



## CONTEXTE

---

Depuis le début des années 2000, la pratique de la baignade en eau libre s'accroît dans de nombreuses régions métropolitaines. A Paris, l'organisation des Jeux Olympiques et Paralympiques en 2024 accentue les enjeux autour de la baignade en eau libre et incite à la rendre possible de façon durable dans l'ensemble de la région. Il est pour cela nécessaire que la qualité des milieux aquatiques soit compatible avec les réglementations sanitaires en vigueur. En France le contrôle des eaux de baignade, en particulier vis-à-vis des bactéries indicatrices de contamination fécale (BIF), est effectué par les Agences régionales de Santé (ARS) en accord avec les préconisations d'une Directive Européenne (2006/7/CE).

Dans le cadre de Paris-Plage, une baignade est ouverte depuis l'été 2017 dans le bassin de la Villette. Les risques sanitaires encourus par les baigneurs doivent être prévenus en évitant leur exposition à des contaminations par des micro-organismes pathogènes, notamment lors des temps de pluie qui dégradent fortement la qualité de l'eau du bassin.

## OBJECTIFS

---

L'objectif de cette action est de développer un système intégré de surveillance et d'alerte des risques de contamination par des pathogènes au niveau de la zone de baignade du bassin de la Villette, afin d'aider la prise de décision des gestionnaires.

Plusieurs sous-objectifs sont identifiés ci-dessous :

- Compréhension et modélisation du fonctionnement hydrodynamique du bassin de la Villette
- Couplage d'un module de transport des contaminants microbiologiques;
- Mise en œuvre d'une méthode d'apprentissage automatique pour la prévision du risque sanitaire;
- Développement d'un prototype de système de surveillance et d'alerte en ligne.

## METHODOLOGIE ET PLANNING

---

### 1. *Suivi de l'hydrodynamique et des micro-organismes pathogènes*

- *Hydrodynamique* : Afin de connaître les temps de transfert des contaminants microbiologiques lors des temps de pluie ou des chomages d'ouvrage depuis le canal de l'Ourcq vers la baignade dans le bassin de la Villette, il est nécessaire de connaître les champs de vitesse dans le système. Durant l'été, le bassin de la Villette est stratifié thermiquement, ce qui peut modifier la distribution spatiale des champs de vitesse. Il est donc indispensable de connaître également la structure thermique du bassin et son évolution.

Il n'existe actuellement pas de suivi des variables hydrodynamiques dans le bassin de la Villette. Des capteurs de mesure en continu de la température de l'eau seront donc installés dans le bassin en trois points et trois profondeurs. Des campagnes ponctuelles de mesure des profils de vitesse seront réalisées en plusieurs périodes caractéristiques du fonctionnement hydrodynamique estival du bassin (par exemple période de canicule, période suivant un orage...). De plus, pendant la saison de baignade, des profils hebdomadaires de variables physico-chimiques et biologiques seront également réalisés (Température, O<sub>2</sub>, conductivité, pH, Chlorophylle-a, Phycocyanine).

- *Paramètres microbiologiques et physico-chimiques* : En plus du suivi de la concentration en Entérocoques intestinaux et en *E. coli* dans les bassins de baignade, une station d'alerte installée à

environ 1km à l'amont de la zone de baignade (rond-point des canaux) permet la mesure *in situ* quotidienne de ces bactéries indicatrices de contamination fécale. Ceci sera complété par deux lignes de capteurs (température, conductivité et turbidité) fourniront des mesures à fréquence élevée (15mn). L'une sera installée à proximité immédiate de la station d'alerte et disposera d'un système de transmission des données par GPRS et l'autre sera située au niveau de la zone de baignade.

Des prélèvements et analyses de BIF et de paramètres physico-chimiques (COD, Fluo3D, MES) seront dans le bassin de la Villette à mi-chemin de la station d'alerte et du site de baignade, durant différents épisodes hydrologiques (période de sécheresse, période pluvieuse, à la suite d'un orage...). Des profils de variables physico-chimiques et biologiques seront réalisés en parallèle (température, O<sub>2</sub>, conductivité, pH, Chlorophylle-a, Phycocyanine). Ces mesures viendront compléter les mesures effectuées par le service des canaux de la Ville de Paris. Ceci permettra de préciser les taux de mortalité, de sédimentation des BIF dans le bassin en fonction de différents facteurs de contrôle environnementaux (température de l'eau, production algale, MOD...).

