

## I.1. Introduction

Les normes vis-à-vis de la qualité de l'eau potable, devenant de plus en plus contraignantes, conduisent les traiteurs d'eau à optimiser non seulement l'étape de clarification mais aussi les traitements d'affinage de l'eau. Quant aux étapes d'oxydation, les oxydants chimiques tels que Cl<sub>2</sub>, ClO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> ont une place privilégiée (Lefebvre, 1995).

En effet, il est bien connu aujourd'hui, que le chlore est l'oxydant et /ou le désinfectant le plus utilisé dans le domaine du traitement des eaux potables. Son pouvoir oxydant / désinfectant est excellent, mais malheureusement il entraîne la formation de sous produits toxiques en présence de la matière organique (Doré 1989).

Les sous produits de la chloration les plus connus sont les trihalométhanes (THM), ils constituent également un critère de choix important pour l'oxydant chlore.

Après quelques rappels sur les caractéristiques physico-chimiques du chlore, le présent chapitre a pour but de présenter succinctement quelques travaux de certains chercheurs sur la réactivité du chlore vis-à-vis de la matière organique et l'incidence de la composante minérale des eaux de surface à potabiliser ainsi que les effets toxiques du chlore sur la santé humaine.

## I.2. Propriétés physico-chimiques du chlore

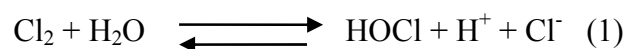
Le chlore est un produit corrosif et dangereux en raison des quantités à mettre en œuvre, à manipuler et à stocker lors du traitement des eaux. Son utilisation impose l'observation de règles de sécurité assez strictes.

### I.2.1. Chimie du chlore

Le chlore destiné à la désinfection se retrouve normalement sous l'une des trois formes suivantes : Chlore gazeux, hypochlorite de sodium ou hypochlorite de calcium. Les réactions chimiques induites par le chlore gazeux, l'hypochlorite de sodium et l'hypochlorite de calcium sont les suivantes :

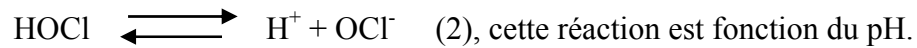
#### a) *chlore gazeux*

Le chlore gazeux est rapidement hydrolysé dans l'eau pour donner de l'acide hypochloreux (HOCl) selon la réaction suivante (Gonzalez et al, 1996) :



Il est à noter que l'addition du chlore gazeux dans l'eau diminue le pH, car cela entraîne la formation d'un ion hydrogène (Doré 1989 ; Gonzalez et al, 1996).

L'acide hypochloreux est un acide faible (un  $pK_a$  environ de 7.50), ce qui signifie qu'il se dissocie légèrement en ion hydrogène et hypochlorite, tel que le montre l'équation 2.



Quand le pH se situe entre 6.50 et 8.50 la dissociation demeure incomplète et les deux espèces (HOCl et  $\text{OCl}^-$ ) sont présentes jusqu'à un certain point (White, 1992).

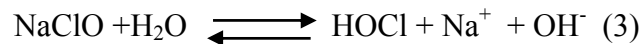
Ainsi un pH élevé favorise la libération d'ions hypochlorites,  $\text{OCl}^-$ . Lorsque la concentration de chlore libre est de quelques (mg/l), comme c'est le cas dans le traitement des eaux à potabiliser et que le pH est situé entre 6 et 10, la réaction (2) est incomplète dans ces conditions, il y'a coexistence de HOCl et de  $\text{OCl}^-$ .

Notons que, plus l'eau est alcalinisée et plus l'équilibre se déplace dans le sens d'apparitions des ions  $\text{ClO}^-$ .

#### ***b) Hypochlorite de sodium***

De manière générale, l'hypochlorite de sodium est une autre forme de chlore dont l'utilisation présente moins de dangers que le chlore gazeux. Il se présente habituellement sous forme d'une solution aqueuse dont la teneur en chlore est de 5 à 15% (White, 1992).

En solution dans l'eau, l'hypochlorite de sodium (eau de javel) produit la réaction suivante :



Cette équation montre que l'ajout d'hypochlorite de sodium dans l'eau entraîne la formation de l'acide hypochloreux comme dans le cas de l'hydrolyse du chlore gazeux (équation 1) mais provoque une légère remontée du pH.

Contrairement à l'hydrolyse du chlore gazeux l'ajout de l'hypochlorite de sodium dans l'eau produit un ion hydroxyle qui fait augmenter le pH (Doré, 1989 ; Gillis, 2001).

Le chlore libre est dit actif sous la forme HOCl,  $\text{ClO}^-$ ,  $\text{Cl}_2$  et c'est surtout sous cette forme qu'il sera consommé par les composés réducteurs de l'eau.

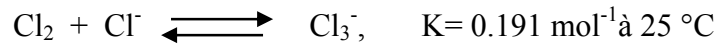
L'acide hypochloreux a une action désinfectante environ 100 fois plus forte que les ions hypochlorites, son efficacité sera d'autant plus élevée que le pH sera bas (Ellis, 1991). En pratique, il est souhaitable que celui-ci soit compris entre 6.50 et 8.0.

En réalité, en dehors des espèces très largement majoritaires que nous venons de voir (HOCl et  $\text{ClO}^-$ ), d'autres espèces intermédiaires seraient susceptibles de se former dans

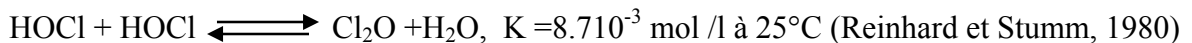
certaines conditions dans les solutions aqueuses de chlore (Morris et al, 1992 ; Reinhard et Stumm, 1980), ce sont :



La formation de l'ion trichlorure est thermodynamiquement possible selon Zimmermann cité par Merlet (1986).



L'intervention de  $\text{Cl}_2\text{O}$ , fréquemment cité, est également possible suivant :

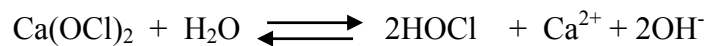


### c) *Hypochlorite de calcium*

On fabrique l'hypochlorite de calcium à partir du précipité issu de la dissolution de chlore gazeux dans une solution d'oxyde de calcium (chaux vive) et d'hypochlorite de sodium.

L'hypochlorite de calcium granulaire du commerce contient habituellement 65% de chlore disponible. Cela signifie que 1,50 g de ce produit renferme l'équivalent d'un gramme de chlore (Doré, 1989 ; White, 1992).

L'équation suivante illustre la réaction qui a lieu entre l'hypochlorite de calcium et l'eau.



D'après cette équation, on voit que l'addition d'hypochlorite de calcium dans l'eau produit elle aussi de l'acide hypochloreux, de manière similaire à l'hydrolyse du chlore gazeux et d'hypochlorite de sodium (équations 1 et 3). Comme dans le cas de la solution d'hypochlorite de sodium, cet ajout entraîne la formation d'ions hydroxyles qui font augmenter le pH de l'eau (White, 1992).

