



Association de la surveillance épidémiologique basée sur les eaux usées et de la modélisation du SRAS-CoV-2/COVID-19 : applications pratiques à l'Agence de santé publique du Canada

Meong Jin Joung^{1,2}, Chand S Mangat³, Edgard M Mejia³, Audra Nagasawa⁴, Anil Nichani⁵, Carol Perez-Iratxeta⁴, Shelley W Peterson³, David Champredon^{1*}

Résumé

La surveillance du coronavirus 2 du syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS-CoV-2) à partir des eaux usées constitue un outil complémentaire de la surveillance clinique pour détecter et surveiller la maladie à coronavirus 2019 (COVID-19). Étant donné que les personnes symptomatiques et asymptomatiques infectées par le SRAS-CoV-2 peuvent transmettre le virus par voie fécale, la surveillance à partir des eaux usées peut mesurer la prévalence communautaire de COVID-19 sans restriction liées aux comportements de recherche de soins de santé et à la capacité de dépistage clinique. Pendant la vague Omicron, la capacité limitée des tests cliniques à identifier les cas de COVID-19 dans de nombreux territoires a mis en évidence l'utilité de la surveillance à partir des eaux usées pour estimer la prévalence de la maladie et contribuer aux stratégies de santé publique; cependant, il existe de nombreux facteurs internes liés aux égouts, à l'environnement et aux laboratoires qui peuvent avoir une influence sur les résultats de la surveillance à partir des eaux usées. La mise en œuvre de la surveillance à partir des eaux usées nécessite donc un cadre complet pour définir une filière qui tienne compte de ces facteurs complexes et nuancés. Cet article passe en revue le cadre national de la surveillance à partir des eaux usées mené par l'Agence de la santé publique du Canada afin de présenter les méthodes de surveillance basées sur les eaux usées utilisées au Canada pour suivre et surveiller le SRAS-CoV-2. En particulier, nous mettons l'accent sur cinq villes canadiennes - Vancouver, Edmonton, Toronto, Montréal et Halifax - dont les signaux d'eaux usées sont analysés par un modèle mathématique afin de fournir des prévisions de cas et des estimations du nombre de reproduction. L'objectif de ce travail est de partager nos idées sur les approches de mise en œuvre de la surveillance à partir des eaux usées. Il est important de noter que le système national de surveillance à partir des eaux usées a des implications au-delà de la COVID-19, car un cadre similaire peut être appliqué pour surveiller d'autres pathogènes infectieux ou la résistance aux antimicrobiens dans la collectivité.

Citation proposée : Jin Joung M, Mangat CS, Mejia EM, Nagasawa A, Nichani A, Perez-Iratxeta C, Peterson SW, Champredon D. Association de la surveillance épidémiologique basée sur les eaux usées et de la modélisation du SRAS-CoV-2/COVID-19 : applications pratiques à l'Agence de santé publique du Canada. *Relevé des maladies transmissibles au Canada* 2023;49(5):187–97. <https://doi.org/10.14745/ccdr.v49i05a01f>

Mots-clés : COVID-19, SRAS-CoV-2, eaux usées, épidémiologie, surveillance environnementale, modélisation mathématique, pandémie

Introduction

Les épidémies causées par des agents pathogènes infectieux font traditionnellement l'objet d'une surveillance clinique des individus. La surveillance basée sur les eaux usées est une

approche de surveillance épidémiologique alternative qui consiste à évaluer la concentration d'un agent pathogène d'intérêt dans les eaux usées afin d'estimer la prévalence de

Cette oeuvre est mise à la disposition selon les termes de la licence internationale Creative Commons Attribution 4.0



Affiliations

¹ Laboratoire national de microbiologie, Division des sciences du risque en santé publique, Agence de santé publique du Canada, Guelph, ON

² École de santé publique Dalla Lana, Université de Toronto, Toronto, ON

³ Laboratoire national de microbiologie, Unité de surveillance des eaux usées, Agence de la santé publique du Canada, Winnipeg, MB

⁴ Statistique Canada, Centre des mesures directes de la santé, Ottawa, ON

⁵ Laboratoire national de microbiologie, Agence de la santé publique du Canada, Guelph, ON

*Correspondance :

david.champredon@phac-aspc.gc.ca



l'infection qui lui est associée au sein d'une communauté. Depuis 2010, la surveillance des eaux usées fait partie intégrante des initiatives d'éradication du poliovirus (1). Au Canada, elle a été utilisée pour surveiller la consommation de médicaments et les pathogènes viraux afin de déterminer les variations saisonnières de la charge virale et l'inactivation par les processus de traitement des eaux usées (2–6). Pendant la pandémie de maladie à coronavirus 2019 (COVID-19), la surveillance à partir des eaux usées a attiré beaucoup d'attention pour la surveillance du coronavirus 2 du syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS-CoV-2) (le virus qui cause la COVID-19) à la fois au Canada et dans le monde (7). La surveillance des eaux usées constitue un outil complémentaire à la surveillance clinique pour détecter et suivre les tendances de la maladie causée par le SRAS-CoV-2. Contrairement à la surveillance clinique de la COVID-19 (8), la surveillance à partir des eaux usées n'est pas limitée par le sous-diagnostic des personnes asymptomatiques, car la plupart des personnes infectées par le SRAS-CoV-2 excrètent des particules virales dans leurs selles (9,10). La surveillance basée sur les eaux usées utilise un échantillon communautaire groupé provenant de la zone de captage d'un lieu d'échantillonnage pour mesurer les niveaux de SRAS-CoV-2 au sein de la collectivité (11). De nombreuses études ont montré que la concentration de SRAS-CoV-2 mesurée dans les eaux usées est corrélée avec la prévalence réelle affectant la collectivité vivante dans la zone de captage (12–15).

La surveillance des eaux usées a suscité un vif intérêt lors de l'apparition du variant préoccupant Omicron en novembre 2021 (16). Son grand nombre de mutations génétiques par rapport aux lignées circulantes précédentes lui a conféré une plus grande transmissibilité et une plus grande évasion immunitaire, entraînant une augmentation rapide du nombre de cas (17). Par conséquent, pendant la vague Omicron, les capacités de dépistage dans de nombreux pays, y compris dans les grandes villes canadiennes, ont été débordées, ce qui a obligé à limiter le dépistage du SRAS-CoV-2 par réaction en chaîne de la polymérase (PCR) dans les échantillons cliniques à certaines populations à haut risque ou vulnérables (18). Des recherches antérieures ont montré que le SRAS-CoV-2 était détecté dans 29 % à 100 % des échantillons fécaux des personnes infectées (19) et que la détection du SRAS-CoV-2 par la surveillance à partir des eaux usées précédait les cas cliniques confirmés de 5 à 63 jours (11), ce qui confirme que la surveillance à partir des eaux usées est 1) une mesure alternative de la prévalence de la maladie, en particulier lorsque la surveillance clinique est limitée par une demande excessive ou des comportements de recherche de tests et 2) un indicateur précoce de la présence de COVID-19 pour informer les stratégies de dépistage et de santé publique au niveau de la collectivité (20). Dans l'ensemble, la surveillance à partir des eaux usées constitue une méthode non invasive et peu coûteuse pour estimer la prévalence de COVID-19 dans la collectivité, ce qui permet de pallier les limites de la surveillance clinique traditionnelle.

