LES EAUX USÉES, MIROIR DES SOCIÉTÉS

L'EAU, NOUVEAUX USAGES, NOUVEAUX RÔLES SOCIAUX

01

CAHIERS DE LA CHAIRE VILLE MÉTABOLISME

THOMAS THIEBAULT
EPHE-PSL

Les *Cahiers de la Chaire Ville Métabolisme* réunissent les notes publiées au fil de l'eau par les chercheur.ses de la *Chaire Ville Métabolisme – Université PSL* (2024-2026). Ils donnent à lire un dialogue interdisciplinaire autour des enjeux liés à l'étude des villes, à leur inscription dans des écosystèmes et à la place qu'y occupe le vivant, et entendent contribuer à l'élaboration de réponses face aux transformations urbaines contemporaines.

Thomas Thiebault, rattaché à l'UMR METIS, est enseignant-chercheur à l'EPHE-PSL et étudie le devenir des contaminants organiques, en mettant l'accent sur l'estimation des usages, expositions et pratiques à partir des eaux usées.

Les eaux usées urbaines constituent un observatoire privilégié des dynamiques sociales et sanitaires à l'échelle des territoires. Issues du métabolisme des villes, elles concentrent une grande diversité de traceurs chimiques et microbiologiques, révélateurs des usages, des pratiques et de l'état de santé des populations. Dans un contexte d'urbanisation croissante et d'intensification des pressions environnementales, leur analyse soulève une problématique centrale : comment interpréter ces signaux complexes pour caractériser les interactions entre sociétés urbaines et environnement ? Pour y répondre, ce travail s'appuie sur une approche intégrée combinant analyses chimiques, microbiologiques et traitement de données, afin d'identifier des traceurs robustes et de reconstruire, à partir des eaux usées, des indicateurs fiables des pratiques et expositions à l'échelle des systèmes urbains.

CONTEXTE

Les eaux usées urbaines constituent un reflet direct du métabolisme des sociétés contemporaines. Elles concentrent les excrétions humaines, les résidus chimiques issus des activités domestiques et industrielles, ainsi qu'une grande diversité de microorganismes. Longtemps considérées uniquement comme un vecteur de contamination environnementale nécessitant une collecte, puis un traitement avant rejet, elles apparaissent aujourd'hui comme une source d'information majeure sur les pratiques et l'état de santé des populations. Depuis le début des années 2000, l'analyse des eaux usées a donné naissance à un nouveau champ scientifique : l'épidémiologie basée sur les eaux usées (« wastewater-based epidemiology »). Cette approche permet de suivre l'évolution de nombreux indicateurs sanitaires et sociétaux, allant de la consommation de substances psychoactives à la circulation de pathogènes viraux, en passant par l'exposition à des contaminants chimiques.

La pandémie de Covid-19 a fortement accéléré l'intérêt pour cette approche, en démontrant sa capacité à fournir une surveillance rapide et peu coûteuse de l'évolution d'une épidémie à l'échelle de populations entières. L'intégration progressive de ces dispositifs dans les politiques publiques, notamment au niveau européen, ouvre aujourd'hui la perspective d'un observatoire sanitaire fondé sur l'analyse des eaux usées. Toutefois, le développement de ces outils soulève également des enjeux scientifiques, éthiques et politiques importants, liés à l'interprétation des données, à la protection des populations et à l'utilisation de ces informations par les autorités publiques.

LES EAUX USÉES, UN OBJET CENTRAL DE L'ANTHROPOCÈNE

Les eaux usées constituent aujourd'hui l'une des principales voies de transfert des contaminants et nutriments issus des activités humaines vers les milieux aquatiques. Elles résultent des usages domestique et industriel d'eau et contiennent une grande diversité de substances chimiques, de microorganismes et de matières organiques (Scheringer et Schulz, 2025).

