

→ F. Gérardin (1),
N. Muller-Rodriguez (2),
B. Quenis (1)

(1) Département Ingénierie des procédés,
Centre de Lorraine, INRS, Vandœuvre

(2) Laboratoire de Génie chimique
de l'École supérieure de chimie - physique -
électronique de Lyon (CPE-Lyon)

Strippage de la trichloramine dans les bacs tampons des piscines

Etude de différents contacteurs gaz/liquide

TRICHLORAMINE STRIPPING IN SWIMMING POOL BUFFER TANKS

STUDY OF DIFFERENT GAS/LIQUID CONTACT SYSTEMS

The aim of this study was to compare the performance of four gas/liquid contactors. These systems can be adapted to the buffer tanks of bathing establishments in order to extract trichloramines by stripping (irritant atmospheric pollutants) present in the recirculated water of pools. To do so, we employed two pilot plants allowing several parameters to be varied.

This study was carried out within the framework of an agreement with the Chemical engineering Laboratory of the educational establishment CPE in Lyons. It confirmed the satisfactory extraction results recorded in the field (reductions in the atmospheric nitrogen trichloride concentrations of more than 60% were achieved) and also allowed the determination of the dimensioning parameters of each system. The last chapter of this paper provides an example of the dimensioning of these four systems for a typical buffer tank (with average dimensions, gas and liquid flow rates, and pollution).

● trichloramine ● swimming pool
● extraction ● gas/liquid contact system

Cette étude a pour objectif de comparer les performances de quatre contacteurs gaz/liquide. Ces systèmes peuvent être adaptés sur des bacs tampons d'établissements nautiques, afin d'extraire par strippage la trichloramine (polluant atmosphérique irritant) présente dans les eaux recirculées des bassins.

Pour ce faire, nous avons eu recours à un pilotage en produit sur deux maquettes, ce qui a permis de faire varier plusieurs paramètres.

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une convention de l'INRS avec le laboratoire de Génie chimique de l'école CPE-Lyon. Elle a confirmé les bons résultats d'extraction enregistrés sur le terrain (les diminutions des concentrations atmosphériques en trichlorure d'azote pouvaient être supérieures à 60 %) et a permis de déterminer les paramètres dimensionnants pour chaque système. En fin d'article, on trouvera un exemple de dimensionnement de ces quatre systèmes pour un bac tampon type (avec des caractéristiques moyennes : dimensions, débits liquide et gazeux et pollution).

● trichloramine ● piscine ● extraction ● contacteur gaz/liquide

Depuis plusieurs années, les établissements aquatiques (piscines, centres nautiques et centres de loisirs) rencontrent des problèmes de pollution de leurs halls par des composés chlorés très irritants, notamment la trichloramine (ou trichlorure d'azote, NCl_3). Ces espèces sont générées par la combinaison du chlore, utilisé comme bactéricide dans les eaux de baignade, et la pollution azotée apportée par les baigneurs (sueur, urine, peau, cosmétique, etc.). Si les réactions entre le chlore et ces produits sont très complexes, elles conduisent, entre autres, à la formation de chloramines (mono-, di- ou tri-) dont la dernière (la forme la plus halogénée), le trichlorure d'azote NCl_3 , est la plus volatile et a tendance à se dégager dans les halls de piscine. L'INRS a mené un travail de fond autour de ce polluant :

■ Une méthode de dosage spécifique au trichlorure d'azote a été développée [1] ;

■ Une étude visant à évaluer les conséquences d'une exposition du personnel à la trichloramine a conduit à mettre en évidence son caractère d'irritant respiratoire et oculaire et a permis de proposer une valeur de confort ($0,5 \text{ mg/m}^3$), pour laquelle les salariés ne ressentent aucune gêne [2] ;

■ Une étude épidémiologique, auprès du personnel de surveillance de baignade de 63 établissements, a montré un lien significatif entre le niveau d'exposition au trichlorure d'azote et l'intensité des irritations ressenties [3].

La trichloramine est un polluant de l'eau très volatile. Elle est donc facilement extractible par strippage (mise en contact du liquide avec un gaz). Certains exploitants et concepteurs de piscines ont choisi d'utiliser cette propriété pour traiter une partie de leurs eaux de bassins, par aération au niveau des bacs tampons qui recueillent les trop-pleins des bassins. Ces systèmes

d'aération des eaux sont divers. Certains ont fait récemment l'objet d'une étude menée par la cellule « Procédé » de l'INRS. Il s'agissait de réaliser une évaluation des performances de systèmes d'extraction de chloramines par contact gaz/liquide dans les eaux de piscines existantes dans trois établissements [4].

Les bons résultats d'extraction enregistrés sur les trois systèmes examinés (les diminutions des concentrations atmosphériques en trichlorure d'azote pouvaient être supérieures à 60 %) nous ont conduits à vouloir examiner de façon plus systématique les performances des contacteurs gaz/liquide que nous pouvions rencontrer dans les établissements nautiques.

Pour ce faire, nous avons eu recours à un pilotage en produit sur deux maquettes, qui permettait de faire varier plusieurs paramètres. Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une convention avec le laboratoire de Génie chimique de l'école CPE-Lyon.

Le but poursuivi était double :

- Réaliser une comparaison systématique des contacteurs, tâche difficile à mener à bien en situation d'exploitation, les paramètres d'études (débits de liquide et de gaz, concentration des pollutions, etc.) sont difficiles à maintenir constant d'une piscine à l'autre.

- Mesurer l'importance des différents paramètres sur le strippage de la trichloramine pour chaque contacteur.

Deux types de contacteur ont été testés :

- les contacteurs avec le liquide en phase continue (l'injection de l'air a lieu dans le liquide, en fond de bac tampon, et la phase gazeuse strippe la trichloramine en remontant à la surface du liquide) ;
- les contacteurs avec le gaz en phase continue (le liquide est dispersé dans le ciel du bac tampon sous forme plus ou moins divisée, il croise un courant d'air qui contribue à stripper la trichloramine).

Dans chaque cas, deux configurations étaient étudiées pour la dispersion de la phase discontinue. Nous avons sélectionné les contacteurs les plus couramment rencontrés dans les établissements nautiques, mais aussi ceux qui nous semblaient présenter un intérêt pour ce type de fonction (une très bonne performance de strippage tout en restant extrêmement simple d'utilisation et facile d'entretien).

Nous présentons dans cet article une synthèse de l'ensemble des travaux réalisés par le laboratoire de Génie chimique de l'école CPE-Lyon. En fin de document, les résultats trouvés sur les pilotes ont été extrapolés à un bac tampon type (avec un débit de liquide le traversant et une pollution moyenne), dont les caractéristiques sont présentées dans le *tableau 1*. Ils peuvent être ainsi comparés entre eux et dans une certaine mesure aux résultats mesurés en situation (¹).

1. Description du pilotage

1.1. Présentation théorique

Le strippage de la trichloramine contenue dans l'eau, par un courant d'air traversant le courant d'eau, repose sur le phénomène d'équilibre thermodynamique. Cette notion d'équilibre thermodynamique permet de décrire comment plusieurs constituants se répartissent entre un liquide et une vapeur, si le temps de contact et le mélangeage entre les deux phases sont suffisants pour atteindre un état stationnaire.

Pour les besoins de cette étude, nous devons définir un appareil idéal correspondant à un étage théorique de transfert : imaginons un appareil dans lequel le temps de séjour et le contact entre les deux phases sont suffisants pour que l'air et l'eau ressortent de cet appareil à l'équilibre thermodynamique. Ce n'est pas systématiquement le cas des différents contacteurs et nous évaluerons leurs performances par rapport à celle d'un étage théorique de transfert.

