

Qualité de l'air intérieur dans les établissements recevant du public (métrologie des contaminants, expositions et effets sanitaires)

Exposition aux sous-produits de chloration retrouvés dans l'air des piscines couvertes : vers une meilleure caractérisation pour une meilleure appréciation des risques sanitaires ?

Période : avril 2009 à août 2009

Luc MOSQUERON

Veolia Environnement Recherche et Innovation – Pôle Évaluation et Veille Sanitaire – Rueil-Malmaison

Mots clés : Air intérieur, Asthme, Chloramines, Chloroforme, Exposition, Piscines, Sous-produits désinfection, THM

Pour garantir leur qualité microbiologique, les eaux des bassins de piscine sont désinfectées, le plus souvent par chloration. En réagissant avec la matière organique apportée par les baigneurs (squames, sueur, urine...), les agents désinfectants forment des sous-produits de désinfection (SPD⁽¹⁾) comme les haloformes (notamment les trihalométhanes ou THM⁽²⁾) ou les chloramines qui peuvent se volatiliser dans l'air des bâtiments et exercer des effets délétères sur les voies respiratoires, en particulier chez les maîtres-nageurs et les jeunes enfants.

Estimation des concentrations en THM dans l'air des piscines et évaluation du risque de cancer

Analyse

Cette étude coréenne (Lee *et al.*, 2009) avait pour objectif de tester l'influence du mode de désinfection des eaux de piscines sur la formation de THM et d'estimer, chez les nageurs, les risques sanitaires associés à l'exposition à ces sous-produits. Durant l'été 2004, les concentrations en THM ont été mesurées dans l'eau des bassins de 183 piscines fermées de la ville de Séoul : 72 utilisant une désinfection par chloration, 86 traitées par ozonation/chloration⁽³⁾ et 25 utilisant une technique électrochimique générant des oxydants (EGMO⁽⁴⁾).

Les résultats montrent que les moyennes géométriques des concentrations en THM dans les bassins diffèrent significativement selon le mode de désinfection ; le chloroforme est le principal des THM mesurés (ozonation/chloration 23,3 +/- 2,2 µg/l, chloration 32,9 +/- 2,4 µg/l, EGMO 58,2 +/- 1,9 µg/l). Il représente plus de 80 % des composés trihalogénés avec les deux premiers procédés de désinfection et seulement 35 % avec l'EGMO qui génère plus de dérivés bromés (bromoforme : 39,5 % des THM, bromodichlorométhane 11,9 % et dibromochlorométhane 13,6 %). Sur la base de ces mesures, les auteurs ont ensuite estimé, à l'aide d'un modèle spécifique, les teneurs en THM attendues dans l'air des bâtiments. Appliquant la démarche classique d'évaluation quantitative des risques sanitaires, le niveau ainsi estimé de

risque de cancer des nageurs associé à l'exposition aux THM toutes voies confondues (inhalation de vapeurs, ingestion d'eau et contact cutané avec l'eau) apparaît largement dominé par l'inhalation, et ce quel que soit le mode de désinfection considéré (de $1,4 \cdot 10^{-3}$ pour la chloration à $7,8 \cdot 10^{-4}$ pour l'EGMO).

Commentaire

Confirmant pour les établissements traités par chloration que le chloroforme est le THM prédominant dans l'eau (Kim *et al.*, 2002), les résultats de Lee *et al.* (2009) montrent qu'une désinfection par EGMO conduit à des mécanismes de formation différents, avec une présence de dérivés bromés et de chloroforme en proportions équivalentes.

Si des études antérieures ont déjà montré l'existence d'une relation significative entre les teneurs en THM dans l'eau et celles retrouvées dans l'air (Caro et Gallego, 2008; Caro et Gallego, 2007), on peut regretter que les auteurs ne présentent pas les valeurs estimées dans l'air avec leur modèle. L'information majeure de cette étude est que les risques de cancer pour les nageurs sont dominés par l'exposition par voie respiratoire, l'influence de l'exposition par ingestion et contact cutané restant toujours faible (niveaux de risque de l'ordre de 10^{-7} à 10^{-6}), y compris dans le cas des piscines utilisant l'EGMO. On peut également regretter que les auteurs n'aient pas estimé les niveaux de risque pour d'autres situations d'exposition chronique (maîtres-nageurs par exemple).