L'augmentation rapide de la consommation mondiale d'eau au cours du XX^{e} siècle, liée à la croissance démographique et à l'élévation du niveau de vie, s'est traduite par une augmentation massive des volumes d'eaux usées produits par les sociétés urbaines (Wada et Bierkens, 2014). Les consommations domestiques et industrielles ont ainsi respectivement quintuplé et triplé au cours des dernières décennies, impliquant une production d'eau usée, entendue comme des eaux dont la qualité a été modifiée par leur usage, augmentant du même ordre de grandeur.

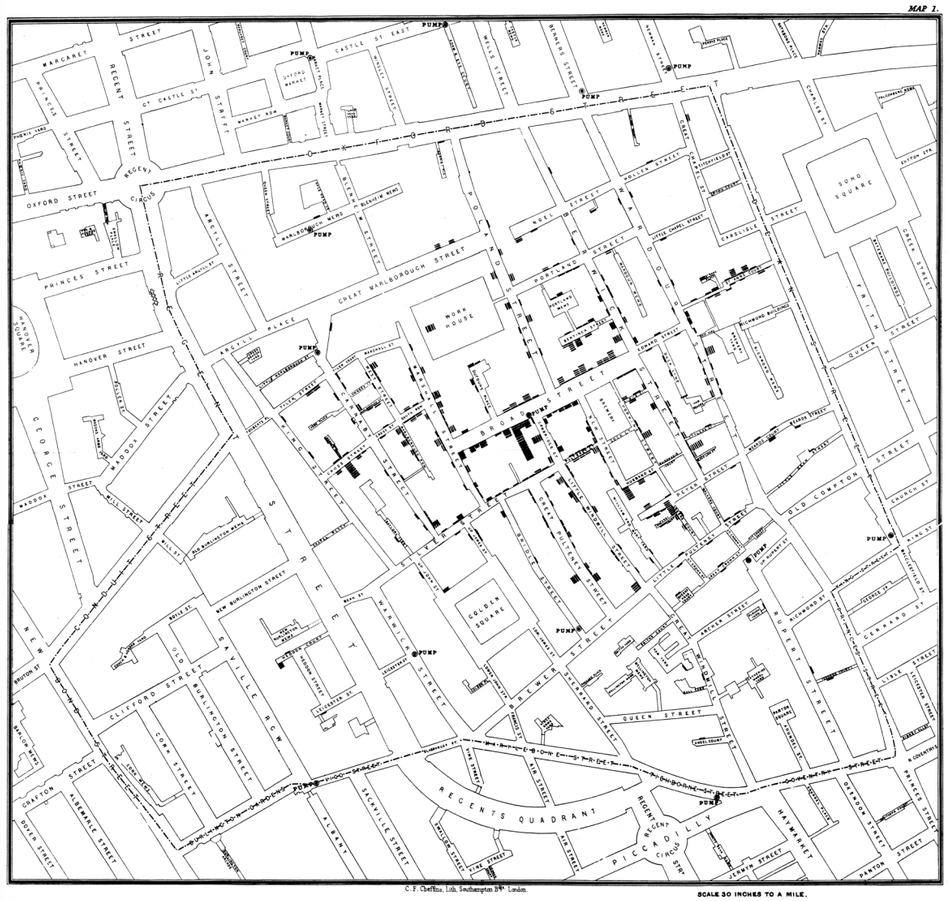
Ces effluents urbains concentrent aujourd'hui une large gamme de substances issues des pratiques quotidiennes, médicaments, produits chimiques industriels, pesticides, plastiques ou encore microorganismes pathogènes. Les stations de traitement des eaux usées ont été conçues historiquement pour réduire la charge organique puis les nutriments présents dans ces eaux, mais elles ne permettent pas l'élimination complète des contaminants émergents. Dans ce contexte, les eaux usées apparaissent comme un objet caractéristique de l'Anthropocène, à la fois produit du métabolisme urbain et vecteur d'impact environnemental.

UNE LONGUE HISTOIRE ENTRE EAUX USÉES ET SANTÉ PUBLIQUE

La gestion des excréta humains constitue un enjeu central depuis les premières formes d'urbanisation. Les premiers systèmes d'évacuation des eaux usées apparaissent dès le IV^{e} millénaire avant notre ère en Mésopotamie, en lien avec les premières concentrations « urbaines », et témoignent déjà de la nécessité d'assainir le milieu urbain.

