

---

## Enoncé de TP numérique sur Matlab "Analyse de signaux turbulents" séance 1

---

*Durée : 2 heures*

L'objectif de ce TP est d'analyser diverses données expérimentales d'écoulements turbulents au moyen des outils statistiques proposés en cours (moyennes, calculs d'intensité turbulente, fonctions de corrélation et d'autocorrélation, transformée de Fourier et densité spectrale). On dispose pour cela de données ponctuelles obtenues par ADV (mesures acoustiques) en rivière, et par LDV (mesures optiques) pour une turbulence de grille en laboratoire.

### Présentation des données expérimentales

#### Mesures d'écoulement en rivière à l'Aouach (Garonne, amont de Toulouse)

Des mesures de vitesse ont été réalisées dans une couche limite turbulente de rivière, sur un site d'étude en amont de Toulouse (Aouach), au moyen d'un ADV (Acoustic Doppler Velocimetry) de marque Sontek. Dans la figure 1, on a reproduit à gauche une photographie du dispositif expérimental sur le terrain, ainsi qu'un schéma de la tête de l'ADV à droite. Des séries d'impulsions très rapides sont émises vers un volume de mesure où passent des particules en suspension dans l'eau. Le signal réfléchi (réflexion acoustique) est enregistré par trois micros et analysé pour déterminer le changement de fréquence (effet doppler) induit par le mouvement des particules qui renvoient le signal acoustique. Au moyen de trois micros, on est capable de déterminer la vitesse des particules à l'instant  $t$ , qu'on suppose être la vitesse instantanée de l'écoulement  $\mathbf{u}$  (particules dites "passives" ou non inertielles car elles suivent l'écoulement).

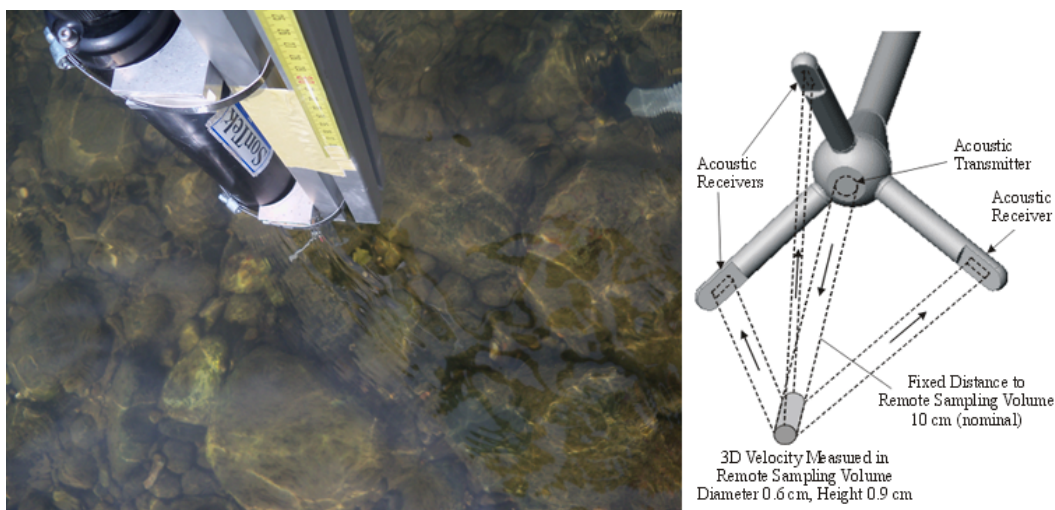


Figure 1: Photographie du déploiement d'un ADV sontek sur le terrain (à gauche) et principe de fonctionnement de la tête de cet instrument (à droite).

Le volume de mesure est situé à une dizaine de centimètres sous la tête ADV, et est de taille presque centimétriques (voir schéma). La fréquence d'acquisition est de 50 Hz, ce qui implique une moyenne temporelle sur 0.02s des réflexions acoustiques enregistrées (l'instrument renvoie une vitesse "moyenne" calculée sur plusieurs "pings" reçus pendant les 0.02s).

Dans le fichier "serietemporelle\_uv\_w\_mesureponctuelleADVriviere.mat", on trouvera une série temporelle de presque 4 minutes de durée, réalisée à mi profondeur (40 cm au-dessus du fond).

## Mesures d'écoulement en turbulence de grille oscillante (IMFT)

De manière à produire et maintenir une turbulence artificielle quasi-homogène et quasi-isotrope, un dispositif expérimental de grille oscillante a été conçu et fabriqué à l'IMFT. Il s'agit d'un dispositif permettant ensuite de réaliser des études d'interaction particules-turbulence (avec des particules exotiques comme des algues, par exemple) ou turbulence-milieu poreux (augmentation des transferts de masse entre l'écoulement et une vase réactive pompant de l'oxygène par exemple). Le principe consiste à faire osciller verticalement une grille régulière avec un "stroke" ( $2 \times$  l'amplitude)  $S$  fixé et une fréquence  $f$  variable. La modélisation de ce type d'écoulement repose sur une diffusion de l'énergie cinétique turbulente  $E_t$  et de la dissipation  $\epsilon$  depuis la grille (modèle  $k - \epsilon$  en stationnaire). L'utilisation de deux grilles permet d'espérer d'obtenir une zone centrale (au milieu des deux grilles) encore relativement isotrope et homogène. Le schéma de l'expérience est donné dans la figure 2.