Influence de la configuration des piscines et des activités de leurs occupants sur la présence de chloroforme dans l'air

Analyse

Hsu *et al.* (2009) ont développé un modèle mathématique visant à estimer les concentrations en chloroforme dans l'air des piscines couvertes à partir : des conditions physiques à l'intérieur du bâtiment (vélocité du flux d'air intérieur, température de l'eau et de l'air, volume d'air dans le bâtiment...), du taux d'occupation et des activités pratiquées (nombre de nageurs, visiteurs...) et des concentrations de chloroforme dans les bassins. Les valeurs ainsi estimées ont été confrontées aux teneurs mesurées dans l'air d'une piscine ventilée naturellement.

Les activités des occupants (nombre de nageurs, de visiteurs), le taux de recyclage de l'air et la température de l'eau sont les facteurs les plus influents sur les concentrations estimées de chloroforme dans l'air. L'agitation de l'eau en surface, du fait de la présence des baigneurs, influencerait significativement le transfert de chloroforme de l'eau vers l'air (en présence d'une cinquantaine de baigneurs, les teneurs dans l'air seraient 2 à 3 fois plus élevées qu'en l'absence de nageurs). Selon les auteurs, la bonne capacité prédictive du modèle proposé (il explique 73 % des valeurs mesurées) indique que celui-ci est utilisable dans le cadre d'évaluations des risques sanitaires ou de procédures de management de la qualité de l'air intérieur dans les piscines.

Commentaire

Le modèle proposé est décrit de manière détaillée, mais sa complexité (une cinquantaine d'équations utilisées !) rend sa compréhension difficile pour des non spécialistes. Les résultats confirment d'autres données de la littérature (Aggazzotti *et al.*, 1995; Santa Marina *et al.*, 2009) montrant une relation entre le nombre de nageurs dans les bassins et les concentrations en chloroforme dans l'air; en raison de la forte capacité de volatilisation de l'eau vers l'air du chloroforme, ceci témoigne ainsi que les baigneurs fréquentant les piscines aux heures de pointe seraient les plus exposés.

D'autre part, si ces résultats confirment l'influence notoire du taux de recyclage de l'air, il convient de souligner, selon les résultats d'une enquête de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI, 2007), que si 92 % des piscines en France sont équipées de systèmes de recyclage de l'air, une très faible proportion pratique des contrôles réguliers de l'air.

Évaluation de l'exposition aux THM dans les études épidémiologiques : quelle approche méthodologique ?

Analyse

Une équipe française (Thiriat *et al.*, 2009) a estimé, chez 30 enfants âgés de 4 à 10 ans, l'exposition aux THM par inhalation selon deux approches : (i) approche directe par mesurages individuels en continu pendant 7 jours à l'aide d'échantillonneurs passifs et (ii) approche indirecte basée sur le couplage des concentrations mesurées dans l'air des salles de bain de leur domicile et l'air ambiant des piscines et du budget espace-temps des enfants (renseigné par questionnaire). Les prélèvements d'air ambiants ont été réalisés durant la présence des enfants dans leur salle de bain et pendant une heure à proximité des bassins lorsqu'ils fréquentaient une piscine. Les modalités d'exposition considérées pour calculer la dose inhalée dans l'approche indirecte sont : la prise d'une douche ou d'un bain au domicile et la pratique de la natation.