Au XIX^{e} siècle, la croissance incontrôlée des villes européennes, associée aux épidémies de choléra successives ont conduit à la mise en place de grands réseaux d'assainissement. De plus, les travaux de John Snow sur la transmission hydrique du choléra (*Figure 1*) ont joué un rôle déterminant dans la prise de conscience du lien entre eau et santé publique, impensé dans un monde sans bactéries, et en parallèle du développement des théories hygiénistes.

Dans les grandes villes européennes, ces transformations se traduisent par la construction d'importants réseaux d'égouts, notamment à Paris sous la direction d'Eugène Belgrand ou à Londres sous celle de Joseph Bazalgette. Leur objectif était double, avec i) la protection des ressources en eau potable et ii) évacuer les excrétas urbains vers l'aval (Lofrano et Brown, 2010). Cependant, la simple collecte des eaux usées sans traitement a rapidement conduit à une dégradation importante de la qualité des milieux aquatiques environnants, dont la capacité de dilution et d'atténuation naturelle de la composition des eaux usées a été durement éprouvée, révélant les limites de cette approche (appelée « cleaning by dilution »). Ce constat a progressivement conduit au développement de stations de traitement au cours du XX^{e} siècle, qui ont suppléé à l'utilisation des eaux usées brutes pour l'irrigation et l'amendement des sols agricoles, progressivement abandonnée pour des raisons logistiques et hygiénistes.



↑ *Figure 1 : Cas de choléra recensés à Londres en 1854 (barre noire) en fonction de la distance à l'approvisionnement en eau (rond noir au centre de l'image). Carte originale de John Snow, dessinée et lithographiée par Charles Cheffins. Tirée de John Snow, 1855,* On the mode of communication of cholera, *Londres, John Churchill.*

LES EAUX USÉES COMME SOURCE D'INFORMATION SUR LES SOCIÉTÉS

Au-delà de leur dimension environnementale, les eaux usées contiennent également une quantité considérable d'informations sur les pratiques humaines. Comme l'écrivait Victor Hugo dans *Les Misérables*, les égouts peuvent être vus comme la « conscience de la ville[1] », où convergent les traces matérielles de la vie urbaine. Les progrès récents des techniques analytiques ont transformé cette intuition en un nouveau champ disciplinaire. L'analyse des eaux usées permet aujourd'hui d'identifier et de quantifier de nombreux traceurs issus des activités humaines. Les premières études dans les années 1940 se sont focalisées sur le suivi épidémique de la poliomyélite (Paul *et al.*, 1939), et c'est seulement à partir des années 2000 que d'autres pratiques ont été tracées, telles les drogues illicites, afin de mieux appréhender les enjeux de santé publique. Depuis lors, les cibles de l'épidémiologie basée sur les eaux usées se sont multipliées à des degrés de maturité divers, des produits pharmaceutiques jusqu'à l'exposition à la qualité de l'air ou la détection d'une multitude de pathogènes (Singer *et al.*, 2023).

Cette approche repose sur le postulat qu'il existe une proportionnalité entre l'intensité d'une pratique ou d'une pathologie à l'échelle d'une population et la concentration d'un traceur ou indicateur de cette pratique/pathologie dans les eaux usées brutes. À partir de différentes données à mobiliser, on considère que l'on est en capacité d'évaluer rétrospectivement les quantités excrétées ou les quantités consommées en population en fonction de nos connaissances. S'il est tentant de maximiser le contenu géochimique et microbiologique des échantillons pour leur faire dire beaucoup (car, après tout, les eaux usées contiennent des milliers d'informations chimiques), il faut prêter attention aux critères permettant de définir un indicateur comme robuste. Ils sont au nombre de trois : i) la spécificité de l'indicateur à la substance ou l'usage étudié, ii) la stabilité de l'indicateur dans une matrice très réactive comme les eaux usées, et iii) la possibilité de le quantifier avec précision (O'Keeffe, 2021). Cette validation est effective pour certains, mais encore en cours pour d'autres, qui demeurent exploratoires et confinés à la recherche académique, tels que le système immunitaire, l'exposition à la contamination atmosphérique ou le microbiote intestinal. Concernant les indicateurs mieux maîtrisés (SARS-CoV-2, drogues illicites) des réseaux internationaux de surveillance (*Figure 2*) ont été mis en place et ont permis des comparaisons à l'échelle mondiale. Il en est ainsi pour les drogues illicites, grâce à un programme qui se poursuit sans discontinuer depuis 2011 (González-Mariño *et al.*, 2020).

