

Les gaz à
effet de serre



Les différentes techniques de mesure des émissions de gaz à effet de serre des réservoirs

Les gaz à effet de serre (GES) ont une incidence majeure sur le climat. Plusieurs gaz peuvent contribuer au réchauffement atmosphérique, dont le dioxyde de carbone (CO_2) et le méthane (CH_4). Ces gaz ne sont pas seulement issus de l'activité humaine, ils font partie de la dynamique normale des écosystèmes.

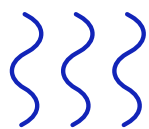


Les réservoirs émettent temporairement plus de GES que les milieux naturels qu'ils remplacent. Il est donc important de mesurer leurs émissions pour évaluer l'impact de la production hydroélectrique sur l'environnement. Dans ce contexte, plusieurs techniques sont utilisées afin de mesurer les GES à la surface des réservoirs, en centrales et en aval des ouvrages hydroélectriques. Combinées, ces techniques permettent de mieux estimer les émissions globales des réservoirs, et donc l'empreinte carbone de notre électricité.



À chaque type d'émissions ses techniques de mesure

Comme dans les plans d'eau naturels, les GES peuvent être émis par diffusion et par bullage dans les réservoirs hydroélectriques. La production de GES est due à la décomposition de la végétation enoyée, qui produit temporairement plus d'émissions qu'un milieu naturel. Le dégazage en aval des centrales s'ajoute également au bilan des émissions. Chacune des méthodes de mesure présente des avantages et, lorsque combinées, elles permettent de brosser un portrait représentatif des émissions des réservoirs (Tremblay et coll., 2005).



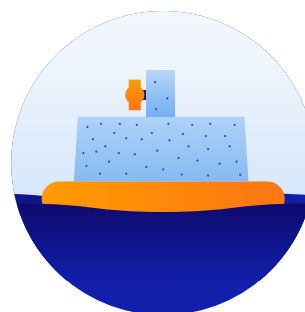
La diffusion

La diffusion à la surface d'un écosystème aquatique est un processus au cours duquel les gaz dans l'eau quittent le milieu vers l'atmosphère. Les concentrations plus élevées dans l'eau s'équilibrent avec celles dans l'atmosphère, plus faibles.

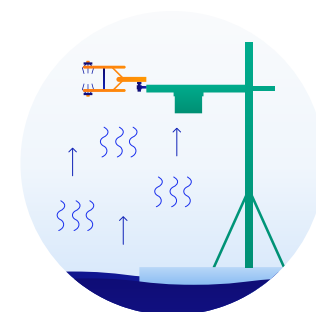
On peut mesurer la diffusion de trois façons différentes :



Mesure indirecte par l'extraction des gaz dissous par la technique d'espace de tête ou par système automatisé



Mesure directe par chambre flottante déposée sur le plan d'eau



Mesure directe par des équipements installés sur un quai flottant

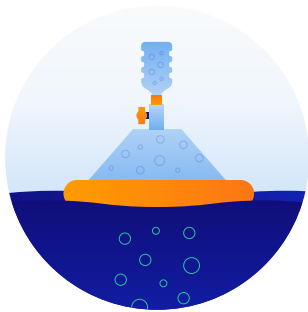




Le bullage

Le bullage est principalement dû à l'accumulation de CH_4 dans les sédiments après la dégradation anaérobie de la matière organique, c'est-à-dire sans oxygène. Ce phénomène survient le plus souvent dans les parties peu profondes des plans d'eau, où la pression hydrostatique relativement faible permet aux bulles de s'échapper vers la surface.

Bien que difficile à mesurer, car peu prévisible, le bullage se quantifie principalement par la méthode suivante :



