

CHLORATION DE L'EAU POTABLE





Index

1.	Introduction	3
1.1	Eau pour consommation humaine	3
2.	Chloration	7
2.1.	Chlore et dérivés	7
2.2.	Chimie du chlore	8
2.3.	Demande de chlore	11
2.4.	Chloration: doses et contact	12
2.5.	Méthodologie analytique	14
2.6.	Détermination de chlore en continu	16
2.6.1	Colorimétrie	16
2.6.2	Ampérométrie	17
2.7.	Protocole de chloration	19
3.	Équipement de chloration	20
3.1.	Pré-chloration	22
3.2.	Stockage-maintenance	23
3.3.	Post-chloration	25



1. INTRODUCTION

L'eau potable est un bien nécessaire mais limité. Bien que l'eau soit l'élément plus abondant et commun de notre planète (il couvre le 71% de la surface), le 97,3% est contenu dans les océans. Du 2,7% qui reste, à peu près le 2,1% se trouve dans les calottes polaires et dans des glaciers, et seulement le 0,61% est de l'eau douce liquide. De celle-ci, environs le 0,60% se trouve dans des nappes aquifères souterraines, difficilement accessibles, et seulement le 0,009% correspond à de l'eau douce superficielle (fleuves et lacs). Encore plus, seulement le 0,003% du total est de l'eau douce disponible pour être utilisée dans la maison. Nous ferons un exemple imagé: si l'eau totale de la Terre était contenue dans un récipient de 100 litres, seulement la moitié d'une petite cuillerée serait bonne pour son usage humain.

Origine de l'eau	Volume de l'eau en kilomètres cubiques	Pourcentage d'eau total
Océans	1,321,000,000	97.24%
Couches de glace, Glaciers	29,200,000	2.14%
Eau souterraine	8,340,000	0.61%
Lacs d'eau douce	125,000	0.009%
Mers intérieures	104,000	0.008%
Humidité de la terre	66,700	0.005%
Atmosphère	12,900	0.001%
Rivières	1,250	0.0001%
Volume total d'eau	1,360,000,000	100%

Source: Nace, Enquête Géologique des États-Unis, 1967 et
Le Cycle Hydrologique (brochure), U.S. Geological Survey, 1984

Toutes ces données confirment que l'eau potable est un bien très précieux et limité, et qu'il doit être consommé et administré scrupuleusement. Il est très important d'en réduire la dépense et chercher autant que possible de la réutiliser convenablement.

1.1. Eau pour consommation humaine

L'approvisionnement en eau pour la population peut se faire à partir de deux sources aux caractéristiques bien différentes:

- Eaux superficielles: lacs, rivières, barrages, etc. Ces eaux se trouvent exposées à l'environnement, et pour ceci elles sont susceptibles de pollution. Pour ceci il est nécessaire de faire un traitement exhaustif pour qu'elles puissent arriver à être aptes pour consommation humaine. Ceci habituellement est effectué par les institutions qui s'occupent de l'exploitation des ressources hydriques.
- Eaux souterraines: les puits, les sources, etc. Ce sont des sources plus difficiles d'exploiter, car elles ne sont pas aussi accessibles que les eaux superficielles. Elles ont leur origine dans les eaux superficielles qui

filtrant à travers les différentes couches de la terre et passent à la nappe aquifère. Ce système de filtration naturelle permet que l'eau soit purifiée. En tout cas, pour être considérée potable, l'eau doit respecter certaines caractéristiques physiques, chimiques et microbiologiques. En outre, à longue échéance les aquifères peuvent aussi se polluer, et pour ceci souvent il est nécessaire de traiter ces eaux (un traitement moins intensif que celui des eaux superficielles).

Les sources de pollution de l'eau peuvent être naturelles (la pluie, la matière végétale en décomposition, l'érosion du sol, etc.) ou anthropogéniques (l'élevage de bétail, sous-produits de l'activité industrielle, les eaux ménagères, etc.), mais toutes elles donnent lieu à une eau qui ne respecte pas les conditions nécessaires pour en garantir la potabilité.

