

**MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE
L'ALIMENTATION, DE LA PÊCHE ET
DES AFFAIRES RURALES**

DOCUMENT TECHNIQUE

FNDAE

N°2

DEFINITION DES CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE FONCTIONNEMENT ET DOMAINE D'EMPLOI DES APPAREILS DE DESINFECTION

Nouvelle version par Catherine JUERY

**FONDS NATIONAL POUR LE
DEVELOPPEMENT DES
ADDUCTIONS D'EAU**



**Office International de l'Eau
SNIDE**

Remerciement au relecteur

Madame Florence BERNE (Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers)

Sommaire

<i>Introduction</i>	6
<i>1 - Réglementation</i>	7
1.1 La réglementation européenne.....	7
1.2 La réglementation française.....	7
<i>2 – Les principales configurations des réseaux de distribution</i>	12
2.1 Introduction.....	12
2.2 Désinfection intermédiaire en réseau de distribution.....	14
<i>3 – Les principes fondamentaux de la désinfection</i>	16
<i>4 - Désinfection au chlore gazeux</i>	19
4.1 Principe	19
4.2 Mise en oeuvre	21
4.3 Cas particulier : chloration d'un débit variable	22
4.4 Avantages et inconvénients de la chloration au chlore gazeux.....	23
4.5 Coûts	23
<i>5 – Désinfection à l'eau de Javel</i>	24
5.1 Principe	24
5.2 Mise en oeuvre	24
5.3 Avantages et inconvénients de la chloration à l'eau de Javel.....	25
5.4 Coûts	25
<i>6 - Désinfection au dioxyde de chlore</i>	26
6.1 Principe	26
6.2 Mise en oeuvre	26
6.3 Avantages et inconvénients de la chloration au dioxyde de chlore	27
6.4 Coûts	28
<i>7 – Désinfection par rayonnement ultraviolet</i>	31
7.1 Principe	31
7.2 Matériels de base	31
7.3 Mise en oeuvre	32
7.4 Avantages et inconvénients de la désinfection par U.V.....	33
7.5 Coûts	33
<i>8 – Désinfection à l'ozone</i>	36

8.1 Principe	36
8.2 Matériels de base	37
8.3 Mise en oeuvre	37
8.4 Avantages et inconvénients de la désinfection à l’ozone	39
8.5 Coûts	40
9 – Choix d’un système de désinfection.....	41
10 – Etudes de cas	46
10.1 Commune de Nothalten – Désinfection U.V.	46
10.2 Commune de Chapareillan – Désinfection ultra-violet.....	47
10-3 Etude de cas chlore	48
10-4 Etude de cas dioxyde de chlore	50
ANNEXE 1 : les principaux fabricants de matériels de désinfection en France.....	51
BIBLIOGRAPHIE.....	52
GLOSSAIRE.....	57

MOTS-CLES

Eau potable, désinfection, chlore, ozone, ultraviolet, traitement de l'eau, appareils, avantages, inconvénients

RESUME

La désinfection de l'eau destinée à la consommation humaine est l'étape finale indispensable dans toute filière de traitement de potabilisation de l'eau et dans la distribution et correspond à la destruction ou l'inactivation des micro-organismes pathogènes pour l'homme.

Ce cahier technique FNDAE fait le point sur les différents procédés disponibles pour réaliser cette désinfection : chlore gazeux, eau de javel, dioxyde de chlore, ozone, ultraviolets.

Après un rappel de la réglementation en vigueur, les différentes solutions techniques de désinfection sont détaillées en présentant leurs avantages et leurs inconvénients dans la configuration de petites collectivités.

Introduction

La désinfection de l'eau destinée à la consommation humaine est l'étape finale indispensable dans toute filière de traitement de potabilisation de l'eau et dans la distribution et correspond à la destruction ou l'inactivation des micro-organismes pathogènes pour l'homme.

Le décret 2001-1220 du 20 décembre 2001 pris en application de la directive européenne 98/83/CE fixe les limites de qualité de l'eau destinée à la consommation humaine. Ce décret prévoit « la mesure du chlore libre et total ou de tout autre paramètre représentatif du traitement de désinfection » au point de mise en distribution ainsi qu'au robinet du consommateur.

Sur un total de près d'un million de déterminations analytiques par an pour les unités de distribution desservant plus de 5 000 habitants (représentant environ 42 million d'habitants soit environ 73% de la population française), le taux de conformité des résultats est de 99.18%.

Dans un communiqué daté du 16 octobre 1998, le Secrétariat d'Etat à la Santé indique que les paramètres les plus souvent cités comme responsable d'épisodes de non conformité des réseaux de distribution sont les paramètres microbiologiques dans 49.8% des cas.

Ce cahier technique FNDAE est une refonte du cahier technique n°2 daté de 1986. Il tente de faire le point sur les grands procédés de désinfection, leurs avantages et inconvénients et leurs mises en oeuvre à l'usage des collectivités rurales. Il propose des critères de choix pour la sélection d'un procédé plutôt qu'un autre en fonction des contraintes des collectivités.

Avant tout descriptif des techniques, il convient d'analyser la législation en vigueur en France. Le choix des techniques dépendra aussi des objectifs à atteindre, objectifs fixés par la réglementation. Bien évidemment, les facteurs économiques peuvent être un critère de choix comme les études de cas nous permettront de le montrer.

1 - Réglementation

La qualité de l'eau potable mise en distribution relève de plusieurs réglementations : la réglementation européenne et la réglementation française.

1.1 La réglementation européenne

- **La directive 80/778**

La première directive européenne sur la qualité des eaux destinées à la consommation humaine a été adoptée dès 1980.

La directive a retenu, entre autres, une liste de paramètres organoleptiques, physico-chimiques, indésirables, toxiques et microbiologiques auxquels elle a associé des valeurs impératives à respecter. Chaque état membre est à même d'imposer des valeurs plus strictes.

Une seconde Directive Eau Potable a été adoptée en 1998 modifiant sensiblement celle-ci en ce qui concerne les paramètres et les valeurs associées :

- **La directive 98/83/CE du 3 novembre 1998**

Les principales évolutions ont porté sur :

- l'orientation générale, plus marquée " santé publique " : la directive distingue les paramètres sanitaires (dont le non-respect a un impact direct sur la santé humaine) et les aspects techniques (plutôt considérés comme indicateurs pour les exploitants) ;
- l'organisation du contrôle sanitaire ;
- les descripteurs de la qualité : la liste des paramètres et des valeurs associées a été révisée en profondeur ;
- l'information des consommateurs et des autorités (information par l'exploitant en cas de difficulté, etc.).

1.2 La réglementation française

- **Le décret 89-3 du 3 janvier 1989**

Sont considérées comme " eaux destinées à la consommation humaine " :

- *Toutes les eaux qui, soit en l'état, soit après traitement, sont destinées à la boisson, à la cuisson, à la préparation d'aliments ou à d'autres usages domestiques, qu'elles soient fournies par un réseau de distribution, à partir d'un camion-citerne ou d'un bateau-citerne, en bouteilles ou en conteneurs, y compris les eaux de source ;*
- *Toutes les eaux utilisées dans les entreprises alimentaires pour la fabrication, la transformation, la conservation ou la commercialisation de produits ou de substances, destinés à la consommation humaine, qui peuvent affecter la salubrité de la denrée alimentaire finale, y compris la glace alimentaire d'origine hydrique.*

Le présent décret n'est pas applicable aux eaux minérales naturelles et aux eaux relevant de l'article L. 5111-1 du code de la santé publique.

Toutes ces eaux doivent remplir 3 conditions cumulatives :

- *ne pas contenir un nombre ou une concentration de micro-organismes, de parasites ou de toutes autres substances constituant un danger potentiel pour la santé des personnes ;*
- *être conformes aux limites de qualité définies à l'annexe I-1 du présent décret,*
- *satisfaire à des exigences de qualité, valeurs indicatives établies à des fins de suivi des installations de production et de distribution d'eau et d'évaluation de risques.*

- **Le décret 2001-1220 du 20 décembre 2001 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exception des eaux minérales**

Le décret 2001-1220 transcrit en droit français la directive du Conseil n°98/83/CE du 3 novembre 1998. Ce texte, qui remplace le décret 89-3 du 3 janvier 1989, intègre dans le droit national les grandes innovations apportées par la directive de 1998. Parmi les nouvelles dispositions on peut citer par exemple :

- le passage de 63 paramètres de qualité à 48 paramètres.
- le durcissement de certaines normes de qualité (notamment en ce qui concerne le plomb et la turbidité)
- la possibilité de réaliser des contrôles de la qualité de l'eau au robinet du consommateur.

L'annexe I-1 détaille les *limites de qualité* que doivent impérativement respecter les eaux destinées à la consommation humaine. Ce sont des indicateurs du bon fonctionnement des installations de production et de distribution des eaux. En cas de non-conformité, le distributeur doit informer le maire et le préfet et, après avoir recherché et identifié les causes, prendre les mesures correctives nécessaires (art. 19 et 20).

Sans préjudice des dispositions transitoires prévues à l'article 53, pour les eaux mentionnées aux a, c, d et e de l'article 3, les limites de qualité des paramètres suivants sont applicables :

- pour le paramètre plomb, à compter du 25 décembre 2013 ;
- pour les paramètres bromates et trihalométhanes, à compter du 25 décembre 2008 ;

Les références de qualité sont des valeurs indicatives auxquelles les eaux doivent normalement satisfaire (alors qu'elles doivent être *conformes* aux limites de qualité).

Ces références sont établies à des fins de suivi des installations de production et de distribution d'eau et d'évaluation de risques pour la santé des personnes. Elles sont détaillées à l'annexe I-2, qui distingue 25 paramètres, dont 23 sont liés au bon fonctionnement des installations et 2 mesurent la radioactivité.

Décret 2001-1220 du 20 décembre 2001 - Annexe I-1 Limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine

Partie A : Paramètres microbiologiques

Les eaux de distribution doivent respecter les valeurs suivantes :

Tableau 1: décret 2001-1220 – paramètres microbiologiques

Paramètres	Limites de qualité (nombre / 100 ml)
Escherichia coli (E. coli)	0
Entérocoques	0

Partie B : Paramètres chimiques

Les eaux doivent respecter des valeurs inférieures ou égales aux limites de qualité définies ci-après :

Tableau 2 : décret 2001-1220 – paramètres chimiques

Paramètres	Limites de qualité	Unité	Notes
Acrylamide	0,10	µg/l	La limite de qualité se réfère à la concentration résiduelle en monomères dans l'eau, calculée conformément aux spécifications de la migration maximale du polymère correspondant en contact avec l'eau.
Antimoine	5,0	µg/l	
Arsenic	10	µg/l	
Baryum	0,7	µg/l	
Benzène	1,0	µg/l	
Benzo[a] pyrène	0,010	µg/l	
Bore	1,0	µg/l	
Bromates	10	µg/l	La valeur la plus faible possible inférieure à cette limite doit être visée sans pour autant compromettre la désinfection.
Cadmium	5,0	µg/l	
Chrome	50	µg/l	
Chlorure de vinyle	0,5	µg/l	La limite de qualité se réfère à la concentration résiduelle en monomères dans l'eau, calculée conformément aux spécifications de la migration maximale du polymère correspondant en contact avec l'eau.
Cuivre	2,0	mg/l	
Cyanures totaux	50	µg/l	
1,2-dichloroéthane	3,0	µg/l	
Epichlorhydrine	0,10	µg/l	La limite de qualité se réfère à la concentration résiduelle en monomères dans l'eau, calculée conformément aux spécifications de la migration maximale du polymère correspondant en contact avec l'eau.
Fluorures	1,5	mg/l	
Hydrocarbures aromatiques polycycliques	0,1	µg/l	Pour la somme des composés suivants : benzo[b] fluoranthène, benzo[k] fluoranthène, benzo[ghi] pérylène, indéno[1,2,3-cd] pyrène
Mercuré total	1,0	µg/l	

Microcystine-LR	1	µg/l	A rechercher en cas de prolifération algale dans les eaux brutes
Nickel	20	µg/l	
Nitrates	50	mg/l	De plus la somme de la concentration en nitrates divisée par 50 et de celle en nitrites divisée par 3 doit rester inférieure à 1
Nitrites	0,50	mg/l	En sortie des installations de traitement, la concentration en nitrites doit être inférieure ou égale à 0,1 mg/l.
Pesticides	0,10 Pour chaque pesticide sauf aldrine, dieldrine, heptachlore, heptachlorépoxyde : 0,03	µg/l µg/l	Par "pesticides" on entend : - les insecticides organiques, - les herbicides organiques, - les fongicides organiques, - les nématocides organiques, - les acaricides organiques, - les algicides organiques, - les rodenticides organiques, - les produits antimoisissures organiques, - les produits apparentés (notamment les régulateurs de croissance) et leurs métabolites, produits de dégradation et de réaction pertinents.
Total pesticides	0,50	µg/l	Par "total pesticides" on entend la somme de tous les pesticides individualisés détectés et quantifiés.
Plomb	10	µg/l	50 µg/l actuellement, le seuil devra passer à 25 µg/l fin 2003, puis à 10 µg/l fin 2013
Sélénium	10	µg/l	
Tétrachloroéthylène et trichloroéthylène	10	µg/l	Somme des concentrations des paramètres spécifiés.
Total trihalométhanes (THM)	100	µg/l	Par Total trihalométhanes on entend la somme de : chloroforme, bromoforme, dibromochlorométhane et bromodichlorométhane.
Turbidité	1	NFU	La limite de qualité est applicable au point de mise en distribution, pour les eaux visées à l'article 25 et pour les eaux d'origine souterraine provenant de milieux fissurés présentant une turbidité périodique importante et supérieure à 2 NFU. En cas de mise en œuvre d'un traitement de neutralisation ou de reminéralisation, la limite de qualité s'applique hors augmentation éventuelle de turbidité due au traitement. Pour les installations qui sont d'un débit inférieur à 1000 m ³ /j ou qui desservent des unités de distribution de moins de 5 000 habitants, toutes les mesures appropriées doivent être prises pour réduire le plus possible la turbidité, au cours de la période nécessaire pour se conformer à la limite de qualité.

De nouveaux paramètres comme les bromates, les trihalométhanes, ou la turbidité devront être pris en compte dès le 25/12/2003; les exigences de qualité augmentent pour certains autres paramètres. Actuellement fixée à 50 mg/l, la limite de qualité pour le plomb passe à 25 mg/l en 2003 puis 10 mg/l en 2013. L'article 3 du décret 2001-1220 stipule que le respect des limites et références de qualité est apprécié à des " *points de conformité* "; la qualité de l'eau devra désormais s'apprécier au robinet et, en cas de non conformité, c'est le propriétaire qui sera tenu pour responsable, s'il est établi que la non-conformité résulte bien d'une défaillance du réseau privé.

En comparaison de la réglementation antérieure (décret 89-3 du 3/01/1989), la liste des valeurs obligatoires s'est allégée. Elle comprend désormais 31 paramètres : 2 microbiologiques et 29 chimiques. Parmi ces derniers, on constate les évolutions suivantes :

- 7 nouveaux paramètres : acrylamide, benzène, bromates, chlorure de vinyle, 1,2-dichloroéthane, épichlorhydrine, microcystine-LR ;
- 6 valeurs réduites : antimoine, arsenic, hydrocarbures aromatiques polycycliques, nickel, plomb, turbidité ;
- 3 valeurs relevées : cuivre, chlorures et le sodium
- 4 valeurs fixées : barium, bore, tétra et trichloroéthylène, total trihalométhanes (THM).