Cependant, la surveillance à partir des eaux usées n'est pas exempte de biais et d'incertitudes. La surveillance à partir des eaux usées peut être influencée par divers facteurs pré- et post-analytiques, notamment les méthodes de collecte et de l'entreposage des échantillons, le protocole d'analyse en laboratoire, l'ingénierie du réseau d'égouts et des stations d'épuration des eaux usées, les changements de conditions météorologiques et les procédures d'analyse des données (21–23). En outre, comme la surveillance à partir des eaux usées pour le SRAS-CoV-2 est encore en cours d'évolution, il n'existe pas de procédures normalisées pour traiter ces facteurs. Compte tenu de la sensibilité potentielle des données de surveillance à partir des eaux usées à ces facteurs, il est important d'établir une filière qui spécifie des protocoles et des méthodologies standardisés, de la collecte des échantillons à l'analyse, afin de garantir l'exactitude des données issues de la surveillance basée sur les eaux usées. Bien qu'il soit impossible de contrôler certaines sources d'incertitude, il est essentiel d'en minimiser les effets. Il est important de mettre en place un cadre permettant de combiner les résultats de la surveillance à partir des eaux usées et de la surveillance clinique afin de communiquer clairement les résultats épidémiologiques et de contribuer aux stratégies de santé publique (24).

Au Canada, la surveillance à partir des eaux usées est réalisée par des laboratoires aux niveaux fédéral, provincial et municipal, ainsi que par des groupes universitaires (7). Le Laboratoire national de microbiologie (LNM) de l'Agence de la santé publique du Canada (l'Agence) rassemble et analyse des échantillons provenant de plusieurs provinces afin de réaliser une surveillance à partir des eaux usées au niveau national. L'objectif de cet article de synthèse est de fournir une vue d'ensemble de la filière de surveillance à partir des eaux usées au LNM et un cadre permettant d'intégrer la surveillance à partir des eaux usées et la surveillance clinique afin d'améliorer la surveillance nationale de la COVID-19. Nous décrivons comment la modélisation mathématique peut être utilisée pour faciliter l'interprétation des résultats de la surveillance à partir des eaux usées. Pour accroître l'utilité des données de la surveillance à partir des eaux usées, nous évaluons les facteurs clés qui influencent les signaux de la surveillance à partir des eaux usées à chaque étape de la chaîne de production et les méthodes pour y remédier.

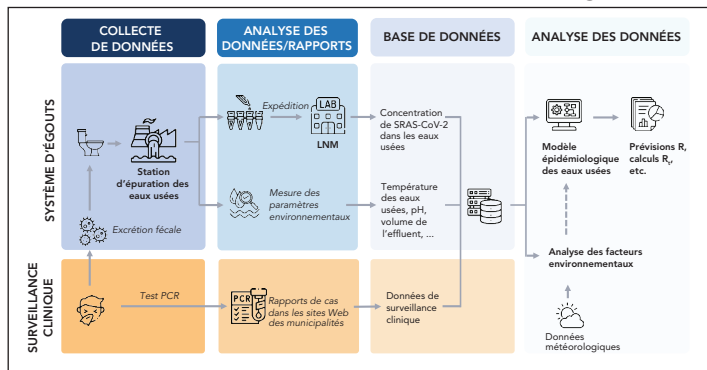
Résultats

Canalisation de surveillance des eaux usées

Le programme national canadien de surveillance à partir des eaux usées comprend la collaboration des stations d'épuration des eaux usées municipales et de plusieurs divisions et agences gouvernementales, dont Statistique Canada, le LNM et l'Agence. La surveillance à partir des eaux usées a été développée pour rationaliser les processus de surveillance à partir des eaux usées, de la collecte des échantillons à l'établissement des rapports, de manière précise et rapide (**figure 1**).



Figure 1 : Données de surveillance des eaux usées et pipeline d'analyse à l'Agence de la santé publique du Canada/au Laboratoire national de microbiologie

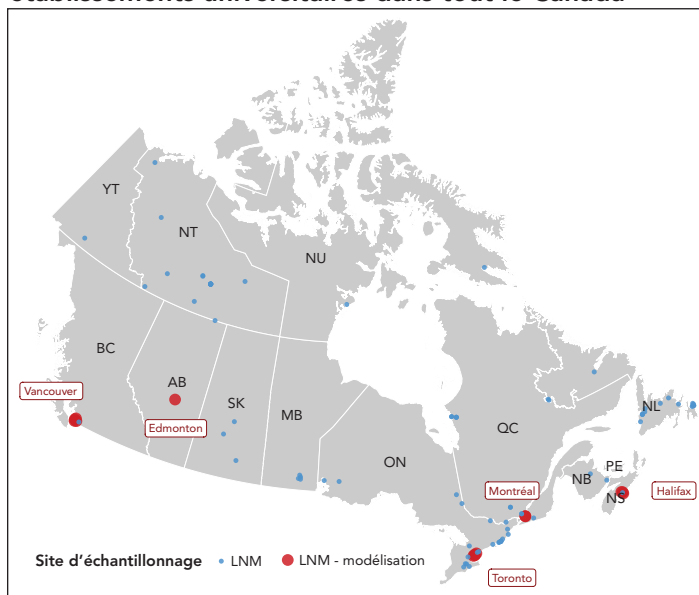


Abréviations: LNM, Laboratoire national de microbiologie; PCR, réaction en chaîne de la polymérase; SRAS-CoV-2, coronavirus 2 du syndrome respiratoire aigu sévère

Collecte de données

L'enquête canadienne sur les eaux usées, menée conjointement par Statistique Canada et l'Agence, porte actuellement sur 102 stations d'épuration au Canada. Nous mettons l'accent sur 15 stations d'épuration de cinq villes — Vancouver, Edmonton, Toronto, Montréal et Halifax — où la modélisation mathématique est appliquée pour analyser les tendances du SRAS-CoV-2 (figure 2). L'échantillonnage des eaux usées dans les cinq villes a commencé en septembre 2020. Les échantillons sont prélevés environ deux fois par semaine sur les effluents bruts. Les échantillons sont prélevés avant le dessablage dans une station d'épuration des eaux usées d'Edmonton, trois stations d'épuration des eaux usées de Montréal et trois stations d'épuration des eaux usées de Vancouver, et après le dessablage dans quatre stations d'épuration des eaux usées de Toronto et deux stations d'épuration des eaux usées de Vancouver. Les eaux usées peuvent être échantillonnées à l'aide de méthodes composites ou d'échantillons instantanés. L'échantillonnage instantané constitue un échantillonnage rapide à un moment précis, qui représente l'influent à ce moment-là; par conséquent, les résultats sont plus sujets aux variations du débit de l'influent au cours de la journée. L'échantillonnage composite consiste à collecter plusieurs échantillons à l'aide d'un échantillonneur automatique au cours d'une période donnée (généralement 24 heures) afin de représenter la composition des eaux usées pour cette période. Pour l'enquête canadienne sur les eaux usées, la méthode d'échantillonnage composite a été utilisée : des échantillonneurs automatiques ont collecté des échantillons d'eaux usées pendant une période de 24 heures. Ces échantillons ont été conservés à 4 °C et expédiés au LNM à Winnipeg, Manitoba.