### **I.2.2.Méthodes de dosage du chlore**

Le chlore résiduel des eaux est souvent analysé par la méthode volumétrique ou iodométrique. Cette méthode implique un milieu très acide (pH compris entre 3 à 4) en introduisant des ions iodure, puis en dosant l'iode libéré par le thiosulfate de sodium. Ce qui permet le dosage du chlore sous forme  $\text{Cl}_2$ . Les résultats correspondent donc à des équivalents oxydants ( $\text{HOCl}$ ,  $\text{ClO}^-$ ) que l'on exprime en  $\text{mgCl}_2/\text{l}$  (Rodier, 1996). Elle représente une méthode de base en comparaison avec les autres méthodes d'analyse telles que la méthode par absorptiométrie, ampérométrie, potentiométrie, chimiluminescence et chromatographie. Ces dernières méthodes permettent l'analyse de faibles concentrations en

oxydants résiduels et sont largement influencées par les interférences liées à la nature de l'eau (turbidité, couleur, pH, oxygène dissous ainsi que par la présence des nitrites, fer, manganèse et matières organiques) (Doré, 1989 ; Franck, 2002).

Deux autres méthodes sont basées sur les dérivés d'oxydation et couramment mises en œuvre. Ce sont la méthode à la DPD (diéthyl-p-phényldianine) et la méthode à l'orthotolidine (Afnor, 1987).

### **I.3.Principales applications de la chloration**

#### **I.3.1.Application de la chloration dans le traitement des eaux potables**

Les installations de production d'eau potable utilisent surtout le chlore comme désinfectant. Il a toutefois été constaté qu'en vertu de ses capacités oxydantes, il peut servir à d'autres fins, dont voici quelques exemples (Leclerc, 2003) :

- Eliminer les goûts et odeurs désagréables des eaux.
- Prévenir la croissance d'algues dans les ouvrages de la station et notamment les filtres
- Enlever le fer et le manganèse de l'eau.
- Détruire le sulfure d'hydrogène
- Maintenir la qualité de l'eau dans le réseau de distribution.
- Eliminer l'azote ammoniacal.
- Favoriser la floculation par déstabilisation des particules colloïdales et désinfecter partiellement l'eau avant la décantation (Merlet, 1986).

#### **I.3.2.Avantages et inconvénients du chlore**

Le chlore présente de nombreux avantages qui contribuent à répandre son usage dans l'industrie de la production d'eau potable. Il possède notamment les avantages suivants :

- Il inactive de manière efficace une vaste gamme d'agents pathogènes courants.
- Il laisse dans l'eau un résidu facilement mesurable et dont le suivi est aisé.
- Il est économique.
- Il a plus d'une fois fait ses preuves et contribué au succès du traitement.

*Les inconvénients du chlore sont les suivants:*

- Le chlore réagit avec de nombreux composés organiques et inorganiques naturellement présents dans l'eau pour former des sous produits de désinfection (SPD) indésirables.

- Les risques associés à l'usage du chlore, surtout en ce qui concerne le chlore gazeux. Il nécessite des précautions particulières et la planification de mesures d'urgence.
- Des doses élevées de chlore peuvent faire en sorte que l'eau ait un goût et une odeur désagréable.

### **I.3.3. Pratique de la chloration en Algérie**

Dans la pratique de la chloration, il y'a lieu de distinguer entre l'utilisation du chlore gazeux et des hypochlorites.

Le chlore gazeux est souvent utilisé dans les usines importantes alors que l'hypochlorite de sodium est utilisé dans le cas de petites installations. Chaque type de chlore nécessite des appareillages particuliers et demande des conditions de mise en oeuvre et précautions d'entretien bien précises.

Au niveau des stations de traitement, la chloration est effectuée selon le type d'eau à distribuer aux consommateurs, les taux de chlore utilisés sont directement liés à la qualité de l'eau brute à traiter et en particulier à la concentration en matière organique et /ou matières minérales réactives vis-à-vis du chlore en particulier les substances azotées.

En Algérie, la chloration est l'unique méthode pratiquée à partir de l'hypochlorite de sodium (eau de javel) ou plus rarement de chlore gazeux, telle que la station de traitement des eaux de barrage de Ain Zada (Sétif), des eaux de barrage de Hammam Ghrouz (Constantine), des eaux de barrage de Keddara (Alger)...etc. Les taux de chlore utilisés sont directement liés à la qualité de l'eau brute à traiter et en particulier à la concentration en substances azotées. En Algérie, l'appréciation de l'efficacité du traitement est subordonnée à un personnel encore insuffisamment expérimenté, de sorte que les dosages sont généralement ceux définis par les constructeurs de station (1 à 5 mg/l en pré-chloration et 1 à 2 mg/l en post-chloration) d'une façon générale (Achour, 2001).

S'il s'agit d'une eau souterraine, la chloration des eaux de consommation est effectuée en une seule étape, l'appareillage de mise en oeuvre pour la désinfection de l'eau est très simple.

Au niveau du réservoir, il y'a généralement un bac de mise en solution. Dans le cas où il y'a une injection directe dans le réseau, la chloration est effectuée par des pompes doseuses.

Des études faites en Algérie sur des eaux provenant de stations de traitement (Achour, 1992 ; Merakeb et Hafid, 1991) indiquent que les eaux arrivant aux consommateurs présentent souvent un goût désagréable dû à un excès de chlore résiduel et/ou à la

formation de produits de substitution organohalogénés. De même, la teneur en chloroforme dépasse souvent la norme recommandée par l'OMS (Achour et Moussaoui, 1993).

Par ailleurs, une étude faite par Guergazi et Achour (2004) sur la qualité des eaux de consommation de la ville de Biskra, montre également que les teneurs en chlore résiduel des eaux distribuées dans les quartiers de la ville de Biskra et provenant des réservoirs (eaux souterraines) sont très variables, allant de valeurs nulles jusqu'à des valeurs dépassant 2 mg/l. Cette valeur dépasse largement les normes de 0,10 à 0,20 mg/l de chlore résiduel au robinet. En effet, l'absence totale du chlore résiduel pour les différents points est expliqué d'une part par la présence dans le réseau des micro-organismes qui sont fixés aux parois des canalisations et dans ce cas le chlore a pu jouer partiellement son rôle de désinfectant. D'autre part, il peut y avoir la présence de quelques éléments minéraux réducteurs présents dans les eaux et qui ont une forte réactivité avec le chlore. C'est le cas du fer et du manganèse qui ont une réactivité non négligeable vis-à-vis du chlore (Guergazi et Achour, 2004 ; Doré 1989). L'absence de chlore résiduel peut être le fait que la dose du chlore introduit est insuffisante pour que la chloration aboutisse à ses objectifs qui sont, la destruction des micro-organismes et l'oxydation de quelques éléments minéraux et organiques contenus dans le réseau. Par contre, la présence de teneurs résiduelles en chlore atteignant 2 mg/l semble indiquer que les gestionnaires peuvent parfois majorer fortement les doses introduites sans essais préalables en laboratoires.

L'ensemble de ces résultats nous indique qu'en Algérie les doses de chlore sont rarement ajustées à la qualité de l'eau et sont souvent largement majorées. La chloration est pratiquée d'une manière qui n'est pas toujours adéquate et les risques sanitaires en sont les principales conséquences.

#### **I.4. Action bactéricide et virulicide du chlore**

L'eau de distribution doit être exempte de tout germe pathogène. Cet impératif microbiologique régi par la législation, nécessite l'emploi d'un désinfectant dans des conditions appropriées (Minear et Gary, 1996).

On admet généralement que la désinfection est l'étape finale d'une chaîne de traitement, où le chlore pénètre à l'intérieur des micro-organismes tels que les bactéries ou les virus et les détruit en inhibant certaines réactions vitales de synthèse.

Plusieurs facteurs environnementaux influencent l'efficacité avec laquelle le chlore désinfecte l'eau y compris la température de l'eau, pH, le temps de contact, le degré de mélange, la turbidité, les substances indésirables et la concentration de chlore disponible (Shang et al, 2000 ; Groupe scientifique sur l'eau, 2004).

