



HAL
open science

Prévision de la qualité microbiologique des milieux aquatiques : modélisation hydrodynamique pour anticiper des épisodes de contamination microbiologique sur des sites de baignade urbaine.

Arthur Guillot - Le Goff, Natalia Angelotti, Rémi Arthur Carmigniani, Guilherme Calabro Souza, Mohamed Saad, Philippe Dubois, Brigitte Vinçon-Leite

► To cite this version:

Arthur Guillot - Le Goff, Natalia Angelotti, Rémi Arthur Carmigniani, Guilherme Calabro Souza, Mohamed Saad, et al.. Prévision de la qualité microbiologique des milieux aquatiques : modélisation hydrodynamique pour anticiper des épisodes de contamination microbiologique sur des sites de baignade urbaine.. Novatech 2023 : 11e Conférence internationale sur l'eau dans la ville, GRAIE, Jul 2023, Lyon, France. hal-04176992

HAL Id: hal-04176992

<https://hal.science/hal-04176992v1>

Submitted on 3 Aug 2023

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.

Prévision de la qualité microbiologique des milieux aquatiques : modélisation hydrodynamique pour anticiper des épisodes de contamination microbiologique sur des sites de baignade urbaine.

Warning system for the microbiological quality assessment of urban waters: hydrodynamic modelling to anticipate episodes of sanitary contamination at bathing sites.

Arthur Guillot – Le Goff ^{1,2}, Natalia Angelotti ^{1,2}, Rémi Carmigniani ², Guilherme Calabro Souza ¹, Mohamed Saad ¹, Philippe Dubois ¹, Brigitte Vinçon-Leite ¹

[1] LEESU, Ecole des Ponts, Univ Paris Est Creteil, Marne-La-Vallée, France

[2] LHSV, Ecole des Ponts, EDF R&D, Chatou, France

RÉSUMÉ

La baignade dans les cours d'eau urbains bénéficie d'un attrait grandissant. Afin de limiter les risques sanitaires pour les baigneurs, un système d'alerte pour la prévention des risques sanitaires permet d'anticiper des épisodes de contamination microbiologique et ainsi d'améliorer la gestion des fermetures des baignades.

Cet article présente un système prédictif à court terme (3 jours) développé sur le site d'étude du bassin de La Villette à Paris. Il s'appuie sur la mesure *in situ* de bactéries indicatrices fécales en amont de l'espace de baignade et la simulation de leur transport avec un modèle hydrodynamique. Le temps de transfert des bactéries ainsi que leur distribution spatiale sont alors estimés pour avertir si un seuil de baignabilité risque d'être franchi et pour quelle durée. Le forçage hydraulique et physico-biologique du modèle se base sur des conditions antérieures mesurées ou prédites à partir des prévisions météorologiques. Dans la structure opérationnelle du système, la qualité de l'eau au niveau de la baignade est estimée et la comparaison *a posteriori* avec les mesures de terrain permet d'évaluer les performances du modèle. Ce système pourra être déployé ultérieurement sur d'autres sites de baignade, notamment en Marne.

ABSTRACT

Bathing in urban rivers is becoming increasingly attractive. In order to reduce the sanitary risks, a warning system is helpful in anticipating episodes of microbiological contamination and therefore in improving the management of bathing areas.

This paper presents a short term (3 days) predictive system developed for La Villette basin study site in Paris. It is based on *in situ* measurements of faecal indicator bacteria upstream of the bathing area and the simulation of their transportation with a hydrodynamic model. A bacteria transfer time and their spatial distribution are then estimated to warn if a bathing threshold is likely to be crossed and for which duration. The hydraulic and physical-biological forcing of the model is based on antecedent measured conditions or predicted ones from weather forecasts. In the operational structure of the system, the water quality at the bathing site is estimated and a retrospective comparison with field measurements is used to evaluate the performance of the model. It is planned to operate this system at other bathing sites, including the Marne river.