Figure 2 : La surveillance de COVID-19 dans les eaux usées est activement menée par les autorités fédérales, provinciales et municipales ainsi que par des établissements universitaires dans tout le Canada



Abréviations : AB, Alberta; BC, Colombie-Britannique; LNM, Laboratoire national de microbiologie; MB, Manitoba; NB, Nouveau-Brunswick; NL, Terre-Neuve-et-Labrador; NS, Nouvelle-Écosse; NT, Territoires du Nord-Ouest; NU, Nunavut; ON, Ontario; PE, Île-du-Prince-Édouard; QC, Québec; SK, Saskatchewan; YT, Yukon

Outre la collecte d'échantillons, la qualité des eaux usées et les paramètres environnementaux des eaux usées, tels que le volume journalier influent, la température et le pH, sont mesurés à la station d'épuration. Les données sur les eaux usées du LNM sont rassemblées avec les paramètres environnementaux de chaque station d'épuration des eaux usées par Statistique Canada pour la gestion des données et partagées avec l'Agence/LNM.

Les données de surveillance clinique sont extraites de la liste des cas de COVID de l'Agence (une liste anonyme des cas de COVID, au niveau individuel, communiquée par les provinces et les territoires à l'Agence pendant la réponse au COVID-19) ou de sources accessibles au public sur les sites Web municipaux de chaque ville dans les cas où la liste de l'Agence n'a pas une résolution spatiale suffisante. Lorsqu'elles sont disponibles (e.g. Toronto, Vancouver), nous recueillons des données au niveau sous-municipal afin de cartographier la localisation spatiale des cas cliniques signalés avec la zone de captage de chaque station d'épuration. Les données environnementales liées aux conditions météorologiques, y compris la quantité de précipitations et de neige au sol pour chaque ville, sont obtenues auprès d'Environnement Canada.



Analyse en laboratoire de la concentration de SRAS-CoV-2

La concentration de SRAS-CoV-2 a été mesurée à l'aide de deux méthodes. Les protocoles de laboratoire pour les deux méthodes ont été décrits en détail par Nourbakhsh *et al.* (25). En bref, avant le 12 février 2021, l'acide ribonucléique (ARN) du SRAS-CoV-2 a été extrait de la partie liquide surnageante d'échantillons d'eaux usées clarifiées. Toutefois, les premières études ont montré que la partie solide des échantillons d'eaux usées clarifiées présentait une concentration virale plus élevée (26–28). Par conséquent, après le 12 février 2021, l'extraction de l'ARN a été effectuée sur le culot solide après clarification. Le changement de protocole a permis d'améliorer l'efficacité de la quantification de l'ARN.

Qualité des données et sources d'incertitude

Les données de surveillance à partir des eaux usées sont influencées par plusieurs facteurs, notamment les conditions environnementales, les protocoles de laboratoire et l'ingénierie des stations d'épuration. Nous résumons ci-dessous la manière dont les facteurs environnementaux et de laboratoire peuvent avoir un impact sur les données de surveillance à partir des eaux usées. Il s'agit d'un domaine où la recherche est encore active et où de nombreuses lacunes subsistent en matière de connaissances.

Les facteurs environnementaux tels que les précipitations ou la fonte des neiges ont été décrits comme des facteurs critiques susceptibles d'influencer les signaux viraux dans les eaux usées (29). Toutefois, l'impact des facteurs environnementaux peut varier en fonction du type de réseau d'égouts desservi par une station d'épuration des eaux usées. Il existe deux grands types de systèmes d'égouts : les systèmes combinés et les systèmes sanitaires. Les systèmes combinés recueillent les eaux pluviales de surface et les eaux usées dans les mêmes canalisations. Alors que les systèmes combinés ne collectent les eaux usées comme eau entrante dans la station d'épuration que par temps sec, le temps humide ou les fortes précipitations (y compris la fonte des neiges) augmentent le débit entrant et diluent la concentration virale présente dans les eaux usées (29). En revanche, les systèmes sanitaires séparent principalement les eaux pluviales et les eaux usées, ce qui signifie que le volume d'afflux ne varie pas de manière significative en fonction des conditions météorologiques, évitant ainsi la dilution du signal viral.

Les systèmes combinés sont présents dans les parties les plus anciennes des villes suivies par l'Agence. Pour garantir la qualité des données de surveillance à partir des eaux usées, nous avons étudié les effets médiateurs potentiels des précipitations sur le signal SRAS-CoV-2 de surveillance à partir des eaux usées. Nos analyses quantitatives des facteurs environnementaux (manuscrit en préparation) ont révélé que si certaines fluctuations du volume de l'affluent ont été enregistrées avec les changements de précipitations, elles ne semblent pas avoir d'impact significatif

sur la concentration de SRAS-CoV-2 dans les eaux usées pour les dates et les sites analysés. Il a également été suggéré que la fonte des neiges influence le signal du SRAS-CoV-2 dans les eaux usées (21,30). Bien que certaines études aient montré que le volume de l'influent augmentait pendant la saison de la fonte des neiges (30–32), il y a peu de preuves que les événements de fonte des neiges ont un impact significatif sur le signal viral.

Facteurs de laboratoire

La mesure de la concentration virale à partir d'un échantillon d'eau usée est un processus en plusieurs étapes, où chaque étape peut introduire une source d'erreur potentielle. La durée et les conditions de transport de l'échantillon entre le lieu de prélèvement et le laboratoire peuvent avoir une incidence sur la mesure de la concentration finale de SRAS-CoV-2. Par nature, les échantillons d'eaux usées sont très « actifs » ; i.e. qu'ils présentent un degré élevé d'activité biologique qui entraîne une modification rapide de la nature de l'échantillon. En outre, l'équipement et les récipients du système d'échantillonnage peuvent être contaminés. Par conséquent, le stockage, le transport et la manipulation des échantillons d'eaux usées sont essentiels au maintien de leur intégrité et constituent des sources potentielles d'erreurs. En outre, la nature complexe et variable des eaux usées nécessite l'utilisation appropriée d'échantillons de contrôle pour tenir compte des variations dans la composition des eaux usées et évaluer l'efficacité globale du processus. L'absence d'exécution correcte de ces contrôles constitue une autre source potentielle d'erreur. La détection moléculaire par réaction en chaîne de la polymérase quantitative en temps réel (RT-qPCR) peut également être sujette à des erreurs (e.g. courbe standard non mise à jour, nouvelles mutations virales affectant l'identification par les amorces). Par conséquent, des protocoles rigoureux visant à garantir la cohérence et la fiabilité des mesures de concentration du SRAS-CoV-2 à partir d'échantillons d'eaux usées devraient être mis en place à ce stade de la filière de surveillance à partir des eaux usées. Les orientations relatives à ces protocoles sont présentées en détail dans les **Matériel supplémentaires**.

