

**STABILITE TEMPORELLE DES OSCILLATEURS :  
METHODE D'ANALYSE MULTI-VARIANCES  
DES DIFFERENTS TYPES DE BRUITS.**

F. Vernotte\*, J. Gros Lambert\*\*, J. J. Gagnepain

\*Observatoire de Besançon, 41 bis avenue de l'Observatoire, BP 1615, 25010 BESANÇON Cedex - FRANCE

\*\*Laboratoire de Physique et Métrologie des Oscillateurs du C.N.R.S., 32 avenue de l'Observatoire, 25000 BESANÇON

**RÉSUMÉ**

On modélise généralement le bruit présent dans les oscillateurs par une densité spectrale en lois de puissances. On peut ainsi caractériser différentes sources de bruits, chacune de ces sources correspondant à une loi de puissance particulière. La mesure de la contribution de ces sources est nécessaire pour connaître leur origine et y remédier afin d'améliorer les performances des oscillateurs.

Habituellement, on obtient une estimation des différents types de bruits présents dans un signal par l'utilisation d'une variance (variance de Allan, variance de Picinbono, ...). Cependant, la sensibilité de la variance utilisée, qui diffère pour chaque type de bruits, limite cette méthode.

Par contre, l'utilisation de plusieurs variances, chacune étant plus particulièrement sensible à un type de bruit, permet d'améliorer notablement la précision des mesures. La méthode proposée ici, utilise autant de variances différentes qu'il y a de types de bruits à mesurer. La contribution des différents types de bruits est alors obtenue par la résolution d'un système de N équations à N inconnues, N étant le nombre de bruits présents dans le signal.

**ABSTRACT**

One generally models oscillator noise by a power law spectral density. Thus, it is possible to characterize different noise sources, each of them corresponding to a particular power law. The measurement of the contribution of these sources is necessary to know their origin and to remedy to these causes in order to improve oscillator performance.

Usually, one obtains an estimation of the different types of noises present in a signal by using a variance (Allan variance, Picinbono variance, ...). However, the sensitivity of this variance, which differs for each type of noises, limits this method.

On the other hand, the use of several variances, each of them being more sensitive to one type of noises, permits to notably improve the measurement precision. The method which is suggested here, uses as many different variances as there are types of noises to measure. The contribution of these different types of noises is so obtained by resolution of a system of N equations with N unknown, N being the number of noises present in the signal.

**1. INTRODUCTION.**

**1.1. Caractérisation du bruit dans le domaine temporel.**

Le signal délivré par un oscillateur idéal de fréquence nominale  $\nu_0$  peut être modélisé par la relation :

$$V(t) = V_0 \sin[2\pi\nu_0 t] \quad (1)$$

Cependant, un oscillateur réel subit des perturbations, de nature déterministe ou aléatoire, qui affectent son amplitude et sa phase. Ainsi, on peut exprimer le signal qu'il délivre par<sup>[1]</sup> :

$$V(t) = (V_0 + \varepsilon(t)) \sin[2\pi\nu_0 t + \varphi(t)] \quad (2)$$

$\varepsilon(t)$  représente le bruit d'amplitude  
 $\varphi(t)$  représente le bruit de phase

Généralement, dans la plupart des oscillateurs on peut négliger le bruit d'amplitude :

$$V(t) = V_0 \sin[2\pi\nu_0 t + \varphi(t)] \quad (3)$$

Cependant, les fluctuations de phase peuvent aussi être caractérisées par la fréquence instantanée de ce signal qui est définie par :

$$\nu(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} [2\pi\nu_0 t + \varphi(t)] = \nu_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (4)$$

La fréquence instantanée est donc la somme de la fréquence nominale de l'oscillateur  $\nu_0$  et d'un terme aléatoire  $\Delta\nu(t)$ , appelé bruit de fréquence :

$$\Delta\nu(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (5)$$

Ainsi, les fluctuations de phase peuvent être traduites en fluctuations de fréquence grâce à la relation (5). Ces deux notions, les fluctuations de phase et les fluctuations de fréquence, sont deux représentations différentes mais équivalentes du même phénomène.

