

Préconisations

pour réduire la formation de sous-produits de désinfection dans les unités de production et les réseaux de distribution

d'**EAU destinée à la CONSOMMATION HUMAINE**

Décembre 2014

PRÉAMBULE

TABLE DES FICHES

Glossaire

8

L'EXPLOITATION DES FILIÈRES DE TRAITEMENT

- Fiche 1** - Préconisations pour limiter la formation de sous-produits de désinfection – L'EXPLOITATION – Bien connaître et mesurer la qualité de la ressource et ses évolutions saisonnières 9
- Fiche 2** - Préconisations pour limiter la formation de sous-produits de désinfection – L'EXPLOITATION – Bien connaître et optimiser le temps de séjour hydraulique des réacteurs de désinfection 11
- Fiche 3** - Préconisations pour limiter la formation de THM et autres sous-produits de chloration – L'EXPLOITATION – Bien optimiser l'élimination de la matière organique 13
- Fiche 4** - Préconisations pour limiter la formation de bromates – L'EXPLOITATION – Maîtrise de l'ozonation et contrôle de la qualité de l'eau de Javel 17
- Fiche 5** - Préconisations pour limiter la formation de THM et autres sous-produits de chloration – L'EXPLOITATION – Maîtrise et contrôle de la chloration en usine 21
- Fiche 6** - Préconisations pour limiter la formation de sous-produits de désinfection – L'EXPLOITATION – Equipements analytiques à acquérir sur l'usine 27

LA RÉHABILITATION ET LA CONSTRUCTION DE NOUVELLES USINES

- Fiche 7** - Préconisations pour limiter la formation de sous-produits de désinfection – RÉHABILITATION DE FILIÈRE ET NOUVELLE USINE – La qualité de la ressource et ses évolutions saisonnières 29
- Fiche 8** - Préconisations pour limiter la formation de sous-produits de désinfection – RÉHABILITATION DE FILIÈRE ET NOUVELLE USINE – Le temps de séjour hydraulique des réacteurs de désinfection 33
- Fiche 9** - Préconisations pour limiter la formation de bromates – RÉHABILITATION DE FILIÈRE ET NOUVELLE USINE – L'ozonation 35
- Fiche 10** - Préconisations pour limiter la formation de bromates – RÉHABILITATION DE FILIÈRE ET NOUVELLE USINE – La chloration en usine 37
- Fiche 11** - Préconisations pour limiter la formation de sous-produits de désinfection – RÉHABILITATION DE FILIÈRE ET NOUVELLE USINE – Les équipements analytiques à prévoir sur l'usine 39

LA LIMITATION DE LA FORMATION DES SOUS-PRODUITS DE DÉSINFECTION EN DISTRIBUTION

- Fiche 12** - Préconisations pour limiter la formation de sous-produits de désinfection – MAÎTRISE DE LA CHLORATION EN RÉSEAU – Gestion des réseaux et des réservoirs de stockage 41





Cécile COURRÈGES

*Directrice générale de
l'Agence régionale de santé*

Conformément aux orientations du Plan National Santé-Environnement, le second Plan Régional Santé-Environnement adopté en Pays de la Loire a retenu parmi ses objectifs la sécurisation et l'amélioration de la qualité de l'eau de consommation humaine.

L'un des aspects étudiés a concerné la maîtrise de la formation des sous-produits de désinfection.

Les sous-produits qui se forment dans les unités de production (les produits chlorés et les bromates) et de distribution dans le cas des produits chlorés, sont reconnus comme présentant des risques sanitaires.

Ils sont en effet reconnus comme contribuant au développement de certains cancers (vessie et colorectal pour les sous-produits chlorés et reins, plèvres et thyroïde pour les bromates).

Ils sont également à l'origine de mauvais goût et d'odeur de l'eau.

Les eaux de surface (cours d'eau et barrages) sont particulièrement affectées de par leur richesse en matière organique, précurseur de la formation de ces sous-produits.

Ces eaux de surface alimentent près de 60 % de la population de la région Pays de la Loire et même jusqu'à 94 % des Vendéens.

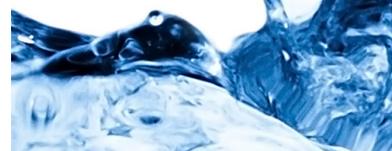
C'est la raison pour laquelle il a été décidé de mener une étude spécifique pour réduire la formation des sous-produits de désinfection.

Le présent document présente l'une des phases de l'étude, réalisée entre 2012 et 2014. Il définit des préconisations en vue de limiter la formation des sous-produits à la fois lors de travaux de construction ou de modernisation d'unités de production et lors de l'exploitation de ces usines et des réseaux de distribution associés.

Ces préconisations sont issues des réflexions d'une étude confiée à des experts associés d'un groupe de suivi comprenant des collectivités et des exploitants d'usines d'eau de la région. Elles ont été définies en tenant compte des données de qualité disponibles dans la région sur les filières en exploitation.

L'une des préconisations essentielles insiste sur la nécessité d'avoir une connaissance la plus précise possible de la qualité de la ressource et ce à différentes saisons de l'année.

L'objectif de ces fiches est d'améliorer la situation actuelle dans ce domaine. L'Agence régionale de santé Pays de la Loire formule le vœu d'une prise en compte de ces préconisations par les différents acteurs concernés par la production et la distribution d'eau destinée à la consommation humaine : maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, constructeurs et exploitants d'usines et de réseaux d'eau.



Parmi les objectifs du Plan National Santé Environnement figure celui de la maîtrise de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine dans les réseaux de distribution publique.

L'un des aspects plus spécifiquement visé est celui de la formation des sous-produits de la chloration.

Cet enjeu a été repris dans le Plan Régional Santé Environnement des Pays de la Loire approuvé par le Préfet de région, le Président du conseil régional et la Directrice générale de l'Agence régionale de santé des Pays de Loire en décembre 2010.

Il s'agit de l'action 3-1 de ce plan qui cherche à réduire la formation de sous-produits de chloration et des bromates dans l'eau destinée à la consommation humaine en améliorant les filières de traitement.

Ce plan repose sur deux étapes :

- Identifier les installations de traitement à risque et diagnostiquer la formation de sous-produits de chloration (station de traitement et réseaux). Une campagne analytique a été menée sur une dizaine d'installations de traitement et le réseau de distribution associé en 2011 et 2012.
- Elaborer des recommandations pour améliorer ces installations de traitement et limiter la formation de sous-produits de désinfection. Ces recommandations feront l'objet d'un guide de bonnes pratiques sur les filières en 2013. L'objectif final est d'obtenir 100 % des stations sans dépassement de sous-produit de désinfection en 2014.

Dans ce contexte, l'ARS a confié à Hydratec la réalisation d'une étude sur la formation des sous-produits de désinfection. Cette étude comporte 4 phases :

- phase 1 : étude bibliographique et caractérisation des situations régionales, ressources, filière de traitement, impact des réseaux.
- phase 2 : analyse des campagnes analytiques réalisées sur 10 sites de la région.
- phase 3 : visite détaillée de 6 sites de la région.
- Phase 4 : proposition d'action sous la forme d'un guide de recommandations à destination des collectivités et exploitants pour limiter les risques de formation des sous-produits.

L'objet du présent document porte sur la phase 4 à savoir de développer les recommandations pour améliorer les installations de traitement d'eau de consommation humaine à risque dans le but limiter la formation de sous-produits de désinfection.

Les préconisations et conseils présentés dans ce document reposent sur les données disponibles en Pays de Loire ainsi que sur l'état de l'art et les savoir-faire.

Les mesures et outils analytiques conseillés, pour une application à court terme, sont :

- **soit déjà utilisés couramment (COT, pH, Cl₂ et O₃ dissous)**
- **soit réalistes à mettre en œuvre sur les usines s'ils ne le sont pas déjà (abs. UV).**

Les adaptations à mener au niveau des usines, en exploitation et en éventuelles réhabilitations, restent réalistes.

Quelques perspectives de préconisations à moyen terme (plus coûteuses) sont également présentées.

Cette étude a été réalisée dans le souci de limiter la formation des sous-produits de désinfection. Cet objectif important en terme de santé publique ne doit toutefois pas occulter le fait qu'en tout état de cause l'objectif de distribuer une eau conforme aux exigences de qualité bactériologique doit rester une priorité. Les 2 sont conciliables et c'est tout l'objectif des préconisations figurant dans ce document.

Il est important de préciser que cette étude porte sur la formation des sous-produits de désinfection à savoir les THM et les bromates. Les préconisations peuvent être modulées si des problématiques connexes de type microbiologie, micropolluants organiques spécifiques, ammonium, métaux tels que le manganèse par exemple, sont à prendre en considération dans la définition de la filière.

Les pages suivantes présentent les fiches de préconisation à destinations des acteurs :

- **De la création de nouvelles unités de production d'eau potables,**
- **Des projets de réhabilitation d'unités existantes,**
- **De l'exploitation des unités de potabilisation et des réseaux de distribution.**

Un glossaire introductif permet d'éclairer le lecteur.

GLOSSAIRE

Symboles	Définitions	Unité usuelle
CAG	Charbon actif en grains	
CAP	Charbon actif en poudre	
CF	Chlorure ferrique	
COD	Carbone organique dissous (COD = COT – COP)	- mg/L de carbone
CODB	Carbone organique dissous biodégradable	- mg/L de carbone
COP	Carbone organique particulaire (COP = COT – COD)	- mg/L de carbone
COT	Carbone organique total	- mg/L de carbone
C	Concentration résiduelle dissoute en désinfectant	- mg/L de Cl ₂ ou O ₃
C.t (C.t ₁₀ , C.τ)	Paramètre de dimensionnement pour la désinfection	- mg/L-min.
PCA	Polychlorure d'aluminium	
PFTHM	Potentiel de formation de THM	- µg/L de THM
SA	Sulfate d'aluminium	
SUVA	Rapport UV ₂₅₄ nm / COD	- L/(mg.m) ou m ⁻¹ /(mg/L)
t ₁₀	Temps de sortie de 10 % de la quantité d'un traceur	- min.
t	Temps de contact	- min.
τ	Temps de résidence hydraulique moyen (volume/débit)	- min.
t ₁₀ / τ	Rapport permettant d'évaluer l'efficacité d'un cloisonnement	- sans unité
THM	Trihalométhanes totaux	- µg/L
UV ₂₅₄ nm	Absorbance UV à 254 nm	- 1/m ou m ⁻¹

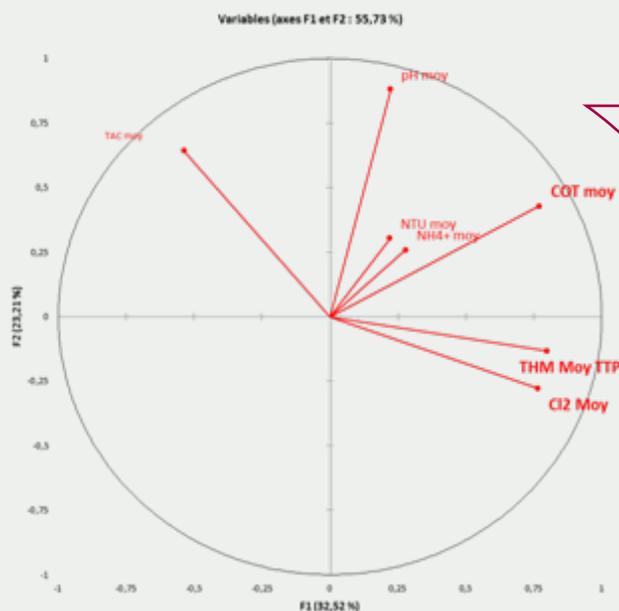
Bien connaître et mesurer la qualité de la ressource et ses évolutions saisonnières

Une eau brute à fort COT et contenant, de plus, des bromures présente un facteur de risque de formation de THM et de bromates dans l'eau traitée plus élevé qu'une eau brute à faibles teneurs en COT et en bromures. Ces deux paramètres doivent donc être contrôlés fréquemment dans la ressource. Attention, le niveau de l'indicateur COT, quand il est faible, n'est pas toujours révélateur du niveau du potentiel de formation de THM de l'eau traitée (ex : alluvions de la Loire). L'importance du rapport absorbance UV254 nm /COT de l'eau brute peut être également déterminante dans ce cas.

Préconisations pour l'analyse de la matière organique

- Des augmentations de COT dans l'eau brute sont fortement susceptibles de conduire à une augmentation des THM dans l'eau distribuée. L'exploitant doit donc être vigilant sur ce paramètre et suivre les recommandations pour mieux maîtriser la teneur en matière organique avant chloration (fiche n° 3), ainsi que les conditions pour mieux maîtriser la chloration (fiche n° 5).

L'illustration ci-dessous a été établie à partir de 167 données d'eau brute et d'eau traitée en Pays de Loire.