Dans les salles de bain comme dans les piscines, le chloroforme est le THM prédominant (les teneurs en bromoforme, bromodichlorométhane et dibromochlorométhane sont d'un à deux ordres de grandeur plus faibles, ce qui explique que l'article ne présente de manière détaillée et complète que les résultats concernant le chloroforme). Les concentrations de chloroforme mesurées dans les piscines sont environ 10 fois plus élevées que dans les salles de bain durant un bain ou une douche (médiane 81,3 µg/m³ versus 7,3 µg/m³). Chez les enfants fréquentant une piscine, l'exposition individuelle au chloroforme est 2,5 fois plus élevée que chez les autres enfants (1 µg/m³ versus 0,4 µg/m³).

Les résultats indiquent une corrélation significative ($r_{\text{spearman}} = 0,69$ $p < 0,001$) entre les deux méthodes d'estimation proposées de l'exposition des enfants. L'approche directe fournit des estimations supérieures à l'approche indirecte, suggérant, selon les auteurs, la non prise en compte par la méthode indirecte de l'influence de certains microenvironnements.

Commentaire

L'influence relative des différentes modalités d'exposition aux THM (ingestion d'eau de boisson, inhalation de vapeurs lors d'une douche, d'un bain...) reste difficile à estimer. Concernant l'exposition par voie respiratoire, les résultats confirment, malgré un échantillon de taille réduite (6 enfants seulement par exemple ont fréquenté une piscine), que la fréquentation des piscines augmente les niveaux d'exposition individuelle au chloroforme de manière significative chez des enfants. À noter, comme le soulignent d'ailleurs les auteurs, que quelle que soit l'approche (directe ou indirecte) d'estimation de l'exposition, aucune ne permet de prendre en compte les taux de ventilation⁽⁵⁾ pulmonaire des sujets durant la nage, ce qui pourrait sous-estimer l'influence réelle de la pratique de la natation dans l'exposition respiratoire au chloroforme et plus largement aux autres SPD.

Exposition aux sous-produits de chloration retrouvés dans l'air des piscines couvertes : vers une meilleure caractérisation pour une meilleure appréciation des risques sanitaires ?

Luc MOSQUERON

CONCLUSION GÉNÉRALE

Confirmant les résultats de travaux antérieurs, les articles analysés n'apportent pas d'informations réellement nouvelles.

Les travaux de **Lee et al. (2009)** par exemple confirment que le chloroforme est le trihalométhane le plus abondamment retrouvé dans les eaux traitées par chloration (Kim et al., 2002). S'il existe globalement une corrélation entre les teneurs en sous-produits de désinfection mesurées dans l'eau et dans l'air des piscines, les travaux de **Hsu et al. (2009)** montrent que les facteurs déterminants les niveaux de concentration de chloroforme dans l'air des piscines sont nombreux et leurs interactions complexes ; l'influence réelle de chacun reste donc difficile à quantifier. Les résultats obtenus par ces mêmes auteurs et par **Thiriati et al. (2009)** indiquent que des modèles basés sur la connaissance de paramètres simples (concentrations de chloroforme dans l'eau ou l'air, durée d'exposition des sujets...) peuvent être utilisés pour estimer l'exposition par voie respiratoire des maîtres-nageurs ou nageurs. Toutefois, comme le rappellent à juste titre **Thiriati et al. (2009)**, les modèles actuels n'intègrent pas l'activité ventilatoire des nageurs, ce qui pourrait sous-estimer les estimations fournies pour les nageurs. Comme le suggèrent d'autres travaux (Caro et Gallego, 2008), cette activité ventilatoire accrue, couplée au contact cutané durant la baignade d'une part et aux plus fortes teneurs en trihalométhanes dans l'air à la surface de l'eau d'autre part, pourrait expliquer que les nageurs réguliers soient plus exposés que les maîtres-nageurs. L'ensemble de ces résultats, et notamment ceux de la modélisation mise en œuvre par **Lee et al. (2009)**, indiquent également le rôle majeur de l'inhalation comme voie d'exposition par rapport aux autres voies potentielles, confirmant ce qui a été décrit par des études ayant eu recours par exemple à des dosages biologiques (Caro et Gallego, 2008 ; Caro et Gallego, 2007). Finalement, la caractérisation de l'exposition des sujets fréquentant les piscines reste délicate ; une amélioration des outils ou méthodes d'estimation de ces expositions semble donc nécessaire (Spivey, 2009).

