

Construction et analyse des signaux non-stationnaires adaptés à la caractérisation des phénomènes turbulents

Ion Candel, Cornel Ioana, Bertrand Reeb, Guy d'Urso

▶ **To cite this version:**

Ion Candel, Cornel Ioana, Bertrand Reeb, Guy d'Urso. Construction et analyse des signaux non-stationnaires adaptés à la caractérisation des phénomènes turbulents. GRETSI 2013 - XXIVème Colloque francophone de traitement du signal et des images, Sep 2013, Brest, France. pp.I376. hal-00985636

HAL Id: hal-00985636
https://hal.science/hal-00985636

Submitted on 30 Apr 2014

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.

Construction et analyse des signaux non-stationnaires adaptés à la caractérisation des phénomènes turbulents

ION CANDEL[1,2], CORNEL IOANA[1], BERTRAND REEB[2], GUY D'URSO[3]

[1] Gipsa-lab,
11 rue des Mathématiques BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex, France
[2] Electricité de France, Division Technique Générale
21 Avenue de l'Europe, 38040, Grenoble, France
[3] R&D, Electricité de France,
6 Quai Watier, 78401, Chatou, France

[1]Ion.Candel @gipsa-lab.grenoble-inp.fr, Cornel.Ioana@ gipsa-lab.grenoble-inp.fr,
[2,3]Ion.Candel@edf.fr, Bertrand.Reeb@edf.fr, Guy.Durso@edf.fr

Résumé – Dans ce papier nous proposons une approche hybride signal-physique pour la détection de la présence de la turbulence dans un fluide. L'idée est de construire une forme d'onde capable de porter, de manière robuste, l'information sur la turbulence et de mettre en place le traitement qui permettra l'extraction des paramètres liés à ce phénomène. Il est donc nécessaire de réaliser une correspondance entre les grandeurs qui caractérisent les écoulements turbulents et les signaux acoustiques. Nous allons montrer que l'utilisation des signaux avec une loi de fréquence instantanée polynomiale est potentiellement porteuse de l'information de turbulence que nous pouvons extraire à partir de l'estimation de la déformation de cette loi.

Abstract – In this paper, we present a hybrid approach based on the signal – turbulence physics interaction in order to detect the presence of turbulence in a fluid. The idea is o build a waveform capable to embed, in a robust manner, the turbulence information and to develop a signal processing technique that will allow the extraction of the phenomena's parameters. In this way, we establish a correspondence between the physical parameters that define turbulent flows (wave number, Reynolds number, etc.) and the ones that define acoustic signals (amplitude, spectrum, phase, etc.). We show that signals with an instantaneous frequency law (IFL) have the potential of carrying information regarding the turbulence and quantified by estimating the law's deformation.

1 Introduction

Dans ce travail nous proposons une approche pour l'analyse et la représentation de la turbulence avec des signaux acoustiques. Les techniques ultrasonores, utilisées par exemple dans les applications de débitmètrie, sont basées largement sur des critères d'amplitude. L'amplitude de signaux transmis par les capteurs acoustiques varie avec l'intensité de la turbulence noyée dans l'écoulement, mais la technique reste sensible aux interférences et aux perturbations, ce qui introduit des erreurs dans les résultats des mesures (figure 1). Toutefois, dans un contexte de plusieurs sources de turbulence, leur séparation reste difficile.

L'idée est de réaliser une liaison entre les paramètres de la turbulence (vitesse, dimensions, fréquence de pulsation) avec les paramètres de signaux transmis. La forme d'onde émise sera adaptée à la dynamique de la turbulence et les grandeurs d'écoulement mesurées (vitesse, débit, etc.).

Le papier est organisé sous la forme suivante. Le paragraphe 2 présente quelques considérations physiques permettant de relier la turbulence avec les paramètres des signaux acoustiques. Le paragraphe 3 définie la forme d'onde adéquate pour l'étude de la turbulence. Les résultats expérimentaux sont décrits dans le paragraphe 4.