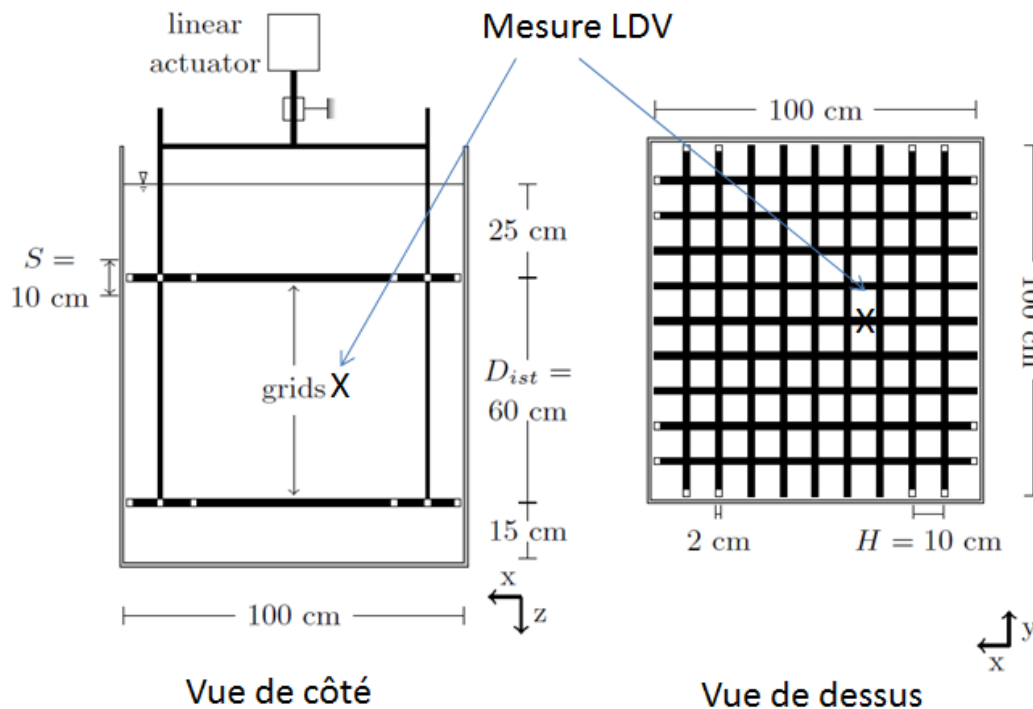


Figure 2: Vue de côté (à gauche) et de dessus (à droite) du dispositif expérimental de grille oscillante de l'IMFT.

Pour caractériser la turbulence ainsi générée, des mesures ponctuelles par LDV (Laser Doppler Velocimetry) ont été réalisées entre les deux grilles, presque au centre de la cuve. Le point de mesure est indiqué par une croix dans les vues de côté et de dessus de la figure 2. Dans la figure 3 ont été représentées une photographie de l'instrument en opération et un schéma du principe de fonctionnement. Deux faisceaux lasers de couleur différents convergent au même point et forment des figures d'interférence dans un petit volume dont la taille dépend du diamètre des faisceaux et de leur angles. Des particules dans l'écoulement qui passent à travers ces franges d'interférence sont vues par un capteur optique situé sur la tête du LDV qui convertit le signal optique reçu (succession temporelle d'éclairement et d'extinction) en une vitesse de passage des particules. Avec deux réseau

de franges d'interférence, on dispose de deux composantes du champ de vitesse, dans les directions perpendiculaires à l'axe de la tête LDV (certains modèles disposent d'une troisième source laser pour avoir la troisième composante).

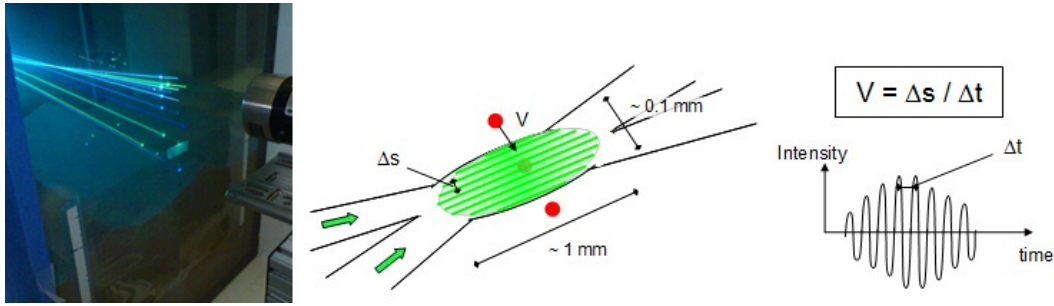


Figure 3: Photographie du déploiement d'un LDV sur une expérience de laboratoire (à gauche) et principe de fonctionnement de cet instrument (à droite).