D'une manière générale, différentes formes du chlore auraient ainsi un pouvoir biocide inégal selon l'ordre d'efficacité :  $\text{Cl}_2 > \text{HOCl} > \text{ClO}^-$  (Shang et Blatchley, 2001; White, 1972). En particulier, il a été montré que l'acide hypochloreux était 80 fois plus actif que  $\text{ClO}^-$  pour inactiver l'espèce bactérienne *E. coli* et 150 fois plus pour détruire les kystes d'*Entamoeba histolytica* (White, 1992). Ceci est confirmé par les travaux de Ellis (1991) qui montrent que 99% des micro-organismes (*Escherichia coli*, Poliovirus et *Giardia – Lamblia*) sont inactivés par le chlore et cela pour une température comprise entre 5 et 23°C et un pH acide. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'acide hypochloreux (HOCl), grâce à sa faible taille moléculaire et à sa neutralité, peut traverser plus aisément les parois cellulaires que la forme dissociée de  $\text{ClO}^-$  (Ellis, 1991; White, 1992).

Dans le même contexte, les travaux effectués par Morris et al (1992) ont montré qu'une solution d'hypochlorite de sodium (NaClO) contenant 3,50g de chlore actif est active contre 7 virus dont le très résistant poliovirus. Cette constatation permet de penser que cette solution est active contre le rétrovirus et en particulier contre le virus du sida.

Il a aussi été noté par les travaux d'un GSE (groupe scientifique sur l'eau) (2004) que l'hypochlorite de sodium constitue un excellent décontaminant pour l'eau, le linge et les surfaces.

Cependant, le pouvoir virulicide du chlore libre est encore mal connu, compte tenu de la diversité des virus et de la variation de leur résistance au chlore.

### **I.5. Action du chlore sur les composés minéraux de l'eau**

Parallèlement à ses propriétés désinfectantes et algicides, le chlore conduit également à un grand nombre de réactions chimiques avec les matières minérales présentes dans les eaux à traiter. Compte tenu de leur grande réactivité vis-à-vis du chlore, les ions ammonium et bromure doivent être plus particulièrement considérés.

#### **I.5.1. Azote ammoniacal**

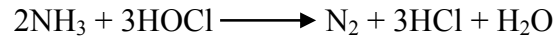
Les réactions du chlore avec l'ammoniac sont rapides et complexes et fonction du pH, du rapport des concentrations du chlore libre appliqué et de l'ammoniac, de la température et du temps de contact (Degrémont, 1989)

En solution aqueuse, l'acide hypochloreux et les hypochlorites réagissent avec l'azote ammoniacal suivant les réactions (Rodier, 1996).

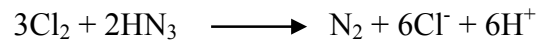


Les deux premières réactions sont réversibles, la monochloramine et la dichloramine ont un certain pouvoir oxydant et désinfectant. Ces composés constituent ce que l'on appelle le chlore actif combiné (Desjardins, 1997).

Pour des taux de chloration suffisamment élevés, la réaction globale d'écrit :



Cette réaction globale nous montre que, par action de HOCl sur NH<sub>3</sub>, on peut avoir oxydation et passage de NH<sub>3</sub> à N<sub>2</sub> (azote gazeux). Après ce point, le chlore sera sous forme libre. Si on prend en considération la réaction d'hydrolyse du chlore dans l'eau, on a :



Cette réaction montre un rapport molaire (Cl<sub>2</sub>/NH<sub>3</sub>) = 1.50 (Rodier, 1996 ; Franck, 2002) et un rapport massique Cl<sub>2</sub>/NH<sub>3</sub> = 7.60. Ceci correspond au break point théorique (dégradation totale de l'azote ammoniacal). Celui-ci est représenté sur la figure 1 (Desjardins, 1997).

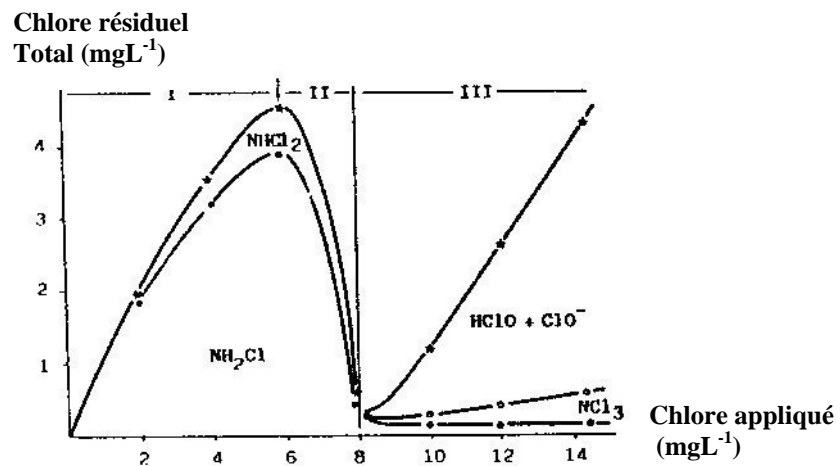
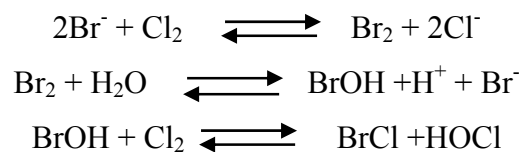


Figure 1 : Courbe du break point (Desjardins, 1997).

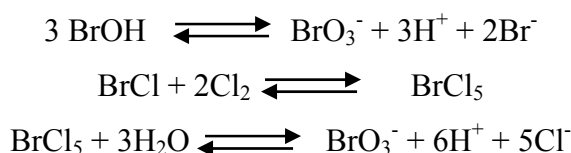
### I.5.2. Les ions bromures

En présence du chlore, les ions bromures sont oxydés en d'autres entités intermédiaires bromées telles que Br<sub>2</sub>, HOBr, BrO<sup>-</sup>, BrCl et BrCl<sub>5</sub> qui sont beaucoup plus réactives dans les réactions d'halogénéation que le chlore. Selon Szabo et Csanyi cités par Ishikawa et al (1986), la réaction de Br<sup>-</sup> avec Cl<sub>2</sub> se fait en deux étapes :



Et

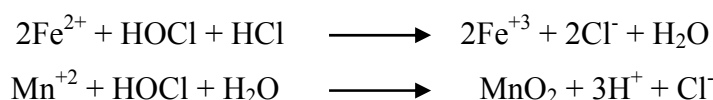




La première étape est favorisée pour un pH entre 6.50 et 7.50 et la deuxième pour un pH un peu plus élevé.

### I.5.3. Le fer et le manganèse

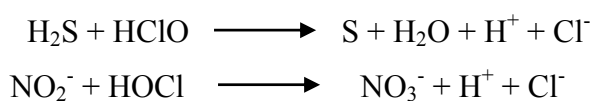
D'après Knocke et al (1990), l'ion ferreux est oxydé en quelques secondes par le chlore libre à pH égal à 6 et à 25 °C, tandis qu'ils ont constaté l'absence d'oxydation en présence de la matière organique colloïdale. En ce qui concerne le manganèse, le chlore l'oxyde lentement Knocke et al (1990), ont remarqué que seulement 10% de manganèse a été oxydé après 120 minutes à pH = 8 et ce avec une dose égale à quatre fois la dose stoechiométrique en chlore. La réaction du fer et du manganèse avec le chlore se fait comme suit.



