
Résumé

Les plans d'eau urbains participent à la qualité de l'environnement en ville, tels que la pêche, la baignade et les sports nautiques. Ils contribuent à la régulation de la chaleur urbaine. Ils fournissent également un stockage en eau. Par ailleurs, ils sont sensibles au changement climatique et aux contaminations par des micropolluants. Pour ces raisons, la surveillance de leur qualité est devenue un problème majeur.

Les recherches en milieu lacustre ont généralement porté sur les grands lacs naturels et les barrages. Or les défis scientifiques que présentent les lacs urbains sont nombreux du fait de leur faible profondeur et de leur extension : effets de bord et de l'interface importants, faible inertie par rapport aux fluctuations météorologiques (ex. fréquents mélanges complets par le vent). Le travail que nous présentons ici s'inscrit dans le cadre du projet Petits Lacs Urbains Mesures Modèles Multi-Echelles (PLUMMME), projet financé par la région Île-de-France (programme DIM R2DS). Ce projet a permis l'équipement du lac de Créteil en mesures à haute résolution. Ce sont ces mesures physiques et biologiques qui sont essentiellement exploitées dans cette thèse, parfois en comparaison avec celles du lac du Bourget.

La première étape de cette thèse a été ainsi d'enrichir la base de données déjà disponible. Pour cela, nous avons mis en place une station de mesure en continu (capteurs de température, chlorophylle et luminosité, données météorologiques telles que vitesse du vent et température atmosphérique), ainsi que deux chaînes de mesures comportant différents capteurs. Des campagnes de mesures spécifiques ont également été réalisées pour l'étude de hydrodynamique à l'aide d'un courantomètre de type Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), ainsi qu'un profileur de type Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) à deux points différents du lac (point central et point du rejet d'eaux pluviales). L'analyse des différents champs montre que le lac présente des stratifications avec une période d'une semaine. Nous avons également identifié les modes d'oscillations des ondes internes lorsque ces dernières se produisent sous l'effet du vent.

L'analyse spectrale a permis de mettre en évidence une première propriété d'invariance d'échelle des différents champs mesurés. Les différents processus physiques (turbulence, stratification, écoulement proche de la paroi) opérant le long de la colonne d'eau ont également été caractérisés. L'analyse spectrale ne permet pas de mettre en évidence le

caractère intermittent des fluctuations des champs mesurés, ces dernières peuvent par contre être analysées à l'aide des techniques multifractales.

Dans cette thèse nous avons montré que lorsqu'il existe une dépendance entre deux champs, celle-ci est multi-échelle. L'utilisation du modèle multifractal universel (UM) a permis de quantifier le degré de cette dépendance. Le modèle multifractal universel est défini à l'aide de deux paramètres : α représente le degré de multifractalité et définit l'écart à la monofractalité ($0 \leq \alpha \leq 2$) et C_1 mesure l'hétérogénéité moyenne du champ ($0 \leq C_1 \leq 1$). La qualité de l'estimation des paramètres UM (α, C_1) dépend fortement de celle de l'invariance d'échelle observée : des séries temporelles présentant des tendances ne respectent pas cette invariance. Les effets de ces dernières sur l'estimation des paramètres UM peuvent être éliminés en utilisant la méthode de décomposition empirique modale dans l'espace physique.

L'utilisation des données du champ de vitesse mesuré à l'aide de l'ADCP montre que, les pentes des spectres suivent un profil logarithmique selon la verticale, cela met en évidence que différents processus physiques opèrent le long de la colonne d'eau. Nous montrons également que l'hydrodynamique du lac est fortement perturbée à petite échelle au point du rejet d'eau pluviale.

La dernière partie de la thèse examine ce que notre analyse à petites échelles apporte aux modèles numériques. Nous montrons que si les modèles déterministes arrivent à reproduire certains phénomènes à grande échelle, ils sont dans l'incapacité de représenter correctement les fluctuations à petites échelles, donc les processus physiques correspondants. L'analyse multifractale montre que la variabilité des champs physiques présentent une forte intermittence. Le fait que la majorité des interactions biologiques/chimiques se produisent à petites échelles souligne la nécessité d'améliorer qualitativement les modèles de fermeture des équations de Navier-Stokes.