Réalisons un bilan matière sur la trichloramine pour un étage théorique de transfert. Pour les solutions diluées (c'est le cas de la trichloramine dans l'eau), il y a proportionnalité entre la pression partielle du gaz à l'équilibre P^* [bar] et sa concentration en phase liquide C [mol/m³]. C'est la loi de Henry :

$$C = K^{\circ}_H \cdot P^*$$

qui peut aussi s'exprimer à l'aide des abréviations de la *figure 1* : $y = H \cdot x$

On trouve dans la littérature :

$$H = 555 \text{ et } K^{\circ}_H = 0.1 \text{ mol/kg.bar [5].}$$

Le bilan matière exprimé en trichloramine donne :

$$Q_{Lm} \cdot x_0 + Q_{Gm} \cdot y_0 = Q_{Lm} \cdot x_2 + Q_{Gm} \cdot y_2$$

Et l'équilibre thermodynamique entre les deux phases à la sortie du contacteur :

$$y_2 = H \cdot x_2$$

Si r est le taux d'abattement de la trichloramine dans le contacteur :

$$r = (x_0 - x_2) / x_0,$$

$$\text{on a : } r = 1 / (1 + Q_{Lm} \cdot H / Q_{Gm}).$$

Ainsi, comme le montre le bilan matière de la *figure 2*, il faudrait, si le bac représentait un étage d'échange parfait, environ 2 750 m³/h d'air dans le cas d'un bac tampon type, pour stripper 80 % de la trichloramine présente dans les 300 m³/h d'eau arrivant dans le bac.

1.2. Etude de l'efficacité des contacteurs - Méthodologie

L'étude expérimentale menée par l'école CPE-Lyon va permettre de comparer les contacteurs gaz/liquide à un appareil idéal.

1.2.1. Choix d'une molécule traceur

En raison de la toxicité de la trichloramine et de la difficulté à réaliser un dosage sur la phase liquide, nous avons essayé de remplacer ce polluant par des molécules simples, de toxicité moindre et facilement dosables.

Afin de s'approcher le plus possible de la réalité, les nouveaux traceurs doivent avoir un encombrement stérique et une masse molaire proches de ceux de la trichloramine. La molécule trouvée en première approche fut la dichloracétone. Malheureusement, si ce corps présente des caractéristiques physiques proches de celles de la trichloramine, il fut abandonné en raison de sa toxicité.

Afin de montrer que le strippage ne dépendait que très faiblement de la structure du polluant, nous avons retenu l'acétone et le butanol et montré que les résultats ne variaient pratiquement pas selon la molécule testée (les diffusivités de l'acétone et du butanol sont différentes. Comme aucune influence de la molécule testée n'a été mise en évidence sur l'efficacité du procédé, il est relativement probable que les résultats obtenus soient transposables à la trichloramine). D'autre part, le dosage de ces deux molécules peut être effectué de façon simple, en utilisant la chromatographie en phase gazeuse.

(¹) Ces résultats ont été exposés dans un précédent article [4].

TABLEAU I

CARACTÉRISTIQUES D'UN BAC TAMPON TYPE
 - CHARACTERISTICS OF A TYPICAL BUFFER TANK

DIMENSIONS (m)	L = 4 ; l = 3 ; H = 3
Débit d'eau traversant le bac (m ³ /h)	300
Concentration moyenne en NCl ₃ de l'eau arrivant au bac (mg/l)	50
Débit de gaz de strippage (m ³ /h)	1 000 - 2 500
Hauteur de liquide dans le bac (m)	1,5 - 2

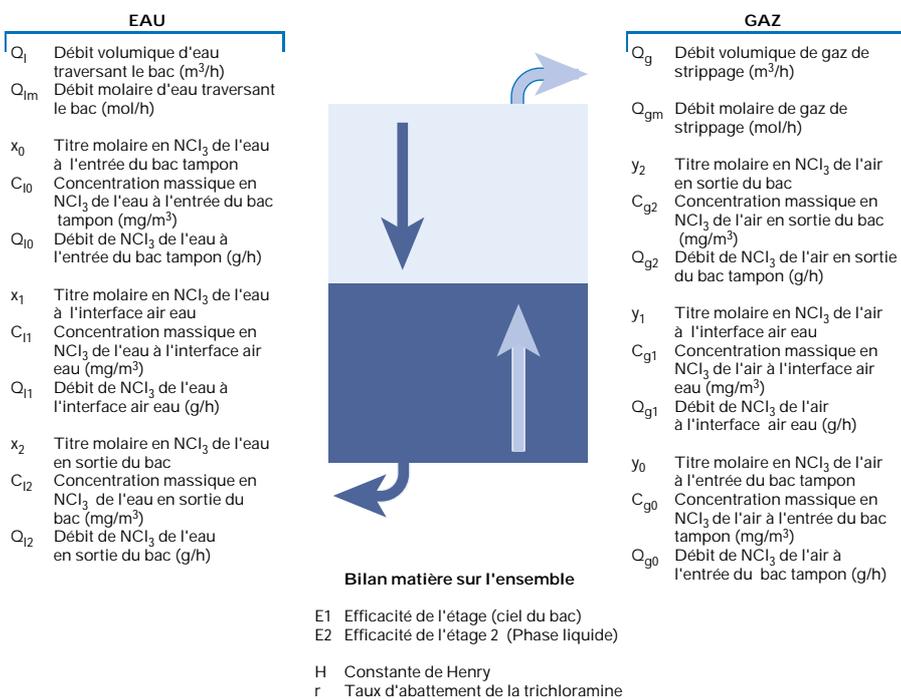


Fig. 1. Définition des grandeurs utiles à l'établissement des bilans matières sur les bacs tampon

- Definitions of the parameters useful in establishing the buffer tank material balance

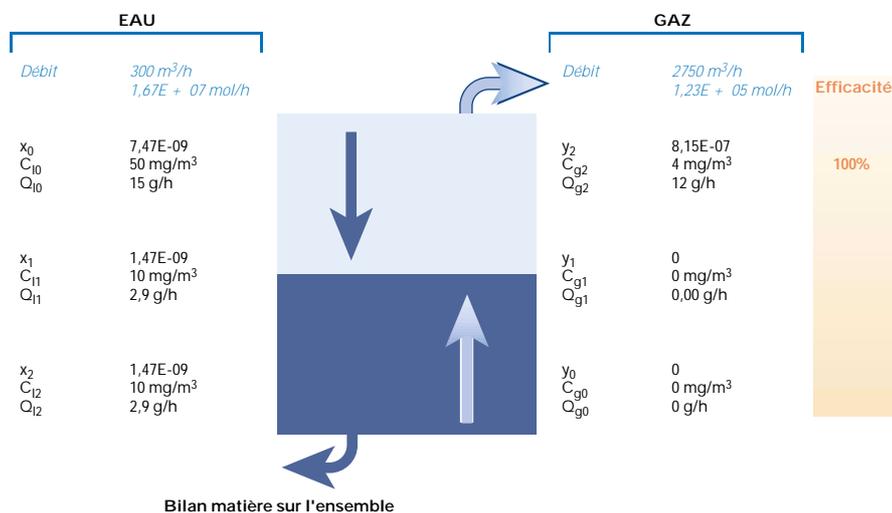


Fig. 2. Bilan matière pour un étage théorique

- Material balance for a theoretical stage

Enfin, l'efficacité du strippage étant complètement indépendante du niveau de concentration des corps en jeu, tous les essais ont été réalisés sur des solutions d'acétone ou de butanol diluées au 1/100^e en volume.

1.2.2. Détermination de l'efficacité de strippage

Afin d'évaluer l'efficacité du distributeur étudié, la teneur en traceur (acétone ou butanol) dans la phase gaz sortant du pilote a été comparée à celle du gaz mis en équilibre avec une fraction de la phase liquide prélevée au même moment.

Une évaluation du temps de mise en équilibre de la phase liquide et de la phase gazeuse a été réalisée au préalable. Il faut environ 1 h 30 pour que la concentration dans la phase gaz mise en équilibre avec la phase aqueuse n'évolue plus. Par précaution, l'analyse de la phase gaz n'était généralement effectuée que 6 heures après la mise en équilibre.

