



LES NOUVEAUX SOUS-PRODUITS DE DÉSINFECTION :
TOXICITÉ, OCCURRENCE ET RISQUES POUR LA SANTÉ

.....

XING-FANG LI, PH. D. UNIVERSITÉ DE L'ALBERTA



Réseau
canadien
de l'eau

LES NOUVEAUX SOUS-PRODUITS DE DÉSINFECTION : TOXICITÉ, OCCURRENCE ET RISQUES POUR LA SANTÉ

XING-FANG LI, PH. D. UNIVERSITÉ DE L'ALBERTA

POURQUOI AVONS-NOUS RÉALISÉ CETTE RECHERCHE?

Au cours des 30 dernières années, le secteur de l'eau a investi massivement dans des ressources permettant de se conformer à la réglementation de plus en plus sévère sur la qualité de l'eau potable. Pour veiller à la salubrité de l'eau de consommation, on s'est attardé avec un intérêt croissant aux sous-produits de désinfection (SPD). Les SPD se forment lorsque les désinfectants utilisés pour traiter l'eau (comme le chlore et les chloramines) réagissent avec la matière organique naturellement présente dans les eaux de surface pour créer de nouveaux composés (p. ex., les trihalométhanes). C'est en 1974 que l'on a découvert les premiers SPD, ceux connus sous le nom de trihalométhanes (THM). Le chloroforme était de loin le plus prévalent de ces SPD et on pouvait le détecter à diverses concentrations dans toute eau de surface désinfectée avec du chlore.

La présence de SPD dans l'eau potable pose le problème du compromis entre les risques.

À cette époque, le chloroforme était largement utilisé dans les produits de consommation (dentifrice, rince-bouche, etc.), mais d'après les résultats d'un essai biologique de cancérogenèse du chloroforme sur les rongeurs, publiés en 1976, le produit a été déclaré cancérogène. Ces preuves ont mené à l'interdiction d'utiliser le chloroforme dans les produits de consommation couramment ingérés et à l'élaboration de recommandations concernant les THM dans l'eau potable au Canada dès 1978. La présence de SPD dans l'eau potable posait un problème : trouver un compromis entre les risques. Nous savons depuis plus de 50 ans que si l'on ne désinfecte pas l'eau potable, les microbes pathogènes qui s'y trouvent pourront causer des maladies d'origine hydrique. Plus récemment, les écloisions de maladies d'origine hydrique à Walkerton et North Battleford ont démontré l'importance cruciale d'obtenir une désinfection adéquate de l'eau potable.

La découverte des SPD a suscité des inquiétudes concernant une vaste gamme d'effets néfastes sur la santé, allant du cancer à des répercussions négatives sur la reproduction. Étant donné ces possibles risques pour la santé, bien qu'ils n'aient pas encore été prouvés, les fournisseurs d'eau potable ont fait de la réduction des SPD dans l'eau potable une priorité. Au milieu des années 1990, des études ont démontré que le chloroforme causait des tumeurs chez les rongeurs uniquement à des doses massives, comme celles utilisées dans l'essai biologique original de 1976. (Autrement, sous un certain seuil d'exposition, le chloroforme ne pose aucun risque de cancer pour les consommateurs et les concentrations de chloroforme que l'on a pu trouver dans l'eau potable étaient bien en deçà de ce seuil). D'après les sondages informels menés après de divers auditoires cibles, la plupart des professionnels du secteur de l'eau

potable ne sont pas au courant du fait que l'exposition au chloroforme dans l'eau potable ne cause pas le cancer. Les recommandations par mesure de précaution concernant les taux de THM dans l'eau potable fournissent une très large marge de sécurité. Les résultats accumulés des recherches ont aussi indiqué que même les concentrations de THM bromés présentes dans l'eau potable ne sont pas susceptibles de causer le cancer (Bull, 2012).

