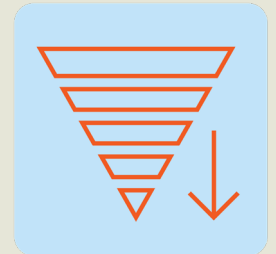


## Développement de stratégie visant à contrôler le niveau de contamination des piscines par les sous-produits de désinfection

### Rapport de recherche synthèse

Maximilien Debia<sup>1</sup>, Elham Ahmadpour<sup>1</sup>,  
Isabelle Valois<sup>1</sup>, Sami Haddad<sup>1</sup>, Robert Tardif<sup>1</sup>,  
Stéphane Hallé<sup>2</sup>, Hélène Proulx<sup>2</sup>, Manuel  
Rodriguez<sup>3</sup>, François Proulx<sup>3</sup>, Ianis Delpla<sup>3</sup>,  
Jean Sérodes<sup>3</sup>, Sabrina Simard<sup>3</sup>

RS-1185-fr





## NOS RECHERCHES travaillent pour vous!

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

### Mission

Dans l'esprit de la *Loi sur la santé et la sécurité du travail* (LSST) et de la *Loi sur les accidents du travail et les maladies professionnelles* (LATMP), la mission de l'IRSST est de : Contribuer à la santé et à la sécurité des travailleuses et travailleurs par la recherche, l'expertise de ses laboratoires, ainsi que la diffusion et le transfert des connaissances, et ce, dans une perspective de prévention et de retour durables au travail.

### Pour en savoir plus

Visitez notre site Web! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. [www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement :

- au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST ([preventionautravail.com](http://preventionautravail.com))
- au bulletin électronique [InfoIRSST](http://InfoIRSST)

### Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2023  
978-2-89797-271-4 (PDF)

© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé  
et en sécurité du travail, 2023

IRSST – Service des communications  
505, boul. De Maisonneuve Ouest  
Montréal (Québec) H3A 3C2  
Téléphone : 514 288-1551  
[publications@irsst.qc.ca](mailto:publications@irsst.qc.ca)  
[www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)

### Note au lectorat

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des autrices et auteurs. Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document n'ont pas fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

### Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information. Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle. Cette publication est disponible en version PDF sur le site Web de l'IRSST.

# Cadre de référence pour la recherche en SST



Prévention des atteintes à l'intégrité physique et psychique



Réadaptation, retour et maintien au travail



Surveillance et prospection des données en SST



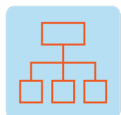
Identification des dangers, estimation et évaluation des risques



Élimination des dangers et maîtrise des risques



Métrologie appliquée à la SST



Organisation du travail



Santé mentale et psychologique



Population, société et SST

## REMERCIEMENTS

Cette étude a bénéficié de l'appui de nombreux organismes tout au long de sa réalisation. Nous tenons à souligner et remercier particulièrement l'apport des groupes suivants :

- Les membres du comité de suivi qui ont partagé généreusement leurs expertises des milieux aquatiques et qui nous ont permis de rejoindre un plus grand nombre de gestionnaires de piscine.
- Les gestionnaires et le personnel des piscines qui ont été visités dans le cadre de ce projet.
- Les collaborateurs, techniciens et équipes de soutien qui ont participé au design de l'étude, à la collecte de données et à l'analyse de nombreux échantillons d'eau et d'air : Cyril Catto, Patrick Eddy Ryan, Badr El Aroussi, Édith Giasson, Kader Djaho, Ross Thuot, Justine Basque, Andréa Tremblay et Sandrine Bourque.

## SOMMAIRE

La présence de sous-produits de désinfection dans l'eau et l'air des piscines intérieures est une problématique de santé publique et de santé au travail. L'exposition aux sous-produits de désinfection et notamment à la trichloramine est associée à différents effets délétères comme l'irritation des voies respiratoires, l'irritation oculaire et l'hyperréactivité bronchique. La présence des sous-produits de désinfection résulte des réactions chimiques qui surviennent entre les agents désinfectants ajoutés et les matières organiques ou azotées présentes naturellement dans l'eau ou qui y sont amenées par les baigneurs.

L'objectif général de recherche visait à améliorer les connaissances sur les pratiques de gestion et de surveillance des sous-produits de désinfection dans les milieux aquatiques intérieurs. Il s'agissait plus précisément d'évaluer l'impact de différentes stratégies de gestion sur les niveaux de contamination.

Cinq articles scientifiques publiés dans des revues avec comités de pairs ont été rédigés par les membres de l'équipe de recherche. Ces articles concernent la gestion et la métrologie des sous-produits de désinfection dans l'air et l'eau des piscines ainsi que l'impact de différentes stratégies de ventilation pour gérer la contamination de l'air des piscines. Les analyses ont permis de faire plusieurs recommandations en lien avec la gestion des sous-produits de désinfection en vue de maîtriser l'exposition professionnelle à ces contaminants.

Les travaux de recherche ont fait la démonstration que les méthodes de mesure pour évaluer l'exposition professionnelle sont disponibles. La mise en place d'une valeur d'exposition admissible dans l'air des piscines est nécessaire. Le gouvernement du Québec pourrait s'inspirer de la province de la Colombie-Britannique qui a établi une valeur d'exposition admissible à 0,35 mg/m<sup>3</sup> pour huit heures pour la trichloramine.

Les gestionnaires de piscines devraient viser à atteindre les débits d'air total recommandé par l'*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) (8 changements d'air à l'heure) afin de diluer la trichloramine qui a tendance à s'accumuler à la surface de l'eau et de la plage (pourtour de la piscine), là où les vitesses de l'air sont maintenues basses pour limiter l'évaporation de l'eau puis pour maintenir un niveau de confort thermique acceptable pour les baigneurs.

La mise en place d'un outil d'estimation des niveaux de trichloramine dans l'air des piscines est nécessaire. Cet outil devrait faire l'objet de futurs travaux de recherche. Il considérera des facteurs importants pour la génération de trichloramine (température de l'eau, nombre de baigneurs, activités de natation), mais aussi des facteurs en lien avec le devenir des contaminants dans le milieu (volume de milieu intérieur, dimensions des bassins, taux de ventilation, stratégie de ventilation).