L'efficacité du système est définie par :

$$E = C_G / C^*$$

avec :

C_G : la concentration du traceur dans la phase gaz en sortie du pilote,

C^* : la concentration du traceur dans la phase gaz en équilibre avec le liquide du pilote.

Pour vérifier le résultat par bilan matière, la phase liquide prélevée a été aussi analysée.

1.2.3. Description des pilotes

Deux pilotes ont été utilisés lors de cette étude. Le premier (**pilote 1**) a servi à déterminer les efficacités de strippage des contacteurs en phase liquide continue. Cet appareil avait été utilisé pour une étude précédente à CPE-Lyon. Il n'était pas possible de le modifier pour évaluer les efficacités des contacteurs en phase gaz continue. Il fallut donc investir dans une nouvelle maquette pour réaliser cette dernière phase de l'étude (**pilote 2**).

Les deux pilotes sont de conception similaire. Ils sont constitués d'une cuve (de diamètres 0,63 m sur le pilote 1 et 0,89 m sur le pilote 2) sur laquelle tourne en rond le liquide à stripper, par l'intermédiaire d'une pompe à vitesse variable (le débit maximum des pompes est de 6 m³/h sur le pilote 1 et 30 m³/h sur le pilote 2). Le débit de liquide est mesuré par un débitmètre. L'air amené dans le bac est de « l'air service » mesuré lui aussi par un débitmètre.

Fig. 3. Schémas des quatre configurations de pilotes étudiées

- Diagrams of the four configurations studied

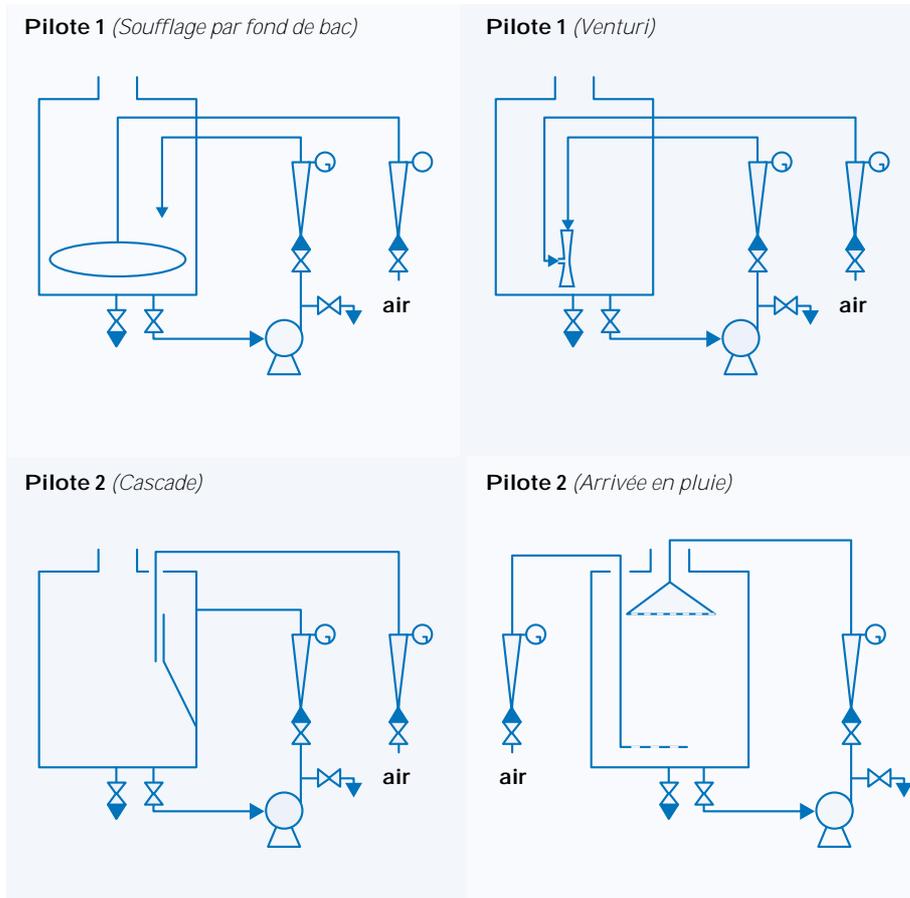


TABLEAU II

CARACTÉRISTIQUES DES PILOTES ET DU BAC TAMPON TYPE

- CHARACTERISTICS OF THE PILOT PLANTS AND OF A TYPICAL BUFFER TANK

	PILOTE PHASE LIQUIDE CONTINUE (PILOTE 1)	PILOTE PHASE GAZ CONTINUE (PILOTE 2)	INSTALLATION TYPE
Section (m ²)	0,31	0,62	4 x 3 = 12 m ²
Ql débit d'eau (m ³ /h) traversant le bac	3 - 6	5 - 30	300
Qg débit d'air (m ³ /h) de strippage	5 - 35	5 - 35	1 000 - 2 500
Débit d'air moyen / m ² surface (m ³ /h.m ²)	64	32	80 - 210

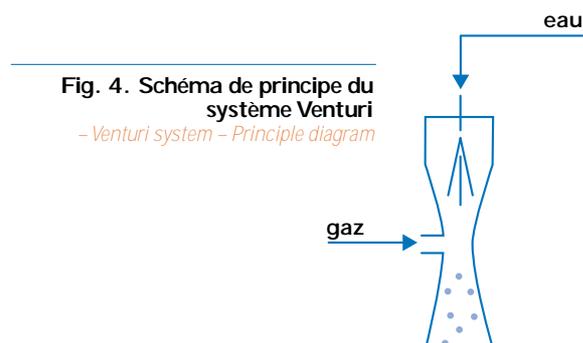


Fig. 4. Schéma de principe du système Venturi

- Venturi system - Principle diagram

Le gaz est collecté en tête de la capacité puis analysé par chromatographie. Seuls les systèmes de distribution de la phase gazeuse dans le liquide et de la phase liquide dans le gaz sont différents.

On trouve dans la *figure 3* les quatre configurations de diffuseurs gaz/liquide testées lors de l'étude.

Le *tableau II* reprend les principales caractéristiques des deux pilotes et d'une installation type.

Il apparaît (cf. *tableau II*) que le critère de débit de gaz surfacique est plus faible sur les pilotes que sur les installations types. Cette valeur basse vient du fait que le débit d'air envoyé au pilote était limité par l'installation d'air service à 35 m³/h. Ce ratio faible reste acceptable pour comparer les phénomènes que nous voulons mesurer sur les pilotes et sur des bacs réels.

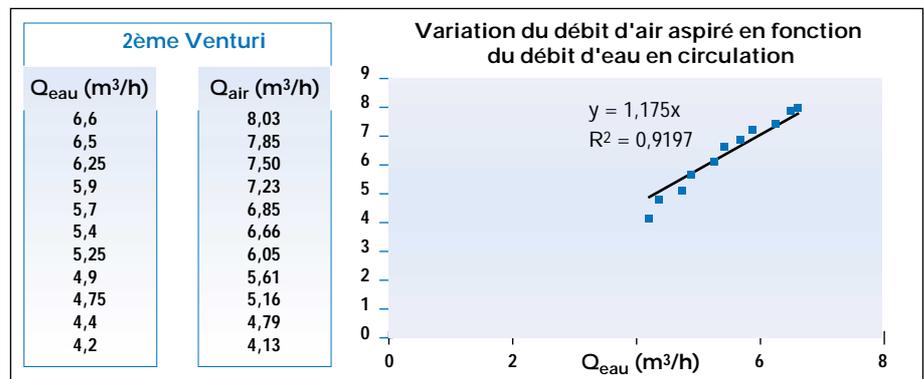
1.2.4. Description des systèmes de distribution gaz et liquide sur les quatre pilotes

Pilote 1 : liquide en phase continue

■ **Tube perforé en fond de bac** : le tube d'arrivée d'air est un tube annulaire placé en fond de cuve de façon à distribuer le gaz sur une surface plus importante. L'anneau a un diamètre de 0,46 m. Il est perforé de 29 trous de 5 mm de diamètre. Comme dans les cas précédents, l'air provient du réseau d'air utilisé.

