la valeur efficace du signal privé de sa moyenne  $[x - \langle x \rangle]_{\text{eff}}$ , sont accessibles directement par le mesureur et l'afficheur.

On rappelle le rôle des deux contributions d'un signal quelconque:  $\langle x \rangle$  et  $[x(t) - \langle x \rangle]_{\text{eff}}$  puis on insiste sur le bilan de " puissance sur 1  $\Omega$  ( en  $V^2$  )" qui lie les trois caractéristiques:

$$P_x(1\Omega) = x_{\text{eff}}^2 = \langle x \rangle^2 + [x(t) - \langle x \rangle]_{\text{eff}}^2$$

On fait vérifier ce bilan par des mesures sur les signaux périodiques Sinus, Triangle, Impulsion, avec ou sans valeur moyenne. Ces rappels ne semblent pas inutiles, même en 2<sup>o</sup> année !

♣ **La caractérisation statistique:**

C'est la méthode qui permet d'aborder les signaux compliqués ou aléatoires. Le comparateur permet de tracer la répartition du signal  $F_x(a)$  en fonction du seuil  $a$ . On obtient par exemple, pour la source BRUIT1, une répartition gaussienne que les élèves tracent point par point (fig 10). Sachant que la répartition gaussienne prend les valeurs  $F_x(E[x] + \sigma) = 0,84$  et  $F_x(E[x] - \sigma) = 0,16$ , on extrait graphiquement l'écart type  $\sigma$ .

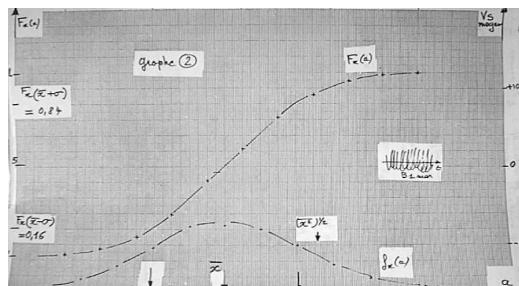


Figure 10 : le graphe de la répartition de BRUIT1.

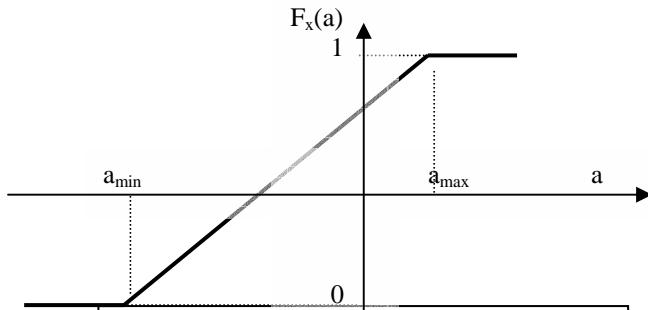


Figure 11 : la répartition du GPA en fonction du seuil a.

Pour la source GPA, qui présente une répartition uniforme (figure 11), on peut extraire facilement la densité de probabilité qui est constante,  $f_x(u) = \frac{\partial F_x(u)}{\partial u}$  puisque par définition on a :  $F_x(a) = P(x < a) = \int_{-\infty}^a f_x(u) du$ .

Le graphe donne pour  $f_x(u)$   $2,5V^{-1}$ , ce qui permet de calculer numériquement les espérances  $E[x]$  et  $E[x^2]$ , grâce aux définitions statistiques :

$$\text{Espérance } E[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} u f_x(u) du \text{ et Carré moyen } E[x^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} u^2 f_x(u) du.$$

Les résultats statistiques et les mesures classiques, faites par le mesureur de la carte, sont comparés dans un tableau comme celui ci :

résultats statistiques.		mesures classiques	
	Calcul numérique, unités		Mesure, unités
Espérance	$E[x]$		$\langle x \rangle$
Carré Moyen	$E[x^2]$		
Racine du carré moyen	$(E[x^2])^{1/2}$		$x_{\text{eff}}$
Variance	$E[x^2] - E^2[x]$		
Ecart type	$(E[x^2] - E^2[x])^{1/2}$		$[x - \langle x \rangle]_{\text{eff}}$