2 Le spectre de la turbulence et les signaux acoustiques

La plupart de dispositifs utilisés dans les techniques de mesure en ultrason sont basées sur la transmission

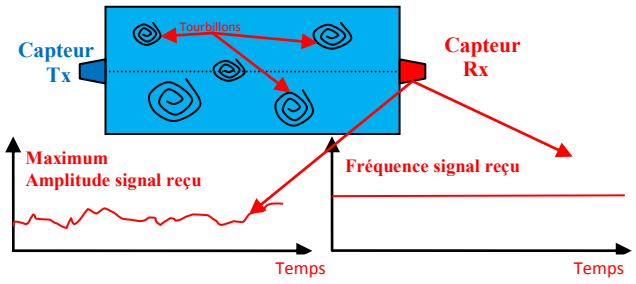


Figure 1 : Modifications sur l'amplitude de signaux au passage de la turbulence

d'impulsions centrées sur la fréquence centrale des capteurs acoustiques. Le passage dans le milieu turbulent modifie l'amplitude de signaux et leur temps du vol entre l'émission et la réception, comme illustré sur la figure 1.

Ces techniques exploitent les modifications d'amplitude dues au passage des inhomogénéités (la turbulence, par exemple) noyées dans l'écoulement. Plusieurs paramètres de base peuvent être estimés comme la température, la vitesse et le débit du fluide trouvé dans le milieu turbulent. Si pour la température une précision assez importante n'est pas requise, pour le débit et la vitesse, la précision reste encore un défi qui est de plus en plus difficile d'améliorer. En effet, à part la turbulence qui est considérée comme « utile » pour la mesure, il existe aussi de la turbulence qui appartient aux sources d'erreur (sillage, vibrations, etc.).

Afin d'améliorer les mesures, dans [1] et [2] les auteurs ont montré que le remplacement de la forme d'onde transmise avec des formes d'onde plus évoluées offre une meilleure

robustesse aux interférences et fournit également une basse adéquate pour une représentation plus précise de la dynamique de l'écoulement.

Pour aller au delà des techniques d'amplitude, il est nécessaire de relier les grandeurs qui caractérisent l'écoulement turbulent avec les grandeurs qui caractérise les signaux acoustiques et trouver une méthode qui utilise les caractéristiques communes.

La première démarche est d'étudier la dynamique de la turbulence. Il est connu que l'écoulement peut être dissocié en écoulement turbulent et écoulement laminaire [3]. La grandeur qui caractérise cette classification est le nombre de Reynolds qui s'exprime, selon [4], comme :

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}, \tag{1}$$

ou ρ est la densité du fluide (dans notre cas l'eau), v est la vitesse de la turbulence, L est l'échelle de longueur et μ est la constante de viscosité dynamique. Toutefois, on peut écrire l'équation (1) sous la forme suivante :

$$Re = \frac{k^2}{\varepsilon \cdot \nu}, \quad k = \frac{f}{v}, \tag{2}$$

où k est ne nombre d'onde caractéristique à la turbulence avec la fréquence f et la vitesse v, ε est la constante dissipative et ν est la viscosité cinématique.

La fréquence caractéristique à chaque turbulence dépend de la vitesse et les dimensions de l'endroit où la turbulence se trouve (conduite, pertuis, etc.).

On considère maintenant le cas des signaux acoustiques transmis pendant une durée D dans une colonne caractérisée par un écoulement turbulent, comme illustré sur la figure 2.

Le signal reçu, $x(t)$ est le résultat de la convolution entre le signal émis $s(t)$ et la réponse impulsionnelle du milieu turbulent, $h(t)$:

$$x(t) = (s * h)(t), \forall t \in [0, D] \tag{3}$$

La forme générale du signal émis $s(t)$ est donnée par :

$$s(t) = A(t) e^{j\omega_0 t}, \forall t \in [0, D] \tag{4}$$

où $A(t)$ est l'enveloppe du signal $s(t)$ et ω_0 est la fréquence de résonance des capteurs acoustiques. Le terme $A(t)$ portera l'information concernant la turbulence à la réception.