Cependant, la grandeur la plus utilisée dans le domaine du Temps-Fréquence, est certainement l'écart de fréquence instantané normalisé  $y(t)$ , qui est défini par :

$$y(t) = \frac{\Delta\nu(t)}{\nu_0} \quad (6)$$

Le principal intérêt de cette quantité est le fait qu'elle soit sans dimension, ce qui présente deux avantages<sup>[1,2]</sup> :

- d'une part, cette quantité reste inchangée quelque soient les multiplications ou divisions de fréquence que l'on peut faire subir au signal de l'oscillateur;
- d'autre part, on peut ainsi comparer les signaux provenant d'oscillateurs travaillant à des fréquences très différentes.

L'écart de fréquence instantané normalisé est relié au bruit de phase par la relation :

$$y(t) = \frac{1}{2\pi\nu_0} \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (7)$$

A l'instar du bruit de fréquence  $\Delta\nu(t)$ , l'écart de fréquence instantané normalisé n'est pas une grandeur observable<sup>[1,2]</sup>. On ne peut ainsi en connaître que la valeur moyenne sur un intervalle de temps  $\tau$  commençant à l'instant  $t_k$ , que l'on appelle habituellement échantillon  $\bar{y}_k$ , suivant la relation :

$$\bar{y}_k = \langle y(t) \rangle_{t_k, \tau} = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k + \tau} y(t) dt \quad (8)$$

Ainsi, pour étudier les fluctuations de fréquence (ou de phase) d'un oscillateur, on étudie généralement une séquence de N échantillons  $\bar{y}_k$  consécutifs, N étant un nombre suffisamment grand pour pouvoir effectuer des traitements statistiques de manière significative.

**1.2. Caractérisation du bruit dans le domaine des fréquences. Modèles de bruit.**

Dans le domaine des fréquences, une des quantités les plus utilisées est la densité spectrale d'écart de fréquence instantané normalisé  $S_y(f)$ . La densité spectrale d'une grandeur est définie comme la transformée de Fourier de l'autocorrélation de cette grandeur. Ainsi, en notant  $R_y(t)$  l'autocorrélation de  $y(t)$ , on peut écrire :

$$S_y(f) = T.F.[R_y(t)] = |T.F.[y(t)]|^2 \quad (9)$$



Le principal avantage d'utiliser la densité spectrale  $S_y(f)$  provient du fait qu'elle n'est théoriquement pas une fonction aléatoire. De plus, elle peut être très bien modélisée par des lois de puissance. En effet, on considère généralement que la densité spectrale  $S_y(f)$  est la somme de 5 types de bruits indépendants, chaque type de bruits correspondant à une loi de puissance différente :

$$S_y(f) = \sum_{\alpha=-2}^{\alpha=+2} h_{\alpha} f^{\alpha} \quad \alpha \text{ entier} \quad (10)$$

L'intérêt de ce modèle en lois de puissances, outre sa simplicité, réside dans le fait que chacun des 5 types de bruits correspond à une cause physique qui lui est propre<sup>[1]</sup>. Cependant, les liens entre ces causes et ces effets, en terme de types de bruits, sont relativement mal connus. La raison de cette méconnaissance réside principalement dans le manque de précision des mesures des coefficients  $h_{\alpha}$  correspondant aux différents types de bruits.

L'objectif principal du travail exposé ici consiste à tenter d'améliorer la précision de ces mesures, donc, indirectement, de contribuer à une meilleure connaissance des liens existants entre les causes (vibrations, changements de température, agitation électronique, etc ...) et la présence des divers types de bruits.

**2. METHODE A VARIANCE UNIQUE.**

La mesure de ces coefficients  $h_{\alpha}$  est généralement effectuée grâce à une variance. Il existe différentes variances, la plus connue étant la variance à deux échantillons ou variance de Allan.

**2.1. Approches temporelle et spectrale des variances.**

Une variance peut être utilisée dans le domaine temporel sur des échantillons d'écart de fréquence  $\overline{y_k}$  ou dans le domaine des fréquences sur la norme au carré de la transformée de Fourier de ces échantillons.