■ **Système Venturi** : le Venturi est un appareil constitué d'un système convergent-divergent traversé par le liquide à traiter (*fig. 4*). La dépression de la phase liquide au niveau du col du venturi permet d'aspirer le gaz naturellement. Ce type de système ne nécessite que l'emploi d'une pompe pour assurer la circulation du liquide, l'aspiration et la dispersion de l'air et l'homogénéisation du liquide dans le réacteur. Le seul inconvénient de ce type de système est sa capacité maximale d'aspiration. La capacité maximale des Venturis (en termes de débit de gaz transférable de l'air à l'eau) se situe aux environs de 8 m³/h par Venturi pour un débit d'eau traversant de 6,6 m³/h (la *figure 5* représente la variation du débit d'air aspiré en fonction du débit d'eau en circulation pour le Venturi testé). Il était d'autre part possible, sur le pilote, de réduire le débit d'air aspiré en bridant une vanne sur la tuyauterie d'arrivée de gaz.

Fig. 5. Performances du système Venturi
- Venturi system - Performance



Ces deux derniers systèmes ne se rencontrent pas dans les piscines françaises actuellement. Ils nous ont pourtant semblé intéressants, car le transfert de la trichloramine vers la phase gazeuse est limité par la résistance en phase liquide. Proposer un strippage avec le liquide en phase continue donnerait vraisemblablement de meilleurs résultats avec des appareils simples, qu'un strippage avec le gaz en phase continue.

Pilote 2 : gaz en phase continue

■ **Système de cascade** : un déversoir de largeur 0,4 m et occupant 1/4 de la périphérie du réservoir est placé au niveau du piquage d'arrivée de la pompe de tourne en rond.

Le distributeur d'air est un simple tube en L. Il est perforé sur toute la partie horizontale du L (de longueur 0,4 m) et il vient se placer sous la cascade sous le déversoir. Le distributeur d'air comprend 29 trous de 5 mm de diamètre, mais la dispersion d'air dans ce cas n'a que peu d'importance vis-à-vis de la dispersion d'eau.

■ **Système de répartition de l'eau en pluie** : l'arrivée d'eau se fait sur la face supérieure du bac. L'extrémité de la tuyauterie d'eau est munie d'un distributeur de style « pommeau de douche » d'un diamètre de 0,27 m percé de 233 trous de 5 mm (ils seront agrandis pour une deuxième série de mesures). Le distributeur d'air est le même tube en L que précédemment. Sa distance au distributeur d'eau peut être ajustée pendant les mesures. Il a été placé dans un premier temps à la surface du liquide, soit environ à 1 m du diffuseur de liquide (cette distance a été portée à 1,5 m lors d'une autre série de mesures).

2. Résultats

2.1. Système de cascade

A débit de tourne-en-rond constant (30 m³/h), le débit d'air soufflé à travers la cascade était variable. L'efficacité du système décroît suivant le *tableau III*.

TABLEAU III

EFFICACITÉ DU SYSTÈME DE CASCADE
- EFFICIENCY OF THE CASCADE SYSTEM

Q _G [m ³ /h] (DÉBIT SURFACIQUE [m ³ /h.m ²])	5 (8)	10 (16)	20 (32)	30 (48)
E (%)	> 99	96	88,5	88

Q_G : débit de gaz de strippage ; E : efficacité d'extraction du système.

Plus le débit d'air augmente, plus la quantité de traceur trouvé dans le ciel du réacteur diminue. Le temps de séjour du gaz à travers la cascade devient de plus en plus faible, le temps de contact diminue lorsque le débit de gaz augmente. Toutefois, la variation de l'efficacité reste faible au regard de la variation de débit gazeux.

2.2. Système de distribution de l'eau en pluie dans le ciel du réacteur

L'efficacité du contacteur a été mesurée lorsque le débit d'eau dispersée varie. Les essais ont été menés pour deux débits de gaz. Les résultats sont reportés dans le *tableau IV*.

A mesure que le débit d'eau mis en jeu augmente, l'efficacité du contacteur est améliorée.

En effet, plus l'énergie dissipée à travers le diffuseur est grande, plus le liquide est finement divisé dans le ciel du pilote ; plus l'interface gaz/liquide est importante et meilleur est l'échange.

L'influence de la hauteur de la chute d'eau sur l'efficacité de la séparation a été mesurée en augmentant la distance entre le diffuseur liquide et le diffuseur gaz. Cette distance (H) a été passée de 1 m à 1,5 m avec un débit d'eau traversant constant (15 m³/h) et trois débits de gaz

différents (5, 10 et 15 m³/h). Les résultats de ces expérimentations sont repris dans le *tableau V*.

L'augmentation de la hauteur de chute est synonyme d'une augmentation de l'efficacité du pilote. Pour H = 1,5 m, l'étagé théorique est atteint, quel que soit le débit d'air et le diamètre de perforation du diffuseur liquide. Dans cette configuration, le temps de séjour du gaz est suffisant pour que les deux phases sortent du pilote à l'équilibre.

On constate enfin que la diminution du débit d'air insufflé entraîne une perte d'efficacité à débit d'eau équivalent. En effet, pour un même temps de contact, les turbulences sont vraisemblablement moindres, ce qui diminue l'efficacité du transfert.

Dans tous les cas, à 30 m³/h, la composition de la phase gaz prélevée est comparable à celle obtenue après la mise en équilibre. Pour ce débit d'eau, le pilote peut donc être considéré globalement comme un étage théorique.

2.3. Soufflage de gaz en fond de réacteur

Pour ces essais, la hauteur d'eau dans la cuve est de 1,5 m. Le débit d'eau de 4,5 m³/h sur le tourne-en-rond est maintenu de façon à homogénéiser la solution et

à reproduire des conditions équivalentes à celles d'un bac tampon de piscine.

La variation de l'efficacité en fonction du débit d'air est reportée dans le *tableau VI*.

Pour les faibles débits surfaciques (13 m³/h.m²), l'efficacité du distributeur perforé se dégrade et ne permet pas d'atteindre les performances d'un contacteur parfait. Il est vraisemblable que la vitesse du gaz à travers les trous du distributeur soit trop faible pour assurer une bonne dispersion de celui-ci dans la phase liquide.

2.4. Dispersion du gaz par l'intermédiaire du Venturi

A débit de tourne-en-rond d'eau constant (4,5 m³/h), nous avons fait varier le débit d'air en bridant plus ou moins la vanne sur la ligne d'aspiration de gaz. Les résultats sont résumés dans le *tableau VII*.

Quel que soit le débit d'air mis en jeu, la composition de la phase prélevée en sortie de réacteur est comparable à celle obtenue après mise en équilibre. Le plus faible débit est suffisant pour obtenir une phase gaz saturée en traceur. Le pilote peut donc être considéré comme un étage théorique.

L'influence d'autres paramètres sur ce système a été testée :

TABLEAU IV

EFFICACITÉS DU SYSTÈME DE DISTRIBUTION DE L'EAU EN PLUIE DANS LE CIEL DU BAC

– EFFICIENCIES OF THE WATER SPRAYING SYSTEM AT TANK TOP LEVEL

Q _G (m ³ /h) Q _L (m ³ /h)	5 (8)	10 (16)
5	-	94,5 %
10	91 %	98 %
15	95 %	97 %
20	97 %	> 99 %
30	> 99 %	> 99 %

Q_G : débit de gaz de stripping.
Q_L : débit d'eau traversant le bac tampon.