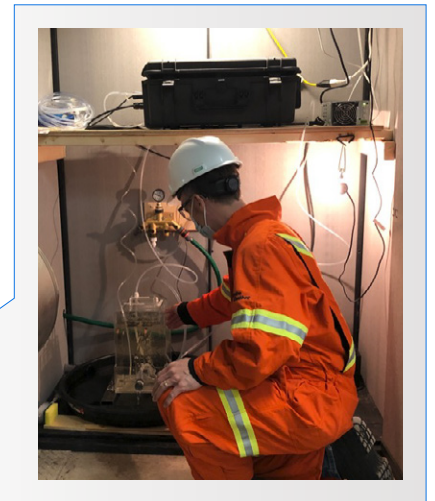
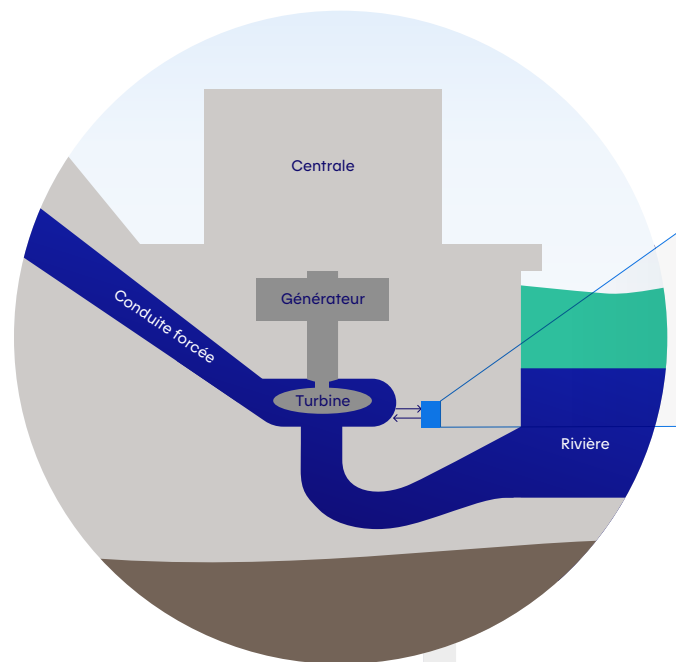
Le captage de bulles par entonnoirs inversés



Le dégazage en aval

Les émissions par dégazage en aval d'une centrale sont causées, d'une part, par l'écart de pression à l'entrée et à la sortie des turbines et, d'autre part, par la turbulence des eaux en aval, qui force une équilibration de l'eau et de l'atmosphère, comme dans les rapides des rivières.

On peut les estimer en continu :



Les systèmes automatisés de mesure installés directement en centrale



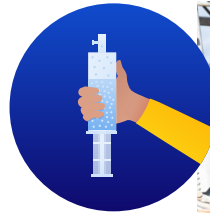
Mesures indirectes des émissions par diffusion



Pour évaluer la quantité de GES qu'émettent les réservoirs par diffusion, on peut mesurer la concentration de ces gaz dans l'eau. Comme il est relativement difficile de prendre ce genre de mesures directement dans l'eau, des méthodes indirectes sont utilisées. Grâce aux informations obtenues, on peut ensuite estimer la quantité émise en utilisant des équations basées sur des principes physiques et chimiques.

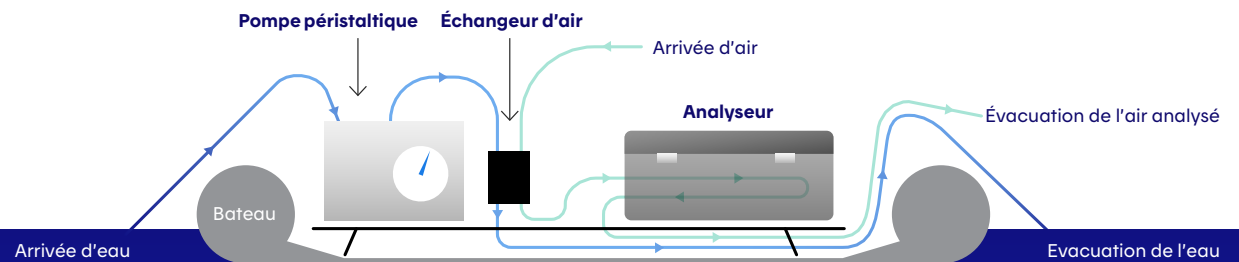
Par espace de tête

Un échantillon d'eau à analyser est récolté dans un flacon de type seringue, auquel on ajoute une certaine quantité de gaz inerte. De cette façon, un espace est créé entre le haut du flacon et l'eau. Il est alors nécessaire d'agiter le récipient pendant quelques minutes pour accélérer l'équilibre de la concentration de gaz entre l'eau et le gaz inerte. Une fois l'équilibre des phases atteint, on mesure la concentration dans la portion de gaz inerte, qui correspond à celle de l'échantillon d'eau (Kolb et Ettre, 2006).



Par système automatisé

L'eau échantillonnée est pompée en surface vers un extracteur qui sépare les gaz dissous dans l'eau. Ces gaz sont ensuite analysés par un système automatisé qui mesure en direct la concentration des différents gaz contenus dans l'échantillon (CO_2 , CH_4 et oxygène) au moyen de sondes installées dans son circuit, où l'air circule en continu. Avec un tel système, le temps requis pour obtenir la concentration de gaz est d'environ 10 minutes (Demarty et Tremblay, 2017 ; Deblois et coll., 2023 ; Demarty et coll., 2024).



