

Open water swimming: Monitoring and hydrodynamic modelling for sanitary conditions assessment

Baignade en eau libre : Surveillance et modélisation hydrodynamique pour l'évaluation des conditions sanitaires

Abstract

Swimming in open water has become very popular, particularly in urban areas where summer heatwaves are increasingly frequent. To control sanitary risks, the monitoring of indicators of pathogenic microorganisms, namely faecal indicator bacteria (FIB), such as *E. coli* is required. Reference laboratory methods take at least 24h to provide results.

For opening a bathing area to the public, FIB concentrations must meet the regulatory limits. In watercourses, this condition can be estimated from measurements at an upstream point, defined to take into account the transfer time to the bathing area and the response time of the FIB measurement.

The transfer time is affected by flowrate and thermal stratification. Variations in current velocity can be computed using hydrodynamic models, which are also useful to estimate the FIB spatiotemporal distribution

In order to propose a system for monitoring and forecasting the microbiological quality of bathing areas, two research lines have been developed: (1) the implementation of a 3D hydrodynamic model to compute the velocity field and the water temperature and (2) the definition of a FIB proxy for faster microbiological water quality assessment.

The specific objectives of the PhD thesis are as follows:

- To implement the 3D hydrodynamic model TELEMAC-3D, coupled with the WAQTEL thermal module;
- To design and install a monitoring system to obtain field data that can be used for input and validation of the hydrodynamic model;
- To investigate the influence of thermal stratification on the spatiotemporal distribution of faecal contamination;
- To identify a fast-measuring indicator of FIB.

The study site, La Villette basin, is located in Paris (France). It consists of a canal upstream (25m wide, 800m long), and a basin downstream (70m wide, 700m long, 3m deep). The average discharge is around $2.1\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

The installed fully autonomous monitoring system consists of two monitoring points located: (1) 1000m upstream of the bathing area and (2) downstream, close to the bathing area. At both sites, water temperature is measured at three depths, and electrical conductivity at mid-depth, with a 10 min time step.

From spring to mid-autumn, the data showed a daily thermal stratification of the water column, breaking up at night. Conductivity data allowed to estimate the transfer time between both monitoring points. The values varied from 6h30 to more than 24h.

To obtain real-time information on FIB level, the relationship between FIB and the fluorescence of dissolved organic matter (FDOM) was investigated. Fluorescence spectroscopy combined with PARAFAC modelling was used to characterize DOM and microbiological activity in five watercourses in the Paris metropolitan region. The results

showed a higher presence of a protein-like component in samples with higher microbial contamination. A relationship was established between this component and FIB.

For a short-term (3 days) FIB level forecast, a relationship between FIB and hydro-meteorological data (discharge, rainfall and dry weather duration) was investigated. In La Villette basin, a relationship between *E. coli* and the precipitation measured upstream, between one and three days before the day of interest, was found.

The *in-situ* measured values were used as model input and for validation. The FIB concentration was derived from FDOM data and from hydro-meteorological data using the established relationships.

The results of the 3D hydro-microbiological model were compared to field data. The observed alternation of thermal stratification and mixing was correctly reproduced. Its effect on *E. coli* spatial distribution was highlighted. The conductivity variation was well simulated. The transfer time between the two measuring points was correctly estimated and can be applied to other passive tracers.

This work highlights the relevance of a 3D hydrodynamic model for assessing contaminant transport and sanitary conditions in a river area of interest.

Keywords: *Urban waters, Early warning system, Faecal indicator bacteria (FIB), 3D hydrodynamic modelling, Thermal stratification, Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM).*

Résumé

La baignade en eau libre connaît un fort engouement, notamment en milieu urbain où les canicules estivales sont de plus en plus fréquentes.

Pour éviter les risques sanitaires, le suivi d'indicateurs de micro-organismes pathogènes, les bactéries indicatrices fécales (BIF) telles que *E. coli*, est nécessaire. Les résultats des méthodes de référence en laboratoire sont obtenus au mieux en 24h.