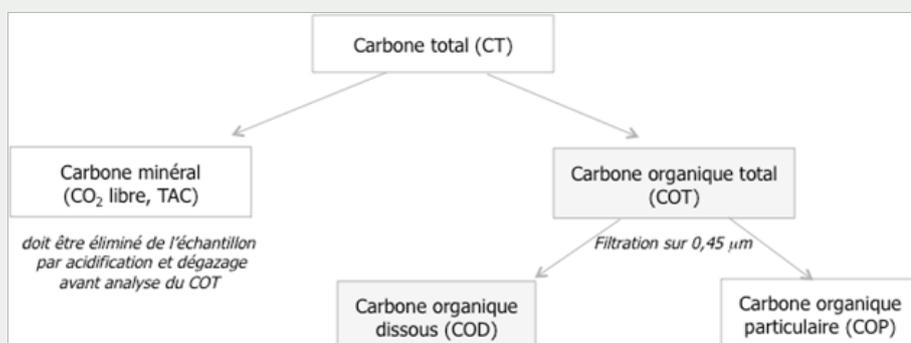
La projection des variables dans le plan principal permet de visualiser les observations obtenues à partir de la matrice des composantes.

Sur l'axe 1 (horizontal), on constate une forte corrélation entre le COT, Cl2 et les THM ce qui traduit un lien fort entre ces trois paramètres.

Illustration : Analyse en Composantes Principales sur les données disponibles SISEAUX des eaux brutes (COT) et des eaux traitées (THM et Cl2 résiduel avant distribution)

- La mesure du COT (et du COD) de l'eau brute doit être pratiquée fréquemment (a minima chaque mois), et plus particulièrement quand la turbidité ou la couleur de l'eau change significativement (caractéristique d'une variation du régime hydraulique) ou quand l'historique disponible mentionne des changements périodiques de qualité : lessivage de sols, crues, efflorescence algale, niveau bas des retenues...

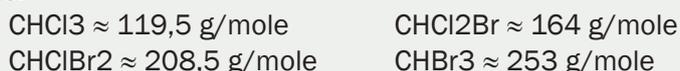
Les prélèvements (100 mL minimum, cf. échantillonnage ci-dessous) en flaconnage verre (propre) doivent être acidifiés (pH < 2 avec acide sulfurique) et conservés à 4 °C (7 jours maximum). Si les échantillons sont congelés (en flaconnage polyéthylène), l'acidification n'est pas indispensable et la conservation est de 1 mois (maximum). Si l'analyse est effectuée sur le site, étalonner l'appareil chaque mois.



- Mesurer régulièrement l'absorbance UV à 254 nm de l'eau brute pré-filtrée (filtration à 0,45 micron, prélèvements identiques au COT mais sans acidification) si possible sur le site de l'usine (fiche n° 6). Ces mesures sont ensuite reliées aux valeurs de COD en calculant le SUVA (= rapport UV254 nm/COD). Pour un SUVA constant ou pour des périodes de SUVA constant (il peut y avoir des différences importantes entre les saisons), il est possible d'asservir le taux de coagulant à l'absorbance UV à 254 nm, afin d'optimiser l'abattement de la matière organique par coagulation/floculation (fiche n° 3).

Préconisations pour d'autres analyses nécessaires

- Analyser fréquemment les bromures (Br-), tous les deux mois. Cette analyse permet d'évaluer le potentiel de formation de bromates si l'ozonation est pratiquée (fiche n° 4). Par ailleurs, la contribution des bromures à la formation des THM est fondamentale compte tenu, d'une part, de la grande réactivité du brome (formé par réaction avec le chlore libre actif HOCl) avec la matière organique, et d'autre part, de la masse molaire plus élevée des THM bromés.



- La fréquence de l'analyse des bromures peut être diminuée si la constance de la teneur dans la ressource est démontrée. Attention aux périodes d'étiage où la concentration en bromures augmente ainsi que la température, ce qui est « catastrophique » pour la formation de bromates (fiche n° 4).

Les échantillons d'eau (100 mL) pour l'analyse des bromures sont prélevés en flaconnage verre ou polypropylène, sans traitement particulier (conservation 1 mois au frais).

- L'azote ammoniacal (ou ammonium NH_4^+) est également mesuré régulièrement (tous les mois et surtout en hiver), car fortement consommateur de chlore (environ 8 à 10 mg Cl_2 / mg N), mais pas consommateur d'ozone, ni de dioxyde de chlore.

Les échantillons d'eau (200 mL) sont acidifiés (acide sulfurique pH < 2) en flacons verre ou polyéthylène et stockés à l'obscurité et à 4 °C (conservation 48 h).

- Afin d'évaluer le potentiel de formation de THM de l'eau brute, certaines analyses spécifiques peuvent être menées par des laboratoires spécialisés (PFTHM, analyse fractionnée de la matière organique). Ces analyses sont en fait beaucoup plus utiles, sur eau brute, quand il s'agit de définir une nouvelle filière (fiche n° 7) ou, sur une eau traitée (avant chloration finale), pour évaluer les évolutions de la formation de THM y compris en réseau (fiche n° 5).

Les prélèvements d'eau pour analyse doivent être représentatifs de l'eau. Un seul prélèvement ponctuel ne suffit pas, notamment pour une eau de surface.

Bien connaître et optimiser le temps de séjour hydraulique des réacteurs de désinfection

Le temps de contact entre l'eau et les désinfectants chimiques est un des paramètres les plus influents sur la formation des sous-produits de désinfection (THM, bromates et autres) mais aussi sur l'efficacité de la désinfection. C'est le « t » du concept du « C.t ».

Préconisations générales

- Pour les procédés chimiques de désinfection (chlore, ozone, dioxyde de chlore), les performances des étapes de désinfection sont toujours annoncées en nombre de log₁₀ (ou encore en puissance de 10) de microorganismes inactivés (bactéries, virus, protozoaires, algues). Les abattements correspondent à des valeurs du produit « C. » de la concentration résiduelle en désinfectant (C) par le temps de résidence hydraulique ou temps de contact (t) et ce pour une température et un pH donnés. Ces valeurs sont établies à l'échelle du laboratoire, où les paramètres sont rigoureusement maîtrisés.
- En usine, ne pas se contenter du rapport « volume de réacteur / débit » pour estimer le temps de résidence d'un réacteur ou d'un réservoir de désinfection. Ce rapport correspond au temps de résidence hydraulique d'un « réacteur piston », ce qui n'est jamais le cas d'un réacteur réel ou d'un réservoir de désinfection. Ce rapport est encore appelé « τ ».
- Pour les applications industrielles en traitement des eaux, les anglo-saxons utilisent fréquemment la notion de « C.t₁₀ ». Le « t₁₀ » est le temps correspondant à la sortie du réacteur de 10 % de la quantité d'un traceur soluble injecté (sous flux, au temps zéro) en tête de réacteur. Le risque de ne pas appliquer les conditions de désinfection souhaitées (par rapport aux valeurs « théoriques » de laboratoire) n'est alors pris que sur 10 % du débit d'eau, sachant qu'une partie aussi importante du débit subit des conditions de désinfection plus fortes.

Plus la valeur de τ (rapport « volume / débit ») est grande par rapport au t₁₀, (temps de sortie de 10 % d'un traceur), plus il y a des zones mortes dans le réacteur d'ozonation ou dans le réservoir de chloration. La valeur du t₁₀, par rapport à « τ » dépend du type de réacteur :

- réacteur « piston » : $t_{10} / \tau = 1$ (cas jamais rencontré en usine)
- réacteur « parfaitement mélangé » (par exemple avec turbine) : $t_{10} / \tau = 0,1$ (cas rare en usine)
- réacteur ou réservoir classique, sans cloisonnage : $t_{10} / \tau = 0,2$ à $0,3$ (cas fréquent en usine)
- réacteur ou réservoir, cloisonné : $t_{10} / \tau = 0,5$ à $0,8$ (la valeur la plus élevée est à rechercher en usine ; celle-ci augmente avec le nombre de cloisons)

- Le « C. τ » (et le « C.t₁₀ ») pour un abattement donné diminue d'un facteur d'environ 2 par tranche de 10°C d'augmentation de la température de l'eau. Il peut donc être diminué lorsque la température de l'eau augmente tout en maintenant la même efficacité, toutes autres conditions identiques.

- Le temps de séjour hydraulique augmente quand le débit de l'usine diminue. La concentration résiduelle en désinfectant pourrait donc être diminuée dans ce cas, car c'est la valeur du « C. τ » (ou du « C.t₁₀ ») qu'il faut garder constante mais il est très difficile de réguler de très faibles taux de résiduel. Il est donc préférable de prévoir des réacteurs de capacité réduite, fonctionnant en parallèle afin d'arrêter un ou plusieurs de ces réacteurs quand le débit diminue.

- Réaliser le traçage des ouvrages (réacteur d'ozonation et réservoir de désinfection finale) en suivant la quantité de traceur sortante en fonction du temps (le temps « zéro » correspond au moment de l'injection du traceur). Effectuer ce traçage à plusieurs valeurs de débit, choisies en fonction des caractéristiques de l'usine.

Faire effectuer le traçage par un organisme compétent qui indiquera la nature du traceur soluble à injecter (fluorescéine, lithium, chlorure de sodium, ...) et à analyser en sortie de réacteur.

Préconisations pour l'exploitation (avec réacteur et réservoir existants)

- Pour chaque débit, calculer la valeur du « t_{10} , » (temps correspondant à la sortie de 10 % de la quantité de traceur injectée) et la comparer à celle du rapport « volume du réacteur / débit » (ou « τ »).
- Plus la valeur du rapport « t_{10} / τ » est inférieure à 1, plus il y a des zones mortes dans le réacteur ou le réservoir. Ces zones mortes sont souvent la cause d'une formation excessive de sous-produits de désinfection puisque l'eau y séjourne plus longtemps que la moyenne.

Réaliser le cloisonnage du réacteur ou du réservoir pour faire tendre le rapport « t_{10} / τ » vers 0,5 à minima, ou mieux vers 0,8. Vérifier que la désinfection de l'eau est bien complète, notamment vis à vis de la qualité microbiologique exigée.

Bien optimiser l'élimination de la matière organique

La coagulation floculation avec un sel métallique est à l'heure actuelle l'étape la plus performante pour éliminer la matière organique dissoute. Son optimisation est indispensable même en présence de traitement d'affinage performant. Bien que ce soit au niveau de cette coagulation floculation que la lutte contre la matière organique est la plus efficace (rendement/coût), une exploitation optimisée du (ou des) traitement(s) de finition est également nécessaire pour minimiser la formation de THM et autres sous-produits de désinfection.

Préconisations pour l'étape de coagulation

- Effectuer fréquemment des expériences de « jar-test » en s'appuyant sur les conditions optimales connues et souvent vérifiées dans plusieurs usines : 1 mg Al par mg COD à pH ~ 6,5 (voire plus faible) ou 2 à 3 mg Fe/mg COD à pH ~ 5,5.

→ Commencer par un premier jar-test à dose constante (1 mg Al/mg COD ou 2 mg Fe/mg COD) et à pH variable autour des valeurs optimales de pH précisées ci-dessus. Choisir le meilleur pH (attention c'est souvent un compromis) et faire un second jar-test à pH constant (la valeur choisie) et à dose variable, en encadrant les doses utilisées pour le premier jar-test (jusqu'à 3 mg Fe/mg COD pour le chlorure ferrique).

→ Les contrôles à effectuer sont les suivants :

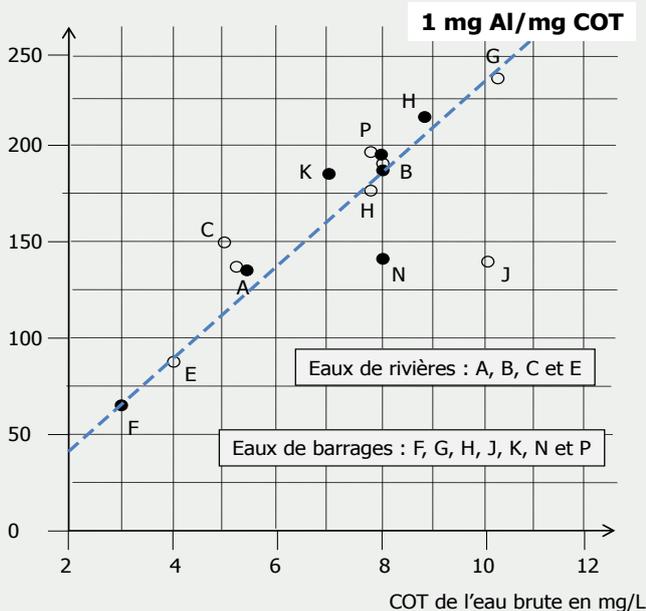
- pendant la coagulation/floculation : pH
- sur eau décantée : pH, turbidité + éventuellement les contrôles suivants : COD, absorbance UV 254 nm, résiduel de coagulant dissous
- analyses complémentaires sur eau filtrée : PFTHM (cf. fiche 5).

- La fréquence des essais de jar-tests doit être guidée par les analyses d'eau brute (fiche 1), et tout particulièrement par les variations brutales de turbidité, de la couleur ou du pH et/ou de la teneur en matière organique, ainsi que par les données disponibles sur l'historique de la ressource. Appliquer à minima une fréquence saisonnière.