### I.5.4. Oxydation d'autres micropolluants minéraux

D'autres éléments minéraux réagissent rapidement avec le chlore, l'acide hypochloreux en particulier ou l'ion hypochlorite.

Parmi ces réducteurs, on a les sulfures et les nitrites (Merlet, 1986 ; Doré, 1989).



## I.6. Action du chlore sur les composés organiques de l'eau

### I.6.1. Catégories de la matière organique

La matière organique dissoute des eaux naturelles constitue un milieu très hétérogène, comprenant des molécules à structures très complexes de masse moléculaires élevées mais aussi des composés organiques simples (acides aminés, sucres ...), difficiles à analyser car généralement présents à l'état de traces (Lefebvre, 1995).

Certains auteurs ont fractionné cette matière organique en grandes classes. Les substances humiques ont été définies par Thurman et Malcom (1981) comme la fraction de la matière organique dissoute retenue sur résine XAD8 à pH acide.

La matière organique est généralement définie dans la globalité par les mesures de carbone organique total (COT), de carbone organique dissous (COD) ou encore par l'oxydabilité au permanganate de potassium en milieu acide et chaud.

Le tableau 1 donne les concentrations et les pourcentages relatifs en COD des grandes classes de composés rencontrés dans les eaux naturelles. Il est intéressant de constater que les substances humiques constituent la fraction la plus importante.

**Tableau 1: Grandes classes de composés organiques rencontrés dans les eaux naturelles (Thurman et Malcom, 1981).**

Composés	Concentrations	% COD
Substances humiques	2 – 10 mg/l	40 – 60
Acides Carboxyliques	100 – 600 µg/l	5 – 8
Acides aminés	300 µg/l	2– 3
Hydrate de carbone	500 µg/l	5 – 10
Hydrocarbures	1 – 10 µg/l	<1
Composés à l'état de traces	ng/l - µg/l	<1

Ce sont en particulier les acides humiques et fulviques qui réagissent avec le chlore et forment des composés organohalogénés. En effet, ces substances possèdent des sites métadihydroxybenzeniques très réactifs avec le chlore. Les réactions peuvent être de différentes natures (Christman et al, 1981 ; Minear et Gray, 1996) :

- Des substitutions halogénées sur les cycles et les chaînes aliphatiques des molécules organiques.
- Des oxydations qui peuvent être couplées aux substitutions.
- Des décarboxylations et des hydroxylations

La chloration des eaux de surface conduit à la production du chloroforme, bromoforme et d'autres THM (Christman et al, 1981 ; Minear et Gray, 1996 ; Achour, 2001).

Pour décrire l'action du chlore sur cette matière organique, il est nécessaire de noter qu'en solution aqueuse et pour des pH voisins de 7, le chlore se trouve essentiellement sous forme d'acide hypochloreux HOCl. Dans cette molécule, la liaison oxygène – chlore est polarisée selon  $\text{HO}^{\delta-} - \text{Cl}^{\delta+}$  et l'action du chlore sur les substances organiques conduit à des réactions d'oxydation et d'addition sur les doubles liaisons carbone – carbone, d'hydrogène, de décarboxylation et de polycondensation ( Doré, 1989).

Dans les conditions de traitement des eaux potables, l'action prépondérante du chlore sera une attaque électrophile sur les sites de plus forte densité électronique, conduisant directement à des réactions de substitution (Vaudras et Reinhard, 1988a ; 1988b).

### **I.6.2. Réactivité du chlore vis-à-vis des substances humiques**

Les substances humiques sont des composés macromoléculaires naturels, complexes, résultant essentiellement de la polymérisation des composés organiques, lors des processus de dégradation biologique et d'oxydation chimique de la matière végétale et des détritiques animaux qui se déroulent dans les milieux terrestres et aquatiques, suivant des mécanismes lents et complexes (Christman et al, 1981 ; Thurman, 1985).

La littérature sur la réactivité des substances humiques avec le chlore est très abondante. Cette réactivité se traduit par un potentiel de consommation en chlore important, une diminution de couleur et formation des composés organohalogénés en particulier les trihalométhanes (THM) (Croué, 1987 ; Lévesque et al, 2002 ; Xu et al 2001).

Dans ce même contexte, certains chercheurs (Legube et al, 1990 ; Achour, 1992) se sont intéressés aux potentiels de consommation en chlore des substances humiques à moyen et à long terme ( 24 heures à 72 heures) et ont également montré que ce potentiel est très important. Ces résultats se rapprochent suffisamment des résultats obtenus par la chloration de quelques types d'eaux de surface riches en matière organique (Croué, 1987; Zertal, 1994 ; Guergazi, 1998).

Ces études montrent que la forte réactivité du chlore vis-à-vis des substances humiques fait appel à un mécanisme complexe lié à la présence d'un grand nombre de noyaux phénoliques dans la structure même de ces composés ou bien par la présence de nombreux sites de réactivités différentes qui sont soit présents initialement dans la structure du matériel humique, soit formés au cours de la réaction.

En ce qui concerne la cinétique de consommation en chlore, différentes études (Reckhow, 1984 ; Jadas Hecart, 1989 ; Guergazi et Achour, 1998), montrent que la consommation en chlore par les substances humiques s'effectue grossièrement en deux étapes. Une étape de consommation rapide au cours des premières heures de réactions, suivie d'une étape de consommation plus lente qui peut se prolonger jusqu'à plusieurs centaines d'heures.

Qualls et Johnson (1983) se sont intéressés à la consommation en chlore à court terme (5 minutes) et ont également montré que cette consommation s'effectue en deux étapes. La première très rapide a lieu pendant les 30 premières secondes, la deuxième plus lente se prolonge au-delà de 5 minutes de réaction.

Toutefois, des études comparatives effectuées sur différents acides humiques et acides fulviques (Achour, 1992 ; Zertal, 1994) ont abouti aux mêmes résultats et montrent que plus de 50% du chlore est consommé dans la première étape rapide de la réaction de chlore vis-à-vis du matériel humique.

L'influence du pH sur la consommation en chlore se présente également sous forme de résultats diversifiés.

Qualls et Johnson (1983) indiquent que la demande en chlore au cours des premières minutes de réaction dépend du pH, phénomène qui est expliqué par l'effet antagoniste de la réaction du chlore ( $\text{HOCl}/\text{ClO}^-$ ) et celle des sites réactifs avec le chlore, présents avec la variation du pH. Noack et Doerr (1978) signalent que la demande en chlore après 7 heures augmente sensiblement de  $\text{pH} = 6$  à  $\text{pH} = 9.50$ .

Les travaux effectués par Achour (1992) et Guergazi (1998) montrent que cette demande reste toujours forte à  $\text{pH} = 7$  mais subit néanmoins une certaine diminution lorsque le pH devient acide au basique.

Enfin, sur la base des données de la littérature, les demandes en chlore des substances humiques extraites d'eaux de surface et les demandes en chlore des eaux de surface riche en matière organique sont généralement du même ordre de grandeur en comparaison avec les substances humiques commerciales (Croué, 1987 ; Doré, 1989 ; Achour et Guergazi, 2002).

### **I.6.3. Réactivité du chlore vis-à-vis des composés organiques simples non azotés**

Parmi les composés organiques simples non azotés et qui sont susceptible de réagir avec le chlore, les composés aromatiques possédant le groupement fonctionnel OH a fait l'objet de quelques études.