MOTS CLÉS

Baignade urbaine, Contamination microbiologique, Modélisation hydrodynamique, Prévision, Système de surveillance

KEYWORDS

Urban bathing, Microbiological contamination, Hydrodynamic modelling, Forecasting, Warning system

1 INTRODUCTION

1.1 L'initiative des baignades urbaines en Île-de-France

La baignade urbaine est une pratique courante au début du XX^{ème} siècle avant de progressivement disparaître suite à l'accroissement des échanges par voie fluviale et la dégradation de la qualité des eaux. Depuis l'ordonnance préfectorale du 17 avril 1923, il est interdit de se baigner dans la Seine à Paris (Préfecture de police de Paris, 1923). Néanmoins, cette pratique perdure jusque dans les années 1960 avant la création des voies automobiles sur les berges de la Seine (Ribet & Le Bec, 2020). Depuis plusieurs années un nouvel élan vers la réintroduction de la baignade urbaine est lancé. En effet, pouvoir se baigner dans les grands cours d'eau d'Île-de-France constituerait la preuve que la région œuvre vers la reconquête écologique des rivières. Pour les Jeux Olympiques et Paralympiques de Paris en 2024, la municipalité s'est engagée à mettre la Seine au cœur des épreuves de triathlon et de nage en eau libre. Cette impulsion a pris la forme d'un "Plan d'action, qualité de l'eau et baignade" amorcé en 2016 en vue de l'amélioration de la qualité de l'eau dans la Seine et la Marne afin de rendre possible la baignade d'ici 2024, tout en préservant la biodiversité de ces cours d'eau. Outre les épreuves sportives, ce sont 23 sites de baignades publics, sur 16 communes, qui sont prévus (Préfecture d'Île-de-France, 2020).

Aujourd'hui, se baigner dans la Marne ou dans la Seine, c'est prendre le risque de s'exposer à des risques de contamination bactériologique. Ces contaminations sont de sources diffuses (ruissellement de surface, lessivage du sol, fuites d'eaux usées, fèces d'animaux) ou ponctuelles (déversoirs d'orage, effluents traités de stations d'épuration, etc.) (Mouchel et al., 2020) et surviennent après un épisode pluvieux (Burnet et al., 2019; Herrig et al., 2019). Ces risques de contamination pouvant être de plus en plus fréquents avec les changements climatiques actuels qui accroissent la fréquence des fortes pluies (Hunter, 2003).

La qualité de l'eau de la baignade urbaine est encadrée par la Directive européenne 2006-7-EC qui préconise le classement de la qualité des eaux de baignade, leur gestion et la fourniture au public d'informations à ce propos (Directive 2006 7 EC, 2006). Pour mesurer et qualifier la qualité microbiologique de l'eau, la réglementation porte sur la mesure de la quantité de bactéries indicatrices fécales (BIF) *Escherichia coli* (*E. coli*) et Entérocoques.

1.2 Gestion du risque sanitaire

Pour mesurer les concentrations de BIF dans l'eau de baignade, des échantillons d'eau sont prélevés puis analysés en laboratoire. L'énumération de bactéries sur une culture cellulaire prend plus de vingt-quatre heures. Cette méthode de contrôle de la qualité de l'eau ne permet pas de mesurer en temps réel, ou tout du moins dans un laps de temps raisonnable la quantité de bactéries sur le site de baignade (Burnet, Dinh, et al., 2019).

Pour s'affranchir de ce temps de culture, des méthodes de mesure *in situ* sont actuellement développées, notamment l'utilisation de mesures optiques des caractéristiques de l'eau, par exemple la fluorescence de la matière organique dissoute. Ces méthodes établissent un lien entre une valeur de substitution (ou proxy) et les concentrations de BIF dans l'eau. Ces mesures permettent d'estimer, en quasi temps réel et en un point, les niveaux bactériens dans les cours d'eau.

Une seconde méthode d'estimation des quantités de bactéries est de s'appuyer sur le constat précédemment cité : les pics de contamination sont liés à des épisodes pluvieux. Il est alors possible de construire une relation entre les concentrations de BIF mesurées en un point et la pluviométrie, l'hydrologie du bassin versant et les différents rejets d'eaux contaminés (Mälzer et al., 2016; Seis et al., 2018). De plus, les prévisions météorologiques à court terme comptant parmi les plus fiables et facilement accessibles, leur utilisation permet de prédire des pics de contamination microbiologique.

Ces mesures directes ou estimations indirectes fournissent une information ponctuelle. Or la morphométrie du cours d'eau ou les conditions hydro-météorologiques peuvent impacter les vitesses et les directions de l'écoulement. La distribution spatio-temporelle d'une contamination microbiologique peut être calculée en couplant ces mesures avec un modèle hydrodynamique (Van et al., 2022). L'idée est alors d'utiliser un point de mesure en amont de la baignade, en entrée du modèle physique.

La simulation de l'écoulement du cours d'eau et ainsi du déplacement des bactéries permet de connaître leur temps de transport et leur localisation (figure 1), permettant ainsi d'anticiper un possible franchissement de seuil de baignabilité (Angelotti et al., 2022).