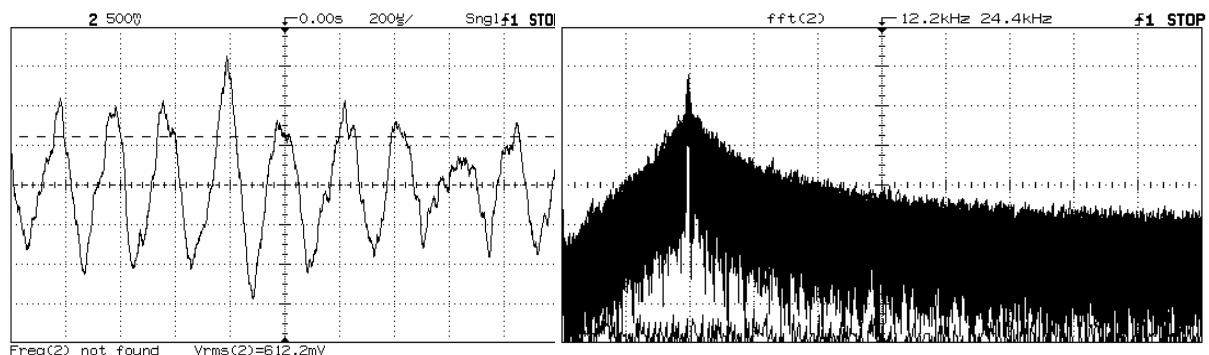
♣ **L'aspect spectral du signal gaussien centré, ou bruit "rose".**

Ici on utilise la fonction FFT de l'oscilloscope numérique, qui ouvre la fenêtre sur un monde passionnant : l'image des densités spectrales de puissance. La source BRUIT1 permet de visualiser deux étendues spectrales et de fixer le modèle de la DSPM par l'expression  $S(f) = S_0 / |1 + jf/f_1|^2$ . En effet, la figure 5, montre une pente du spectre qui vaut  $-12\text{dB/octave}$ . En modifiant  $f_1$ , on constate l'effet entre  $S(f)$  et la puissance moyenne de bruit.

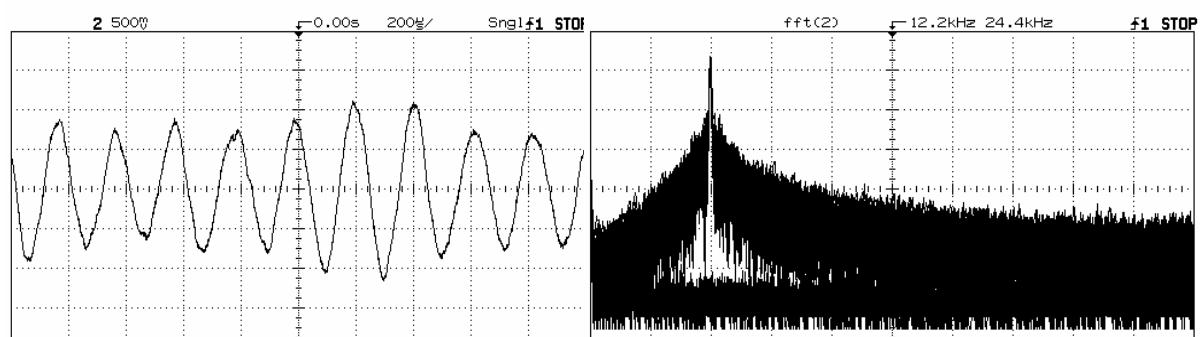
♣ **Le signal noyé dans le bruit et son extraction:**

L'extraction se fait grâce à un modeste passe bande, de bande passante 1 kHz à 3dB, aux alentours de 5kHz. Les deux écrans montrent le signal utile sinusoïdal et le bruit **avant et après filtre**.

Les exemples correspondent à un rapport signal à bruit C/N de 0dB avant filtre et un C/N après de 10dB. Ces oscillosogrammes parlent d'eux même, et montrent aux élèves la nécessité de filtrer à bande étroite le bruit à l'entrée d'un récepteur.



**Figure 12 : Deux aspects du signal noyé dans le bruit, avec un rapport C/N = 0dB**



**Figure 13 : Deux aspects du signal noyé dans le bruit, avec un rapport C/N = 10dB**

♣ **Résemblance et corrélation de signaux aléatoires:**

On superpose dans un additionneur les deux sources de bruit gaussien, puis les élèves font le bilan de puissance et mettent en évidence la valeur du coefficient de corrélation **C**, en utilisant l'expression  $\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2C\sigma_1\sigma_2$ . Les mesures et les calculs groupés sous forme d'un tableau comme celui ci, donnent C. Dans l'exemple des deux sources de bruit indépendantes, le tableau conduit à **C = 0**, puisqu'il n'y a aucune ressemblance, ni corrélation entre les signaux !

