

Signature d'un émetteur par variance d'Allan à partir du bruit rayonné

Marie LECADET Briec RICHARD Abdel-Ouahab BOUDRAA Jean-Jacques SZKOLNIK

IRENav (UR 3634) Ecole Navale & ENSAM, BRCM Brest, CC600, 29240 Brest Cedex 9, France

Résumé – Dans ce travail on s'intéresse au problème du bruit émis par un émetteur en vue de sa caractérisation. En effet, les différentes classes de bruit, dominantes dans telle ou telle gamme de fréquences, peuvent constituer une signature unique et sans équivoque d'un émetteur. Pour ce faire, nous utilisons la variance d'Allan combinée avec la décomposition modale empirique (EMD). La composante bruit du signal de l'émetteur est approximée par la somme partielle des modes empiriques haute fréquence extraits par l'EMD. Nous illustrons la méthode de caractérisation proposée sur deux types d'émetteurs : un système de navigation de navires (AIS : Automatic Identification System) et un AUV (autonomous underwater vehicle), et nous analysons les résultats de caractérisation de ces émetteurs.

Abstract – In this work, we focus on the problem of noise emitted by a transmitter with a view to characterizing it. Indeed, the different classes of noise, dominant in a given frequency range, can constitute a unique and unequivocal signature of a transmitter. To this end, we use Allan variance combined with empirical modal decomposition (EMD). The noise component of the transmitter signal is approximated by the partial sum of the high-frequency empirical modes extracted by EMD. We illustrate the proposed characterization method on two transmitters: a ship navigation system (AIS: Automatic Identification System) and an AUV (autonomous underwater vehicle), and analyze the characterization results of these transmitters.

1 Introduction.

En guerre électronique la connaissance du terrain et les acteurs sur le site d'intérêt est capitale. Radars, drones télécommandés, systèmes de positionnement GPS sont autant de sources électromagnétiques différentes ayant une signature propre. Avec l'augmentation du nombre de ces sources électromagnétiques, la discrimination des émetteurs dans un tel environnement électriquement dense devient très compliquée. La variance d'Allan a été développée pour permettre la caractérisation, dans le domaine temporel, des fluctuations de fréquence et de phase de ces émetteurs [1], [2], [3], [4], [5], [6]. C'est le cas notamment des oscillateurs de précision, comme les horloges atomiques. Cette variance s'est imposée dans le temps et elle est devenue un procédé d'analyse standard pour l'estimation des différents types de bruits présents dans un signal type oscillateur. Elle permet d'évaluer la stabilité de la fréquence et de la phase des oscillateurs. En isolant efficacement les différentes sources de bruit ou la composante bruit du signal d'émetteur, la variance d'Allan permet d'identifier et caractériser l'émetteur [3], [4], [5], [6]. Cette analyse suppose la connaissance du bruit de l'émetteur. En pratique, on a uniquement accès au signal de l'émetteur mais pas à la composante bruit. Dans ce travail on propose une stratégie, basée sur la décomposition modale empirique, pour extraire la composante bruit pour caractériser, dans le domaine temporel, l'émetteur associé par la variance d'Allan.

2 Modèle du signal d'un oscillateur

On peut modéliser un oscillateur ou un signal d'horloge par une composante tonale comme suit :

$$V(t) = V_0 \sin(2\pi f_0 t) \quad (1)$$

où V_0 and f_0 désignent respectivement l'amplitude maximale et la fréquence du signal $V(t)$. Comme ces paramètres sont fixes, l'oscillateur est parfaitement stable. En pratique, les sources de bruit et de dérive affectent aussi bien l'amplitude de sortie de l'oscillateur que sa phase. L'instabilité de l'oscillateur est analysée via le modèle suivant :

$$V(t) = (V_0 + e(t)) \sin(2\pi f_0 t + \phi(t)) \quad (2)$$

avec $e(t)$ et $\phi(t)$ deux grandeurs aléatoires représentant les fluctuations d'amplitude et de phase, provenant de l'oscillateur, appelées également bruits. Pour analyser la stabilité de l'oscillateur on s'intéresse au terme $\phi(t)$. Pour ce faire, on calcule la fréquence instantanée associée comme suit :

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} (2\pi f_0 t + \phi(t)) = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (3)$$

On détermine l'écart de la fréquence instantanée par :

$$\Delta f(t) = f(t) - f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (4)$$