Les procès basiques de traitement de l'eau renferment plusieurs étapes: coagulation, floculation, séparation de particules (sédimentation/flottation), filtration et désinfection (chloration/ozonisation). Dans beaucoup de ces étapes on effectue l'addition de produits chimiques au débit d'eau qui doit être traité, et c'est ici où I.T.C. S.L. peut intervenir pour aider à doser correctement et contrôler les produits avec sa vaste gamme de pompes et accessoires.

Dans les cas des eaux, dont la qualité a été vérifiée et qu'on les considère bonnes pour être consommées par les êtres humains, comme par exemple de nombreuses eaux souterraines et les eaux superficielles qui respectent les caractéristiques décrites dans l'Annexe II de l'*Ordre Ministérielle du 11 Mai 1998 du Gouvernement espagnol, sur les caractéristiques basiques de qualité que doivent être maintenues dans les courants d'eau superficiels, quand ils sont destinés à la production d'eau potable* classifiées comme genre A1, leur traitement préalable à la consommation humaine consiste en un traitement physique simple (par exemple le filtrage), suivi d'un procès de désinfection. Dans le cas du genre A2, il est nécessaire faire un traitement physique normal: traitement chimique et désinfection. Pour le genre A3 il faut des traitements physiques et chimiques intensifs, affinage et désinfection.

Paramètre	Unité	Genre A1	Genre A2	Genre A3
pH	-	(6.5-8.5)	(5.5-9.0)	(5.5-9.0)
Couleur	Échelle Pt	20	100	200
Solides en suspension	mg/l	(25)	-	-
Température	°C	25	25	25
Conductivité (20°C)	µS/cm	(1000)	(1000)	(1000)
Nitrates (*)	mg/l NO ₃ ⁻	50	50	50
Fluorures	mg/l F	1.5	(1.7)	(1.7)
Fer dissous	mg/l Fe	0.3	2	(1)
Manganèse	mg/l Mn	(0.05)	(0.1)	(1)
Cuivre	mg/l Cu	0.05	(0.05)	(1)
Zinc	mg/l Zn	3	5	5
Bore	mg/l B	(1)	(1)	(1)
Arsenic	mg/l As	0.05	0.05	0.1
Cadmium	mg/l Cd	0.005	0.005	0.005
Chrome total	mg/l Cr	0.05	0.05	0.05
Plomb	mg/l Pb	0.05	0.05	0.05
Sélénium	mg/l Se	0.01	0.01	0.01
Mercure	mg/l Hg	0.001	0.001	0.001
Baryum	mg/l Ba	0.1	1	1
Cyanures	mg/l CN ⁻	0.05	0.05	0.05
Sulfates (**)	mg/l SO ₄ ²⁻	250	250	250
Chlorures (**)	mg/l Cl	(200)	(200)	(200)
Détergents	mg/l	(0.2)	(0.2)	(0.5)
Phosphates (*)	laurilsulfate mg/l P ₂ O ₅	(0.4)	(0.7)	(0.7)
Phénols	mg/l phénol	0.001	0.005	0.1
Hydrocarbures dissous ou émulsionnés (après leur extraction dans éther de pétrole)	mg/l	0.05	0.2	1
PAH	mg/l	0.0002	0.0002	0.001
Plaguicides totaux	mg/l O ₂	-	-	(30)
DQO	%	(70)	(50)	(30)
Oxygène dissous	saturation	(3)	(5)	(7)
DBO5	mg/l O ₂	(1)	(2)	(3)
Nitrogène Kjeldahl	mg/l N	(0.05)	1.5	4
Ammoniac	mg/l NH ₄ ⁺	(0.1)	(0.2)	(0.5)
Matières extractibles avec chloroforme	mg/l sec	(50)	(5000)	(50000)
Coliformes totaux (37°C)	u/100ml	(20)	(2000)	(20000)
Coliformes fécaux	u/100ml	(20)	(1000)	(10000)
Streptocoques fécaux	u/100ml	Absentes	Absentes	-
Salmonellas	-	en 5 l	en 1l	-

(*) Dans des lacs peu profonds à rénovation lente

(**) Sauf dans le cas où il n'y ait des eaux plus aptes à être consommées

Les numéros en parenthèse indiquent des valeurs indicatives souhaitables à caractère provisionnel

De tous les traitements mentionnés, dans ce document nous considérerons la désinfection. Dans ce procès on cherche à détruire ou inactiver les organismes pathogènes présents dans l'eau surtout les bactéries, les virus et les protozoaires. Dans les cas des eaux de Genre A2 ou Genre A3, ces organismes sont éliminés en grande partie pendant les opérations de traitement physico-chimique, mais ceci n'est pas suffisant à garantir la totale innocuité de l'eau.