- Préférer le chlorure ferrique aux sels d'aluminium, car l'abattement des matières organiques est bien supérieur à pH acide, seulement possible avec le chlorure ferrique. La dose optimale à pH 5,5 voire 5, ou 6 est généralement de 2 mg/ mg COD, mais souvent plus élevée pour les eaux de retenue (jusqu'à 3 mg/ mg COD). Attention aux problèmes de corrosion des bétons en particulier. Le recours aux sels d'aluminium pose par ailleurs le problème d'un risque de résiduel d'aluminium dans l'eau distribuée.

L'illustration ci-après sur la comparaison entre les sels d'aluminium et le chlorure ferrique est extraite de l'ouvrage « Le traitement de l'eau potable, par B. Legube » à paraître prochainement chez Dunod.

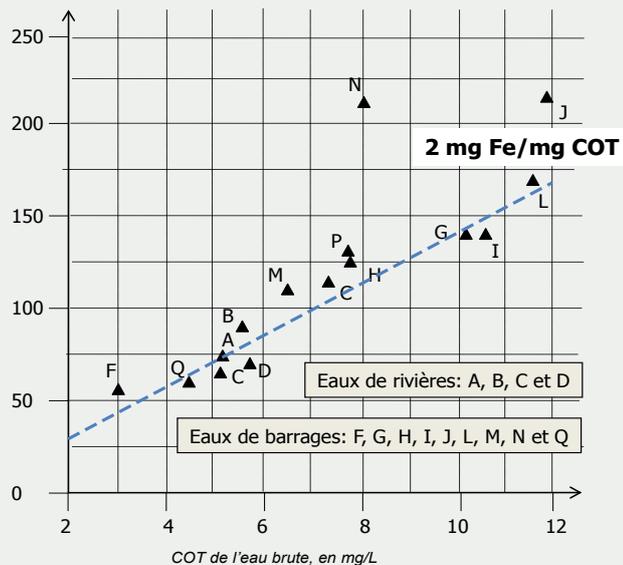
Dose de coagulant en g/m³ de produit technique
en solution à 8% Al₂O₃



- Doses optimales de SA liquide à 8% Al₂O₃ (•) à pH régulé entre 6 et 6,7 (selon les eaux) ou de PCA liquide à 8% Al₂O₃ (o) à pH régulé entre 6,2 et 7 (selon les eaux).
- A l'exception de deux eaux (N et J) la dose optimale est proche de 1 mg Al/mg COT, soit 23,2 mg de produit technique (à 8%) par mg de COT.

Doses optimales de CF liquide à 41% en FeCl₃ à pH régulé à 5,5 – 5,6, sauf pour A (pH 7,1) et Q (pH 6).
A l'exception de deux eaux (N et J) la dose optimale est proche de 2 mg Fe/mg COT, soit 14,2 mg de produit technique (à 41%) par mg de COT.

Dose de FeCl₃ technique à 41%, en g/m³



Légende : Doses optimales de coagulant technique (en solution) obtenues en « Jar-tests » pour différentes eaux douces de rivières et de retenues.

- Lors des jar-test avec un coagulant et un pH de coagulation donnés, établir la relation entre le COD et la dose optimale de coagulant. Cette relation existe.
- Essayer alors d'établir la relation **spécifique à la ressource** entre l'absorbance UV (à 254 nm) de l'eau brute pré-filtrée et la dose de coagulant, la mesure de l'absorbance UV est plus facile et moins coûteuse et elle peut être automatisée plus facilement.
- Contrôler l'indice de LARSON et, dans le cas du chlorure ferrique, l'apport de bromures dans l'eau qui doit être négligeable.

$$\rightarrow \text{Indice de LARSON} = [(\text{chlorures}) + (\text{sulfates})] / (\text{bicarbonates})$$

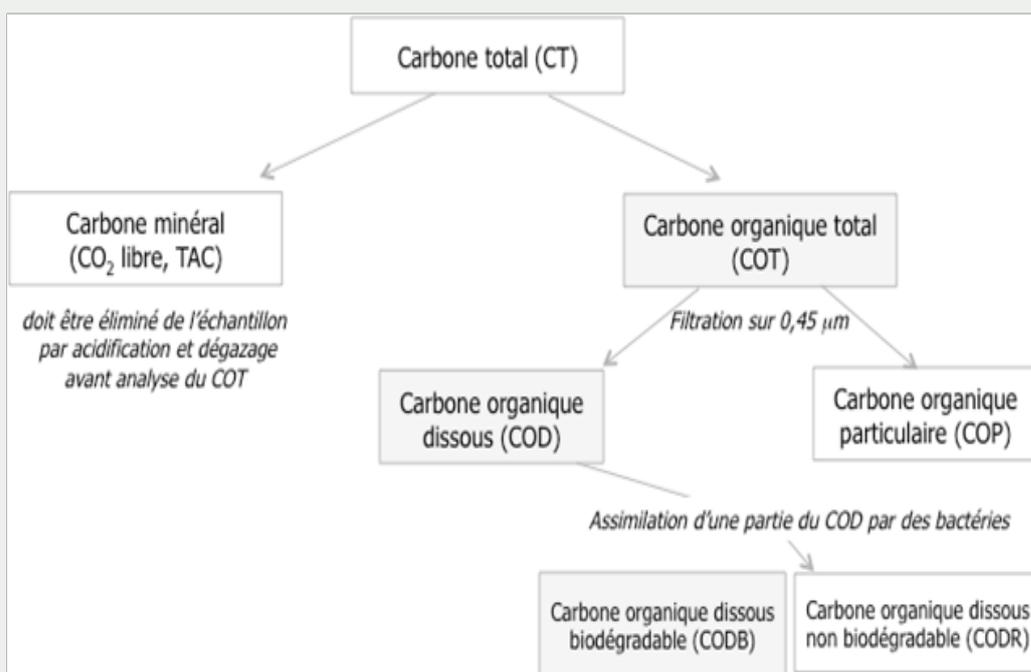
L'objectif est de veiller à produire une eau non corrosive. Les ouvrages devront notamment bénéficier d'une protection jusqu'à l'étape de remontée du ph.

Préconisations pour les étapes d'ozonation

La pré-ozonation n'a pas d'effet significatif sur la réduction directe de la matière organique dissoute et de son potentiel de formation de sous-produits de chloration. Elle peut néanmoins avoir un effet bénéfique sur la coagulation, phénomène particulièrement visible en période de développement algal.

- Optimiser l'étape d'inter-ozonation de manière à obtenir un abattement important du SUVA (rapport absorbance UV 254 nm / COD) dans l'eau ozonée. La diminution du SUVA se traduit souvent par une diminution de la formation de THM en production, même si le COD évolue peu. Cet abattement du SUVA est d'autant plus grand que le taux d'ozonation appliqué est élevé.
- Quand l'inter-ozonation est suivie d'une filtration sur charbon actif en grains (CAG), vérifier que l'inter-ozonation transforme une partie du COD en CODB, qui sera lui-même éliminé en grande partie par le CAG, même saturé. Une augmentation du taux d'ozonation doit induire une formation plus importante de CODB donc une élimination plus grande de la matière organique.

L'illustration ci-dessous est extraite de l'ouvrage «Le traitement de l'eau potable, par B. Legube» à paraître prochainement chez Dunod.



Légende : Le carbone organique dissous biodégradable (CODB) représente de 20 % à (parfois) 50 % du COD de l'eau inter-ozonée

- Des augmentations du taux d'ozonation ont des effets positifs sur la désinfection de l'eau et sur la qualité microbiologique de l'eau distribuée. Rester toutefois vigilant sur la surveillance des bromates qui augmenteront avec l'augmentation du taux d'ozonation si les autres conditions sont réunies pour leur formation (fiche n° 4).

Préconisations pour les étapes d'affinage au charbon actif en poudre

- Optimiser, au moins une fois par saison, la dose de charbon actif en poudre (CAP) en fonction de l'abattement de COD et de SUVA. Augmenter cette dose pour mieux éliminer la matière organique. Tester également l'efficacité de plusieurs types de CAP en n'omettant pas de tester l'influence du PH pour chaque CAP.

→ *Les tests avec CAP (dose et type) sont réalisés en jar-test. Attention le jar-test ne prend en compte ni l'effet positif du lit concentré de CAP dans certains procédés, ni l'effet négatif de l'âge du CAP dans ce lit.*

- Maintenir le pH le plus faible possible dans le traitement de finition au CAP (minimiser la remontée du pH) pour s'assurer de la meilleure adsorption possible de la matière organique.

Toutefois dans certaines situations et notamment en présence de micropolluants spécifiques ou selon la filière cet objectif de maintien de pH bas vis-à-vis de l'élimination de la matière organique pourra être modulé.

L'étape de traitement principalement responsable de la présence de bromates (BrO_3^-) dans l'eau traitée est l'inter-ozonation, certaines conditions de traitement favorisant particulièrement cette formation. La pré-ozonation ne produit pas de bromates puisqu'il n'y a pas d'ozone résiduel dans cette étape. La qualité de l'eau de Javel peut être également une source d'introduction de bromates dans l'eau.

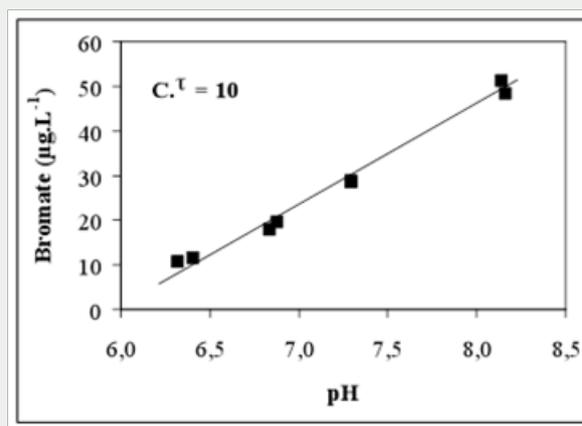
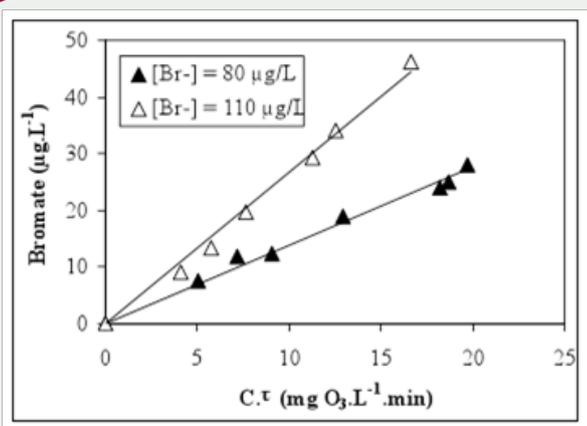
Préconisations générales

- Analyser les bromures dans la ressource a minima tous les deux mois. La fréquence de l'analyse des bromures peut être diminuée si la constance de la teneur dans la ressource est démontrée. Attention aux périodes d'étiage où la concentration en bromures augmente ainsi que la température, ce qui est « catastrophique » pour la formation de bromates.

➔ *Les échantillons d'eau (100 mL) pour l'analyse des bromures sont prélevés en flaconnage verre ou polypropylène, sans traitement particulier (conservation 1 mois).*

- Toutes autres conditions réunies et constantes, la formation de bromates en inter-ozonation est directement proportionnelle à la valeur du « C.τ » (cf. fiche n° 2). En inter-ozonation, le « C. τ » est le produit de la concentration résiduelle en ozone dissous par le temps de séjour hydraulique moyen du (ou des) compartiment(s) de contact, le compartiment de diffusion produisant peu (ou pas) de bromates.
- Pour l'action virulicide (et 3 log de giardia lamblia à plus de 10°C), un « C.t10 » de 1,6 min.mg/L est suffisant, soit un « C. τ » de 3 à 3,5 min.mg/L pour un réacteur d'ozonation bien cloisonné (cf. fiche n° 2). Le risque de non-conformités en bromates ($> 10 \mu\text{g/L}$) est faible à ces valeurs, sauf à pH légèrement alcalin.
- Pour une action sur les *cryptosporidium parvum* (3 log₁₀ d'abattement à plus de 10 °C), les valeurs des « C.t10 » sont bien plus élevées, de l'ordre de 36 min.mg/L à 5°C et 9 min.mg/L à 20°C, donc des « C. τ » pratiquement du double pour un réacteur bien cloisonné. Le risque de non-conformités sur les bromates est beaucoup plus grand dans ce cas, voire inévitable (sauf à pH vraiment acide, < 6).
- Ne pas remonter le pH avant ozonation au-delà de 6,5.

Les illustrations ci-après sont extraites d'un article publié dans Techniques Sciences et Méthodes (B. Legube et al. 2001, TSM n°6, pp. 61-69), suite à des essais réalisés à l'échelle du laboratoire (dans un réacteur de type colonne à bulles).