En effet, les travaux décrits par Merlet (1986) et Doré (1989), montrent que la chloration de composés organiques simples non azotés, dont le phénol et le résorcinol aboutissent à des potentiels de consommation en chlore importants du fait de la présence du groupement activant OH sur la structure aromatique. Les mêmes résultats ont été trouvés par les travaux de Achour (1992) et Guergazi (1998). Ceci confirme la théorie avancée par De Laat et al (1982) qui suggèrent que la présence d'un tel groupement (OH) sur le cycle aromatique favorise la délocalisation des électrons de substitution et par la suite l'augmentation de la vitesse de réaction de la molécule organique avec le chlore.

En ce qui concerne le suivi de la consommation en chlore en fonction de la variation du temps de contact, il montre que cette consommation est effectuée en deux étapes ; une étape rapide succédant à une autre étape qui apparaît lente et où la vitesse de

consommation en chlore devient faible. Au bout de 2 à 3 heures, la réaction semble pratiquement terminée (Doré, 1989 ; Guergazi et Achour, 1996).

Ces deux étapes peuvent être expliquées par le fait que la réactivité du chlore vis-à-vis des composés organiques engendre plusieurs réactions compétitives se déroulant simultanément. La vitesse de ces réactions dépend entre autres paramètres du taux de chlore et de la nature des espèces organiques et minérales présentes initialement durant la phase de consommation rapide.

Les composés aliphatiques non azotés (alcool, aldéhyde, acide ...) sont relativement inertes vis-à-vis de l'action du chlore.

On observe essentiellement des réactions de substitution en présence d'atomes de carbone possédant des hydrogènes mobiles (Doré, 1989).

Par ailleurs, il faut noter que, de par ses propriétés oxydantes, le chlore est capable d'oxyder les alcools en aldéhydes ou en cétones, susceptibles de réagir de manière similaire. Ainsi les alcools secondaire seraient transformés en cétones (De Laat et al, 1982 ; Merlet, 1986).

Signalons que les données de la littérature sur la chloration des composés oxygénés sont relativement peu nombreuses.

#### **I.6.4. Réactivité du chlore vis -à-vis des composés organiques azotés non humiques**

##### *a) Les acides aminés*

Les acides aminés sont présents dans les eaux naturelles à de très faibles concentrations, de quelques dizaines à quelques centaines de nmole/l, soit 1 à 10% COD (Thurman, 1985 ; Dossier-Berne et al, 1994). Mais ils ont la caractéristique d'être à la fois biodégradables et consommateurs de chlore. Les acides aminés apparaissent donc comme un paramètre de choix pour évaluer la qualité d'une eau traitée, tant sur le plan de sa stabilité biologique que sur le plan de sa réactivité aux oxydants (Dossier-Berne et al, 1996).

L'action du chlore sur les acides aminés se traduit par la formation de chloramines minérales plus au moins stables. De même, cette oxydation conduit soit à la formation des aldéhydes (rapport molaire  $\text{Cl}_2$  /acide aminé faible) soit à la formation des nitriles (rapport molaire  $\text{Cl}_2$  /acide aminé élevé) Le Cloirec (1984), Alouini (1987), Hazen et al (1996), et notamment des sous produits organochlorés (De laat et al 1982 ; Benabdessalem et al, 1990).

En ce qui concerne la consommation en chlore des acides aminés, Hureiki (1993) a montré que leur demande en chlore sur 72 heures variait suivant leur nature de 2.50 à 16.50  $\text{mgCl}_2/\text{mgC}$ , dans le cas des acides aminés libres, et de 2.5 à 4  $\text{mgCl}_2/\text{mg C}$  dans le cas des

acides aminés combinés. Pour ces derniers, la consommation en chlore peut se prolonger sur plusieurs centaines d'heures El Morer (1992). D'après Jadas-Hecart (1989), les acides aminés seraient à l'origine de 20 à 30% du potentiel total de la demande en chlore de l'eau produite par l'usine de Choisy Le Roi à partir de l'eau de la Seine. Ces valeurs sont confirmées par Agbekodo (1994) qui considère que 25% de la demande en chlore de l'eau pourraient être attribués à ces mêmes composés.

Le suivi de la consommation en chlore à long terme pour les acides aminés combinés en fonction du temps de contact selon Dossier-Berne et al (1996) a montré que la courbe de consommation en chlore est divisé en deux parties :

Une première phase de consommation rapide sur 4 heures, appelée demande initiale.

Une phase de consommation lente s'étalant sur plusieurs centaines d'heures ou consommation à long terme. Les acides aminés étant présents dans les eaux essentiellement sous forme combinée, ils réagissent donc lentement vis-à-vis du chlore, contrairement aux acides aminés libres très réactifs.

Les travaux de Kantouch et Abdel-Feteh (1971) et ceux de Shang et al (2000) sur la sérine, la tyrosine, la cystine, l'acide aspartique, la lysine, l'arginine et la glycine, montrent que le chlore réagit très vite sur certains acides aminés alors que sur d'autres composés possédant un hétéro atome, un cycle ou un hétérocycle il pourrait y avoir substitution sur un atome ou même cassure de la molécule.

En série aromatique et par chloration de la tyrosine Kettle (2000), Hazen et al (1996), Winterbour (2002), ont montré que la tyrosine a une forte réactivité vis-à-vis du chlore. Sa demande en chlore à pH neutre est de 11.40 moles/mole. Ils ont aussi identifié la 3-chlorotyrosine et la 3,5- dichlorotyrosine. Ceci a été confirmé par les travaux de Chapman et al (2002) qui montrent qu'à une température de 37°C, pour un taux d'acide hypochloreux compris entre 1 et 30 n mole/l et un temps de contact de 20 minutes l'oxydation des bactéries produit de la tyrosine qui par la suite entre en réaction avec l'acide hypochloreux et forme de la 3 chlorotyrosine et la 3,5 dichlorotyrosine.

Drabik et Naskalski (2001) montrent que l'action de HOCl sur la glycine, la cystine et l'asparagine donne des chloramines et des phénomènes de break point qui dépend de la structure du composé aminé. Les chloramines disparaissent avec l'excès de chlore.

Pour la phénylalanine, Benabdesselam (1987) ainsi que Heller et al (2000), identifient le phénylacétaldéhyde et le phénylacétronitrile comme produits majeurs d'oxydation. L'acide phénylacétique et le benzaldéhyde sont également obtenus. La demande en chlore de la phénylalanine est de 2 moles/mole (Dossier- Berne et al, 1996).

Les travaux de Dossier- Berne et al (1996), Hureiki et Croué (1997) et ceux de Shang et al (2000) sur la chloration des acides aminés soufrés tels que la méthionine, la cystine et la phénylthiourée avec le chlore est relativement importante comme en témoignent les valeurs de demande en chlore (tableau 2). La présence du groupement soufré au sein de la structure est très certainement responsable d'une part importante de la consommation en chlore.

Nous pouvons dire aussi que très peu d'informations sont disponibles sur la nature des sous produits de chloration des acides aminés soufrés. Pour la méthionine, seul le chloroforme, le trichloro-1,1,1 éthane et le dichloroacétonitrile ont été identifiés (Horth, 1991 ; Heller et al 2000). Néanmoins, les résultats présentés dans le tableau 2 ont montré que ce composé est un fort précurseur de TOX (organohalogénés totaux). L'étude qui a été effectuée avec la proline a permis de mettre clairement en évidence la formation des acides dichloroacétique et trichloroacétique. De plus, il est intéressant de noter que quelques chloroacides identifiés présentent un groupement terminal aldéhyde ou nitrile.

