

TRAITEMENT UV : SUIVI DE L'ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN CHLOROFORME ET EN TRICHLORURE D'AZOTE DANS LES EAUX DE BAINNADE D'UN CENTRE AQUATIQUE

- Azote trichlorure
- Trichlorométhane
- Chloroforme
- Piscine
- Traitement des eaux
- Irradiation UV

► Fabien GÉRARDIN, Gérard HECHT,
Geneviève HUBERT-PELLE, Isabelle SUBRA
INRS, Département Ingénierie des procédés

Confrontés à des niveaux d'exposition élevés du personnel de surveillance au trichlorure d'azote ainsi qu'à des teneurs importantes en chlore combiné dans les eaux de baignade, les exploitants de centres aquatiques font de plus en plus fréquemment le choix de systèmes complémentaires de traitement des eaux, basés sur l'irradiation UV. Appliquée à un milieu chloré et riche en substances anthropiques, cette technologie est à l'origine de la formation de sous-produits indésirables tels que le chloroforme (cancérogène, catégorie 2B). Pendant huit semaines, l'INRS a suivi l'évolution des concentrations en chloroforme et en trichlorure d'azote dans l'eau de deux bassins équipés respectivement de lampes basse et moyenne pressions. Cette étude met en évidence la forte contribution de l'irradiation UV à la formation du chloroforme et une possible augmentation du trichlorure d'azote dissous. Cette observation, préoccupante pour les hygiénistes du travail, s'inscrit également dans un cadre de santé publique.

UV PROCESS: CHLOROFORM AND NITROGEN TRICHLORIDE LEVEL MONITORING IN INDOOR SWIMMING POOL WATERS

Faced with high levels of supervisory staff exposure to nitrogen trichloride and high combined chlorine contents of pool water, indoor swimming pool operators choose, increasingly often additional, water treatment systems based on UV irradiation. Applied to a chlorinated environment rich in anthropic substances, this technology results in formation of undesired by-products such as chloroform (Category 2B carcinogenic). For eight weeks, INRS monitored chloroform and nitrogen trichloride concentrations in water from two baths equipped with low and medium pressure lamps respectively. This study reveals the significant contribution of UV irradiation to chloroform formation and possible dissolved nitrogen trichloride increase. This observation, of concern to occupational hygiene specialists, also falls within the scope of public health.

CONTEXTE ET OBJECTIF

Si le chlore est, à ce jour, l'agent désinfectant le plus communément employé dans les centres aquatiques, il n'en demeure pas moins un produit particulièrement réactif au contact des substances azotées et carbonées contenues dans l'eau de baignade [1]. Apportées en fortes quantités dans les bassins, ces substances d'origine anthropique sont, avec le chlore, au cœur d'une chimie très complexe. Cette chimie conduit, entre autres, à la formation de sous-produits tels que les trihalométhanes (THM)¹, les acides halogéno-acétiques, les halogéno-cétones [2, 3] et les chloramines dont la forme la plus

halogénée, le trichlorure d'azote (trichloramine, NCl_3), très volatil [4]. Dégazé dans les halls des établissements, ce dernier, irritant pour les voies respiratoires et pour les yeux, est à l'origine des plaintes enregistrées auprès du personnel de surveillance posté à proximité des bassins [5].

Principale source de préoccupation des personnels de piscine et des hygiénistes du travail, le trichlorure d'azote a fait l'objet d'études toxicologiques, épidémiologiques et technologiques.

¹ Trihalométhanes (THM) : dénomination regroupant, le chloroforme (CHCl_3), le bromodichlorométhane (CHBrCl_2), le chlorodibromométhane (CHBr_2Cl) et le bromoforme (CHBr_3).

- Nitrogen trichloride
- Trichloromethane
- Chloroform
- Swimming pool
- Water treatment
- UV irradiation

Ces travaux ont abouti d'une part, à la proposition d'une valeur moyenne d'exposition égale à $0,5 \text{ mg.m}^{-3}$ dans l'air, valeur à partir de laquelle les salariés ressentent une gêne [6, 7] et d'autre part, à proposer des solutions de prévention destinées à réduire les niveaux d'exposition [8, 9].

Les autres chloramines contenues dans les eaux, regroupées sous la dénomination de chlore combiné, sont beaucoup moins volatiles que le trichlorure d'azote. Si la teneur en chlore combiné ne présente que peu d'intérêt pour l'évaluation des risques professionnels, elle fait l'objet d'une attention particulière de la part des propriétaires et des exploitants de centres nautiques. En effet, les autorités sanitaires françaises ont défini une valeur réglementaire de la teneur en chlore combiné dans les eaux de baignade à ne pas dépasser, égale à $0,6 \text{ mg.L}^{-1}$ [10]. Très difficile à respecter durant les jours de grande affluence, cette valeur est fréquemment dépassée dans les établissements à vocation ludique. Au-delà du contrôle de l'application des règles élémentaires d'hygiène de la clientèle, l'exploitant ne disposait pas, jusqu'à ces dernières années, de solution permettant la maîtrise de ce paramètre. La dilution, c'est-à-dire l'apport massif d'eau neuve en début de journée, demeurait le seul moyen de réduire significativement la teneur en chlore combiné.

Depuis quelques années, des appareils équipés de lampes à vapeur de mercure émettant un rayonnement ultra-violet (UV), ont fait leur apparition sur le marché avec pour vocation l'élimination du chlore combiné présent dans l'eau de piscine. Traditionnellement mise en œuvre à des fins germicides à la longueur d'onde de $253,7 \text{ nm}$, l'irradiation UV a été largement développée pour la désinfection de l'eau potable [11, 12].

Ces appareils, couramment appelés déchloramineurs, sont équipés de lampes monochromatiques (basse pression) ou de lampes polychromatiques (moyenne pression). Puissantes, avec un spectre d'émission qui s'étend d'environ 189 nm à 400 nm , ces dernières sont, en général, destinées à traiter de gros volumes de bassin. En revanche, compte tenu de leurs faibles puissances, les lampes basse pression, dont le spectre d'émission est centré sur $253,7 \text{ nm}$, ne sont proposées que pour traiter de faibles débits d'eau.

Le principe de dégradation des substances dissoutes repose sur l'absorption du rayonnement UV (photons) par les molécules comprenant une ou plusieurs liaisons azote - chlore (N-Cl). La rupture de la liaison se produit lorsque l'énergie absorbée est supérieure à l'énergie de liaison des deux atomes (photolyse). Il y a alors formation de composés « libres » tels que Cl° , très réactifs chimiquement. La création de ces éléments actifs conduit également la formation de radicaux OH° dont le pouvoir oxydant sur la matière organique est fort (photo-oxydation). Les appareils utilisés sont placés dans la boucle de recirculation de l'eau, après l'étape de filtration et avant l'appoint en chlore.

Le chlore comme d'autres halogènes intervient dans les processus complexes de la pollution atmosphérique en relation avec une exposition solaire. De très nombreux composés sont produits par photo-transformation à partir des polluants générés par l'homme.

À la lumière des connaissances de la photochimie atmosphérique et à partir d'une étude conduite sur une installation pilote par Judd et al. [13], il a été suspecté la possible augmentation de la concentration en THM (notamment en chloroforme) dans l'eau, après la mise en fonctionnement d'un déchloramineur.

Classé cancérigène probable pour l'Homme (groupe 2B) par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC), le chloroforme a fait l'objet de nombreuses investigations scientifiques dans le domaine des eaux de piscines. Dans des conditions de chloration habituelles, le chloroforme dissous est l'haloforme majoritaire. Il représente environ 85 % de la concentration totale en trihalométhanes [14]. Différents auteurs indiquent que certaines eaux de baignade contiennent jusqu'à $200 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ de CHCl_3 [15, 16, 17].

Même si, dans la plupart des situations, les valeurs relevées pour le chloroforme sont inférieures à la norme de potabilité de $200 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ définie par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), l'exposition des usagers de centres aquatiques mérite que l'on s'en préoccupe [14]. En effet, Beech et al. [18] ont montré que la pénétration du chloroforme dans l'organisme d'un enfant de 6 ans immergé dans une eau de piscine, s'effectue à 60 % par voie cutanée, 30 %

par voie respiratoire et 10 % par ingestion. Lindström et al. [19] ont mis en exergue que 80 % du chloroforme sanguin chez un nageur est attribuable à un passage percutané. L'OMS considère que l'ensemble de la population fréquentant les établissements aquatiques (enfants, nageurs occasionnels, nageurs de haut niveau, maîtres-nageurs) est exposé de manière importante [20]. Dans ce contexte, certains pays européens, comme le Danemark et l'Allemagne, ont défini une valeur réglementaire de la concentration maximale en THM totaux dans les eaux de baignade égale à $20 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ [21].