Légendes

A gauche : la production de bromates en inter-ozonation est linéairement proportionnelle à la valeur du « C. τ », la pente de la droite dépendant des autres conditions (pH, température, concentration en bromures, ...)

A droite : Le pH est très influent sur la production de bromates par inter-ozonation, surtout quand les autres conditions sont favorables (bromures, « C. τ », température)

Préconisations pour l'exploitation

- Analyser les bromates tous les mois dans l'eau distribuée et de temps en temps en sortie d'inter-ozonation.

➔ Les échantillons d'eau (100 mL) pour l'analyse des bromates sont prélevés en flaconnage verre ou polypropylène, sans traitement particulier (conservation à 4 °C, 1 mois).

- Etre vigilant lors de l'augmentation de la teneur en bromures dans la ressource et/ou de l'augmentation de la température (qui vont souvent de pair). Une augmentation de 50 % de la teneur en bromures entraîne le doublement de la concentration en bromates formés (toutes autres conditions identiques). Une augmentation de la température de l'eau de 5 à 20 °C double la quantité de bromates formés (toutes autres conditions identiques).

- Contrôler la concentration résiduelle en ozone dissous (« C » en mg O₃/L) en sortie de réacteur d'inter-ozonation et essayer d'asservir le taux de traitement en ozone appliqué à la valeur choisie de « C » afin de maintenir un taux de résiduel constant. Disposer d'un enregistrement du résiduel avec des alarmes mini-maxi.

- En période d'eau chaude (~ 20°C), imposer une valeur de « C » pour que le produit « C.τ » (avec « τ » = rapport « volume du réacteur / débit de l'installation ») soit compris entre 3 et 3,5 min.mg/L, à condition que le réacteur soit correctement cloisonné (à vérifier par traçage, cf. fiche n° 2). Si le réacteur n'est pas suffisamment cloisonné la valeur de « C » doit être augmentée (fonction du rapport « t₁₀ / τ », cf. fiche n°2).

- En période d'eau froide, l'effet désinfectant de l'ozone est nettement diminué (mais la formation de bromates également). Une diminution de température de l'eau de 20 °C à 5 °C nécessite de doubler la valeur de « C » pour un même débit pour conserver le même effet désinfectant.

- Si le pH de l'eau clarifiée est faible (cas d'une eau douce ou acidifiée lors de la coagulation), surtout ne pas remonter le pH avant ozonation au-delà de 6,5. Une augmentation du pH de 6,5 à 7,5-8,0 peut occasionner un triplement de la concentration en bromates formés (toutes autres conditions identiques).

- Si nécessaire, neutraliser l'ozone résiduel dès la sortie du réacteur d'ozonation afin d'éviter l'augmentation du « C. τ » notamment au-dessus des filtres à charbon actif en grains.
- Contrôler la qualité de l'eau de Javel utilisée en désinfection finale vis à vis de l'impureté bromates. Certaines eaux de Javel peuvent contenir jusqu'à 600 mg de bromate/L.
 - ➔ Pour une eau de Javel à 47 ° chlorométriques qui contient 75 mg BrO₃-/L d'impuretés, à chaque gramme de Cl₂ ajouté par m³ d'eau en désinfection finale, correspond 0,5 μg/L de bromate ajouté dans l'eau traitée.

La pré-chloration étant aujourd'hui bannie, c'est en désinfection finale que sont formés les THM et autres sous-produits de chloration (acides haloacétiques notamment). Cette désinfection finale ayant pour but de sécuriser la distribution en réseau, c'est très souvent le chlore gazeux ou l'eau de Javel (voire l'électro-chloration) qui sont utilisés, l'utilisation du dioxyde de chlore (autre désinfectant rémanent) produisant des chlorites pour lesquels la réglementation est difficile à respecter. Outre la matière organique, les paramètres qui déterminent la formation de sous-produits de chloration sont la teneur en chlore libre, le pH, les bromures et le temps de contact avec le chlore résiduel.

Préconisations pour l'exploitation : **Analyses à effectuer sur l'eau avant chloration finale**

- Optimiser l'abattement de la matière organique tout au long de la filière (cf. fiche n° 3).
- Contrôler le chlore résiduel libre et total, ainsi que le pH en sortie de réservoir de désinfection. Calculer la proportion de chlore libre actif (acide hypochloreux HOCl), sauf si l'appareil de mesure peut donner directement cette valeur.

➔ *Les analyseurs de chlore en ligne utilisés en usine (et en réseau) sont souvent des analyseurs par méthode ampérométrique dont la gamme de mesure est comprise entre 0,01 et 5 mg/L de chlore libre. Ils mesurent en fait HOCl et le pH, puis calculent le chlore libre. Il ne faut pas oublier de vérifier la validité de la mesure (cf. notice des appareils), notamment en pratiquant régulièrement des contrôles manuels par la méthode à la DPD.*

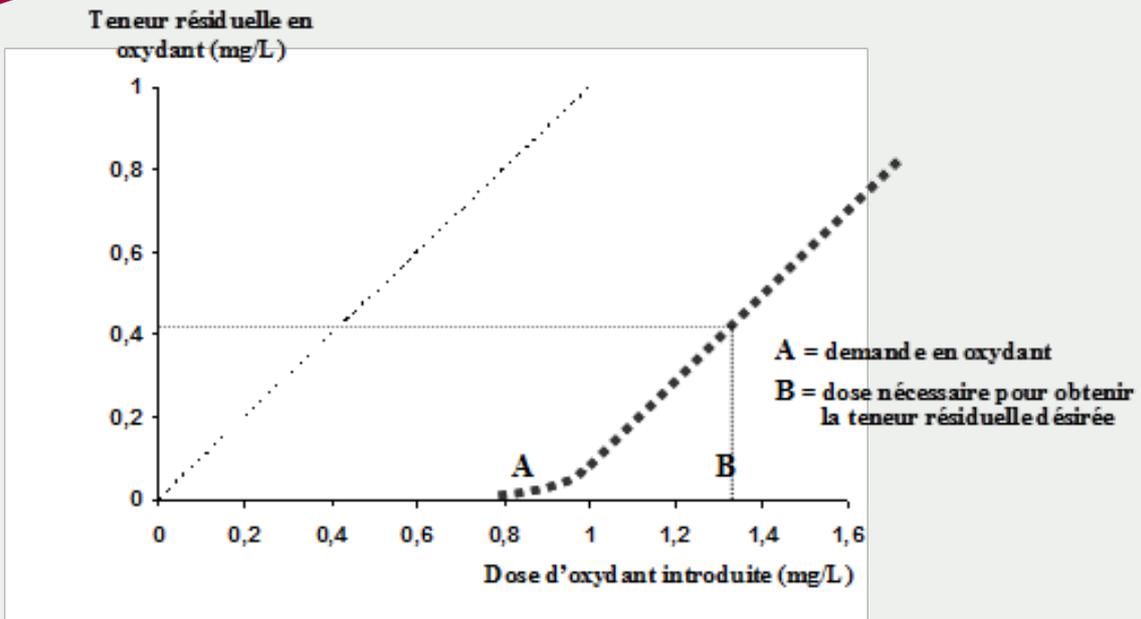
- Contrôler (si possible en continu) l'absorbance UV à 254 nm sur l'eau traitée en amont de la chloration (rapportée à 1 m de trajet optique, cf. fiche n° 6) et contrôler le COD ou le COT (en mg/L). A ce niveau du traitement de l'eau, le carbone organique particulaire est négligeable. Calculer le SUVA (dans les unités précisées ci-dessus), c'est-à-dire le rapport UV254nm / COD et observer sa variation saisonnière.

D'après l'étude réalisée pour l'ARS Pays de Loire (sur dix usines sélectionnées), les valeurs de SUVA des eaux traitées sont généralement comprises entre 0,2 et 2 et peuvent varier dans cette proportion (facteur 10) pour la même usine sans que le COD présente des variations importantes ou très significatives. Les valeurs de SUVA des eaux traitées sont souvent les plus faibles en été.

- Toutes autres conditions constantes, la formation de THM et autres sous-produits de chloration sur l'usine (en désinfection finale) est directement proportionnelle à la valeur du « C.τ » (produit de la concentration résiduelle en chlore libre dissous par le temps de séjour hydraulique moyen, cf. fiche n° 2). Il faudra donc éviter les zones mortes dans les réservoirs de chloration, et pour cela connaître et optimiser le temps de séjour hydraulique réel (cf. fiche n° 2).
- Appliquer en chloration des valeurs de « C.τ » suffisantes et non pas excessives.

- Quand aucune autre étape de désinfection (ozone, UV) ou traitement membranaire n'existe sur l'usine, appliquer un « C.t10 » (cf. fiche n° 2) de 15 mg/L.min à pH inférieur à 8 (suffisant pour bactéries pathogènes et virus). Cela correspond à un « C.τ » (avec τ = temps de séjour hydraulique moyen) d'environ 30 mg/L.min pour un réacteur de chloration bien cloisonné (cf. fiche n° 2). Attention, si le réacteur n'est pas ou mal cloisonné, cette valeur du « C.τ » peut être beaucoup plus élevée (100 à 150 mg/L.min, voire plus), surtout sous faible débit. La formation de THM (et autres sous-produits de chloration) va nécessairement augmenter dans ce cas.
- Quand d'autres étapes de désinfection existent et fonctionnent sur l'usine (ozonation, désinfection UV) ou qu'il existe une filtration membranaire, la désinfection finale n'est qu'une désinfection de sécurité (pour la distribution) et les valeurs de « C.t10 » peuvent être fortement diminuées, ce qui limitera considérablement la formation de THM en usine. D'après la littérature scientifique, un « Ct10 » de l'ordre de 2 min.mg/L est suffisant, soit un « C.τ » de 4 min.mg/L pour un réservoir cloisonné et de 15 à 20 min.mg/L pour un réservoir non cloisonné. Attention, ces valeurs faibles de « C.τ » ne sont valables que pour une eau exempte d'azote ammoniacal. Si l'azote ammoniacal est présent, le temps de chloration doit être au minimum de 30 minutes et la dose à appliquer dépend de la teneur en azote ammoniacal (8 à 10 mg Cl₂ / mg N-NH₄⁺) et du résiduel « C » souhaité.
- Contrôler régulièrement la teneur en matière organique dans l'eau traitée avant désinfection finale, c'est à dire les valeurs de COD (ou COT), de l'absorbance UV à 254 nm, voire de l'indice permanganate. Calculer les relations entre ces valeurs et observer leur variation.
 - Pour le COT (ou COD), les prélèvements (100 mL minimum pour COT) en flaconnage verre (propre) doivent être acidifiés (pH < 2 avec acide sulfurique) et conservés à 4°C (7 jours maximum). Si les échantillons sont congelés (en flaconnage polyéthylène), l'acidification n'est pas indispensable et la conservation est de 1 mois (maximum). Si l'analyse est effectuée sur le site, étalonner l'appareil chaque mois.
 - Pour la mesure de l'absorbance UV, filtrer l'échantillon sur membrane 0,45 μm (100 mL) et faire la mesure de préférence sur le site. Si la mesure est effectuée à l'extérieur, prélever en flaconnage verre ou polypropylène, ne pas acidifier et conserver à 4 °C (7 jours maximum).
 - D'autres études plus poussées peuvent être confiées à des laboratoires spécialisés, sur le fractionnement et la caractérisation de la matière organique. Elles ne doivent être effectuées que lorsque le problème des THM demeure malgré la mise en œuvre des préconisations et notamment celles concernant la réduction du COT.
- Contrôler régulièrement la teneur en azote ammoniacal (ou ammonium NH₄⁺) de l'eau traitée avant désinfection finale. Le chlore consommé par l'ammonium est compris entre 8 et 10 mg Cl₂/mg N-NH₄⁺ (théoriquement 7,6 mg Cl₂/mg N-NH₄⁺).
 - Les échantillons d'eau (200 mL) sont acidifiés (acide sulfurique pH < 2) en flacons verre ou polyéthylène et stockés à l'obscurité et à 4°C (conservation 48 h).
- Mesurer de temps en temps la demande en chlore de l'eau traitée (avant désinfection). Elle conduit à la dose de chlore à appliquer en tête de réservoir en fonction de la concentration résiduelle en chlore libre choisie. Le temps de contact pour ce test doit correspondre au temps de séjour hydraulique moyen (« τ ») du réservoir de chloration pour un débit donné.
 - Se reporter aux ouvrages détaillant cette méthode (par exemple celui cité dans l'illustration ci-dessous) et pratiquer cette manipulation sur site, et le plus vite possible après collecte des échantillons d'eau.