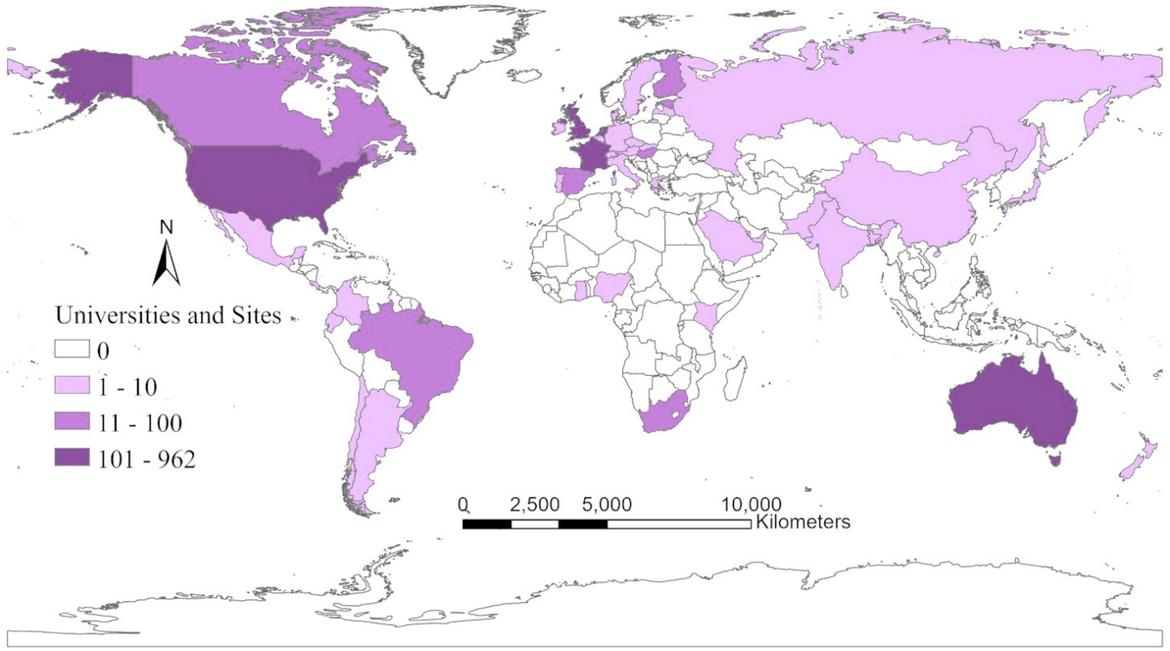
DE LA SURVEILLANCE SANITAIRE GLOBALE À L'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DE VIE ?