Dans le cas d'un oscillateur idéal, on a $\Delta f(t) = 0$. Au lieu de l'écart $\Delta f(t)$, en pratique, on utilise l'écart relatif instantané de la fréquence notée $y(t)$:

$$y(t) = \frac{f(t) - f_0}{f_0} = \frac{1}{2\pi f_0} \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{dx(t)}{dt} \quad (5)$$

Le signal $x(t)$ représente la variation de phase. L'instabilité de fréquence de l'oscillateur peut être définie dans le domaine fréquentiel pour $f \in [0, +\infty[$, via la densité spectrale de puissance (dsp) de $y(t)$, $x(t)$, $\phi(t)$ ou $\dot{\phi}(t)$. Si le signal $\phi(t)$ est stationnaire, sa fonction d'autocorrelation s'écrit :

$$\Gamma_\phi(\tau) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \phi(t') \phi(t' + \tau) dt' \quad (6)$$

En utilisant le théorème de Wiener–Khintchine, la dsp bilatérale de $\phi(t)$ est donnée par

$$\gamma_{\phi}^B(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Gamma_{\phi}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (7)$$

et la dsp unilatérale s'écrit :

$$\gamma_{\phi}(f) = 2\gamma_{\phi}^B(f), f \in [0, +\infty[\quad (8)$$

De la même manière, on définit la dsp des fluctuations relatives de fréquence comme suit :

$$\gamma_y(f) = 2 \int_0^{+\infty} \Gamma_y(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 \gamma_{\phi}(f) \quad (9)$$

Ces dsp nécessitent des intervalles de fréquences infinis. En pratique, il est recommandé que l'instabilité d'un oscillateur soit caractérisée par la dsp $\gamma_y(f)$. De plus, des considérations théoriques et des mesures expérimentales montrent que les bruits affectant un oscillateur peuvent être modélisés par une loi de puissance comme suit [3], [7], [4], [8], [6] :

$$\gamma_y(f) = \sum_{\alpha=-2}^{\alpha=-2} h_{\alpha} f^{\alpha} \quad (10)$$

où les h_{α} sont les paramètres de la fréquence. A chaque valeur de α correspond une classe de bruit ($\alpha = 0$: bruit blanc).

3 Variance théorique

La variance théorique du bruit rayonné par un émetteur, notée $I^2(\tau)$, est calculée comme suit :

$$I^2(\tau) = \langle \overline{y_k^2} \rangle - \langle \overline{y_k} \rangle^2 \quad (11)$$

en utilisant un nombre N d'échantillons infini où $\langle \rangle$ correspond à la moyenne d'ensemble. La valeur moyenne au sens de la moyenne d'ensemble est définie par :

$$\langle \overline{y_k} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \overline{y_k} \quad (12)$$

La quantité $I^2(\tau)$ peut être calculée en utilisant la relation (4) et $\Gamma_{\phi}(\tau)$ comme suit :

$$I^2(\tau) = \frac{1}{2\pi^2 f_0^2 \tau} (\Gamma_{\phi}(0) - \Gamma_{\phi}(\tau)) \quad (13)$$

En utilisant la transformée de Fourier inverse de (7) on obtient

$$I^2(\tau) = \int_0^{+\infty} \gamma_y(f) \left(\frac{\sin(\pi f\tau)}{\pi f\tau}\right)^2 df = \int_0^{+\infty} \gamma_y(f) |H(f)|^2 df \quad (14)$$

où $H(f)$ est fonction de transfert de l'opérateur variance. Notons que pour f tendant vers zéro, la fonction de transfert tend vers 1. Pour un bruit en $1/f$, $I^2(\tau)$ diverge. Par conséquent, la variance théorique n'est pas adaptée pour les lois en puissance et donc ne permet pas la caractérisation des oscillateurs réels.

4 Variance multi-échantillon

Calculons la moyenne de $y(t)$ sur un intervalle de temps de durée τ à partir de l'instant t_k

$$\overline{y(t_k)} = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k+\tau} y(u) du := \overline{y_k} \quad (15)$$

Ce qui permet d'écrire

$$\overline{y_k} = \frac{1}{2\pi f_0} \frac{\phi(t_k + \tau) - \phi(t_k)}{\tau} = \frac{x(t_k + \tau) - x(t_k)}{\tau} \quad (16)$$

Ainsi, la moyenne de l'écart de fréquence normé instantané entre deux instants consécutifs, dépend de la durée τ de l'intervalle considéré. Si on répète plusieurs fois la mesure, on obtient un ensemble d'échantillons $\overline{y_k}$ de valeurs aléatoires. Ainsi, on peut caractériser la stabilité de l'oscillateur en calculant les moments statistiques de ces échantillons.