À ce jour, peu de travaux destinés à évaluer l'incidence du traitement UV sur la composition d'une eau de baignade ont été menés. Bisted [22] et Cassan [23] ont mis en évidence le fait qu'un déchloramineur UV – moyenne pression induit une réduction globale de la teneur en chlore combiné dans les bassins de l'ordre de 50 %. Cependant, ces études montrent une augmentation significative de la concentration totale en THM, et notamment en chloroforme. Proposés initialement pour améliorer la qualité de l'air et de l'eau des piscines, les déchloramineurs UV font donc l'objet de fortes préoccupations.

L'INRS propose dans cet article d'apporter, aux préventeurs et aux professionnels, des éléments d'information supplémentaires sur les conséquences de la mise en place de dispositifs UV, basse et moyenne pressions, pour la qualité d'une eau de baignade préalablement chlorée.

Ainsi, pendant huit semaines, un suivi de l'évolution des concentrations en chloroforme, en chlore combiné et en trichlorure d'azote a été réalisé dans les eaux de deux bassins d'un centre aquatique ludique équipés respectivement d'un déchloramineur UV basse et moyenne pressions. Cette démarche ne constituait pas une étude paramétrée de l'incidence des lampes UV sur la composition d'une eau de piscine. Il s'agissait de suivre, au cours du temps, l'évolution des substances concernées dans des conditions d'exploitation stabilisées et habituelles de l'établissement. Toutefois, l'évolution de la concentration en Carbone Organique Total (COT, indicateur de la pollution organique globale) contenu dans les eaux pourra être comparée à celles de CHCl_3 et de NCl_3 .

Le suivi hebdomadaire de l'exposition atmosphérique des maîtres-nageurs à CHCl_3 et à NCl_3 n'a pu être réalisé conjointement au suivi des composés en solution. Les conditions météorologiques estivales contraignaient le personnel à ouvrir l'ensemble des baies vitrées de l'établissement. À titre d'information, les résultats d'une campagne de mesures, menée dans ce centre quelques mois auparavant et destinée à évaluer l'exposition des maîtres-nageurs à ces polluants, sont abordés dans ce document.

TABLEAU 1

Caractéristiques principales des différents bassins de la piscine
Main characteristics of different swimming pool baths

Bassins	Volume (m ³)	Température de l'eau (°C)*	Débit d'eau recyclée (m ³ .h ⁻¹)*
Sportif	829	26	200
Ludique	167	30	200
Pataugeoire	9	26	20
Spa	5	33	-
Toboggan	21	30	20

* Informations issues de l'instrumentation de la piscine.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉTABLISSEMENT AQUATIQUE

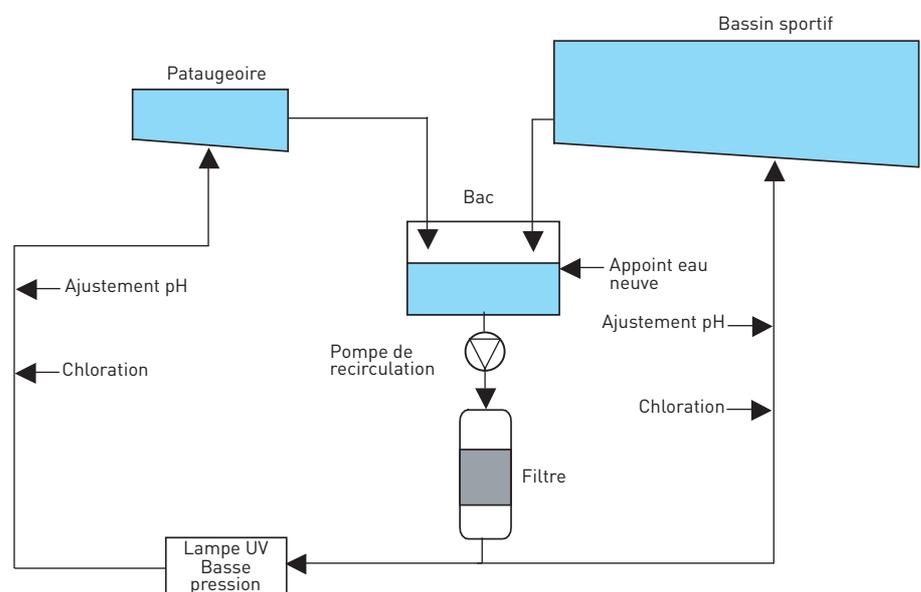
L'étude a été menée dans un centre aquatique à vocations sportive et ludique, dont la Fréquentation Maximale Instantanée (FMI) est de 350 personnes. L'établissement est composé de deux zones d'activité distinctes : la première regroupant le bassin sportif (15 m x 25 m), la « pataugeoire » et le spa, la seconde intégrant le bassin ludique et le toboggan. L'ensemble des bassins fonctionne en hydraulique inversée. Chacune des deux parties possède sa propre centrale de traitement d'air et un circuit d'eau indépendant. Il est à noter que les deux zones communiquent entre elles par un étroit couloir.

Paramètres généraux de fonctionnement (cf. Tableau 1) :

- température moyenne de l'air des halls : 26 – 27°C ;
- humidité relative moyenne : 65 ± 10 % ;
- filtres à sable ;
- ventilation générale respective de la zone sportive et de la zone ludique : 11 500 m³.h⁻¹ et 20 000 m³.h⁻¹. L'apport d'air neuf dans chacune des deux zones est ajusté par une régulation asservie à l'humidité relative ;
- volumes respectifs des halls des zones sportive et ludique : 6 230 m³ et 5 200 m³ ;
- chloration par ajout d'hypochlorite de sodium non stabilisé ;
- régulation de pH par ajout d'acide chlorhydrique ou de soude.

FIGURE 1

Circuit hydraulique de la pataugeoire et du bassin sportif
Paddling pool and sports bath hydraulic circuit



Il est important de mentionner qu'à des fins récréatives, le bassin ludique et la pataugeoire sont aérés à l'aide de diffuseurs placés en fond de bassin délivrant respectivement 500 et 100 m³.h⁻¹ d'air.

CARACTÉRISTIQUES DES LAMPES UV

Lampe UV basse pression

Une lampe UV basse pression (Rime SA, modèle RUV1P) est placée sur le circuit hydraulique de la pataugeoire. Elle assure, à l'état neuf, une puissance de 30 mW.cm⁻², soit une dose énergétique de 24 mJ.cm⁻² pour un temps de contact de l'ordre de 0,8 s. Le fonctionnement de la lampe est continu. Compte

tenu de la particularité du schéma hydraulique de la piscine, les eaux de la pataugeoire et du bassin sportif alimentent un bac tampon commun (cf. Figure 1). La conséquence de ce montage est la présence, dans le bassin sportif, d'eau traitée par UV. Une lampe neuve a été installée au début de la campagne de mesures.

Lampe UV moyenne pression

Le bassin ludique est équipé d'une lampe UV moyenne pression (Cifec SA, modèle DC 125 - 1) (cf. Figure 2). Cette lampe assure, à l'état neuf, une puissance de 215 mW.cm⁻², soit une dose énergétique de 150 mJ.cm⁻² pour un temps de contact de 0,7 s. La lampe n'a pas été remplacée pour cette campagne de

mesures et présentait, selon l'information indiquée sur l'écran de contrôle, un rendement de 60 % - 70 %, soit une dose de l'ordre de 100 mJ.cm⁻² et une puissance d'environ 140 mW.cm⁻². La lampe fonctionne en continu et dispose d'un système de nettoyage automatique de son fourreau de quartz.

PROTOCOLE

La démarche de l'étude a consisté à suivre l'évolution des concentrations aqueuses en chloroforme et en trichlorure d'azote, en effectuant des prélèvements d'eau dans la pataugeoire et dans les bassins sportif et ludique. Des mesures du COT, du chlore libre et combiné ont également été effectuées pour chaque bassin. Le COT est considéré comme un indicateur de la pollution organique contenue dans le milieu. L'étude s'est déroulée pendant huit semaines en effectuant des prélèvements hebdomadaires : le mardi après-midi (J1) et le mercredi matin (J2). La campagne de prélèvements a été organisée en fonction des périodes de fonctionnement et d'arrêt des lampes UV, selon le canevas présenté *Tableau II*.