Normalisation

Comme indiqué ci-dessus, de nombreux facteurs peuvent avoir un impact sur la concentration virale dans les eaux usées. Idéalement, ces facteurs devraient être déterminés, mesurés et contrôlés avant de communiquer une concentration virale « finale » dans les eaux usées. Les eaux usées représentent une matrice complexe qui contient des facteurs biologiques, chimiques et physiques susceptibles d'affecter la concentration et/ou la détection de l'ARN. Les eaux usées ne contiennent pas seulement des eaux usées domestiques, mais peuvent également contenir des rejets industriels/agricoles et des eaux pluviales en fonction des conditions météorologiques (33). La composition des eaux usées peut changer en termes de pH, de teneur en chlore et en oxygène dissous, ce qui peut réduire la concentration virale (23). En outre, le transport des eaux usées dans le réseau d'égouts comprend des fluctuations de

la température des eaux usées, du débit, de la sédimentation/remise en suspension et de la durée du trajet. Pour ces raisons, il est peu probable d'obtenir un signal viral régulier dans les eaux usées, en particulier lors de la surveillance de petites collectivités. Cependant, plusieurs approches de normalisation ont été employées par différents groupes pour répondre à ces incertitudes. La normalisation n'est pas encore standardisée dans la surveillance à partir des eaux usées; même le mot « normalisation » n'est peut-être pas approprié, car il tente de corriger différents facteurs. Le signal viral dans les eaux usées doit être contrôlé pour 1) la masse fécale humaine afin de tenir compte de la population (e.g. en utilisant des biomarqueurs tels que le virus de la marbrure douce du poivron [PMMoV], le crAssphage et l'ammoniac); 2) les événements environnementaux (e.g. le débit d'afflux de la station d'épuration des eaux usées) et 3) la dynamique de transport et de dispersion dans les égouts (e.g. en utilisant des mesures de la suspension de particules dans les eaux usées). Il n'existe probablement pas de solution globale pour contrôler ces facteurs (et d'autres), car chaque égout présente des spécificités uniques. La normalisation est encore un domaine d'investigation à l'Agence/LNM, où la collecte de plusieurs variables de normalisation (e.g. la concentration de PMMoV, le pH, la masse des solides totaux en suspension) a été effectuée depuis le début du programme fédéral surveillance à partir des eaux usées.

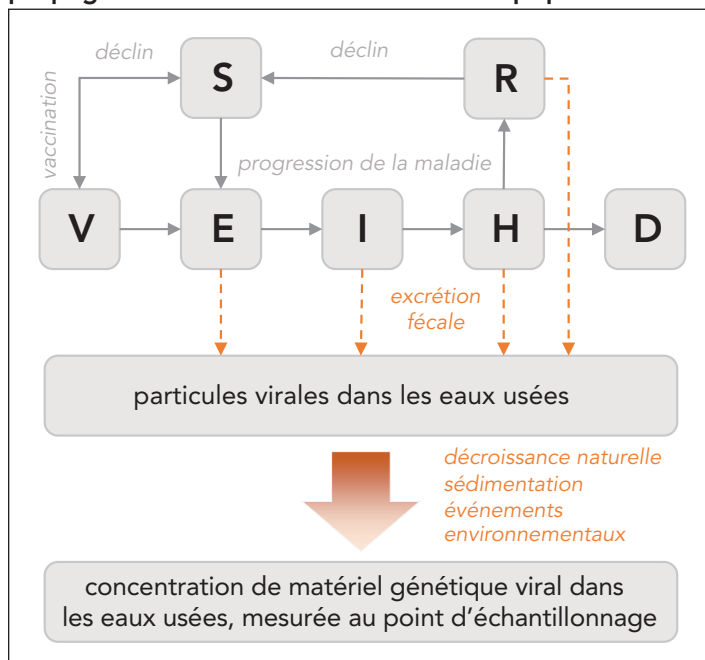
Modèle épidémiologique des eaux usées

Un modèle mathématique décrivant à la fois la transmission du SRAS-CoV-2 au niveau de la population et la concentration du SRAS-CoV-2 dans les eaux usées (en modélisant explicitement l'excrétion fécale) a été mis au point à l'Agence/NML (25) et mis en œuvre sous la forme d'une librairie R accessible au public (34). Une représentation simple de ce modèle, appelé modèle épidémique des eaux usées (le MEEU), est illustrée par la **figure 3**.

Comme d'autres modèles mathématiques, le MEEU fournit un cadre de principe pour estimer les paramètres épidémiologiques non observés (e.g. la prévalence, le nombre de reproduction effectif R_e) et pour prévoir les cas, les hospitalisations et les décès. Il est important de noter que le MEEU intègre à la fois les données relatives aux eaux usées et les données traditionnelles basées sur la surveillance clinique. Ces deux types de données, eaux usées et cliniques, peuvent être utilisés soit en combinaison lorsque davantage de renseignements sont nécessaires pour trianguler l'état de la pandémie, soit en remplacement l'un de l'autre lorsque l'une des deux sources de données est manquante ou jugée inexacte. Nous en donnons un exemple dans la section consacrée à l'analyse de la vague Omicron.

Comme le MEEU intègre les données relatives aux eaux usées, il traduit le signal des eaux usées - qui peut être difficile à interpréter d'un point de vue épidémiologique - en mesures pratiques et bien connues pour la santé publique (e.g. la prévalence, R_e). Le manque de données et de compréhension

Figure 3 : Le modèle épidémique des eaux usées est basé sur la modélisation mathématique standard de la propagation des maladies au sein d'une population^a



Abréviations : D, décédé; E, exposition latente; H, hospitalisé; I, infectieux; R, guéri; S, sensible; V, immunisation
^a Nourbakhsh et al. référence (25)

du devenir de l'ARN viral dans les égouts nous a empêchés d'associer, *a priori*, la mesure de la concentration virale au « véritable » niveau de prévalence de l'infection dans la zone desservie par la station d'épuration des eaux usées. Nous avons donc été limités à l'estimation de la prévalence comme si elle avait été rapportée par la surveillance clinique. Cela signifie que nous avons pris en compte les données historiques de la concentration virale dans les eaux usées et de la prévalence clinique rapportée pour calculer leur ratio moyen. Nous avons utilisé ce ratio pour convertir la concentration virale en une estimation des cas « déclarables » dans le MEEU (i.e. cas déclarables = ratio x concentration virale) (25). En d'autres termes, nous n'avons pas essayé d'estimer la fraction déclarante. Bien que cela soit techniquement possible avec le MEEU, nous n'avons pas essayé de prévoir les hospitalisations ou les décès parce que ces données n'étaient pas disponibles au niveau du réseau d'égouts (i.e. au niveau sous-municipal), ce qui nous a empêché d'ajuster les paramètres du modèle associés à l'hospitalisation et à la mortalité. C'est pourquoi nous avons limité nos prévisions aux cas déclarables et au matériel complémentaire. La **figure S1** montre nos estimations pour cinq villes canadiennes.

Nous n'avons pas constaté de différences significatives dans les prévisions produites par le MEEU, que la concentration soit normalisée par PMMoV ou non. Nous avons donc décidé d'utiliser simplement la concentration brute (non normalisée) de SRAS-CoV-2 dans les eaux usées, car la normalisation est



encore un domaine d'étude au LNM. Les prévisions de cas sont des indicateurs clés dans la planification des actions de santé publique car elles prédisent la transmission de la maladie au niveau de la population. Nous avons contrôlé la précision des prévisions à quatre semaines du MEEU en utilisant des scores logarithmiques (35).

Le nombre de reproduction effectif (R_t) est une autre mesure importante qui résume l'état actuel de la dynamique de transmission. Nous présentons les estimations de R_t obtenues à partir du MEEU dans le matériel supplémentaire **figure S2**. Ces indicateurs épidémiologiques de la transmission du virus ont joué un rôle important dans la surveillance nationale de la COVID-19, et la modélisation permet d'incorporer des renseignements provenant de la surveillance à partir des eaux usées afin d'améliorer l'estimation de ces indicateurs.