4.1 Variance à N échantillons

Cette variance est définie à partir de N échantillons de $\overline{y_k}$, mesurés sur des intervalles de temps τ , avec une période de T de répétition de mesures :

$$\langle \sigma^2(N, \tau, T) \rangle = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \left(\overline{y_k} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \overline{y_i} \right)^2 \quad (17)$$

4.2 Variance à deux échantillons

Comme recommandé par le comité d'IEEE pour la stabilité de fréquence, et par souci de normalisation, on se limite à la variance à deux échantillons ($N = 2$) avec une prise d'échantillon sans temps mort ($T = \tau$) [3]. Dans ce cas, la variance définie par la relation (17), est appelée variance d'Allan [1], [2]. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\langle \sigma^2(2, \tau, \tau) \rangle = \frac{1}{2} \langle (\overline{y_{k+1}} - \overline{y_k})^2 \rangle \quad (18)$$

Pour simplifier on utilise la notation $\langle \sigma^2(2, \tau, \tau) \rangle = \sigma^2(\tau)$. La variance d'Allan a une utilité pratique bien plus grande que $I^2(\tau)$ puisqu'elle existe pour toutes les lois de puissance de la densité spectrale rencontrées dans l'oscillation réelle, y compris le bruit de fréquence de scintillement [3]. Cette variance correspond à la moyenne des écarts au carré de deux échantillons successifs du signal temporel (bruit). Elle fournit une indication sur la stabilité de l'émetteur à différentes échelles de temps quand on fait varier la durée τ des échantillons [1], [2]. La figure (1) présente une synthèse graphique des pentes en tracé bi-logarithmique de la variance d'Allan en fonction du paramètre τ .

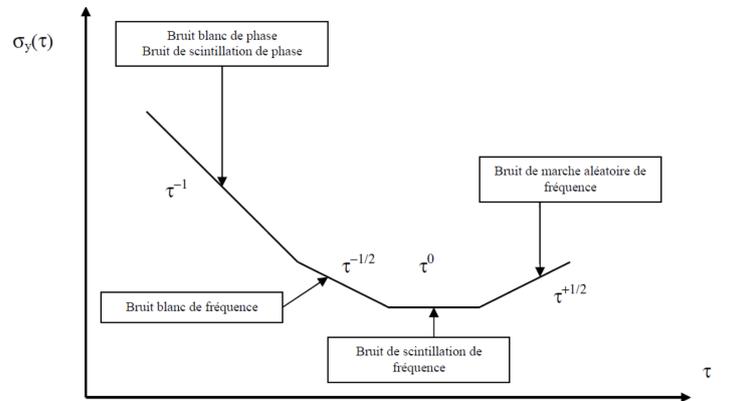


FIGURE 1 – Représentation graphique théorique des pentes de la variance d'Allan en fonction τ [8].

Expérimentalement, seules des estimations de $\sigma^2(\tau)$ peuvent être obtenues à partir d'un nombre fini d'échantillons $\overline{y_k}$ prélevés sur une durée finie. Il existe donc une incertitude statistique inhérente lorsque N valeurs de $\overline{y_k}$ sont utilisées pour estimer

$\sigma^2(\tau)$. Un estimateur largement utilisé est donné par [6] :

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{k=1}^{N-1} (\overline{y_{k+1}} - \overline{y_k})^2 \quad (19)$$

Flandrin a établi un lien entre la variance d'Allan et une transformée en ondelettes basée sur l'ondelette de Haar [9], ce qui suggère une approche de l'évaluation de la variabilité des classes d'ondelettes générales [10].

5 Composante bruit de l'émetteur

La méthode dite de la variance d'Allan consiste à caractériser les différentes composantes du bruit rayonné par l'émetteur en vue de son identification (signature). En général, le signal issu de l'émetteur est un mélange d'un signal d'intérêt et d'une composante bruit. Pour simplifier, on suppose que le mélange additif. La composante bruit peut être, par exemple, estimée en utilisant une méthode de décomposition en sous-espace ou une approche multi-résolution comme la décomposition modale empirique (EMD) ou la transformation en ondelettes. Pour simplifier, on propose de scinder le signal de l'émetteur par EMD en modes empiriques comme suit :

$$x(t) = \sum_{i=1}^M I_i(t) + r(t) \quad (20)$$

où M est la profondeur de la décomposition, $I_i(t)$ est le $i^{\text{ème}}$ mode empirique et $r(t)$ le résidu de la décomposition. La décomposition (type Reynolds) de $x(t)$ en deux composantes est obtenue par reconstruction partielle des modes :

$$x(t) = \underbrace{\sum_{i=1}^L I_i(t)}_{\approx y(t)} + \sum_{i=L+1}^M I_i(t) + r(t) \quad (21)$$

La composante bruit du signal est approximée par la somme des premiers, qui sont haute fréquence, et l'index L est estimé par le maximum du critère CMSE (consecutive mean square error) [11].