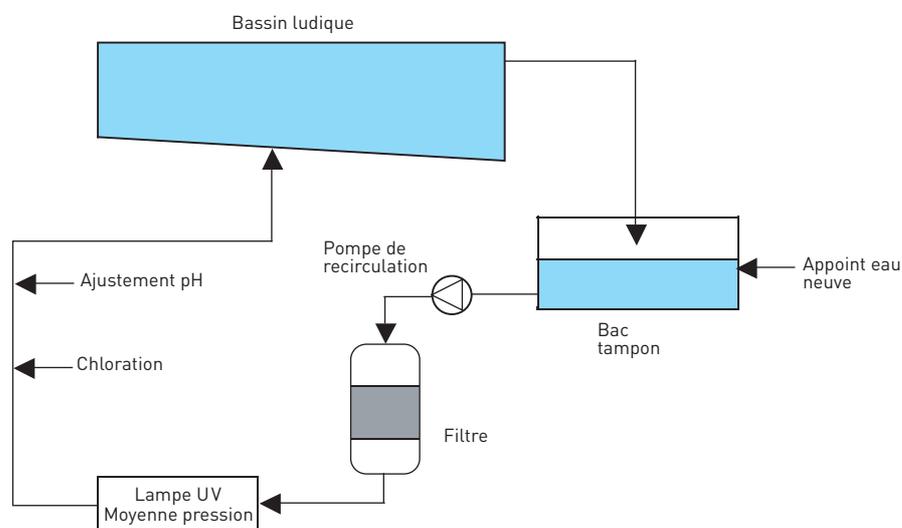
Le centre aquatique a procédé à la vidange de l'ensemble de ses bassins quelques mois avant le début de la campagne. L'eau étudiée n'est donc pas une eau neuve.

Conjointement à ces prélèvements, un relevé systématique des paramètres opératoires de la piscine a été effectué :

- pH de chaque bassin ;
- température de l'eau de chaque bassin ;
- apport d'eau neuve hebdomadaire par bassin ;
- fréquentation hebdomadaire cumulée ;
- dose énergétique délivrée par chaque lampe.

FIGURE 2

Circuit hydraulique du bassin ludique Play pool hydraulic circuit



PRÉLÈVEMENTS ET ANALYSES

L'ensemble des prélèvements d'eau a été effectué à raison de deux séries par journée de mesures. L'échantillonnage s'est déroulé de manière identique durant la campagne.

Le chloroforme (CHCl₃)

Le prélèvement et l'analyse du chloroforme dissous sont réalisés selon le protocole défini par la Norme Française ISO 10301 [24]. L'échantillonnage consiste à prélever un volume de 10 mL d'eau dans un flacon en verre contenant 100 µL d'une solution de thiosulfate de sodium à 30 g.L⁻¹ (neutralisation du chlore libre) et 1 mL de sulfure de carbone (extraction liquide-liquide).

L'analyse de l'extrait est effectuée au laboratoire, dans un délai maximum de

48 h, en chromatographie en phase gazeuse (CG) couplée à un détecteur à spectrométrie de masse (SM) (couplage GC-SM Shimadzu QP 5050A). Le détecteur de masse fonctionne en mode ions ciblés (5 ions sélectionnés pour l'identification de chaque composé, les 2 ions majoritaires sont utilisés pour la quantification).

Les conditions chromatographiques sont :

- colonne : AT1 60 m x 0,25 mm (Alltech référence 15941) ;
- gaz vecteur : hélium, débit : 0,7 ml.mn⁻¹ ;
- température injecteur : 250°C, détecteur : 250°C ;
- programmation température : 30°C pendant 5 mn puis chauffage jusqu'à 140°C à 5°C.mn⁻¹ ;
- injection en mode split (1:20).

TABLEAU II

État de fonctionnement des lampes UV durant la campagne de mesures UV lamp operating condition during measurement campaign

Semaines de prélèvements								
	1	2	3	4	5	6	7	8
Lampe moyenne pression	En service (arrêt le mardi soir)	À l'arrêt (en service le mardi soir)	En service	En service	En service	En service	En service	En service
Lampe basse pression	À l'arrêt (lampe hors service)	À l'arrêt (lampe hors service)	En service (lampe neuve)	En service				

Le rendement d'extraction par du sulfure de carbone (CS_2) du chloroforme dissous a été validé par différents essais. Ces essais ont consisté à effectuer des ajouts dosés de CHCl_3 dans de l'eau ultra-pure, dans de l'eau de réseau et dans une eau de piscine. Les rendements d'extraction sont voisins de 95 % dans le cas de l'eau ultra-pure contre environ 90 % pour les eaux de réseau et de piscine.

Il est important de noter qu'une autre technique analytique, dite « head-space », est également décrite dans la norme ISO 10301 [24]. Couramment mise en œuvre par certains laboratoires pour l'analyse de THM contenus dans les eaux, elle se révèle inadaptée pour l'analyse de THM dans les eaux de piscine. En effet, des travaux ont démontré que certaines molécules, de types acides halogéno-acétiques et halogéno-acétones, se décarboxyleront facilement par chauffage et interfèrent dans la quantification des THM [25-26]. Cette technique peut donc conduire à surestimer la teneur de ces derniers composés, et en particulier CHCl_3 .

Le trichlorure d'azote (NCl_3 ou trichloramine)

Le prélèvement et l'analyse du trichlorure d'azote dissous sont réalisés à l'aide de la méthode mise au point par l'INRS [27]. Le principe repose sur un échantillonnage, en continu, de l'eau à analyser suivi d'une extraction de ce produit à l'air dans une colonne garnie de laboratoire. La trichloramine, une fois transférée dans la phase gaz, est piégée et analysée par la méthode traditionnelle de mesure atmosphérique des chloramines [5]. La concentration aqueuse en trichlorure d'azote est déduite par un bilan matière. Cette technique, simple et fiable de par sa conception, permet d'évaluer des concentrations en NCl_3 dissous très faibles, de l'ordre de quelques $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Au-delà de sa sensibilité, cette technique de prélèvement en continu permet d'écartier les doutes concernant la représentativité d'un échantillonnage réalisé à l'aide d'un simple flacon. En effet, la grande volatilité du trichlorure d'azote conduit à penser qu'une quantité de matière non négligeable peut être perdue entre le moment du prélèvement manuel de la solution et celui de son analyse. Cependant, la durée d'échantillonnage étant voisine d'une à deux heures, la concentration aqueuse

TABLEAU III

Localisation des points de mesures et composés analysés Measuring point location and analysed compounds

Localisation	Nombre de points de mesures	CHCl_3	NCl_3	Chlore libre, total, combiné	COT
Pataugeoire	1	x	-	-	x
Bassin sportif	2	x	-	-	x
Bassin ludique	3	x	-	-	x
Alimentation pataugeoire	1	x	x	x	-
Alimentation bassin ludique	1	x	x	x	-
Réseau eau neuve	1	x	x	x	x

déterminée ne sera qu'une valeur moyenne.

Le chlore libre, total et combiné

La détermination de la concentration des différentes formes de chlore en solution est couramment réalisée par spectrophotométrie. En effet, en milieu neutre, le chlore libre (HClO , ClO^-) oxyde la N,N-diéthyl-paraphénylènediamine (DPD) en radical semiquinone de couleur rouge. Par ailleurs, l'addition d'un excès d'iodure de potassium permet de déterminer le chlore total (ensemble du chlore présent dans l'échantillon sous forme de chlore libre et de chlore combiné). L'absorbance de la solution est mesurée à 550 nm par un spectrophotomètre de marque Hanna®. La teneur en chlore combiné est obtenue par différence entre la teneur en chlore total et la teneur en chlore libre.

D'après Soulard et al. [28], cette méthode permet le dosage du chlore total et une estimation de la teneur en chlore libre. Bien qu'approximative, cette méthode a été tout de même retenue dans le cadre de cette intervention pour sa simplicité de mise en œuvre.

Le Carbone Organique Total (COT)

La concentration en COT en solution est déterminée selon la norme NF EN 1484 [29] dont le principe repose sur l'oxydation (thermique, photochimique ou chimique) des composés organiques contenus dans l'échantillon. L'oxydation de ces composés conduit à la formation de dioxyde de carbone (CO_2) qui est mesuré par spectrométrie infrarouge ou par potentiométrie.