Les traitements de désinfection peuvent être physiques (radiation gamma, rayons de Roentgen, radiation ultraviolette, stérilisation par la chaleur,...) ou chimiques (métaux lourds, acides ou alcalis, halogènes, ozone, permanganate,...), les traitements chimiques étant les plus habituels. Entre tous les réactifs chimiques, le chlore et ses composés sont les agents désinfectants les plus utilisés à l'échelon mondial, et pour ceci nous les étudierons avec plus de détail.

Les valeurs du chlore résiduel sont réglées par de nombreuses institutions, et elles dépendent de l'utilisation finale de l'eau. Ainsi, pour les eaux potables on recommande que le chlore libre résiduel soit entre 0,5 et 1 ppm, tandis que, dans le cas des piscines et des établissements de bains, le chlore doit se maintenir entre 1,5 et 3,0 ppm. Cependant, ces valeurs sont générales et chaque institution compétente a établi les siennes.



2. CHLORATION

2.1 LE CHLORE ET SES DERIVES

L'utilisation du chlore comme agent désinfectant commence au début du siècle XX, en complétant ainsi le procès de filtration, qui était déjà largement utilisé.

Les produits de la famille du chlore les plus habituels dans la désinfection de l'eau sont: le chlore gazeux, l'hypochlorite de sodium, l'hypochlorite de calcium.

Le chlore (Cl_2) est un gaz toxique, plus dense que l'air, d'une couleur verte jaunâtre. Il s'agit d'un produit très oxydant qui réagit avec beaucoup de composés. En présence d'humidité il devient extrêmement corrosif, et c'est pour ceci que les conduits et les matériels qui sont en contact avec le chlore doivent être fabriqués en alliages spéciaux. Le vapeur de chlore est irritant par inhalation, et il peut causer des graves blessures dans le cas d'une exposition à des concentrations élevées. Par conséquent, le chlore doit être utilisé par du personnel qualifié et il faut des systèmes de contrôle et d'alarme très efficaces. Pour ceci, il est préférable utiliser des hypochlorites en solution ou en forme solide.

L'hypochlorite de sodium (NaClO) en solution est un désinfectant utilisé depuis le siècle XVIII, et populairement connu comme eau de Javel. Dans l'industrie, ceci est obtenu par réaction du chlore gazeux avec une solution d'hydroxyde de sodium. Après la réaction on obtient des solutions aqueuses de couleur jaune verdâtre, qui ont une concentration donnée de chlore actif par litre. Il est commercialisé en dissolutions de concentrations entre 3 et 15% en poids. L'hypochlorite de sodium est un oxydant très puissant et instable, à tel point que une solution de 100 grammes de chlore actif par litre, après avoir été emmagasinée pendant trois mois, peut en contenir 90 grammes ou moins.

L'hypochlorite de calcium ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$) est un solide blanc avec un contenu entre 20 et 70% de chlore actif. Il est très corrosif et il peut s'enflammer en contact avec certains matériaux acides. Cependant, il présente deux avantages par rapport à l'hypochlorite de sodium: un contenu en chlore plus élevé et une plus grande stabilité. Pour son utilisation on le dilue dans l'eau pour en obtenir une solution avec une concentration plus maniable, par exemple 2%.

2.2 CHIMIE DU CHLORE

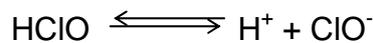
Quand le Cl_2 se dissout dans l'eau il est rapidement hydrolysé et il produit l'acide hypochloreux et l'acide chlorhydrique.



Dans le cas des hypochlorites, il se produit une dissociation des deux sels d'accord avec les équations suivantes:



Ainsi, dans n'importe quel cas: chlore, hypochlorite de sodium et hypochlorite de calcium, finalement il se forme l'acide hypochloreux, qui est vraiment le désinfectant. Cependant, celui-ci se dissocie d'accord avec l'équilibre suivant:



Cet équilibre est gouverné par la suivante constante:

$$K_a = \frac{[\text{H}^+][\text{ClO}^-]}{[\text{HClO}]}$$

dont la valeur approximative est $3.2 \cdot 10^{-8}$.