Dans l'équation (3) le terme $h(t)$ représente la réponse impulsionnelle de la turbulence noyée dans l'écoulement. Le spectre correspondant est connu comme le *spectre du*

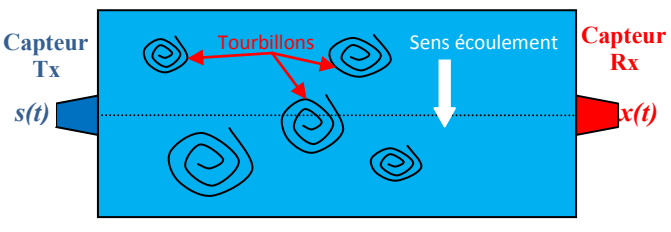


Figure 2 : Transmission des signaux acoustiques dans une colonne d'eau en écoulement turbulent

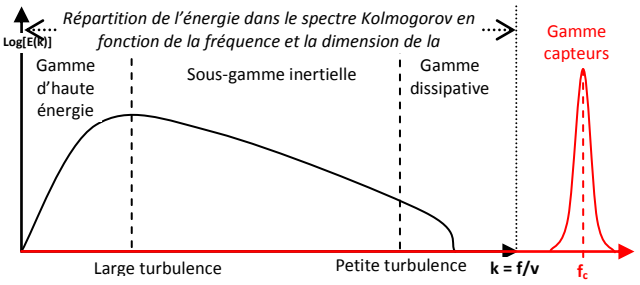


Figure 3 : le spectre de turbulence et la bande passante de capteurs acoustiques

*du Kolmogor*ov [2] et représente la répartition de l'énergie d'un écoulement turbulent en fonction du nombre d'onde de la turbulence $k = f_{turb}/v_{turb}$ [3].

Selon [4] et [5], cette fréquence caractéristique varie dans une plage très large, entre des dizaines d'hertz et une dizaine de kilohertz. Mais les transducteurs utilisés pour les applications en ultrason ont une fréquence centrale au moins dix fois plus grande que les fréquences de pulsation de la turbulence, comme illustré sur la figure 3.

Le spectre du Kolmogorov illustré sur la figure 3 montre qu'en quantifiant les variations sur le nombre d'onde dues à la dynamique de la turbulence, les paramètres dynamiques de turbulence seront connues. Ceci montre que l'impact de chaque type de turbulence sur un résultat de mesure (vitesse d'écoulement, débit, etc.) est quantifiable et que les impacts indésirables (qui introduisent des erreurs) seront supprimés. L'effet sera une amélioration dans la précision de mesure, mais aussi une meilleure connaissance de la physique de l'écoulement.

3 Formes d'onde adaptées à la dynamique de la turbulence

L'idée principale de ce papier est de construire une forme d'onde *capable d'interagir avec le spectre de la turbulence* et de mettre en place la méthode d'extraction des paramètres du signal reçu portant l'information sur cette interaction. Etant donnée la distribution en basse fréquence du spectre de Kolmogorov (en dessous de 20 kHz), nous proposons de concevoir un signal avec une *enveloppe définie par une loi de modulation adéquate pour la mesure de l'interaction avec la turbulence*. Cette loi de modulation modifiera la fréquence instantanée de l'enveloppe dans la bande 500 Hz – 10 kHz.

De façon générale, nous supposons que l'enveloppe dans l'équation (4) est caractérisée par une phase instantanée de forme polynomiale, définie par :

$$\begin{aligned} A(t) &= e^{j\varphi(t)}, \\ \phi(t) &= \sum_{k=1}^{p} a_k t^k, \forall t \in [0, D], p \in \mathbb{N}^*, a_k \quad \mathbb{R} \end{aligned} \tag{5}$$

où a_k sont les coefficients du polynôme de la phase qui donneront la forme de la LFI.