Le pH et la température

Le pH est mesuré par potentiométrie à l'aide d'une électrode de verre munie d'une compensation de température. La température de l'eau est mesurée par une sonde Pt 100.

LOCALISATION DES POINTS DE MESURES (cf. Tableau III)

Les prélèvements effectués dans les conduits alimentant les bassins en eau ont été réalisés en aval des lampes UV. Ces points de mesures ont été choisis pour suivre l'évolution du NCl_3 en solution, l'opération étant impossible dans les bassins (alimentation en 220 V indispensable).

RÉSULTATS

FRÉQUENTATION

La fréquentation indiquée est une valeur cumulée sur sept jours, du mercredi au mardi suivant (cf. Tableau IV). Ce paramètre intègre l'ensemble des populations fréquentant l'établissement (scolaires, associations, clientèle libre, sapeurs pompiers, etc.). Compte tenu de la durée de la campagne de mesures, il n'a pas été aisé d'observer une fréquentation hebdomadaire stable pendant les huit semaines. Durant les quatre premières semaines, la variation hebdomadaire de la Fréquentation Cumulée (FC) est faible. Sur cette période, la FC moyenne est d'environ 5 800 personnes par semaine. En revanche, la

TABLEAU IV

Relevé des paramètres de fonctionnement Operating parameter record

Bassins	Paramètres	Semaines de prélèvements															
		1		2		3		4		5		6		7		8	
		J1	J2	J1	J2	J1	J2	J1	J2	J1	J2	J1	J2	J1	J2	J1	J2
Sportif et pataugeoire	pH	7,4	7,4	7,4	7,4	7,3	7,3	7,3	7,3	7,2	7,2	7,2	7,2	NR	NR	7,1	7,2
	Température eau (°C)	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	NR	NR	26	26
	Apport eau neuve (m3)	240		196		250		216		292		239				1041	
	Renouvellement bassin (%)	29		23		30		26		35		28				124	
	Dose lampe basse pression (mJ.cm ⁻²)	0	0	0	0	0	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Ludique	pH	7,1	7,1	7,3	7,3	7,2	7,2	7,4	7,4	7,4	7,4	7,2	7,3	NR	NR	7,2	7,3
	Température eau (°C)	30	30	32	31	31	29	33	33	32	32	30	31	NR	NR	31	30
	Apport eau neuve (m3)	86		255		173		184		176		167				218	
	Renouvellement bassin (%)	46		137		93		99		95		90				117	
Établissement	Dose lampe moyenne pression (mJ.cm ⁻²)	82	0	0	83	93	96	112	112	100	104	98	97	NR	NR	95	103
	Fréquentation cumulée (FC)	5666		5703		6126		5622		6913		7915		4783		4183	
	Variation FC sem n / sem n-1 (%)	-		1		7		-8		23		14		-40		-12	

NR : valeur non relevée.

fréquentation des semaines 5 et 6 s'est accrue, respectivement de 20 % et 36 % par rapport à la moyenne des semaines précédentes. Cette hausse sensible s'explique par les conditions météorologiques estivales et la fin de l'année scolaire. Le début des vacances d'été (semaines 7 et 8) est marqué par un net recul de la fréquentation avec une variation hebdomadaire (semaine n / semaine n-1), respectivement de - 40 % et - 12 %.

APPORT D'EAU NEUVE ET PARAMÈTRES DE FONCTIONNEMENT

L'apport d'eau neuve est géré séparément entre les bassins sportif et ludique. En fonctionnement habituel, c'est-à-dire hors périodes scolaires, les appoints en eau neuve permettent de renouveler, chaque semaine, 23 - 35 % du volume du bassin sportif et de la pataugeoire contre 90 - 100 % pour le bassin ludique. L'apport d'eau est demeuré régulier au cours de la campagne de mesures avec, toutefois un taux de renouvellement du bassin ludique de l'ordre de 137 % lors de la semaine 2. Sans traitement UV depuis plusieurs mois, il n'a pas été jugé utile d'accroître les ajouts d'eau neuve dans le bassin sportif et la pataugeoire avant la remise en service de la lampe basse pression. Il est à noter que, malgré la baisse notable de la fréquentation durant les semaines 7 et 8, le volume du bassin sportif a été renouvelé à hauteur de 124 %.

Dépendants d'un dispositif de régulation, les paramètres physico-chimiques tels que le pH et la température n'ont pas évolué de manière remarquable durant la campagne de mesures (cf. *Tableau IV*).

COMPOSÉS CHIMIQUES

Les résultats des mesures de concentrations des différents composés sont, pour chaque bassin, des valeurs moyennes par journée de prélèvements. Les résultats, qui correspondent aux prélèvements dans les conduits d'alimentation en eau des bassins, sont également des valeurs moyennées par journée (cf. *Tableaux V et VI*). Par commodité d'interprétation, les résultats sont regroupés sous forme de graphiques en valeurs relatives (C/C₀) pour chaque bassin. C₀ est alors une valeur de référence qui correspond à la concentration de chacune des substances mesurée avant la remise en service des lampes. Les résultats sont présentés distinctement pour J1 et J2. La pataugeoire et le bassin ludique sont fortement aérés (bullage direct dans les bassins) au cours de J1, alors que J2 succède à une période de 12 h de fonctionnement sans aération. Par ailleurs, suite à des contraintes logistiques du laboratoire, il n'a pas été possible de réaliser des prélèvements durant les journées J2 - semaine 4 et J1 - J2 - semaine 7.

Chloroforme

La teneur en chloroforme mesurée dans l'eau de la pataugeoire, lors des semaines précédant la mise en fonctionnement de la lampe basse pression, est stable (cf. *Tableau V*). Voisine de 12 µg.L⁻¹, cette valeur est choisie comme valeur de référence (C₀). La concentration en CHCl₃ progresse sensiblement dès le premier jour (J1) de l'irradiation pour atteindre 1,3.C₀. La valeur de 1,8.C₀ est atteinte le lendemain matin (J2) (cf. *Figure 3a*). La progression se poursuit régulièrement jusqu'à la semaine 6 pour atteindre 2,6.C₀. Malgré la baisse de la fréquentation et l'importante quantité d'eau neuve apportée au cours des semaines 7 et 8, la teneur en CHCl₃ se stabilise autour de 2,5.C₀. La concentration mesurée avec le système de bullage en fonctionnement est inférieure de 12 % à 30 % à celle relevée avec le système à l'arrêt.

Le bassin sportif n'est pas directement traité par la lampe UV basse pression. Bien qu'atténuée, l'évolution de la concentration en CHCl₃ dans ce bassin est proche de celle caractérisée dans la pataugeoire (cf. *Figure 3b*). La semaine 6 indique une concentration maximale de 1,9.C₀. En revanche, le bassin n'étant pas aéré, les valeurs recueillies à J1 sont proches de celles relevées à J2.

Les résultats, issus des prélèvements effectués dans le conduit d'alimentation

TABLEAU V

Moyennes et étendues des concentrations aqueuses en CHCl₃ et en COT dans les bassins
Mean values and ranges of CHCl₃ and COT aqueous concentrations in different baths

Bassins	Paramètres	Semaines de prélèvements															
		1		2		3		4		5		6		7		8	
		J1	J2	J1	J2	J1	J2	J1	J2	J1	J2	J1	J2	J1	J2	J1	J2
Pataugeoire	CHCl ₃ (µg.L ⁻¹)	-	-	12,5 (11,6-13,4)	12,7 (12,6-12,9)	16,9 (16,7-17,2)	23,3 (-)	21,8 (-)	NR	25,8 (24,2-27,5)	30,5 (-)	28,9 (28,8-29,0)	32,6 (-)	NR	NR	23,0 (22,1-24,0)	32,1 (-)
	COT (mg C.L ⁻¹)	-	-	4,0 (-)	4,0 (-)	4,0 (-)	4,0 (-)	4,2 (-)	NR	4,2 (-)	4,2 (-)	5,0 (-)	5,0 (-)	NR	NR	3,5 (-)	3,5 (-)
Sportif	CHCl ₃ (µg.L ⁻¹)	-	-	21,0 (19,2-23,6)	21,2 (21,0-21,5)	23,7 (22,9-23,8)	23,9 (23,0-24,9)	28,3 (28,2-28,5)	NR	34,7 (31,2-37,1)	33,1 (31,2-33,9)	39,7 (36,4-42,4)	34,0 (33,6-34,4)	NR	NR	30,6 (30,1-31,1)	33,7 (32,3-35,2)
	COT (mg C.L ⁻¹)	-	-	3,9 (3,6-4,2)	3,9 (3,6-4,2)	3,9 (3,7-4,2)	3,9 (3,7-4,2)	4,0 (3,7-4,4)	NR	4,0 (3,8-4,4)	4,0 (3,8-4,4)	5,3 (5,3-5,4)	5,3 (5,3-5,4)	NR	NR	3,5 (3,4-3,7)	3,5 (3,4-3,7)
Ludique	CHCl ₃ (µg.L ⁻¹)	-	28,6 (25,6-31,7)	12,6 (11,0-13,6)	21,5 (20,2-22,4)	21,4 (19,1-23,4)	36,5 (35,1-38,5)	29,3 (26,1-31,8)	NR	24,8 (23,9-26,3)	39,8 (35,7-44,7)	25,1 (24,7-25,7)	41,7 (40,0-44,6)	NR	NR	25,7 (23,8-28,6)	49,5 (45,9-52,1)
	COT (mg C.L ⁻¹)	-	6,8 (6,3-7,0)	6,7 (6,4-6,9)	6,7 (6,4-6,9)	6,6 (6,1-7,0)	6,6 (6,1-7,0)	6,8 (6,6-6,9)	NR	7,0 (6,3-7,8)	7,0 (6,3-7,8)	7,0 (6,6-7,8)	7,0 (6,6-7,8)	NR	NR	7,3 (7,3-7,4)	7,3 (7,3-7,4)