Ce dernier point est intéressant dans le contexte de ce cahier technique car la production de THM est directement liée à la phase de désinfection des eaux.

De plus, parmi les paramètres indicateurs de qualité témoins du fonctionnement des installations de production et de distribution d'eau, on retrouve certains composés directement liés à la désinfection :

Tableau 3 : paramètres indicateurs de qualité témoins du fonctionnement des installations de production et de distribution d'eau (extrait du décret 2001/1220)

Paramètres	Références de qualité	Unité	Notes
Chlore libre et total			Absence d'odeur ou de saveur désagréable et pas de changement anormal
Chlorites	0,2	mg/l	Sans compromettre la désinfection, la valeur la plus faible possible doit être visée

- **Circulaire DG5/VS4 n°2000-166 du 28 mars 2000**

Les produits de traitement des eaux destinées à la consommation humaine sont soumis à une autorisation. Ainsi, la circulaire DG5/VS4 n°2000-166 du 28 mars 2000 fixe la liste des produits et procédés autorisés dont : le chlore, le dioxyde de chlore, l'hypochlorite de calcium, l'hypochlorite de sodium, l'ozone.

Les radiations ultra violet produites à partir de lampes à mercure basse pression sont également autorisées. La circulaire du 19 janvier 1987 du Ministère de la Santé régissant les règles générales d'utilisation de la désinfection UV ne prenait en compte que les lampes mercure basse pression. De nouvelles lampes moyenne pression sont actuellement sur le marché. Comme les rayonnements émis sont différents un agrément différent devra être obtenu.

2 – Les principales configurations des réseaux de distribution

2.1 Introduction

A l'exception de quelques captages familiaux, la quasi totalité de la population française est desservie par un réseau de distribution publique organisé en unités de distribution (UDI). Une UDI correspond à un secteur de distribution où l'eau est de qualité homogène, gérée par un même exploitant et appartenant à la même entité administrative (commune ou groupement de communes).

Les 26.680 UDI sont alimentés par 36.581 captages. 95 % des captages exploitent les eaux souterraines et produisent 63 % de l'eau distribuée. 5 % des captages prélèvent des eaux superficielles et produisent 37 % du volume distribué.

Le réseau de distribution d'eau potable français long de 850 000 kilomètres est constitué de divers matériaux compte tenu de l'historique de pose de ces canalisations. Le réseau est essentiellement détenu par les communes de moins de 2 000 habitants qui représentent un peu plus de 26% de la population.

Tableau 4 : Longueur du réseau d'eau potable par taille de communes France entière

communes classées selon la population (nombre d'habitants)	longueur du réseau	Pourcentage de la population	Pourcentage de communes	Pourcentage du volume facturé
< 400	20,06%	6,42%	52,28%	7,14%
400 à 999	22,65%	9,98%	24,84%	9,20%
1000 à 1999	16,48%	9,88%	11,14%	8,48%
2000 à 3499	12,32%	8,30%	5,03%	8,07%
3500 à 9999	13,65%	16,78%	4,46%	15,79%
10000 à 19999	5,33%	10,45%	1,18%	10,06%
20000 à 49999	4,60%	15,23%	0,78%	14,78%
50000 et +	4,91%	22,95%	0,28%	26,46%

(Source : JM. BERLAND, C. JUERY , 2002)

L'enquête FNDAE réalisée en 1995 fait apparaître, que dans les usines de production d'eau potable pour les communes rurales, une simple désinfection suffit : plus de 77% des stations de traitement en zone rurale n'ont qu'une simple désinfection et représentent plus de 58% de la capacité de production d'eau potable.

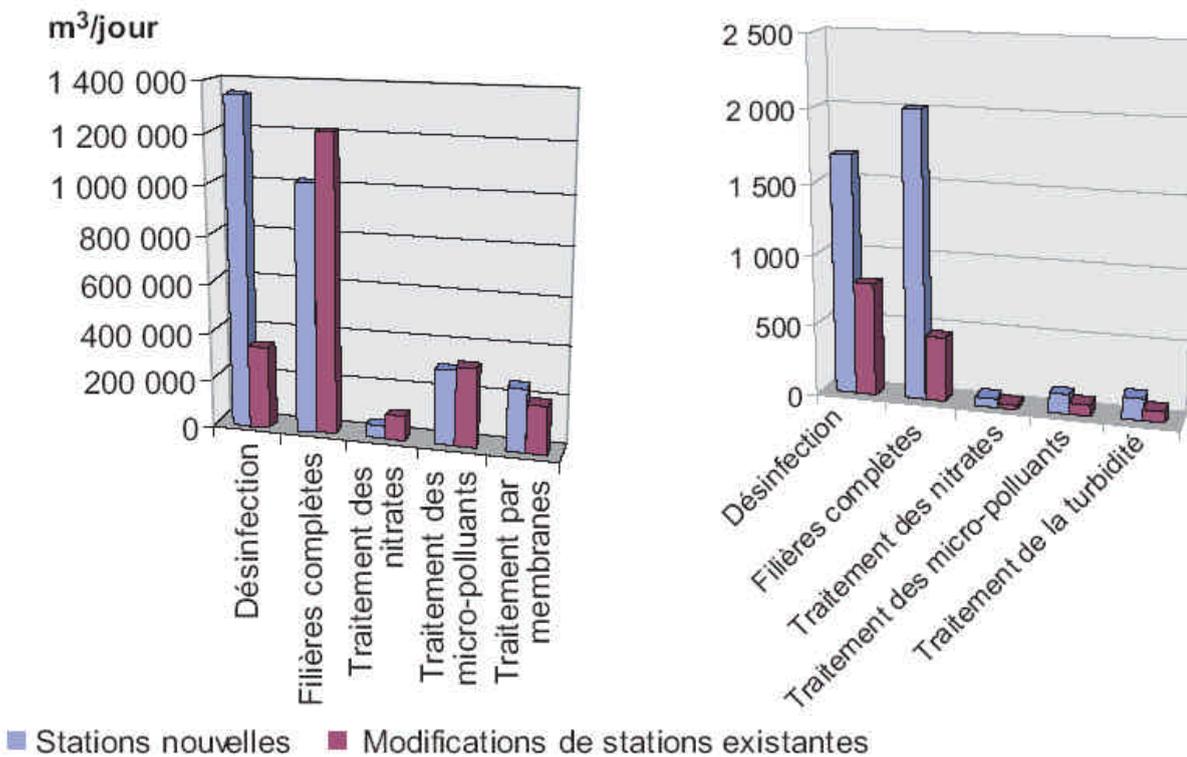
Cependant, cette tendance a une simple désinfection tend à diminuer compte tenu de la dégradation de la qualité de la ressource (cf. figure 1 indiquant la situation pour l'année 2000).

Tableau 5 : types de filière d'eau potable en France

Type de filière	Nombre de stations de traitement	Capacité (m ³ /j)	Pourcentage
Désinfection	8 312	6 346 143	77.7%
Traitement des nitrates	38	147 300	0.4%
Traitement des micropolluants organiques	132	730 806	1.2%
Filières plus complètes (déferrisation...)	2 217	3 688 779	20.7%
Total	10 699	10 913 028	100%

(Source : FNDAE – 1997)

Figure 1 : Nouvelles stations de traitement en capacité de production et en nombre (chiffres année 2000) (source : FNDAE 2004)



Les conditions d'installation d'un poste de désinfection dépendent directement de la configuration du réseau de distribution.

Très schématiquement, un réseau de distribution peut être défini comme étant constitué :

- d'une source d'eau brute
- d'un réservoir assurant le rôle de bassin tampon,
- de conduites de distribution

2.2 Désinfection intermédiaire en réseau de distribution

La post-chloration unique en sortie d'usine a longtemps été la règle en matière de désinfection. Mais l'apparition de réseaux très longs fortement interconnectés a mis en évidence la nécessité d'une désinfection intermédiaire en réseau. Cette rechloration pourra être effectuée au niveau d'un poste de relevage ou d'un réservoir intermédiaire. Le but étant de maintenir un taux de résiduel de désinfectant, seul un composé chloré est adapté. La rechloration ne constitue pas une désinfection par elle même.

Elle peut s'effectuer à l'aide de chlore gazeux, d'hypochlorite de sodium ou de bioxyde de chlore.

L'installation type pour une rechloration en réseau d'eau potable est composé de :

- une bouteille de chlore
- un analyseur de chlore résiduel ou de débit
- un chloromètre
- un hydroéjecteur

Le réseau de distribution d'eau potable de la ville de Cholet représente 250 kms de conduites et compte 2 réservoirs de stockage de 1 600 et 5 000 m³.

Une post-chloration est effectuée en sortie d'usine. Une étude a été réalisée sur ce réseau afin de modéliser l'évolution qualitative de l'eau, compte tenu de la consommation en désinfectant dû au biofilm notamment. Différentes configurations ont été simulées afin de déterminer les emplacements optimaux des rechlorations. A l'issue de cette étude, 2 postes de rechloration par chlore gazeux ont ainsi été installés. Il a été constaté une augmentation de 15% de la couverture en chlore du réseau pour un dosage complémentaire en chlore de 0.25 mg/l et une post-chloration à 0.7 mg/l. Dans le même temps, ce dispositif a permis un abattement des populations bactériennes d'une unité logarithmique.

Enfin, la réduction de la quantité de produit utilisée a atteint 4 kg par jour : la dose avant l'installation des rechlorations était de 12 kg pour n'être plus que de 8 kg après (CENTENE – 2000).

Une étude menée par l'agence de l'eau Adour Garonne propose l'estimation des coûts d'investissement suivants :

Tableau 6 : estimation des coûts d'investissement

Désignation	Fourchette de prix
Injection de chlore gazeux asservie uniquement au débit d'eau à traiter	9000 à 11000 € HT
Injection de chlore gazeux asservie au débit d'eau à traiter et au résiduel de chlore (débit supérieur à 30 m ³ /h)	18500 à 23000 € HT
Injection d'eau chlorée proportionnelle au débit d'eau à traiter et au résiduel de chlore (débit supérieur à 30 m ³ /h)	17500 à 22000 € HT
Injection d'hypochlorite de sodium proportionnelle au débit d'eau à traiter et au résiduel de chlore	9000 à 11000 € HT

(source : Agence de l'eau Adour Garonne – 2002)

Il convient de noter qu'une désinfection par U.V. sur le réseau peut également être possible lorsque la qualité de l'eau le permet.

3 – Les principes fondamentaux de la désinfection

La désinfection de l'eau potable consiste à rendre cette eau exempte de :

- germes pathogènes pour la consommation humaine,
- virus,
- la majeure partie des germes banaux.

La désinfection est une étape commune à tous les traitements même si les eaux souterraines présentent naturellement moins de germes pathogènes que les eaux de surface.

Les principaux types de désinfection utilisés actuellement pour parvenir à cela sont :

- la désinfection physico-chimique qui consiste à ajouter des réactifs chimiques tels que :
 - des composés chlorés comme le chlore gazeux, le dioxyde de chlore, l'eau de Javel ou les chloramines,
 - l'ozone,
- la désinfection physique notamment :
 - la stérilisation par les rayonnements ultraviolets,
 - la désinfection par le biais de traitement membranaire tel que l'osmose inverse.

Les chloramines sont généralement générés sur site ou in situ dans l'eau. Il s'agit principalement de NH_2Cl (monochloramine) et NHCl_2 (dichloramine) en mélange. Les chloramines ont un effet germicide moindre que le chlore : on considère que le chlore est 20 à 30 fois plus actif que la dichloramine et 50 fois plus que la monochloramine (PAILLARD H., SIBONY J. – 1988). Elles sont considérées comme des désinfectants secondaires, plutôt utilisées pour maintenir un résiduel dans les réseaux de distribution en soutien à un autre procédé de désinfection. Cependant en France, la monochloramine n'est pas autorisée en eau potable.

Nous nous proposons de faire le point sur les procédés disponibles et leur domaine d'application dans le cas de petites collectivités rurales, champ d'action du FNDAE. Chaque procédé fait l'objet d'une description plus poussée sous forme de fiches ci-dessous auxquelles il conviendra de se rapporter faisant état du principe général de chaque méthode ainsi que des matériels utilisés et de leurs mises en oeuvre.

Les conditions d'une bonne désinfection

Selon le type de désinfection, certains paramètres sont à prendre en considération :

- pour la désinfection physico-chimique : il convient de respecter un temps de contact et une dose d'application adaptée afin d'assurer l'efficacité de l'action du composé chimique et minimiser les sous-produits susceptibles de se créer le cas échéant ;
- pour la désinfection par rayonnement ultraviolet : respect d'une certaine intensité de radiation par volume d'eau ;
- pour la désinfection par membrane d'ultrafiltration : vérification de l'intégrité des membranes. Dans la pratique, le traitement membranaire est toujours suivi d'une étape de désinfection chimique.

Les produits à base de chlore tels que le chlore gazeux, l'eau de Javel ou le dioxyde de chlore sont les oxydants les plus largement utilisés pour la désinfection de l'eau destinée à la consommation humaine. Les usines les plus importantes utilisent davantage l'ozone.

Cette chloration arrive généralement en fin de filière de potabilisation avant envoi de l'eau dans les réservoirs amont et donc dans le réseau, c'est à dire en tête de distribution afin de maintenir un résiduel dans le réseau. Depuis le 11 septembre 2001, les consignes sont de maintenir un résiduel voisin de 0,2 mg/l. D'éventuelles chlurations intermédiaires sur le réseau peuvent s'avérer nécessaires pour limiter la prolifération de micro-organismes.

La préchloration n'est plus pratiquée car elle favorise la formation de sous-produits de chloration indésirables : les trihalométhanes ou THM formés par réaction du chlore avec des composés organiques présents dans l'eau. Des effets sur le cancer et sur la reproduction humaine sont suspectés. Les risques d'une exposition prolongée ne sont pas connus.

En France, les pratiques de désinfection en France sont les suivantes :

Tableau n° 7 : les pratiques de désinfection en France

Débit en m ³ /j	Eaux d'origine souterraine				
	Moins de 300	300 - 1000	1000 - 5000	5000 - 10000	Plus de 10000
Chlore gazeux	34.8%	67.7%	71.3%	61.5%	61.8%
Dioxyde de chlore	1.5%	4.4%	13.6%	25.0%	17.6%
Hypochlorites (eau de Javel ...)	47.3%	21.7%	10.0%	1.0%	1.5%
Ozone	0.1%	0.5%	3.1%	8.7%	19.1%
Ultrafiltration	0.6%	0.9%	0.5%	0.0%	0.0%
Ultraviolet	15.4%	4.6%	1.2%	3.8%	0.0%

Débit en m ³ /j	Eaux d'origine superficielle				
	Moins de 300	300 - 1000	1000 - 5000	5000 - 10000	Plus de 10000
Chlore gazeux	36.7%	53.1%	41.6%	36.7%	29.0%
Dioxyde de chlore	5.9%	10.2%	20.8%	16.7%	18.3%
Hypochlorites (eau de Javel ...)	36.2%	7.5%	4.9%	8.3%	8.6%
Ozone	6.9%	24.5%	31.4%	38.3%	43.0%
Ultrafiltration	0.0%	1.4%	0.4%	0.0%	0.0%
Ultraviolet	13.8%	1.4%	0.0%	0.0%	0.0%

(Source : base SISE-EAUX – 2002)

Les très petites unités font majoritairement appel à l'eau de Javel ou au chlore gazeux.