# TABLE DES MATIÈRES

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
Sous-produits de désinfection .....	1
Études des déterminants de l'exposition des travailleurs en piscine .....	1
Origine du projet .....	4
Objectifs de recherche .....	4
<b>1. RÉSUMÉS DES ARTICLES .....</b>	<b>5</b>
1.1 Article 1 : Impact cumulé des baigneurs sur la qualité de l'eau des piscines intérieures : une étude de cas réel révélant les variabilités saisonnières et journalières des sous-produits de désinfection.....	5
1.2 Article 2 : Comparaison des méthodes d'échantillonnage utilisées pour évaluer les niveaux de trichloramine dans l'air des piscines intérieures.....	6
1.3 Article 3 : Variations spatiales et temporelles des niveaux de sous-produits de désinfection dans l'air de quatre piscines intérieures .....	7
1.4 Article 4 : Étude numérique des impacts des apports d'air extérieur et des renouvellements d'air par heure sur les concentrations de trichloramine dans une enceinte de piscine intérieure.....	8
1.5 Article 5 : Impact de l'extraction de l'air des piscines intérieures au niveau des bassins sur les concentrations de trichloramine : une étude numérique.....	10
<b>2. DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION.....</b>	<b>12</b>
2.1 Surveillance des SPD dans l'eau .....	12
2.2 Surveillance des SPD dans l'air .....	12
2.3 Stratégies de ventilation.....	13
2.4 Enjeux de gestion .....	14
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>16</b>

## LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Acronyme	Définition
AHA	Acides haloacétiques
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
CAH	Chloramines
CAM	Mécanique des fluides numérique « <i>Computational Fluid Dynamics</i> »
CFD	Centimètre
cm	Carbone organique total
COT	Dichloramines
DCAM	Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
INRS	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité au travail
IRSST	Litre par seconde
L/s	Mètre
MCAM	Monochloramines
m/s	Mètre par seconde
mg/L	Milligramme par litre
mg/m <sup>3</sup>	Milligramme par mètre cube
nm	Nanomètre
pH	Potentiel hydrogène
SPD	Sous-produits de désinfection
SPDe	Sous-produits dits « émergents »
TCA	Acide trichloroacétique
TCAM	Trichloramine
TCM	Trichlorométhane (chloroforme)
UV	Ultra-violet
VEA	Valeur d'exposition admissible

# INTRODUCTION

## Sous-produits de désinfection

Les sous-produits de désinfection (SPD) résultent des réactions chimiques qui surviennent entre les agents désinfectants et les matières organiques ou azotées présentes naturellement dans l'eau ou qui y sont amenées par les baigneurs.

Parmi ces contaminants, on distinguera des composés que l'on qualifiera de « classiques » en comparaison aux sous-produits dits « émergents » (SPDe) découverts plus récemment (Manasfi *et al.*, 2016 ; Mercier Shanks *et al.*, 2013 ; Richardson *et al.*, 2010 ; Richardson *et al.*, 2007 ; Weaver *et al.*, 2009 ; Zwiener *et al.*, 2007). Dans la catégorie des composés classiques, on identifie traditionnellement trois classes de composés : les trihalométhanes (THM) [incluant notamment le trichlorométhane (TCM), le dichlorobromométhane, le bromodichlorométhane et le bromoforme], les acides haloacétiques (AHA) [incluant notamment l'acide monochloroacétique, l'acide monobromoacétique, l'acide dichloroacétique, l'acide trichloroacétique (TCA), l'acide bromochloroacétique, et l'acide dibromoacétique] et les chloramines (CAM) [incluant la monochloramine (MCAM), la dichloramine (DCAM) et la trichloramine (TCAM)]. Les THM, composés particulièrement volatils, peuvent se diffuser dans l'air, alors que les AHA resteront très majoritairement concentrés dans l'eau. Dans la famille des CAM, on retrouvera essentiellement la MCAM dans l'eau et la TCAM dans l'air. Dans la longue liste des SPDe, on peut citer les haloacétonitriles [incluant le trichloroacétonitrile, le dichloroacétonitrile, le dibromoacétonitrile et le bromochloroacétonitrile], les halonitrométhanés dont la chloropicrine ou trichloronitrométhane, ainsi que les haloacétones [incluant le 1,1-Dichloro-2-propanone ou le 1,1,1-trichloro-2-propanone], les haloacétaldéhydes, le chlorite et le chlorate, bromures, bromates, perchlorates ou encore la N-nitrosodiméthylamine. Les bromates, les chlorates et les chlorites sont des SPD inorganiques. On suppose que la présence de ces derniers dans les piscines proviendrait de la dégradation des solutions d'hypochlorite (et non pas de réactions associées à l'ozonation ou à la dioxydation de chlore comme c'est le cas des réseaux d'eau potable qui utilisent l'ozone et le dioxyde de chlore).

## Études des déterminants de l'exposition des travailleurs en piscine

L'évidence de la contamination de l'eau et l'air des piscines par les SPD impose la question de la sécurité et du confort sanitaires des employés de ces milieux. L'exposition aux SPD est associée à différents effets délétères comme l'irritation des voies respiratoires, l'irritation oculaire et l'hyperréactivité bronchique. Villanueva *et al.* (2015) soulignaient dans une revue des effets sanitaires associés aux SPD, une prévalence élevée d'atteintes respiratoires chez les travailleurs des piscines. L'exposition aux SPD en suspension dans l'air des substances plus volatiles comme la TCAM et le TCM sera plus particulièrement évaluée par les intervenants en santé au travail.

De nombreux facteurs liés aux exigences techniques d'entretien et/ou aux comportements individuels peuvent favoriser (i) la formation et la diffusion des contaminants dans les médias environnementaux (c.-à-d., eau et air), ainsi que (ii) l'exposition des personnes à ces contaminants. Plusieurs études s'orientent désormais vers la recherche de solutions pour minimiser la formation des SPD, améliorer la qualité de l'eau et de l'air des piscines (Cheema *et al.*, 2017 ; Chowdhury *et al.*, 2014 ; Peng *et al.*, 2016 ; Tang et Xie, 2016 ; Teo *et al.*, 2015 ; Yang *et al.*, 2016 ; Yang *et al.*, 2017 ; Yue *et al.*, 2016 ; Zare Afifi et Blatchley, 2015 ; Zare Afifi et Blatchley, 2016 ; Zhang *et al.*, 2015).

Au regard des opérations de gestion de l'eau, ce sont les questions du renouvellement de l'eau (vidange, changements) et de l'optimisation de la désinfection qui se posent. Dans une piscine, l'eau traitée est presque entièrement recirculée, entraînant ainsi une accumulation des SPD dans son eau (Judd et Black, 2000). L'impact des pratiques de renouvellement de l'eau (c.-à-d. stratégies associées à la recirculation de l'eau et à la vidange complète de la piscine) sur la présence des SPD dans l'eau et dans l'air des piscines n'a pas vraiment été documenté (Chowdhury *et al.*, 2014), notamment pas à une échelle « réelle » (« *full-scale* »).

L'impact de la fréquentation des piscines et du type de clientèle (enfants, adultes, cours de compétition) sur les SPD de l'eau sont suspectés être des déterminants importants, mais ils n'ont pas été directement mis en évidence à travers des études à échelle « réelle » (« *full-scale* »).

Par ailleurs, la réglementation québécoise impose un niveau de chlore résiduel dans l'eau des piscines intérieures entre 0,8 à 2,0 mg/L (*Règlement sur la qualité de l'eau des piscines et autres bassins artificiels*, RLRQ, c. Q-2, r. 39). Pour assurer un niveau de chlore résiduel acceptable en tout temps, les opérateurs font un suivi de ce paramètre et selon les résultats obtenus ajustent la dose de chlore ajoutée. Des ajustements de la dose de chlore auront un impact sur la formation de SPD (Judd et Black, 2000 ; Singer, 1994 ; Teo *et al.*, 2015). Il serait donc souhaitable d'ajuster la dose de chlore en fonction de la connaissance de la qualité de l'eau en amont, afin d'obtenir une concentration minimale de chlore résiduel (0,8 mg/L) et ce, afin de réduire la formation de SPD. Il ne semble pas y avoir de recherches menées sur la gestion de la dose de chlore à ajouter pour la désinfection des piscines (c.-à-d. qui assure la désinfection, mais minimise la formation des SPD), et là encore notamment pas à l'échelle « réelle » (« *full-scale* ») des piscines.