En prenant en compte uniquement le trajet de propagation direct, le signal reçu $x(t)$ est décrit par l'équation :

$$x(t) = \alpha s[t - \tau(t)], \forall t \in [0, D] \tag{6}$$

où $\tau(t)$ est le décalage variable en temps, due à la turbulence et α est le coefficient d'atténuation dans l'eau. Le décalage est

proportionnel avec un vecteur de déplacement $r(t)$ qui dépend de la vitesse de la turbulence :

$$\tau(t)=\frac{\vec{r}(t)}{c}=\left(\frac{r_0}{c}+\frac{vt}{c}\right)\cos(\theta),\forall t\in[0,D] \qquad (7)$$

où c est la vitesse de propagation de l'onde acoustique dans l'eau, r_0 est la valeur initiale du vecteur de déplacement, θ est l'angle entre le vecteur de déplacement et la direction de propagation signal et v est la vitesse de la turbulence.

Le signal $x(t)$ aura donc, en ignorant les perturbations, l'expression suivante :

$$\begin{aligned} x(t) &= e^{j\phi(t-\tau(t))}\cdot e^{j\omega_0[t-\tau(t)-t_0]} \\ &= \underbrace{e^{j\phi\left(t-\frac{v}{c}t\right)}}_{enveloppe}\ \underbrace{e^{j\omega_0[t-\tau(t)-t_0]}}_{porteuse}, \end{aligned} \qquad (8)$$

où t_0 est le temps de vol entre l'émission et la réception.

Selon (5), la phase de l'enveloppe du signal reçu sera caractérisée toujours par un polynôme mais dont les coefficients polynomiaux seront modifiés par la présence du phénomène de turbulence :

$$\begin{aligned} &\phi\left(t-\frac{v}{c}t\right)=\sum_{k=1}^{p}a_k\left(t-\frac{v}{c}t\right)^k=\sum_{k=1}^{p}a_k t^k\left(1-\frac{v}{c}\right)^k, \\ &\forall t\in[0,D], p\in\mathbb{N}^*, a_k \quad \mathbb{R} \end{aligned} \qquad (9)$$

Comme la vitesse de la turbulence v est très faible par rapport à la vitesse de propagation du signal, c, le terme v/c est très faible. C'est pourquoi la « visibilité » de ce terme sur la LFI pourrait être assurée par la forme polynomiale de la phase. Afin d'identifier le degré optimal, des expérimentations ont été réalisées afin de trouver l'ordre polynomial pour lequel la variation de la phase est la plus importante (figure 4). Sur la figure 4, nous présentons les spectrogrammes des enveloppes des signaux (obtenues après la démodulation d'amplitude) pour trois ordre polynomiaux – 1, 2, 3. Nous présentons également l'estimation des LFI correspondantes. L'estimation a été réalisée à partir du spectrogramme (le rapport signal sur bruit des signaux reçus est élevé) :

$$LFI(t)=\arg\max_f\left|STFT_{env}(t,f)\right|^2, \qquad (9)$$

où *STFT* est la Transformée Fourier à Courte Terme.

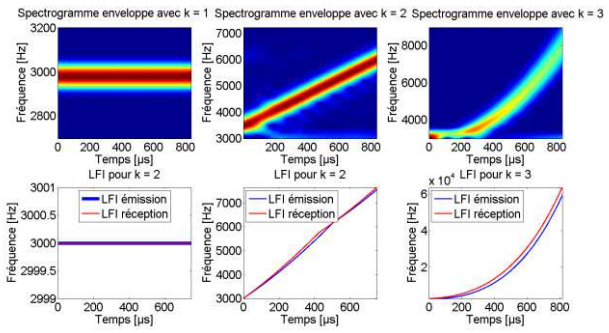


Figure 4 : Les spectrogrammes des enveloppes et les variations de leurs LFIs pour *k = 1, 2 et 3.*