NR : valeur non relevée ;

(-) : étendue négligeable.

TABLEAU VI

Moyennes et étendues des concentrations aqueuses en CHCl₃, NCl₃, chlore libre, chlore total et en chlore combiné dans le conduit d'alimentation de la pataugeoire et du bassin ludique
Mean values and ranges of CHCl₃, NCl₃, free chlorine, total chlorine and combined chlorine aqueous concentrations in paddling pool and play pool supply pipe

Bassins	Paramètres	Semaines de prélèvements															
		1		2		3		4		5		6		7		8	
		J1	J2	J1	J2	J1	J2	J1	J2	J1	J2	J1	J2	J1	J2	J1	J2
Alimentation pataugeoire	CHCl ₃ (µg.L ⁻¹)	21,8 (20,9-22,7)	21,7 (21,6-21,8)	19,4 (19,3-19,6)	33,6 (31,6-35,5)	21,7 (21,3-22,0)	20,6 (19,5-21,8)	24,8 (-)	NR	32,9 (31,2-34,6)	29,4 (-)	35,1 (33,0-37,1)	NR	NR	NR	27,4 (27,3-27,5)	29,4 (-)
	NCl ₃ (µg.L ⁻¹)	24 (20-28)	31 (29-33)	23 (19-31)	22 (21-24)	30 (30-31)	41 (35-47)	36 (-)	NR	35 (-)	42 (-)	48 (41-56)	57 (-)	NR	NR	52 (50-55)	63,5 (52-75)
	Chlore total (mg.L ⁻¹)	2,7 (2,6-2,8)	2,5 (2,3-2,7)	2,2 (2,1-2,4)	1,4 (-)	2,4 (2,3-2,4)	2,1 (2,1-2,2)	2,1 (-)	NR	2,5 (2,4-2,7)	NR	2,3 (2,2-2,5)	2,4 (-)	NR	NR	3,7 (3,5-3,8)	3,8 (-)
	Chlore libre (mg.L ⁻¹)	2,0 (1,9-2,1)	1,7 (1,5-1,9)	1,4 (1,3-1,6)	1,0 (1,0-1,1)	1,8 (1,8-1,9)	1,6 (1,4-1,8)	1,7 (1,5-1,9)	NR	2,0 (1,8-2,4)	NR	1,9 (1,7-2,1)	2,0 (-)	NR	NR	2,6 (2,5-2,7)	2,7 (-)
	Chlore combiné (mg.L ⁻¹)	0,7 (0,5-0,8)	0,8 (0,4-1,2)	0,8 (-)	0,4 (0,3-0,4)	0,6 (-)	0,5 (0,5-0,6)	0,4 (0,4-0,5)	NR	0,5 (0,5-0,6)	NR	0,4 (0,4-0,5)	0,4 (-)	NR	NR	1,1 (1,0-1,1)	1,1 (-)
	Alimentation bassin ludique	CHCl ₃ (µg.L ⁻¹)	19,7 (17,6-21,9)	21,1 (21,0-21,2)	12,2 (12,1-12,3)	20,2 (20,0-20,5)	20,9 (19,7-22,1)	31,2 (31,1-31,4)	31,9 (-)	NR	27,5 (-)	36 (-)	26,2 (-)	NR	NR	NR	31,3 (29,2-33,5)
NCl ₃ (µg.L ⁻¹)	34 (27-41)	28 (26-31)	37 (30-45)	22 (19-25)	28 (21-35)	30 (25-36)	22 (-)	NR	14 (-)	15 (-)	17 (-)	41 (-)	NR	NR	33 (31-35)	43 (43-44)	
Chlore total (mg.L ⁻¹)	2,9 (2,8-3,1)	3,2 (3,1-3,4)	2,8 (-)	2,3 (2,3-2,4)	2,2 (2,0-2,4)	2,6 (2,5-2,7)	1,6 (1,6-1,7)	NR	1,6 (1,6-1,7)	NR	1,5 (-)	1,5 (-)	NR	NR	2,3 (2,2-2,4)	2,6 (-)	
Chlore libre (mg.L ⁻¹)	2,1 (2,0-2,3)	2,6 (2,5-2,7)	2,0 (1,8-2,2)	2,0 (1,9-2,1)	1,7 (1,4-2,1)	2,3 (-)	1,3 (1,1-1,5)	NR	1,3 (-)	NR	1,2 (-)	NR	NR	NR	1,8 (1,7-1,8)	2,1 (-)	
Chlore combiné (mg.L ⁻¹)	0,8 (-)	0,6 (-)	0,8 (0,6-1,0)	0,3 (0,3-0,4)	0,5 (0,3-0,7)	0,3 (0,2-0,4)	0,3 (0,2-0,5)	NR	0,3 (0,3-0,4)	NR	0,3 (-)	0,3 (-)	NR	NR	0,5 (0,4-0,6)	0,5 (-)	

NR : valeur non relevée ;

(-) : étendue négligeable.

de la pataugeoire, sont comparables à ceux correspondant au bassin sportif. La concentration en COT dans la pataugeoire et le bassin sportif n'évolue pas significativement durant la campagne.

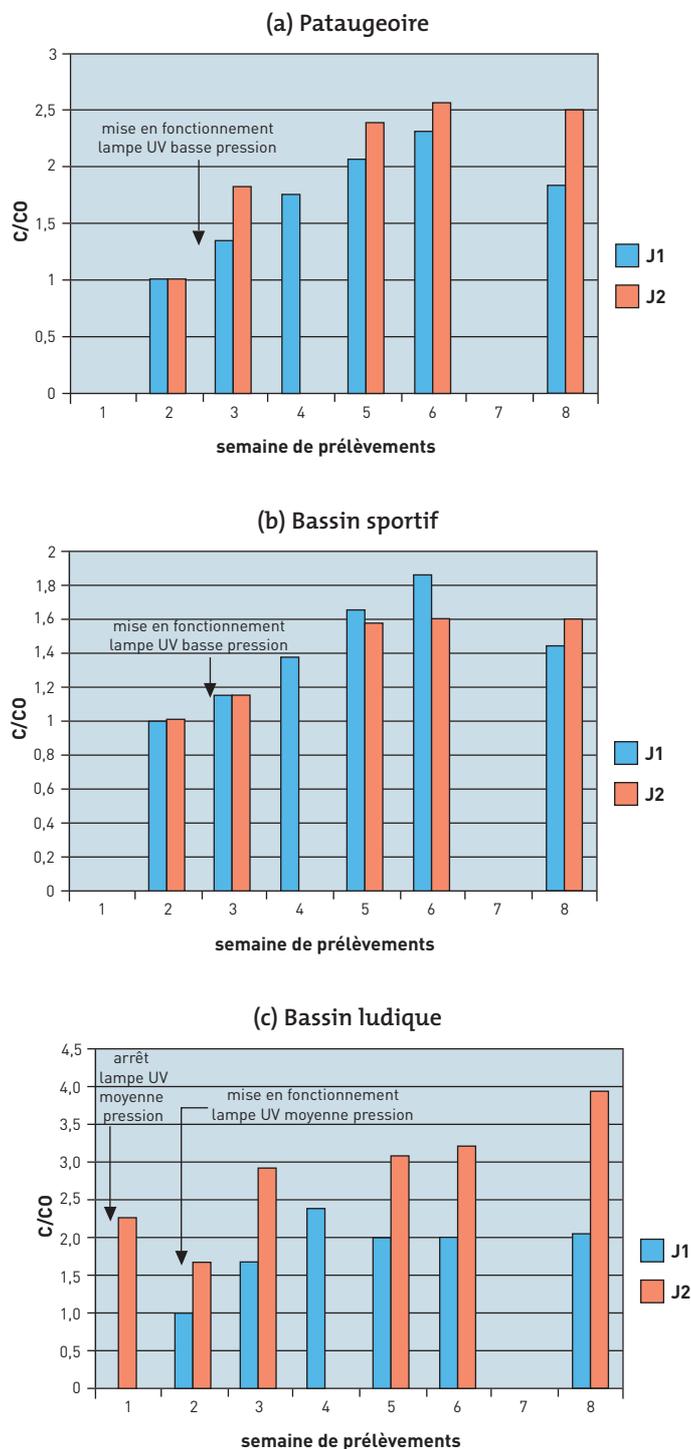
Après un arrêt d'une semaine de la lampe moyenne pression et un renou-