Dans le domaine temporel, une variance est définie par sa séquence de calcul. La variance de Allan par exemple est définie par :

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \left\langle \left( \overline{y_{k+1}} - \overline{y_k} \right)^2 \right\rangle \quad (11)$$

Dans le domaine spectral, une variance est définie par sa fonction de transfert qui est la transformée de Fourier de sa séquence de calcul. Pour la variance de Allan, la fonction de transfert s'écrit<sup>[1]</sup> :

$$H_y(f) = \sqrt{2} \frac{\sin^2(\pi\tau f)}{\pi\tau f} \quad (12)$$

et, le calcul d'une variance dans le domaine des fréquences est obtenu en résolvant l'intégrale suivante :

$$\sigma^2(\tau) = \int_0^{\infty} S_y(f) |H(f)|^2 df \quad (13)$$

donc, dans le cas de la variance de Allan :

$$\sigma_y^2(\tau) = 2 \int_0^{\infty} S_y(f) \frac{\sin^4(\pi\tau f)}{(\pi\tau f)^2} df \quad (14)$$

De plus, comme nous l'avons vu précédemment,  $S_y(f)$  est assez bien représentée par des lois de puissances (voir relation (10)), et la connaissance des coefficients  $h_{\alpha}$  liés à chaque loi de puissance est caractéristique des perturbations affectant l'oscillateur.

**2.2. Utilisation des variances.**

Pour effectuer des mesures de bruits à l'aide d'une variance, il suffit de faire varier le temps d'intégration  $\tau$ . Pour un bruit en  $f^{\alpha}$ , la courbe de variance  $\sigma_y^2(\tau)$  suit alors en fonction de  $\tau$  une pente en  $\tau^{\mu}$  et, généralement on constate que  $\mu = -1 - \alpha$  (en particulier pour la variance de Allan et les lois de puissances  $\alpha = -2, -1$  et  $0$ ) :

$$S_y(f) = h_{\alpha} f^{\alpha} \Leftrightarrow \sigma_y^2(\tau) = c_{\mu} \tau^{\mu} \quad (15)$$

De plus les coefficients  $c_{\mu}$  qui peuvent aisément être mesurés sur les courbes de variances par interpolation polynomiale, sont reliés aux coefficients  $h_{\alpha}$

correspondants par des lois connues (voir tableau I ci-dessous).

	de Allan	Variance passe-haut	passe-bande
$S_y(f)$	$\sigma_y^2(\tau)$	$\sigma_{HP}^2(\tau)$	$\sigma_{BP}^2(\tau)$
$h_2 f^2$	$\frac{3h_2 f_h}{4\pi^2 \tau^2}$	$\frac{2h_2 f_h}{\pi^2 \tau^2}$	$\frac{h_2}{\sqrt{2} \pi \tau^3}$
$h_1 f$	$\frac{h_1 [1,038 + \text{Log}2\pi f \tau_h]}{4\pi^2 \tau^2}$	$h_1 \text{Log} [1 + (\pi\tau f_h)^4]$	$\frac{h_1}{\pi \sqrt{2} \tau^2}$
$h_0$	$\frac{h_0}{2\tau}$	$\frac{h_0}{\sqrt{2} \tau}$	$\frac{\sqrt{2} h_0}{\pi \tau}$
$\frac{h_{-1}}{f}$	$2h_{-1} \text{Log}2$	$\frac{\pi h_{-1}}{2}$	$\frac{5 h_{-1}}{\pi \sqrt{2}}$
$\frac{h_{-2}}{f^2}$	$\frac{2\pi^2 h_{-2} \tau}{3}$	$\frac{\pi^2 h_{-2} \tau}{\sqrt{2}}$	$\frac{8 \sqrt{2} h_{-2} \tau}{\pi}$

Tableau I : Réponses de diverses variances pour différents types de bruits.<sup>[1]</sup>

On constate que toutes les variances ne permettent pas de séparer facilement tous les types de bruits. La variance de Allan, par exemple, distingue mal<sup>[3]</sup> les bruits en  $f$  et en  $f^2$ . La courbe suivante (figure 1) représente la variance de Allan en fonction du temps d'intégration  $\tau$  appliquée à un signal contenant tous les types de bruits. Les asymptotes à cette courbe correspondent aux mesures des coefficients  $c_{\mu}$  qui en ont été déduites, donc aux mesures des coefficients  $h_{\alpha}$ .

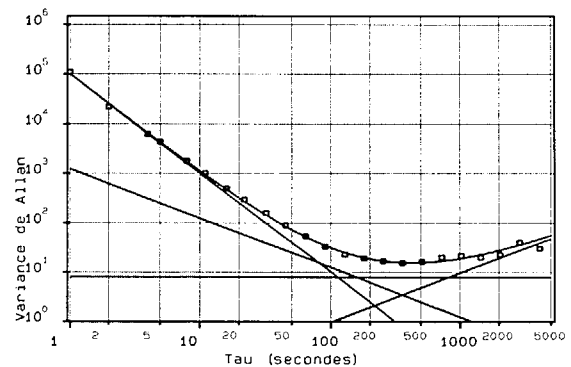


Figure 1 : Variance de Allan en fonction de  $\tau$ , appliquée à un signal contenant tous les types de bruits ( $-2 \leq \alpha \leq +2$ ).