L'illustration ci-après (demande en oxydant) est extraite de l'ouvrage « L'analyse de l'eau » (par J. Rodier, B. Legube, N. Merlet et collaborateurs, 9^{ème} édition 2009 Dunod, Paris)



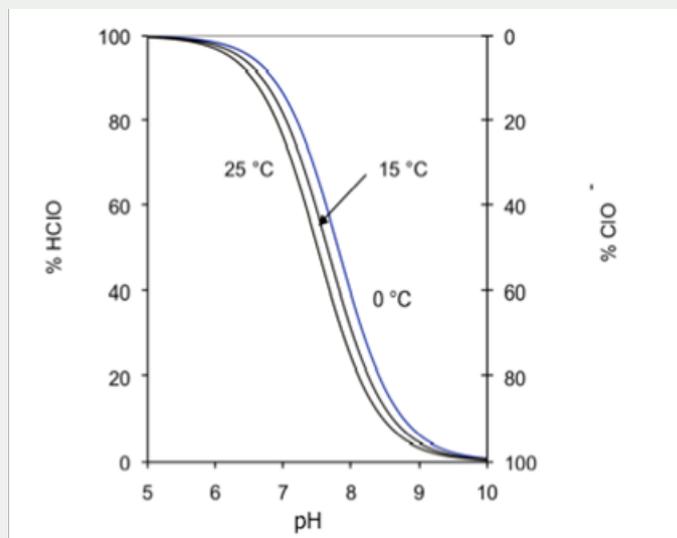
Légende : Exemple de détermination de la demande en chlore d'une eau (point A) et du taux de chloration à appliquer pour un résiduel de l'ordre de 0,4 mg/L (point B)

- Mesurer éventuellement le potentiel de formation de THM (PFTHM) de l'eau traitée avant désinfection finale. Cette mesure surestime la formation de THM et ne peut être qu'un outil de mesure de l'efficacité d'un changement de traitement amont ou d'une évolution saisonnière de la qualité de l'eau.

→ La méthode permet d'évaluer la formation maximale de THM de l'eau étudiée après chloration dans des conditions « extrêmes » (72 h de réaction et chlore résiduel en large excès, surtout dans les premières heures, à une température inférieure à 15°C pour des eaux souterraines et 120 h à 20-25° C pour des eaux de surface). Cette approche est à confier à des laboratoires spécialisés.

Préconisations pour l'exploitation : Analyses à effectuer sur l'eau après chloration finale

- Contrôler en ligne le pH, la température et les différentes formes de chlore dissous résiduel présentes dans l'eau traitée (chlore libre, chlore actif et chlore total). C'est le chlore actif (Acide hypochloreux :HOCl) qui est désinfectant et qui malheureusement est lui aussi réactif avec la matière organique pour former des sous-produits de chloration.



Légende : Spéciation du chlore libre entre pH 5 et 10

Une concentration résiduelle de 0,3 mg/L de chlore libre, c'est environ :

- 0,03 mg/L de chlore actif (HOCl) à pH 8,5 et 25 °C
- 0,05 mg/L de chlore actif à pH 8,5 et 0°C
- 0,18 mg/L de chlore actif à pH 7,3 et 25 °C
- 0,23 mg/L de chlore actif à pH 7,3 et 0°C

→ Vérifier fréquemment (cf. notice appareils) les valeurs des mesures en ligne, par des contrôles manuels (mesure de pH et de différentes formes de chlore par la méthode à la DPD).

Préconisations pour l'exploitation : **Connaissance et optimisation du réservoir de chloration**

(voir aussi fiche n° 2)

- Réaliser le traçage du ou des réservoirs de désinfection finale, en suivant la quantité de traceur sortante en fonction du temps (le temps « zéro » correspond au moment de l'injection du traceur). Effectuer ce traçage à plusieurs valeurs de débit, choisies en fonction des caractéristiques de l'usine.

→ Faire réaliser le traçage par un organisme compétent qui indiquera la nature du traceur soluble à utiliser (fluorescéine, lithium, chlorure de sodium, ...) et à analyser en sortie de réacteur.

- Pour chaque débit, calculer la valeur du « t10 » (temps correspondant à la sortie de 10 % de la quantité de traceur injectée) et la comparer à celle du rapport « volume du réacteur / débit » (ou « τ »).

- Plus la valeur du rapport « t10 / τ » est inférieure à 1, plus il y a des zones mortes dans le réacteur ou le réservoir. Ces zones mortes sont souvent la cause d'une formation excessive de sous-produits de désinfection.

- Réaliser le cloisonnage du réacteur ou du réservoir pour faire tendre le rapport « t10 / τ » vers 0,5 à minima, ou mieux vers 0,8.

Préconisations pour l'exploitation : **Pratique de la chloration en vue de la maîtrise de la formation de THM**

- Asservir le taux de chloration appliqué à la valeur souhaitée de « C » en sortie, en fixant un minimum et un maximum. La valeur de « C » est fonction du temps de séjour hydraulique moyen (« τ ») et du « C. τ » imposé (cf. ci-dessus, préconisations générales).

- Être très vigilant lors de l'augmentation de la teneur en bromures dans la ressource et/ou de l'augmentation de la température (qui vont souvent de pair). Une augmentation des bromures va inévitablement conduire à une augmentation des THM totaux exprimés en unités massiques. Une élimination plus poussée de la matière organique et une optimisation (minimisation) du temps de séjour hydraulique et du résiduel de chlore libre sont les seules solutions pour limiter cette augmentation de THM en production.

- Ne pas oublier qu'en général, plus le pH de chloration est faible plus la teneur en chlore actif est élevée et plus la formation de THM sera importante. Ce constat issu des données étudiées mérite d'être vérifié au niveau de chaque exploitation, car certaines matières organiques peuvent présenter un comportement différent. Comme l'efficacité de la désinfection est également plus grande, la valeur

de « C » pourra être ajustée au pH de chloration. Par exemple, le passage de pH 8 à pH 7,3-7,5 (ce que nous ne conseillons pas) peut théoriquement conduire à une diminution du « C.t » de 2, à débit et température constants. L'application de la diminution de la valeur du « C.t » à ce niveau doit être validée en exploitation par des contrôles adaptés et sécurisée si nécessaire.

- Une augmentation de la température de l'eau conduit à une augmentation de l'efficacité de la désinfection (par un facteur 2, de 5°C à 20°C), mais diminue la proportion de chlore actif (HOCl). Il n'est donc pas conseillé de diminuer systématiquement la valeur du « C.t » à débit constant, quand la température de l'eau augmente.
- La valeur de la concentration résiduelle en chlore libre peut être diminuée lorsque le débit diminue (car le temps de séjour hydraulique moyen augmente dans le réservoir de chloration). Cette diminution de « C » peut être théoriquement dans la même proportion que la diminution du débit.
- **Vérifier que la désinfection de l'eau est bien complète**, notamment vis à vis de la qualité microbiologique exigée.
- **S'assurer enfin que l'eau est bien à l'équilibre calco-carbonique au point de mise en distribution.**

Préconisations pour l'exploitation : **Utilisation de modélisations adaptées**

- Pas (ou peu) de modélisations simples, s'appuyant sur des paramètres facilement accessibles, sont disponibles pour s'appliquer dans n'importe quel cas (tous types et tous traitements).
- Par contre pour une même usine et quand la teneur en bromure est constante dans l'eau traitée, il peut exister une relation entre les THM formés, le SUVA de l'eau traitée avant chloration finale (absorbance UV254 nm rapportée au COD) et la teneur résiduelle en chlore actif (HOCl) dans l'eau mise en distribution.

D'après l'étude réalisée pour l'ARS Pays de Loire (sur dix usines sélectionnées), cette relation est de la forme

$$\log \mu [10(\text{THM totaux})] = \log(A) + 0,8 \cdot \log [10(\text{HOCl})] + \log [p \cdot (\text{SUVA})]$$

avec THM en mole/L, HOCl en mg Cl₂/L et UV et COD du SUVA respectivement en m⁻¹ et en mg/L, la valeur de p dépend du type d'eau (entre 0,7 à 1,1) et celle de A des types d'eau et de traitement (0,6 à 2,3).

- **Il faut retenir que plus le SUVA de l'eau traitée (avant chloration) et plus la teneur en HOCl résiduel dans l'eau distribuée sont faibles, plus la formation de THM en production est faible.**

L'instrumentation et les contrôles doivent refléter la taille de l'usine de production d'eau potable, sa complexité, le nombre d'employés et leur compétence. Pour ce faire, l'exploitant doit prévoir des équipements (en « ligne » et en laboratoire d'usine) qui permettront de bien suivre et contrôler l'usine, particulièrement les paramètres utiles pour tendre vers une formation maîtrisée des sous-produits de désinfection en production.

Mesures à effectuer en ligne

- Les appareils de mesures classiquement utilisés en ligne sur une usine (turbidité, pH, température, azote ammoniacal, chlore résiduel) doivent être fréquemment entretenus et étalonnés. L'exploitant se référera aux notices techniques des appareillages.
- La vérification du pH avec une solution étalon doit être faite de manière quotidienne avec deux solutions étalons en suivant les recommandations du fabricant. L'entretien de l'électrode est critique pour assurer la qualité de la mesure. Il peut être nécessaire de recourir à des produits chimiques.
- L'étalonnage et l'entretien de l'analyseur de chlore résiduel sont critiques pour assurer la qualité de la mesure (notamment pour les analyseurs utilisant des tampons de pH ou des réactifs). On préférera un analyseur ampérométrique qui peut directement mesurer le chlore libre actif (HOCl), mesure beaucoup plus utile que le chlore libre total (HOCl + ClO⁻), pour prédire la formation de THM (cf. fiches n° 5 et 10).
- Si l'inter-ozonation existe sur l'usine, prévoir un analyseur d'ozone résiduel dissous en continu et assurer l'entretien et l'étalonnage en suivant les recommandations du fabricant. Par ailleurs, la mesure de la concentration d'ozone dans le gaz ozoné (généralement par une cellule UV) doit être étalonnée aussi régulièrement pour connaître le plus exactement possible le taux de traitement.
- La teneur en matière organique (COT) peut être reliée à l'absorbance UV à 254 nm (cf. fiches n° 1, 5 et 10). Cette mesure de l'absorbance UV doit être effectuée sur un échantillon filtré (0,45 µm), notamment quand il s'agit d'eau brute.
- La mesure de la turbidité doit faire l'objet d'un étalonnage selon les préconisations du fabricant ou au minimum toutes les semaines.

Equipements analytiques à acquérir en laboratoire d'usine

- De façon générale, le laboratoire de l'usine doit comprendre au minimum : un turbidimètre de laboratoire, un pH-mètre, un équipement de mesure du chlore libre et du chlore total, ainsi qu'un équipement de jar-test.
- L'exploitant devra acquérir, en plus, un spectromètre UV, à minima à filtre (longueur d'onde proche de 254 nm) ou à réseau, avec cuves en quartz de 10 cm d'épaisseur. Les mesures effectuées seront rapportées au mètre de trajet optique (soit multipliées par 10 pour une cuve de mesure de 10 cm d'épaisseur ou trajet optique).

- Un analyseur de COT est bien évidemment l'idéal pour mesurer la teneur en matière organique de l'eau brute et de l'eau traitée. Son étalonnage doit être effectué une fois par mois selon les préconisations du fabricant. Son installation suppose la présence d'un personnel d'exploitation qualifié et disponible pour sa maintenance régulière.

RÉHABILITATION DE FILIÈRE ET NOUVELLE USINE

La qualité de la ressource et ses évolutions saisonnières

Les nouvelles filières sont souvent conçues et dimensionnées sur les bases des usines récemment installées (notamment lorsqu'elles intègrent des nouvelles technologies de procédés), des connaissances de l'homme de l'art et des données analytiques sur la ressource (pas toujours suffisantes).

Les actions de réhabilitation d'une usine s'appuient généralement sur la lutte contre les non-conformités de l'eau anciennement produite, ainsi que sur les dysfonctionnements de l'usine existante. Dans ce cas de réhabilitation, les données analytiques sur la ressource (et autres) sont généralement nombreuses.

Que ce soit pour une nouvelle usine ou pour une réhabilitation, les tests de traitabilité ne sont pas assez pratiqués sur l'eau brute et/ou clarifiée et la connaissance de la ressource (quand elle est nouvelle) n'est pas toujours représentative de l'ensemble des saisons.

Préconisations pour l'analyse de l'eau brute

(voir aussi fiche n° 1)

- Avant d'utiliser une nouvelle ressource en eau superficielle, plusieurs campagnes complètes d'analyse doivent être programmées pendant une année au minimum, de façon à couvrir le mieux possible les variations saisonnières de la ressource.
- Les prélèvements doivent être représentatifs de l'eau. Un seul prélèvement ponctuel ne suffit pas, notamment en eau de cours d'eau. Essayer de pratiquer un échantillonnage moyen, au moins sur 24 h. Ces prélèvements ainsi que les analyses à effectuer doivent être confiés à un laboratoire agréé par le Ministère de la Santé.
- La mesure du COT (et du COD) de l'eau brute doit être pratiquée plus couramment que l'analyse complète (a minima chaque mois), et plus particulièrement quand la turbidité de l'eau change significativement (caractéristique d'une variation du régime hydraulique) ou quand l'historique disponible mentionne des changements périodiques de qualité (fiche n° 1).
- Mesurer régulièrement l'absorbance UV à 254 nm de l'eau brute pré-filtrée pour relier cette mesure aux valeurs de COD en calculant le SUVA (= rapport UV254nm/COD) (cf. fiche n° 1).
- Analyser fréquemment les bromures (Br-) et l'azote ammoniacal (cf. fiche n° 1).