Depuis 1974, plus de 600 SPD ont été identifiés dans l'eau potable. N'importe quel procédé efficace et complet de désinfection va donner lieu à une certaine quantité de SPD. La chloration est le procédé de désinfection le plus courant et le plus économique, surtout pour les petits réseaux, soit ceux qui présentent le plus grand risque de contamination par des pathogènes. Plus de la moitié de tous les SPD chlorés dans l'eau ne sont pas encore identifiés. De nombreuses techniques variées permettant de réduire la formation des SPD ont été développées, dont d'autres procédés de désinfection comme l'ozonisation et la chloramination. Ces solutions de rechange pour la désinfection de l'eau peuvent produire des SPD non chlorés, comme le bromate (issu de l'ozonisation) et les nitrosamines (issues de la chloramination), lesquels, par molécule, sont beaucoup plus toxiques que les THM. Par conséquent, les changements aux procédés de désinfection mis en place pour se conformer aux mesures réglementaires doivent être basés sur une pleine compréhension des risques possibles des SPD pour la santé.



(Ci-dessus) Walkerton (Ontario), mai 2000. Des microbes pathogènes dans du fumier ont contaminé un puits municipal à proximité de la ferme, causant 7 décès et plus de 2 000 cas de maladie chez les consommateurs, parce que la désinfection était inadéquate pour contrer la contamination du puits par le fumier.



(Ci-dessus) L'organisme pathogène *Cryptosporidium* provenant d'un émissaire d'évacuation (en face du pont) est passé par l'usine de traitement d'eau potable de North Battleford en Saskatchewan, causant une écloision de maladie affectant un nombre estimé de 6 000 consommateurs en mars et avril 2001.

QU'AVONS-NOUS FAIT DANS LE CADRE DE CETTE RECHERCHE?

Ce projet a sollicité la collaboration d'équipes de recherche provenant de l'Université de l'Alberta, de l'Université de Waterloo, de l'Université de Toronto et de l'Université Laval. Ces équipes ont travaillé sur trois principaux aspects :

1. *L'élaboration de nouvelles méthodes d'analyse ayant une capacité accrue d'analyse des concentrations traces des nouveaux SPD non réglementés.*
2. *L'identification des SPD récemment découverts et la caractérisation de leur occurrence.*
3. *L'élaboration de nouvelles techniques d'évaluation de la toxicité permettant de classer les nouveaux SPD et d'évaluer leur toxicité.*

1. *Élaboration de techniques d'analyse des SPD*

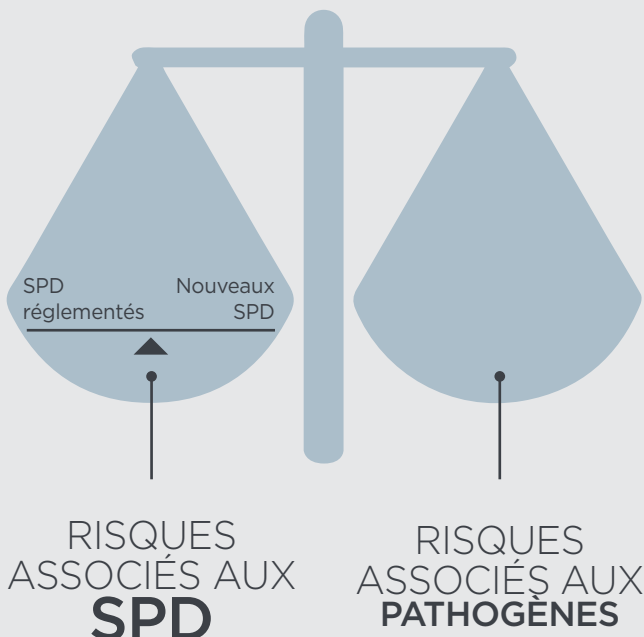
Puisque les SPD sont présents à de très faibles concentrations, allant de fractions de ng/L (1 partie par mille milliards) à quelques µg/L (1 partie par milliard), les méthodes d'analyse doivent être très sensibles (pour détecter des quantités ultra-traces) et aussi très spécifiques (pour distinguer précisément les SPD ciblés parmi un nombre incalculable d'autres substances ultra-traces dans l'eau).