**2.3. Résultats.**

Nous avons utilisé la variance de Allan sur des signaux simulés<sup>[3]</sup> contenant différentes proportions de bruits en  $f^{-2}$ , en  $f^{-1}$  et blanc. L'intérêt de cette simulation réside dans le fait qu'elle permet de connaître parfaitement les contributions des divers types de bruits, et qu'ainsi il est possible d'estimer la précision de la méthode à variance unique. Les figures 2 à 4, dont les résultats sont rassemblés dans le tableau II, sont des exemples représentatifs de la précision qu'il est possible d'atteindre par cette méthode.

Les résultats du tableau II montrent que la précision que l'on peut atteindre avec des signaux de ce type (composés de 8192 échantillons  $\overline{y_k}$  et contenant 3 types de bruits) est de l'ordre de 25% lorsque les 3 types de bruits sont tour à tour dominant dans la plage de fréquences considérée (figure 3).



Cependant, lorsqu'on fait varier le coefficient  $h_{-1}$ , il peut noyer les autres types de bruits ( $h_{-1} = 10000$ ), auquel cas la précision sur la mesure des autres coefficients diminue nettement, ou être noyé par les autres types de bruits ( $h_{-1} = 10$ ), auquel cas c'est la précision sur la mesure de  $h_{-1}$  qui diminue nettement. Nous avons ainsi mesuré la dynamique de cette méthode en fixant comme limite une précision meilleure que 30% sur la mesure des 3 coefficients de bruits. Dans ces conditions, la dynamique de cette méthode a été estimée à 15 dB, ce qui signifie que chaque coefficient de bruits peut varier dans des proportions de 1 à 30 sans que la précision des mesures n'en soit trop affectée.

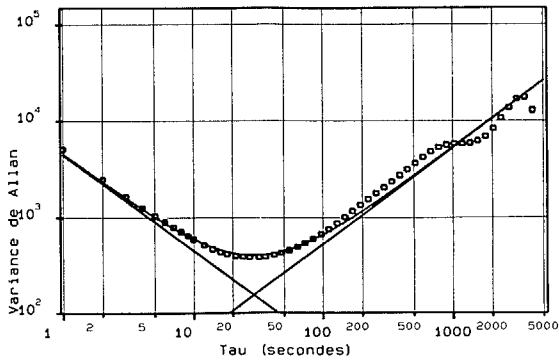


Figure 2 : Variance de Allan appliquée à un signal contenant des bruits en  $f^{-2}$ , en  $f^{-1}$  et blanc ( $h_{-2} = 1, h_{-1} = 10, h_0 = 1000$ ).

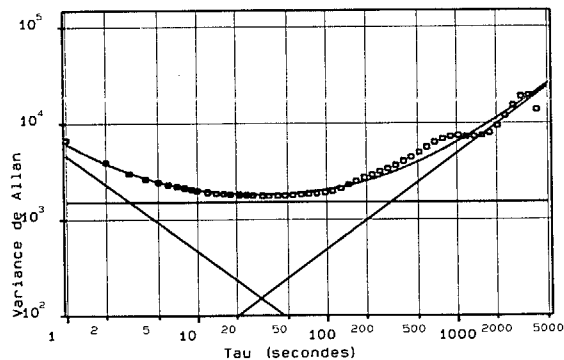


Figure 3 : Variance de Allan appliquée à un signal contenant des bruits en  $f^{-2}$ , en  $f^{-1}$  et blanc ( $h_{-2} = 1, h_{-1} = 1000, h_0 = 1000$ ).

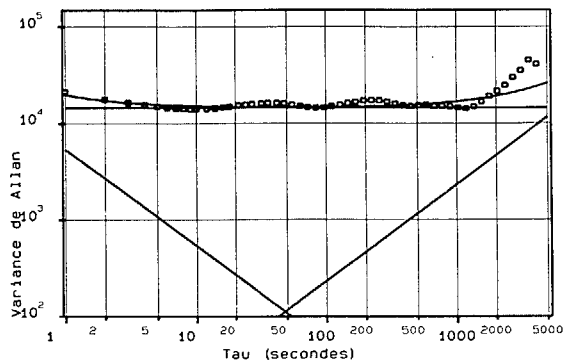


Figure 4 : Variance de Allan appliquée à un signal contenant des bruits en  $f^{-2}$ , en  $f^{-1}$  et blanc ( $h_{-2} = 1, h_{-1} = 10000, h_0 = 1000$ ).