Rapports de surveillance des eaux usées

La surveillance des eaux usées est effectuée au niveau local — typiquement au niveau d'une municipalité (échantillonnage dans une station d'épuration), d'un quartier (échantillonnage dans une bouche d'égout ou d'une institution (e.g. un hôpital, un campus universitaire). Lorsque des données provenant de plusieurs sites d'échantillonnage sont disponibles, il peut être plus pertinent d'agréger les données afin de fournir un indicateur de tendance pour une zone géographique plus large. Une approche possible pour agréger les concentrations virales dans les eaux usées de différents sites consiste à effectuer une moyenne pondérée par la taille de la population de chaque bassin versant. Bien entendu, les concentrations virales doivent être préalablement standardisées.

Pour étayer ses analyses, l'Agence agrège les échantillons d'eaux usées prélevés dans les stations d'épuration au niveau municipal et national. L'Agence analyse la surveillance à partir des eaux usées à travers le prisme de la modélisation; ainsi, l'agrégation de la moyenne pondérée est effectuée sur les mesures épidémiologiques (e.g. l'incidence prévue, R_t) après avoir ajusté le MEEU aux données de chaque site d'échantillonnage. En d'autres termes, nous n'adaptions pas la méthode MEEU à un signal d'eaux usées agrégé. La surveillance basée sur les eaux usées est présentée en combinaison avec la surveillance clinique et les prévisions de modélisation pour montrer la concentration des eaux usées et les cas à ce jour, ainsi que les prévisions basées sur le modèle MEEU.

Application à l'analyse de la vague Omicron au Canada

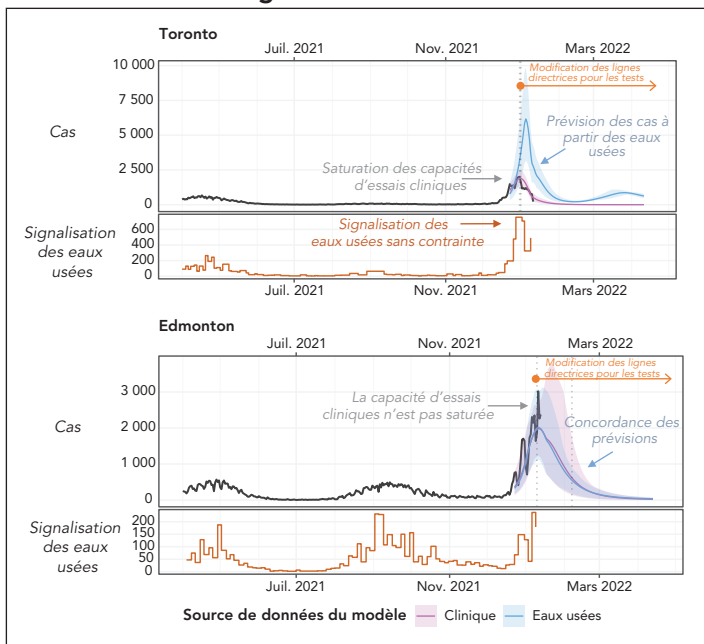
Le variant Omicron du SRAS-CoV-2 a été classé comme variant préoccupant le 26 novembre 2021 (16). En janvier 2022, plus de 90 % des échantillons de SRAS-CoV-2 collectés au Canada ont été identifiés comme étant Omicron (36). Omicron s'est rapidement répandu au Canada, ce qui a entraîné une modification des politiques de dépistage visant à limiter les

tests PCR aux populations à haut risque ou vulnérables dans de nombreux territoires afin de répondre à la demande écrasante. Ce changement a probablement conduit à une sous-estimation de la charge de morbidité par la surveillance clinique. Il est important de noter que les prévisions de cas issues des modèles utilisant les données de cas ne peuvent plus servir d'indicateurs fiables pour contribuer aux politiques de santé publique. En fait, dans les cinq villes analysées avec le MEEU, les charges virales des eaux usées ont augmenté de manière concordante avec les cas cliniques, mais les tendances ont divergé avec la mise en œuvre des restrictions des tests PCR (matériel supplémentaire, figure S1). Alors que les cas cliniques semblent avoir atteint un pic autour de la date de la restriction, les signaux des eaux usées sont restés élevés ou ont continué à augmenter. La discordance entre la surveillance clinique et la surveillance à partir des eaux usées pendant la vague Omicron a souligné l'utilité de la surveillance à partir des eaux usées lorsque les tests cliniques étaient limités (3).

Pour évaluer l'impact de la source de données sur les estimations de cas et les prévisions avec le MEEU en l'absence de tests cliniques fiables, le modèle a été calibré alternativement sur des données cliniques et des données de surveillance à partir des eaux usées. En outre, les paramètres du modèle représentant la proportion d'asymptomatiques et l'efficacité du vaccin, supposés constants pour toutes les vagues avant Omicron, ont été calibrés sur les données propres à Omicron lorsqu'elles sont devenues disponibles (e.g. les premières études sur l'efficacité du vaccin). Une fois ces ajustements effectués, les données de la surveillance à partir des eaux usées, de la surveillance clinique et des prévisions du modèle ont été communiquées avec des interprétations épidémiologiques pour le suivi interne des tendances nationales du SRAS-CoV-2 (figure 1). Le MEEU a fourni des estimations des cas déclarables (i.e. les cas cliniques qui auraient été déclarés sans les restrictions sur les tests PCR) en utilisant uniquement les données sur les eaux usées, en comparaison avec les cas cliniques effectivement déclarés, afin d'évaluer l'ampleur de la sous-déclaration et la probabilité d'avoir dépassé le pic d'incidence de la vague. La **figure 4** montre comment les résultats de la modélisation ont été utilisés dans deux villes différentes pendant la vague Omicron. Dans cet exemple, la méthode de MEEU a été ajustée aux données cliniques ou aux données sur les eaux usées de Toronto (la plus grande ville du Canada) et d'Edmonton (une ville de taille moyenne). Le modèle suggère que la sous-déclaration des cas était plus prononcée dans le premier cas que dans le second. Cette analyse de modélisation de la vague Omicron, ainsi que les estimations pour cinq villes sur une période plus longue présentées dans le matériel supplémentaire, figure S1, ont mis en évidence les limites de la surveillance clinique, en particulier après la modification des directives relatives aux tests PCR. La comparaison des cas estimés à partir de la surveillance clinique et de la surveillance à partir des eaux usées a mis en évidence la sous-déclaration des cas. En outre, la surveillance à partir des eaux usées a complété les renseignements issus

de la surveillance clinique, notamment en ce qui concerne le moment du pic et les tendances à la hausse ou à la baisse. Dans l'ensemble, la vague Omicron au Canada a permis d'apprécier l'utilité de la surveillance à partir des eaux usées en tant qu'approche alternative pour surveiller la transmission du SRAS-CoV-2 lorsque la surveillance clinique était débordée et peinait à fournir des données de haute qualité sur les tendances de la prévalence de la maladie.

Figure 4 : Exemple d'interprétation de la sortie du modèle lors de la vague Omicron



Discussion

Limites de la surveillance des eaux usées au Canada

Actuellement, la modélisation basée sur les eaux usées se concentre sur cinq grandes villes du Canada. Bien que la zone de couverture combinée de la surveillance à partir des eaux usées pour ces cinq villes représente environ 23 % de la population canadienne (37), elle ne peut fournir une vue d'ensemble des tendances du SRAS-CoV-2 en raison de l'étendue limitée de la surveillance. On ne sait pas exactement quelle proportion minimale de la population devrait être surveillée par la surveillance à partir des eaux usées pour fournir une estimation fiable de la prévalence nationale. La surveillance des grandes villes peut constituer un bon point de départ pour évaluer l'intensité de la transmission à l'échelle nationale, car c'est probablement là que se produit la majeure partie de la transmission. Bien que l'extension de l'enquête canadienne sur les eaux usées puisse accroître la couverture de l'enquête sur les eaux usées, plusieurs défis sont à prévoir compte tenu de la géographie et de la répartition de la population au Canada.