Les nitrosamines sont de petites molécules, dont certaines sont des substances carcinogènes reconnues. Elles sont très difficiles à analyser. Les chercheurs ont conçu de nouvelles techniques d'échantillonnage et d'extraction de ces SPD, ainsi qu'une série de méthodes d'analyse ayant une excellente sensibilité et spécificité. Ces méthodes ont permis d'analyser certains SPD qui se dégradent pendant l'analyse faite à l'aide d'autres techniques courantes.

« La recherche qui se fait sur les sous-produits de désinfection est extrêmement utile aux services d'eau potable du pays. Actuellement, les Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada comprennent seulement deux groupes de SPD (les THM et les AHA) et un autre sous-produit de désinfection, la diméthylnitrosamine (DMNA); cependant, d'autres SPD peuvent se former pendant le traitement et bien qu'ils ne soient pas réglementés, ils peuvent poser un risque chimique important pour la santé. En sachant quels sont les SPD présents et en quelles concentrations, les fournisseurs d'eau potable seront en mesure de planifier les améliorations à faire aux procédés et de se préparer à d'éventuels règlements. »

*Andy Campbell, Qualité de l'eau,
Services environnementaux, Ville d'Ottawa*

LES RISQUES COMPLEXES ET CONCURRENTS INHÉRENTS À LA RÉGLEMENTATION DES SPD



2. *Identification de nouveaux SPD*

Les techniques d'analyse récemment développées ont permis d'identifier des SPD qui n'avaient jamais été trouvés auparavant dans l'eau potable. On a découvert une classe de SPD complètement nouvelle (les halobenzoquinones ou HBQ) après avoir prédit leur présence dans de l'eau potable chlorée et avoir estimé qu'il pourrait s'agir de composés cancérigènes. Dans le cadre du présent projet, nous avons donc évalué une série d'usines de traitement de l'eau au Canada, y compris plusieurs combinaisons de procédés de traitement appliqués à différents types d'eaux de surface, afin de déterminer l'occurrence des nitrosamines et des HBQ nouvellement découverts.

3. *Nouveaux outils d'évaluation de la toxicité*

Notre équipe de chercheurs a élaboré et évalué une nouvelle méthode permettant d'évaluer un grand nombre d'échantillons et de combinaisons de contaminants, avec une mesure en temps réel de leur toxicité pour diverses lignées cellulaires humaines. Une nouvelle méthode a également été élaborée pour évaluer la capacité de divers SPD de se lier à l'ADN, un marqueur potentiel d'un composé chimique ayant la capacité d'endommager l'ADN.

QUELS SONT NOS CONSTATS?

1. *Élaboration de la méthode d'analyse*

Nous avons fait plusieurs avancées en ce qui a trait à l'échantillonnage et à l'extraction de huit nitrosamines, dont la diméthylnitrosamine (DMNA), soit la nitrosamine que l'on retrouve le plus fréquemment. Cela s'est fait concurremment au développement de méthodes automatisées de préparation des échantillons, avec séparation et détection pour des analyses à débit élevé, incluant la validation d'une micro-extraction sur couche mince pour les SPD. Un nouvel échantillonneur actif sur couche mince a aussi été conçu et testé sur le terrain pour un échantillonnage rapide et sur place de l'eau qui soit convivial et plus facile à commercialiser que les échantillonneurs précédents.

L'équipe de recherche a aussi élaboré de nouvelles méthodes de spectrométrie de masse et les a utilisées pour identifier les précurseurs de la N-nitrosodiphénylamine (NDPhA), une nitrosamine qui n'était pas détectée à l'aide des anciennes méthodes d'analyse.

2. *Identification de nouveaux SPD*

Les avancées analytiques ont été utilisées avec succès pour identifier des SPD qui n'avaient pas encore été identifiés dans l'eau potable, et pour caractériser l'occurrence de plusieurs SPD non réglementés dans un large éventail de situations. Cette étape était nécessaire pour juger des risques potentiels pour la santé des Canadiens.