Nous proposons dans le chapitre suivant un récapitulatif des différents avantages et inconvénients de chaque solution à l'exclusion de l'ultrafiltration, cette technique étant traitée dans le cahier technique FNDAE n°14.

Quelques rappels de chimie de l'eau – formation des composés indésirables suite à la désinfection

Un eau à potabiliser et surtout une eau de surface est un mélange complexe, souvent polyphasique, et qui contient presque toujours plusieurs composés à éliminer.

L'eau contient des gaz dissous essentiellement de l'oxygène et du gaz carbonique mais aussi de l'azote. Tous n'ont pas la même solubilité dans l'eau et celle-ci décroît quand la température augmente.

Elle contient aussi, sous forme dissoute ou en suspension, des substances minérales et organiques. Si les substances minérales sont limitées à une centaine de composés, les substances organiques sont innombrables (plusieurs centaines de mille voire plusieurs millions) et leur identification individuelle très difficile.

Les matières minérales :

L'eau contient de nombreux ions dissous dont les principaux sont le calcium (Ca^{++}), le magnésium (Mg^+), le sodium (Na^+), le potassium (K^+), les carbonates (CO_3^-), les bicarbonates (HCO_3^-), les sulfates (SO_4^-), les chlorures (Cl^-) et les nitrates (NO_3^-). Ils proviennent pour l'essentiel du ruissellement.

En moins grande concentration, l'eau contient aussi des nutriments, tels que l'azote (contenu dans l'ammoniac, les nitrites et les nitrates), le phosphore (contenu dans les phosphates) et la silice, ainsi que du fer et du manganèse.

D'autres éléments ne sont présents qu'à l'état de trace. C'est le cas de l'arsenic, le cuivre, le cadmium, le manganèse, le fer, le zinc, le cobalt, le plomb... Ils peuvent provenir des roches mais aussi parfois des activités industrielles et domestiques.

L'eau contient aussi des matières minérales en suspension (matériaux argileux, limons, etc).

Les matières organiques :

Les matières organiques peuvent être présentes sous forme dissoute (carbohydrates, acides humiques, chlorophylles et polluants synthétiques comme les hydrocarbures, les solvants chlorés ou les pesticides), ou en suspension (déchets végétaux, plancton...). Elles proviennent pour l'essentiel de la dégradation de la matière organique présente dans le milieu ou dans les sols lessivés par les pluies (décomposition des plantes et des animaux), mais aussi de composés issus de l'activité humaine. Leur concentration, infime dans les eaux profondes, peut atteindre quelques dizaines de milligrammes par litre dans les eaux de surface.

Les trihalométhanes (THM) formés par chloration des eaux de surface sont essentiellement :

- le chloroforme CHCl_3
- le bromodichlorométhane CHBrCl_2
- le dibromochlorométhane CHBr_2Cl
- le bromoforme CHBr_3

Parmi les précurseurs de THM les plus représentatifs des eaux de surface, les acides fulviques jouent un rôle fondamental. Il existe en effet des sites très réactifs avec le chlore dans leur structure chimique dont certains peuvent conduire à la formation de chloroforme.

La formation de THM à partir de ces précurseurs est rapide dans la phase initiale de la réaction, elle devient beaucoup plus lente au bout de quelques heures.

Les structures polyhydroxyaromatiques conduisent rapidement à la formation de chloroforme et/ou de bromoforme et de composés organohalogénés mixtes tandis que les méthylcétones constituent des précurseurs à réaction lente.

4 - Désinfection au chlore gazeux

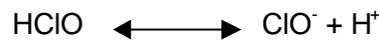
4.1 Principe

Le chlore est un désinfectant puissant par l'intermédiaire de l'ion hypochloreux HClO^\ominus qui peut pénétrer la membrane cellulaire pour inhiber les fonctions enzymatiques de la bactérie.

Le chlore gazeux réagit selon la réaction suivante:



(formation d'acide hypochloreux HClO et d'acide chlorhydrique HCl), qui s'accompagne de la réaction acide base :



(formation de l'ion hypochlorite ClO^\ominus et de l'ion hydrogène H^\oplus),

En fonction de la dose appliquée le traitement entraîne soit des lésions réversibles, soit des lésions irréversibles causant de fait la mort cellulaire (JC Block – 2003).

Par contre, le chlore n'a que peu d'effet sur les bactéries contenues au sein du biofilm dans un réseau public d'eau potable.

Le chlore gazeux peut produire des composés chlorés indésirables voire dangereux (THM: trihalométhanes, chlorophénols, organochlorés) et entraîne un goût prononcé de l'eau potable. Son efficacité dépend du pH du milieu et son utilisation nécessite un local de stockage spécifique.

Son action est avérée contre les bactéries mais non contre les virus. De plus, il existe de plus en plus d'organismes résistant au chlore.

Il a été démontré qu'une dose de chlore de 0.3 mg/l dans une eau (en terme de résiduel de chlore) à 15 °C et à pH 7,5, maintenue pendant 10 à 20 minutes assure la destruction des bactéries. Cependant, l'efficacité du chlore décroît avec l'augmentation de la température et du pH. La plage de pH optimale se situe entre 4 et 6, ce qui se situe hors de la gamme des pH acceptables en eau potable.

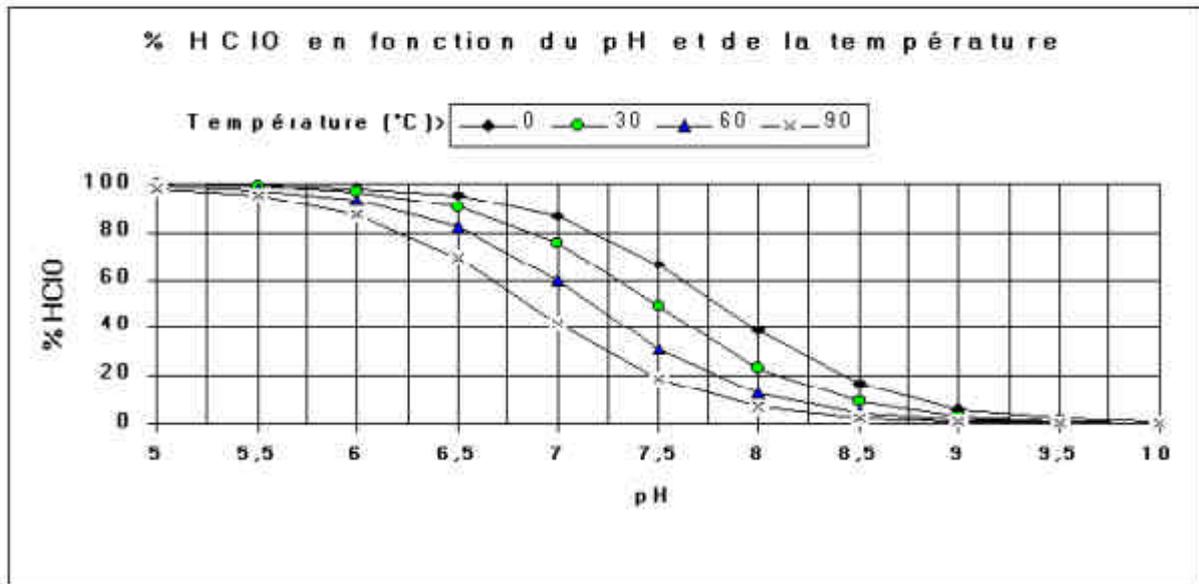


figure 2 : évolution de la concentration en HClO en fonction de la température et du pH (d'après : <http://pravarini.free.fr/Desinfectants.htm>)

De plus, compte tenu de la réaction du chlore avec les matières organiques et l'ammoniaque, il est conseillé de ne traiter l'eau qu'après élimination de sa matière organique, ceci afin de pas conduire à des sur-consommations de chlore et à la formation de sous-produits. Il présente un effet rémanent dans le réseau si la dose appliquée est supérieure au break-point ou point de rupture (dose consommée par les matières azotées présentes dans l'eau et donc non disponible pour un effet désinfectant).

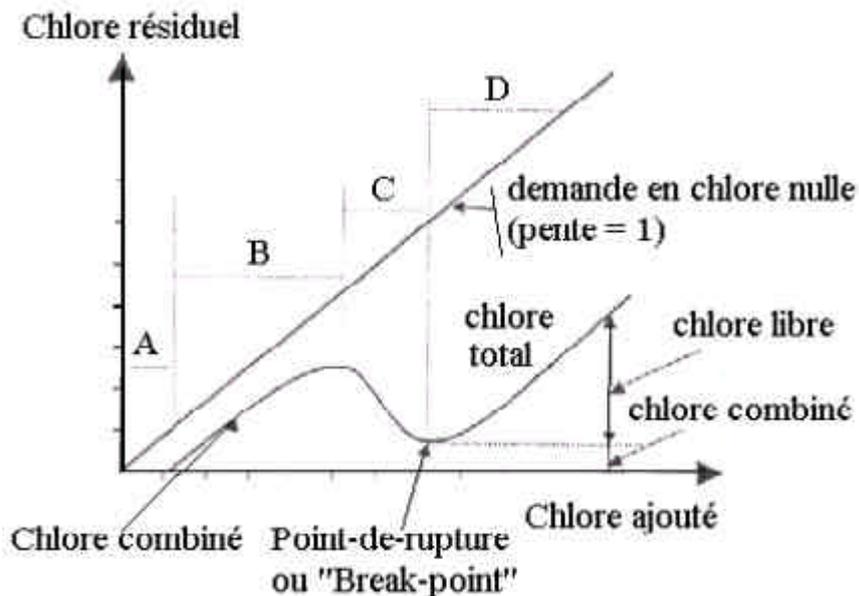


Figure 3 : chloration au break point (d'après : <http://pravarini.free.fr/Desinfectants.htm>)

A : destruction du chlore par les composés minéraux réducteurs,
B : formation de composés chlorés organiques et de chloramines,
C : destruction des chloramines par ajout de chlore supplémentaire,
D : production de chlore actif.

4.2 Mise en oeuvre

Le chlore gazeux est simple à utiliser : sur un forage de faible débit en zone rurale, une bouteille de chlore gazeux et un organe de dosage peu sophistiqué suffisent (Miquel et Revol, rapport au Sénat - 2003). Aucune alimentation électrique n'est nécessaire dans la mesure où le débit d'eau à traiter est constant. Néanmoins, pour des débits inférieurs à 5 m³/h, il y a risque de colmatage des hydroéjecteurs : son utilisation est donc prescrite pour des débits supérieurs à cette valeur (Saunier – 2000). Pour des débits inférieurs, mieux vaut faire appel à de l'eau chlorée préparée à partir de chlore gazeux et stockée dans un bac : l'injection dans l'eau à traiter se fait par le biais d'une pompe doseuse.

Le chlore gazeux est livré et stocké sous forme liquéfiée dans des bouteilles en acier conçues pour une pression de 15 bar (ou tanks pour les installations plus importantes) sous pression généralement de l'ordre de 40 kg net de Cl₂. Ces bouteilles ne doivent pas être stockées à des températures supérieures à +40°C.

Dans la pratique, il est recommandé d'installer ces bouteilles en 2 unités parallèles afin de basculer l'alimentation de l'une à l'autre sans interruption du dosage. Ces récipients sont posés sur un système de pesée permettant de vérifier le niveau de consommation.

Par connexion sur la bouteille, après détente dans un chloromètre, le chlore gazeux est mélangé grâce à un hydroéjecteur à une eau de service, ce qui permet la production d'une solution aqueuse concentrée de chlore. Le prélèvement maximum possible au départ d'une bouteille est de 1.3 à 1.4 kg/h à 20°C ; il est recommandé de ne pas dépasser 0.6 à 0.8 kg/h soit un taux de traitement de 12 g/m³ pour un débit d'eau de 50 m³/h.

La solution mère aqueuse est injectée dans le bassin de contact par le biais d'un dispositif toujours immergé et toujours à une pression supérieure à celle de l'eau à traiter.

Des appareils de contrôle doivent être installés tels qu'un débitmètre de chlore gazeux de préférence équipé d'un système d'alarme de débit minimal et un débitmètre sur l'arrivée d'eau de dilution permettant la fermeture automatique de la vanne d'arrivée du flux gazeux en cas de manque d'eau de service.

On s'assurera de l'absence de graisses, d'huiles et autres lubrifiants organiques au contact du chlore gazeux ou liquide du fait du risque d'ignition.

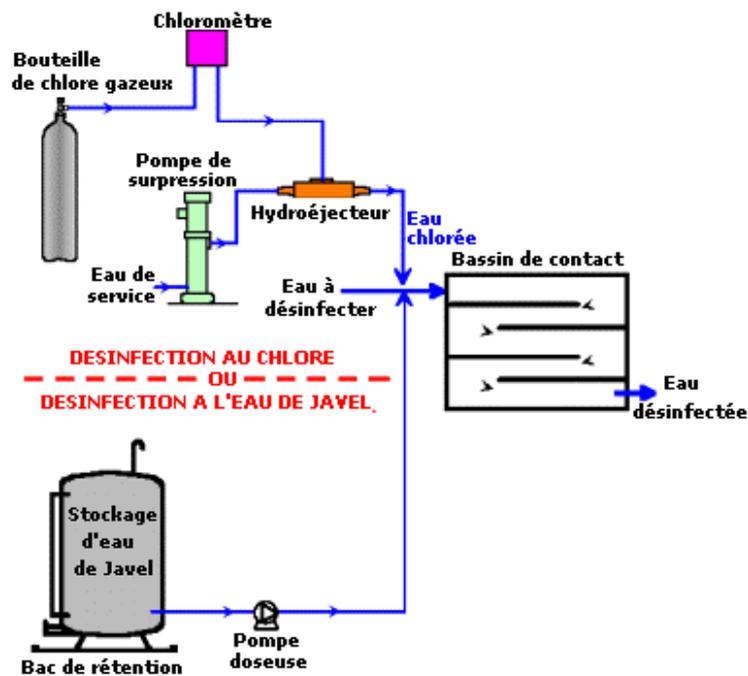
Les locaux de stockage seront équipés d'une ventilation permettant un renouvellement de l'air dans le local «équivalent à 6 renouvellements par heure (Masschelein, 1999). De plus, le local de stockage sera séparé du local de mise en oeuvre. Le stockage du chlore relève de la réglementation des installations classées. La constitution d'un dépôt d'une capacité supérieure actuellement à 150 kg est soumise à une réglementation qui impose notamment l'installation dans un local séparé, d'un dispositif de neutralisation des fuites :

- capacité du dépôt comprise entre 150 et 500 kg : la bouteille de chlore objet de la fuite est immergée dans un bac rempli de soude,

- capacité du dépôt supérieure à 500 kg : les vapeurs de chlore sont aspirées par un ventilateur et neutralisées dans une tour de contact à l'aide d'une solution composée de soude et d'hyposulfite de sodium.

L'installation est enclenchée automatiquement à partir d'un détecteur de fuite.

Des dispositions de sécurité sont à prendre par le personnel lors de leur intervention sur les récipients de stockage.