## **2. Modélisation hydrodynamique du bassin de la Villette**

Le temps de transfert des contaminations depuis le rond-point des canaux a été estimé à 12 heures. La modélisation hydrodynamique tridimensionnelle du bassin de la Villette permettra de calculer de façon précise ce temps de transfert en fonction de différentes conditions hydrologiques et thermiques du bassin. Elle sera réalisée à l'aide du logiciel Telemac3D. Les apports par le canal de l'Ourcq à l'amont et les échanges thermiques avec l'atmosphère seront pris en compte. Les résultats de modélisation hydrodynamique fourniront les champs de vitesse et les valeurs de température de l'eau dans l'ensemble du bassin, et donc les temps de transfert et les conditions de viabilité des BIF. Afin de calibrer les paramètres du modèle hydrodynamique et de valider ses résultats, les séries de mesures hydrodynamiques indiquées au paragraphe 1 seront utilisées.

## **3. Modélisation déterministe du transport des contaminants microbiologiques**

Une étude bibliographique approfondie des différentes approches de modélisation déterministe du transport des contaminants microbiologiques sera réalisée. Dans un premier temps, une modélisation du transport des BIF sera réalisée avec Telemac3D en les considérant comme des traceurs passifs, c'est-à-dire uniquement transportés par le mouvement de l'eau et soumis à un taux fixe de perte. Les conditions initiales seront fournies par les mesures télétransmises de la station d'alerte et de la ligne de capteurs associée (température, conductivité, turbidité).

Sera ensuite réalisé le couplage de Telemac3D avec une librairie de processus biologiques (AED2) décrivant la dynamique des BIF. En fonction des résultats obtenus et des connaissances apportées par la revue bibliographique, les équations décrivant la dynamique des BIF seront améliorées. La modélisation prédictive à court terme (2 jours) sera ensuite réalisée en utilisant comme forçage les prévisions météorologiques. Les concentrations mesurées en BIF dans les rejets et au droit des rejets fourniront des valeurs de niveau de contamination réalistes pour différents scénarii de modification du bassin versant d'apport.

## **4. Mise en œuvre de méthodes d'apprentissage automatique**

Une étude bibliographique approfondie des méthodes d'apprentissage automatique basées sur des données massives et utilisées pour prédire les risques sanitaires sera réalisée. Seront en particulier étudiées les méthodes de type « réseaux de neurones artificiels » et « Random Forest ». Les méthodes les mieux adaptées seront ensuite mises en œuvre et comparées aux observations et aux résultats de la modélisation déterministe. Une modélisation prédictive à l'horizon de deux jours sera ensuite réalisée en utilisant comme variables prédictives celles identifiées par l'analyse des données massives.

## **5. Développement d'un prototype de système de surveillance de baignade en ligne**

Une base de données évolutive et interrogeable en ligne sera constituée pour regrouper les différents types de mesures effectuées ainsi que les résultats de modélisation prédictive à court terme. Elle alimentera un système de surveillance en ligne consultable sur un site Internet ou sur une application mobile. Le système permettra la visualisation des mesures réalisées les jours précédents

et fournira des indicateurs prévisionnels de la qualité sanitaire de l'eau pour les 48 heures à venir, basés sur les résultats de la modélisation prédictive. Ce système n'a pas de vocation réglementaire mais apportera aux gestionnaires une aide à la décision pour la gestion de la baignade.

## RESULTATS ATTENDUS ET RETOMBEEES

---

- Protocole de mise en œuvre d'une station de surveillance de baignade
- Modèle 3D couplé hydrodynamique et microbiologique, calibré et validé du bassin de la Villette
- Base de données évolutive et interrogeable en ligne
- Modèle d'apprentissage automatique de la prévision du risque sanitaire pour la baignade urbaine
- Prototype de système de surveillance de baignade en ligne (Internet et application mobile)

Le système développé a vocation à être adapté et déployé sur d'autres sites de baignade urbaine en eau douce présentant des caractéristiques similaires au bassin de la Villette.

## CONTACTS

---

Brigitte Vinçon-Leite, LEESU, Ecole des Ponts (ENPC)

[b.vincon-leite@enpc.fr](mailto:b.vincon-leite@enpc.fr)