Ces nouvelles méthodes d'analyse ont permis la découverte pour la première fois dans l'eau potable de deux nitrosamines, la NDPhA et la nitrosopipéridine, et de deux SPD azotés apparentés, la phénazine et la N chlorophénazine. Ces SPD ont fait l'objet d'études dans 38 réseaux d'eau potable au Canada et aux États-Unis. La DMNA s'est révélée le SPD le plus fréquemment détecté, suivie de la NDPhA qui a été détectée en tant que SPD autant dans des eaux de surface que dans des eaux souterraines traitées. Le principal facteur suscitant la présence de nitrosamine était la chloramination, un procédé de désinfection de remplacement couramment adopté pour satisfaire les limites réglementaires pour les THM.

La prédiction de l'occurrence d'une classe de SPD préalablement non détectée, les HBQ, a été vérifiée dans les réseaux d'eau potable, ce qui constitue une découverte majeure dans ce domaine. Les HBQ sont importants, car ils semblent être beaucoup plus toxiques (jusqu'à 1 000 fois à 10 000 fois plus toxiques) que les THM. Heureusement, la capacité d'analyse de ces composés a révélé que les HBQ sont présents dans les réseaux d'eau potable à de faibles concentrations de ng/L plutôt qu'aux concentrations mille fois plus élevées des THM. L'étude des HBQ dans neuf réseaux d'eau potable qui utilisent les procédés de chloration, de chloration et chloramination, de chloramination, et d'ozonation et chloramination a révélé que le 2,6-dichlorobenzoquinone était présent dans tous les réseaux étudiés et que le 2,6-dibromobenzoquinone (DBBQ) était présent dans 72 % des réseaux. On a aussi constaté que l'ozonation, un autre procédé de désinfection de rechange visant à réduire les THM, augmentait les taux de DBBQ dans l'eau traitée.

3. *Élaboration d'une nouvelle technique d'évaluation de la toxicité*

La présente recherche a fait la démonstration de l'utilisation d'une technique de culture cellulaire avec inspection électronique des cellules en temps réel. La capacité de cette technologie d'utiliser des lignées cellulaires humaines et non des cellules d'organismes simples (comme des bactéries) est un ajout très utile pour évaluer rapidement le potentiel toxique de SPD individuels. Cette technique a servi à démontrer la grave cytotoxicité de la NDPhA, en relevant que ce SPD était 24 fois plus toxique que la DMNA la plus courante, qui elle-même était considérée comme un produit fortement cancérigène pour les rongeurs.

Les résultats toxicologiques fournissent des données importantes pour évaluer les risques potentiels des SPD pour la santé. On a également évalué la fiabilité et le comportement robuste de cette technique à des fins d'utilisation en surveillance environnementale.

En outre, l'équipe a conçu un test du dommage fait à l'ADN. La combinaison de la mesure de la toxicité cellulaire et du dommage de l'ADN est très utile pour caractériser la nature des effets toxiques et indiquer un potentiel cancérigène. Les essais de toxicité réalisés sur quatre HBQ ont montré qu'ils sont hautement toxiques pour les cellules et que les HBQ endommagent également l'ADN et les protéines. De plus, l'équipe a aussi conçu une nouvelle technique de spectrométrie de masse qui peut déterminer les liaisons que forment certains SPD sur l'ADN.

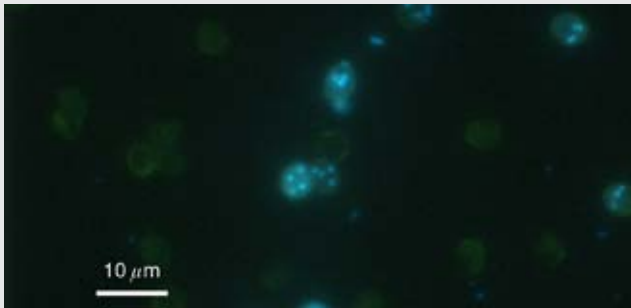
« Les preuves toxicologiques dont nous disposons indiquent que les THM représentent un risque qui est de deux ordres de grandeur de moins (c.-à-d. 100 fois moins) que ce qui avait été associé à l'eau potable chlorée dans des études épidémiologiques... Au fur et à mesure que les données deviennent disponibles pour évaluer les risques associés à d'autres SPD, l'importance des THM en ce qui a trait aux risques de cancer devrait passer complètement à l'arrière-plan. »

Bull (2012).