Désinfection par chloration (source : site cartel'eau)

Compte-tenu de la technicité exigée pour la mise en oeuvre de ce procédé, il est réservé aux installations moyennes et grandes mais ne peut être recommandé pour de petites unités.

4.3 Cas particulier : chloration d'un débit variable

Dans le cas d'un débit variable, l'injection de chlore devra être asservie au débit d'eau. De fait, cela nécessitera le recours à une alimentation électrique pour mettre en oeuvre un débitmètre, un compteur à impulsion ou une vanne modulante.

4.4 Avantages et inconvénients de la chloration au chlore gazeux

La chloration au chlore gazeux présente de nombreux avantages dont la présence d'un résiduel de chlore qui garantit l'efficacité de la désinfection et son pouvoir oxydant.

De plus, elle présente une grande facilité d'utilisation, comme les autres composés chlorés. L'augmentation de la chloration depuis les événements du 11 septembre 2001 participe à la croyance commune d'une arme quasi absolue. Or, outre un effet très désagréable sur le goût qui conduit une part de la population à se détourner de l'eau du robinet, plusieurs défauts méritent d'être signalés.

Tout d'abord, le chlore n'est pas un désinfectant universel : certaines bactéries, et plus encore certains virus et parasites résistent au chlore notamment les protozoaires lorsqu'ils sont enkystés (*Giardia*, *Cryptosporidium*, *Entamoeba histolytica*).

De plus, il est pourvu d'inconvénients et non des moindres :

- hygiène et sécurité pour l'exploitant : la manipulation du chlore gazeux demande une certaine technicité et une sécurité des installations;
- présence de sous-produits indésirables dans le milieu récepteur (THM, chloramines sauf si la chloration est supérieure au break-point) en présence de matière organique dans l'eau;
- coût des réactifs.

Des recherches récentes ont montré que des bactéries pouvaient s'accoutumer au chlore et, de ce fait, leur permet d'être de moins en moins vulnérables à cette désinfection. Selon les experts, il vaut mieux avoir de fortes doses de chlore de temps en temps qu'un «bruit de fond de chlore» constant qui va réduire l'efficacité des actions désinfectantes ultérieures.

4.5 Coûts

Le chlore est un gaz corrosif. Ceci conduit à un remplacement régulier des instruments.

Les coûts d'investissement sont de l'ordre de 10 à 19 k€H.T. indépendamment du débit d'eau à traiter si le stockage en bouteille est suffisant. Le génie civil contribue dans ces coûts d'investissement à hauteur de 4 000 € pour le local de stockage extérieur à l'installation.

Les coûts d'exploitation sont essentiellement constitués de coût en réactifs représentant 120 €/an pour 100 m³/j et 680 €/an pour une unité de désinfection de 600 m³/j pour une dose de chlore injectée de 2g de chlore / m³. Le renouvellement contribue à un surcoût de 305 à 765 €/an.

Le poste énergie est négligeable. Quant au poste main d'oeuvre, il peut représenter 1 200 € par an correspondant à un passage mensuel de 2 heures d'un agent sur un site isolé (Saunier – 2000).

Les ordres de grandeur donnés ci-dessus peuvent se révéler très variables en fonction des sites mais constituent une bonne base de départ.

5 – Désinfection à l'eau de Javel

5.1 Principe

L'eau de Javel est produite par électrolyse du chlorure de sodium. Cette réaction conduit à la formation de chlore gazeux et d'hydroxyde de sodium qui lui-même peut réagir avec le chlore pour donner de l'hypochlorite selon la formule :



L'eau de Javel se décompose plus rapidement sous l'effet de la chaleur, et par conséquent davantage en été qu'en hiver, lorsque sa concentration en chlore est importante. L'hypochlorite se décompose alors en chlorate, chlorure et oxygène perdant ainsi son effet désinfectant.

L'hypochlorite de calcium peut être obtenu de la même façon par réaction avec une eau ou un lait de chaux. Cependant, ces solutions d'hypochlorite de calcium sont moins employées dans le traitement des eaux (Masschelein 1999).

5.2 Mise en oeuvre

La désinfection à l'eau de javel est simple à mettre en oeuvre.

Elle nécessite l'installation d'un bac de stockage de la solution diluée ainsi que d'une pompe doseuse et d'un système d'injection dans la conduite : soupape de mise en pression ou surpresseur et canne d'injection dans le cas d'une conduite sous pression.

Une alimentation électrique est nécessaire pour l'injection et le système d'asservissement au débit (débitmètre ou compteur d'impulsion).

Elle peut se faire à différents endroits : à la crépine, au refoulement ou à la station.

La chloration à la crépine, du fait de son principe même, n'est mise en oeuvre qu'au moment du pompage. Cependant, cette technique est peu utilisée car elle induit des problèmes de corrosion sur le forage, sa précision est mise en doute. Les chlorations au refoulement ou en usine sont privilégiées (MIGNE V., 1999).

L'hypochlorite de sodium en solution ou eau de javel peut être livré en bonbonnes, en containers ou en camions citernes. Le stockage en cuves plastiques ou acier doit se faire à l'abri de la chaleur et de la lumière. Il convient de noter que l'eau de javel est sensible au froid et cristallise à 0°C si la concentration est forte.

De plus, l'eau de javel se décompose rapidement. La stabilité de la solution commerciale n'excède pas 2 mois. Quant à la solution diluée elle peut être de l'ordre de 15 jours.

Livrée sous forme liquide, elle est stockée dans une cuve avant d'être reprise par une pompe doseuse pour être injectée dans le bassin de contact où transite l'eau à désinfecter. Les solutions commerciales d'eau de javel de 47/50 degrés chlorométriques contiennent 150 g/l de chlore. La dilution de la solution à injecter peut s'avérer délicate à réaliser : possibilité d'erreurs.

L'électrochloration consiste à fabriquer in situ de l'hypochlorite de sodium par électrolyse d'une solution de NaCl. L'installation comprend entre autres des cuves pour la préparation de la saumure, des cellules d'électrolyse, une cuve de stockage ventilée et une pompe doseuse d'hypochlorite. Une telle installation demande une certaine technicité et s'applique plutôt sur des installations de moyenne à grande capacité.

5.3 Avantages et inconvénients de la chloration à l'eau de Javel

Tout comme le chlore gazeux, l'utilisation d'eau de javel pour la désinfection de l'eau destinée à la consommation humaine peut conduire à la production de sous-produits de désinfection responsables de mauvais goûts et d'odeurs, voire dangereux pour la santé (THM, chlorophénols, organochlorés).

De plus, l'eau de javel est basique et peut provoquer la précipitation du calcium en cas d'eau dure ce qui entraîne des colmatages des équipements.

Cette solution de désinfection est utilisée pour de petites installations : les installations sont réduites et la maintenance est limitée. Cependant sa stabilité est faible, 2 mois maximum pour la solution commerciale, ce qui est très limitatif. Ceci peut conduire à des erreurs dosage (sous dosage car la solution a une concentration diminuée). De plus, elle impose une maintenance importante (remplacement de la solution).

5.4 Coûts

Les coûts d'investissement pour une unité d'eau de javel (livrée liquide) sont majoritairement composés de bacs de stockage, pompe doseuse et système d'injection. Ils représentent 2 à 4 k€ indépendamment du débit.

Les coûts d'exploitation sont dus aux réactifs et s'élèvent à 150 € environ par an pour 100 m³/j et 900 € pour 600 m³/j. Les coûts d'énergie sont négligeables. Les coûts de main d'œuvre sont également à prendre en compte et ne sont pas négligeables compte tenu des inconvénients décrits ci-dessus.

Le renouvellement contribue à un surcoût de 305 € par an (Saunier – 2000).

L'électrochloration est beaucoup plus coûteuse : 30 à 53 k€ en investissement selon le débit d'eau à traiter, les coûts d'exploitation relèvent de la dépense énergétique et sont élevés.

6 - Désinfection au dioxyde de chlore

6.1 Principe

Le dioxyde de chlore (ClO_2) est également appelé bioxyde de chlore. C'est un gaz orangé explosif à plus de 10% (concentration dans l'air).

Pour des raisons de sécurité du fait de son instabilité, il doit être fabriqué sur place au dernier moment à partir de chlorite de sodium et d'acide chlorhydrique ou de chlorite de sodium et de chlore gazeux.

Contrairement au chlore ou à l'ozone, le dioxyde de chlore ne réagit qu'avec quelques composés organiques. Cette plus grande sélectivité augmente l'efficacité de ce désinfectant. Comme il n'oxyde pas l'ammoniaque, il peut être préféré au chlore, pour éviter de donner à l'eau un goût désagréable.

De plus, la gamme de pH pour laquelle le dioxyde de chlore conserve un pouvoir germicide est plus importante : entre 4 et 10.

Le dioxyde de chlore est également plus efficace que le chlore pour l'inactivation des spores, bactéries, virus et autres organismes pathogènes. Son action est également rapide : temps de contact 2 à 3 fois plus court que pour le chlore.

Ainsi une dose de 0.1 à 0.2 mg/l pendant 5 à 10 minutes assure une action bactéricide (contre 10 à 15 minutes pour le chlore) et une dose de 0.3 à 0.5 mg/l pendant 30 minutes une action virulicide (contre 30 à 45 minutes pour le chlore) (source : Le Besq et Le Galliot – 1991).

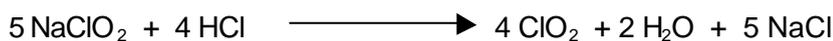
Un tel procédé peut être préconisé pour toutes les tailles d'installations.

6.2 Mise en oeuvre

Compte tenu de son instabilité, le dioxyde de chlore est préparé sur le lieu d'utilisation à partir de :

- Soit de chlorite en présence d'acide chlorhydrique pour maintenir un milieu acide :

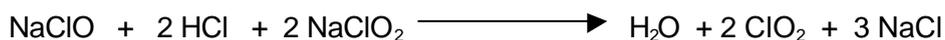
La réaction mise en oeuvre dans ce cas est la suivante :



Le rendement de cette réaction est bon, taux de transformation du chlorite proche de 100%, en présence d'un excès d'acide (pH inférieur à 4).

- Soit de chlorite et de chlore,
- Soit de chlorite, d'acide chlorhydrique et d'eau de javel :

La réaction chimique intervenant alors est la suivante :



Cette dernière solution ne fait pas appel au chlore et évite les problèmes inhérents au stockage de ce composé (source : OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU – 1993).

Le schéma ci-dessous présente un modèle de générateur de dioxyde de chlore à partir de chlore gazeux et de chlorite.

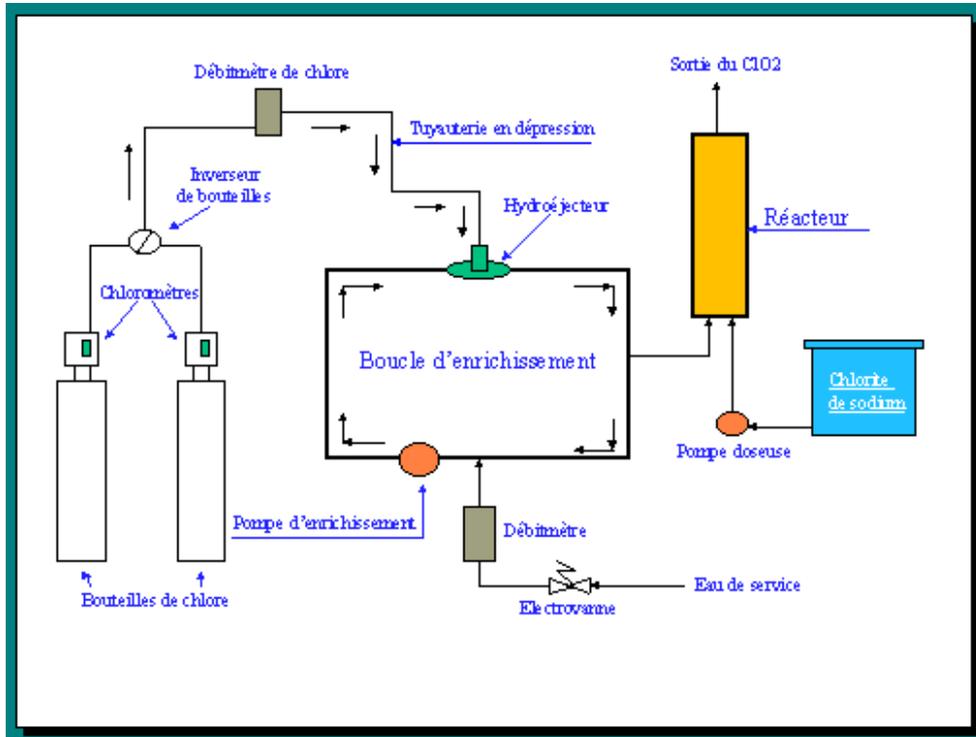


Figure 4 : exemple d'installation de production de dioxyde de chlore (d'après : <http://pravarini.free.fr/Desinfectants.htm>)

La réaction mise en œuvre est la suivante :



Une boucle d'enrichissement permet d'obtenir une solution de chlore concentrée de pH très acide qui est introduite dans un réacteur en présence de chlorite . La solution de dioxyde de chlore ainsi générée est stable et peut être utilisée pure ou diluée (Office International de l'Eau – 1993).

6.3 Avantages et inconvénients de la chloration au dioxyde de chlore

Le dioxyde de chlore présente une très grande efficacité pour éliminer de nombreuses espèces pathogènes. L'ion chlorite produit a également une action bactériostatique ce qui lui confère un pouvoir rémanent.

Il est plus efficace que le chlore sur les protozoaires, bactéries et virus. A titre d'exemple, le tableau ci-dessous reprend des ordres de grandeur de CT pour le dioxyde de chlore comparé au chlore .

Tableau 8 : Valeurs de CT en mg.min/l

Désinfectants	<i>Cryptosporidium parvum</i>	<i>Giardia muris</i>	<i>Clostridium perfringens</i>
Dioxyde de chlore	160	7 à 18	10 à 20
Chlore	14000	30 à 600	Résistant au chlore

(source : ZYDOWICZ P. et al – 2002)

Le dioxyde de chlore présente la meilleure efficacité combinée si l'on considère les 2 paramètres que sont l'efficacité biocide et la rémanence dans le réseau.

De plus, il est très sélectif et ne réagit avec :

- les composés azotés :il n'y a pas formation de nitrites ou nitrosamines,
- les bromures : aucune formation de bromates,
- les composés organiques ce qui évite la formation de THM.

De plus, le dioxyde de chlore est peu sensible au pH.

D'autre part, son caractère rémanent , par le biais de l'ion chlorite, lui confère une efficacité inégalée sur le biofilm. Ainsi, 0,5 g/l de chlorite équivaut à 6 à 7 mg/l de chlore (Zydowicz P. et al – 2002).

Cependant, il faut noter que le décret 2001/1220 du 20 décembre 2001, à la différence de la directive européenne 98/83/EC, préconise une valeur limite pour les chlorites : 0,2 mg/l. La formation de chlorite à partir de dioxyde de chlore est rapide : 30 à 60 minutes. La proportion de chlorite formé est de 50 à 70% du dioxyde ayant réagi.

Les sous-produits de désinfection sont réglementés (Coccagna et al – 2002) : les trihalométhanes issus de la chloration, les chlorites issus de l'usage du dioxyde de chlore ainsi que les bromates dans le cas de l'ozonation.