Tout d'abord, dans les petites collectivités ou les collectivités isolées, les méthodes d'échantillonnage devront être différentes, comme la collecte d'échantillons dans une fosse septique, un regard ou une lagune, en raison de l'absence de stations d'épuration dans ces régions. Bien que des recherches antérieures aient démontré que l'échantillonnage dans les regards n'entraînait pas de dégradation significative de l'ARN (38), il représente un défi logistique. En outre, notre cadre de modélisation actuel (le MEEU) n'est pas adapté à l'analyse des petites populations, principalement parce que le MEEU n'est pas un modèle stochastique.

Bien qu'il s'agisse encore d'un domaine de recherche actif, il est essentiel de tenir compte des incertitudes liées au signal viral dans les eaux usées, telles que la dynamique de l'excrétion fécale et la désintégration de l'ARN dans les égouts. Étant donné que le signal viral est censé être utilisé pour informer la santé publique, la normalisation peut améliorer sa précision dans l'estimation de la prévalence des infections. L'incertitude quant à l'efficacité des techniques de normalisation, à l'Agence/LNM mais aussi pour de nombreux autres groupes, est actuellement une limitation qui entrave l'interprétation de la surveillance à partir des eaux usées et un domaine de recherche active.

Au-delà de la COVID-19

La mise en œuvre de la surveillance à partir des eaux usées en tant qu'outil de surveillance de routine a des implications plus larges que la COVID-19. La surveillance basée sur les eaux usées peut également être utilisée pour contrôler les pathogènes respiratoires autres que le SRAS-CoV-2 (y compris les virus de la grippe, le virus respiratoire syncytial), les infections transmissibles sexuellement, la résistance aux antibiotiques et l'utilisation des antibiotiques dans la collectivité (39,40). Il est important de noter que la recherche active avec la surveillance à partir des eaux usées pendant la pandémie de COVID-19 a permis de mieux comprendre les facteurs internes aux égouts, les facteurs environnementaux et la dynamique de la population qui affectent la surveillance à partir des eaux usées et de développer une modélisation mathématique pour estimer la prévalence du risque sanitaire au sein de la population et ses prévisions futures. Cependant, nous notons que pour tout agent pathogène étudié dans les eaux usées, il est essentiel de comprendre sa dynamique d'excrétion fécale et sa décomposition dans les égouts afin d'améliorer les estimations de la prévalence de l'infection dans la collectivité à partir de la concentration virale mesurée dans les eaux usées. Malheureusement, ces études cliniques sont rares, même pour le SRAS-CoV-2. Si l'extension de la surveillance à partir des eaux usées à d'autres pathologies nécessite la mise au point de nouveaux tests de laboratoire, le cadre et les connaissances actuels de la surveillance à partir des eaux usées et de la modélisation avec le MEEU constitueront une base solide pour faciliter la surveillance d'autres agents pathogènes infectieux.



Prochaines étapes

Bien que le cadre présent constitue une filière complète pour le champ d'application actuel des surveillances à partir des eaux usées nationales, des modifications et des améliorations peuvent être apportées pour répondre à la nature dynamique de la pandémie de COVID-19. Une étape cruciale dans le développement de la surveillance à partir des eaux usées consiste à normaliser les données de surveillance, y compris les paramètres de mesure et le stockage, dans de nombreux laboratoires. Le modèle de données ouvertes pour la surveillance environnementale en santé publique (41) est une initiative visant à développer une structure de données ouvertes, y compris des métadonnées et un vocabulaire, pour soutenir la surveillance environnementale telle que la surveillance à partir des eaux usées. L'Agence est en train d'intégrer la surveillance nationale des eaux usées dans le modèle de données ouvertes de la surveillance environnementale de la santé publique afin d'accroître sa capacité à surveiller de multiples pathogènes et emplacements géographiques pour la surveillance à partir des eaux usées, facilitant ainsi l'extensibilité de l'analyse des données, grâce à sa structure de données normalisée. Outre l'intégration de données provenant de programmes de surveillance à partir des eaux usées simultanés, la surveillance à partir des eaux usées a le potentiel de s'étendre à un plus grand nombre de lieux géographiques avec des environnements divers, tels que des collectivités éloignées ou de petites tailles. Cependant, les collectivités isolées posent des problèmes particuliers, car elles ne disposent souvent pas de station d'épuration et nécessitent d'autres méthodes d'échantillonnage pour la surveillance à partir des eaux usées. Par conséquent, le cadre peut également être élargi pour intégrer les processus d'analyse des données provenant de ces différentes sources d'échantillons afin de normaliser les analyses. Enfin, la surveillance à partir des eaux usées peut servir d'indicateur des variantes émergentes préoccupantes grâce au séquençage du génome du SRAS-CoV-2. Bien que ce travail soit actuellement mené au LNM, les interprétations épidémiologiques des résultats ne sont pas encore incorporées dans la surveillance à partir des eaux usées décrite ici.

Conclusion

Bien que la surveillance à partir des eaux usées ait déjà été utilisée pour contribuer aux réponses de la santé publique pour d'autres risques sanitaires, la pandémie de COVID-19 a stimulé l'expansion de la surveillance à partir des eaux usées à une échelle sans précédent. Comme l'a démontré la vague Omicron, la surveillance de la COVID-19 à partir des eaux usées peut avoir des implications politiques de santé publique importantes, en particulier lorsque les méthodes traditionnelles de surveillance épidémiologique sont réduites. Le cadre présent décrit la première surveillance nationale à partir des eaux usées de COVID-19 au Canada. En particulier, l'utilisation de la modélisation mathématique est un outil essentiel pour interpréter la surveillance à partir des eaux usées, car elle traduit les concentrations d'eaux usées en prévalence, ce qui facilite

l'interprétation dans le cadre de la santé publique. Bien que la surveillance à partir des eaux usées pour la COVID-19 fournisse des renseignements uniques sur la propagation communautaire du SRAS-CoV-2, il reste de nombreuses incertitudes et incohérences à résoudre dans les données de la surveillance à partir des eaux usées. La mise en place de ce cadre permettra de poursuivre l'expansion et le développement du programme de surveillance à partir des eaux usées, y compris la surveillance d'autres zones géographiques et d'autres agents pathogènes.

Déclaration des auteurs

M. J. J. — Rédaction de la version originale, analyse des données, révision et édition, approbation finale
C. S. M. — Acquisition des données, analyse des données, révision et édition, approbation finale
E. M. M. — Acquisition des données, rédaction de la version originale des documents supplémentaires, analyse des données, révision et édition, approbation finale
A. Nagasawa — Acquisition des données, analyse des données, révision et édition, approbation finale
A. Nichani — Acquisition des données, révision et édition, approbation finale
C. P. I. — Acquisition des données, analyse des données, révision et édition, approbation finale
S. W. P. — Acquisition des données, rédaction de la version originale des documents supplémentaires, analyse des données, révision et édition, approbation finale
D. C. — Rédaction de la version originale, rédaction de la version originale des documents supplémentaires, analyse des données, révision et édition, approbation finale

Les ensembles de données obtenus et/ou analysés au cours de la présente étude sont disponibles auprès de l'auteur correspondant sur demande raisonnable.