vellement de son volume d'eau de 137 %, le bassin ludique observe une concentration minimale de 13 µg.L⁻¹ (C₀) (cf. Figure 3c). La concentration en CHCl₃ évolue régulièrement jusqu'à la semaine 8 pour atteindre 3,9.C₀ dans une eau non-aérée. Les prélèvements effectués avec le dispositif d'aération du

bassin en fonctionnement indiquent que la teneur en CHCl₃ est 30 % à 50 % plus faible que la teneur observée avec le système à l'arrêt. A l'instar de la pataugeoire, la concentration en COT dans le bassin sportif ne varie pas durant la période de mesures.

FIGURE 3

Évolution de la concentration en CHCl_3 dans la pataugeoire, le bassin sportif et le bassin ludique
Variation in CHCl_3 concentration in paddling pool, sports bath and play pool



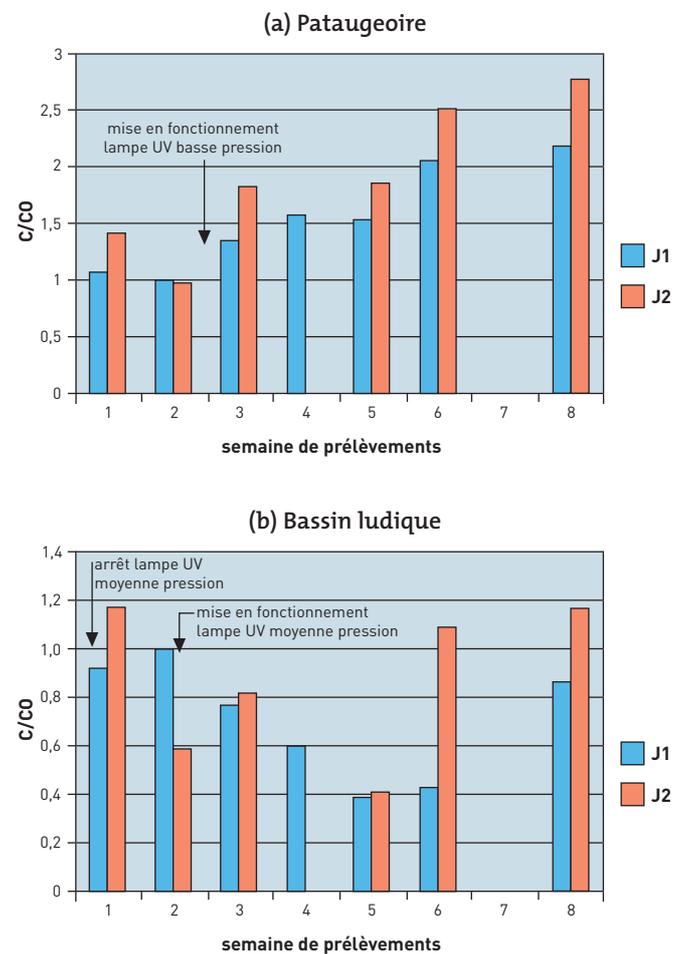
Trichlorure d'azote

Les prélèvements effectués semaines 1 et 2 dans le conduit d'alimentation de la pataugeoire, indiquent des valeurs en NCl_3 dissous stables et voisines de

$23 \mu\text{g.L}^{-1}$ (C_0) (cf. Figure 4a). La concentration progresse rapidement pendant les six semaines qui suivent la remise en fonctionnement de la lampe basse pression, sans atteindre de palier. Mesurée lors de la semaine 8, la valeur

FIGURE 4

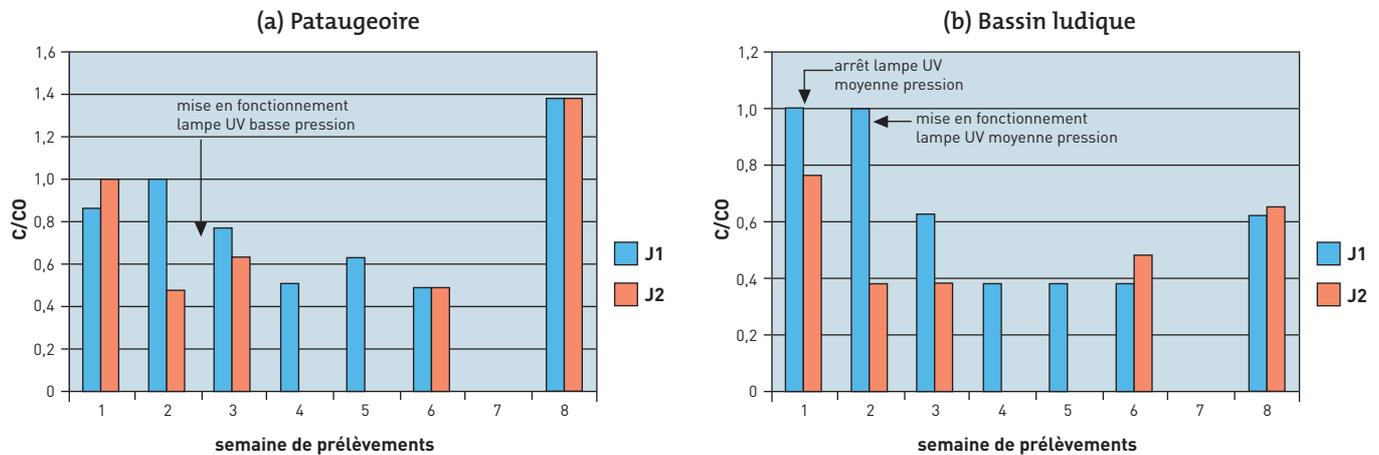
Évolution de la concentration en NCl_3 dans la pataugeoire et le bassin ludique
Variation in NCl_3 concentration in paddling and play pools



maximale en NCl_3 est de $2,8.C_0$ dans une eau non-aérée. Lorsque le dispositif de soufflage d'air est opérant, la teneur en NCl_3 chute de 12 % à 25 % par rapport aux mesures menées en période d'aération.

FIGURE 5

Évolution de la concentration en chlore combiné dans la pataugeoire et le bassin ludique Variation in combined chlorine concentration in paddling and play pools



La teneur en NCl_3 dans l'eau issue du conduit d'alimentation du bassin ludique évolue de manière irrégulière à partir de la remise en service de la lampe. Si une baisse de la teneur est observée au cours des semaines 4 et 5, une augmentation, jusqu'à $1,2 \cdot C_0$ ($C_0 = 37 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), est mise en évidence à l'issue de la semaine 8 (cf. Figure 4b). Dans ce cas de figure, il est difficile de corréler l'évolution de la concentration en NCl_3 avec les différents paramètres opératoires (fréquentation, appoint d'eau neuve, lampe UV). Cependant, les valeurs recueillies avec le dispositif d'aération en service sont inférieures à celles obtenues avec le système à l'arrêt. La semaine 5 est marquée par une faible teneur en NCl_3 , avec une fréquentation et une concentration en COT comparables à celles des semaines précédentes.