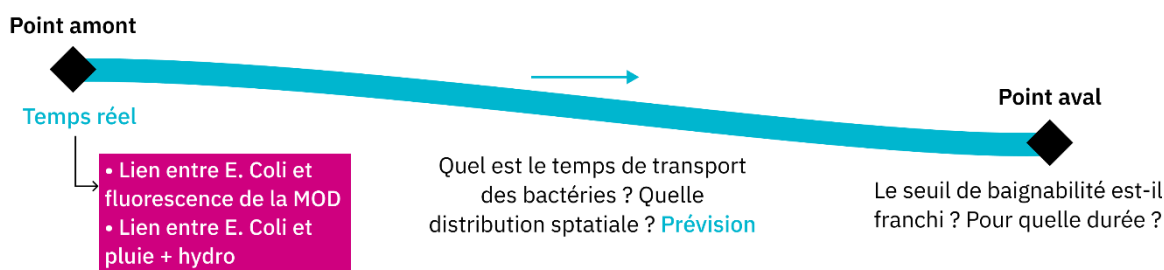


Figure 1 - Schéma du couplage de mesures in situ ou d'estimations avec un modèle hydrodynamique

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 Site d'étude et données de terrain

Le site d'étude est le bassin de La Villette, situé au nord-est de Paris. En accord avec le schéma présenté sur la figure 1, la station de mesure amont (point A) est située au niveau du carrefour des canaux de l'Ourcq, de Saint-Denis et de La Villette. Elle est équipée d'une chaîne de capteurs de température (3 profondeurs), d'un capteur de conductivité et d'un capteur de profondeur. La station aval (point B) se situe en face des bassins de baignade et est pourvue, comme à l'amont, d'une chaîne de mesures de température et d'une mesure de la conductivité (voir figure 2). Ces mesures sont enregistrées toutes les 20 minutes. Les systèmes de mesure sont autonomes car alimentés électriquement avec des panneaux photovoltaïques et les données enregistrées sont télétransmises quotidiennement. Les mesures, en cours depuis 2020, sont stockées dans une base de données. L'ensemble des données et du matériel font l'objet de vérifications régulières.

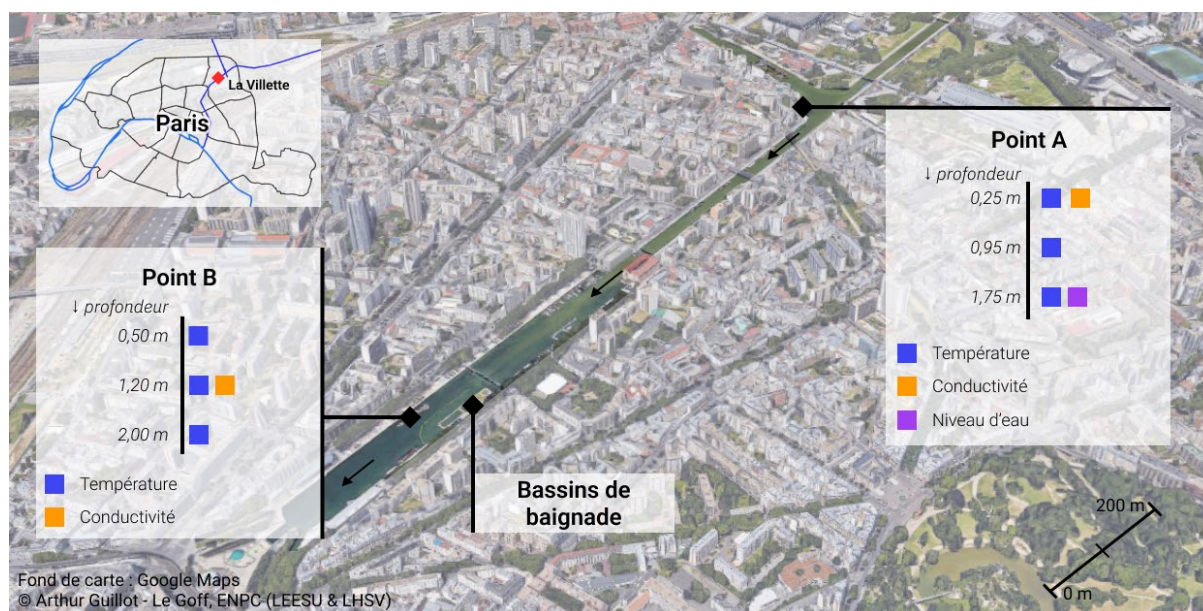


Figure 2 - Emplacements des stations de mesures autonomes (point A et point B)

En parallèle de ces mesures, des échantillons d'eau ont été prélevés régulièrement pour des analyses en laboratoire de la fluorescence de la matière organique dissoute. De plus, l'ensemble des données météorologiques a été collecté sur différentes stations de Météo-France : Le Bourget, Orly et Roissy. Des relevés journaliers et des bulletins prédictifs sont enregistrés. Ils compilent des données horaires de température de l'air, de nébulosité, de précipitation, de vitesse et direction du vent, de pression atmosphérique et d'humidité relative.