Pour qu'une baignade soit ouverte au public, les concentrations de BIF doivent être inférieures à des seuils réglementaires. En cours d'eau, ces conditions peuvent être estimées à partir de mesures en un point amont, défini en tenant compte du temps de transfert vers la baignade et du temps de réponse de la mesure des BIF.

Le temps de transfert change en fonction du débit et de la stratification thermique. Ces variations peuvent être calculées par des modèles hydrodynamiques, également utiles pour estimer la distribution spatiotemporelle des BIF.

Afin de proposer un système de suivi et de prévision de la qualité microbiologique d'une zone de baignade, deux axes de recherche ont été développés : (1) la mise en œuvre d'un modèle hydrodynamique 3D pour calculer les champs de vitesses et la température de l'eau et (2) la définition d'un proxy des BIF pour une évaluation rapide de la qualité microbiologique de l'eau.

Les objectifs spécifiques du doctorat sont les suivants :

- Mise en œuvre du modèle hydrodynamique, TELEMAC-3D, couplé au module thermique WAQTEL ;
- Conception et déploiement d'un système de mesure de terrain ;
- Étude de l'influence de la stratification thermique sur la distribution spatiotemporelle des BIF ;
- Identification d'un indicateur des BIF de mesure rapide.

Le site d'étude, le bassin de La Villette, est situé à Paris (France). Il se compose d'un canal en amont (25 m de large, 800 m de long) et d'un bassin en aval (70m de large, 700m de long, 3m de profondeur). Le débit moyen est d'environ $2.1\text{m}^3.\text{s}^{-1}$.

Le système de suivi se compose de deux points de mesure situés à 1000m en amont de la zone de baignade et en aval, à proximité de la baignade. Sur les deux sites, la température de l'eau est mesurée à trois profondeurs et la conductivité électrique à mi-profondeur (pas de temps 10 min).

Du printemps à l'automne, une stratification thermique de la colonne d'eau, interrompue la nuit a été mesurée. Les données de conductivité aux deux points de suivi ont permis d'estimer le temps de transfert d'un traceur passif, qui varie de 6h30 à 24h.

Pour connaître leur niveau en temps réel, la relation entre BIF et fluorescence de la matière organique dissoute (MOD) a été étudiée. La spectroscopie de fluorescence combinée à la modélisation PARAFAC a été utilisée pour caractériser la MOD et l'activité microbiologique dans cinq sites en région parisienne. Les résultats ont montré une forte présence d'un composant protéique dans les échantillons de contamination microbienne plus élevée. Une relation a été établie entre ce composant et les BIF.

Pour une prévision à court terme (3 jours), une relation entre BIF et données hydrométéorologiques (débit, pluie et durée de temps sec) a été étudiée. À La Villette, une

relation entre *E. coli* et la pluie mesurée en amont, entre un et trois jours avant le jour d'intérêt, a été trouvée.

Les mesures ont été utilisées comme données d'entrée du modèle et pour sa validation, la concentration des BIF étant estimée à partir des relations établies entre fluorescence et données de pluie.

Les résultats du modèle hydro-microbiologique ont été comparés aux mesures. L'alternance de stratification thermique et mélange observée a été correctement reproduite. Son effet sur la distribution spatiale d'*E. coli* a été mis en évidence. La variation de la conductivité a été bien simulée. Les temps de transfert, correctement estimés, peuvent être appliqués à d'autres traceurs passifs.

Ce travail met en évidence la pertinence d'un modèle hydrodynamique 3D pour évaluer le transport des contaminants et les conditions sanitaires dans un cours d'eau.

Mots-clés : *Eaux urbaines, Système d'alerte précoce, Bactéries indicatrices fécales (BIF), Modélisation hydrodynamique 3D, Stratification thermique, Matière organique dissoute fluorescente.*