Chlore combiné

À la mise en fonctionnement de la lampe UV basse pression, la concentration en chlore combiné dans la pataugeoire décroît de manière sensible pour atteindre $0,5 \cdot C_0$ lors de semaine 6 (cf. Figure 5a). Paradoxalement, la semaine 8 est caractérisée par une forte augmentation de la teneur en chlore combiné alors que la fréquentation avait fortement diminué par rapport aux semaines précédentes. De plus, une quantité d'eau neuve importante a été introduite dans le bassin sportif et la pataugeoire.

Le suivi de la concentration en chlore combiné dans le bassin ludique indique qu'à partir de la mise en service de la lampe UV moyenne pression cette teneur décroît significativement et se stabilise à $0,4 \cdot C_0$ dès la semaine 4 (cf. Figure 5b).

Enfin, qu'il s'agisse de mesures effectuées dans la pataugeoire ou dans le bassin ludique, il n'y a pas de différence notable de la concentration en chlore combiné avec le système d'aération en fonctionnement ou le système à l'arrêt.

Eau du réseau

À titre d'information, la composition de l'eau du réseau révèle des concentrations en sous-produits chlorés et en COT très faibles :

- CHCl_3 : $1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;
- NCl_3 , \leq à la limite de détection ;
- COT $\leq 0,5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

DISCUSSION

La mise en place de lampe UV pour le traitement d'une eau de baignade induit une modification significative de sa composition. Le suivi de l'évolution de la fréquentation et des conditions de fonctionnement de l'établissement au

cours de la campagne de mesures a permis de mettre en évidence la contribution de l'irradiation UV à la formation de sous-produits chlorés.

Ainsi, même à faible dose ($24 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$), l'irradiation monochromatique par la lampe basse pression provoque une augmentation de la teneur en CHCl_3 dissous, de 150 %, avec une valeur mesurée en fin de campagne supérieure à $20 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (valeur réglementaire en Allemagne et dans différents pays européens). De manière inattendue, il a été observé une progression significative de la teneur en trichlorure d'azote dissous dès la mise en service de la lampe. Il est important de signaler que l'aération quotidienne de la pataugeoire et la dilution engendrée par l'arrivée de l'eau du bassin sportif dans un bac tampon commun conduisent à sous-estimer la formation en chloroforme et en trichlorure d'azote. Initialement proposée pour réduire d'une part, la teneur en chlore combiné dans l'eau et d'autre part, l'exposition des maîtres-nageurs à NCl_3 , ce type de lampe accroît sensiblement le risque chimique pour l'ensemble des populations fréquentant la piscine. Une étude complémentaire sera engagée afin de confirmer l'action des rayonnements émis par une lampe basse pression sur la cinétique de formation du trichlorure d'azote dans une eau de baignade.

Les mesures effectuées dans l'eau du bassin ludique mettent en exergue la

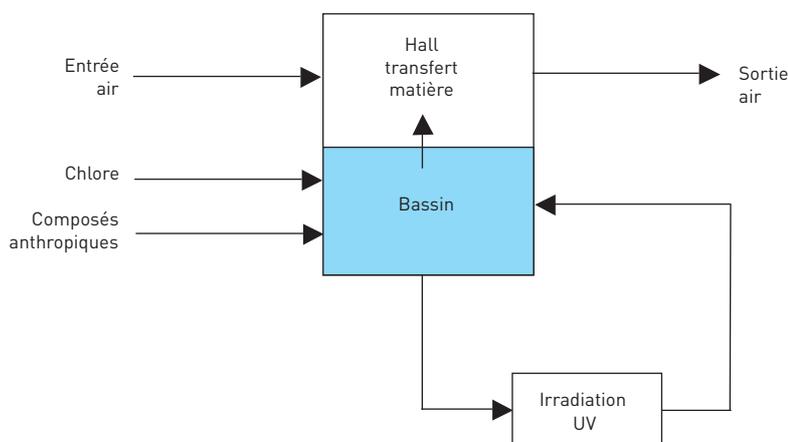
forte progression de la concentration en CHCl_3 lors de la mise en service de la lampe UV moyenne pression. Malgré une lampe fonctionnant à 60 % - 70 % de sa puissance nominale et une aération quotidienne importante du bassin ludique, la teneur en CHCl_3 dissous atteint des valeurs proches de $60 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, soit quatre fois la teneur initiale et trois fois la valeur réglementaire allemande. L'irradiation UV produite par ce type de lampe ne provoque pas de modification remarquable sur le trichlorure d'azote dissous.

La démarche entreprise lors de cette campagne ne permet pas d'extrapoler les résultats présentés dans ce document à l'ensemble des centres nautiques. Cette étude n'a pas mis en évidence de relation entre l'évolution des concentrations en CHCl_3 et en NCl_3 avec celle de la teneur en COT. Cependant, il est aisé de concevoir qu'un centre dont les bassins seraient fortement concentrés en précurseurs organiques, pourrait être le lieu d'une formation de sous-produits chlorés, dans des proportions élevées. La formation, dans un milieu complexe, de composés tels que le CHCl_3 et le NCl_3 sous l'action d'un rayonnement UV est peu connue. Afin de préciser les mécanismes de formation de ces substances, il sera pertinent de conduire une étude paramétrée en intégrant le type et la puissance de la lampe, la nature des composés anthropiques présents en solution et la caractérisation des sous-produits formés. Il s'agit, dans ce cas de figure, d'une étude de cinétique classique. Au-delà de la connaissance des sous-produits générés, un tel modèle cinétique appliqué à un système « bassin - hall - lampe UV » (réacteur réel ouvert) contribuerait à évaluer et à gérer, en fonction des différents paramètres opératoires de l'établissement (flux de matières, volumes, débit de recirculation, etc.), les concentrations dans l'eau et dans l'air de ces composés (cf. Figure 6).

Par ailleurs, et sans être en mesure d'apprécier l'incidence des émissions lumineuses des lampes UV sur l'amélioration de la qualité de l'air des établissements aquatiques, il est intéressant de faire part des résultats d'une campagne de mesures destinée à évaluer l'exposition atmosphérique à CHCl_3 et à NCl_3 du personnel de cet établissement [30]. Cette campagne a été réalisée au cours de la saison hivernale, hors période scolaire, avec les lampes UV en service

FIGURE 6

Description schématique du système « bassin - hall - lampe UV »
Diagrammatic description of "swimming pool - hall - UV lamp" system



et un fonctionnement en tout air neuf de la ventilation générale. Qu'elles aient été effectuées dans la zone sportive ou dans la zone ludique, les mesures traduisent une exposition à NCl_3 dans l'air élevée avec des valeurs moyennes proches de $1,0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. En revanche, l'exposition à CHCl_3 est moins importante avec des valeurs proches de $0,6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (la Valeur Moyenne d'Exposition du chloroforme est de $25 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$). En tout état de cause, ces systèmes de déchloramination ne permettent pas, à eux seuls, de répondre aux exigences de sécurité et de confort définies dans un contexte d'hygiène du travail.

Il est intéressant de remarquer que l'aération des bassins conduit systématiquement à la réduction des teneurs de ces deux composés. La technique de strippage en place dans certaines piscines pour réduire la concentration en NCl_3 dissous, pourrait être appliquée pour la réduction des THM, et en particulier du chloroforme.

CONCLUSION

Cette étude a été initiée afin de répondre aux interrogations des exploitants de centres aquatiques, des préventeurs et des services d'hygiène sur la problématique de l'irradiation UV d'une eau de baignade. Même si ces travaux ne concernent que deux marques de

déchloraminateurs UV, il est fort probable que le principe de la technologie photochimique ne soit pas totalement adapté à ce type de milieu aquatique. Manifestement, la mise en place de lampes basse ou moyenne pression accentue le risque d'exposition à des produits, tels que le chloroforme, et n'apporte pas de réponse satisfaisante à la problématique du trichlorure d'azote. Il s'avère indispensable de poursuivre ces travaux pour confirmer la contribution de l'irradiation UV à la formation du trichlorure d'azote. Compte tenu des propriétés toxicologiques des substances générées et des résultats de cette étude, il est difficile pour les préventeurs de préconiser l'installation de ce genre de matériels.

Cette problématique s'étend au-delà du cadre des risques professionnels avec l'émergence d'un risque élargi à la santé publique. Dans ces conditions, il est légitime de se préoccuper du risque encouru par des nageurs de haut niveau ou des enfants en bas âge. En effet, certaines activités dispensées dans les établissements aquatiques à vocation ludique, telles que l'atelier « bébés nageurs », se déroulent dans des conditions favorisant les expositions à certains composés volatils dont la toxicité est préoccupante.