Enfin, nous montrons que les fonctions de structures, observables statistiques de base en turbulence, ne permettent pas de caractériser de façon unique les champs non conservatifs et donc correspondent à des simulations multifractales non identiques.

Mots Clés :

Turbulence, Ondes internes, Multifractal

Abstract

Urban water bodies play a large role in the environmental quality of cities. They regulate heat, contribute to the beauty of the landscape – providing space for leisure activities, e.g., aquatic sports, swimming – while also providing water storage. Because they are particularly sensitive to global environmental changes, climate change, eutrophication and contamination by micro-pollutants, monitoring their quality is thus a major and important challenge for urban areas.

Research in limnology has generally focused on natural lakes and dams. Moreover, the scientific challenges posed by urban lakes are numerous because of their large width and shallow depth resulting in complex problems that involve : boundary effects and large interface, low inertia with respect to weather fluctuations (i.e. frequent complete mixing by the wind).

This work is part of the project Petits Lacs Urbains Mesures Modèles Multi-Echelles (PLUMMME), founded by Région Île-de-France (DIM R2DS program). The project provides the high-resolution equipment measuring equipment used at Lake Créteil. Physical and biological measurements are the primary scope of this thesis, with some comparisons of measurements done between Lake Creteil and Lake Bourget.

With this in mind, the first step of the thesis was to enhance currently available data. In order to do this we installed a station for the continuous measurement of : temperature, chlorophyll and light, also meteorological quantities such as wind speed, and air temperature were measured. The quantities were measured using two measuring chains comprising different sensors.

Measurements were conducted in order to characterise hydrodynamics, using a current meter of type Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) and a profiler of type Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) positioned at different points in the lake (centrally, and at the point of stormwater discharge). The analysis of the various measured fields shows that the lake is periodically stratified with a period of one week. We also identify the different modes of the internal waves that occur due to the effects of the wind.

Spectral analysis was used to highlight the first scale invariant propriety of the different measured fields. Various physical processes (turbulence, stratification, near-wall flow) operating along the water column were also characterised using this method. The spectral

analysis, however, does not provide information about the intermittency of the fluctuations of the measured fields – this can only be done using multifractal techniques.

In this thesis, we have shown that when there is a dependence between two fields, the dependence is multiscale. The use of the Universal Multifractal (UM) model, allows one to quantify the degree of this dependence. The UM model is defined using two parameters : α - the index of multifractality ($0 \leq \alpha \leq 2$) and C_1 - describes the heterogeneity of the field ($0 \leq C_1 \leq 1$). The quality of the estimation of the UM parameters depends strongly on that of the observed scale : time-series with trends are not scaling. The effects of the latter on the estimation of UM parameters can be improved by the application of the Empirical Modal Decomposition method.

The measured velocity data from the ADCP shows that the slope of the power spectra density follow a logarithmic profile along the depth of the lake, it shows that different physical processes operate along the water column. We also show that the hydrodynamics of the lake at small scale are strongly perturbed at the point of waterstorm discharge.

The last part of the thesis is focused on what our analysis at small-scales brings to numerical models. We show that, if the deterministic models are able to reproduce some phenomena at large scale, they fail to describe the small-scale variability. the small scale variability and the physical processes involved. A multifractal analysis showed that the small-scale variability of the physical fields displays a strong intermittency, an extremely important feature for biological or chemical reactions and therefore for biological scenarios. Knowing that the majority of biological/chemical interactions occur at smaller scales, this result underlines the necessity to greatly improve the closure of the Navier-Stokes equations.

Finally, we show that the structure function, a frequently used statistical tool in turbulence, do not uniquely characterise non-conservative fields, i.e., they do not correspond to identical simulations.

Keywords :

Turbulence, Internal waves, Multifractal