Intérêts concurrents

Aucun.

Financement

Aucun.

Matériel supplémentaire

Ces documents sont accessibles dans le fichier « [Matériel supplémentaire](#) ».

Références

1. Hovi T, Shulman LM, van der Avoort H, Deshpande J, Roivainen M, DE Gourville EM. Role of environmental poliovirus surveillance in global polio eradication and beyond. *Epidemiol Infect* 2012;140(1):1–13. [DOI PubMed](#)



2. Qiu Y, Lee BE, Neumann N, Ashbolt N, Craik S, Maal-Bared R, Pang XL. Assessment of human virus removal during municipal wastewater treatment in Edmonton, Canada. *J Appl Microbiol* 2015;119(6):1729–39. [DOI PubMed](#)
3. Statistique Canada. Enquête canadienne sur les eaux usées, décembre 2021 à janvier 2022. Ottawa, ON : StatCan; 2022. [Consulté le 20 avril 2022]. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/220218/dq220218d-fra.htm>
4. Yargeau V, Taylor B, Li H, Rodayan A, Metcalfe CD. Analysis of drugs of abuse in wastewater from two Canadian cities. *Sci Total Environ* 2014;487:722–30. [DOI PubMed](#)
5. Qiu Y, Li Q, Lee BE, Ruecker NJ, Neumann NF, Ashbolt NJ, Pang X. UV inactivation of human infectious viruses at two full-scale wastewater treatment plants in Canada. *Water Res* 2018;147:73–81. [DOI PubMed](#)
6. Webb AL, Taboada EN, Selinger LB, Boras VF, Inglis GD. Prevalence and diversity of waterborne *Arcobacter butzleri* in southwestern Alberta, Canada. *Can J Microbiol* 2017;63(4):330–40. [DOI PubMed](#)
7. Naughton CC, Roman FA, Alvarado AGF, Tariqi A, Deeming MA, Kadonsky KF, Bibby K, Bivins A, Medema G, Ahmed W, Katsivelis P, Allan V, Sinclair R, Rose JB. Show us the data: global COVID-19 wastewater monitoring efforts, equity, and gaps. *FEMS Microbes* 2023;4:xtad003. [DOI](#)
8. Hilborne LH, Wagner Z, Cabrerós I, Brook RH. Linking Statistics With Testing Policy to Manage COVID-19 in the Community. *Am J Clin Pathol* 2020;154(2):142–8. [DOI PubMed](#)
9. Miura F, Kitajima M, Omori R. Duration of SARS-CoV-2 viral shedding in faeces as a parameter for wastewater-based epidemiology: re-analysis of patient data using a shedding dynamics model. *Sci Total Environ* 2021;769:144549. [DOI PubMed](#)
10. Sangkham S. A review on detection of SARS-CoV-2 RNA in wastewater in light of the current knowledge of treatment process for removal of viral fragments. *J Environ Manage* 2021;299:113563. [DOI PubMed](#)
11. Shah S, Gwee SX, Ng JQ, Lau N, Koh J, Pang J. Wastewater surveillance to infer COVID-19 transmission: A systematic review. *Sci Total Environ* 2022;804:150060. [DOI PubMed](#)
12. Akingbola S, Fernandes R, Borden S, Gilbride K, Oswald C, Straus S, Tehrani A, Thomas J, Stuart R. Early identification of a COVID-19 outbreak detected by wastewater surveillance at a large homeless shelter in Toronto, Ontario. *Can J Public Health* 2023;114(1):72–9. [DOI PubMed](#)
13. Izquierdo-Lara RW, Heijnen L, Oude Munnink BB, Schapendonk CM, Elsinga G, Langeveld J, Post J, Prasad DK, Carrizosa C, Been F, van Beek J, Schilperoort R, Vriend R, Fanoy E, de Schepper EI, Sikkema RS, Molenkamp R, Aarestrup FM, Medema G, Koopmans MP, de Graaf M. Rise and fall of SARS-CoV-2 variants in Rotterdam: comparison of wastewater and clinical surveillance. *Sci Total Environ* 2023;873:162209. [DOI PubMed](#)
14. Pang X, Gao T, Ellehoj E, Li Q, Qiu Y, Maal-Bared R, Sikora C, Tipples G, Diggle M, Hinshaw D, Ashbolt NJ, Talbot J, Hrudéy SE, Lee BE. Wastewater-Based Surveillance Is an Effective Tool for Trending COVID-19 Prevalence in Communities: A Study of 10 Major Communities for 17 Months in Alberta. *ACS ES T Water* 2022;2(11):2243–54. [DOI PubMed](#)
15. Li Q, Lee BE, Gao T, Qiu Y, Ellehoj E, Yu J, Diggle M, Tipples G, Maal-Bared R, Hinshaw D, Sikora C, Ashbolt NJ, Talbot J, Hrudéy SE, Pang X. Number of COVID-19 cases required in a population to detect SARS-CoV-2 RNA in wastewater in the province of Alberta, Canada: sensitivity assessment. *J Environ Sci (China)* 2023;125:843–50. [DOI PubMed](#)
16. World Health Organization. Classification of Omicron (B.1.1.529): SARS-CoV-2 Variant of Concern. Geneva (CH): WHO; 2021. [Consulté le 20 avril 2022]. [https://www.who.int/news/item/26-11-2021-classification-of-omicron-\(b.1.1.529\)-sars-cov-2-variant-of-concern](https://www.who.int/news/item/26-11-2021-classification-of-omicron-(b.1.1.529)-sars-cov-2-variant-of-concern)
17. Khandia R, Singhal S, Alqahtani T, Kamal MA, El-Shall NA, Nainu F, Desingu PA, Dhama K. Emergence of SARS-CoV-2 Omicron (B.1.1.529) variant, salient features, high global health concerns and strategies to counter it amid ongoing COVID-19 pandemic. *Environ Res* 2022;209:112816. [DOI PubMed](#)
18. Santé Publique Ontario. Sous-déclaration du nombre de cas de COVID-19 dans le contexte du variant Omicron. Toronto, ON : SPO; 2021. [Consulté le 20 avril 2022]. <https://www.publichealthontario.ca/fr/about/news/2021/underreporting-of-covid-19-case-counts-in-the-context-of-the-omicron-variant>
19. Kitajima M, Ahmed W, Bibby K, Carducci A, Gerba CP, Hamilton KA, Haramoto E, Rose JB. SARS-CoV-2 in wastewater: state of the knowledge and research needs. *Sci Total Environ* 2020;739:139076. [DOI PubMed](#)