**Tableau 2 : Potentiels de réactivité avec le chlore des acides aminés soufrés (Hureiki et Croué, 1997 ; Dossier- Berne et al, 1996)**

Acides Aminés	Chlore appliqué mg/mg C	Demande en chlore mg/mg C	PFTOX $\mu\text{gCl}/\text{mgC}$
Méthionine	9.40	7.10	80.50
Proline	9.40	6.30	189
Phénylthiourée	20	12.40	2.70

#### *b) Bases puriques et pyrimidiques*

Les bases puriques et pyrimidiques sont des bases azotées, partagées en deux séries, entrant dans la composition des nucléotides et leurs polymères. Elles vont conférer aux composés biologiques dont elles font partie des propriétés capitales. Ces bases sont aussi des dérivés oxy ou / et amino de la pyrimidine et purine formant les deux familles de base des nucléotides naturels. Les nucléotides de l'ADN comme ceux de l'ARN ne comportent que quatre de ces bases azotées : deux puriques communes aux deux types d'acides nucléiques (Peter et Anthony 2002).

Les acides nucléiques sont des enchaînements de nucléosides 5'-Phosphates dont l'assemblage est réalisé par une liaison phosphorique. Les deux types d'acides nucléiques sont (hames et al 2000 ; Peter et Anthony 2002) :

-**ADN** (acide désoxyribonucléique) composé de :

- Un ose qui est le 2'-désoxyribose.
- La base est soit l'adénine ou la guanine (bases puriques), soit la cytosine ou la thymine (bases pyrimidiques).

-**ARN** (acide ribonucléique) composé de :

- Un ose qui est le ribose
- La base est soit l'adénine ou la guanine (bases puriques), soit la cytosine ou l'uracile (bases pyrimidiques).

Bien qu'il y'ait peu d'études concernant la réactivité du chlore vis-à-vis des bases puriques et pyrimidiques, les travaux qui existent à l'heure actuelle (Gould et Hay, 1982; Chapman et al, 2002), indiquent que l'action du chlore sur les bases puriques et pyrimidiques se manifeste par trois types de réactions :

- Des réactions de substitution
- Des réactions d'addition avec formation de chlorhydrine.
- Des réactions d'oxydation.

En fait, l'oxydation des bases puriques et pyrimidiques, peut aller jusqu'à l'ouverture des cycles. Le degré d'avancement de la réaction est fonction du taux de chlore appliqué (Gould et Hay, 1982 ; Gillian et al, 1988). De même, cette oxydation conduit aussi à la formation des composés N - chloro organiques de base d'acide nucléique et des chloramines. Pour les faibles rapports de chlore (Cl/N), il y'a formation de dichloramines. Tandis que pour les forts rapports de chlore (Cl/N) il y'a formation de mono et dichloramines (Shang et al, 2000).

Shang et al (2000) montrent aussi que la formation du break point n'est pas évidente pour les bases puriques et pyrimidiques. De même, la demande en chlore pour les bases puriques telles que la guanine et l'adénine est plus importante que pour les bases pyrimidiques telles que la cytosine et l'uracile (Gould et Hay 1982 ; Shang et al, 2000).

Le suivi de l'évolution de la concentration de la cytosine en fonction du temps de contact (pH = 7, Cl/Cytosine =3), montre que la concentration de la cytosine diminue en fonction du temps de contact, tandis qu'il y'a augmentation dans le chlore total combiné jusqu'à 1 heure. La consommation en chlore est apparue constante mais subit une augmentation après 250 minutes du temps de contact (Gillian et al, 1988).

Shang et al (2000) ainsi que Gillian et al (1988), indiquent que la réaction du chlore avec la cytosine est un processus assez compliqué. Cette complexité est engendrée par la présence d'un groupe amino primaire dans l'hétérocycle aromatique de la structure de la cytosine.



Ils ont identifié la formation de quantités remarquables de chloramines stables tels que la 1-chlorocytosine, 3-chloro cytosine, 5-chlorocytosine et 3,5-dichlorocytosine.

De même, Gillan et al (1988) montrent que la réactivité du chlore vis-à-vis de la cytosine dépend du pH. Elle est maximale pour un pH = 6,50, et subit une diminution pour un pH basique égal à 9. Ils montrent aussi que la consommation en chlore augmente avec l'augmentation du pH. Ceci peut être expliqué d'une part par la forme du chlore à pH voisin de la neutralité qui sera sous forme moléculaire (HOCl) très réactif vis-à-vis des composés organiques. D'autre part, à pH élevé, la molécule de la cytosine subit une dissociation du groupe 2 hydroxy permettant à son tour l'activation de la réaction.

En ce qui concerne la chloration de l'uracile, Gould et Hay (1982) montrent qu'à pH compris entre 7,50 à 8,50 et après 24 heures de temps de contact, la consommation en chlore de l'uracile est comprise entre 80 à 85% du chlore introduit et à un longueur d'onde  $\lambda = 274$  nm, il y'a la formation non négligeable de 5-chloro uracile. Par contre, à pH = 10,40, la consommation en chlore est faible.

De même, les travaux de Watts et al (1982), de Gould et al (1984) ainsi que Achour (2001), montrent qu'au cours de la chloration de l'uracile la réactivité de cet hétérocycle azoté est assez faible et peut être comparée à celle d'un cycle aromatique désactivé. Toutefois, des réactions de substitution ont été évoquées par identification de la chloro-5-uracile pour des taux de chlore assez faible ( $\text{Cl}_2/\text{uracile}$  de l'ordre de 1). Notons que, ce produit de substitution ne serait pas le produit ultime de la réaction.

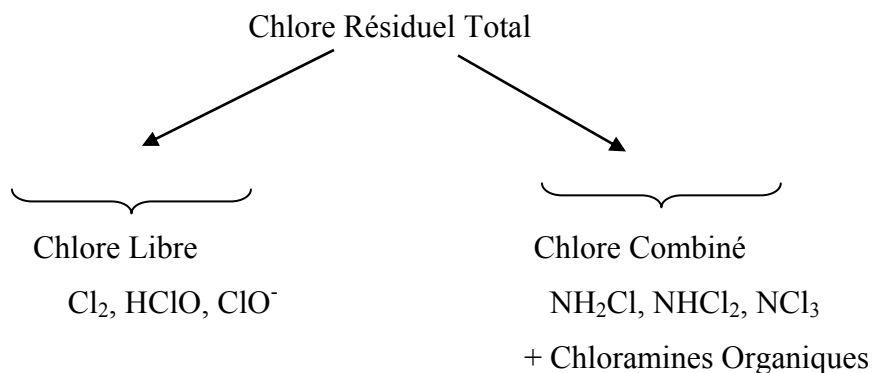
Quant aux travaux de Shang et al (2000), ils ont porté sur la chloration de solution de bases puriques et pyrimidiques à différents taux de chlore. Le break- point n'apparaît pas clairement et une quantité non négligeable de chlore libre est détectée dans le cas de la cytosine et l'uracile. Leurs demandes en chlore se sont avérées plus faibles que celle de la guanine et pour la quelle le chlore libre n'est détecté que pour les forts taux de chloration.

En comparant les résultats de la chloration de l'uracile et de la cytosine, ces mêmes auteurs concluent que le groupement aminé exocyclique de la cytosine était plus réactif que l'azote hétérocyclique vis-à-vis de la réaction de substitution par le chlore. Cet aspect est en rapport avec la formation importante de composés organiques N-chlorés. Assimilés aux chloramines, ils ont pu être déterminés par titration, par la méthode DPD/FAS. Ce groupement azoté exocyclique de la cytosine pourrait assez facilement subir un clivage menant ainsi à la formation de chloramines minérales. Il est intéressant de dire que cette étude est en accord avec les résultats trouvés par Gould et Hay (1982).