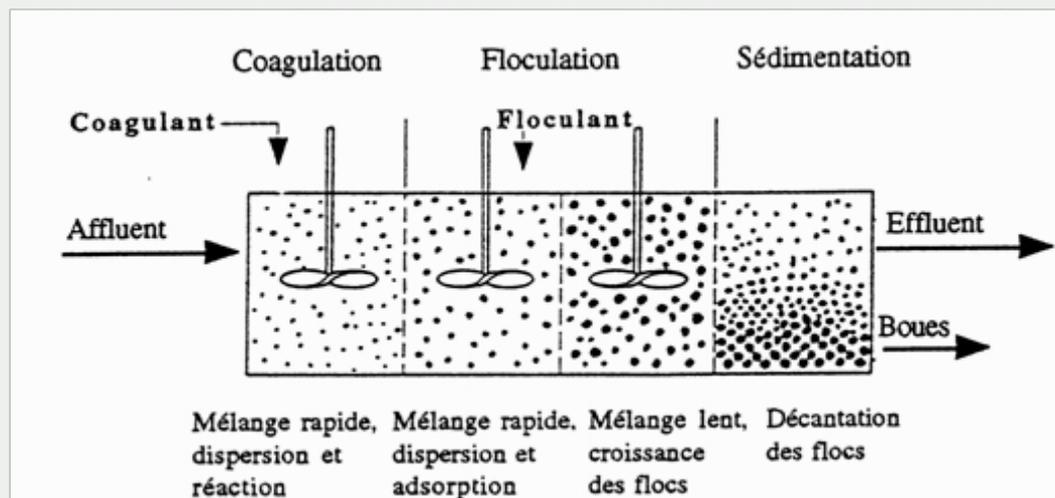
Préconisations pour les tests de traitabilité en vue d'optimiser l'élimination de la matière organique

(voir aussi fiche n° 3)

- Compte tenu de la complexité de tester en laboratoire l'ensemble de la filière, il faut procéder par étape en commençant par la coagulation - floculation qui constitue l'étape décisive pour l'abattement de la matière organique, précurseur de sous-produits de chloration. Les autres étapes (effet de la pré-oxydation, efficacité du traitement de finition, reminéralisation ou décarbonatation) sont testées dans un second temps. La désinfection finale par le chlore est évidemment évaluée sur l'eau finale, après son traitement dans différentes conditions.

- Il est rare de tester la coagulation-floculation sur unité pilote et ce sont de simples expériences de laboratoire dites de Jar-test qui permettent de définir la dose de coagulant et le pH de coagulation (cf. fiche n°3). **Pratiquer ces séries de jar-tests sur au moins quatre prélèvements d'eau représentatifs des variations saisonnières.** Quand l'objectif principal est l'élimination des matières organiques naturelles, il a été démontré que les doses théoriques optimales sont de 1 mg Al/mg COD ou 2 à 3 mg Fe/mg COD (cf. fiche 3).

L'illustration ci-dessous est extraite de l'ouvrage « Le traitement de l'eau potable » (par B. Legube, à paraître en 2015, Dunod, Paris)



Légende : Schématisation de la séquence des opérations de l'expérience « Jar-test »

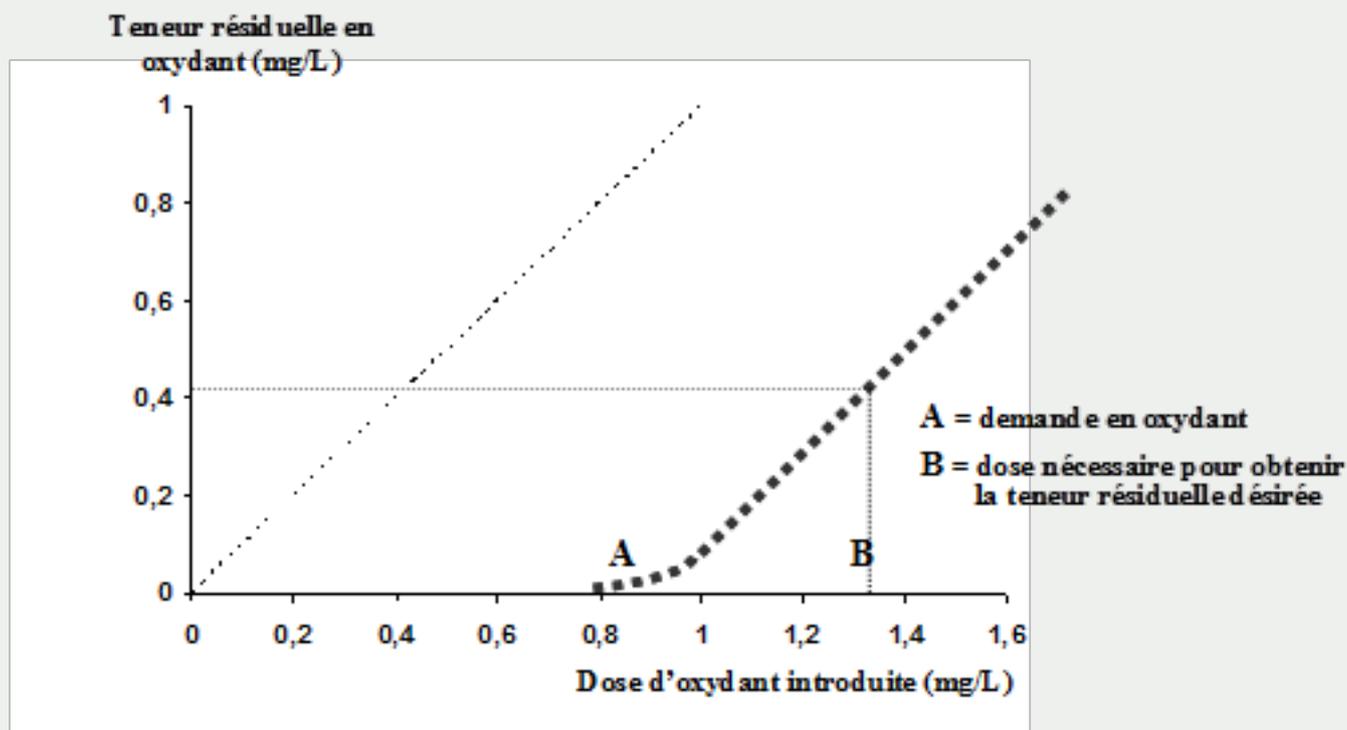
- Les effets d'autres réactifs sont évalués sur la base des conditions optimales (dose et pH) de coagulation – floculation. Ce peut être l'effet de la pré-oxydation, de l'ajout de flocculant et/ou de CAP. Il ne faudra pas oublier que la pré-oxydation peut modifier légèrement et de manière favorable le rendement de coagulation-floculation.
- Si l'eau est « dure » une décarbonatation peut être prévue avant la coagulation. Dans ce cas, il est nécessaire de tester son impact sur les conditions optimales de coagulation.
- **Si un traitement de finition par CAP est prévu dans la filière, on peut reproduire partiellement l'effet recherché du CAP par des essais en Jar-test**, sans pouvoir reproduire les autres effets de ce type de procédé (recirculation du CAP, contact avec de fortes concentrations de CAP plus ou moins saturé). Il s'agira dans ce cas de tester différents types de charbon, les doses appliquées et le temps de contact.
- **Dans certaines situations la possibilité de disposer de 2 types de charbon en poudre peut être préconisée. Leur utilisation variera selon les saisons ou bien un type en prétraitement et un second type en post traitement.**
- Il est quasiment impossible (actuellement) d'évaluer la durée d'efficacité d'un filtre à charbon actif en grains (CAG) au laboratoire. Il faut faire appel à des essais sur unité pilote (longue durée) et/ou à l'habitude de l'homme de l'art. Un tel filtre ne sera efficace que sur la partie biodégradable d'où la nécessité de faire des mesures de ce CODB sur les eaux coagulées et post ozonées obtenues lors des essais précédents.

Préconisations pour les tests de traitabilité en vue d'évaluer la formation de bromates

(voir aussi fiche n° 4)

- Quand une étape d'inter-ozonation est prévue, la demande en ozone est réalisée sur l'eau clarifiée. Elle permet de déterminer la dose d'ozone à appliquer pour obtenir le résiduel souhaité (par exemple 0,4 mg/L) après un temps de contact donné (par exemple 4 min). La teneur en bromates formés est alors mesurée, si possible dans différentes conditions d'ozonation (différentes valeurs du « C.t » et différents pH).

L'illustration ci-dessous (demande en oxydant) est extraite de l'ouvrage « L'analyse de l'eau » (par J. Rodier, B. Legube, N. Merlet et collaborateurs, 9ème édition, 2009, Dunod, Paris)



Légende : Exemple de détermination de la demande en ozone d'une eau (point A) pour un résiduel de l'ordre de 0,4 mg/L (point B)

Préconisations pour les tests de traitabilité en vue d'évaluer la formation de THM et autres sous-produits de chloration

(voir aussi fiche n° 5)

- La demande en chlore (fiche n° 5) doit être évaluée au laboratoire sur l'eau traitée, c'est à dire clarifiée, éventuellement ozonée et/ou traitée au CAP (quand ces étapes sont prévues dans la filière) dans les conditions optimales prédéterminées par les tests de laboratoire ci-dessus.
- Pour chaque essai de demande en chlore conduisant à un résiduel de chlore libre, donc pour différentes valeurs de « C. τ » (à « τ » constant, choisi pour la détermination de la demande en chlore, cf. fiche n°5), les sous-produits formés (THM, acides chloroacétiques) seront analysés.
- Après avoir choisi une valeur de « C. τ » prenant en compte les préconisations (fiche n° 5)

et la formation de THM, faire des essais sur l'effet du pH.

- Si après ces essais, il réside des doutes sur la formation de THM (non-conformité en production ou en distribution), il est recommandé de faire réaliser une étude plus complète sur la nature de la matière organique (fractionnement, caractérisation, PFTHM du global et de chaque fraction) et sur l'évolution de cette nature à chaque étape de traitement. Les traitements à appliquer (choix du coagulant de la dose du pH, choix du CAP, dose d'ozone,...) seront alors étudiés de nouveau pour mieux éliminer la (ou les) fraction(s) de matière organique principalement responsable(s) de la formation de sous-produits de chloration.
- De façon générale, le laboratoire de l'usine doit comprendre au minimum : un turbidimètre de laboratoire, un pH-mètre, un équipement de mesure du chlore libre et du chlore total, ainsi qu'un équipement de jar-test.

RÉHABILITATION DE FILIÈRE ET NOUVELLE USINE

Le temps de séjour hydraulique des réacteurs de désinfection

Le temps de contact entre l'eau et les désinfectants chimiques est un des paramètres les plus influents sur la formation des sous-produits de désinfection (THM, bromates et autres) mais aussi sur l'efficacité de la désinfection. C'est le « t » du concept du « C.t ».

Préconisations générales

- Les performances des procédés de désinfection sont toujours annoncées en nombre de log10 (ou encore en puissance de 10) de microorganismes inactivés (bactéries, virus, protozoaires, algues). Pour les procédés chimiques de désinfection (chlore, ozone, dioxyde de chlore), les abattements correspondent à des valeurs du produit « C.t » de la concentration résiduelle en désinfectant (C) par le temps de résidence hydraulique ou temps de contact (t) et ce pour une température et un pH donnés. Ces valeurs sont établies à l'échelle du laboratoire, où les paramètres sont rigoureusement maîtrisés.
- Les bureaux d'étude et les constructeurs se contentent parfois du rapport « volume de réacteur / débit » pour estimer le temps de résidence d'un réacteur ou d'un réservoir de désinfection. Ce rapport encore appelé « τ » correspond au temps de résidence hydraulique d'un « réacteur piston ».
- Pour les applications industrielles en traitement des eaux, les anglo-saxons utilisent fréquemment la notion de « C .t10 ». Le « t10 » est le temps correspondant à la sortie du réacteur de 10 % de la quantité d'un traceur soluble injecté (sous flux, au temps zéro) en tête de réacteur. Le risque de ne pas appliquer les conditions de désinfection souhaitées (par rapport aux valeurs « théoriques ») n'est alors pris que sur 10 % du débit d'eau, sachant qu'une partie aussi importante du débit subit des conditions de désinfection plus fortes.

➔ *Plus la valeur de τ (rapport « volume / débit ») est grande par rapport au t10, (temps de sortie de 10 % d'un traceur), plus il y a des zones mortes dans le réacteur d'ozonation ou dans le réservoir de chloration.*

La valeur du t10 par rapport à « τ » dépend du type de réacteur :

- réacteur « piston » : $t_{10} / \tau = 1$ (cas jamais rencontré en usine)
- réacteur « parfaitement mélangé » (par exemple avec turbine) : $t_{10} / \tau = 0,1$ (cas rare en usine)
- réacteur ou réservoir classique, sans cloisonnage : $t_{10} / \tau = 0,2$ à $0,3$ (cas fréquent en usine)
- réacteur ou réservoir, cloisonné : $t_{10} / \tau = 0,5$ à $0,8$ (cas idéal)

- Le « C. τ » (et le « C.t10 ») pour un abattement donné diminue d'un facteur d'environ 2 par tranche de 10°C d'augmentation de la température de l'eau. Il peut donc être diminué lorsque la température de l'eau augmente tout en maintenant la même efficacité, toutes autres conditions identiques.