Le même tableau fait avec les sources BRUIT1 et BRUIT1 conduit, évidemment, à **C = 1**.

Source B1( ,E )	Source B2( )	Mesure $\sigma_1$	Mesure $\sigma_2$	Mesure $\sigma_{1+2}$	Calcul $\sigma_1^2 + \sigma_2^2$	Calcul $(\sigma_1 + \sigma_2)^2$	Calcul $(\sigma_{1+2})^2$	Valeur de C
G	G							
G	M							
M	G							
M	M							

♣ **La mesure du facteur de bruit F:**

On utilise un amplificateur caricaturalement bruyant, et on applique le protocole des appareils de mesure de F. Une source de bruit dont on connaît la DSPM en fonction de sa température de bruit  $T_s$ , alimente l'amplificateur. La comparaison de la DSPM en sortie, avec celle d'entrée permet d'extraire F. Toutes les mesures de DSPM se font grâce au filtre de bande équivalente  $\Delta F_{bruit}$ .

Les élèves tracent le graphe représenté en figure 14, donnant 3 points, grâce aux 3 niveaux de la source BRUIT1.

A la place de  $kTo$ , référence des mesures de bruit, on compare à une puissance ( $1\Omega$ ) de  $0,01V^2$ , **car les bruits caricaturaux du TP nous y obligent !** ( figure 14 ).

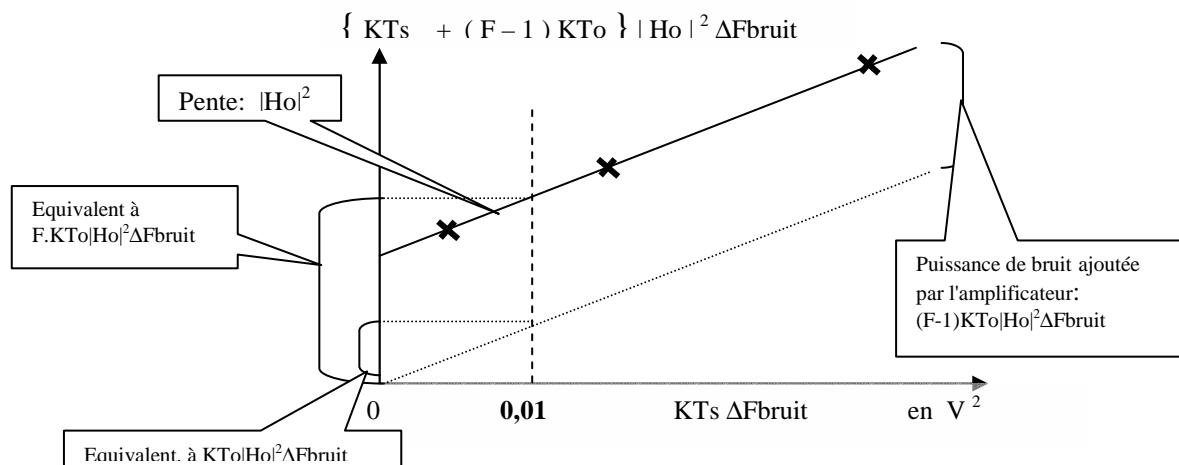


Figure 14 : La relation linéaire entre DSPM ( puissance dans  $\Delta F_{bruit}$  ) d'entrée, et DSPM de sortie.

#### Renseignements utiles:

A l'attention des collègues intéressés, je tiens à disposition les textes des TP de deuxième année, réalisés sur cette carte.

" **Caractérisation des signaux**" ( options EN et RLI ).

" **Le signal et le bruit** " ( option EN ).

Disponibles par retour de courriel à : [immathieu@wanadoo.fr](mailto:immathieu@wanadoo.fr)

TP faits grâce à un oscilloscope numérique hp 54603B, muni de son module 54659B.

Tous les composants sont disponibles chez les grands distributeurs habituels.

Référence pour la définition du facteur F : Signaux, systèmes linéaires et bruit en électronique de Monique et Francis Biquard, aux éditions Ellipse.

Remerciements à Mr Guiridlian, pour le routage et l'usinage, et à Mr Nouari, pour le montage et le câblage.