### I.7. Incidence de la composante minérale sur la chloration de la matière organique

Comme nous l'avons décrit précédemment (Cf I.5), le chlore agit sur différents composés présents dans l'eau. Il réagit tout d'abord très rapidement avec certaines substances oxydables (sels de fer, manganèse et nitrites...) pour former des composés oxydés et des chlorures dont le pouvoir désinfectant est nul. La quantité de chlore consommé, dans ce cas constitue la demande immédiate (Doré, 1989).

En présence d'ammoniaque et de certains composés organiques azotés, il forme des chloramines ou chlore combiné. Ces chloramines sont peu désinfectantes et donnent des goûts désagréables à l'eau (schéma 1).



**Schéma 1: Différents formes de chlore résiduel total (Doré, 1989).**

La chloration de la matière organique en présence de quelques éléments minéraux spécifiques tels que l'ion ammoniacal ou bromure est abordée surtout sous l'angle de la détermination et de l'évolution des composés organohalogénés en particulier les trihalométhanes.

Les travaux de Merlet et al (1982) et Doré (1989) montrent ainsi que l'azote ammoniacal est excessivement réactif vis-à-vis du chlore et joue un rôle prépondérant dans la chloration de la matière organique des eaux de surface.

Le suivi de l'évolution de la concentration en chlore résiduel total (chloramines + chlore libre), exprimé en concentration de chlore en fonction de la dose de chlore appliqué lors de la chloration de la matière organique en présence de l'azote ammoniacal, a abouti à une courbe connue en traitement des eaux sous la dénomination de la courbe de break point, ou point de rupture qui correspond à l'oxydation complète de l'azote ammoniacal et l'apparition du chlore libre dans le milieu. Ce point de rupture peut être déplacé vers des valeurs dont le rapport massique  $\text{Cl}_2/\text{NH}_3$  est supérieure à 7,60 (White, 1972 ; Martin, 1995).

En conséquence, ceci suggère que la détermination du break point dans une eau naturelle pourra dépendre non seulement de la teneur en azote ammoniacal mais aussi de la réactivité des composés organiques en présence ainsi que celle d'entités minérales prépondérantes dans la matrice de la composante minérale de l'eau.

En ce qui concerne l'ion bromure, il a été longtemps négligé du fait des faibles concentrations rencontrées dans les eaux naturelles.

Notons qu'au cours de chloration, les ions bromures sont susceptibles de s'oxyder en acide hypobromeux, lequel pourra ensuite par réaction sur la micropollution organique conduire à des dérivés bromés (amines halogénés, THM, organobromés non volatils). Ce phénomène est expliqué par De Laat et al (1982) par:

- la vitesse importante d'oxydation des bromures par le chlore libre.
- la grande réactivité du brome libre sur les précurseurs de THM.

Concernant la chloration de la matière organique en présence des ions bromures dans des milieux de minéralisation variable, signalons les travaux réalisés par Guergazi (1998) et Achour (2001). Les résultats obtenus montrent que les potentiels de consommation en chlore diminuent en présence de bromures lors de la chloration de composés simples aromatiques (phénol, résorcinol) mais augmentent sensiblement dans le cas des composés complexes (substances humiques). Cette différence peut vraisemblablement être due à l'influence de certains paramètres comme la nature et la concentration des sites réactifs vis-à-vis du chlore qui peuvent intervenir sur l'activité oxydative du chlore.

Par ailleurs, d'autres éléments minéraux spécifiques tels que les chlorures et les sulfates, pourraient avoir un rôle dans la réactivité chlore / matière organique. A ce jour, seuls les travaux de Guergazi et Achour (2002) indiquent que les demandes en chlore par la matière organique simple et /ou complexe en présence de ces deux éléments minéraux aboutissent à une dégradation importante quelque soit le milieu de dilution (eau distillée ou minéralisée). Les chlorures et les sulfates sont considérés alors comme deux agents inhibiteurs de la réaction de chloration de la matière organique.

Par ailleurs, ces travaux indiquent également que sur le plan pratique, les eaux qui ont une minéralisation élevée avec prédominance des ions chlorures et des ions de sulfates doivent subir d'abord un traitement de déminéralisation avant qu'elles ne soient chlorées pour une meilleure oxydation de la matière organique et pour éviter la présence d'un taux de chlore résiduel important en réseau de distribution (Guergazi, 1998 ; Achour, 2001).

### **I.8. Chloration des eaux de surface**

Comme nous l'avons déjà cité, les notions de carbone organique total (COT), de carbone organique dissous (COD) et l'indice permanganate constituent en règle générale les principaux paramètres analytiques retenus pour apprécier l'évolution de la matière organique des eaux naturelles.

En effet, ces paramètres ainsi que ceux liés à la présence de quelques éléments minéraux tels que l'ion ammonium ont une influence appréciable sur la demande en chlore des eaux de surface et en particulier sur le taux de chlore à introduire.

Les travaux effectués par Achour et Moussaoui (1993), Zertal (1994), montrent qu'après un temps de contact de 72 heures la chloration des eaux de surface induit une forte demande en chlore (7.10 à 15.70 mgCl<sub>2</sub>/ l). Ces potentiels semblent liés à la teneur et la nature de la matière organique qui semble en grande partie non biodégradable, sachant que le pourcentage en carbone total des d'eaux de barrages qui ont été testés est important et de l'ordre de 60 à 90%. D'autre part, la présence d'une concentration en azote ammoniacal dans ces eaux joue un rôle promoteur dans l'étape de la chloration.

De la même manière, Martin et al (1997) indiquent que la demande en chlore de quelques types eaux de surface françaises à un pH =7.50 est de l'ordre de 5.0 mg Cl<sub>2</sub>/l. Ces valeurs sont directement fonction de la teneur en COD. Lorsqu'ils ont rapporté ces valeurs obtenus à l'unité de carbone, ils notent que les résultats varient peu d'une eau à une autre (1.60 à 2.50 mgCl<sub>2</sub>/mgC) et correspondent aux résultats trouvés par les travaux de Croué (1987), Reckhow et al (1990) et ceux de Zertal (1994).

Dans le même état d'esprit, l'ensemble des travaux ont abouti à la même conclusion et suggèrent que la chloration des eaux de surface induit des potentiels de consommations en chlore élevés qui sont en corrélation directe avec la matière organique présente et à leur nature ainsi que la présence de quelques éléments minéraux réactifs vis-à-vis du chlore.

Parallèlement à la demande en chlore des eaux de surface, il y a souvent formation des composés organohalogénés en particulier les trihalométhanés potentiellement toxiques lors de la chloration de ces eaux (O.M.S, 2000 ; Lévesque et al, 2002).

### **I.9. Formation de sous produits toxiques de la chloration**

La découverte de l'existence d'un grand nombre de sous produits créés par la réaction du chlore avec des matières organiques naturelles, nous a conduit à nous intéresser aux effets possibles sur la santé d'une exposition à ces composés (Lévesque et al, 2002 ; Groupe scientifique sur l'eau, 2004).

La chloration de la matière organique produit des composés organohalogénés totaux encore appelés TOX. Ce sont les principaux et les plus connus comme sous produits de la chloration. Parmi ceux –ci, on compte les trihalométhanes (THM).

