

# Insertion d'informations numériques dans un signal : Application à la classification de données expérimentales en anémométrie laser Doppler

Alain LE DUFF<sup>1</sup>, Bruno GAZENGEL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>École Supérieure d'Électronique de l'Ouest, 4, Rue Merlet de la Boulaye, 49009 Angers cedex 01, France

<sup>2</sup>Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Av. O. Messiaen, 72085 Le Mans cedex 09, France  
alain.le\_duff@eseo.fr, Bruno.Gazengel@univ-lemans.fr

**Résumé** – Ce travail propose d'évaluer une procédure de marquage de signaux expérimentaux en anémométrie laser à effet Doppler. La méthode adoptée est basée sur une technique d'étalement de spectre et des mesures de corrélation. L'impact du marquage sur la qualité des estimations des paramètres de la vitesse particulière acoustique est mesuré de manière objective à l'aide d'une méthode basée sur la dérivée de la phase du signal.

**Abstract** – The aim of this work is to propose to evaluate a watermarking procedure for experimental signals in laser Doppler anemometry. The adopted method is based on a spread spectrum technique and correlation measurements. The impact of the watermark on the quality of the estimation of the particle acoustic velocity parameters is measured using a phase derivative based estimator method.

## 1 Introduction

La mesure de vitesse particulière acoustique par anémométrie laser Doppler (ALD) génère des quantités de données considérables. Dans un contexte de traitement en temps différé de ce type de données il est indispensable de pouvoir leur associer un certain nombre d'informations concernant, par exemple, les paramètres du système d'acquisition (fréquence d'échantillonnage, date, etc.). Une solution consiste simplement à positionner ces renseignements dans l'entête du fichier accueillant les données issues de l'acquisition. Une alternative consiste à insérer directement ces informations dans les données acquises. Une telle méthode de classification des signaux d'acquisition permet d'envisager, par exemple, la mise en place d'une base de donnée de signaux ALD partagée par plusieurs laboratoires de recherche. Les données peuvent ainsi être échangées de manière discrète et indépendante du format des fichiers. Pour cela il est indispensable de choisir une méthode de marquage à la fois robuste et ne perturbant que très faiblement les mesures des paramètres de la vitesse acoustique. Dans ce papier nous proposons d'évaluer, à titre de faisabilité, une procédure de marquage basée sur une technique d'étalement de spectre et des mesures de corrélation. L'impact du marquage sur la qualité des estimations des paramètres de la vitesse acoustique est par la suite mesuré de manière objective à l'aide d'une méthode basée sur la dérivée de la phase du signal Doppler (PDBE - Phase Derivative Based Estimator).

## 2 Signaux Doppler

Le principe de la mesure de vitesse particulière acoustique par ALD est décrit en détail dans [1]. Les expériences que nous menons supposent que la vitesse particulière acoustique  $V(t)$

se compose d'une composante continue (vitesse d'écoulement due à la convection naturelle) à laquelle se superpose une composante sinusoïdale (excitation acoustique) de fréquence  $F_{ac}$  :

$$V(t) = V_{ec} + V_{ac} \cos(2\pi F_{ac}t + \phi_{ac}) \quad (1)$$

Les paramètres du signal acoustique sont la fréquence acoustique  $F_{ac}$ , supposée connue, la phase acoustique initiale  $\phi_{ac}$  et l'amplitude de la vitesse acoustique  $V_{ac}$  que l'on cherche à estimer. La vitesse de convection,  $V_{ec}$ , supposée petite devant  $V_{ac}$ , doit elle aussi être estimée. Dans l'hypothèse où une seule particule d'ensemencement traverse le volume de mesure, le signal Doppler prend la forme

$$s(t) = A(t) \{M + \cos[2\pi F_B t + 2\pi D x(t) + \phi_0]\} \quad (2)$$

où  $x(t)$  est la position de la particule ( $V(t) = dx(t)/dt$ ) et  $F_B$  la fréquence porteuse (de l'ordre de 40 MHz). Dans la relation (2),  $A(t)$  représente l'amplitude variable du signal avec

$$A(t) = K \exp\{-[\beta x(t)]^2\} \quad (3)$$

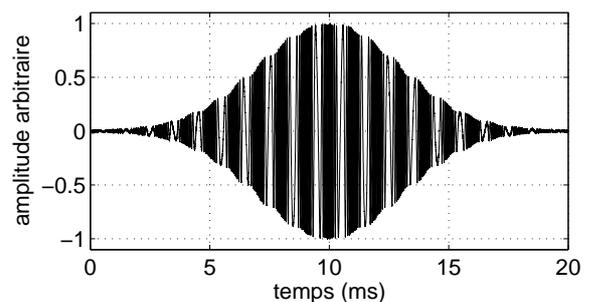


FIG. 1: Composante en phase,  $y_1(t)$ , du signal Doppler.  $F_{ac} = 500$  Hz.