20. Wu F, Xiao A, Zhang J, Moniz K, Endo N, Armas F, Bonneau R, Brown MA, Bushman M, Chai PR, Duvall C, Erickson TB, Foppe K, Ghaeli N, Gu X, Hanage WP, Huang KH, Lee WL, Matus M, McElroy KA, Nagler J, Rhode SF, Santillana M, Tucker JA, Wuertz S, Zhao S, Thompson J, Alm EJ. SARS-CoV-2 RNA concentrations in wastewater foreshadow dynamics and clinical presentation of new COVID-19 cases. *Sci Total Environ* 2022;805:150121. [DOI PubMed](#)
21. Wade MJ, Lo Jacomo A, Armenise E, Brown MR, Bunce JT, Cameron GJ, Fang Z, Farkas K, Gilpin DF, Graham DW, Grimsley JM, Hart A, Hoffmann T, Jackson KJ, Jones DL, Lilley CJ, McGrath JW, McKinley JM, McSparron C, Nejad BF, Morvan M, Quintela-Baluja M, Roberts AM, Singer AC, Souque C, Speight VL, Sweetapple C, Walker D, Watts G, Weightman A, Kasprzyk-Hordern B. Understanding and managing uncertainty and variability for wastewater monitoring beyond the pandemic: lessons learned from the United Kingdom national COVID-19 surveillance programmes. *J Hazard Mater* 2022;424 Pt B:127456. [DOI PubMed](#)
22. McCall C, Fang ZN, Li D, Czubai AJ, Juan A, LaTurner Z, Ensor K, Hopkins L, Bedient P, Stadler LB. Modeling SARS-CoV-2 RNA Degradation in Small and Large Sewersheds. *Environ Sci Water Res Technol* 2022;8:290–300. [DOI](#)
23. Bertels X, Demeyer P, Van den Bogaert S, Boogaerts T, van Nuijs AL, Delputte P, Lahousse L. Factors influencing SARS-CoV-2 RNA concentrations in wastewater up to the sampling stage: A systematic review. *Sci Total Environ* 2022;820:153290. [DOI PubMed](#)
24. Smith T, Holm RH, Yeager R, Moore JB 4th, Rouchka EC, Sokoloski KJ, Elliott EM, Talley D, Arora V, Moyer S, Bhatnagar A. Combining Community Wastewater Genomic Surveillance with State Clinical Surveillance: A Framework for SARS-CoV-2 Public Health Practice. *Food Environ Virol* 2022;14(4):410–6. [DOI PubMed](#)
25. Nourbakhsh S, Fazil A, Li M, Mangat CS, Peterson SW, Daigle J, Langner S, Shurgold J, D'Aoust P, Delatolla R, Mercier E, Pang X, Lee BE, Stuart R, Wijayasri S, Champredon D. A wastewater-based epidemic model for SARS-CoV-2 with application to three Canadian cities. *Epidemics* 2022;39:100560. [DOI PubMed](#)
26. Li B, Di DY, Saingam P, Jeon MK, Yan T. Fine-Scale Temporal Dynamics of SARS-CoV-2 RNA Abundance in Wastewater during A COVID-19 Lockdown. *Water Res* 2021;197:117093. [DOI PubMed](#)
27. Palmer EJ, Maestre JP, Jarma D, Lu A, Willmann E, Kinney KA, Kirisits MJ. Development of a reproducible method for monitoring SARS-CoV-2 in wastewater. *Sci Total Environ* 2021;799:149405. [DOI PubMed](#)
28. Kim S, Kennedy LC, Wolfe MK, Criddle CS, Duong DH, Topol A, White BJ, Kantor RS, Nelson KL, Steele JA, Langlois K, Griffith JF, Zimmer-Faust AG, McLellan SL, Schussman MK, Ammerman M, Wigginton KR, Bakker KM, Boehm AB. SARS-CoV-2 RNA is enriched by orders of magnitude in primary settled solids relative to liquid wastewater at publicly owned treatment works. *Environ Sci (Camb)* 2022;8(4):757–70. [DOI PubMed](#)
29. Lazuka A, Arnal C, Soyeux E, Sampson M, Lepeuple AS, Deleuze Y, Pouradier Duteil S, Lacroix S. COVID-19 wastewater based epidemiology: long-term monitoring of 10 WWTP in France reveals the importance of the sampling context. *Water Sci Technol* 2021;84(8):1997–2013. [DOI PubMed](#)
30. Statistique Canada. L'analyse des eaux usées laisse croire que la consommation de fentanyl, de cannabis et de méthamphétamine a augmenté au début de la pandémie. Ottawa, ON : StatCan; 2021. [Consulté le 20 avril 2022]. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/210726/dq210726a-fra.htm>
31. Tiwari A, Lipponen A, Hokajärvi AM, Luomala O, Sarekoski A, Rytönen A, Österlund P, Al-Hello H, Juutinen A, Miettinen IT, Savolainen-Kopra C, Pitkänen T. Detection and quantification of SARS-CoV-2 RNA in wastewater influent in relation to reported COVID-19 incidence in Finland. *Water Res* 2022;215:118220. [DOI PubMed](#)
32. Ai Y, Davis A, Jones D, Lemeshow S, Tu H, He F, Ru P, Pan X, Bohrerova Z, Lee J. Wastewater SARS-CoV-2 monitoring as a community-level COVID-19 trend tracker and variants in Ohio, United States. *Sci Total Environ* 2021;801:149757. [DOI PubMed](#)
33. Nagarkar M, Keely SP, Jahne M, Wheaton E, Hart C, Smith B, Garland J, Varughese EA, Braam A, Wiechman B, Morris B, Brinkman NE. SARS-CoV-2 monitoring at three sewersheds of different scales and complexity demonstrates distinctive relationships between wastewater measurements and COVID-19 case data. *Sci Total Environ* 2022;816:151534. [DOI PubMed](#)
34. Wastewater Epidemic Model. [Consulté le 20 avril 2022]. <https://github.com/phac-nml-phrsd/wem>
35. Gneiting T, Balabdaoui F, Raftery AE. Probabilistic forecasts, calibration and sharpness. *J R Stat.* 2007;69(2):247–68. [DOI](#)



- 36. Santé Publique Ontario. Variant préoccupant Omicron de la COVID-19 (B.1.1.529) : Évaluation du risque, 26 janvier 2022. Toronto, ON : SPO; 2022. https://www.publichealthontario.ca/-/media/documents/ncov/voc/2022/01/covid-19-omicron-b11529-risk-assessment-jan-26.pdf?sc_lang=fr
- 37. Statistique Canada. Profil du recensement, Recensement de la population de 2021. Ottawa, ON : StatCan; 2023. [Consulté le 20 avril 2022]. <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2021/dp-pd/prof/index.cfm?Lang=F>
- 38. Yeager R, Holm RH, Saurabh K, Fuqua JL, Talley D, Bhatnagar A, Smith T. Wastewater Sample Site Selection to Estimate Geographically Resolved Community Prevalence of COVID-19: A Sampling Protocol Perspective. *Geohealth* 2021;5(7):GH000420. DOI PubMed
- 39. Zhang Y, Duan L, Wang B, Du Y, Cagnetta G, Huang J, Blaney L, Yu G. Wastewater-based epidemiology in Beijing, China: prevalence of antibiotic use in flu season and association of pharmaceuticals and personal care products with socioeconomic characteristics. *Environ Int* 2019;125:152–60. DOI PubMed
- 40. Heijnen L, Medema G. Surveillance of influenza A and the pandemic influenza A (H1N1) 2009 in sewage and surface water in the Netherlands. *J Water Health* 2011;9(3):434–42. DOI PubMed
- 41. The Public Health Environmental Surveillance Open Data Model. [Consulté le 9 mars 2023]. <https://github.com/Big-Life-Lab/PHES-ODM>

Voulez-vous devenir pair examinateur?

Communiquez avec l'équipe de rédaction du RMTC : phac.ccdr-rmtc.aspc@canada.ca