Nous pouvons noter que les trihalométhanes (THM) sont des composés constitués d'un seul atome de carbone lié à des halogènes, de formule générale  $CHX_3$ , où X est habituellement du chlore, du brome ou une combinaison de ces deux éléments. Les THM mesurés dans l'eau chlorée sont le chloroforme ( $CHCl_3$ ), le bromodichlorométhane ( $CHBrCl_2$ ), le chlorodibromométhane ( $CHClBr_2$ ) et le bromoforme ( $CHBr_3$ ). Ces substances existent à l'état liquide à une température ambiante (Santé canada, 2003). Elles sont extrêmement volatiles et se dégradent dans l'air par réaction photo oxydative (Santé canada, 2003 ; O.M.S, 2000).

Le chloroforme est généralement le principal THM mesuré dans l'eau potable (jusqu'à 90% en poids de tous les THM), mais sa proportion par rapport à l'ensemble des THM peut varier de façon significative selon la teneur de l'eau brute en bromure (qui peut entraîner alors une formation de sous produits bromés) et selon le pH de l'eau (Mills et al, 1998 ; Levallois, 1997 ; Groupe scientifique sur l'eau, 2002 ; Véronique, 2003).

Il est important de dire qu'en Algérie, les études qui ont été effectuées par Achour et Moussaoui (1993) et Achour et Guergazi (2002) montrent qu'au cours de la chloration des eaux brutes algériennes, il y'a formation de quantités importantes de chloroforme allant de 39 à 152  $\mu\text{g/l}$  (tableau 3).

Toutefois, les THM ne représentent qu'une fraction des produits qui peuvent se former lors de la chloration de l'eau. Parmi les autres sous produits susceptibles d'être formés, on trouve des acides haloacétiques (HAA), les haloacétronitriles (HAN), les haloaldéhydes, les chlorophénols et les hydroxyfuranones (Groupe scientifique sur l'eau, 2002; Wright et al, 2002).

**Tableau 3 : Potentiels de réactivité des eaux de surface algériennes vis-à-vis du chlore**  
Chlore introduit = 20 mg/l ; temps = 72 heures ;(Achour et Guergazi, 2002).

	Eaux de surface			
	Souk El Djemâa	Ain Zada	Foum El Gherza	Fontaine des Gazelles
$PCl_2$ (mgCl <sub>2</sub> /l)	9,3	10,5	5,9	7,4
$CHCl_3$ ( $\mu\text{g/l}$ )	134	152	39	86
$CHCl_2Br$ ( $\mu\text{g/l}$ )	12	16	16	29
$CHClBr_2$ ( $\mu\text{g/l}$ )	<1	2	12	11
$CHBr_2$ ( $\mu\text{g/l}$ )	<1	<1	10	6

Par ailleurs, il est bien montré que les THM sont des sous produits halogénés susceptibles d'accroître l'incidence de cancer de la vessie et possiblement du côlon et des reins après l'ingestion d'eau chlorée durant plus de 25 ans (Vandentorren, cité par Véronique, 2003).

Des études californiennes suggèrent aussi un lien entre l'ingestion d'eau chlorée et les risques d'avortement spontané (USEPA, 1998; Santé Canada, 2003)

En effet, le Groupe scientifique sur l'eau (2002), indique que l'organisation mondiale de la santé a établi des valeurs guides pour le chloroforme (200µg/l), le bromoforme (100µg/l), le bromodichlorométhane (60µg/l), et le dibromochlorométhane (100µg/l). De plus, afin de tenir compte de la présence simultanée de ces substances et de leur toxicité possiblement additive, l'organisation mondiale de la santé considère que la somme des rapports entre la concentration mesurée de chaque contaminant et sa valeur guide ne doit pas excéder l'unité.

Notons que la position internationale sur les THM est de rappeler à la population que la chloration constitue une des grandes découvertes de ce siècle pour éradiquer des épidémies mortelles et pour diminuer l'incidence de gastro-entérites au sein de la population OMS, (2000) (Organisation mondiale de la santé).

Elle met aussi en garde les distributeurs d'eau de ne pas diminuer les dosages de chlore, ce qui aurait pour conséquence d'hypothéquer l'effet de désinfection nécessaire pour éviter les épidémies.

#### **I.10. Principales règles à respecter pour limiter les teneurs en sous-produits dans l'eau**

La position internationale sur les THM consiste à diminuer le plus possible l'exposition des consommateurs aux THM sans affecter toutefois l'efficacité de la désinfection. La norme américaine est depuis novembre 1998 de 80 µg/l (Groupe scientifique sur l'eau, 2002). Pour arriver à cet résultat (réduction du THM), (Laferrière et al, 1999) ont clairement démontré les avantages de reporter les points de chloration en aval de la chaîne de traitement et de profiter ainsi de l'enlèvement des précurseurs par floculation et la décantation. De même, White en (1992) suggère que les objectifs du prétraitement comportent :

- Un enlèvement maximal des précurseurs des trihalométhanés.
- Une réduction de la concentration d'azote ammoniacal à 0.10 mg/l.
- Une baisse de la concentration d'azote organique à 0.05 mg/l.
- Une limitation de la demande en chlore (15 minutes) à 0.50 mg/l.

En se fiant à ces guides, on devrait pouvoir améliorer suffisamment la qualité de l'eau brute pour que le chlore résiduel libre soit dans les limites qui sont fixées par l'USEPA (1998).

De même, quelques principales règles à respecter pour limiter les teneurs en sous-produits dans l'eau (Montiel et al, 1996):

- Commencer par l'utilisation des produits désinfectants contenant un minimum d'impuretés. Cela concerne le chlore, les hypochlorites et le bioxyde de chlore

- Rechercher le meilleur compromis efficacité / risque à chaque point d'utilisation d'oxydant désinfectant sur la filière de traitement.

- Ainsi, en pré oxydation, on évite les doses d'oxydant en excès.

- Dans la mesure du possible, on cherchera à éliminer les précurseurs de sous produits avant l'introduction du produit oxydant.

- Contrôler et maintenir la turbidité et la matière organique à leurs niveaux les plus faibles possible.

- Injecter l'oxydant le plus tard possible dans la filière.

### **I.11. Conclusion**

Le chlore, soit sous forme gazeux ou sous forme d'hypochlorite de sodium, est un oxydant puissant. Il permet l'oxydation de la matière organique et minérale ainsi que la désinfection pour l'inactivation de microorganismes pathogènes. Il a fait preuve d'efficacité depuis de nombreuses années tant dans le monde qu'en Algérie.

Le chlore a une réactivité appréciable vis-à-vis de la matière organique des eaux de surface aussi bien vis-à-vis des composés organiques complexes tels que les substances humiques que des composés simples caractérisés par un noyau aromatique contenant un groupement fonctionnel (OH, NR<sub>2</sub>...). De même, il est très réactif vis-à-vis des bases puriques et pyrimidiques constituants des acides nucléiques (ADN et ARN) et molécules vitales dans le métabolisme de micro-organismes de l'eau.

La présence de la composante minérale entre en réaction compétitive avec le chlore et la matière organique et provoque soit un effet promoteur tels que les ions ammoniums ou bromures soit un effet inhibiteur tels que les chlorures et les sulfates.

Enfin, nous pouvons dire que les données scientifiques montrent que les avantages de la chloration de l'eau potable surpassent les risques sanitaires que peuvent poser les THM et autres sous produits. Bien qu'il existe d'autres oxydants, les traiteurs d'eau continuent de privilégier le chlore.

L'optimisation des étapes de la clarification par élimination au maximum les matières organiques naturelles de l'eau (les précurseurs des sous produits de la chloration) avant de pratiquer l'oxydation par le chlore est nécessaire.