Ce champ disciplinaire en considérable évolution permet donc aujourd'hui d'étudier de manière multiple la population qui génère les eaux usées collectées. On l'a vu, depuis les pathologies jusqu'aux pratiques quotidiennes, au sein desquelles on note toutefois des questions encore irrésolues, relatives par exemple à certains virus oncogènes ou à la composition du bol alimentaire et qui constituent les défis de la recherche actuelle. Dans une perspective de moyen-terme, un fort intérêt se développe à l'égard des molécules endogènes, telles les hormones, dont l'évaluation constituerait théoriquement un moyen d'accéder à des informations sur des réponses biologiques au stress en population ou d'opérer des croisements avec des vulnérabilités socio-environnementales (Choi *et al.*, 2020). Si des défis spécifiques sont liés à l'étude de ces composés, réussir à les appréhender ouvrirait, au-delà des molécules exogènes et pathogènes divers, une voie pour saisir au plus près l'état de santé des populations. Ce qui constitue un frein à ces approches est à l'image de ce qui a été mentionné précédemment, la spécificité des eaux usées (forte activité biologique) et la capacité à identifier des traceurs spécifiques (*Figure 3*). L'apparition de l'analyse non ciblée, qui permet d'évaluer de manière aussi exhaustive que possible la composition d'un échantillon est à ce titre prometteuse (Bowes, 2024), mais pose de réels défis dans la capacité de traitement d'une masse d'informations et de signaux aussi importants qui nécessitent une détection automatisée. La principale force de l'analyse *via* l'eau usée est également sa principale faiblesse : les indicateurs sont toujours mesurés à l'échelle d'une population excrétant sur la zone de collecte, et la distinction entre somme des pratiques individuelles et collectives est indiscernable. Pour le dire trivialement, une augmentation d'un traceur n'est pas systématiquement synonyme d'une augmentation généralisée de l'intensité d'une pratique en population, mais peut-être seulement de quelques individus contributeurs.

SURVEILLANCE ET ENJEUX ÉTHIQUES

Les eaux usées peuvent, on l'a vu, être considérées comme un objet frontière, à la fois source d'information, source de contamination et potentiel réservoir de ressources (énergie, nutriments). Mais cet objet est légalement un déchet. Et si l'on s'en tient à la surveillance sanitaire dont elles font l'objet, contrairement aux études épidémiologiques classiques, aucun consentement des populations, impliquées à leur corps défendant, n'est requis. Le sujet soulève donc des questions éthiques, que la communauté scient a tardé à s'approprier (Lancaster *et al.*, 2019). En l'absence de consentement, l'anonymat statistique est par exemple une obligation. Ceci nécessite de travailler sur les eaux usées excrétées par des populations supérieures à au moins mille équivalent-habitants (Prichard *et al.*, 2014). Or le dire n'est pas le faire. Par exemple, les suivis conduits dans des prisons (Postigo *et al.,* 2011) ou encore dans des lieux d'usage intense de produits stupéfiants ciblent des populations déjà sujettes à de nombreuses vulnérabilités. Le possible transfert de compétences depuis la communauté scientifique vers des institutions coercitives génère dès lors une responsabilité éthique particulière dans les modalités de déploiement de ces approches.

Dès lors, il apparaît tout à la fois urgent de revoir le statut juridique des eaux usées, au sein desquelles la surveillance sanitaire sera imposée par la nouvelle mouture de la directive sur les eaux résiduaires urbaines (DERU2), et de travailler en toute transparence pour en déminer l'effet panoptique et associer les populations au travail en amont et après acquisition des résultats. Ce consentement des résidentes et résidents à ces approches est un pré-requis indispensable à la prise en main de ces approches par les pouvoirs publics.