Dans le fichier "serietemporelle\_uv\_mesureponctuelleLDV\_grilleS10f3p33.mat", on trouvera une série temporelle de presque 1 heure de durée, réalisée dans une turbulence de grille générée par un mouvement oscillant avec un stroke  $S=10$  cm et une période  $T=0.3s$  (soit  $f=3.33$  Hz).

## Analyse des données

### moyenne et fluctuations turbulentes

- au moyen des séries temporelles, calculer les composantes moyennes  $\overline{u_i}$  (moyenne temporelle du fait de l'ergodicité de temps) et les rms des fluctuations turbulentes  $\sqrt{\overline{u_i'^2}}$ .
- Prenez des sous-échantillons de taille inférieure à la taille maximale pour étudier l'effet de la taille de l'échantillon sur l'estimation de ces grandeurs statistiques.

### corrélations

- vérifier si les mesures sont bien réalisées à fréquence fixe. Si ce n'est pas le cas (pour le LDV), recalculer un signal temporel régulier par interpolation au moyen de la fonction "Regulate-data.m" (dans le répertoire "pretraitementdonneesLDV").
- pour des signaux temporels "prototypes" (sinusoidal ou aléatoire), calculer les fonctions d'autocorrélation.
- au moyen de séries temporelles régulières pour les fluctuations turbulentes  $u_i'$ , calculer la (les) fonction(s) de corrélation adimensionnelles  $R_{u_i'u_j'}(\Delta t)$ .
- en déduire le temps intégral de la turbulence  $T_{int}$ .
- pour les mesures ADV, justifier l'hypothèse de turbulence "gelée" et calculer la série spatiale équivalente  $u_i(x)$  où  $x$  est la direction de l'écoulement.
- calculer les fonctions d'autocorrélation longitudinale ( $R_{u'u'}(x)$ ) et transverses ( $R_{v'v'}(\Delta x)$  et  $R_{w'w'}(\Delta x)$ ). En déduire les longueurs intégrales associées  $L_{int}$ . Comparer et commenter.
- Les acquisitions réalisées correspondent à combien d'échelles intégrales ? Quelle influence cela a-t-il sur l'estimation des grandeurs moyennes et turbulentes ?

## approche spectrale

- reprendre des signaux temporels "prototype" (sinusoidal ou aléatoire) et en calculer la FFT (transformée de fourier discrète) pour en déduire le spectre. Vérifier que l'intégrale du spectre redonne bien la rms du signal.
- pour le signal aléatoire, réaliser les spectres sur des sous-échantillons temporels et moyenner les spectres pour obtenir la densité spectrale du signal.
- calculer la densité spectrale temporelle pour les signaux LDV et ADV au moyen de la fonction "autocorrandspectrum.m" du répertoire "posttraitement\_approchetemporelleLDVetADV".
- pour le signal ADV, procéder à la conversion temps-espace pour en déduire les densités spectrales longitudinales et transverses  $E_{u'u'}(k_x)$  et  $E_{v'v'}(k_x)$ .
- vérifier que les petites échelles se comportent conformément au spectre de Kolmogorov.

## exploitation finale

Estimer la dissipation  $\epsilon$  à partir de ce traitement. On pourra comparer les valeurs obtenues par une approche de type "équilibre" ( $\epsilon = u_{rms}^3/L_{int}$ ) et par une approche spectrale (utilisation du comportement en  $(18/55)C\epsilon^{2/3}k^{-5/3}$  pour  $E_{u'u'}(k_x)$ , avec  $C \approx 1.5$ ). En déduire l'échelle de Kolmogorov  $\ell_\eta$ .

## Annexe : quelques fonctions matlab utiles

Il est toujours très utile d'aller voir la syntaxe exacte sur l'aide de matlab.

1. *mean* : permet de calculer la moyenne d'un vecteur ou d'un tenseur d'ordre N.
2. *sqrt* : pour le calcul de la racine carrée.
3. *xcorr* : pour le calcul de la corrélation et de l'autocorrélation de signaux sous forme vectorielle.
4. *fft* : pour "fast Fourier transform", transformée de Fourier discrète d'un signal discret et périodique (périodisation automatique d'un signal de durée finie).
5. *conj* : pour obtenir le conjugué d'un nombre complexe.
6. *rand*, *randi*, *randn* : pour générer des nombres aléatoires.