- Le temps de séjour hydraulique augmente quand le débit de l'usine diminue. La concentration résiduelle en désinfectant doit donc être diminuée dans ce cas, car c'est la valeur du « C. τ » (ou du « C.t10 ») qu'il faut garder constante.

Préconisations pour la conception de nouveaux réacteurs de désinfection

- Concevoir les nouveaux réacteurs de désinfection (ozonation et chloration) de façon à se rapprocher le plus possible d'un « réacteur piston », ce qui permet de connaître à tout moment le temps réel de séjour hydraulique, quel que soit le débit, et éventuellement de faire varier le volume du réacteur. Il faut donc compartimenter et cloisonner ces réacteurs. Se rapprocher d'un bureau d'études spécialisé.
- Prévoir des contrôles d'oxydant résiduel (chlore libre ou ozone) dans différentes zones stratégiques des réacteurs.
- Prévoir également la possibilité de neutraliser (partiellement ou totalement) l'oxydant résiduel, surtout si les réacteurs ne sont pas à volume variable.

Préconisations pour la réhabilitation de réacteurs de désinfection

- Faire effectuer le traçage des réacteurs existants, pour vérifier la valeur du rapport « t_{10}/τ » (cf. Fiche n° 2). Pour chaque débit, calculer la valeur du « t_{10} » (temps correspondant à la sortie de 10 % de la quantité de traceur injectée) et la comparer à celle du rapport « volume du réacteur / débit » (ou « τ »). Plus la valeur du rapport « t_{10}/τ » est inférieure à 1, plus il y a des zones mortes dans le réacteur ou le réservoir (cf. ci-dessus). Ces zones mortes sont souvent la cause d'une formation excessive de sous-produits de désinfection.
- Cloisonner les réacteurs existants pour augmenter le rapport « t_{10}/τ » (cf. fiche n° 2).
- Equiper les réacteurs de contrôles d'oxydant résiduel (chlore libre ou ozone) dans différentes zones stratégiques.
- Prévoir également la possibilité de neutraliser (partiellement ou totalement) l'oxydant résiduel, dans les réacteurs ou, a minima, en sortie.
- Vérifier que la désinfection de l'eau sera bien complète, notamment vis à vis de la qualité micro-biologique exigée.

FICHE

9

RÉHABILITATION DE FILIÈRE
ET NOUVELLE USINE

L'ozonation

L'étape de traitement principalement responsable de la présence de bromates (BrO_3^-) dans l'eau traitée est l'inter-ozonation, certaines conditions de traitement favorisant particulièrement cette formation. La pré-ozonation ne produit pas de bromates. La qualité de l'eau de Javel peut être également une source d'introduction de bromates dans l'eau.

Préconisations générales

- Connaître les teneurs en bromures dans la ressource et leur variation saisonnière, notamment l'été (cf. fiches n° 1 et 7).
- Toutes autres conditions constantes, la formation de bromates en inter-ozonation est directement proportionnelle à la valeur du « $C \cdot \tau$ ». Le « $C \cdot \tau$ » est le produit de la concentration résiduelle en ozone dissous par le temps de séjour hydraulique moyen du (ou des) compartiment(s) de contact, le compartiment de diffusion produisant peu (ou pas) de bromates.
- Prévoir une ozonation avec des valeurs de « $C \cdot \tau$ » suffisantes et non pas excessives.
- Pour l'action virulicide (et 3 log de giardia lamblia à plus de 10°C), un « $C \cdot t_{10}$ » de 1,6 min.mg/L est suffisant, soit un « $C \cdot \tau$ » de 3 à 3,5 min.mg/L pour un réacteur d'ozonation bien cloisonné (cf. fiche n° 2). Le risque de non-conformités en bromates ($> 10 \mu\text{g/L}$) est faible à ces valeurs, sauf à pH légèrement alcalin.
- Pour une action sur les cryptosporidium parvum (3 log₁₀ d'abattement à plus de 10 °C), les valeurs des « $C \cdot t_{10}$ » sont bien plus élevées, de l'ordre de 36 min.mg/L à 5°C et 9 min.mg/L à 20°C, donc des « $C \cdot \tau$ » pratiquement du double pour un réacteur bien cloisonné. Le risque de non-conformités sur les bromates est beaucoup plus grand dans ce cas, voire inévitable (sauf à pH vraiment acide, inférieur à 6).

Préconisations pour la conception de nouvelle usine ou la réhabilitation de filière

- Prévoir une production d'ozone capable d'assurer en inter-ozonation les objectifs fixés. Il faut donc déterminer la demande en ozone de l'eau clarifiée (cf. fiche n° 7) capable d'assurer les valeurs de « C » du « $C \cdot \tau$ » compatibles avec les objectifs de désinfection choisis (cf. préconisations générales) et avec le temps de résidence hydraulique moyen du compartiment de contact (« τ »).
- Le réacteur d'ozonation doit comprendre au moins deux compartiments (hauteur d'eau de 5 à 6 m pour un réacteur à diffuseurs poreux à fines bulles) et un (ou deux) compartiment(s) de contact, le(s) plus cloisonné(s) possible et prenant en compte les possibles variations de débit du traitement. Le temps de séjour hydraulique moyen de ce (ou ces) compartiment(s) de contact doit être de 4 min (minimum) à 8 minutes.
- Prévoir une neutralisation de l'ozone résiduel à l'issue du dernier compartiment.
- Ne pas remonter le pH avant ozonation au-delà de 6,5 si la clarification précédente est réalisée à pH légèrement acide.

- Prévoir un contrôle de la concentration résiduelle en ozone dissous (« C » en mg O₃/L) en sortie de réacteur d'inter-ozonation et essayer d'asservir le taux de traitement en ozone appliqué à la valeur choisie de « C » à condition que les variations de débit et de dosage à appliquer ne soient pas trop importantes, sinon, prévoir des réacteurs en parallèle pouvant être isolés à faible débit.

RÉHABILITATION DE FILIÈRE ET NOUVELLE USINE

La chloration en usine

La pré-chloration étant aujourd'hui bannie, c'est en désinfection finale que sont formés les THM et autres sous-produits de chloration (acides haloacétiques notamment). Cette désinfection finale ayant pour but de sécuriser la distribution en réseau, c'est très souvent le chlore gazeux ou l'eau de Javel (voire l'électro-chloration) qui sont utilisés, l'utilisation du dioxyde de chlore (autre désinfectant rémanent) produisant des chlorites pour lesquels la réglementation est difficile à respecter.

Préconisations générale

- Concevoir une filière qui présente une grande efficacité d'abattement de la matière organique (cf. fiches n° 3 et 7).
- Toutes autres conditions réunies et constantes, la formation de THM et autres sous-produits de chloration sur l'usine en désinfection finale est directement proportionnelle à la valeur du « $C \cdot \tau$ » (produit de la concentration résiduelle en chlore libre dissous par le temps de séjour hydraulique moyen). Il faudra donc éviter les zones mortes dans les réservoirs de chloration (cf. fiches n° 2 et 8).
- Prévoir une chloration en production avec des valeurs de « $C \cdot \tau$ » suffisantes et non pas excessives.
- Quand aucune autre étape de désinfection (ozone, UV) ou traitement membranaire n'existe sur l'usine, appliquer un « $C \cdot t_{10}$ » (cf. fiche n° 2 et 8) de 15 min.mg/L à pH inférieur à 8 (suffisant pour bactéries pathogènes et virus). Cela correspond à un « $C \cdot \tau$ » (avec τ = temps de séjour hydraulique moyen) d'environ 30 min.mg/L pour un réacteur de chloration bien cloisonné (cf. fiches n° 2 et 8).
- Quand d'autres étapes de désinfection sont prévues sur l'usine (ozonation, désinfection UV) ou qu'il existe une filtration membranaire, la désinfection finale n'est qu'une désinfection de sécurité (pour la distribution) et les valeurs de « $C \cdot t_{10}$ » peuvent être fortement diminuées, ce qui limitera considérablement la formation de THM en usine. D'après la littérature scientifique, un « Ct_{10} » de l'ordre de 2 min.mg/L est suffisant, soit un « $C \cdot \tau$ » de 4 min.mg/L pour un réservoir bien cloisonné. Attention, cette valeur faible de « $C \cdot \tau$ » n'est valable que pour une eau exempte d'azote ammoniacal. Si l'azote ammoniacal est présent, le temps de chloration doit être au minimum de 30 minutes et la dose à appliquer dépend de la teneur en azote ammoniacal (8 à 10 mg Cl_2 / mg $N-NH_4^+$) et du résiduel « C » souhaité.

Préconisations pour la conception de nouvelle usine ou la réhabilitation de filière

- La filière doit inclure une clarification optimisée et un traitement de finition, si possible au CAP. Il est conseillé une valeur de COT (ou COD) de 1,5 à 2 mg/L dans l'eau traitée avant chloration finale. Des essais de traitabilité doivent être effectués (cf. fiche n° 7).
- Éviter de reminéraliser partiellement en tête de filière, sauf si l'eau est trop douce pour dans ce cas tamponner (« amortir ») une baisse trop importante du pH lors de la coagulation. Dans ce dernier cas la reminéralisation optimisera la coagulation et facilitera le contrôle et l'obtention d'un pH optimum dans la filière.

- Pour une eau brute « dure », il peut être utile de décarbonater partiellement en tête de filière, ce qui permet de coaguler plus facilement à pH acide.

- Concevoir ou réhabiliter l'usine avec des parements anti-acide sur les ouvrages de coagulation, floculation et décantation.

- L'inter-ozonation conduit très souvent à une diminution du SUVA (rapport de l'absorbance UV254 nm/COD) ce qui diminue le potentiel de formation de THM lors de la chloration finale. Dans ce cas et si les conditions le permettent (vis à vis de la formation de bromates, cf. fiche n° 4 et 9), prévoir une inter-ozonation poussée à pH légèrement acide, pour éliminer les protozoaires de type cryptosporidium (cf. recommandations générales), en complément des abattements obtenus en clarification.

- La pré-ozonation a peu (ou n'a pas) d'effet sur la diminution du potentiel de formation de THM et autres sous-produits de chloration.

- Respecter les préconisations de conception ou de réhabilitation du (ou des) réservoir(s) de chloration (cf. fiche n°8). Prévoir des compartiments pour ajuster le temps de séjour hydraulique moyen aux variations de débit.

- Prévoir l'application de valeurs de « $C \cdot \tau$ » suffisantes et non pas excessives. Comme la nouvelle usine ou la réhabilitation de filière inclura nécessairement une autre étape de désinfection (ozonation, UV) ou filtration membranaire, les volumes de réservoirs cloisonnés pourront être calculés sur la base de « $C \cdot \tau$ » de 4 min.mg/L pour le débit maximum de l'usine (cf. fiche n° 5).

→ Exemple : pour un débit de 600 m³/h et un résiduel de chlore souhaité de 0,4 mg/L, le temps de séjour hydraulique moyen sera de 10 minutes et le volume utile de réacteur de seulement 100 m³. Un réacteur non cloisonné équivalent en performance de désinfection, serait de l'ordre de 400 à 500 m³. La formation de THM en production sera d'autant plus faible que le volume du réacteur sera faible.

- Prévoir une étape de neutralisation du chlore résiduel avec injection de réducteur en sortie et dans le dernier compartiment si le réservoir en comprend plusieurs.

- Prévoir les contrôles analytiques mentionnés ci-après (cf. fiche n° 11) et la régulation du taux de chloration appliqué en fonction de la teneur en chlore résiduel.

RÉHABILITATION DE FILIÈRE ET NOUVELLE USINE

Les équipements analytiques à prévoir sur l'usine

L'instrumentation et les contrôles doivent refléter la taille de l'usine de production d'eau potable, sa complexité, le nombre d'employés et leur compétence. Pour ce faire, le concepteur doit prévoir des équipements (en « ligne » et en laboratoire d'usine) qui permettront à l'exploitant de bien suivre et contrôler l'usine, particulièrement les paramètres utiles pour tendre vers une formation maîtrisée des sous-produits de désinfection en production.