Au regard de la gestion de l'air, la conception des systèmes de ventilation dans les piscines intérieures pose plusieurs défis, car ces derniers doivent : i) limiter la concentration des SPD à des niveaux acceptables, ii) assurer des conditions de confort thermique, iii) limiter l'évaporation à la surface de l'eau et iv) créer un mouvement d'air suffisant près des parois où la température est inférieure au point de rosée. De plus, ces objectifs doivent être atteints en limitant la consommation d'énergie des systèmes.

L'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE, 2019) recommande de maintenir un nombre de changements d'air par heure (CAH) compris entre 4 et 6 (sans spectateurs) et entre 6 et 8 (avec spectateurs) ainsi qu'un débit d'air extérieur de 2,4 L/s par m<sup>2</sup> de surface de plage (pourtour de la piscine) et de bassin et de 0,3 L/s par m<sup>2</sup> de surface de l'aire des spectateurs en plus de 0,3 L/s par spectateur. Baxter (2012) souligne qu'un équilibre délicat doit être maintenu entre l'extraction des SPD, le maintien de conditions de confort thermique des baigneurs et la limitation des pertes d'énergie par évaporation de l'eau du bassin.

Une étude expérimentale menée par Cavestri et Seeger-Clevenger (2009) a montré que des grilles de retour d'air situées au niveau du plafond ne permettaient pas d'extraire efficacement les CAM dans l'air. Ces auteurs recommandent d'extraire l'air vicié le plus près possible de la surface de l'eau et de maintenir une vitesse d'air de l'ordre de 0,05 à 0,10 m/s à la surface du bassin. ASHRAE recommande de maintenir cette vitesse entre 0,05 à 0,15 m/s pour permettre l'extraction des CAM tout en limitant l'évaporation de l'eau du bassin, qui augmente lorsque la vitesse de l'air à la surface de l'eau augmente. Ces éléments invitent bien évidemment à poursuivre des investigations plus poussées sur les pratiques de ventilation efficaces dans le milieu. La simulation numérique des écoulements (CFD) est une méthode reconnue permettant d'étudier la performance des systèmes de ventilation. La CFD a été appliquée avec succès pour la modélisation des mouvements d'air dans de grands volumes tels un entrepôt (Bauwens et Dorofeev, 2014), un tunnel routier (Weng *et al.*, 2014) un atrium (Ray *et al.*, 2014) et plus spécifiquement pour des enceintes aquatiques (Calise *et al.*, 2018 ; Ciuman et Lipska, 2018 ; Limane *et al.*, 2017 ; Rojas et Grove-Smith, 2018 ; Sobhi *et al.*, 2022). Cependant aucune étude numérique ne semble avoir été publiée en lien avec la ventilation et la dispersion de la TCAM dans une enceinte aquatique.

Preuve s'il en faut que ces questions de gestion de l'eau et de l'air des piscines interpellent les responsables, les gestionnaires d'établissement et les différents intervenants en santé et sécurité du travail œuvrant dans ces milieux, l'Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (France) a récemment développé un outil, le modèle Aquaprev (Gérardin *et al.*, 2015). Ce modèle propose une estimation des concentrations en TCAM dans l'air des halls de piscines à partir des paramètres de fonctionnement des piscines. Plus précisément, il permet d'estimer le transfert de masse entre l'eau des piscines et l'air ambiant. Ce transfert de masse couplé au débit de ventilation et à une équation de bilan massique permet d'obtenir une concentration en TCAM dans l'air des piscines en fonction du nombre de baigneurs et de leur niveau d'activité. Ainsi, une concentration moyenne en TCAM supposée uniforme dans tout le volume d'air intérieur est obtenue.

## Origine du projet

La problématique de la contamination des piscines intérieures aux SPD et de l'exposition des travailleurs a ainsi retenu l'attention de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) qui a subventionné deux recherches durant les dernières années.

Une première étude (Tardif, Catto, Haddad *et al.*, 2015) a évalué la contamination environnementale (eau et air) dans un panel de 41 piscines intérieures, puis les niveaux biologiques dans des échantillons d'air alvéolaire et d'urine fournis par des travailleurs.

Une seconde recherche (Tardif, Catto et Rodriguez, 2015) a examiné l'impact de différentes filières de traitement sur la contamination par les SPD dans le cadre d'une étude de cas exploratoire et a souligné l'importance d'effectuer des choix de procédés de traitement tenant compte du contexte et des problématiques spécifiques des piscines.

Le présent projet de recherche s'inscrit dans la suite des travaux susmentionnés. Ces recherches ont permis de dresser un panorama de la qualité de l'eau et de l'air des piscines intérieures au Québec. En revanche, les connaissances plus spécifiques sur la gestion des infrastructures et des opérations en lien avec les niveaux de contaminations de l'eau et de l'air demeurent limitées. L'étude de l'impact des facteurs liés aux exigences techniques de gestion de l'eau et de l'air et aux comportements individuels sur la contamination en SPD est donc nécessaire.

## Objectifs de recherche

L'objectif général visait à améliorer les connaissances sur les pratiques de gestion et de surveillance des SPD dans les milieux aquatiques intérieurs. Il s'agissait plus précisément d'évaluer l'impact de différentes stratégies de gestion sur les niveaux de contamination.

Plus spécifiquement, il s'agissait :

- de générer de nouvelles données, en lien avec certaines pratiques de gestion, sur les niveaux de contamination en SPD dans l'eau et dans l'air des piscines intérieures ;
- d'évaluer l'impact de différents scénarios relatifs à la gestion de l'eau (c.-à-d. changements d'eau – vidange, renouvellement) et à la ventilation des sites (c.-à-d., changement d'air) sur la contamination en SPD par le biais combiné de modèles en laboratoire, de simulations numériques et d'investigations sur le terrain ;
- de valider une méthode d'analyse de la TCAM pour évaluer l'exposition des travailleurs.

# 1. RÉSUMÉS DES ARTICLES

## 1.1 Article 1 : Impact cumulé des baigneurs sur la qualité de l'eau des piscines intérieures : une étude de cas réel révélant les variabilités saisonnières et journalières des sous-produits de désinfection

### *Référence*

Delpla, I., Simard, S., Proulx, F., Sérodes, J.B. Valois, I, Ahmadpour, E., . . . Rodriguez, M.. (2021). Cumulative impact of swimmers on pool water quality: A full-scale study revealing seasonal and daily variabilities of disinfection by-products. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106809>

### *Résumé*

L'eau des piscines est désinfectée pour assurer la sécurité microbienne. Cependant, les procédés de désinfection génèrent également des SPD qui sont créés par la réaction entre un désinfectant et des matières organiques. Dans cette étude, la qualité de l'eau de deux piscines intérieures aux caractéristiques différentes a été contrôlée en situation réelle.