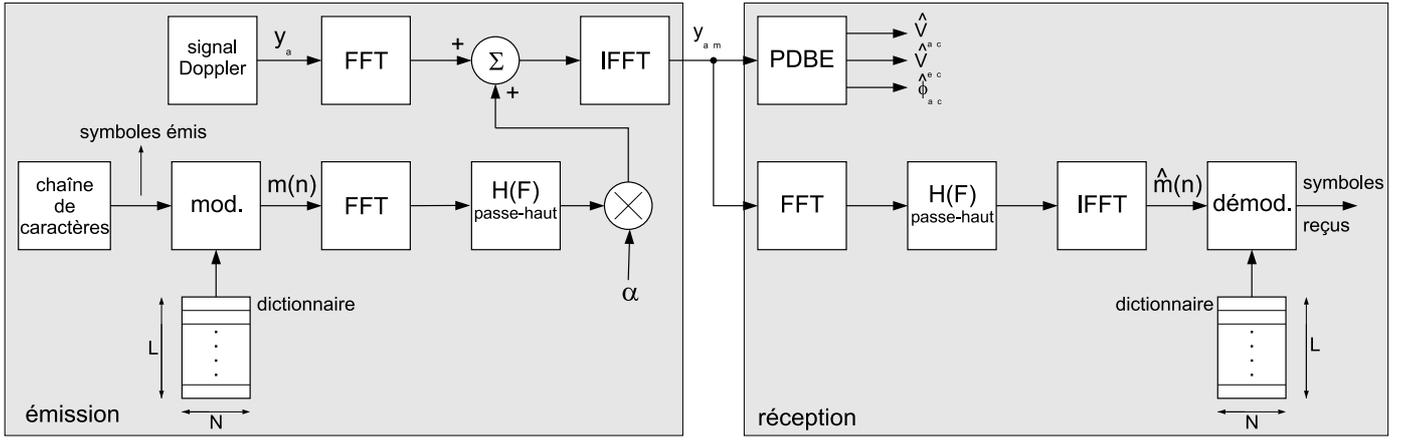


FIG. 2: Système de marquage.

où le terme  $1/\beta$  dépend du système de mesure. La phase instantanée est donnée, quant à elle, par

$$2\pi D x(t) + \phi_0 = 2\pi F_D t + \phi_0 = \phi(t). \quad (4)$$

Par la suite la composante basse-fréquence  $MA(t)$  est éliminée à par un filtrage passe-haut. L'équation (2) devient alors

$$s(t) = A(t) \cos [2\pi F_B t + \phi(t)]. \quad (5)$$

Enfin, le spectre de puissance de  $s(t)$  est ramené en bande de base à l'aide d'un démodulateur en quadrature analogique synchrone de la fréquence  $F_B$ . Comme les spectres de  $A(t)$  et de  $\cos \phi(t)$  présentent des supports fréquentiels disjoints une bonne approximation des signaux  $y_1(t)$  et  $y_2(t)$  peut être donnée par

$$y_1(t) = A(t) \cos \phi(t), \quad (6)$$

$$y_2(t) = A(t) \sin \phi(t). \quad (7)$$

Cette opération est analogue à une transformée de Hilbert. Après échantillonnage nous obtenons les signaux à temps discret  $y_1(k)$  et  $y_2(k)$  donnés par

$$y_1(k) = A(k) \cos \phi(k) + b_1(k) \quad (8)$$

$$y_2(k) = A(k) \sin \phi(k) + b_2(k) \quad (9)$$

Dans les relations (8) et (9),  $b_1(k)$  et  $b_2(k)$  sont deux bruits blancs, indépendants, à moyennes nulles et de variance identique. Les deux composantes  $y_1(k)$  et  $y_2(k)$  sont destinées à accueillir les informations numériques.

La figure 1 donne, à titre d'exemple, l'allure d'un signal d'observation  $y_1(k)$  synthétisé numériquement.