2.2 Modèle hydrodynamique

Les simulations hydrodynamiques sont réalisées avec le logiciel open-source de modélisation TELEMAC-3D, version v8p3 (suite logicielle TELEMAC-MASCARET <http://www.opentelemac.org/>). Il permet la simulation des écoulements hydrauliques à surface libre, en particulier les champs de vitesses

et la hauteur d'eau. L'utilisation d'un modèle tridimensionnel est justifiée par les stratifications thermiques observées dans le bassin de La Villette pendant les périodes estivales de forte chaleur (Angelotti et al., 2022). Dans un contexte de réchauffement climatique caractérisé par des épisodes de canicule et de faibles débits estivaux des cours d'eau, l'occurrence et la durée des périodes de stratification thermique augmentent. Couplé au module hydrodynamique, le module WAQTEL (WATER Quality for TELEmac) permet de modéliser les échanges thermiques entre le cours d'eau et l'atmosphère et l'évolution de traceurs. Le modèle est forcé hydrauliquement par un limnigramme en entrée et un hydrogramme en sortie. La température de l'eau est considérée comme un traceur actif, modifiant la masse volumique de l'eau. Les concentrations de BIF estimées avec les mesures de fluorescence ou la pluviométrie sont considérées comme des traceurs passifs.

2.3 Système d'alerte

Pour anticiper le niveau de contamination microbiologique et l'éventuelle nécessité de fermeture de la baignade, les simulations hydrodynamiques sont réalisées à partir de conditions hydrauliques et physico-biologiques prédites et ainsi d'estimer le transport des BIF. Le schéma de fonctionnement du système d'alerte se divise en trois étapes (voir figure 3). Premièrement, une pré-simulation permet de fixer les conditions initiales à partir des données mesurées sur le terrain avec les stations de mesures et les relevés hydro-météorologiques. Ensuite, utilisant les conditions initiales fournies, une simulation prédictive à court terme est effectuée. Elle est basée sur de nouvelles données de forçages, agrégées à partir de bulletins de prévision météorologiques. Certaines variables sont obtenues directement, par exemple la température de l'air ou la pluviométrie. D'autres doivent être calculées. C'est le cas de la température de l'eau entrant en amont, estimée à partir de la température de l'air, ou les concentrations de BIF estimées à partir d'une relation avec la pluie tombée sur le bassin versant en amont. Enfin, la dernière étape est l'analyse des résultats de simulation et leur interprétation. Il est nécessaire de communiquer aux entités de gestion concernées par la gestion de la baignade des indicateurs adaptés. Ce dernier point doit faire l'objet d'une démarche de concertation entre les gestionnaires de la baignade et les développeurs du système d'alerte.

Le système d'alerte est développé pour fonctionner de manière automatique. À partir de scripts python effectuant des requêtes vers la base de données, les fichiers de forçage sont transcrits au format requis par TELEMAC. Des simulations peuvent alors être démarrées à intervalle régulier. Il est aussi prévu de communiquer les résultats à travers une interface utilisateur.

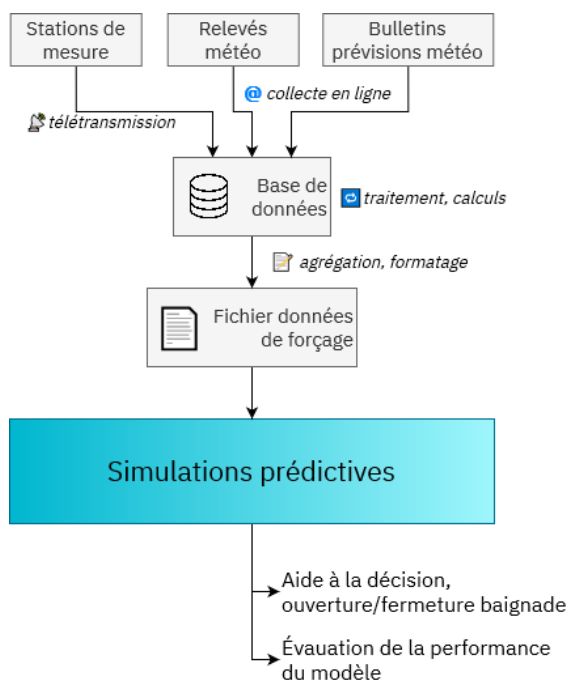


Figure 3 - Schéma de fonctionnement du système de simulation prédictive

En parallèle des simulations, il est nécessaire d'évaluer la performance du modèle. L'intérêt du point de contrôle au niveau de la baignade, en plus de connaître certaines données en temps réel sur le site, est