6.4 Coûts

Les coûts d'investissement sont quasiment indépendants du débit et s'élèvent en moyenne à 45 – 60 k€

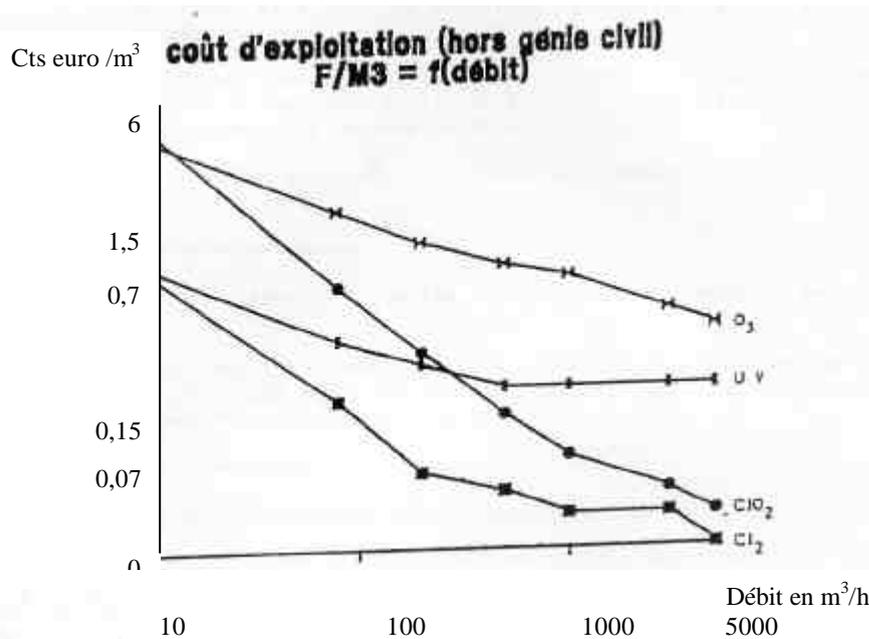
Les coûts en réactif constituent la composante majoritaire des coûts d'exploitation : 230 €/ an pour 100 m³/j.

Des concentrations élevées en dioxyde de chlore n'ont pas d'effet corrosif. Les coûts de maintenance à long terme sont réduits.

Comparativement aux autres désinfectants, le dioxyde de chlore est avec l'ozone le plus cher en exploitation et en investissement pour les faibles débits. Les coûts d'exploitation décroissent rapidement lorsque le débit de l'installation augmente comme le montrent les graphiques ci-dessous.

Les installations retenues pour les 2 graphiques si dessous comprennent les réactifs suivants :

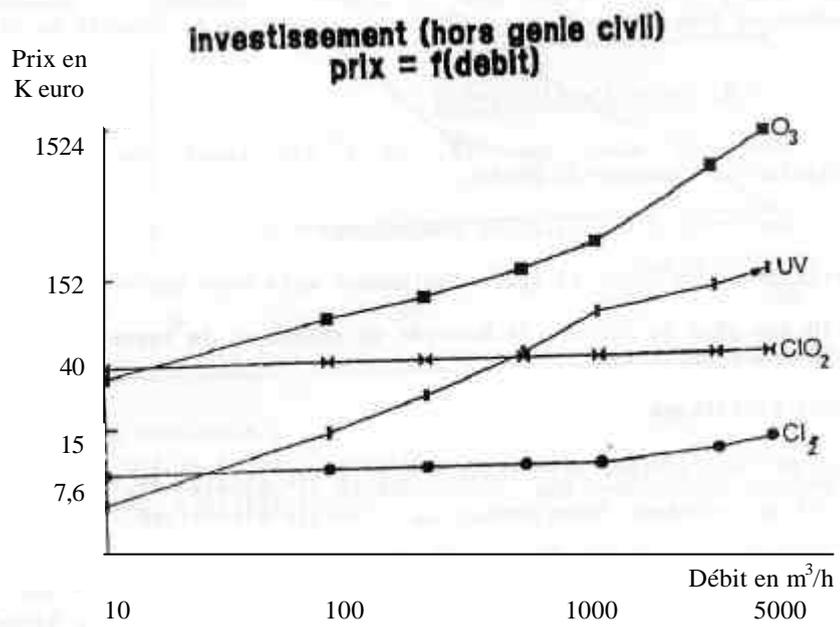
- Chlore gazeux : 0,8 mg/l
- Dioxyde de chlore : 0,4 mg/l
- Ozone : 2,5 mg/l
- UV : intensité de 250 J/m²



Graphique : Coûts d'exploitation (source : Le Besq et al – 1993)

N.B : Pour calculer ces coûts, l'amortissement a été estimé à 10 ans pour le chlore, le dioxyde de chlore et le rayonnement U.V. et 20 ans pour l'ozone.

Les coûts indiqués ne doivent pas être pris comme base car anciens. Cependant, l'évolution des coûts comparés entre les 4 procédés de désinfection en fonction des débit est toujours valable. Ainsi le bioxyde de chlore, le plus coûteux en exploitation pour les faibles débits, devient plus intéressant lorsque le débit est supérieur à 1 000 m³/h.



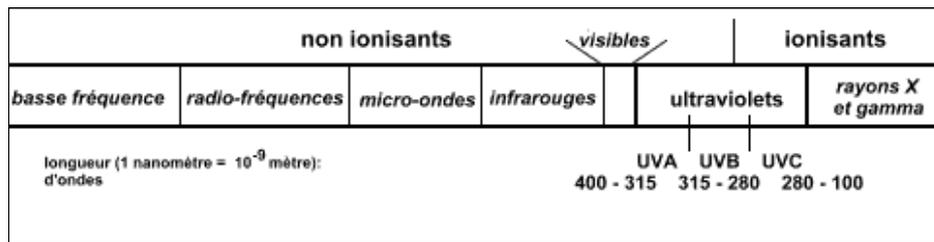
Graphique : Coûts d'investissement (source : Le Besq et al – 1993)

7 – Désinfection par rayonnement ultraviolet

7.1 Principe

Le rayonnement ultraviolet est une forme de rayonnement électromagnétique comme l'infrarouge, les rayons X et la lumière. Il se situe entre la lumière visible et les rayons X dans le spectre électromagnétique. Il se divise en 3 bandes de longueur d'onde, selon l'effet qu'il produit sur les tissus vivants, soit UVA, UVB et UVC.

Figure 5 : Le spectre électromagnétique



(source : <http://www.gov.on.ca/lab/french/hs/guidelines/uvradiation/> site consulté le 11/07/2003)

Les lampes ultraviolets utilisés en traitement des eaux émettent la majorité de leur énergie d'irradiation à une longueur d'onde de 254 nm ou 2537 Angström qui a un pouvoir fortement bactéricide, virucide et algicide. Les UV de type C éradiquent les germes en détruisant le métabolisme des cellules.

L'eau à désinfecter transite dans une chambre d'irradiation où sont placées des lampes, isolées de l'eau par des gaines en silice ou quartz, émettant un rayonnement ultraviolet qui a la propriété d'agir directement sur les chaînes moléculaires (ADN-ARN) des cellules des micro-organismes, ce qui interrompt le processus de vie et de reproduction de ces pathogènes. Le rayonnement UV nécessaire se mesure en micro watts.seconde/cm².

Le rayonnement UV est très efficace sur les bactéries et virus à faible dose : de 5 à 25 mW.s/cm² pour une efficacité de 2.log et 90 à 140 mW.s/cm² pour 4.log (USEPA). Son action est immédiate.

7.2 Matériels de base

Les lampes U.V. sont isolées de l'eau par des gaines de silice ou de quartz perméables aux rayonnements. La chambre d'irradiation est en acier galvanisé ou en acier inox.

Les lampes contiennent un gaz chargé de vapeurs de mercure et ont l'aspect de tubes de néon. L'installation comporte une cellule photoélectrique permettant de contrôler l'intensité du rayonnement U.V. qui doit toujours être supérieure à 25 mJ/cm².

Un système de compteur horaire de durée de vie des lampes doit obligatoirement être installé.

Chaque séquence marche/arrêt diminue d'une heure la durée de vie de la lampe.

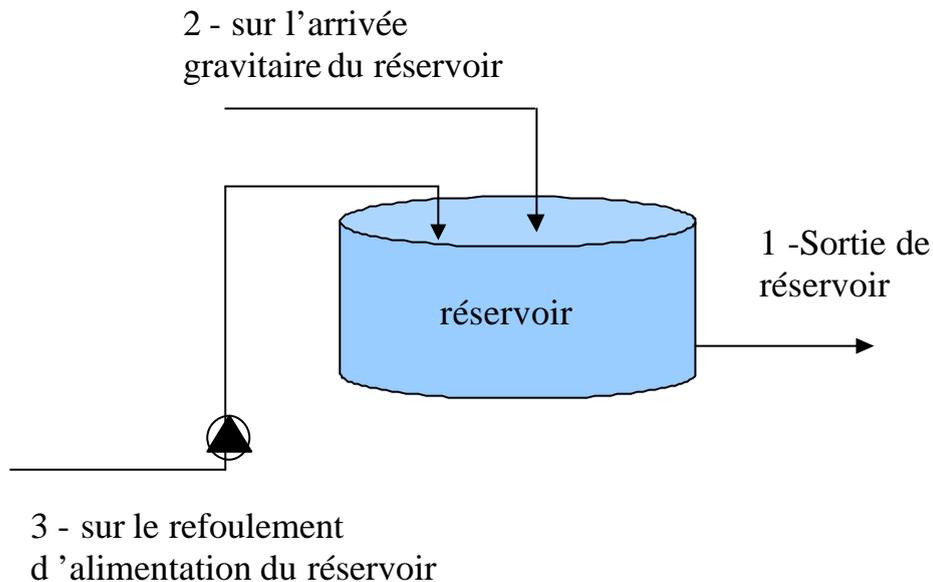
L'écoulement hydraulique doit être turbulent pour permettre une homogénéité de traitement.

7.3 Mise en oeuvre

La désinfection par U.V. pose certaines contraintes d'exploitation. Il convient de limiter l'encrassement et renouveler périodiquement les lampes, de surveiller la qualité amont de l'eau et la répartition dans le chenal.

Une vérification par l'exploitant est nécessaire une fois par semaine.

Les générateurs U.V. peuvent être positionnés en différents emplacements :



La solution n°1 présente certains inconvénients dont notamment l'obligation de dimensionner l'installation U.V. sur la base du débit de consommation de pointe. De plus le réservoir contenant de l'eau brute, il peut être sujet à des proliférations bactériennes. L'installation n°2 permet un meilleur dimensionnement de la désinfection U.V. basé sur le débit d'alimentation du réservoir, inférieur au débit de pointe et en général constant. Sur le refoulement d'alimentation du réservoir, le fonctionnement des lampes est couplé au démarrage des pompes ce qui peut entraîner un vieillissement prématuré (SAUNIER –2000) à moins de laisser les lampes fonctionner en continu. De plus, l'eau traitée stagne dans le réservoir tout comme dans la configuration n°2, ce qui peut conduire à une recontamination. Cette configuration est possible mais elle impose une surveillance du réservoir pour éviter les contaminations éventuelles. On considère que le temps de séjour de l'eau traitée dans le réservoir ne doit pas excéder 2 jours (WEDECO – communication personnelle).

Quelque soit le positionnement du traitement, la désinfection par U.V. impose la disponibilité d'une alimentation électrique.

La désinfection U.V. peut également être effectuée au plus près de la distribution dans le cas d'un réseau très long en tant que désinfection intermédiaire. Il est ainsi possible d'installer une

structure très légère type armoire, sans permis de construire à proximité d'une ligne électrique (WEDECO – communication personnelle).

7.4 Avantages et inconvénients de la désinfection par U.V.

La désinfection par ultra-violet induit l'absence de résiduel et de sous-produits indésirables par rapport à la chloration ce qui constitue un avantage mais également un inconvénient dans la mesure où il n'y a pas d'évaluation de l'efficacité en mesurant une teneur résiduelle contrairement à la chloration. De plus, il peut y avoir un risque de recontamination sur le réseau en particulier lors des casses ou de travaux.

Pour l'exploitant, cette technologie apporte une plus grande sécurité comparativement à la chloration. La maintenance en est simple et son efficacité sur les virus a été prouvée.

Cependant, la désinfection par rayonnement U.V. est très sensible aux variations de turbidité de l'eau à traiter. Les particules en suspension gênent en effet la propagation des rayonnements et diminuent l'efficacité de la désinfection. Dans le cas d'unité présentant une eau brute à forte variation de turbidité, le dimensionnement de l'installation U.V. doit impérativement prendre en compte les conditions les plus mauvaises afin d'assurer l'efficacité de la désinfection en toute circonstance y compris dans les épisodes les plus turbides. Une étape de filtration peut être recommandée en amont des lampes U.V.

D'autre part, le traitement peut être interrompu du fait d'une coupure d'électricité ou d'une défaillance des lampes (cas rare).

7.5 Coûts

Une étude menée par la DDASS du Bas-Rhin (1997) indique que le coût moyen d'installation d'un générateur U.V dans ce département est estimé à 23 – 30 K€ pour des communes de moins de 1 000 habitants ce qui équivaut au double du coût d'une installation utilisant du chlore liquide, voire davantage. Cependant les coûts d'exploitation sont moindres d'après cette même source.

Une autre étude fournit un ordre de grandeur des coûts d'investissement de 10 k€ pour un débit de 100 m³/j à 20 k€ pour 600 m³/j.

Les coûts d'exploitation sont limités. Ils sont constitués des coûts en énergie pour 150 € par an et des coûts de renouvellement des lampe pour 230 € par an par lampe.

Une étude a été menée en 2000 sur des unités de désinfection sur le territoire de l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse. 12 unités de désinfection ont ainsi été auditées.

Tableau 9: caractéristiques des 12 unités étudiées (SAUNIER – 2000)

Commune ou syndicat	Capacité en m ³ /h	Matériel	Puissance lampes	Position du générateur	Prétraitement
CHAPAREILLAN	120	WEDECO - B 160	441 W	Sortie réservoir	Non
CHORANCHE	25	KATADYN - VG 64	2 X 64 W = 128 W	Sortie réservoir	filtre à poche
LA FLACHERE	20	KATADYN - VG 2 G 250	2 X 100 W = 200 W	Sortie réservoir	Non
MALLEVAL	20	KATADYN - VG 64	2 X 64 = 128 W	Sortie réservoir	filtre à poche
TENCIN	25	KATADYN - VR 2 G 250	2 X 100 W = 200 W	Sortie réservoir	Non
CHEVALINE	15	KATADYN - VR A3	3 X 64 W = 192 W	Arrivée gravitaire entrée réservoir	Filtration sur sable + filtre à poche
Les CLEFS Les grangettes	15	KATADYN - VSA-2	2 X 64 W = 128 W	Arrivée gravitaire entrée réservoir	filtre à poche
LES CLEFS – Chalmont	10	KATADYN - VSA-2SV	2 X 64 W = 128 W	Arrivée gravitaire entrée réservoir	filtre à poche
MORZINE	200	KATADYN - G 16	16 X 32 W = 576 W	Arrivée refoulement réservoir	Non
SIE LES ROCAILLES	100	KATADYN - VRA6	6 X 64 W = 384 W	Arrivée refoulement réservoir	Non
THUSY La Léchère	10	KATADYN - TR 150/S	100 W	Départ refoulement sortie bache captage	Filtre métallique 90 µm
THUSY Sallongy	30	KATADYN - VR 2G 250/2	2 X 100 W = 200 W	Départ refoulement sortie bache captage	Filtre métallique

(source : SAUNIER – 2000)

Les coûts d'investissement de ces unités sont les suivants (en euro, valeur de l'année de construction).