TABLEAU V

INFLUENCE DE LA HAUTEUR DE LA CHUTE D'EAU SUR L'EFFICACITÉ DU SYSTÈME DISPERSANT L'EAU EN PLUIE DANS LE CIEL DU BAC – INFLUENCE OF THE HEIGHT OF FALL OF THE WATER ON THE EFFICIENCY OF THE WATER SPRAYING SYSTEM AT TANK TOP LEVEL

Q _G (m ³ /h)	5	10	20
H (m) :			
1	95	97	95
1,5	> 99	> 99	> 99

TABLEAU VI

EFFICACITÉ DU SOUFFLAGE D'AIR EN FOND DE BAC

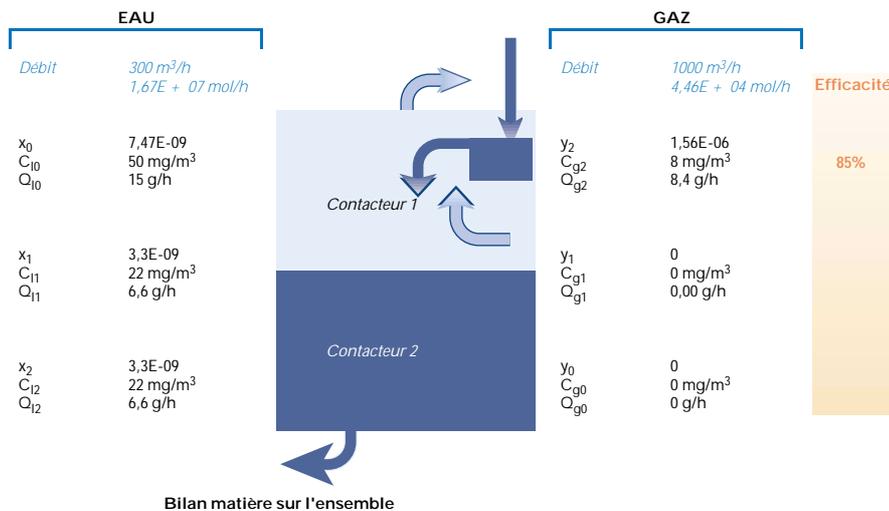
– EFFICIENCIES OF THE AIR-BLOWING SYSTEM AT TANK BOTTOM LEVEL

Q _G (m ³ /h)	4	7	30
(DÉBIT SURFACIQUE [m ³ /h.m ²])	(13)	(22,5)	(97)
E (%)	97,5	> 99	> 99

TABLEAU VII

EFFICACITÉ DU SOUFFLAGE D'AIR EN FOND DE BAC
- EFFICIENCIES OF THE VENTURI SYSTEM

Q_G (m ³ /h)	4	6,2	7,5
E (%)	99,5	> 99	> 99

Fig. 6. Bilan matière autour d'un bac équipé d'une cascade
- Material balance for a tank with a cascade

- le débit d'eau traversant le venturi a été passé de 3,5 à 4,5 m³/h en conservant le débit d'air arrivant à l'appareil constant (à 4 m³/h). Aucune influence de ce paramètre n'a été observée sur l'efficacité du procédé ;
- la hauteur d'eau dans le procédé a été passée de 1 m à 1,5 m sans modifier les autres paramètres (le débit de liquide était de 4,5 m³/h, celui de gaz de 4 m³/h). Cette action permet de modifier le volume du contacteur gaz/liquide et donc, le temps de séjour du gaz dans le liquide. Une fois encore, la hauteur d'eau ne semble pas avoir d'influence sur l'efficacité du procédé. Cette dernière expérience tend à montrer que le contact gaz/liquide se réalise de façon « très intime » dans le divergent et qu'une grande partie du stripping se réalise dans l'appareil même.

L'efficacité du distributeur est donc très bonne et indépendante du débit d'air aspiré. Elle est également indépendante de la hauteur d'eau dans le bac.

3. Application des résultats du pilotage à un bac tampon type

Les contacteurs étudiés ont des efficacités proches (entre 75 et 99 % d'efficacité en fonction des configurations de marche). Mais le fonctionnement et la plage de débits (liquide et gaz) admissibles pour chaque procédé sont très différents. Dans les paragraphes suivants, nous avons essayé de dimensionner les quatre dispositifs précédents pour un bac tampon standard (tel que défini dans le tableau I).

3.1. Système de cascade

Si l'on imagine une cascade de 4 m de long sur un des côtés du bac, sous laquelle se trouverait une rampe de diffusion de

gaz, nous voyons (cf. § 2.1) que plus le débit de gaz est élevé, plus l'efficacité du contacteur chute. Pour stripper une grande quantité de trichloramines de la cascade, il faut trouver le meilleur compromis entre la valeur du débit de gaz et celle de l'efficacité.

Un soufflage de 1 000 m³/h de gaz à travers la cascade semble être facilement réalisable. Le critère de dimensionnement du procédé est le temps de séjour du gaz sous la cascade. Nous voyons que le bac tampon standard présente une configuration plus défavorable que le cas le plus défavorable mesuré sur le pilote. L'efficacité du stripping sera au maximum de 85 %.

Le bilan matière pour la trichloramine autour du bac devient donc celui de la figure 6.

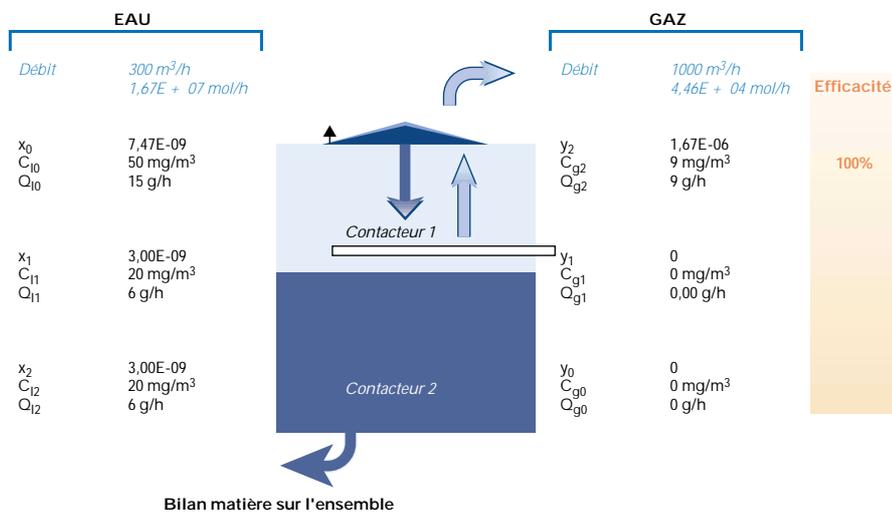
Dans ces conditions, 56 % de la trichloramine présente dans l'eau arrivant au bac est strippée.

L'adaptation de ce système sur un bac tampon classique est facile à réaliser. Il suffit d'adapter un trop-plein à débordement sur l'arrivée des eaux de bassin, afin de réaliser une cascade de longueur suffisante, tout en soufflant de l'air à travers le rideau d'eau à l'aide d'un ventilateur. Un second ventilateur plus puissant est nécessaire pour mettre le bac tampon en dépression.

Ces modifications du procédé ont un coût de l'ordre de quelques milliers d'euros.

Fig. 7. Bilan matière autour d'un bac équipé d'un distributeur d'eau en pluie fine dans le ciel du bac (débit de gaz : 1 000 m³/h)

- Material balance for a tank with a fine spray distributor at tank top level (gas flow rate 1,000 m³/h)



3.2. Système d'arrivée en pluie des eaux

Pour pouvoir comparer ce système au précédent, imaginons que l'on diffuse maintenant l'eau en pluie fine dans le ciel du bac tout en soufflant à contre courant 1 000 m³/h d'air de stripping. L'efficacité de ce contacteur est proche de 100 % (cf. § 2.2). Le bilan matière sur la trichloramine autour du bac est celui de la [figure 7](#).

Dans ces conditions, 60 % de la trichloramine présente dans l'eau arrivant au bac est strippée.