QU'EST-CE QUE CES RÉSULTATS SIGNIFIENT POUR LES PROFESSIONNELS DU SECTEUR DU TRAITEMENT DE L'EAU POTABLE?

Les questions de risque pour la santé publique associées aux SPD dans l'eau potable sont extrêmement complexes, malgré les 40 ans d'étude qui se sont écoulés depuis la découverte des THM. Les règlements initiaux étaient prudents et se fondaient sur des preuves selon lesquelles le chloroforme était cancérigène pour les rongeurs. Les fournisseurs d'eau potable ont réagi en instaurant des actions correctives visant à minimiser la formation des SPD, tout en reconnaissant que la désinfection demeure essentielle pour assurer la salubrité de l'eau potable.

Il y a toutefois une grande incohérence concernant les risques des SPD pour la santé publique : si les études épidémiologiques humaines ont montré des preuves constantes d'un lien entre la chloration de l'eau potable et le risque de cancer de la vessie, il n'y a cependant pas d'explication toxicologique pour ces estimations de risque, et ce pour aucun des SPD connus ou aucune combinaison de ceux-ci.



Oocystes de *Cryptosporidium* colorés avec un colorant fluorescent se liant aux quatre noyaux dans chaque oocyste.
Référence photographique - H.D.A Lindquist, U.S. EPA

Ce projet de recherche a amélioré, de plusieurs façons tangibles, les outils d'analyse dont nous disposons pour caractériser les SPD dans les réseaux publics d'eau potable. En outre, de nouveaux SPD ont été identifiés dans des réseaux d'eau potable au Canada et de nouvelles techniques d'évaluation toxicologique rapide ont été utilisées pour mieux comprendre les risques potentiels pour la santé des SPD connus et des nouveaux SPD. Ces outils ont servi et servent encore d'ailleurs à identifier de nouveaux SPD pour que l'on comprenne mieux les risques connexes pour la santé. Les collaborations dans le cadre ce programme de recherche ont rendu possible la production d'un livre convivial qui traite des SPD et de leur risque pour la santé humaine. Ce livre (Hrudey et Charrois, 2012), auquel ont contribué plusieurs équipes de chercheurs, fournit aux professionnels du traitement de l'eau potable des points de vue importants sur les risques comparés des SPD pour la santé humaine; on y souligne notamment

que les SPD devraient être gérés comme un problème à caractère incertain qu'il faut traiter avec prudence. Jusqu'à maintenant, aucun lien de causalité n'a été prouvé entre un SPD et une maladie humaine par exposition à l'eau potable.

Ce projet de recherche démontre très clairement qu'il est de mise de poursuivre une démarche prudente et pertinente pour minimiser la formation des SPD à l'aide de mesures raisonnables

Ce projet de recherche a fait la démonstration du risque que comporte l'adoption de techniques de désinfection de rechange pour minimiser les SPD sans avoir évalué complètement les nouveaux SPD qui pourraient se former ou augmenter en nombre dus à ces procédés de remplacement visant à réduire les THM. Les fournisseurs d'eau potable ont la difficile tâche d'équilibrer les risques pour la santé humaine, soit les risques certains que présentent les microbes pathogènes et les risques incertains et très complexes que présentent les SPD. Toutefois, avec une meilleure compréhension des connaissances exactes concernant les risques des SPD pour la santé, les fournisseurs peuvent gérer avec plus de confiance les SPD d'une façon prudente et sensée.

Ce projet de recherche fournit des preuves évidentes qu'il faut continuer à avoir une approche de précaution adéquate pour minimiser la formation des SPD, avec des mesures raisonnables. De la même façon, il existe un risque de continuer à utiliser aveuglément toute technologie de rechange pour réduire les SPD réglementés, sans bien comprendre le potentiel de création de nouveaux SPD qu'ont de telles options. Ces nouveaux SPD peuvent poser un plus grand risque pour la santé et les procédés de rechange peuvent compromettre l'efficacité de la désinfection. Les connaissances découlant de cette recherche nous rassurent toutefois que les taux actuels des SPD réglementés permettent un équilibre de précaution raisonnable entre tous les risques concurrents et complexes en jeu (p. ex., les risques des SPD comparés à ceux des pathogènes, les risques des SPD réglementés comparés à ceux des SPD nouvellement découverts).