Il est essentiel de rappeler que l'évaluation du risque sanitaire relatif à une exposition aux THM et notamment au chloroforme, doit prendre en considération l'ensemble des voies de pénétration dans l'organisme. Ainsi, pour les

maîtres-nageurs, la pénétration se fera préférentiellement par inhalation. Pour les baigneurs, ce sont les voies cutanée et respiratoires qui seront privilégiées. Rappelons qu'à ce titre, certains pays européens ont déterminé une valeur en THM dissous à ne pas dépasser dans les eaux de baignade ($20 \mu\text{g.L}^{-1}$). Cette valeur est très inférieure à la valeur proposée par l'OMS pour l'eau potable ($100 \mu\text{g.L}^{-1}$).

Enfin, à titre d'information, plusieurs centres aquatiques ont fait l'objet d'une modification de leurs circuits de recirculation de l'eau avec la mise en œuvre d'un dispositif de strippage [31]. Disposé dans le bac tampon, ce système permet par contact air/eau d'extraire, dans différentes proportions, les composés les plus volatils contenus dans les eaux de baignade. Par exemple, le rendement d'extraction pour le trichlorure d'azote dissous est de l'ordre de 70 %. Une amélioration sensible de la qualité de l'air dans les halls des piscines a ainsi été observée. Sans modifier le pH et la température de l'eau, l'aération de l'eau permet, à moindre coût, de réduire le risque chimique dans ce secteur d'activité. Cependant, il est utile de veiller à ne pas rejeter dans le milieu extérieur des flux de toxiques supérieurs aux recommandations environnementales.

Reçu le : 28/09/2005

Accepté le : 17/10/2005

BIBLIOGRAPHIE

- [1] SEUX R., *Évolution de la pollution apportée par les baigneurs dans les eaux de piscines sous l'action du chlore*. Journal Français d'Hydrologie, 19 (1988), 151-168.
- [2] BEECH J.A., DIAZ R., ORDAZ C., PALOMEQUE B., *Nitrates, chlorates and trihalomethanes in swimming pool water*. Am. J. Pub. Health, 70 (1980), 79-82.
- [3] JUDD S.J., JEFFREY J.A., *Trihalomethane formation during swimming pool water disinfection using hypobromous and hypochlorous acids*. Water Research, 29 (1995), 1203-1206.
- [4] HOLZWARTZ G., BALMER R.G., SONY L., *The rate of chlorine and chloramines in cooling towers. Henry's law constants for flash-off*. Water Research, 18 (1984), 1421-1427.
- [5] HÉRY M., HECHT G., GERBER J.M., GENDRE J.C., HUBERT G. and REBUFFAUD J., *Exposure to chloramines in the atmosphere of indoor swimming pools*, Annals of Occupational Hygiene, 39 (1995), 427-439.
- [6] GAGNAIRE F., AZIM S., BONNET P., HECHT G., HÉRY M., *Pouvoir irritant du chlore et du trichlorure d'azote chez la souris*. INRS, Cahiers de Notes Documentaires, 156 (1994), 293-295.
- [7] MASSIN N., BOHADANA A.B., WILD P., HÉRY M., TOAMAIN J.P., HUBERT G., *Respiratory symptoms and bronchial responsiveness in lifeguards exposed to nitrogen trichloride in indoor swimming pools*, Occupational and Environmental Medicine, 55 (1998), 258-263.
- [8] GÉRARDIN F., GERBER J.M., HÉRY M., QUENIS B., *Extraction de chloramines par contact gaz/liquide dans les eaux de piscines*, INRS, Cahiers de Notes Documentaires, 177 (1999), 21-29.
- [9] GÉRARDIN F., MULLER-RODRIGUEZ N., QUENIS B., *Stripping de la trichloramine dans les bacs tampons des piscines - Étude de différents contacteurs gaz/liquide*, INRS, Cahiers de Notes Documentaires 184 (2000), 25-35.
- [10] Arrêté du 7 avril 1981, *Dispositions techniques applicables aux piscines*, JO du 10 avril 1981 (modifié par l'arrêté du 18 janvier 2002)
- [11] MEULEMANS C., *The basics principles of UV-disinfection of water*, Ozone Science and engineering, 9 (1987), 299-314.
- [12] WOLFE R. L., *Ultraviolet disinfection of potable water, current technology and research needs*, Environmental Science of Technology, 24 (1990), 768-773.
- [13] JUDD S.J., BLACK S.H. and DARKE K., *Disinfection by-product formation in swimming pool waters*, Swimming Pool Water Disinfection II, Conference, School of Water Sciences & PWTAG, Cranfield (1998).
- [14] STACK A., FITZGERALD G., O'CONNELL S., JAMES K. J., *Measurement of trihalomethanes in potable and recreational waters using solid phase micro extraction with gas chromatography-mass spectrometry*, Chemosphere 41 (2000), 1821-1826.
- [15] AGGAZZOTTI G., PREDIERI G., *Survey of volatile halogenated organics (VHO) in Italy - Levels of VHO in drinking waters, surface waters and swimming pools*, Water Research, 20 (1986), 959-963.
- [16] FANTUZZI G., RIGHI E., PREDIERI G., CEPPELLI G., GOBBA F. and AGGAZZOTTI G., *Occupational exposure to trihalomethanes in indoor swimming*, The Science of The Total Environment, 264 (2001), 257-265.
- [17] CAMMANN K., HÜBNER K., *Trihalomethane concentrations in swimmers and bath attendants blood and urine after swimming or working in indoor swimming pools*, Archives of Environmental Health, 50 (1995), 61-65.
- [18] BEECH A., *Estimated worst case trihalomethane body burden of a child using a swimming pool*, Medical Hypotheses, 6 (1980), 303-307.
- [19] LINDSTRÖM A.B., PLEI J.D., BERKÖFF D.C., *Alveolar breath sampling and analysis to assess trihalomethanes exposures during competitive swimming training*, Environmental Health Perspectives; 105 (1997), 636-642.
- [20] Guidelines for Safe recreational-water environments : Swimming pools, spas and similar-recreational-water environments, World Health Organisation (WHO), 2 (2000), 4.1-4.28.
- [21] Deutsche Norm, *Aufbereitung von schwimm und badebeckenwasser-allgemeine Anforderungen*, DIN 19643 (1993).
- [22] BISTED O. - *Activated carbon and UV for pool water treatment*. 3rd International Conference on Pool Water Quality and Treatment, Cranfield University, (November 2002).
- [23] CASSAN D., MERCIER B., CASTEX F. and RAMBAUD A., *Effects of medium-pressure UV lamps radiation on water quality in a chlorinated indoor swimming pool*, Chemosphere, In Press (2005).
- [24] Norme Française ISO 10301, *Qualité de l'eau - Dosage des hydrocarbures halogénés hautement volatils - Méthodes par chromatographie en phase gazeuse*, AFNOR, (1997).
- [25] CAMMANN K., HÜBNER K., *False results in headspace-gas chromatographic analysis of trihalomethanes in swimming pool water due to elevated headspace temperatures*, Journal of Chromatography A, 648 (1993), 294-298.
- [26] TAKAHASHI Y., ONODERA S., MORITA M., TERAOKA Y., *A problem in the determination of trihalomethanes by headspace-gas chromatography/mass spectrometry*, Journal of Health Science, 49 (2003), 1-7.
- [27] GÉRARDIN F., SUBRA I., *Mise au point d'une méthode de prélèvement et d'analyse du trichlorure d'azote en phase aqueuse*, INRS, Hygiène et Sécurité du Travail - Cahiers de Notes Documentaires, 194 (2004) 39-50.
- [28] SOULARD M., BLOC F., HATTERER A., *Étude expérimentale critique de trois méthodes absorptiométriques pour le dosage des halogènes et des halogénamines en solution aqueuse*, Analyses, 9 (1981), 35-46.
- [29] Norme Française EN 1484 - *Analyse de l'eau - Lignes directrices pour le dosage du carbone organique total (TOC) et du carbone organique dissous (COD)*, AFNOR, (1997).
- [30] GÉRARDIN F., SUBRA I., *Compte rendu d'intervention interne*, INRS, (2005).
- [31] GÉRARDIN F., GAGNAIRE F., HECHT G., HÉRY M., HUBERT G., MASSIN N., SUBRA I., *Réduction de l'exposition des travailleurs au trichlorure d'azote dans deux secteurs d'activités par action sur les procédés*, INRS, Hygiène et Sécurité du Travail - Cahiers de Notes Documentaires, 201 (2005).