4 Résultats

Plusieurs essais ont été réalisés afin de trouver, tout d'abord, le dégrée du polynôme de phase qui s'adapte mieux au milieu turbulent. Les formes d'onde ont été construites en Matlab® et émises en utilisant une maquette expérimentale. Les enveloppes considérées ont eu des LFIs avec $k = 2$ *et 3* et une modulation sinusoïdale de fréquence Pour chaque cas, des centaines de transmissions ont été réalisées et enregistrées. Après, la différence entre les LFIs émises et reçues a été tracée (pour toutes les transmissions) afin de choisir le meilleur polynôme pour la LFI.

Figures 5, 6 et 7 illustrent les différences entre les LFIs émises et reçues pour les trois cas. On observe que pour $k = 2$ et $k = 3$ le phénomène turbulent est plus visible que pour le cas avec des LFIs sinusoïdales. La LFI sinusoïdale présente une symétrie à l'axe vertical (figure 7) et donc ne sera pas utile en pratique.

Figure 6 présente l'évolution de la turbulence en traçant les déformations des LFIs des réceptions successives. Deux turbulences ont été générées aux instants $t_1 = 1.65$ *secondes* et $t_2 = 3.98$ *secondes*, sous la forme de deux tourbillons. Comme les déformations des LFIs le montre, le passage entre l'émetteur et le récepteur des vortex est bien détecté.

Nous pouvons également constater que l'utilisation de l'estimateur de la LFI basé sur le spectrogramme est suffisamment efficace car, dans les expérimentations qui nous ont conduit à ces résultats, les perturbations de tout genre ont été négligeables. Dans des conditions plus proches de la réalité (profil de turbulence plus complexe, interférences, propagation multi-trajets,…), que nous sommes en train d'étudier, des estimateurs plus performants de la LFI seront étudiés et comparés.

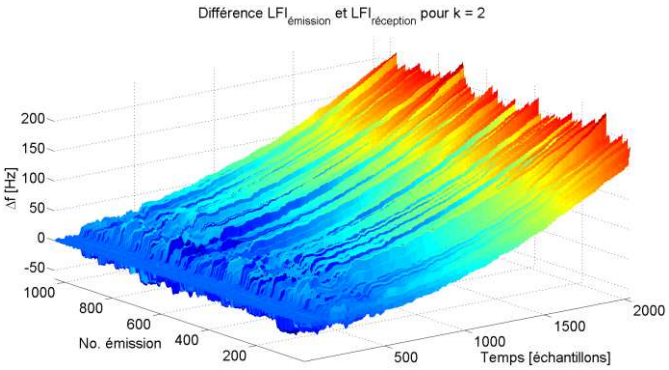


Figure 5 : Différence entre les LFI émises et reçues pour k = 2.

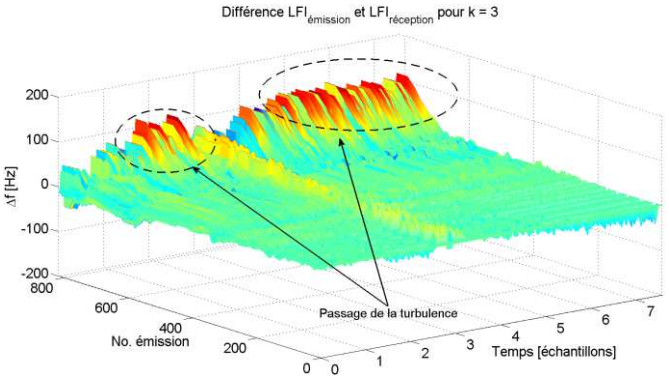


Figure 6 : Différence entre les LFI émises et reçues pour k = 3.