Tableau 10 : Coûts d'investissement

Commune ou syndicat	Date d'installation	Capacité en m ³ /h	Coût H.T. (valeur année construction) en euro	Descriptif de l'investissement
CHAPAREILLAN	1997	120	29 041	UV + canalisations et robinetterie intérieure
CHORANCHE	1993	25	16 388	UV + canalisations et robinetterie intérieure
LA FLACHERE	1995	20	14 314	
MALLEVAL	1993	20	N.D	
TENCIN	1997	25	21 770	UV + équipement hydraulique
CHEVALINE	1995	15	43 295	UV + canalisations
Les CLEFS Les Grangettes	1992	15	22 867	UV + équipement hydraulique
LES CLEFS – Chalmont	1993	10	30 185	UV + équipement hydraulique
MORZINE	1991	200	38 112	
SIE LES ROCAILLES	1994	100	25 001	
THUSY La Léchère	1998	10	42 838	UV + filtre + robinetterie + pompes refoulement
THUSY Sallongy	1993	30	N.D.	

(source : SAUNIER – 2000)

La maintenance principale est le changement de la lampe UV une fois tous les 10 à 12 mois environ (www.ozone.ch) voire même 18 mois selon le constructeur des lampes. Les gaines contenant les lampes U.V. doivent être également régulièrement nettoyées pour maintenir une bonne perméabilité aux rayons et une bonne diffusion.

Les lampes basse pression ont une durée de vie minimum de 8 500 heures (DDASS – 1997) à 8 700 heures (SAUNIER – 2000) soit une année de fonctionnement en continu.

Les lampes haute pression, moins utilisées, ont une durée de vie moindre et sont plus coûteuses. De plus, elles nécessitent un temps de préchauffage avant utilisation ce qui limite leur utilisation couplée à des pompes de forage.

Les coûts d'exploitation sont limités.

8 – Désinfection à l’ozone

8.1 Principe

L’ozone peut être obtenu industriellement par décharge électrique dans l’air très sec ou de l’oxygène entre deux électrodes. C’est un oxydant très puissant. Il se présente comme un gaz instable, qui doit donc être produit sur place dans des ozoneurs industriels.

L’ozone a un potentiel normal d’oxydo-réduction supérieur au chlore. Il possède un spectre d’action germicide supérieur au chlore en ce qui concerne les bactéries et surtout les virus. Il est aussi très efficace contre les protozoaires (www.ozone.ch).

Des études ont montré que l’application à d’une eau potable d’une dose d’au moins 0,4 mg/l d’ozone pendant 4 minutes garantissait l’élimination des virus (Miquel et al, 2003). Dans une gamme de pH compris entre 6 et 10, à une température de 3 à 10°C, une dose de 0.3 à 2 mg/l d’ozone permet l’élimination du virus de l’hépatite A pour un temps de contact de 5 secondes. De même, les entérovirus sont éliminés par l’application d’une dose de 0.5 – 0.6 mg/l d’ozone en 5 minutes (USEPA – 1998).

L’ozonation peut entraîner la formation de sous-produits de réaction notamment en présence de bromures dans l’eau : les bromates dont la teneur dans les eaux potables est limitée selon le Décret 2001-1220 du 20 décembre 2001.

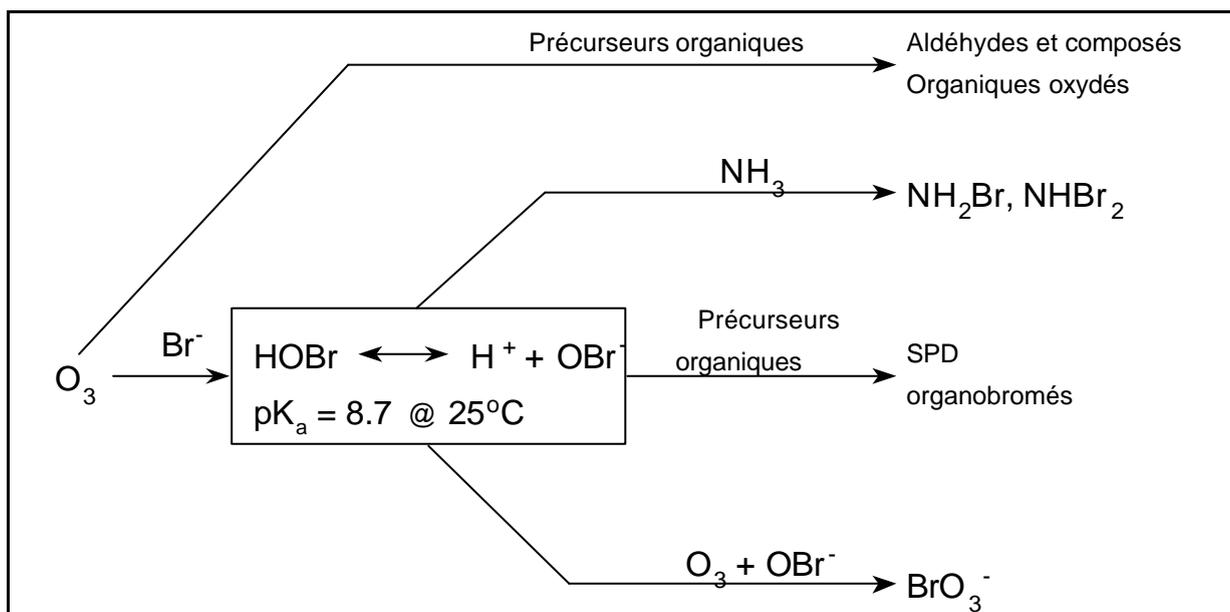


Figure 6 : principales réactions produisant des sous-produits de l’ozonation (NB : SPD signifie sous-produits de la désinfection)

L’efficacité de l’ozone décroît rapidement à des valeurs de pH et de température élevées. Ainsi, à température constante, après 15 minutes de contact eau-ozone, il reste 80% de résiduel à pH = 7.6 mais seulement 8% à pH = 9.2.

L’utilisation de l’ozone est, par contre, plus complexe et plus onéreuse que celle du chlore ou du dioxyde de chlore.

Cependant, l’ozone est instable et ne permet pas de conserver un pouvoir rémanent de désinfectant pour garantir la non reviviscence bactérienne en réseau.

8.2 Matériels de base

Les caractéristiques des ozoneurs varient d'un constructeur à l'autre.

Les valeurs moyennes sont généralement de :

Tension entre les électrodes	15 000 à 20 000 V
Fréquence du courant	50 à 60 Hz
Débit d'air	1 000 NI/h par tube maxi
Concentration du gaz obtenu	15 à 25 g O ₃ /Nm ³
Production spécifique	15 à 20 g O ₃ /h par tube
Consommation d'énergie	14 à 18 Wh/g O ₃ (hors prétraitement de l'air)
Puissance appliquée	25 W par l/minute d'air sec
Pression de fonctionnement	0.5 à 0.6 bar (1 bar maxi)

(source : Fondation de l'eau – 1988)

Les ozoneurs industriels sont constitués d'un assemblage de générateurs élémentaires : de 3 tubes pour une production de 45 g O₃/h à 1 000 tubes pour 20 Kg O₃/h.

Le rendement des ozoneurs industriels est faible : de 0.5 à 2% si on utilise de l'air et de 1 à 4% avec de l'oxygène.

8.3 Mise en oeuvre

Une installation d'ozonation comprend 4 parties:

- le traitement de l'air utilisé pour la production d'oxygène,
- le générateur électrique d'ozone appelé ozoneur,
- le transfert de l'ozone dans l'eau par turbinage, hydro-injection ou diffusion dans des cuves en béton armé,
- le système de récupération et traitement des événements ozonés.

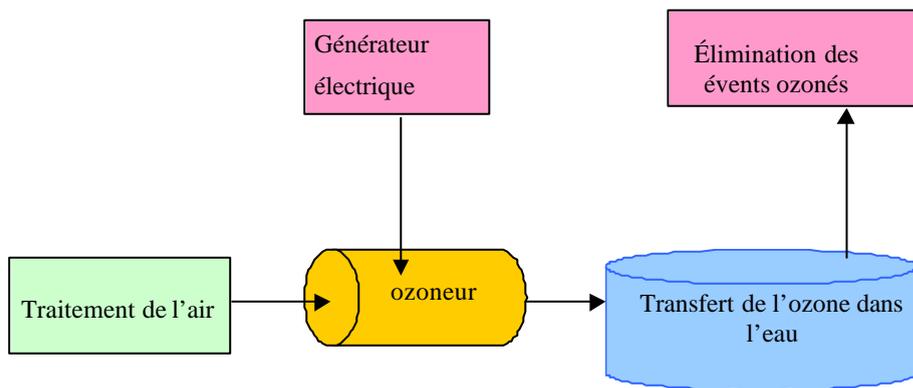


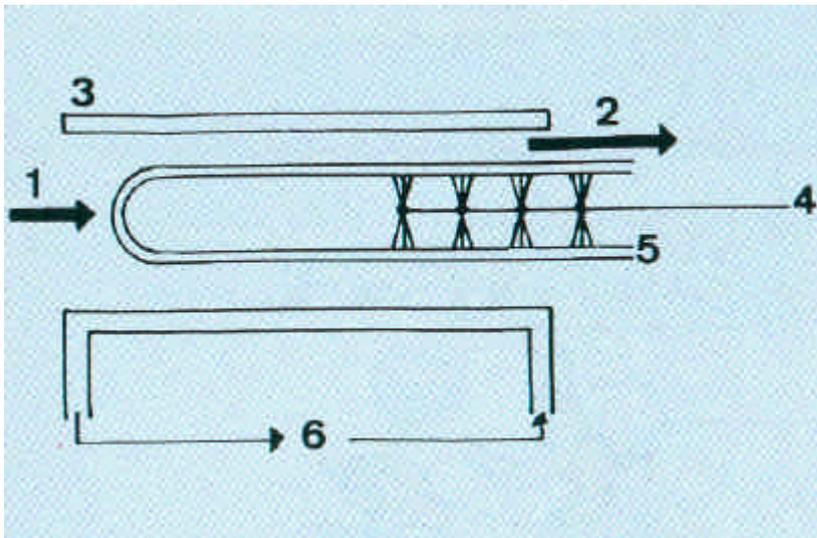
Figure 7 : Schéma de principe d'une ozonation

L'air utilisé pour la production d'ozone doit être sec et propre d'où son traitement préalable. Ce traitement est constitué d'une première étape de condensation de l'air ambiant après filtration,

généralement par surpression pour les petites installations (6 à 7 bars), suivie d'une dessiccation sur un adsorbant.

L'ozone est produit en soumettant cet l'air sec à une décharge électrique ou à une irradiation U.V. Par ce dernier procédé, l'ozone est produit en concentration plus faible (inférieur à 0.1% en poids) que par décharge électrique (1 à 4.5 % en poids). Lorsque le gaz de départ est de l'oxygène, cette concentration peut atteindre 14 à 18% en poids (GDT – 1999).

Une haute tension est appliquée entre deux électrodes disposées concentriquement. Les électrodes sont séparées l'une de l'autre par un diélectrique et par deux chambres de décharge traversées par le gaz. Certaines des molécules d'oxygène présentes dans le gaz injecté se fractionnent dans le champ électrique et se combinent immédiatement aux molécules d'oxygène libre, formant ainsi de l'ozone.



- 1 - air sec
- 2 - air ozoné
- 3 - électrode en acier inoxydable
- 4 - électrode haute tension
- 5 - tube en verre diélectrique revêtu intérieurement d'une couche métallique (électrode)
- 6 - eau de refroidissement

Figure 8 : Principe d'un générateur élémentaire (sources : fondation de l'eau – 1988 et Agence de l'eau Loire Bretagne - 1993)

L'ozone peut être généré dans des concentrations comprises entre 20 et 60 g/m³ sous utilisation d'air sec (point de rosée < -60 °C), la consommation d'énergie étant généralement située entre 12 et 18 W/g d'ozone, en fonction de la concentration et de la température de l'eau de refroidissement. Afin de générer des volumes de production plus importants (> 1kg/h), l'on utilise de plus en plus de l'oxygène technique ou de l'air enrichi d'oxygène (source : WEDECO).

L'air enrichi en ozone ainsi produit est alors ajouté à l'eau à traiter dans des tours de contact par le biais d'une diffusion d'air ozoné à travers des poreux ou à l'aide d'hydroéjecteurs ou de turbines.

Les événements chargés en ozone sont récupérés, éventuellement réutilisés pour une étape de préozonation de l'eau en tête de traitement, et l'excès d'ozone est éliminé par destruction thermique ou catalytique.

8.4 Avantages et inconvénients de la désinfection à l'ozone

L'ozone possède un pouvoir désinfectant supérieur au chlore. Son spectre d'action est le plus large. Il est très efficace contre les virus à la différence du chlore. Il réagit également en oxydant le fer et le manganèse qui sous leur forme oxydes insolubles sont éliminés par décantation et/ou filtration. Il est également efficace pour éliminer la coloration d'une eau souterraine. Son efficacité est indépendante du pH (exception faite de sa solubilité).

L'ozone est un réactif de choix pour les composés aromatiques sur lesquels il procède par hydroxylation puis ouverture du cycle aromatique conduisant à la formation notamment d'aldéhydes. Il en résulte généralement une diminution du potentiel de formation des THM.

Ainsi les CT avancés pour l'inactivation de 99.9% des kystes de Giardia Lamblia sont, pour différents désinfectants, les suivants :

Tableau 11 : efficacité des désinfectants – valeur des CT (en mg/l/min) pour l'inactivation de 99.9% des kystes de Giardia Lamblia

Désinfectant	pH	5°C	10°C	20°C	25°C
Chlore libre à 2 mg/l	6	116	87	44	29
	7	165	124	62	41
	9	353	265	132	88
Ozone	6-9	1.9	1.43	0.72	0.48
Dioxyde de chlore	6-9	26	23	15	11
Chloramine (préformée)	6-9	2200	1850	1100	750

(source : GDT corporation – 1998)

Les valeurs obtenues pour l'ozone sont très inférieures à celles des autres désinfectants ce qui démontre son efficacité.

C'est un composé instable : sa stabilité dans l'eau est de l'ordre de 10 à 20 minutes avant de se décomposer en oxygène sans laisser de produits dérivés dans l'eau. Aucun résiduel n'aura d'action rémanente. C'est pourquoi la désinfection à l'ozone est souvent associée à une post-chloration pour assurer un résiduel désinfectant pour la distribution.

Produit sur place, il ne pose aucun problème de transport de matière dangereuse ou de stockage de produit toxique et ne fait appel à aucun consommable. Cependant sa production est grande consommatrice d'énergie et les coûts d'investissement sont importants.

8.5 Coûts

Les coûts d'investissement sont plus élevés que pour les autres procédés (cf. paragraphe 6.4 ci-dessus).

Les opérations de maintenance doivent être effectuées par des techniciens qualifiés.