6 Résultats

Nous testons la méthode de caractérisation sur deux types d'émetteurs à savoir le système de navigation de navires AIS (Automatic Identification System) et deux AUV (Autonomous Underwater Vehicle), un silencieux et le second bruyant. Le transpondeur AIS permet d'envoyer les informations clés d'un navire émetteur telles que son identité, sa position, sa route et sa vitesse et même ses caractéristiques. Le signal AIS fait apparaître deux périodes : une période d'émission qui correspond à un signal utile noyé dans du bruit, et une période sans émission qui ne correspond qu'à du bruit (Fig. 2). Dans ce premier cas on a accès à la composante bruit sans passer par l'estimation de $y(t)$ par EMD. La figure (3) montre la dsp du signal AIS en émission et hors émission. Le signal hors émission est composé essentiellement de bruit blanc dans la mesure où la pente de la dsp en fonction de la fréquence est nulle (Fig. 1). Le signal coïncidant au moment d'une émission AIS (en rouge) concentre l'énergie aux fréquences faibles. Nous avons vérifié si d'une part toutes les périodes d'émission et d'autre

part toutes périodes hors émission avaient la même tendance. Le calcul de la variance d'Allan sur 5 échantillons différents (5 en émission et 5 hors émission) confirme le fait que l'étude de la variance d'Allan mène aux mêmes conclusions quelle que soit la période étudiée (Fig. 4). Nous avons étudié si le

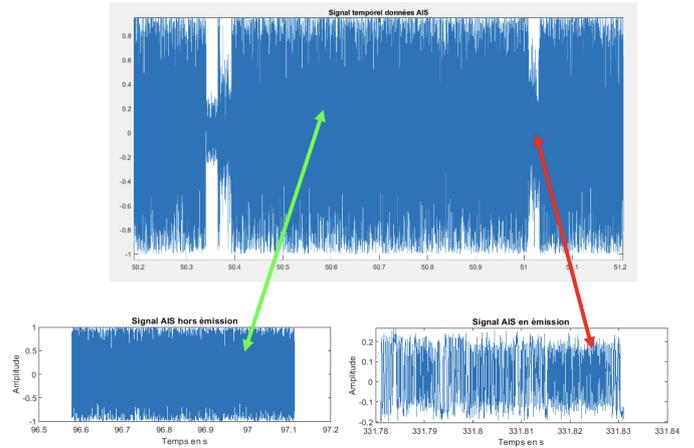


FIGURE 2 – Sélection des périodes hors émission (à gauche) et en émission (à droite).

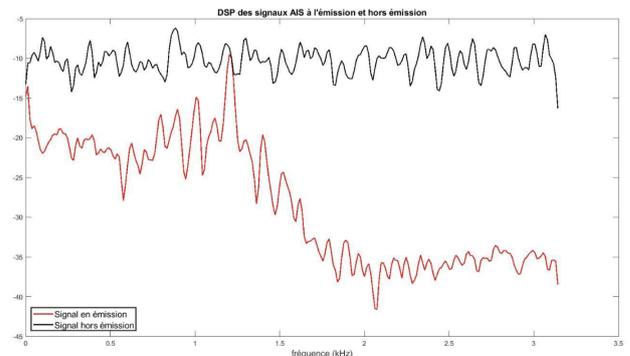


FIGURE 3 – Comparaison des dsp du signal AIS en émission (en rouge) et hors émission (en noir).