Ces difficultés de caractérisation de l'exposition pourraient expliquer en partie la portée parfois limitée des résultats de certaines études épidémiologiques. En effet, l'impact réel des sous-produits de désinfection sur la santé des nageurs et/ou des employés de piscines (maîtres-nageurs principalement du fait de leur proximité aux bassins) reste aujourd'hui difficile à quantifier. Si les résultats de diverses études récentes laissent suggérer une association entre la qualité de l'air dans les piscines et un impact sur leur santé respiratoire (asthme, rhinites...) (Cotter et Ryan, 2009 ; Kaydos-Daniels et al., 2008 ; Voisin et Bernard, 2008 ; Uyan

et al., 2009), voire sur le risque de cancer (Villanueva et al., 2007), il reste impossible selon une revue récente de la littérature sur l'impact des sous-produits de chloration dans les piscines sur la santé respiratoire des enfants (asthme) (Weisel et al., 2009), d'établir une relation causale en l'état actuel des connaissances. À noter qu'au sein du « mélange complexe » retrouvé dans l'air des piscines, il reste aujourd'hui impossible de désigner le ou les agents (chloroforme, trichloramines...) à l'origine de ces effets allergisants ou irritants (« hypothèse du pool chloré »).

Par ailleurs, si les niveaux de risque sanitaire liés à la fréquentation des piscines restent difficilement quantifiables, les effets bénéfiques pour la santé de la pratique de la natation restent indiscutables. En France, les piscines sont des espaces récréatifs très fréquentés (1950 établissements couverts) (OQAI⁽⁶⁾, 2007). Si certains dispositifs techniques (Ultra-violetts par exemple) permettent de réduire significativement les teneurs en sous-produits de chloration dans les bassins (Hamel, 2007), l'alternative la plus efficace pour diminuer la formation des sous-produits de désinfection dans l'eau et ainsi diminuer l'exposition des baigneurs à certains composés chlorés dangereux repose également sur l'éducation des baigneurs en termes d'hygiène. Pour favoriser la gestion des piscines, diminuer les apports de matière organique dans l'eau des bassins reste peut-être la solution en théorie la plus simple et la moins coûteuse... Mais peut-être aussi la plus difficile à mettre en pratique !

Mots clés utilisés pour la recherche bibliographique

Asthma, Chloramine, Chloroform, Indoor Air Quality, Indoor Air Pollution, Respiratory symptoms, Swimming pool, THM.

Publications analysées

Hsu HT, Chen MJ, Lin CH et al. Chloroform in indoor swimming-pool air: monitoring and modeling coupled with the effects of environmental conditions and occupant activities. *Water Res.* 2009 ; 43(15):3693-704.

Lee J, Ha KT, Zoh KD. Characteristics of trihalomethane (THM) production and associated health risk assessment in swimming pool waters treated with different disinfection methods. *Sci. Total Environ.* 2009 ; 407(6):1990-7.

Thiriati N, Paulus H, Le Bot B et al. Exposure to inhaled THM: comparison of continuous and event-specific exposure assessment for epidemiologic purposes. *Environ. Int.* 2009 ; 35(7):1086-9.

Revue de la littérature

Hamel H. Étude de l'évolution du trichlorure d'azote et des trihalométhanes dans l'eau et l'air des piscines chlorées: exploration des voies de réduction de cette contamination. Thèse de Doctorat en Biologie, Université Rennes 1. 2007; 173 pages.

Uyan ZS, Carraro S, Piacentini G et al. Swimming pool, respiratory health, and childhood asthma: should we change our beliefs? *Pediatr. Pulmonol.* 2009; 44(1):31-7.