### 3 Principes de la méthode de marquage

La procédure de marquage s'inspire d'une méthode décrite dans [2]. Son principe est illustré par la figure 2. L'information binaire est codée à l'aide d'un dictionnaire  $\mathcal{D}$  associant à chaque symbole à transmettre ( $m$ -uplet binaire) une séquence aléatoire blanche gaussienne de longueur  $N$ . Ce dictionnaire est donc constitué de  $M$  signaux aléatoires, orthonormalisés par la procédure de Gram-Schmidt [3], entretenant une relation bijective avec les  $M = 2^m$  symboles. Le signal ainsi obtenu est alors inséré par sommation fréquentielle (hautes-fréquences) avec le signal analytique

$$y_a(k) = y_1(k) + jy_2(k) \quad (10)$$

associé aux signaux d'observation. Un coefficient de pondération  $\alpha$  permet de contrôler la puissance de la marque. À la réception, les composantes HF du signal marqué sont soumises à un détecteur par corrélation. L'estimation de la valeur maximale du coefficient de corrélation entre le signal et les  $M$  signaux du dictionnaire, connu du récepteur, détermine alors les symboles émis les plus probables.

### 4 Estimation des paramètres de la vitesse

L'estimation de la vitesse dont le principe est détaillé dans un article précédant [4] s'effectue en trois phases : Un opérateur de type arctan permet d'extraire la phase instantanée  $\phi(k)$  :

$$\phi(k) = \arctan \left[ \frac{y_2(k)}{y_1(k)} \right] \quad (11)$$

La vitesse est ensuite estimée en dérivant la phase ce qui conduit à

$$\hat{V}(k) = \frac{1}{2\pi D} \frac{[\phi(k+1) - \phi(k-1)]}{2T_e} \quad (12)$$

En tenant compte de la relation (4) la vitesse estimée devient :

$$\hat{V}(k) = V_{ec} + \left( \frac{\sin 2\pi f_{ac}}{2\pi f_{ac}} \right) V_{ac} \cos(2\pi f_{ac} k + \phi_{ac}). \quad (13)$$

Enfin une démodulation en quadrature, synchronisée par le signal d'excitation acoustique de fréquence  $F_{ac}$ , suivie d'une transformation de coordonnées cartésiennes en coordonnées polaires, permet d'extraire l'amplitude  $\hat{V}_{ac}$  et la phase  $\hat{\phi}_{ac}$  de la vitesse acoustique,  $\hat{V}_{ec}$  étant estimée, quant à elle, à l'aide d'un simple filtrage de type passe-bas. L'ensemble de cette procédure est résumé par la figure 3.

### 5 Résultats et conclusions

Les performances de la méthode de marquage sont évaluées à l'aide de 500 simulations de Monte-Carlo et à partir de signaux Doppler de synthèse. Pour chaque signal une marque de 310 bits est insérée avec une puissance variant de  $0V^2$  (insertion nulle) à  $5V^2$ . Le signal Doppler recevant la marque est représenté par  $y_1(k)$  et  $y_2(k)$  échantillonnés chacun à une fréquence de 100 kHz et sur une durée de 80 ms ce qui correspond à 8000 échantillons.

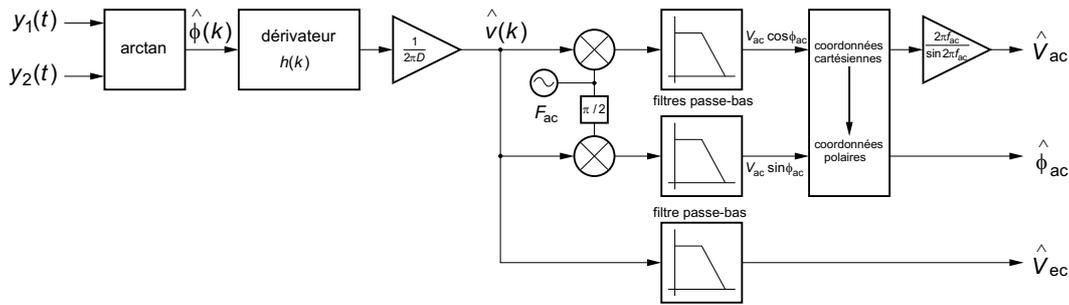


FIG. 3: Estimation des paramètres de la vitesse acoustique.