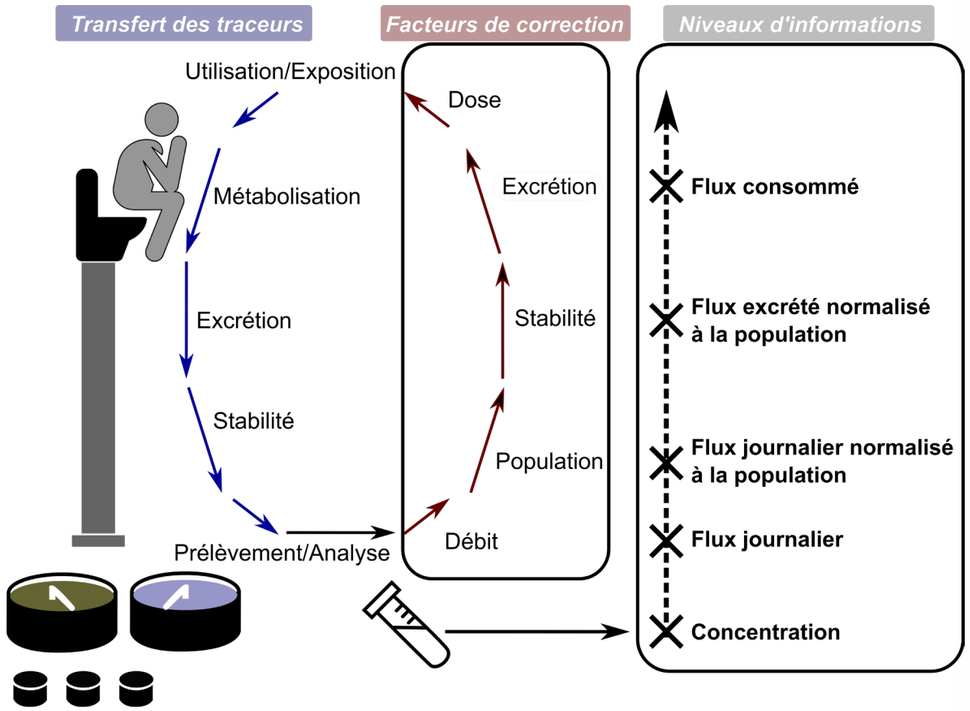
↑ *Figure 2 : Carte du monde indiquant les pays ayant recouru à la surveillance du SARS-CoV-2 dans les eaux usées, tirée de Naughton* et al. *(2023).*

ANCRAGE DANS LA VILLE MÉTABOLISME :
Les eaux usées constituent une matérialisation directe du métabolisme des villes, en tant que matrice intégratrice des rejets des activités humaines. Elles traduisent dès lors les interactions entre consommation, transformation et excrétion à l'échelle des territoires urbains. Ce travail s'inscrit pleinement dans la thématique « Ville Métabolisme » en proposant d'utiliser ces flux comme des indicateurs quantifiables des dynamiques socio-environnementales. En mobilisant des traceurs chimiques et biologiques, il devient possible de relier pratiques individuelles et fonctionnement global de la ville, en considérant les réseaux d'assainissement comme des infrastructures d'observation du métabolisme urbain.

1. Victor Hugo, Les Misérables, *tome V,* L'intestin du Léviathan, *Livre 2, 1862.*

APPLICATIONS URBAINES :
Les résultats des recherches sur les eaux usées ouvrent des perspectives opérationnelles pour la gestion urbaine, notamment en matière de surveillance sanitaire, d'évaluation des expositions et d'aide à la décision publique. Ces analyses pourraient alimenter des dispositifs d'alerte précoce, orienter les politiques de santé ou évaluer l'efficacité de mesures d'atténuation des vulnérabilités. Leur mise en œuvre suppose toutefois des conditions spécifiques, telles que la structuration du réseau d'assainissement qui doit être compatible avec la zone à étudier ou encore la gouvernance des données. L'intégration dans les politiques publiques nécessite également une articulation avec les acteurs locaux afin de garantir un usage éthique, transparent et adapté aux enjeux territoriaux.

↓ *Figure 3 : Schéma conceptuel de l'épidémiologie basée sur les eaux usées et des normalisations nécessaires pour estimer des usages et expositions.*



PERSPECTIVES

À terme, l'analyse des eaux usées pourrait devenir un outil central de surveillance sanitaire des populations et de caractérisation de leurs expositions environnementales. En combinant les informations issues des contaminants chimiques, des biomarqueurs physiologiques et des microorganismes, il devient possible de suivre l'évolution de nombreux indicateurs de santé publique à l'échelle des territoires et en population. Cette approche dispose d'avantages indéniables : son coût modéré, sa capacité de déploiement spatio-temporelle très adaptable et sa réactivité. C'est donc un complément d'intérêt aux dispositifs plus classiques, au potentiel de suivi diversifié. Elle nécessitera toutefois un cadrage méthodologique, notamment pour sa standardisation (la norme AFNOR pour l'analyse du SARS-CoV-2 n'a été produite qu'en 2026) et sa pleine appréhension par les résidents afin de déployer tout son potentiel et de permettre son acceptation collective. Un des ultimes enjeux sera ainsi de rendre publics les résultats des suivis effectués pour une consultation par les différents opérateurs et individus, sans limiter leur utilisation à des sphères autorisées, obligeant la communauté scientifique à expliciter les forces et faiblesses des suivis et des méthodes et ce que l'on peut faire dire à ce que contiennent nos excrétas.