de pouvoir comparer rétrospectivement les prédictions et les données mesurées. Ce schéma comparatif se comprend de la sorte : quel est l'écart entre le modèle prédictif et les mesures de terrain, ou une pré-simulation ou encore une simulation prédictive antérieure ?

REMERCIEMENT

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet OPUR. Nous remercions la Ville de Paris pour leur soutien et Marin d'eau douce pour l'utilisation de leur ponton.

BIBLIOGRAPHIE

- Angelotti, N., Guillot Le-Goff, A., Carmigniani, R., & Vinçon Leite, B. (2022). *Open water swimming in urban areas E. coli distribution with TELEMAC-3D*. Proceedings of the 2022 TELEMAC-MASCARET User Conferencem Saclay (France)
- Burnet, J.-B., Dinh, Q. T., Imbeault, S., Servais, P., Dorner, S., & Prévost, M. (2019). Autonomous online measurement of β -D-glucuronidase activity in surface water : Is it suitable for rapid E. coli monitoring? *Water Research*, 152, 241-250. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.060>
- Burnet, J.-B., Sylvestre, É., Jalbert, J., Imbeault, S., Servais, P., Prévost, M., & Dorner, S. (2019). Tracking the contribution of multiple raw and treated wastewater discharges at an urban drinking water supply using near real-time monitoring of β -d-glucuronidase activity. *Water Research*, 164, 114869. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114869>
- Directive 2006 7 EC. (2006). *Directive 2006/7/EC of the European Parliament and of the Council of 15 February 2006 concerning the management of bathing water quality and repealing Directive 76/160/EEC*. <http://data.europa.eu/eli/dir/2006/7/oj/eng>
- Herrig, I., Seis, W., Fischer, H., Regnery, J., Manz, W., Reifferscheid, G., & Böer, S. (2019). Prediction of fecal indicator organism concentrations in rivers : The shifting role of environmental factors under varying flow conditions. *Environmental Sciences Europe*, 31(1), 59. <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0250-9>
- Hunter, P. R. (2003). Climate change and waterborne and vector-borne disease : CLIMATE CHANGE AND DISEASE. *Journal of Applied Microbiology*, 94, 37-46. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.94.s1.5.x>
- Mälzer, H.-J., aus der Beek, T., Müller, S., & Gebhardt, J. (2016). Comparison of different model approaches for a hygiene early warning system at the lower Ruhr River, Germany. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 219(7, Part B), 671-680. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2015.06.005>
- Mouchel, J.-M., Lucas, F., Moulin, L., Wurtzer, S., Euzen, A., Haghe, J.-P., Rocher, V., Azimi, S., & Servais, P. (2020). Bathing Activities and Microbiological River Water Quality in the Paris Area : A Long-Term Perspective. In *The Handbook of Environmental Chemistry*. https://doi.org/10.1007/698_2019_397
- Préfecture de police de Paris. (1923). *Ordonnance du 17 avril 1923 concernant les bains froids et baignades*. <https://www.prefectures-regions.gouv.fr/ile-de-france/>
- Préfecture d'Île-de-France. (2020, septembre 17). *Plan Baignade : La relance pour l'amélioration de la qualité de l'eau en Seine et en Marne*. <https://www.prefectures-regions.gouv.fr/>
- Ribet, C., & Le Bec, M. (2020). Nager à Paris, entre compétitions olympiques et baignades urbaines. In *Aménager la ville avec l'eau, pour une meilleure résilience face aux changements globaux* (p. 255-266). Presses des Ponts. <https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-03110899>
- Seis, W., Zamzow, M., Caradot, N., & Rouault, P. (2018). On the implementation of reliable early warning systems at European bathing waters using multivariate Bayesian regression modelling. *Water Research*, 143, 301-312. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.06.057>
- Van, L.-A., Nguyen, K.-D., Le Marrec, F., & Jairy, A. (2022). Development of a Tool for Modeling the Fecal Contamination in Rivers with Turbulent Flows—Application to the Seine et Marne Rivers (Parisian Region, France). *Water*, 14(8), 1191. <https://doi.org/10.3390/w14081191>