Pour évaluer l'impact cumulé des baigneurs, la qualité de l'eau des bassins a été surveillée sur le long terme (2 mois), après le renouvellement complet de l'eau des bassins. L'impact quotidien des baigneurs sur la qualité de l'eau a également été estimé en échantillonnant intensivement la qualité de l'eau au cours d'une journée de forte fréquentation. Les échantillons ont été analysés pour les SPD (THM, AHA, chlorites et chlorates) et leurs précurseurs (pH, carbone organique total (COT), UV 254 nm, turbidité, conductivité, dureté, nitrite-nitrates, azote total, température de l'eau, chlore libre et total).

Les résultats obtenus ont montré que la fréquentation des baigneurs avait un impact sur les niveaux d'indicateurs de matière organique (COT et UV 254 nm) et d'azote total. Les niveaux les plus élevés de SPD (THM et AHA) ont ainsi été détectés dans les piscines pendant les périodes de fréquentation maximale et lorsqu'il y avait un rapport plus élevé de nageurs par rapport au volume d'eau de la piscine. Les niveaux de THM se sont également révélés être influencés par des paramètres associés au fonctionnement de la piscine (température de l'eau, renouvellement de l'eau, désinfection). Plus particulièrement, les AHA se sont accumulés dans les deux piscines au cours du suivi en raison de leur faible volatilité.

D'autres études devraient inclure les SPD azotés, compte tenu de leur toxicité importante, et devraient évaluer l'impact de la qualité de l'eau et de la ventilation sur la présence des SPD volatils dans l'air.

## 1.2 Article 2 : Comparaison des méthodes d'échantillonnage utilisées pour évaluer les niveaux de trichloramine dans l'air des piscines intérieures

### Référence

Ahmadpour, E., Hallé, S., Valois, I. Ryan P. E., Haddad, S., Rodriguez, M., . . . Debia, M. (2022). Comparison of sampling collection strategies for assessing airborne trichloramine levels in indoor swimming pools. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(13): 36012-36022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24790-z>

### Résumé

Depuis 1995, la procédure d'échantillonnage des TCAM proposé par Héry *et al.* (1995) a été largement utilisée pour déterminer l'exposition aux TCAM dans les piscines intérieures. Cette méthode consiste à pomper de l'air à un débit de 1 L/min pendant deux heures à travers un préfiltre en téflon et deux filtres en fibre de quartz. Des méthodes de prélèvement modifiées de la proposition initiale d'Héry ont été développées en utilisant différents débits de pompe d'échantillonnage et différents types de préfiltres. Il est toutefois possible que le type de préfiltre ou le débit de la pompe de prélèvement exercent une influence sur les résultats de ces études.

La présente étude a été conçue pour évaluer les effets de différents assemblages de cassettes et débits d'échantillonnage sur les niveaux de TCAM mesurés. Des tests de laboratoire ont été effectués à l'aide d'un système de production de TCAM conçue pour cette étude. Des mesures en milieu de travail ont été effectuées dans quatre piscines intérieures. Différentes options de préfiltrage ont été utilisées : pas de préfiltre, préfiltre en verre ou préfiltre en téflon inclus dans la cassette de prélèvement, et une cassette originale munie d'un préfiltre séparable.

Les tests en laboratoire ont indiqué qu'à des concentrations de TCAM supérieures à 1 mg/m<sup>3</sup>, le pourcentage de TCAM capté sur le premier filtre pouvait être inférieur à 75 %, ce qui démontrait une possible perte de matériel lors de l'échantillonnage (sous-estimation des concentrations). Une étude de l'effet du préfiltre sur la stratégie d'échantillonnage à l'aide de différents assemblages de cassettes a révélé que l'utilisation d'un assemblage de cassette séparable empêchait les surestimations des niveaux de TCAM. De plus, il n'y avait pas de différences significatives entre les concentrations de TCAM mesurées aux débits de 0,5 L/min à 2 L/min dans les piscines.

Cette étude a permis de décrire les incertitudes associées à l'utilisation de différents trains d'échantillonnage.

### 1.3 Article 3 : Variations spatiales et temporelles des niveaux de sous-produits de désinfection dans l'air de quatre piscines intérieures

#### *Référence*

Ahmadpour, E., Halle, S., Valois, I., Ryan, P. E., Haddad, S., Rodriguez, M., . . . Debia M. (2022). Temporal and spatial variations in the levels of prominent airborne disinfection by-products at four indoor swimming pools. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 19(4) 185-196. <https://doi.org/10.1080/15459624.2022.2035741>

#### *Résumé*

L'exposition aux SPD dans l'air, en particulier la TCAM et le TCM, peut entraîner divers effets sur la santé des travailleurs et des utilisateurs des piscines intérieures. Cette étude visait à évaluer les variations spatiales et temporelles des concentrations de TCAM et de TCM dans des piscines intérieures.

Des mesures ont été effectuées dans quatre piscines intérieures du Québec (Canada) pendant la saison froide. Pour mesurer la variation spatiale de TCAM et de TCM, trois points d'échantillonnage ont été distribués dans l'enceinte. L'un des points avait deux mesures en parallèle, l'une à 0,5 m et l'autre à 1,5 m par rapport au niveau de l'eau de la piscine. Pour mesurer la variation temporelle, des échantillons de TCAM et de TCM ont été réalisés toutes les deux heures. Pour bien représenter les conditions de fonctionnement journalières, le prélèvement a commencé deux heures avant l'ouverture de la piscine et s'est poursuivi jusqu'à deux heures après la fermeture. Pour quantifier les concentrations de trichloramine et de TCM, 304 échantillons d'air ont été prélevés.

Trois des quatre piscines ne montraient pas de variations significatives des concentrations simultanées entre les trois points de mesures. De plus, aucune variation significative n'a été trouvée entre les mesures faites à 0,5 m et 1,5 m. Toutefois, les résultats indiquent que les concentrations de TCAM et de TCM variaient significativement dans le temps dans les quatre piscines. Les variations suggèrent que la pratique courante consistant à prélever un seul échantillon d'air sur deux heures pour déterminer les concentrations quotidiennes de ces contaminants n'est pas forcément représentative de l'exposition réelle. Par conséquent, il y a un biais possible dans l'évaluation des risques pour la santé des travailleurs qui sont présents pour un quart de travail complet de huit heures.

Cette étude recommande une nouvelle stratégie d'échantillonnage de huit heures ou une stratégie sur un quart de travail complet en utilisant une cassette avec trois filtres imprégnés et un préfiltre séparable comme solution valide pour comparer les concentrations moyennes pondérées dans le temps aux valeurs limites d'exposition recommandées pour la trichloramine.