Dans un premier temps, l'évolution du Taux d'Erreur Binaire (TEB) moyen en fonction du rapport signal à bruit (RSB) du signal Doppler et de la puissance d'insertion  $\alpha$  de la marque est étudié (figure 4 (a)). Dans un second temps les variances d'estimation des paramètres de la vitesse acoustique sont étudiées en fonction de  $\alpha$  (figure 5). De plus, ces différentes variances sont comparées aux bornes de Cramer-Rao déterminées lors d'une précédente étude [1]. Les résultats présentés dans ce résumé se limitent aux valeurs suivantes :  $V_{ac} = 1000$  Hz,  $V_{ec} = 2$  mm/s et  $\phi_{ac} = 80^\circ$ . Le dictionnaire utilisé est, quant à lui, constitué de  $M = 8$  vecteurs de longueur  $N = 64$ .

Dans la pratique les signaux Doppler observés présentent très fréquemment des RSB supérieurs à 15 dB. La figure 4 (b) montre alors l'évolution du taux du TEB en fonction de  $\alpha$  pour RSB = 15 dB. Il est possible de constater que le taux d'erreur devient très faible à partir d'une puissance de  $2V^2$  ( $\alpha = 2$ ) (pas d'erreur observée pour 500 simulations). De même, dans des conditions identiques, la figure 6 montre qu'il est difficile d'observer un écart notable entre les variances des estimations des signaux marqués et de ceux qui ne le sont pas ( $\alpha = 0$ ) pour des puissances de marque inférieures à  $2,5V^2$  ( $\alpha = 2, 5$ ). Il apparait donc que, pour cette application, une puissance de marquage  $\alpha$  proche de  $2V^2$  ( $\alpha \approx 2$ ) constitue une valeur optimale assurant un compromis entre un taux d'erreur faible et une bonne précision des estimations des paramètres de la vitesse acoustique.

Ce travail préliminaire montre que le marquage de données expérimentales en ALD est envisageable dans de bonne condition de robustesse et de précision des mesures.

## References

- [1] A. Le Duff, G. Plantier, J.C. Valière et R. Perdriau, *Acoustic Velocity Measurement in the Air by Means of Laser Velocimetry: Cramer-Rao Bounds and Maximum Likelihood Estimation*, IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing, ICASSP'2002, Orlando, may 2002.
- [2] M.D. Swanson, B. Zhu, A.H. Tewfik, L. Boney. *Robust audio watermarking using perceptual masking*. Signal Processing, Vol. 66 pp. 337-355, 1998.
- [3] J.G. Proakis. *Digital communications*. McGraw-Hill, 1995.
- [4] A. Le Duff, G. Plantier, J.C. Valière, B. Gazengel, *Mesure de vitesse acoustique particulière en champ libre par*

*anémométrie laser Doppler*, 19ème colloque Gretsi sur le Traitement du Signal et des Images, Paris, septembre 2003.

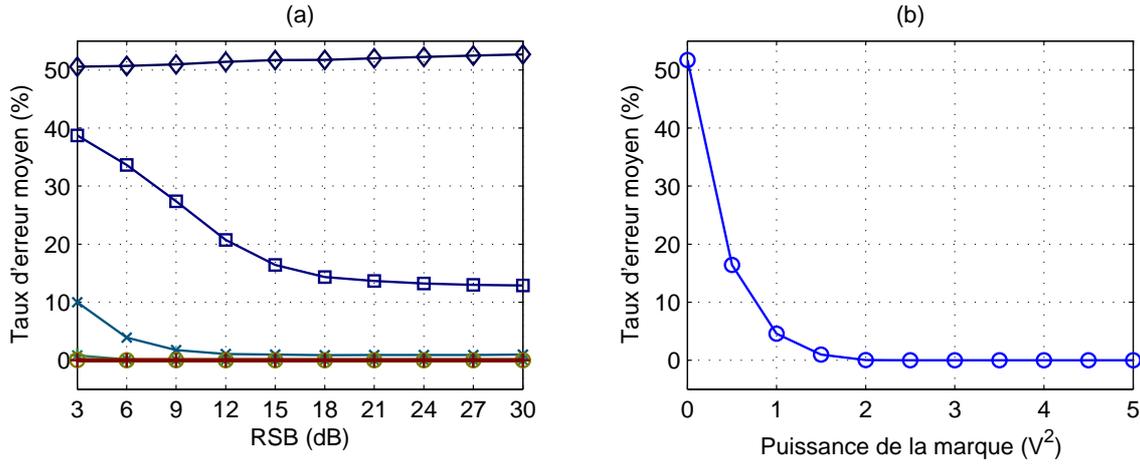


FIG. 4: (a) Taux d'erreur en fonction du RSB pour différentes valeurs de  $\alpha$  :  $- + - \alpha = 5$ ,  $- \circ - \alpha = 4$ ,  $- * - \alpha = 3$ ,  $- \times - \alpha = 2$ ,  $- \square - \alpha = 1$ ,  $- \diamond - \alpha = 0$ ; (b) Taux d'erreur en fonction de  $\alpha$  pour RSB = 15 dB.