Les effets d'un soufflage d'air plus important à 2 500 m³/h sont représentés sur la [figure 8](#).

Dans ces conditions, 79 % de la trichloramine présente dans l'eau arrivant au bac est strippée.

Là encore, les modifications à réaliser sur un bac tampon classique sont peu importantes.

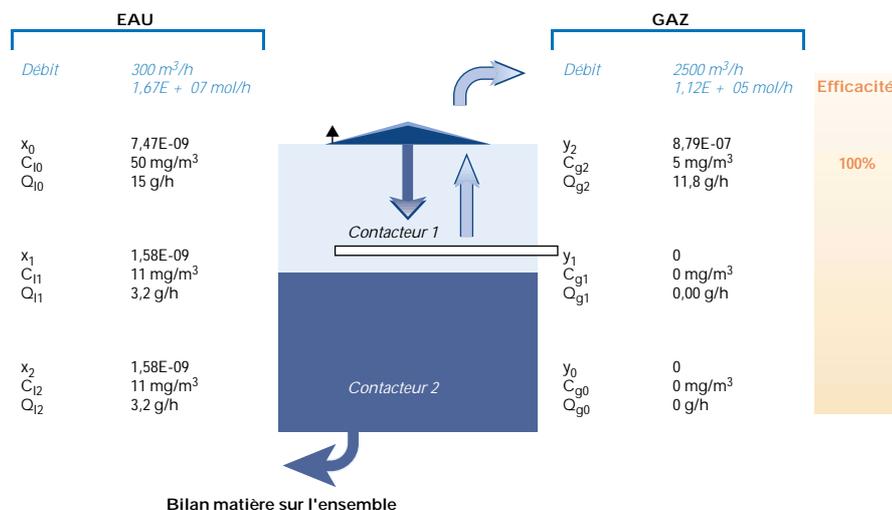
Il sera difficile de bien répartir toute l'eau arrivant dans le bac tampon par un système de pompage de douche, comme nous l'avons utilisé sur le pilote. Il sera plus judicieux d'adopter un système de déversoir par débordement ([fig. 9](#)), qui crée moins de pertes de charge sur les circuits d'arrivées d'eau et permet une bonne répartition du liquide dans le ciel du bac tampon. L'énergie dissipée à travers le diffuseur de liquide sera évidemment moindre que dans le cas du pilote (l'écoulement se fera par gravité, les filets fluides seront assez « grossiers »). L'efficacité de ce système sera toutefois plus importante que celle d'une simple cascade. Elle est estimée à 90 %. Le bilan matière autour du bac tampon devient celui de la [figure 10](#).

Dans ces conditions, 77 % de la trichloramine présente dans l'eau arrivant au bac est strippée.

Il faudra prévoir un ventilateur pour souffler l'air de stripping dans le ciel du bac tampon et un autre ventilateur (un peu plus puissant) pour mettre le bac en dépression. Ces modifications ont un coût de l'ordre de quelques milliers d'euros.

Fig. 8. Bilan matière autour d'un bac équipé d'un distributeur d'eau en pluie fine dans le ciel du bac (débit de gaz : 2 500 m³/h)

- Material balance for a tank with a fine spray distributor at tank top level (gas flow rate 2,500 m³/h)



3.3. Soufflage en fond de bac

Le soufflage en fond de bac doit être réalisé par un compresseur, pour vaincre la hauteur de liquide dans le bac tampon. Les appareils capables de délivrer 2 500 m³/h à 3 m de colonne d'eau sont encore de petites unités qu'il est pensable d'installer dans l'environnement technique d'une piscine. L'efficacité du système est de 100 %, le bilan matière autour du bac devient celui de la *figure 11*.

Dans ces conditions, 79 % de la trichloramine présente dans l'eau arrivant au bac est strippée.

Le coût d'un compresseur de 2 500 m³/h à 3 m de colonne d'eau (hauteur de la colonne de liquide à vaincre) est d'environ 15 250 euros. Il faudra ajouter à cette machine des diffuseurs de gaz (tubes percés) pour assurer la bonne répartition du gaz dans la phase liquide, ainsi qu'un ventilateur pour mettre en dépression le bac tampon. Le coût de ces modifications est compris entre 22 000 et 30 000 euros. Les coûts de fonctionnement (consommation électrique) et de maintenance du compresseur doivent aussi être pris en compte, lors de l'adoption de cette solution.

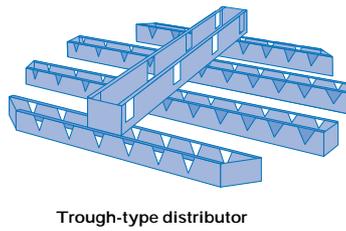


Fig. 9. Système de déversoir par débordement
- *Trough-type distributor*

Fig. 10. Bilan matière autour d'un bac équipé d'un déversoir par débordement (débit de gaz : 2 500 m³/h)
- *Material balance for a tank with a trough-type distributor (gas flow rate 2,500 m³/h)*

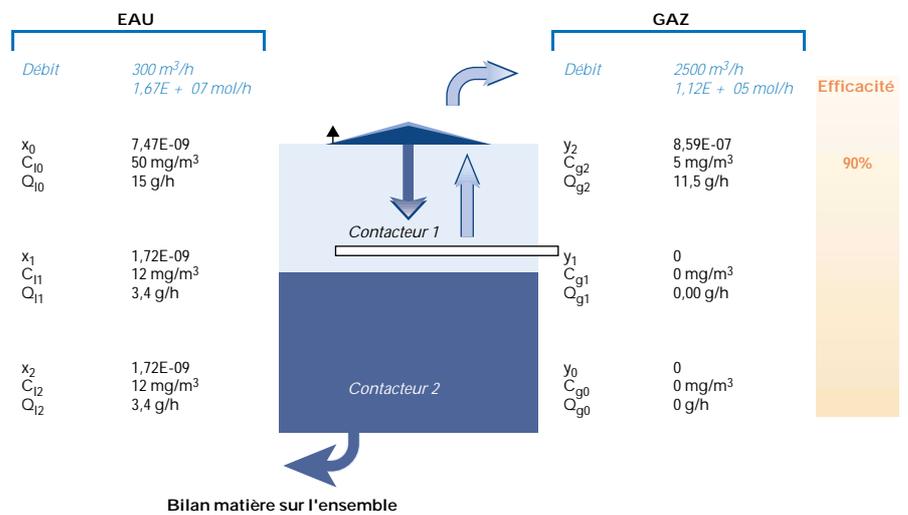


Fig. 11. Bilan matière autour d'un bac équipé d'un soufflage de gaz en fond de bac
- *Material balance for a tank with a gas blower system at tank bottom level*