## 1.4 Article 4 : Étude numérique des impacts des apports d'air extérieur et des renouvellements d'air par heure sur les concentrations de trichloramine dans une enceinte de piscine intérieure

### *Référence*

Proulx, H. et Hallé, S (2022). A numerical study of the impacts of outdoor air intake and air changes per hour on the trichloramine concentrations in a swimming pool enclosure. *Frontiers in Built Environment*, 8. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.957973>

### *Résumé*

La TCAM est un sous-produit de désinfection couramment présent dans l'eau et l'air des piscines intérieures. Ce produit est associé à des maladies chroniques telles que l'asthme et les bronchites et peut provoquer de l'irritation des yeux et de la peau. En raison de sa masse volumique supérieure à celle de l'air, la TCAM a tendance à s'accumuler près de la surface de l'eau. La ventilation mixte (par mélange) est la principale stratégie de ventilation utilisée dans les centres aquatiques pour maintenir les concentrations de TCAM à un niveau acceptable. Ces environnements sont toutefois connus pour être très énergivores, principalement à cause de l'évaporation de l'eau du bassin. Par conséquent, les codes du bâtiment recommandent de maintenir une faible vitesse d'air au-dessus de la piscine et des bords du bassin pour minimiser l'évaporation et assurer le confort thermique des baigneurs. Si les niveaux de TCAM semblent être trop élevés, les gestionnaires privilégieront l'augmentation du nombre de CAH tout en limitant l'apport d'air extérieur. Puisque les filtres des systèmes de ventilation mécanique ne sont pas conçus pour éliminer la TCAM du flux d'air et que la concentration ne peut pas être mesurée directement, les paramètres du système de ventilation sont souvent basés sur des recommandations minimales énoncées dans les codes du bâtiment et peuvent varier en fonction des niveaux de CO<sub>2</sub> dans l'air extrait, indépendamment du niveau de TCAM dans les enceintes. On ne sait toujours pas comment le taux d'apport d'air extérieur affecte les niveaux de TCAM dans les zones respiratoires. Cette étude avait comme objectif l'investigation numérique des impacts de l'apport d'air extérieur et du nombre de CAH sur les concentrations de TCAM dans une enceinte de piscine à Montréal (Canada).

Les résultats montrent que les recommandations minimales (apport d'air extérieur et nombre de CAH) de l'ASHRAE ne sont pas suffisantes pour éliminer l'accumulation et la stratification de TCAM pour l'enceinte aquatique. De plus, les basses vitesses de l'air à la surface de l'eau, en moyenne de 0,06 m/s (résultat numérique), ne sont pas assez élevées pour empêcher l'accumulation de TCAM lorsque le nombre de CAH est maintenu au minimum recommandé par ASHRAE (4 CAH). Lorsque le nombre de CAH est augmenté au seuil maximal de cette recommandation (8 CAH), les vitesses de l'air à la surface de l'eau obtenue numériquement atteignent en moyenne 0,14 m/s, ce qui réduit significativement l'accumulation de TCAM à la surface du bassin. Cependant, les zones

de respiration situées à plus de 1 m de hauteur par rapport à la plage indiquent une augmentation de TCAM par rapport au cas de référence (4 CAH). Une meilleure dilution du contaminant diminue la concentration de TCAM entre 0 et 1 m de hauteur, mais provoque son augmentation au-dessus de 1 m de hauteur. De plus, la recirculation de l'air affecte principalement les zones respiratoires des occupants debout sur la plage et des sauveteurs (1 m et plus), mais a un impact moindre sur les zones respiratoires des nageurs ou des personnes assises sur le bord du bassin (0-1 m). L'arrêt de la recirculation de l'air ainsi que l'augmentation du nombre de CAH ne garantissent pas une meilleure qualité de l'air en termes de TCAM dans les zones respiratoires pour l'ensemble des occupants.

Les résultats pour le centre aquatique à l'étude pourraient être utilisés pour guider des recherches similaires dans d'autres centres aquatiques et pour le développement continu des codes du bâtiment et des normes de qualité de l'air.

## 1.5 Article 5 : Impact de l'extraction de l'air des piscines intérieures au niveau des bassins sur les concentrations de trichloramine : une étude numérique

### Référence

Proulx, H., Debia, M. et Hallé, S. (2023). Deck level air extraction and its impact on trichloramine concentrations in an indoor swimming pool: A numerical study. *Journal of Building Engineering*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106873>

### Résumé

Un objectif très important d'un système de ventilation dans une enceinte de piscine est de réduire à un niveau acceptable la concentration de TCAM dans l'air des zones de respiration des occupants. Une méthode de ventilation couramment utilisée consiste à diluer le contaminant dans l'ensemble du volume de la pièce en mélangeant l'air et en remplaçant une partie de celui-ci par de l'air extérieur exempt de TCAM. D'ailleurs ASHRAE recommande d'ajouter des bouches d'extraction d'air dans le bas de l'enceinte pour capturer la TCAM à proximité de sa source d'émission (principalement le bassin). Quatre cas ont été étudiés et comparés à un cas de référence présentant la stratégie de ventilation existante pendant la saison hivernale dans l'enceinte d'une piscine à Montréal. Comme le nombre de CAH ainsi que le taux d'admission d'air extérieur (air neuf) demeurent les mêmes par rapport au cas de référence, les stratégies d'extraction étudiées n'impliquent pas de dépenses énergétiques supplémentaires pour le chauffage de l'air, ce qui fait de cette approche une mesure très attrayante pour un environnement aussi énergivore. Sur la base des résultats numériques, il est conclu que pour cette enceinte de piscine :

- Les bouches d'extraction au niveau de la plage modifient l'écoulement de l'air au-dessus de la plage et du bassin et par conséquent le déplacement de TCAM dans l'enceinte.
- La position de ces bouches d'extraction basse est un paramètre déterminant du succès de cette stratégie dans la réduction des niveaux de TCAM. Le résultat peut être soit une réduction souhaitée, soit une augmentation indésirable des niveaux de TCAM dans les zones de respiration.
- Le positionnement des bouches d'extraction sur un mur qui comporte également des bouches d'alimentation en air donne les meilleurs résultats avec une réduction de TCAM au-dessus de la plage et du bassin de 25 %, entre 0 et 75 cm de hauteur, et une réduction de 48 % pour l'espace au-dessus de 75 cm de hauteur, toujours par rapport au cas de référence.
- Il y a moins d'accumulation au-dessus du bassin et de la plage lorsque la TCAM qui n'est pas extraite au niveau de la plage est diluée puis entraînée plus haut, grâce à

l'écoulement de l'air provenant des bouches d'alimentation disposées sous les fenêtres des solariums.

- Quelle que soit la méthode de ventilation, les nageurs ont toujours la tête dans la zone ayant les niveaux de TCAM les plus élevés, suivis par les personnes assises sur la plage puis celles se tenant debout.