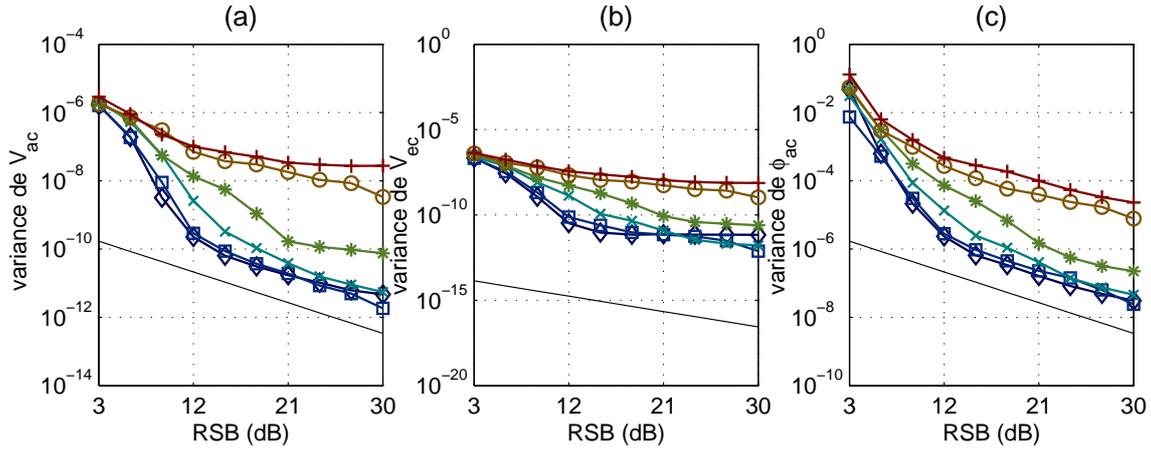


FIG. 5: Variances d'estimation - (a)  $V_{ac}$ , (b)  $V_{ec}$ , (c)  $\phi_{ac}$  - en fonction du RSB pour différentes valeurs de  $\alpha$  :  $- + - \alpha = 0$ ,  $- \circ - \alpha = 1$ ,  $- * - \alpha = 2$ ,  $- \times - \alpha = 3$ ,  $- \square - \alpha = 4$ ,  $- \diamond - \alpha = 5$ , - CRB.

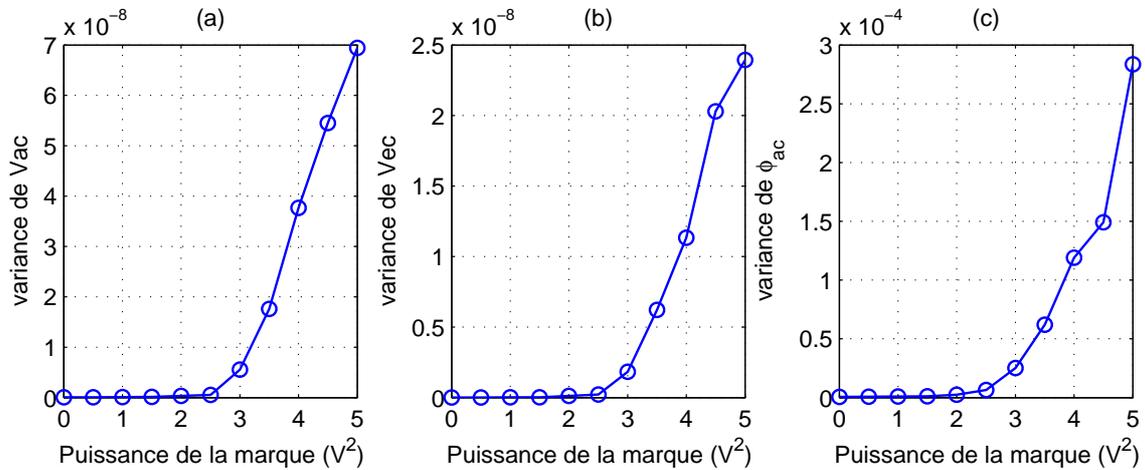


FIG. 6: Variances d'estimation en fonction de la puissance de la marque pour RSB = 15 dB - (a)  $V_{ac}$ , (b)  $V_{ec}$ , (c)  $\phi_{ac}$ .