Valeurs données			Valeurs calculées					
$h_0$	$h_{-1}$	$h_{-2}$	$h_0$	$\frac{\Delta h_0}{h_0}$	$h_{-1}$	$\frac{\Delta h_{-1}}{h_{-1}}$	$h_{-2}$	$\frac{\Delta h_{-2}}{h_{-2}}$
10000	10	1	8950	10,5%	70	600 %	0,803	20 %
10000	1000	1	9253	7,5%	1099	10 %	0,742	25 %
10000	10000	1	10660	6,6%	10520	5,2%	0,354	65 %

Tableau II : Résultats obtenus par la variance de Allan sur des bruits simulés.

### 3. METHODE MULTI-VARIANCES.

#### 3.1. Principe.

Des variances différentes n'ayant pas la même sensibilité pour chaque type de bruit, il est donc possible de connaître le coefficient  $h_\alpha$  de N types de bruits présents dans un signal en lui appliquant successivement N variances différentes et en résolvant, pour chaque valeur de  $\tau$ , le système correspondant de N équations à N inconnues.

De plus, la précision de cette méthode peut être augmentée, d'une part, en moyennant les valeurs obtenues pour les différentes valeurs de  $\tau$ . D'autre part, il est bien évident que le choix des variances est déterminant pour la précision souhaitée. En effet, plus les variances conduisent à des résultats différents pour les types de bruits étudiés, plus les mesures des coefficients  $h_\alpha$  seront précises.

A titre d'exemple, considérons le système de 3 équations à 3 inconnues utilisant les variances de Allan, Passe-haut et Passe-bande afin de connaître les contributions des bruits en  $f^{-2}$ , en  $f^{-1}$  et blanc. En appliquant ce système à un signal contenant ces 3 types de bruits, nous obtenons le système suivant (cf tableau I) :

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{h_0}{2\tau} + 2h_{-1}\text{Log}2 + \frac{2\pi^2 h_{-2}\tau}{3} \quad (16)$$

$$\sigma_{HP}^2(\tau) = \frac{h_0}{\sqrt{2}\tau} + \frac{\pi h_{-1}}{2} + \frac{\pi^2 h_{-2}\tau}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

$$\sigma_{BP}^2(\tau) = \frac{\sqrt{2} h_0}{\pi\tau} + \frac{5 h_{-1}}{\pi\sqrt{2}} + \frac{8\sqrt{2} h_{-2}\tau}{\pi} \quad (18)$$

Le déterminant de ce système s'écrit :

$$\Delta = 2\sqrt{2} - \frac{5\pi}{4} + 2\pi\text{Log}2 - \frac{16\text{Log}2}{\pi} + \frac{5\pi}{3} - \frac{\sqrt{2}\pi^2}{3} \quad (19)$$

La résolution du système précédent par la méthode de Cramer permet de calculer les valeurs des coefficients  $h_0$ ,  $h_{-1}$  et  $h_{-2}$  :

$$\begin{cases} h_0 = \frac{4\sqrt{2} - \frac{5\pi}{2}}{\Delta} \sigma_y^2(\tau) + \frac{5\sqrt{2}\pi - \frac{16\sqrt{2}\text{Log}2}{\pi}}{\Delta} \sigma_{HP}^2(\tau) + \frac{\sqrt{2}\pi^2\text{Log}2 - \frac{\pi^2}{3}}{\Delta} \sigma_{BP}^2(\tau) & (20) \\ h_{-1} = \frac{\pi - \frac{8}{\pi}}{\Delta} \sigma_y^2(\tau) + \frac{4\sqrt{2} - \frac{2\sqrt{2}\pi}{3}}{\Delta} \sigma_{HP}^2(\tau) + \frac{\frac{\sqrt{2}\pi^2}{3} - \frac{\pi^2}{2\sqrt{2}}}{\Delta} \sigma_{BP}^2(\tau) & (21) \\ h_{-2} = \frac{5 - \frac{1}{\sqrt{2}}}{\Delta} \frac{\sigma_y^2(\tau)}{\tau} + \frac{2\sqrt{2}\text{Log}2}{\pi} - \frac{2}{2\sqrt{2}\pi} \sigma_{HP}^2(\tau) + \frac{\frac{\pi}{4} - \sqrt{2}\text{Log}2}{\Delta} \sigma_{BP}^2(\tau) & (22) \end{cases}$$

Les courbes de valeurs de  $h_0$ ,  $h_{-1}$  et  $h_{-2}$  de la figure 5 ont été calculées grâce à ces équations pour différentes valeurs de temps d'intégration  $\tau$ .