Escherichia coli (E. coli) est une espèce de bactérie qui est essentielle à la digestion humaine dans l'intestin. Comme elle est présente en grande quantité, cela en fait un excellent indicateur de la contamination fécale. Certaines souches d'E. coli, comme la souche O157:H07 tristement célèbre pour avoir causé la mort et la maladie à Walkerton, sont des pathogènes pour les humains.
Référence photographique - G. Armstrong, Université de Calgary



RAPPORT RÉDIGÉ PAR ELIZABETH J. HRUDEY, UNIVERSITÉ DE L'ALBERTA

ÉQUIPE DE RECHERCHE

XING-FANG LI Université de l'Alberta, xingfang.li@ualberta.ca

STEVE E. HRUDEY Université de l'Alberta, steve.hrudey@ualberta.ca

ROBERT ANDREWS Université de Toronto, andrews@ecf.utoronto.ca

SUSAN ANDREWS Université de Toronto, sandrews@civ.utoronto.ca

PATRICK LEVALLOIS Université Laval, patrick.levallois@msp.ulaval.ca

JANUSZ PAWLISZYN Université de Waterloo, janusz@sciborg.uwaterloo.ca

JEFFREY CHARROIS Alberta Research Council (alors Université Curtin), jeffrey.charrois@gov.ab.ca

PARTENAIRES

EPCOR WATER SERVICE, EDMONTON

SERVICE DES EAUX, VILLE DE CAMROSE, ALBERTA

SERVICES DE LABORATOIRE, ENVIRONNEMENT, VILLE DE QUÉBEC

GESTION DE L'EAU, VILLE DE LÉVIS, QUÉBEC

METROPOLITAN WATER DISTRICT OF SOUTHERN CALIFORNIA

MASSACHUSETTS WATER RESOURCES AUTHORITY, ÉTATS-UNIS

SANTÉ CANADA

ALBERTA HEALTH AND WELLNESS

ALBERTA RESEARCH COUNCIL

DIRECTION DES SERVICES DE LABORATOIRE, MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, ONTARIO

RÉFÉRENCES

ZHAO, Y., ANICHINA, J.; BULL, R.J.; KRASNER, S.W.; HRUDEY, S.E. ET X.-F. LI. « Occurrence and Formation of Chloro- and Bromo-Benzoquinones during Drinking Water Disinfection », *Water Research*, 2012, vol. 46, no 14, p. 4351-4360.

HRUDEY, S.E. ET J.W.A. CHARROIS. *Disinfection By-Products and Human Health*. IWA Publishing, London, mai 2012, 324 p.

BULL, R.J. « Toxicological evaluation of experimental data that informs the magnitude of cancer risk from disinfection by-products » p. 179-212, dans : Hrudehy, S.E. & J.W.A. Charrois. Eds. 2012. *Disinfection By-Products and Human Health*. IWA Publishing, London, mai 2012. 324 p.

BOYD, J.M.; HRUDEY, S.E. ; RICHARDSON, S.D. ET X.-F. LI. « Solid-phase extraction and high-performance liquid chromatography mass spectrometry analysis of nitrosamines in treated drinking water », *Trends in Analytical Chemistry*, 2011, vol. 30, no 9, p. 1410-1421.

HRUDEY, S.E. « Chlorination disinfection by-products, public health tradeoffs and me », *Water Research*, 2009, vol. 43, p. 2057-2092.

ZHAO, Y.-Y., BOYD, J.M., WOODBECK, M., ANDREWS, R.C., QIN, F. HRUDEY, S.E. ET X.-F. LI. « Formation of N-nitrosamines from eleven disinfection treatments of seven different surface waters », *Environmental Science & Technology*, 2008, vol 42, no 3, p. 4857-4862.