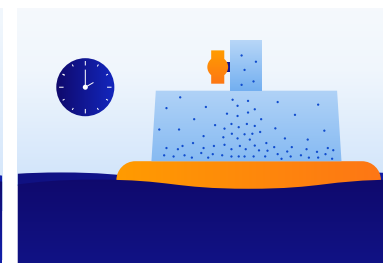
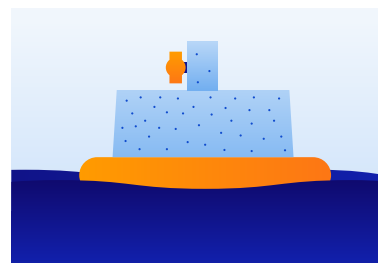
Mesures directes des émissions par diffusion



La deuxième catégorie de techniques d'évaluation de la quantité de GES émis par diffusion repose sur la mesure des flux directement à la surface des réservoirs.

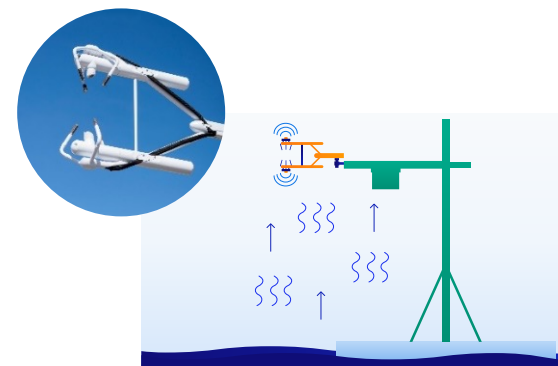
Flux directs par chambre flottante

Une première méthode consiste à utiliser une chambre flottante déposée temporairement sur l'eau du réservoir. Comme la concentration de gaz est plus grande dans l'eau du réservoir que dans l'air, une augmentation de la concentration de gaz à l'intérieur de la chambre est observée en l'espace de 10 à 20 minutes. Les émissions peuvent être analysées en temps réel sur le terrain, grâce à l'analyseur de GES qui est relié à la chambre (Duc et coll., 2013).



Flux directs par turbulence avec instruments à haute fréquence

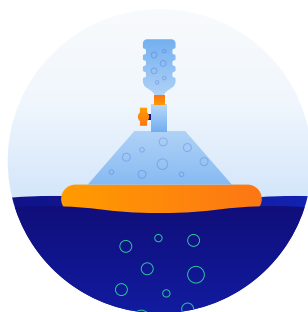
La méthode utilisant les turbulences permet de mesurer les mouvements d'air qui transportent les GES de la surface du réservoir vers l'atmosphère. Les instruments à haute fréquence utilisés permettent de mesurer le déplacement et la concentration de GES à une fréquence de 0,1 seconde. Ces instruments sont installés sur des tours en bordure des réservoirs ou sur un quai flottant (Burba et coll., 2013). Il est important de noter que cette méthode de mesure intègre également les flux par bullage, sans les distinguer de la diffusion.



Mesures directes des émissions par bullage



Pour évaluer la quantité de GES qu'émettent les réservoirs par bullage, on utilise des entonnoirs inversés qui récoltent les bulles s'échappant de l'eau en provenance des sédiments (Peifer Bezerra et coll., 2020).



Entonnoirs inversés

Les entonnoirs inversés de dernière génération sont directement connectés à un analyseur. Celui-ci permet de calculer le volume de bulles accumulé pendant une période donnée ainsi que la concentration de gaz dans les bulles. Ces dernières sont principalement composées de CH_4 en raison d'une dégradation anaérobie de la matière organique. Grâce au dispositif entonnoir-analyseur, les mesures qui s'effectuaient auparavant uniquement en laboratoire peuvent maintenant aussi être réalisées directement sur le terrain.

Comme il est difficile de prévoir l'endroit exact de formation des bulles, il existe plusieurs protocoles expérimentaux pour tenter d'en obtenir une estimation fiable. Une bonne répartition des entonnoirs à la surface des réservoirs est primordiale, en tenant compte de la présence de baies et du type de végétation envasée. L'installation d'entonnoirs en série alignés perpendiculairement à la rive permet également d'estimer l'intensité des émissions par bullage selon la profondeur du plan d'eau.

Les mesures du bullage représentent un champ de recherche important en raison de leur complexité et du volume de ce flux d'émissions. C'est particulièrement le cas pour les réservoirs dont les niveaux varient constamment en fonction de leur exploitation.