#### 3.2. Résultats.

Les 3 courbes de la figure 5, dont les résultats sont rassemblés dans le tableau III, ont été calculées à partir des mêmes échantillons  $\bar{y}_k$  simulés que ceux utilisés dans le chapitre précédent.

La première constatation qui s'impose, lorsqu'on regarde ces courbes, est que les valeurs des coefficients  $h_\alpha$  trouvées sont loin d'être constantes en fonction du temps d'intégration (certaines valeurs sont même négatives, ce qui n'a aucune signification physique). Ces variations sont dues au fait que la densité spectrale du bruit simulé suit "statistiquement" le modèle en lois de puissances, c'est à dire que son comportement global respecte bien ce modèle, mais que chaque échantillon de fréquence présente un écart aléatoire.

Cependant, pour la même raison, si l'on effectue la moyenne des valeurs obtenues pour un coefficient  $h_\alpha$  suivant toutes les valeurs de  $\tau$ , on constate que cette moyenne est une mesure précise de ce coefficient  $h_\alpha$ .

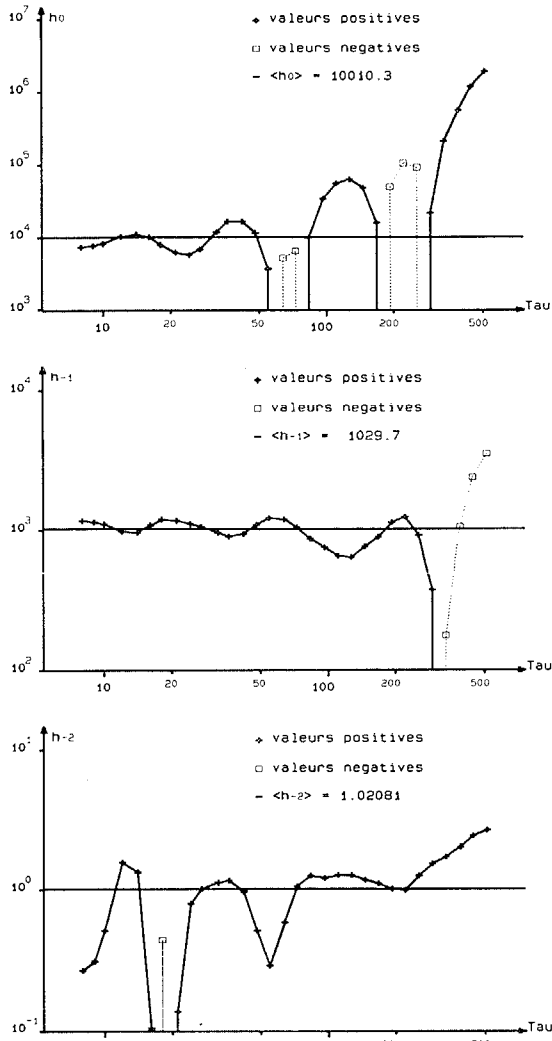


Figure 5 : Valeurs de  $h_0$  (en haut),  $h_{-1}$  et  $h_{-2}$  (en bas) calculées pour différentes valeurs de  $\tau$  dans le cas d'un bruit simulé. ( $h_0 = 10000$ ,  $h_{-1} = 1000$ ,  $h_{-2} = 1$ )

Valeurs données			Valeurs calculées					
$h_0$	$h_{-1}$	$h_{-2}$	$h_0$	$\frac{\Delta h_0}{h_0}$	$h_{-1}$	$\frac{\Delta h_{-1}}{h_{-1}}$	$h_{-2}$	$\frac{\Delta h_{-2}}{h_{-2}}$
10000	10	1	10186	1,9%	9,1	8,8%	1,052	5,2%
10000	1000	1	10010	0,1%	1030	3,0%	1,021	2,1%
10000	10000	1	8477	15,2%	10453	4,5%	0,701	30 %

Tableau III : Résultats obtenus par la méthode multi-variances sur des bruits simulés.