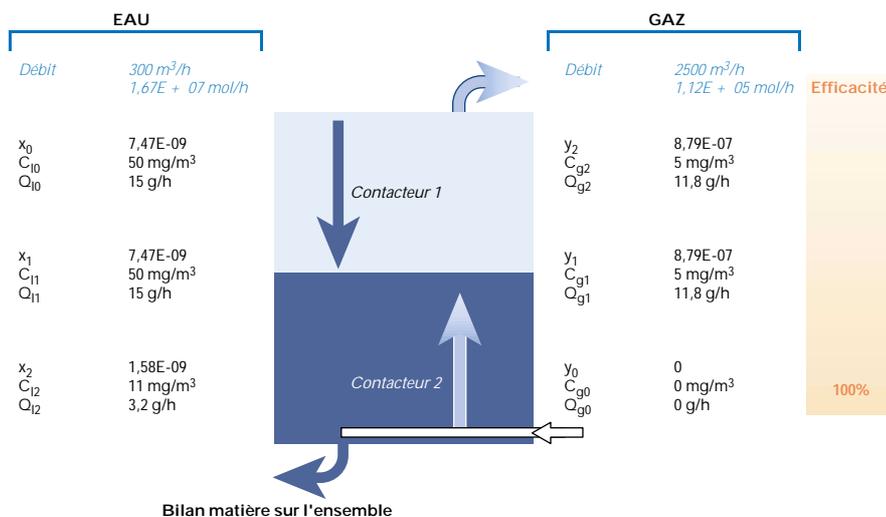
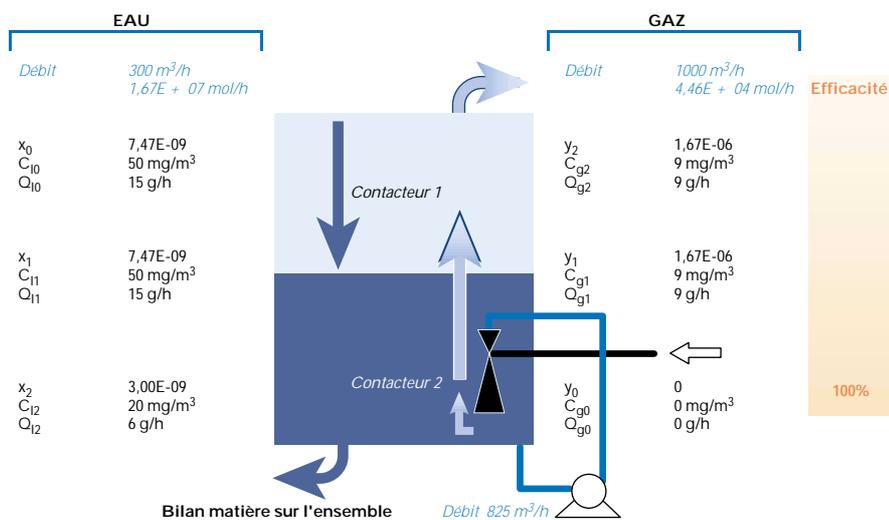


Fig. 12. Bilan matière autour d'un bac équipé d'un système Venturi
 – Material balance for a tank with a Venturi system



3.4. Système Venturi

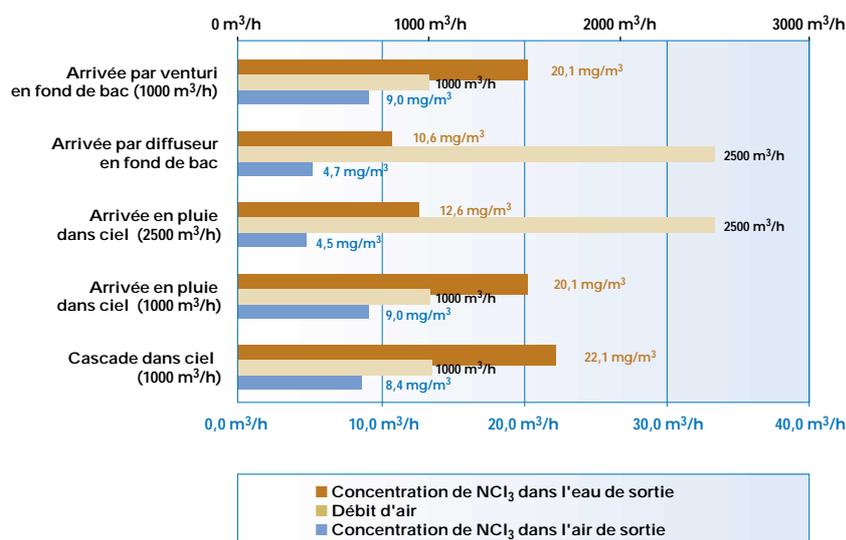
Le Venturi s'avère être un excellent contacteur gaz/liquide, mais sa capacité à aspirer du gaz est limitée (environ 8 m³/h par Venturi). Pour transférer une grande quantité de gaz dans le liquide, il faut mettre plusieurs systèmes en parallèle. 125 Venturis en parallèle est la configuration permettant d'aspirer 1 000 m³/h d'air. C'est aussi le plus gros système que proposent actuellement les constructeurs. Le débit de liquide à recirculer sur les venturis est d'environ 825 m³/h. Le bilan est représenté sur la *figure 12*.

Dans ces conditions, 60 % de la trichloramine présente dans l'eau arrivant au bac est strippée.

Comme dans le cas précédent, ce système est plus coûteux que les deux premiers cas exposés. La pompe et l'ensemble de Venturis permettant l'aspiration de 1 000 m³/h de gaz nécessitent un investissement d'environ 30 000 euros. Il faut aussi investir dans un ventilateur de mise en dépression du bac tampon. Dans cette solution comme dans la précédente, il faudra tenir compte des coûts de maintenance et de fonctionnement des appareils (consommation électrique de la pompe) lors du choix de la solution.

Fig. 13. Concentrations en NCl₃ de l'eau et de l'air en sortie de bac pour les cinq systèmes étudiés

– NCl₃ concentrations in water and air at the outlet of the tank for the five systems studied



3.5. Comparaison des quatre systèmes

On trouvera une comparaison des quatre systèmes et de leurs performances dans les *figures 13 et 14*.

Les deux systèmes, permettant la mise en œuvre de débits de gaz élevés (système de diffuseur de liquide dans le ciel du bac et soufflage de gaz en fond de bac), ont de forts rendements de strippage (proches de 80 %) car leurs efficacités restent proches de celle d'un étage théorique avec de forts débits de gaz.

Les deux autres systèmes (diffuseur Venturi et soufflage de gaz à travers une cascade de liquide) ont des performances plus limitées (des rendements de l'ordre de 60 %) qui peuvent être expliquées de la façon suivante :

■ Dans le cas de la cascade, nous avons vu que la variation de l'efficacité de strippage est inverse à la variation du débit. Il s'agit donc de trouver un compromis entre un débit de gaz raisonnable, ne faisant pas trop chuter l'efficacité du système, et un débit restant soutenu, afin que le débit de trichloramines strippé soit cor-

rect. 1 000 m³/h semble être un bon compromis.

■ Dans le cas du Venturi, il n'est pas possible, dans l'état de nos connaissances, de transférer par l'intermédiaire de ce système plus de 1 000 m³/h de gaz dans le liquide. La limitation est ici mécanique (débit d'eau trop important à mettre en œuvre, encombrement de l'installation). L'efficacité de strippage est excellente, mais les débits sont trop limités pour que la rentabilité du système soit intéressante.

3.6. Température de l'eau après le passage dans le contacteur gaz/liquide

La baisse de la température de l'eau provenant du mélange intime des deux phases est la crainte de nombreux exploitants. Elle signifie pour eux une augmentation de leurs coûts d'exploitation.

Le calcul de la baisse de température dans chaque contacteur n'est pas aisé à faire, car les coefficients de transfert de chaleur entre les deux phases restent difficiles à estimer. On peut toutefois mener un calcul purement théorique (et pessimiste) en considérant l'hypothèse suivante : le transfert thermique dans le contacteur est parfait et donc, l'air sort du bac tampon à la même température que l'eau qui y entre (30 °C).

L'équation du transfert de chaleur s'écrit, en utilisant les abréviations de la figure 15 :

avec t_{ea} : la température humide de l'air en entrée du bac tampon.

$$M_e \cdot c_{pe} \cdot (t_{se} - t_{ee}) = m_a \cdot c_{pa} \cdot (t_{ea} - t_{sa}) + M_a \cdot L \cdot (W_{ea} - W_{sa})$$

avec $t_{sa} = t_{ee} = 30 \text{ °C}$
et $W_i = 0,004 \cdot e \cdot (0,065 t_i)$

La résolution de cette équation pour différentes températures t_{ea} a été portée sur le graphique de la figure 16 (cf. page suivante ; le débit de gaz de strippage est fixé à 2 500 m³/h).