Mesures directes des émissions par dégazage



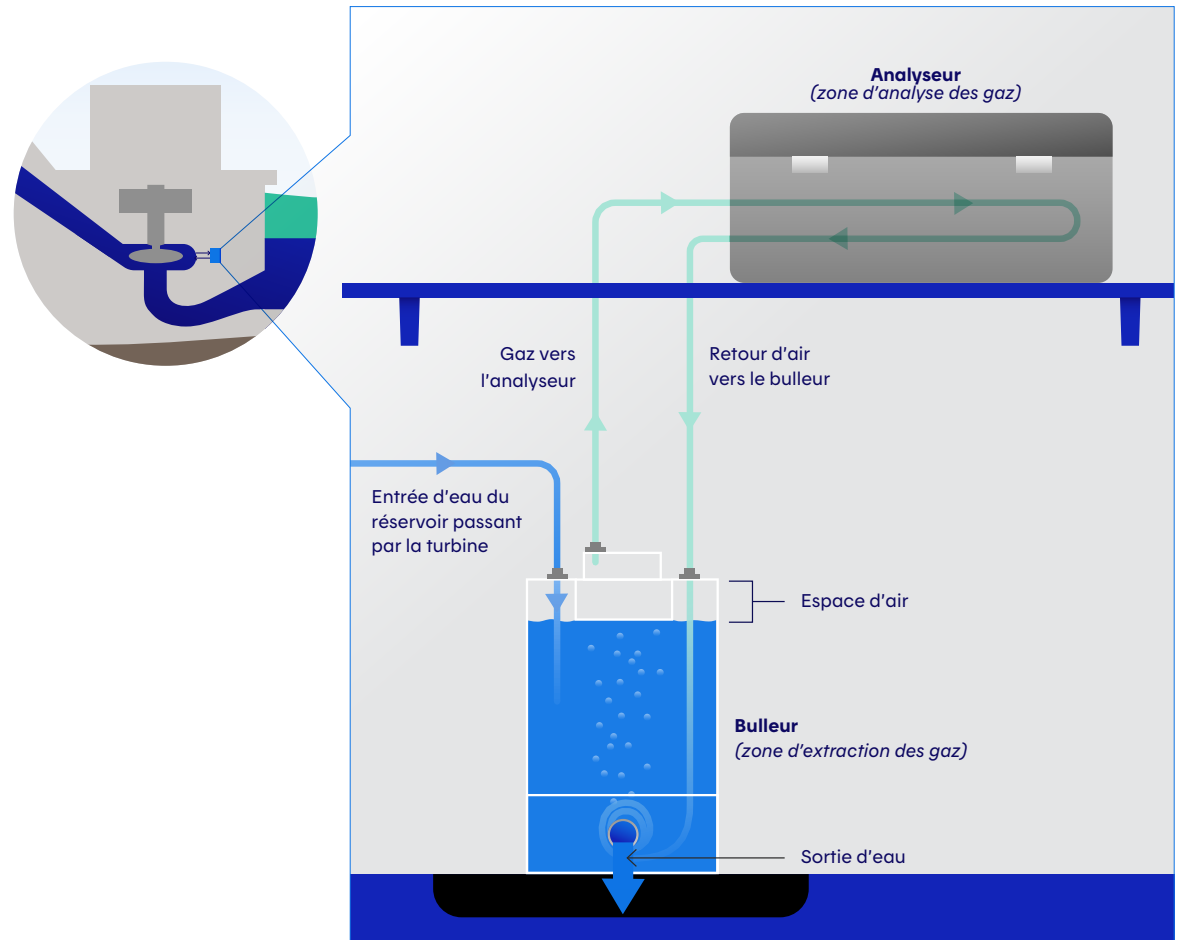
Certaines installations d'Hydro-Québec sont également dotées d'un système automatisé de mesure de la concentration de CO₂ et de CH₄ dans l'eau turbinée.

Système automatisé de mesure

En centrale, le système est installé dans une armoire aménagée à cet effet et est alimenté en énergie en tout temps, même en cas d'interruption majeure de courant, par une batterie constamment rechargée. Le bulleur est installé au bas du dispositif (zone d'extraction des gaz) et permet d'extraire les gaz de l'eau, qui sont ensuite acheminés vers l'analyseur se trouvant dans un petit caisson dans le haut du dispositif (zone d'analyse des gaz) (Deblois et coll., 2021).

En connaissant la concentration des gaz dans l'air en aval de la centrale et le débit total annuel de chaque centrale, on peut alors estimer la quantité d'émissions de GES générée par dégazage.