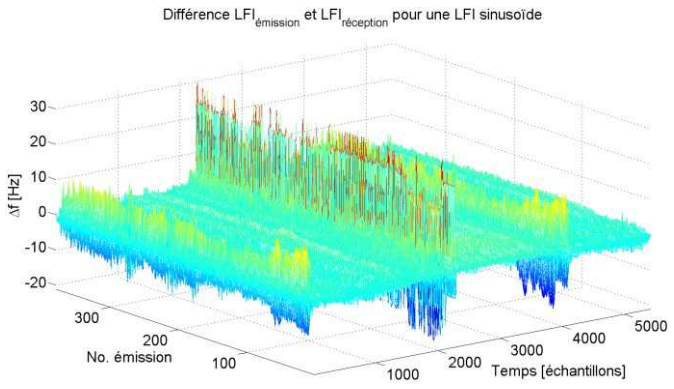


Figure 7 : Différence entre les LFI émises et reçues pour une LFI sinusoïdale

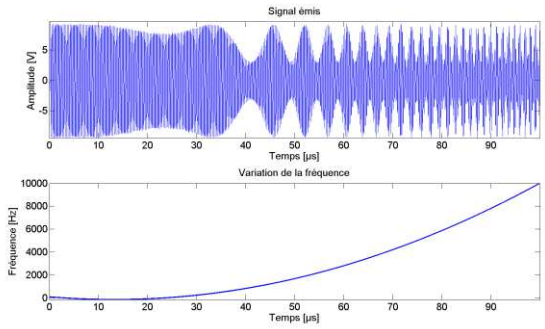


Figure 8 : Forme d'onde adaptée à la physique et sa LFI pour k = 3.

La nouvelle forme d'onde sera donc un signal modulé en amplitude sur la fréquence de résonance des capteurs, avec une enveloppe qui présente une loi de variation d'ordre 3, comme illustré sur la figure 8.

5 Conclusions

Dans ce papier nous avons une nouvelle technique de caractérisation de milieux turbulents en utilisant des formes d'onde adaptées à la turbulence noyée dans l'écoulement.

Les modifications sur les enveloppes de signaux conduisent à la construction des formes d'ondes modulées en amplitude. Le contenu spectral de l'enveloppe est caractérisé par une LFI polynomiale.

Des essais ont été réalisés à petite échelle, donc des turbulences avec faible vitesses et énergie augmentée, mais avec une durée de temps courte. Les estimations des LFIs ont été calculées en réalisant le spectrogramme de chaque enveloppe reçue et après un calcul entre la distance entre les pics fréquentiels importants. Une amélioration ultérieure sera le developpement d'une méthode qui fournira des LFIs plus précises.

Cette technique ouvre des nombreuses possibilités pour la conception d'une nouvelle gamme de dispositifs capable d'estimer les paramètres dynamiques d'écoulement (vitesse, débit, etc.) avec une meilleure précision que la génération actuelle.

6 Références

[1] I. CANDEL, C. IOANA, D. LEMON, and B. REEB, "Using Wide Band Signals for Obstacle Path Correction in Acoustic Scintillation Flow Meters", The 11th International Conference on INFORMATION SCIENCE, SIGNAL PROCESSING and their Applications, ISSPA 2012, Montreal, Canada, July 3 – 5 2012.

[2] I. CANDEL, C. BERNARD, C. IOANA, B. REEB, D. BOLDO, "Sparse Representation of Channel's Impulse Response for Underwater Inhomogeneities Tracking", the 21st European Signal Processing Conference (Eusipco), Marrakech, Morocco, 9th – 13th September 2013.

[3] J. JIMENEZ, "The Contributions of A.N. Kolmogorov to the Theory of Turbulence", Arbor CLXXVIII, 704 (August 2004), pp. 589 – 606.

[4] U. FRISCH, "Turbulence: The Legacy of A.N. Kolmogorov", Cambridge University Press, Cambridge, U.K, 2001.

[5] H. TENNEKES, J. L. LUMLEY, "A First Course in Turbulence", The Massachusetts Institute of Technology Press, U.S.A, 1999.