Ces conclusions apportent un éclairage sur la qualité de l'air intérieur dans les piscines en démontrant, dans une étude de cas, l'importance d'évaluer le profil de l'écoulement de l'air et l'effet de la ventilation sur les taux de TCAM dans l'air, au moyen de simulations numériques. Cette approche peut être appliquée à d'autres enceintes de piscine pour étudier l'impact d'une ventilation générale couplée à une extraction au niveau de la plage sur les niveaux de TCAM en conjonction avec l'analyse des schémas d'écoulement d'air. Les stratégies d'extraction de l'air au niveau de la plage, ainsi que d'autres stratégies de ventilation, doivent être davantage étudiées dans le but de réduire les niveaux de TCAM dans l'air des zones de respiration des occupants, soit les baigneurs, les moniteurs, les sauveteurs, les spectateurs ainsi que les travailleurs exposés à ces environnements de piscines intérieures.

## 2. DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION

L'objectif général de cette recherche visait à améliorer les connaissances sur les pratiques de gestion et de surveillance des SPD dans les milieux aquatiques intérieurs.

À partir d'une stratégie mixte de recherche alliant des interventions dans des piscines intérieures, des développements méthodologiques en laboratoire, des modalisations mathématiques et des simulations en dynamique des fluides, l'équipe de recherche a réalisé des travaux originaux. Les résultats de recherche sont présentés dans les articles scientifiques du chapitre 1 de ce rapport. Ces résultats permettent de faire plusieurs analyses et recommandations.

### 2.1 Surveillance des SPD dans l'eau

La surveillance des SPD dans l'eau vise essentiellement à assurer un suivi des niveaux de chlore résiduel pour ajuster la dose de chlore à ajouter, dans un but de contrôle sanitaire des eaux de baignade. Les travaux de recherche ont démontré que certains SPD, surtout les moins volatils, auront tendance à s'accumuler dans l'eau des bassins. Le renouvellement de l'eau total ou partiel est nécessaire pour diluer ces SPD faiblement volatils. Des travaux de recherche seront nécessaires pour préciser les paramètres de gestion de l'eau des piscines permettant de maîtriser les SPD à des niveaux sécuritaires.

### 2.2 Surveillance des SPD dans l'air

Il n'existe pas de valeurs limites admissibles (VEA) pour les CAM visant à prévenir les effets sur la santé des travailleurs de piscines. En absence de VEA pour les travailleurs, la prévention des expositions professionnelles aux contaminants de l'air ne semble pas être un élément prioritaire de la gestion des piscines. Les mesures de TCAM dans l'air de quatre piscines ont toutefois démontré que la contamination pouvait être importante au Québec avec des concentrations mesurées pouvant atteindre 0,5 mg/m<sup>3</sup>.

Dans la littérature, les concentrations de TCAM dans l'air sont essentiellement évaluées à partir d'un échantillonnage unique de deux heures, soit la méthode publiée initialement par Héry *et al.* (1995). Compte tenu de la variabilité spatio-temporelle des niveaux de SPD dans l'air mis en évidence par Ahmadpour *et al.* (2022) dans quatre piscines au Québec, la capacité d'un échantillon prélevé sur une période partielle de deux heures de représenter adéquatement l'exposition d'un travailleur pour une journée complète est remise en question. Une nouvelle stratégie d'échantillonnage permettant d'évaluer une exposition allant jusqu'à huit heures (ou l'échantillonnage d'un quart de travail) a été recommandée (Ahmadpour *et al.*, 2022). Cette méthode propose un nouvel ensemble de cassettes d'échantillonnage composé de trois filtres en fibre de quartz imprégnés afin de minimiser les risques de pertes de TCAM pouvant mener à une sous-estimation des concentrations.

L'utilisation de préfiltre a aussi été rapportée dans plusieurs méthodologies de recherche pour la mesure de TCAM dans l'air (Lévesque *et al.*, 2015 ; Soltermann *et al.*, 2014 ; Wu *et al.*, 2021 ; Zwiener et Schmalz, 2015). L'objectif de l'utilisation du préfiltre est d'éviter une contamination des filtres de quartz analysés par des aérosols liquides de MCAM et DCAM. L'étude de l'effet de différentes configurations de préfiltre a révélé que l'utilisation d'une cassette et d'un préfiltre séparables à la suite de l'échantillonnage pourrait donner des mesures de TCA plus précises en empêchant un transfert des amines chlorées du préfiltre vers les filtres de quartz (Ahmadpour *et al.*, 2023). L'analyse de l'impact de différents débits de prélèvement de l'air ne semble pas avoir d'impact dans la plage de valeurs étudiées sur les quantités de contaminants recueillies.

La mise en place d'une valeur limite d'exposition professionnelle ou d'une norme maximale en termes de concentration de TCAM est nécessaire et les méthodes de mesure sont disponibles. Le gouvernement du Québec pourrait s'inspirer de la province de la Colombie-Britannique qui a établi une VEA à 0,35 mg/m<sup>3</sup> de 8 heures pour la TCAM dans l'air.

## 2.3 Stratégies de ventilation

Les normes encadrant la ventilation dans les enceintes aquatiques visent à apporter une quantité suffisante d'air extérieur dans les zones de respiration, à maintenir le confort thermique des occupants, à préserver l'intégrité structurale du bâtiment et à minimiser l'évaporation de l'eau du bassin afin de limiter les dépenses énergétiques associées. Le système de ventilation doit aussi extraire les contaminants issus des activités se déroulant à l'intérieur de l'enceinte, dont les SPD. Cependant, il n'existe pas encore, à la connaissance de l'équipe de recherche, de méthode implantée dans l'industrie permettant de mesurer directement les niveaux de TCAM et de modifier en rétroaction les paramètres de ventilation. Les systèmes de ventilation sont donc conçus pour rencontrer les prescriptions minimales recommandées par les normes et codes en vigueur ou reconnus tels que celles d'ASHRAE. Les résultats de la recherche ont montré que ces normes minimales ne peuvent garantir une qualité de l'air optimale pour l'ensemble des occupants en tenant compte de leur position dans l'enceinte (Proulx et Hallé, 2022) et que la simulation numérique peut aider les gestionnaires à positionner adéquatement les équipements de ventilation dans l'enceinte de la piscine et notamment à proximité des sources de TCAM soit le bassin (Proulx *et al.*, 2023).

La TCAM a tendance à s'accumuler à la surface de l'eau et de la plage où les vitesses de l'air sont maintenues basses pour limiter l'évaporation de l'eau ainsi que pour maintenir un niveau de confort thermique acceptable pour les baigneurs. D'abord, la vitesse minimale de l'air à la surface de l'eau recommandée par ASHRAE (0,05 m/s) n'est pas assez élevée pour prévenir l'accumulation de la TCAM dans la zone de respiration des baigneurs (entre 0 et 1 m). Ensuite, le taux d'apport d'air extérieur minimal recommandé ne permet pas de réduire suffisamment la concentration de TCAM dans cette zone parce

que cette méthode n'empêche pas l'accumulation du contaminant à la surface de l'eau et de la plage. Même en augmentant le taux d'apport d'air jusqu'à 100 % (aucune recirculation), la concentration de TCAM demeurera élevée dans cette zone. Bien que le débit minimal d'air total recommandé par ASHRAE n'empêche pas la TCAM de s'accumuler à la surface de l'eau, la concentration de TCAM est diminuée dans la zone de respiration des baigneurs lorsqu'un nombre de CAH élevé est appliqué (8 CAH). Le contaminant est alors déplacé et dilué dans tout le volume de l'enceinte au détriment de la zone de respiration des occupants ( $\geq 1$  m) se tenant debout sur la plage, des sauveteurs dans leur chaise de surveillance et finalement des spectateurs dans la mezzanine.