Le tableau III montre que la méthode multi-variance permet d'atteindre une précision de l'ordre de 5% sur la mesure des coefficients de bruits, lorsqu'on ces bruits sont tour à tour dominants dans la plage de fréquence considérée et lorsqu'on les mesure dans les conditions décrites au chapitre précédent (8192 échantillons  $y_k$  et 3 types de bruits).

De plus, nous avons estimé la dynamique de cette méthode à 30 dB, ce qui signifie que chaque coefficient de bruits peut maintenant varier dans des proportions de 1 à 1000 sans que la précision des mesures n'en soit trop affectée (écart inférieur à 30%).

4. CONCLUSION.

4.1. Comparaison des méthodes à variance unique et multi-variances.

Le tableau IV ci-dessous a été obtenu à partir d'un grand nombre de séquences simulées (chaque séquence

comptant 8192 échantillons). La variance utilisée pour la colonne variance simple est la variance de Allan, et le système multi-variances de la colonne suivante est le système à 3 variances décrit ci-dessus.

Le temps de calcul a été donné à titre indicatif. Il correspond au temps de calcul d'un PC/AT (80286, 16 MHz) pour une séquence de 8192 échantillons et 50 valeurs différentes de  $\tau$ . La méthode multi-variance utilisant N variances correspond à un temps de calcul environ N fois supérieur à celui de la méthode à variance simple car le temps nécessaire pour résoudre le système est largement négligeable devant le temps de calcul des variances.

	Variance simple	Multi-variances
Precision	25 %	< 5 %
Dynamique	15 dB	30 dB
Temps de calcul	1 minute	3 minutes

Tableau IV: Comparaison entre les méthodes à variance simple et multi-variances.

4.2. Perspectives.

La méthode multi-variances, illustrée ici par un exemple à 3 variances, peut aussi concerner un système à 5 variances. Dans ces conditions, il est possible de mesurer les 5 coefficients  $h_\alpha$  correspondant aux 5 types de bruits réels qui peuvent perturber les oscillateurs ( $-2 \leq \alpha \leq +2$ ). La précision et la dynamique devraient rester ainsi du même ordre de grandeur que précédemment car la quantité d'information recueillie augmente comme le nombre de variances utilisées (contrairement à la méthode à variance unique). Cependant, le temps de calcul augmente lui aussi dans les mêmes proportions et devient voisin de 5 fois le temps de calcul de la méthode à variance unique.

Une amélioration de cette méthode consistera aussi à déterminer de nouvelles variances présentant des sensibilités encore plus différentes aux divers types de bruits. Il est en effet possible de définir dans le domaine spectral des variances agissant comme des filtres de différents types (passe-bas, passe-haut, d'ordre 2, 3, etc...), qui peuvent être beaucoup mieux adaptée à ce type de calcul.

Si la méthode à variance simple ne constitue qu'un moyen rapide d'estimer les types de bruits présents dans un signal, la méthode multi-variance permet de réaliser des mesures avec une précision et une dynamique bien supérieures. Le fait de pouvoir mesurer précisément les contributions des différents types de bruits présents dans un signal implique qu'il sera possible de mieux connaître à quels types de causes ils sont liés. En cernant mieux les causes d'instabilités des oscillateurs, on devrait donc pouvoir soit les corriger, et donc améliorer leurs performances, soit séparer les fluctuations qui leur sont propres de celles de leur environnement. Dans le domaine spatial, par exemple, en mesurant les bruits présents dans le signal des oscillateurs embarqués par satellite, on devrait ainsi être en mesure de déterminer la contribution due aux variations d'orbites du satellite (bruit d'orbite).

5. REFERENCES.

- [1] Rutman, J.: Characterization of phase and frequency instabilities in precision frequency sources : fifteen years of progress, Proceedings of the IEEE, vol. 66, N# 9, September 1978, p. 1050.
- [2] Gagnepain, J. J.: Caractérisation des étalons de fréquence : concepts et méthodes, B.N.M. 10<sup>me</sup> journées de mesure du temps et des fréquences, Paris, April 1986.
- [3] Gros Lambert, J., Gagnepain, J. J., Vernotte, F., Walls, F.: A new "filtered Allan variance" and its application to the identification of phase and frequency noise sources, 43<sup>th</sup> annual Frequency Control Symposium, Denver, June 1989.