BIBLIOGRAPHIE :

Bowes, Davin A. 2024. « Towards a Precision Model for Environmental Public Health: Wastewater-based Epidemiology to Assess Population-level Exposures and Related Diseases ». *Current Epidemiology Reports*, n°11, p. 131-139. https://doi.org/10.1007/s40471-024-00350-6.

Choi, Phil M., *et al.* 2020. « Population socioeconomics predicted using wastewater ». *Environmental Science & Technology Letters*, n°7, p. 567-572.

González-Mariño, Iria, *et al.* 2020. « Spatio-temporal assessment of illicit drug use at large scale: Evidence from 7 years of international wastewater monitoring ». *Addiction*, n°115, p. 109-120. https://doi.org/10.1111/add.14767.

Lancaster, Kari, *et al.* 2019. « A 'promising tool'? A critical review of the social and ethico-political effects of wastewater analysis in the context of illicit drug epidemiology and drug policy ». *Current Opinion in Environmental Science & Health*, n°9, p. 85-90. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.06.006.

Lofrano, Giusy, et Brown, Jeanette. 2010. « Wastewater management through the ages: A history of mankind ». *Science of the Total Environment*, n°408, p. 5254-5264. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.062.

Naughton, Colleen C., *et al.* 2023. « Show us the data: Global COVID-19 wastewater monitoring efforts, equity, and gaps ». *FEMS Microbes*, n°4, xtad003. https://doi.org/10.1093/femsmc/xtad003.

O'Keeffe, Juliette. 2021. « Wastewater-based epidemiology: Current uses and future opportunities as a public health surveillance tool ». *Environmental Health Reviews*, n°64, p. 44-52. https://doi.org/10.5864/d2021-015.

Paul, John R., Trask, James D., et Culotta, C. S. 1939. « Poliomyelitic Virus in Sewage ». *Science*, n°90, p. 258-259. https://doi.org/10.1126/science.90.2333.258.

Postigo, Cristina, de Alda, Miren L., Barceló, Damià, 2011. « Evaluation of drugs of abuse use and trends in a prison through wastewater analysis ». *Environment International*, n°37, p. 49-55. https://doi.org/10.1016/j.envint.2010.06.012.

Prichard, Jeremy, *et al.* 2014. « Sewage epidemiology and illicit drug research: The development of ethical research guidelines ». *Science of the Total Environment*, n°472, p. 550-555. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.039.

Scheringer, Martin, et Schulz, Ralf. 2025. « The State of the World's Chemical Pollution ». *Annual Reviews of Environment and Resources*, n°50, p. 381-408. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-111523-102318.

Spellman, Frank R., 2021. *Fundamentals of Wastewater-Based Epidemiology: Biomonitoring of Bacteria, Protozoa, COVID-19, and Other Viruses*. Boca Raton : CRC Press.

Singer, Andrew C., *et al.* 2023. « A world of wastewater-based epidemiology ». *Nature Water*, n°1, p. 408-415. https://doi.org/10.1038/s44221-023-00083-8.

Wada, Yoshihide, et Bierkens, Marc F. P. 2014. « Sustainability of global water use: Past reconstruction and future projections ». *Environmental Research Letters*, n°9, 104003. https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/104003.

Wade, Matthew J., *et al.* 2023. *Wastewater-based Epidemiology at the Frontier of Global Public Health*. Londres : IWA Publishing.

01

PSL UNIVERSITÉ PARIS

CHAIRE VILLE MÉTABOLISME

À l'initiative de
Avec le soutien de

PCA-STREAM
PCA-STREAM, GROUPAMA IMMOBILIER, ARTELIA

Octobre 2026