Les stratégies de ventilation étudiées numériquement comportent des inconvénients. L'augmentation de la vitesse de l'air peut occasionner une augmentation du taux d'évaporation de l'eau du bassin, en plus d'une baisse prévisible du confort thermique des baigneurs. De plus, un apport d'air extérieur plus élevé nécessitera une dépense énergétique accrue liée au conditionnement de l'air extérieur, selon les conditions extérieures. En résumé, les méthodes peuvent entraîner des inconvénients non négligeables sans toutefois apporter une amélioration significative pour l'ensemble des occupants, à l'égard de la concentration de TCAM dans l'air. Les recherches doivent se poursuivre afin de réduire davantage la concentration de TCAM pour chaque zone de respiration au moyen de la ventilation mécanique, tout en minimisant la dépense énergétique associée. Les profils d'écoulement de l'air dans l'enceinte aquatique ainsi que le déplacement et la stratification de la TCAM méritent d'être étudiés davantage.

## 2.4 Enjeux de gestion

Lors de la réalisation des travaux, l'équipe de recherche a mis en évidence différents enjeux touchant la gestion des enceintes aquatiques.

Tout d'abord, les discussions et échanges avec les équipes en charge des piscines ont identifié de nombreuses limites techniques en lien avec la modification des pratiques de gestion que ce soit au niveau de l'eau ou de l'air. Il s'est avéré difficile, voire impossible, de faire modifier les débits de ventilation ou les pourcentages de recirculation de l'air. Les gestionnaires de piscines doivent faire face aux difficultés techniques, doivent considérer le confort des utilisateurs, et assurer la salubrité de l'eau et des normes de qualité. Ils doivent alors opérer les piscines à partir de l'information limitée sur la qualité de l'eau sans connaître précisément les variations dans les temps et l'espace des niveaux de contaminations de l'eau et de l'air aux SPD.

Des gestionnaires ont exprimé leur désir de mieux connaître les niveaux d'exposition des employés aux SPD, notamment ceux pour la TCAM. Que ce soit pour des raisons de prévention ou pour faire suite à des plaintes de travailleurs ou de baigneurs, il existe un

réel besoin de surveillance de la qualité de l'air des piscines. Cette surveillance apparaît comme un élément sous-évalué de la gestion actuelle des piscines au Québec.

Finalement, la réduction à la source de la formation des SPD est un élément clé de la gestion des piscines. Des mesures d'hygiène renforcées doivent être considérées. Toutefois, peu d'initiatives en dehors des mentions de douche obligatoire ont été observées dans les milieux. Des aménagements comme l'installation de pédiluve (bain de pied) ou le port obligatoire de bonnet de bain sont des mesures d'hygiène reconnues pour leur efficacité. La réduction à la source de la formation des SPD demeure la stratégie la plus efficace pour maîtriser les niveaux de SPD dans l'eau et l'air.

## BIBLIOGRAPHIE

- Ahmadpour, E., Hallé, S., Valois, I., Ryan, P. E., Haddad, S., Rodriguez, M., . . . Debia, M. (2022). Temporal and spatial variations in the levels of prominent airborne disinfection by-products at four indoor swimming pools. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 19(4), 185-196. <https://doi.org/10.1080/15459624.2022.2035741>
- Ahmadpour, E., Hallé, S., Valois, I., Ryan, P. E., Haddad, S., Rodriguez, M., . . . Debia, M. (2023). Comparison of sampling collection strategies for assessing airborne trichloramine levels in indoor swimming pools. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(13), 36012-36022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24790-z>
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2019). *Ventilation for acceptable indoor air quality*. Norme ANSI/ASHRAE 61.1.
- Bauwens, C. R. et Dorofeev, S. B. (2014). CFD modeling and consequence analysis of an accidental hydrogen release in a large scale facility. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(35), 20447-20454. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.142>
- Baxter, R. C. (2012). Designing for IAQ in natatoriums. *ASHRAE Journal*, 54, 24-32.
- Calise, F., Figaj, R. D. et Vanoli, L. (2018) Energy and economic analysis of energy savings measures in a swimming pool centre by means of dynamic simulations. *Energies*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/en11092182>
- Cavestri, R. C. et Seeger-Clevenger, D. (2009). Chemical off-gassing from indoor swimming pools. *ASHRAE Transactions*, 115, 502-512.
- Cheema, W. A., Kaarsholm, K. M. et Andersen, H. R. (2017). Combined UV treatment and ozonation for the removal of by-product precursors in swimming pool water. *Water Research*, 110, 141-149. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.12.008>
- Chowdhury, S., Alhooshani, K. et Karanfil, T. (2014). Disinfection byproducts in swimming pool: Occurrences, implications and future needs. *Water Research*, 53, 68-109. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.017>
- Ciuman, P. et Lipska, B. (2018). Experimental validation of the numerical model of air, heat and moisture flow in an indoor swimming pool. *Building and Environment*, 145, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.009>
- Gérardin, F., Cloteaux, A. et Midoux, N. (2015). Modeling of variations in nitrogen trichloride concentration over time in swimming pool water. *Process Safety and Environmental Protection*, 94, 452-462. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.10.004>
- Héry, M., Hecht, G., Gerber, J., Hubert, G. et Rebuffaud, J. (1995). Exposure to chloramines in the atmosphere of indoor swimming pools. *The Annals of Occupational Hygiene*, 39(4), 427-439. [https://doi.org/10.1016/0003-4878\(95\)00013-5](https://doi.org/10.1016/0003-4878(95)00013-5)