Weisel CP, Richardson SD, Nemery B et al. Childhood asthma and environmental exposures at swimming pools: state of the science and research recommendations. *Environ. Health Perspect.* 2009; 117(4):500-7.

Publications de référence

Aggazzotti G, Fantuzzi G, Righi E et al. Environmental and biological monitoring of chloroform in indoor swimming pools. *J. Chromatogr. A.* 1995; 710(1):181-90.

Caro J, Gallego M. Alveolar air and urine analyses as biomarkers of exposure to trihalomethanes in an indoor swimming pool. *Environ. Sci. Technol.* 2008; 42(13):5002-7.

Caro J, Gallego M. Assessment of exposure of workers and swimmers to trihalomethanes in an indoor swimming pool. *Environ. Sci. Technol.* 2007; 41(13):4793-8.

Cotter A, Ryan CA. The pool chlorine hypothesis and asthma among boys. *Ir. Med. J.* 2009; 102(3):79-82.

Kaydos-Daniels SC, Beach MJ, Shwe T et al. Health effects associated with indoor swimming pools: a suspected toxic chloramine exposure. *Public Health.* 2008; 122(2):195-200.

Kim H, Shim J, Lee S. Formation of disinfection by-products in chlorinated swimming pool water. *Chemosphere.* 2002; 46(1):123-30.

Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur. Les piscines couvertes en France: caractéristiques, fréquentation et qualité de l'air. Rapport DESE/SB 2007-59. 2007. 74 pages.

Spivey A. Widening the pool of factors: studies needed to assess asthma-swimming link. *Environ. Health. Perspect.* 2009; 117(4):A162.

Villanueva CM, Cantor KP, Grimalt JO et al. Bladder cancer and exposure to water disinfection by-products through ingestion, bathing, showering, and swimming in pools. *Am. J. Epidemiol.* 2007; 165(2):148-56.

Voisin C, Bernard A. Risques d'affections allergiques associés aux produits de chloration en piscine. *Environ. Risques Santé.* 2008; 7(6):417-23.

Publications non sélectionnées

Santa Marina L, Ibarluzea J, Basterrechea M et al. [Indoor air and bathing water pollution in indoor swimming pools in Guipúzcoa (Spain)]. *Gac. Sanit.* 2009; 23(2):115-20.

Article en espagnol qui décrit les concentrations en THM mesurées dans l'air et l'eau de 20 piscines espagnoles et les associations entre ces concentrations et des variables relatives à la ventilation et les usages des installations.

Weaver WA, Li J, Wen Y et al. Volatile disinfection by-product analysis from chlorinated indoor swimming pools. *Water Res.* 2009; 43(13):3308-18.

Données ciblées sur la qualité de l'eau des bassins et non sur la qualité de l'air.

Lexique

- (1) SPD: Sous-produits de désinfection.
- (2) THM: Trihalométhanes: les principaux représentants sont le chloroforme (CHCl₃), le bromoforme (CHBr₃), le bromodichlorométhane (BDCM) et le dibromochlorométhane (DBCM).
- (3) Ozonation/chloration: utilisation combinée comme agents désinfectants d'ozone complétement en moindre dose par du chlore.
- (4) EGMO: electrochemically generated mixed oxidants (technique électrochimique générant des oxydants).
- (5) Taux de ventilation ou activité ventilatoire: l'activité ventilatoire correspond à la succession de cycles ventilatoires inspiration/expiration. Le volume courant est le volume d'air renouvelé dans les poumons à chaque cycle ventilatoire. Le rythme (ou fréquence) ventilatoire est le nombre de cycles ventilatoires par unité de temps; le débit ventilatoire (L. min⁻¹), qui est égal au volume courant (L) multiplié par la fréquence ventilatoire (min⁻¹), augmente lors de la pratique d'activités sportives. Une augmentation de l'activité ventilatoire augmente les échanges gazeux pulmonaires et peut conduire à une augmentation de l'exposition aux polluants gazeux par voie respiratoire.
- (6) OQAI: Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (<http://www.air-interieur.org>).