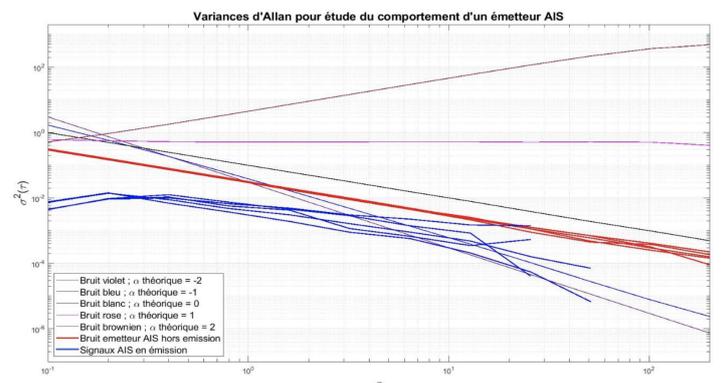


FIGURE 4 – Tracés des variances d'Allan pour différents échantillons (5 en émission et 5 hors émission).

bruit de l'émetteur AIS lorsqu'il émet est identique au bruit qui existe lorsque l'AIS n'émet rien. Pour ce faire, nous avons extrait la composante $y(t)$ pour ne récupérer que le bruit lors de l'émission et le comparer au bruit hors émission. C'est donc la comparaison des tracés des variance d'Allan qui nous renseigne sur les similitudes ou différences entre ces 3 signaux : le bruit seul de l'AIS lorsqu'il n'émet pas ; le signal total de l'AIS lorsqu'il émet ; le bruit de l'AIS lorsqu'il émet. Nous avons sélectionné donc deux intervalles de temps : l'un où l'AIS émet et un où l'AIS n'émet pas, puis on a tracé les variances d'Allan. C'est prioritairement la comparaison des pentes des

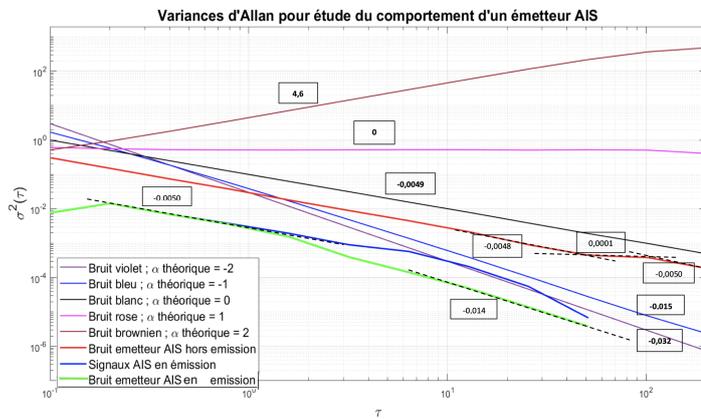


FIGURE 5 – Tracés des variances d’Allan des 3 signaux mentionnés précédemment et comparaison avec les pentes des bruits de référence.

tracés de la variance d’Allan qui importe pour caractériser un bruit. On compare les courbes verte (bruit de l’AIS lorsqu’il émet) et rouge (bruit de l’AIS lorsqu’il n’émet pas). Pour le bruit hors émission (courbe rouge), on remarque que la courbe est très lissée, sans irrégularité, (seulement deux ruptures de pente). Ainsi, la pente et donc le bruit ressort avec beaucoup de netteté : on voit qu’on a les mêmes pentes que le bruit blanc et rose donc un tel émetteur a un bruit composé de bruits blanc et rose (Fig. 5). Pour le signal AIS en émission (courbe bleue), la courbe est plus basse que celle du bruit. Cette translation vers le bas peut être mise en relation avec les amplitudes et donc l’énergie du signal. Il en résulte des valeurs de variance d’Allan plus faibles que pour le bruit hors émission. Par ailleurs, il y a plus de rupture de pente même si on retrouve le bruit blanc, le bruit rose disparaît au profit d’un bruit violet qui n’apparaissait pas pour le bruit hors émission. Pour le signal $y(t)$ lorsque l’AIS émet, est extrait par EMD (courbe verte) : la courbe est toujours traduite vers le bas ce qui veut dire que le bruit est de plus faible amplitude lors de l’émission. De plus, la courbe verte, $y(t)$, ne conservant que les modes de plus haute fréquence, le signal $y(t)$ perd l’énergie des fréquences les plus basses d’où le fait que la courbe verte soit en-dessous de la courbe bleue quand augmente. En outre, la variance d’Allan est très similaire à celle du bruit hors émission. La courbe est plus épurée et avec moins de rupture de pente que celle du signal AIS en émission. On retrouve le bruit blanc du bruit hors émission avec un bruit rose qui disparaît au profit d’un bruit bleu. D’une part, le bruit de l’AIS est sensiblement le même que ce soit en émission et hors émission (essentiellement du bruit blanc ce qui est cohérent avec le tracé de la dsp). D’autre part, on remarque une corrélation entre la hauteur de l’offset sur les courbes de variance d’Allan et l’amplitude et donc l’énergie des signaux. Ce dernier point est particulièrement intéressant pour la classification des émetteurs. En effet, tous les émetteurs n’émettent pas au même niveau. Ainsi, à pente égale, si on observe une translation verticale cela peut nous renseigner sur la puissance des émetteurs et donc sur leur origine.