- Judd, S. et Black, S. (2000). Disinfection by-product formation in swimming pool waters: A simple mass balance. *Water Research*, 34(5), 1611-1619. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00316-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00316-4)
- Lévesque, B., Vézina, L., Gauvin, D. et Leroux, P. (2015). Investigation of air quality problems in an indoor swimming pool: A case study. *Annals of Occupational Hygiene*, 59(8), 1085-1089. <http://doi.org/10.1093/annhyg/mev038>
- Limane, A., Fellouah, H. et Galanis, N. (2017). Simulation of airflow with heat and mass transfer in an indoor swimming pool by OpenFOAM. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109, 862-878. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.02.030>
- Manasfi, T., De Méo, M., Coulomb, B., Di Giorgio, C. et Boudenne, J.-L. (2016). Identification of disinfection by-products in freshwater and seawater swimming pools and evaluation of genotoxicity. *Environment International*, 88, 94-102. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.028>
- Mercier Shanks, C., Sérodes, J.-B. et Rodriguez, M. J. (2013). Spatio-temporal variability of non-regulated disinfection by-products within a drinking water distribution network. *Water Research*, 47(9), 3231-3243. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.03.033>
- Peng, D., Saravia, F., Abbt-Braun, G. et Horn, H. (2016). Occurrence and simulation of trihalomethanes in swimming pool water: A simple prediction method based on DOC and mass balance. *Water Research*, 88, 634-642. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.10.061>
- Proulx, H., Debia, M. et Hallé, S. (2023). Deck level air extraction and its impact on trichloramine concentrations in an indoor swimming pool: A numerical study. *Journal of Building Engineering*, 74, 106873. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106873>
- Proulx, H. et Hallé, S. (2022). A numerical study of the impacts of outdoor air intake and air changes per hour on the trichloramine concentrations in a swimming pool enclosure. *Frontiers in Built Environment*, 8. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.957973>
- Ray, S. D., Gong, N. -W., Glicksman, L. R. et Paradiso, J. A. (2014). Experimental characterization of full-scale naturally ventilated atrium and validation of CFD simulations. *Energy and Buildings*, 69, 285-291. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.018>
- Règlement sur la qualité de l'eau des piscines et autres bassins artificiels*, RLRQ, Q-2, r. 39.
- Richardson, S. D., DeMarini, D. M., Kogevinas, M., Fernandez, P., Marco, E., Lourencetti, C., . . . Villanueva, C. M. (2010). What's in the pool? A comprehensive identification of disinfection by-products and assessment of mutagenicity of chlorinated and brominated swimming pool water. *Environmental Health Perspectives*, 118(11), 1523-1530. <https://doi.org/10.1289/ehp.1001965>
- Richardson, S. D., Plewa, M. J., Wagner, E. D., Schoeny, R. et DeMarini, D. M. (2007). Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-

- products in drinking water: A review and roadmap for research. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 636(1-3), 178-242. <http://doi.org/10.1016/j.mrrev.2007.09.001>
- Rojas, G. et Grove-Smith, J. (2018). Improving ventilation efficiency for a highly energy efficient indoor swimming pool using CFD simulations. *Fluids*, 3(4), 92. <https://doi.org/10.3390/fluids3040092>
- Singer, P. C. (1994). Control of disinfection by-products in drinking water. *Journal of Environmental Engineering*, 120(4), 727-744. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1994\)120:4\(727\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1994)120:4(727))
- Sobhi, M., Fayad, M. A., Al Jubori, A. M. et Badawy, T. (2022). Impact of spectators attendance on thermal ambience and water evaporation rate in an expansive competitive indoor swimming pool. *Case Studies in Thermal Engineering*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102359>
- Soltermann, F., Widler, T., Canonica, S. et von Gunten, U. (2014). Comparison of a novel extraction-based colorimetric (ABTS) method with membrane introduction mass spectrometry (MIMS): Trichloramine dynamics in pool water. *Water Research*, 58, 258-268. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.03.059>
- Tang, H. L. et Xie, Y. F. (2016). Biologically active carbon filtration for haloacetic acid removal from swimming pool water. *Science of the Total Environment*, 541, 58-64. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.059>
- Tardif, R., Catto, C., Haddad, S. et Rodriguez, M. (2015). *Évaluation de l'exposition des travailleurs aux sous-produits de désinfection en piscine intérieure au Québec* (Rapport no R-860). IRSST. <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-860.pdf>
- Tardif, R., Catto, C. et Rodriguez, M. (2015). *Impact de quatre filières de traitement de l'eau en piscine sur les concentrations des sous-produits de désinfection : une étude exploratoire* (Rapport no R-859). IRSST. <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-859.pdf>
- Teo, T. L. L., Coleman, H. M. et Khan, S. J. (2015). Chemical contaminants in swimming pools: Occurrence, implications and control. *Environment International*, 76, 16-31. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.012>
- Villanueva, C. M., Cordier, S., Font-Ribera, L., Salas, L. A. et Levallois, P. (2015). Overview of disinfection by-products and associated health effects. *Current Environmental Health Reports*, 2(1), 107-115. <https://doi.org/10.1007/s40572-014-0032-x>
- Weaver, W. A., Li, J., Wen, Y., Johnston, J., Blatchley, M. R. et Blatchley, E. R. (2009). Volatile disinfection by-product analysis from chlorinated indoor swimming pools. *Water Research*, 43(13), 3308-3318. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.04.035>
- Weng, M. C., Yu, L. X., Liu, F. et Nielsen, P. V. (2014). Full-scale experiment and CFD simulation on smoke movement and smoke control in a metro tunnel with one opening

- portal. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 42, 96-104.  
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.02.007>
- Wu, T., Foldes, T., Lee, L. T., Wagner, D. N., Jiang, J., Tasoglou, A., . . . Blatchley, E. R. (2021). Real-time measurements of gas-phase trichloramine (NCl<sub>3</sub>) in an indoor aquatic center. *Environmental Science & Technology*, 55(12), 8097-8107.  
<https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07413>
- Yang, L., Schmalz, C., Zhou, J., Zwiener, C., Chang, V. W.-C., Ge, L. et Wan, M. P. (2016). An insight of disinfection by-product (DBP) formation by alternative disinfectants for swimming pool disinfection under tropical conditions. *Water Research*, 101, 535-546.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.05.088>
- Yang, L., She, Q., Wan, M. P., Wang, R., Chang, V. W.-C. et Tang, C. Y. (2017). Removal of haloacetic acids from swimming pool water by reverse osmosis and nanofiltration. *Water Research*, 116, 116-125. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.03.025>
- Yue, E., Bai, H., Lian, L., Li, J. et Blatchley, E. R. (2016). Effect of chloride on the formation of volatile disinfection byproducts in chlorinated swimming pools. *Water Research*, 105, 413-420. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.09.018>
- Zare Afifi, M. et Blatchley, E. R. (2015). Seasonal dynamics of water and air chemistry in an indoor chlorinated swimming pool. *Water Research*, 68, 771-783.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.10.037>
- Zare Afifi, M. et Blatchley, E. R. (2016). Effects of UV-based treatment on volatile disinfection byproducts in a chlorinated, indoor swimming pool. *Water Research*, 105, 167-177.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.064>
- Zhang, X., Li, W., Blatchley, E. R., Wang, X. et Ren, P. (2015). UV/chlorine process for ammonia removal and disinfection by-product reduction: Comparison with chlorination. *Water Research*, 68, 804-811. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.10.044>
- Zwiener, C., Richardson, S. D., De Marini, D. M., Grummt, T., Glauner, T. et Frimmel, F. H. (2007). Drowning in disinfection byproducts? Assessing swimming pool water. *Environmental Science & Technology*, 41(2), 363-372.  
<https://doi.org/10.1021/es062367v>
- Zwiener, C. et Schmalz, C. (2015). Ion mobility spectrometry to monitor trichloramine in indoor pool air. Dans T. Karanfil, B. Mitch, P. Westerhoff et Y. Xie (édit.), *Recent advances in disinfection by-products* (p. 431-446). ACS Publications. <https://doi.org/10.1021/bk-2015-1190.ch022>