Ainsi les filtres et le dessicateur dans les systèmes de préparation de l'air doivent être changés régulièrement en fonction de la qualité de l'air utilisé et du nombre d'heures de fonctionnement.

Les compresseurs nécessitent également un examen périodique. Les canalisations et chambre de contact doivent être inspectées à échéance régulière pour pallier à toute corrosion et fuite (source : document technique EPA 815-R-99-014, Avril 1999)

9 – Choix d'un système de désinfection

Le chlore est un désinfectant puissant simple à utiliser : sur un forage de faible débit en zone rurale, une bouteille de chlore gazeux et un organe de dosage peu sophistiqué suffisent (Miquel et al, rapport au Sénat - 2003).

Le dioxyde de chlore (ClO_2) est un composé instable qui doit être produit sur place. Au contraire du chlore, il ne réagit pas avec la matière organique ni l'ammoniaque et ne donne lieu à aucun sous-produit de désinfection comparé au chlore.

L'ozone possède un pouvoir désinfectant supérieur à celui du chlore : son action désinfectante couvre également les virus. Ainsi, on considère qu'une dose de 0,4 mg/l d'ozone appliquée sur une eau pendant 4 minutes assure l'élimination des virus (ouvrage collectif, éditions le Moniteur, 1991).

Il convient de noter cependant que l'ozonation peut entraîner la formation de sous-produits de réaction, les bromates. Son utilisation est, d'autre part, plus complexe et plus onéreuse que celle du chlore ou du dioxyde de chlore.

L'ozone est produit sur place et ne pose aucun problème de transport et de stockage de matière dangereuse. Il se décompose en oxygène dans le milieu et ne laisse aucun résidu de traitement. Cependant l'investissement et les coûts d'exploitation notamment en énergie sont lourds.

L'utilisation de chlore gazeux ou d'ozone demande une certaine technicité et présente un danger à ne pas négliger ; C'est pourquoi, sur de petites unités, ces deux procédés ne sont pas conseillés.

Le traitement aux UV est sans risque de génération de sous-produits de désinfection puisqu'il n'y a aucun ajout de produit chimique, son efficacité est sensible à la présence de matières en suspension qui gênent sa diffusion et donc son efficacité au sein du milieu à traiter, il ne laisse aucun résiduel de désinfection après action au sein de la chambre d'exposition.

La microfiltration fait appel à des pores de taille inférieure à 0.2 μm pour former une barrière physique aux bactéries mais non aux virus qui sont plus petits, l'investissement est faible mais l'exploitation demande un remplacement régulier des filtres et une vérification de leur intégrité.

Le tableau ci-dessous résume les avantages et inconvénients des différents procédés de désinfection :

Tableau 12 : les procédés de désinfection

	Chlore gazeux	Eau de Javel (hypochlorite de sodium) ou hypochlorite de calcium (« chlore solide »)	Dioxyde de chlore	Ozone	Ultra violets
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Facilement disponible - Peu coûteux - Mesures de contrôle aisées - Longue expérience dans leur pratique 	<ul style="list-style-type: none"> - Facile d'utilisation et de manipulation - Peu coûteux - Mesures de contrôle aisées - Longue expérience dans leur pratique 	<ul style="list-style-type: none"> - large plage d'utilisation de pH : de 6 à 10 - ne donne pas de composés sapides avec les phénols - permet d'oxyder fer et manganèse - ne donne pas de composés halogénés - action intéressante vis à vis des algues 	<ul style="list-style-type: none"> - bon désinfectant - permet d'oxyder fer et manganèse - agit également sur les algues - facilite l'élimination des matières organiques en combinaison avec un filtre à charbon actif en grains 	<ul style="list-style-type: none"> - bon bactéricide - aucun produit ajouté
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - La manipulation des bouteilles et containers nécessite des règles strictes de sécurité - le chlore présente un risque de formation de sous-produits nocifs, notamment les trihalométhanes par réaction avec la matière organique présente dans l'eau ou les chlorophénols en présence de phénols. Ceci donne un goût à l'eau traitée - son efficacité dépend du pH (efficacité optimale si pH <7.5) et de la température de l'eau - peu efficace contre les virus 	<ul style="list-style-type: none"> - le chlore présente un risque de formation de sous-produits de la chloration, notamment les trihalométhanes par réaction avec la matière organique présente dans l'eau - son efficacité dépend du pH (efficacité optimale si pH <7.5) et de la température de l'eau - inefficace contre les virus - durée limitée d'utilisation de la solution commerciale (2 mois maximum) 	<ul style="list-style-type: none"> - composé instable à produire sur place (installation d'un générateur) : mesures de sécurité adaptées - formation de sous produits (chlorates et chlorites) - n'élimine pas l'ammoniaque 	<ul style="list-style-type: none"> - coûteux à l'investissement et à l'exploitation car nécessite un générateur spécifique - pas d'effet rémanent - ne réagit pas avec l'ammoniaque - risque de formation de bromate 	<ul style="list-style-type: none"> - pas d'effet rémanent - effet réduit si l'eau change brutalement de qualité (augmentation de la turbidité, présence d'éléments dissous absorbant le rayonnement) - pas de réaction avec l'ammoniaque

Voici un ordre de grandeur des caractéristiques de mises en oeuvre des différents désinfectants dans des conditions normales de pH, de température et de turbidité (< 1JTU) :

Tableau 13 : grandeurs caractéristiques de mise en oeuvre des désinfectants

	Chlore	Dioxyde de chlore	Ozone
Conditions bactéricides	0.1 à 0.2 mg/l pendant 10 à 15 minutes	0.1 à 0.2 mg/l pendant 5 à 10 minutes	0.1 à 0.2 mg/l pendant 1 à 2 minutes
Conditions virulicides	0.3 à 0.5 mg/l pendant 30 à 45 minutes	0.3 à 0.5 mg/l pendant 30 minutes	0.3 à 0.5 mg/l pendant 4 minutes

(Source : Senet – 2003)

Tableau 14 : Quelques critères de choix entre les filières

Critères	Eau de Javel	Ozone	Chlore gazeux	Dioxyde de chlore	U.V.	Microfiltration
Désinfectant actif	HClO	O ₃	HClO	ClO ₂	λ = 254 nm	Filtration physique
Grandeur de l'installation	Petite	Grande	Grande	Moyenne/grande	Petite/moyenne	Très petite
Adaptation aux faibles débits	Bonne	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Bonne	Bonne
Investissement	Faible	Important	Important	Moyen	Moyen	Faible
Nécessité d'un génie civil dédié	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Oui
Entretien	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyen	Important
technicité	Simple	Complexe	Complexe	Moyenne	Simple	Complexe
Autonomie en absence d'exploitation	Faible	Bonne	Bonne	Faible	Très bonne	Bonne
Rémanence	Bonne	Quasi-nulle	Bonne	Très bonne	Nulle	Nulle
Goût / odeur	Caractéristique	Nul	Caractéristique	Nul	Nul	Nul
Efficacité sur Fer / manganèse	Faible	Forte	Faible	Moyenne	Faible	Nulle
Efficacité sur l'ammoniaque	Forte	Nulle	Forte	Nulle	Nulle	Nulle
Efficacité germicide	Bonne	Excellente	Bonne *	Très bonne	Très bonne mais attention aux MES***	Bonne
Inefficace contre			Virus * protozoaires		Algues, moisissures**	Virus
pH optimal	5 < pH < 7.5	6 < pH < 10	5 < pH < 7.5	6 < pH < 10		
Formation de sous produits	THM	Aldéhydes	THM	Chlorites et chlorates	?	Aucun
Influence des très basses températures	Importante	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle

* dépend du pH de l'eau

** : nécessite des doses d'exposition très élevées

*** : matières en suspension

(sources : <http://www.ozone.ch/librairie/gasandwater/applications/desinf.pdf> consulté le 18/07/2003 / Besq et Le Galliot – 1991 / Senet - 2003)

Tableau 15 : Prix indicatifs de traitement de désinfection selon le procédé mis en oeuvre

procédé	Coûts d'investissement	Coûts en réactif	Coûts en énergie	Coûts du renouvellement
Eau de javel	2 à 4 k€ indépendant du débit	150 €/an pour 100 m ³ /j	Négligeable	300 €/an
Chlore gazeux	10 à 20 k€ indépendant du débit	122 €/ an pour 100 m ³ /j	Négligeable	300 à 760 €/ an
Dioxyde de chlore	45 à 60 k€ indépendant du débit	230 €/ an pour 100 m ³ /j	Négligeable	1.5 k€/ an
Ozone	Proportionnel au débit	Négligeable	Elevé	-
Ultraviolets	9 à 18 k€ pour 100 m ³ /j à 600 m ³ /j	Négligeable	150 €/an pour 100 m ³ /j	228 €/ an / lampe

(Source : Senet – 2003)

Nous vous proposons ci-dessous un arbre de choix du traitement de désinfection en fonction de la qualité de l'eau brute ainsi que des contraintes du réseau de distribution (d'après SAUNIER – 2000)

10 – Etudes de cas

Nous proposons ci-dessous quelques études de cas permettant un éclairage concret des dispositifs décrits précédemment.

10.1 Commune de Nothalten – Désinfection U.V.

La commune de Nothalten, située dans le Bas-Rhin, compte 449 habitants.

Le générateur U.V a été installé en 1995. Il s'agit d'un TR 150 dont les caractéristiques sont les suivantes :

Type d'application	Traitement bactériologique d'eau de source
Matériel	TR 150 (Katadyn)
Débit d'eau à traiter	8 m ³ /h
Puissance germicide totale installée	27 Watts UV-C
Volume d'eau de la chambre	19.5 litres
Temps de contact	8.78 secondes
Perte de charge maximale	0.0049 bar
Dose UV-C à 8700 heures fin de vie au débit annoncé	50.93 mJ/ cm ²
Débit maxi à 25mJ/cm ² à la transmission mesurée	16.3 m ³ /h
Seuil mini de transmission à 25 mJ/cm ² pour le débit annoncé	25% sur 50 mm

La chambre de traitement est constituée d'une gaine de quartz type fermé, d'un générateur UV 64 W – 8700 heures de fonctionnement effectif, de 2 robinets pour le contrôle bactériologique et d'une armoire électrique.

Le schéma de l'adduction en eau destinée à la consommation de Nothalten est représenté dans le diagramme ci-dessous (d'après D.D.A.S.S. du Bas-Rhin, 1997).

Le générateur UV est installé en aval d'une bêche de reprise de 41 m³ alimentée par 3 sources.

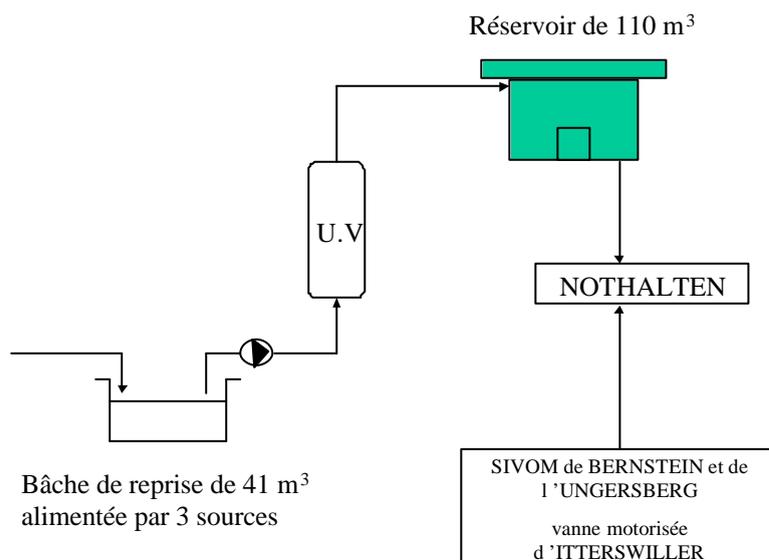


Figure 9 : schéma d'adduction d'eau de la commune de Nothalten

10.2 Commune de Chapareillan – Désinfection ultra-violet

Le site de Villard (Isère) alimente en eau potable à partir de la nappe du Granier la commune de Chapareillan desservant 1 540 habitants. La moyenne journalière d'eau traitée est de 860 m³ (moyenne sur les années 1994 à 1998).

L'eau brute présente des variations saisonnières en turbidité lors d'épisodes pluvieux et en qualité bactériologique, notamment de mars à octobre.

L'eau brute est amenée gravitairement jusqu'à deux réservoirs d'une capacité de 200 m³ chacun.

Le générateur U.V. a été installé en 1997 sur la distribution en sortie de réservoir. Il s'agit d'un matériel WEDECO modèle B160 dont les caractéristiques sont les suivantes :

Type d'application	Traitement bactériologique d'eau de source
Matériel	B 160 (WEDECO)
Débit d'eau à traiter	120 m ³ /h
Puissance germicide totale installée	441 Watts UV-C

(source : Saunier – 2000)

Les coûts d'investissement se sont élevés à 29 040 euros H.T. (année 1997) comportant l'installation U.V. et les canalisations et robinetteries intérieures.

Les coûts d'exploitation sont essentiellement dus à la consommation d'électricité : 1 318 euros T.T.C. pour un an de facture électricité auxquels il convient d'ajouter le coût de remplacement des lampes une fois par an soit 305 euros H.T. environ par lampe (au nombre de 7). La main d'oeuvre représente une visite hebdomadaire d'un fontainier d'une durée de 15 minutes. Les coûts d'exploitation représentent donc un budget inférieur à 4 000 euros T.T.C.

Un contrat de maintenance a été signé avec le constructeur de l'installation couvrant les prestations suivantes : 2 visites par an et une visite par an avec changement des lampes.

La qualité de l'eau traitée est tout à fait satisfaisante.

10-3 Etude de cas chlore

La régie communautaire de La Couronne exploitée par la ComAGA, de la Communauté d'agglomération du Grand Angoulême, fait appel à trois sources d'alimentation en eau potable pour desservir les 7 500 habitants :

- les sources de la Touvre
- le captage dans la résurgence de Forge
- la source du Ponty

Ces trois sources sont de qualités et de débits différents. La filière de traitement est constituée dans tous les cas d'une seule chloration au chlore gazeux.

➤ Sources de la Touvre : 160 m³/h d'eau traitée

La désinfection est effectuée par le biais de deux bouteilles de chlore avec inverseur automatique et chloromètre CIFEC.

Les coûts d'investissement de cette chloration se sont élevés à 7 063,26 € H.T en 1999.

➤ Captage dans la résurgence de Forge : 125 m³/h d'eau traitée

Le matériel d'origine, en 1975, était composé d'un chloromètre et d'une bouteille de chlore.

En 1993, un inverseur automatique a été installé permettant de passer d'une bouteille de chlore à l'autre lorsque la première est vide et le chloromètre a été remplacé pour un coût d'investissement total de 4 039,90 € H.T.

➤ Source du Ponty : 60 m³/h d'eau traitée

La désinfection est là aussi effectuée par l'intermédiaire de deux bouteilles de chlore gazeux, d'un inverseur automatique et d'un chloromètre.

Le coût de remplacement de ce chloromètre représente 1855,91 € H.T. (renouvellement d'un chloromètre en 1997 et en 1999).

En ce qui concerne les coûts d'exploitation, ils se décomposent comme présenté dans le tableau ci-dessous sur la base de 6 chloromètres à entretenir et de trois sites de 2 bouteilles de chlore gazeux de 49 Kg.