Mesures à effectuer en ligne

- Les appareils de mesures classiquement utilisés en ligne sur une usine (turbidité, pH, température, azote ammoniacal, chlore résiduel) seront prévus.
- Pour le pH, prévoir une méthode potentiométrique en réduisant le plus possible la distance séparant l'élément de mesure de l'unité d'amplification.
- Pour le chlore résiduel, privilégier la méthode ampérométrique pour pouvoir mesurer également le chlore actif (HOCl). Les points suivants sont à vérifier lors de l'installation des analyseurs de chlore :
 - Prévoir une vanne de contrôle et une mesure du débit d'alimentation en eau. Il peut être nécessaire d'ajouter une vanne de réduction de pression pour faciliter cet ajustement ;
 - La distance entre les électrodes et le contrôleur doit être réduite au minimum ;
 - Si l'eau est contaminée par la solution tampon, elle doit être évacuée vers l'égout ;
 - Le contrôleur doit comprendre des relais pour les alarmes :
 - 1) de bas et haut niveaux de chlore ;
 - 2) d'absence de débit d'eau aux électrodes ;
 - 3) de bas niveau de solution tampon (si requis) ;
 - 4) de sorties analogiques ou digitales commutables pour le transfert des données vers un enregistreur, un ordinateur ou un système de télémétrie.
- Placer les analyseurs de chlore dans des zones représentatives de la teneur réelle, en sortie de réservoir et dans le réservoir (éviter les zones mortes).
- Si l'inter-ozonation existe sur l'usine, prévoir un analyseur d'ozone résiduel dissous en continu et assurer l'entretien et l'étalonnage en suivant les recommandations du fabricant. Par ailleurs, la mesure de la concentration d'ozone dans le gaz ozoné (généralement par une cellule UV) doit être étalonnée de temps en temps pour connaître le plus exactement possible le taux de traitement.
- La teneur en matière organique (COT, indice permanganate) peut être reliée à l'absorbance UV à 254 nm (cf. fiches n° 1, 5 et 10). Cette mesure de l'absorbance UV doit être effectuée sur un échantillon filtré (0,45 µm), notamment quand il s'agit d'eau brute.

Équipements analytiques à acquérir en laboratoire d'usine

- De façon générale, le laboratoire de l'usine doit comprendre au minimum : un turbidimètre de laboratoire, un pH-mètre, un équipement de mesure du chlore libre et du chlore total, un équipement de jar-test.

- Prévoir sur la nouvelle usine un spectromètre UV, à minima à filtre (longueur d'onde proche de 254 nm) ou à réseau, avec cuves en quartz de 10 cm d'épaisseur. Les mesures effectuées seront rapportées au mètre de trajet optique (soit multipliées par 10 pour une cuve de mesure de 10 cm d'épaisseur ou trajet optique).
- Un analyseur de COT est bien évidemment l'idéal pour mesurer la teneur en matière organique. Son étalonnage doit être effectué une fois par mois selon les préconisations du fabricant.

Le réseau peut être une source de contamination microbiologique. Il est donc impératif de maintenir un résiduel de désinfectant dans l'eau du réseau qui, en France, est très souvent du chlore (quelquefois du dioxyde de chlore). Compte tenu des faibles taux de chlore appliqués en production (pour éviter la formation de sous-produits et les teneurs trop élevées en chlore résiduel), une ou plusieurs rechlorations sont très souvent pratiquées. Comme la consommation de chlore par la matière organique de l'eau n'est pas complète au point de mise en distribution, les réactions se poursuivent et s'accompagnent souvent d'une augmentation de la formation de THM (et autres sous-produits de chloration), formation pouvant être « dopée » par les rechlorations. **Il est important de noter l'impact très significatif du réseau compte tenu des temps de séjour comparés à ceux dans l'usine.**

Préconisations générale

- Le temps de séjour hydraulique dans le réseau est un facteur prépondérant sur les évolutions de la consommation de chlore et de la formation des THM et autres sous-produits de désinfection jusqu'au robinet du consommateur. Il faut donc connaître et maîtriser au mieux ce temps de séjour hydraulique.
- Dans cette perspective, les conditions de marnage de l'eau dans les réservoirs peuvent être adaptées le cas échéant selon les saisons si cela est possible.
- La demande en chlore du réseau (eau + dépôts + parois) suit la courbe inverse de l'évolution de la concentration en chlore libre. Il est théoriquement démontrable que rechlorer à petites doses (une ou plusieurs fois) en réseau (après la chloration en usine) est plus « économe » en chlore consommé que de chlorer à forte dose en usine (pour ne pas rechlorer en réseau) sous réserve de bien maîtriser ces rechlorations : stockage, dosage, maîtrise des doses injectées.

Les valeurs de THM au point de mise en distribution (sortie usine) ne sont pas nécessairement significatives des valeurs dans le réseau de distribution, particulièrement en « queue » de réseau. Les teneurs en THM peuvent augmenter (jusqu'à doubler voire quadrupler). L'échantillon fourni par l'ARS sur lequel a porté l'étude HYDRATEC ne permet pas néanmoins de conforter cette valeur, les variations enregistrées étant au maximum d'un facteur 2, sauf pour des taux très bas de THM (< 20 µg/l) où un facteur allant jusqu'à 2,5 voire 3 a pu être observé. Il faut donc tenir compte des valeurs en réseau pour mieux maîtriser la formation des sous-produits de chloration en production et en distribution.

- Réduire le risque d'augmentation des THM en réseau passe par la réduction, à minima, de la quantité de chlore libre dans le réseau et plus précisément de la teneur en chlore actif (HOCl) sans toutefois compromettre l'effet bactéricide. La densification des postes de rechloration en se focalisant sur les réservoirs contribue à cette optimisation.
- Réduire le risque de THM en réseau nécessite l'établissement d'un lien analytique fort entre l'exploitant de l'usine et celui du réseau.

Impact de la chloration en usine sur la présence de THM en « tête » de réseau

(rappels des fiches n° 5 et 10)

- Quand l'élimination de la matière organique et de l'azote ammoniacal sont très bien menées sur l'usine (COD de l'ordre de 1,5 mg/L, N-NH₄⁺ < limite de détection), la demande en chlore de l'eau (cf. fiche n° 5) est réduite et le taux de chloration à appliquer est faible pour obtenir la valeur souhaitée de chlore libre (« C » entre 0,2 et 0,4 mg/L). La formation de sous-produits de chloration est donc minimisée.
- De plus, quand la désinfection de l'eau en production est assurée par des étapes autres que la chloration (filiales complètes avec ozonation ou désinfection UV ou encore par filtration membranaire), la chloration finale ne doit être qu'une désinfection de sécurité assurant la rémanence. Le « C.τ » à appliquer en chloration finale (cf. fiche n° 5) est faible, de l'ordre de 15 à 20 min.mg/L pour un réservoir non cloisonné et de l'ordre de 4 min.mg/L pour un réservoir parfaitement cloisonné. Ces faibles valeurs qui minimisent la formation de sous-produits de chloration en production ne sont valables que pour une eau exempte d'azote ammoniacal. Si l'azote ammoniacal est présent, le temps de chloration doit être au minimum de 30 minutes et la dose à appliquer dépend de la teneur en azote ammoniacal (8 à 10 mg Cl₂ / mg N-NH₄⁺) et du résiduel « C » souhaité.
- Quand l'étape de désinfection de l'eau n'est assurée que par la chloration finale, les valeurs de « C.τ » de cette chloration doivent être beaucoup plus élevées pour l'action virulicide (30 à 150 min.mg/L selon le cloisonnage du réservoir, cf. fiche n° 5) et le risque de THM est plus élevé.
- Les eaux traitées présentant un faible SUVA (rapport de l'absorbance UV₂₅₄ nm/COD) forment généralement beaucoup moins de THM lors de la chloration en usine que les eaux présentant un fort SUVA. Les valeurs de SUVA sont particulièrement faibles en été.
- La proportion de chlore actif (HOCl) dans le chlore libre a un impact certain sur la formation de THM. Plus cette proportion est grande (tout autre paramètre identique), plus la formation de THM est élevée en usine. Un pH 7 sera beaucoup plus précurseur de formation de THM en usine qu'un pH 8 si les autres paramètres sont constants (notamment chlore libre résiduel, COD, SUVA, « C.t », température). Comme, dans tous les cas l'eau doit être à l'équilibre (pH proche de 8) au départ de l'usine un pH de chloration proche de 8 est donc doublement justifié.

Quelques préconisations sur le retour de l'exploitant usine vers l'exploitant réseau

- Les mesures suivantes au point de mise en distribution et sur l'eau traitée avant chloration finale doivent être communiquées régulièrement à l'exploitant du réseau :
 - concentration résiduelle en chlore libre et (si possible) en chlore actif (HOCl) dans l'eau mise en distribution ;
 - pH et température de l'eau mise en distribution (qui permettent, entre autres, de calculer la concentration en chlore actif, HOCl) ;
 - THM (totaux et détaillés) dans l'eau mise en distribution et éventuellement autres sous-produits de chloration ;

- valeurs du SUVA (rapport absorbance UV₂₅₄ nm / COD) de l'eau traitée (avant chloration).

• Le retour de l'exploitant usine à l'exploitant réseau en termes de SUVA de l'eau traitée est très pertinent :

- un SUVA fort (entre 1,5 et 2, voir plus) est précurseur d'une forte formation de THM au point de mise en distribution (surtout si les autres conditions sont favorables), mais l'augmentation des THM en réseau sera faible (voire nulle ou négative)

- un SUVA faible (< 1) est faiblement précurseur de THM au point de mise en distribution, mais les THM en réseau augmenteront (d'un facteur pouvant atteindre 2, voire 3).

→ Pour les valeurs de SUVA indiquées ci-dessus, l'absorbance UV à 254 nm est rapportée au mètre de trajet optique (la valeur expérimentale est à multiplier par 10 si la cuve de mesure présente un trajet optique de 10 cm) et le COD est en mg/L.

• L'effet de la proportion de chlore actif (concentration en HOCl / concentration en chlore libre) est similaire.

• Des mesures de PFTHM peuvent être pratiquées sur l'eau traitée en usine. L'évolution du PFTHM, d'une période à une autre, est une indication intéressante sur les risques encourus en réseau.

Quelques préconisations sur la gestion de la chloration en réseau

• La mesure ponctuelle (par période idéalement mensuelle) en divers points stratégiques du réseau des concentrations en chlore actif résiduel (HOCl) et en SUVA constitue un indicateur pertinent pour juger de la potentialité de formation des THM. L'idéal est de mesurer aussi les THM à la même fréquence (sur une année de distribution).

→ Les valeurs de SUVA (sur 10 usines étudiées en Pays de Loire) sont généralement comprises entre 0,5 (pour certaines eaux en été) et plus de 2 (pour les mêmes eaux dans les autres saisons) (cf. unités ci-dessus). Les proportions de HOCl dans le chlore libre sont fonctions du pH et de la température et sont généralement comprises entre 10 et 50 %.

• Essayer de modéliser la consommation de chlore en réseau, à partir des données disponibles en plusieurs points du réseau et du modèle hydraulique. La modélisation de la formation de THM est également possible. Confier cette étude à des spécialistes de la cinétique en réseau.

• La modélisation (a minima hydraulique) permettra sur les réseaux à risques de définir des actions correctives saisonnières ou définitives, afin de réduire les temps de séjour hydraulique :

- par adaptation du fonctionnement du réseau en fonction de la demande (marnage des réservoirs par exemple) ;
- par mise en œuvre d'un maillage temporaire ou définitif ;
- par établissement d'un zonage par des purges périodiques.

• Pour densifier efficacement les postes de rechloration, il faut augmenter le nombre et la fiabilité de l'instrumentation. Ceci peut consister à minima.

- à rechercher des matériels permettant de doser de faible taux de désinfectant,
- à éloigner les capteurs du point d'injection pour permettre une mesure plus fiable.

Remarque importante concernant les conditions de rechloration au niveau des réservoirs

- La chloration en aval des réservoirs peut être asservies au débit de l'eau mise en réseau si cette eau subit un traitement complet, y compris une désinfection, au niveau de l'usine ce qui est la situation à rechercher.
- Par contre dans le cas contraire, à éviter, le besoin d'oxydation et le maintien d'une bonne qualité bactériologique passeront par une chloration en amont des réservoirs avec un risque accrue de formation de THM.
- Dans tous les cas les rechlorations doivent disposer d'un analyseur de chlore (cf. fiche n° 11). Les seuils analytiques doivent permettre le contrôle de faible taux et les meilleures conditions de dosage par un éloignement optimum du capteur en accord avec les consignes du fournisseur.

**Guide réalisé dans le cadre du plan régional de santé environnement 2 des
Pays de la Loire :**

ACTION 3

«améliorer la qualité de l'eau distribuée dans les lieux publics et les lieux intérieurs»



Etude réalisée par HYDRATEC avec

- l'appui technique et scientifique du Professeur LEGUBE de l'université de Poitiers

- la contribution d'un groupe de travail associant des collectivités (syndicats d'eau, des départements), des exploitants, des directions départementales des territoires, des experts du traitement de l'eau et l'Agence régionale de santé Pays de la Loire

sous la coordination de Patrick PEIGNER, ingénieur du génie sanitaire chargé de mission eau à l'ARS Pays de la Loire

**Agence Régionale de santé Pays de la Loire
CS 56233
44262 NANTES CEDEX 2
Tél : 02 49 10 40 00
Mél : ars-pdl-contact@ars.sante.fr**