Alors que les mesures sur le terrain peuvent difficilement être prises en hiver, ce type d'instrument permet aussi d'obtenir des mesures à la seconde, et ce, durant toute l'année, en plus d'approfondir nos connaissances.



Une variété de méthodes de mesure au profit de notre hydroélectricité

Que ce soit en bateau, en hydravion, sur la rive, sur un quai flottant ou directement dans les centrales hydroélectriques, Hydro-Québec met tout en œuvre pour suivre et documenter méthodiquement les émissions de GES des réservoirs.

Cette variété de méthodes de mesure permet d'obtenir un portrait complet et précis des impacts environnementaux des installations.

Grâce à cet éventail de mesures, Hydro-Québec peut affirmer, preuves à l'appui, que l'hydroélectricité québécoise est une énergie à faible empreinte carbone.



Photos

Couverture : Vue aérienne du barrage et de l'évacuateur de crue de la centrale Romaine-2

Page 2 : Suivi environnemental du projet de la Romaine : tour Eddy sur quai flottant sur le réservoir de la Romaine-2

Page 9 : Vue aérienne du barrage Daniel-Johnson et des centrales Manic-5 et Manic-5-PA

Références

- Burba, G., R. Madsen et K. Feese. 2013. « Eddy Covariance Method for CO₂ Emission Measurements in CCUS Applications: Principles, Instrumentation and Software ». *Energy Procedia*, vol. 40, pp. 329-336. doi.org/10.1016/j.egypro.2013.08.038.
- Deblois, C., M. Demarty et A. Tremblay. 2021. « Système automatisé de mesure de gaz à effet de serre (SAGES) », Hydro-Québec, Centre de documentation Environnement et collectivités, HQ-2020-042.
- Deblois, C. P., M. Demarty, F. Bilodeau et A. Tremblay. 2023. « Automated CO₂ and CH₄ Monitoring System for Continuous Estimation of Degassing Related to Hydropower ». *Frontiers in Environmental Science*, vol. 11. doi.org/10.3389/fenvs.2023.1194994.
- Demarty, M. et A. Tremblay. 2017. « Long-Term Follow-Up of pCO₂, pCH₄ and Emissions from Eastmain 1 Boreal Reservoir, and the Rupert Diversion Bays, Canada ». *Ecohydrology & Hydrobiology*, vol. 19, pp. 529-540. doi.org/10.1016/j.ecohyd.2017.09.001.
- Demarty, M., C. P. Deblois, P. Lafrance, F. Bilodeau et A. Tremblay. 2024. « Aménagements hydroélectriques du secteur ouest de la Baie-James – Mesure des émissions de gaz à effet de serre en milieux aquatiques – Réservoirs et milieux naturels – Résultats 2022 ». Préparé pour Hydro-Québec. 56 p. et annexes.
- Duc, N. T., S. Silverstein, L. Lundmark, H. Reyier, P. Crill et D. Bastviken. 2013. « Automated Flux Chamber for Investigating Gas Flux at Water–Air Interfaces ». *Environmental Science & Technology*, vol. 47, no 2, pp. 968-975. doi.org/10.1021/es303848x.
- Kolb, B. et L. S. Ettre. 2006. « Theoretical Background of HS-GC and its Applications ». Dans B. Kolb et L. S. Ettre (dir.). *Static headspace-gas chromatography*, pp. 19–50. New Jersey : Wiley Hoboken.
- Peifer Bezerra, M., D. F. McGinnis, J. F. Bezerra-Neto et F. A. R. Barbosa. 2020. « Is it stochastic? Chaoborus Larvae Bioturbation Likely Affect the Timing of Daily Methane (CH₄) Ebullitive Flux in a Tropical Reservoir ». *Hydrobiologia*, vol. 847, no 15, pp.3291-3308. doi.org/10.1007/s10750-020-04331-w.
- Tremblay, A., L. Varfalvy, C. Roehm et M. Garneau (dir.). 2005. *Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments*. Berlin, Heidelberg et New York, Springer. 732 p.



Produite par :

Yann Chavaillaz, climatologue, Ph. D.

François Bilodeau, chimiste, M. Sc.

Luc Pelletier, géographe, Ph. D.

Maude Larochelle, biologiste, B.Sc.

Direction – Environnement (2025G338F-2 – novembre 2025)

Dépôt légal, Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 4^e trimestre 2025

ISBN : 978-2-555-02553-0 (PDF v. fr.)

ISBN : 978-2-555-02554-7 (PDF v. ang.)

This publication is also available in English.