Tableau 16 : exploitation de la régie communautaire de La Couronne – matériel de désinfection de l'eau potable - exploitation

DESCRIPTIF DE MAINTENANCE	FREQUENCE	TEMPS	COÛT HT Euros
<i>Démontage du chloromètre pour nettoyage et remplacement des pièces</i>			
Vérification de l'ensemble des appareillages chlore	1 fois/semaine	2 h	50,00
Nettoyage des tubes et billes Remplacement des joints des tubes	1 fois/an	1 jour	550,00
Nettoyage des bilames	1fois/an	1/2 jour	200,00
Remplacement du joint et corps de l'électrovanne (dès constatation d'un signe de faiblesse)	1 fois/an	2 h	350,00
Remplacement du joint de l'hydro-injecteur (dès constatation d'un signe de faiblesse)	1 fois/2 ans	2 h	750,00 (2 ans)
Remplacement des joints de l'inverseur automatique (dès constatation d'un signe de faiblesse)	1 fois/4 ans	1/2 jour	300,00 (4 ans)
	Coût d'exploitation par An	HT Euros	1550,00
<i>Remplacement des bouteilles de chlore (en fonction des besoins et de la consommation)</i>			
le remplacement s'effectue en fonction des besoins, la fréquence est approximative	2 fois/an	2 h	1200,00
Remplissage d'une bouteille de chlore	10 unités	250,00	2500,00
	Coût d'exploitation par An	HT Euros	3700,00

(source : ComAGA – communication personnelle– 2004)

Les coûts d'exploitation des 3 sites de chloration pour cette régie communautaire s'élève donc à 5 250 €H.T. par an.

Dans ces trois cas, l'exploitant se déclare satisfait de ces postes de désinfection compte tenu de sa fiabilité, sa pérennité et de son efficacité. De plus, l'autonomie de la bouteille de chlore est grande mais nécessite l'intervention de personnel « habilité » et sensibilisé au danger du chlore.

10-4 Etude de cas dioxyde de chlore

Les communes de Beauzac et de Bas-en-Basset sont alimentées en eau potable à partir de 4 puits creusés dans la nappe alluviale d'Ancette.

Le volume total produit est de 160 m³/heure.

Cette eau souterraine est traitée depuis 1992 par du dioxyde de chlore. L'installation est entièrement automatisée, pilotée par un analyseur sur l'eau traitée ; elle est surveillée par un transmetteur d'alarme et de données sur minitel.

Le coût total de chaque dispositif est de 400 000 F.H.T. soit environ 61 000 Euro H.T.

ANNEXE 1 : les principaux fabricants de matériels de désinfection en France

Nom	site Web	Chlore	dioxyde de chlore	Ozone	lampes UV
Abiotec	www.abiotec.fr				D
Agrochem	www.agrochem.fr			D	D
Alldos	www.alldos.com	D	D		
Alsadif	perso.wanadoo.fr/alsadif			P	P
Berson France	www.bersonuv.com				D
Bordas UV Germi	www.bordas.fr				D
Cifec SA	www.cifec.fr	D	D		P
Cir SA	www.cirfrance.com	D	D		
Ecoflux					
L'eau pure	www.eaupure.fr	D	D		D
Lenntech	www.lenntech.com		D	P	D
Permo	www.eva.fr/permo/infopermo.htm			D	D
Prominent France	www.prominent.fr		D	D	D
RER	www.uvrer.com				D
Saur	www.saur.fr www.stereau.fr	P	P	P	P
Siri SA	www.siri-spa.com	D	D		
Suez	www.ondeo-nalco.com www.lyonnaisedeseaux.fr www.ondeo-degremont.com	D	D	D	D
USF Wallace et Tiernan	www.wallace-tiernan.fr	D	D		
Vivendi	www.trailigaz.com www.otv.fr www.generaledeseaux.com	D	D	D	D
Wedeco Katadyn SA	www.wedecoag.de			D	D

D = concepteur et fabricant, P = fournisseur ou revendeur

BIBLIOGRAPHIE

AGENCE DE L'EAU ADOUR GARONNE

Eau potable – Opportunité et efficacité des rechloration sur réseaux
Décembre 2002

AGENCE DE L'EAU RHONE- MEDITERRANEE- CORSE

Etude sur les méthodes de désinfection
7 feuilles Excel, non publié, 2000

BERLAND J.M. , JUERY C.

Inventaire et scénario de renouvellement du patrimoine d'infrastructures des services publics
d'eau et d'assainissement
Rapport pour le MEDD – D4E – 2002

BIO-UV

La désinfection par les ultraviolets
Disponible sur internet : www.bio-uv.com/fr/dossier_pro_français.pdf (consulté le 11/07/2003)

BLOCK J.C.

Intérêt et limites de la chloration pour maîtriser la qualité microbiologique de l'eau distribuée
In La qualité de l'eau et de l'assainissement en France
Rapport du Sénat n°215, tome 1 et 2, 2002-2003 , Office Parlementaire d'évaluation des choix
scientifiques et technologiques

BLOCK J. C., BOIREAU A., CAVARD J., GATEL D., SERVAIS P.

The need for and use of chlorine
Water supply, 1998, n°16, 3-4

BLOCK J.C.

Ozonation de l'eau
GRUTTEE, PARIS, 1978, 10P.

BLOCK J. C., BOIS F., REASONER D. J.

Disinfection of drinking water distribution systems
in conf. "disinfection of potable water", 13-18/03/1994, Kruger national park South Africa, 1994

BOUDHAR H.

Amélioration du fonctionnement des petites unités de traitement d'eau potable en vue d'éliminer
les éléments néoformés, THM et turbidité
Office International de l'Eau, Février 1999

BOULAND S., DUGUET J.P., MONTIEL A.

Hypochlorite : apport en ions bromate
L'Eau, l'Industrie, les Nuisances, n°244, août / septembre 2001, 63-70

BRAGHETTA A. et al.

The practice of chlorination: applications, efficacy, problems and alternatives,
The blue pages, the IWSA information source on drinking water, International Water Supply
Association, , août 1997

CENTENE L.

La rechloration en réseau de distribution d'eau potable
Office International de l'Eau, décembre 2000

COCCAGNA L., CONIO O. , COLOMBINO M., CARBONE A., DELLE PIANE S., ZIGLIO G.

Les sous-produits de la désinfection du dioxyde de chlore : étude expérimentale pour optimiser ses conditions d'utilisation
Journées Information eaux – 2002

CONNELL GERALD F.,

European Water Disinfection Practices Parallel U.S. Treatment Methods, Drinking Water And Health Quarterly, août 1998,
disponible sur Internet <http://www.clo2.com/reading/waternews/european.html> (consulté le 01.12.2003)

DDASS du BAS-RHIN

Eau destinée à la consommation humaine – Fonctionnement des dispositifs de désinfection U.V. dans le Bas-Rhin
Décembre 1997

DEININGER R.A , ANCHETA A., ZIEGLER A.

Chlorine dioxide
School of Public Health, University of Michigan,
disponible sur Internet <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/caliagua/simposio/enwww/trabajos.html> (consulté le 06/07/2003)

EPA

document technique EPA 815-R-99-014, Avril 1999
Disponible sur internet : <http://www.epa.gov/safewater/mdbp/mdbptg.html> (consulté le 08/07/2003)

FNDAE

Situation de l'alimentation en eau potable et de l'assainissement des communes rurales en 2000
Synthèse nationale en 2000
INV2000
Année 2004
Document disponible sur le site du FNDAE : <http://www.eau.fndae.fr>

FNDAE

Situation de l'alimentation en eau potable et de l'assainissement des communes rurales en 1995
Synthèse nationale en 1995
INV95NA
Année 1997
Document disponible sur le site du FNDAE : <http://www.eau.fndae.fr>

FONDATION DE L'EAU

L'ozonation des eaux – Principe, exploitation et maintenance des installations
Les cahiers techniques OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU – 1988

GDT Corporation

Ozone, an effective and affordable choice for small water systems
Presented at American Water Works Association – 1999 annual conference

GDT Corporation

Ozone treatment of small water systems
International ozone association Pan American group – Vancouver – 20 Octobre 1998

JANEX M-L , PICARD N., SCHWARTZ B., DYKSEN J., LAINE J-M

Evaluation de la technologie UV pour la désinfection en eau potable
TSM n°12 – décembre 2001

KIENE L., PIRIOU P ., LEVI Y.

Limit and benefit of chlorine residuals for water quality management in drinking water distribution systems : what is the right chlorine residual ?
Proceeding conference annuelle de l'AWWA, Chicago, 20-24/06/1999

LE BESQ R., LE GALLIOT B.

La désinfection des eaux potables
Agence de l'eau Loire-Bretagne, 1991

MASSCHELEIN W.J.

Utilisation du chlore dans le traitement des eaux
Tribune de l'eau, Vol. 52 ; n°598, Mars/Avril 1999

MIGNE V.

Réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines – La chloration et ses sous-produits – étude bibliographique – Bilan sur les captages du R.E.S.
Agence de l'Eau Seine Normandie – 1999

MIQUEL G., REVOL H.

La qualité de l'eau et de l'assainissement en France
Rapport du Sénat n°215, tome 1 et 2, 2002-2003 , Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques
Disponible sur internet : <http://www.senat.fr/rap/l02-215-1/l02-215-1.html> et <http://www.senat.fr/rap/l02-215-2/l02-215-2.html> (consulté le 08/07/2003)

MINISTERE DE LA SANTE - DGS

Circulaire DGS/VS4 n° 2000-74 du 8 février 2000 relative à la microbiologie des eaux destinées à la consommation humaine
Disponible sur internet : <http://www.sante.gouv.fr/adm/dagpb/bo/2000/00-09/a0090671.htm> (consulté le 8/07/2003)

NADEAU I.

La mise aux normes des petites unités d'eau potable
Environnement magazine, Novembre 1998

OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU

Le dioxyde de chlore – Production – Utilisation – Contrôle
Les cahiers techniques OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU – 1993

OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU – SNIDE

La rechloration en réseau de distribution d'eau potable
Décembre 2000

OFFICE OF WATER,

Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual, United States Environmental Protection Agency, avril 1999,
disponible sur Internet :
http://www.epa.gov/safewater/mdbp/alternative_disinfectants_guidance.pdf (consulté le 01/07/2003)

ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTE

Disinfectants and disinfection by-products
disponible sur Internet http://www.who.int/pcs/ehc/summaries/ehc_216.html (consulté le 06/07/2003)

PAILLARD H., SIBONY J.

Comparaison technico-économique des techniques de désinfection
Agence de l'eau Artois-Picardie – 1988

RESEAU DE BASSIN RHONE MEDITERRANEE CORSE

Glossaire
Disponible en ligne http://www.environnement.gouv.fr/rhone-alpes/bassin_rmc/rdbrmc/glossaire.html (consulté le 05/02/2004)

SANTE CANADA

Etude d'un an sur les sous-produits de désinfection halogénés dans le réseau de distribution d'usines de traitement utilisant trois différents procédés de désinfection
Direction de l'hygiène du milieu – DG de la protection de la santé - 1996
Disponible en ligne : <http://dsp-psd.communication.gc.ca/Collection/H46-2-96-206F.pdf> (consulté le 06/07/2003)

SAUNIER ENVIRONNEMENT / AGENCE DE L'EAU RHONE-MEDITERRANEE-CORSE

Etude relative au constat d'efficacité des appareils de désinfection de l'eau distribuée – cas particulier des U.V. et des membranes
Janvier 2000

SENET D.

Les désinfectants existants pour le traitement de l'eau et la désinfection des installations
Office International de l'Eau, Février 2003

SISE-EAUX

Base de données nationale du Ministère de la Santé
Communication personnelle

USEPA

Small system compliance technology, list for the surface water treatment rule and total coliform rule
EPA-815-R-98-001
September 1998

VENTRESQUE C., BABLON G., LEGUBE B., JADAS-HECART A., DORE M.

Development of chlorine demand kinetics in a drinking water treatment plant
Water chlorination : Chemistry, Environ. Impact and Health effects
Edited by Jolley R.L. et al – Lewis Publishers - 1990

WEDECO

La technologie à l'ozone

Disponible sur internet : http://www.wedecouv.de/fr/produkte/technologie_ozon.html (consulté le 19/09/2003)

ZYDOWICZ P., JACQUEMET V., MIVELAZ P., DE-ROUBIN M.-R

Le dioxyde de chlore dans le traitement de l'eau potable : point sur les propriétés biocides pour la maîtrise des risques sanitaires et méthode de dosage sur site de l'ion chlorite
15^{ème} Journées Information Eaux JIE 2002

GLOSSAIRE

Biocides

Produits, tels que fongicides et insecticides, destinés à rendre des organismes vivants inoffensifs.

Chlore

Atome Cl

CT :

exprimé en mg.min/l est défini comme le produit mathématique de la concentration résiduelle C du désinfectant et le temps de contact T avec ce désinfectant nécessaire pour atteindre le niveau désiré d'inactivation des micro-organismes (généralement 99%)

Mesure de l'efficacité de la désinfection

Désinfection

Procédé de traitement de l'eau destiné à éliminer ou à inactiver des micro-organismes pathogènes

Dioxyde de chlore

Formule chimique : ClO₂

Eau destinée à la consommation humaine

Par référence à la directive 98/83/CE du 3 novembre 1998, on entend par "eaux destinées à la consommation humaine"

1°) toutes les eaux qui, soit en l'état, soit après traitement, sont destinées à la boisson, à la cuisson, à la préparation d'aliments, ou à d'autres usages domestiques, quelle que soit leur origine et qu'elles soient fournies par un réseau de distribution, à partir d'un camion-citerne ou d'un bateau-citerne, en bouteille ou en conteneurs ;

2°) toutes les eaux utilisées dans les entreprises alimentaires pour la fabrication, la transformation, la conservation ou la commercialisation de produits ou de substances destinées à la consommation humaine, à moins que les autorités nationales compétentes n'aient établi que la qualité des eaux ne peut affecter la salubrité de la denrée alimentaire finale.

Hypochlorite

Formule chimique: NaOCl

Javel (eau de)

Mélange en solution aqueuse d'hypochlorite et de sel (chlorure de sodium)

Micropolluant

Produit actif minéral ou organique susceptible d'avoir une action toxique à des concentrations infimes (de l'ordre du µg/l ou moins)

Ozone

Formule chimique : O₃

Paramètre

Grandeur mesurable permettant de présenter de façon plus simple et plus abrégée les caractéristiques principales d'un ensemble statistique

Poste de chloration

Endroit sur le réseau ou en usine où du chlore est ajouté à l'eau

SPD

Sous-produits de la désinfection de la matière organique présente dans l'eau dont les plus connus sont les THM et les acides haloacétiques (AHA)

Turbidité

Réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de particules en suspension

THM : Trihalométhane

Composés organohalogénés résultant de la réaction de composés halogénés avec une matière organique dans l'environnement (que cette réaction soit le résultat d'un processus naturel ou qu'elle résulte de l'activité industrielle) : chloroforme (CHCl_3), le bromodichlorométhane (CHBrCl_2), le dibromochlorométhane (CHBr_2Cl) et le bromoforme (CHBr_3)

Unité de production d'eau potable

Ouvrage comportant une prise d'eau, une chaîne de traitement et un système de pompage de distribution en vue de produire une eau de qualité acceptable à la consommation humaine