Nous avons également testé la méthode sur des données d’AUV, pour voir dans quelle mesure la variance d’Allan permet de distinguer un AUV bruyant d’un AUV silencieux (Fig. 6). La comparaison des deux courbes d’AUV met en lumière la différence notable qu’il peut exister entre deux AUV « détectés » via le prisme de la variance d’Allan (Fig. 6). Si l’allure générale des deux signaux sonores d’AUV est similaire (cohérent car on écoute deux AUV), on peut espérer qu’une analyse

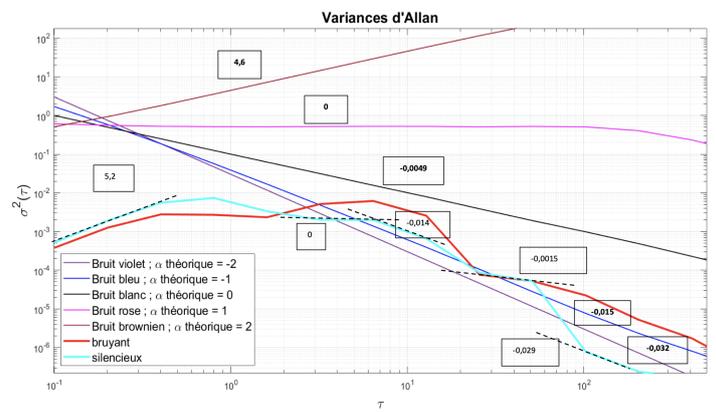


FIGURE 6 – Comparaison des variances d’Allan d’un AUV bruyant et d’un AUV silencieux.

approfondie basée sur les éléments décrits précédemment pourrait aboutir à l’identification formelle d’un AUV.

7 Conclusions

Dans ce travail nous avons proposé une stratégie combinant la variance d’Allan et l’EMD, pour la caractérisation des émetteurs à partir du bruit rayonné par ces dernières. Les résultats préliminaires de l’analyse par variance d’Allan dans le domaine temporel, montre l’intérêt d’une telle stratégie. À terme, l’objectif est de construire une base de données qui, à chaque émetteur, associera une liste de bruits particuliers et permettra donc sa caractérisation. Comme extension à ce travail, est de tester d’autres d’extraction de la composante bruit, comme par exemple la transformée en ondelettes.

Références

- [1] D. ALLAN, « Statistics of atomic frequency standards », *Proc. IEEE*, vol. 54, no. 2, p. 221–230, 1966.
- [2] J. BARNES, « Atomic timekeeping and the statistics of precision signal generators », *Proc. IEEE*, vol. 54, no. 2, p. 207–220, 1966.
- [3] J. RUTMAN, « Characterization of frequency stability in precision frequency sources », *Proc. IEEE*, vol. 79, no. 6, p. 952–960, 1991.
- [4] E. RUBIOLA, « On the measurement of frequency and of its sample variance with high-resolution counters », *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 76, no. 5, p. 1–4, 2005.
- [5] L. GALLEANI et P. TAVELLA, « The dynamic Allan variance », *IEEE TUFFC*, vol. 56, no. 3, p. 624–634, 2016.
- [6] E. RUBIOLA et F. VERNOTTE, « The companion of Enrico’s chart for phase noise and two-sample variances », *IEEE TMTT*, p. 1–30, 2023.
- [7] J. GAGNEPAIN, « La variance de B. Picinbono », *Traitement du Signal*, vol. 15, no. 6, p. 1–6, 1998.
- [8] L. GALLEANI et I. SESIA, « The corrected Allan variance : Stability analysis of frequency measurements with missing data », *IEEE TUFFC*, vol. 66, no. 10, p. 1667–1683, 2019.
- [9] P. FLANDRIN, « Wavelet analysis and synthesis of fractional brownian motion », *IEEE TIT*, vol. 38, no. 2, p. 910–917, 1992.
- [10] D. B. PERCIVAL, « A wavelet perspective on the Allan variance », *IEEE TUFFC*, vol. 63, no. 4, p. 538–554, 2016.
- [11] A. O. BOUDRAA et J. C. CEXUS, « EMD-Based Signal Filtering », *IEEE TIM*, vol. 56, no. 6, p. 2196–2202, 2007.