La différence de température de l'eau entre l'entrée et la sortie du contacteur n'est que de quelques dixièmes de °C (au maximum 3), quelle que soit la température de l'air de strippage. Le strippage ne provoque donc que peu de déperditions thermiques. On peut toutefois penser que le coefficient d'échange sera plus élevé (donc la déperdition thermique plus importante) dans les cas où le liquide est en phase discontinue (système de cascade et arrivée par pluie dans le ciel du bac tampon) que dans les cas où le liquide est en phase continue (soufflage par le fond du bac et système de Venturi).

Fig. 14. Répartition de la trichloramine entre l'air et l'eau en sortie de bac
- Trichloramine distribution between air and water at the outlet of the tank

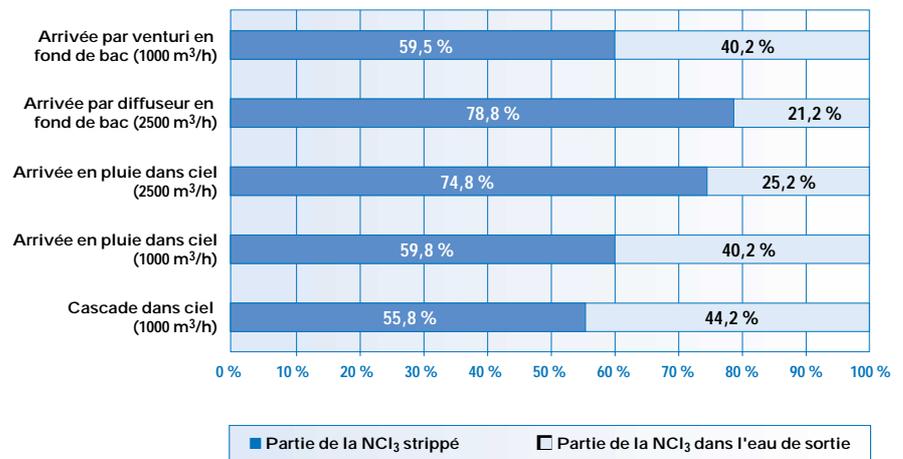


Fig. 15. Bilan thermique autour d'un bac type
- Thermal balance for a typical tank

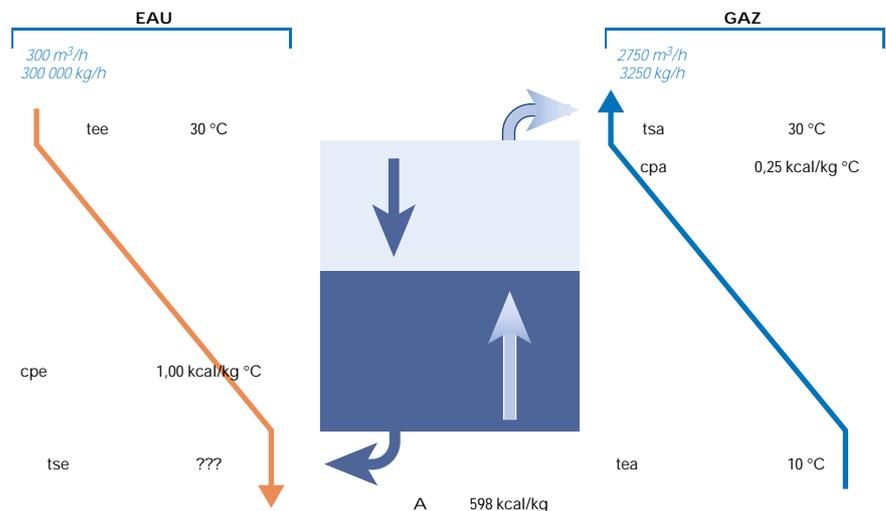
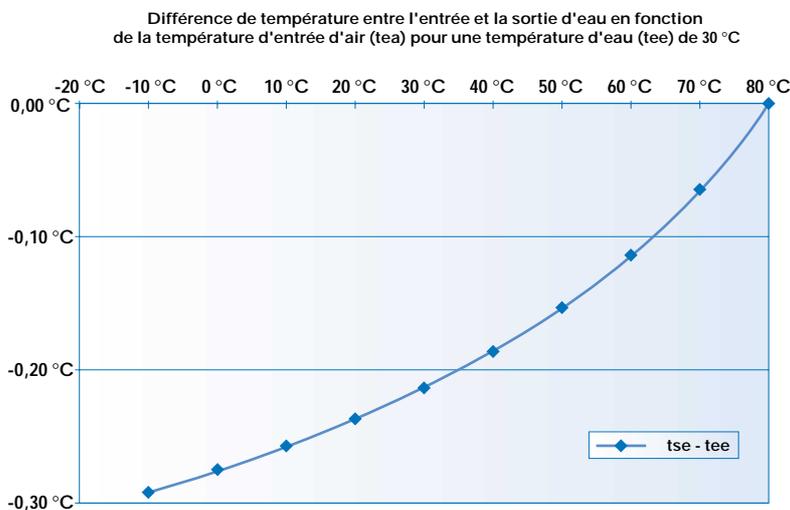


Fig. 16. Variation de la température de sortie de l'eau en fonction de la température de l'air de strippage

- Variation in water temperature at the outlet according to stripping air temperature



CONCLUSIONS

Les performances des quatre systèmes sont assez similaires. Leurs efficacités sont élevées (de 75 à 99 %). Nous avons vu aussi que les trois adaptations proposées pour les bacs tampons (répartition de l'eau en pluie dans le ciel, soufflage de gaz en fond de bac tampon et strippage à l'aide d'un système Venturi) permettent d'améliorer de 20 % les performances de strippage d'un bac tampon standard (équipé d'un système de cascade, comme dans la plupart des bacs aujourd'hui).

C'est dans la façon dont sont mis en œuvre les débits de gaz de strippage que réside la véritable différence entre les quatre diffuseurs testés.

Les systèmes avec le gaz en phase continue sont de conception très simple (leurs coûts d'investissement et de fonctionnement sont donc réduits). Les systèmes avec le liquide en phase continue ont des performances très proches de celles d'un étage d'échange parfait (efficacité supérieure à 99 %), quelle que soit

leur plage de fonctionnement. Mais les technologies de diffusion du gaz dans un liquide sont plus complexes que pour un strippage avec le gaz en phase continue. L'investissement et le coût de fonctionnement de ces ensembles sont donc plus élevés.

Dans tous les cas, la chute de température de l'eau due au strippage reste très faible : de l'ordre de quelques dixièmes de degré.

Enfin, la purification de trichloramine dans l'eau peut être réalisée par d'autres voies que le strippage. Il existe notamment des méthodes mettant en œuvre des charbons actifs et des ultraviolets. Ces dernières ne font pas appel à la notion d'équilibre thermodynamique entre une phase liquide et une phase gazeuse. Ainsi, elles permettent d'atteindre des concentrations très faibles en trichloramine dans l'eau, beaucoup plus faibles que celles atteintes par simple strippage. Ces techniques ont des spécificités et des coûts qui seront développés dans un prochain document.

BIBLIOGRAPHIE

- HÉRY M., GERBER J.M., HECHT G., SUBRA I., POSSOZ C., AUBERT S., DIEUDONNÉ M., ANDRÉ J.C. - Exposure to chloramines in a green salad processing plant. *Annals of Occupational Hygiene*, 1998, 42, pp. 437-451.
- HÉRY M., GERBER J.M., HECHT G., GENDRE J.M., HUBERT G., REBUFFAUD J. - Exposure to chloramines in the atmosphere of indoor swimming pools. *Annals of Occupational Hygiene*, 1995, 39, pp. 427-439.
- 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*, 1998, 55, pp. 258-263. (traduction française à paraître dans les Documents pour le Médecin du Travail, 2001).
- GÉRARDIN F., HÉRY M., GERBER J.M., QUENIS B. - Extraction de chloramines par contact gaz-liquide dans les eaux de piscines. *Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail*, 1999, 177, pp. 21-29.
- MULLER-RODRIGUEZ N. - Strippage de la trichloramine dans l'eau. Rapport d'essais d'un pilotage par l'école CPE. Lyon, CPE, 1999.