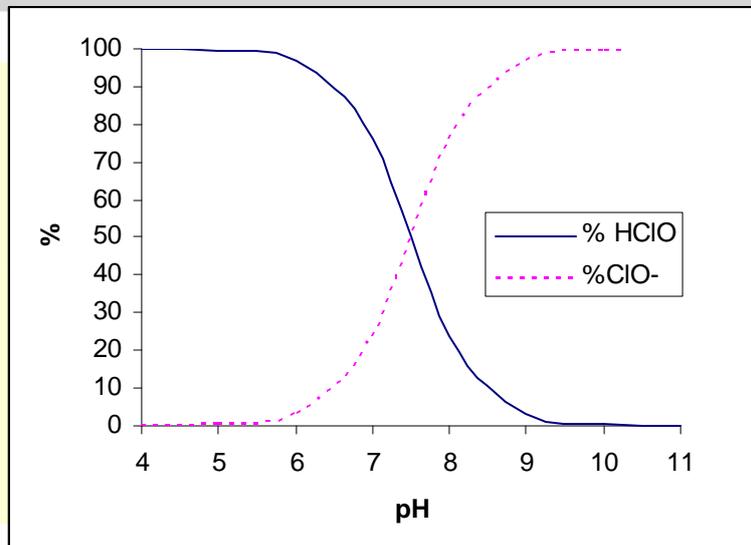
Si nous réalisons le moins logarithme de l'expression:

$$-\log K_a = -\log[\text{H}^+] - \log \frac{[\text{ClO}^-]}{[\text{HClO}]}$$

Compte tenu de ce que le $-\log X$ est connu comme pX, l'expression sera:

$$\text{p}K_a = \text{pH} - \log \frac{[\text{ClO}^-]}{[\text{HClO}]}$$

Dans le graphique qui suit on peut observer la distribution de chaque espèce en fonction du pH:



On voit clairement dans le graphique que entre pH 6 et pH 9 les deux espèces coexistent, tandis que à pH inférieurs à 6 et supérieurs à 9 on considère l'existence d'une seule espèce. Dans la valeur de pH égal au pKa de l'acide hypochloreux (pKa = 7.5), on observe que les concentrations de HClO et ClO⁻ sont égales, ce qui est facilement déductible de l'expression antérieure.

L'acide hypochloreux est un désinfectant beaucoup plus effectif que le ion hypochlorite, et ce fait pourrait être en rapport avec l'absence de charge dans la molécule d'acide hypochloreux. Etant donné qu'il s'agit d'une molécule neutre, il lui serait plus facile de pénétrer la paroi bactérienne avec le résultat d'une

activité bactéricide. Compte tenu de ce fait, et de ce qu'on a vu jusqu'à présent, il est facile de comprendre les différentes activités de l'hypochlorite comme agent bactéricide en différentes conditions de pH. Ainsi, avec un pH inférieur à 7,5, la quantité de hypochlorite pour désinfecter l'eau est très inférieure à celle nécessaire pour la même eau avec un pH en dessus de 7,5.

En plus de son application comme désinfectant, le chlore et ses dérivés se montrent utiles aussi dans les suivants cas:

- Contrôle des odeurs et des goûts
- Prévention dans la croissance des algues
- Élimination du fer et du manganèse
- Destruction de l'acide sulfhydrique
- Élimination des colorants organiques
- Amélioration de la coagulation par silice
- ...

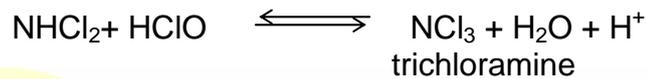
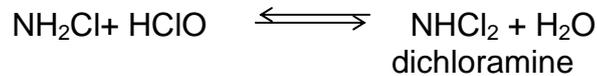
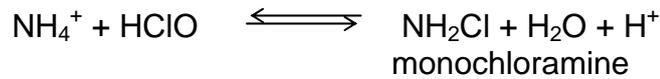
Dans la table suivante on montre, d'une façon résumée, quelqu'un de ces usages et les doses typiques:

Application	Doses	pH optimal	Temps de réaction	Efficacité
Fer	0.62 mg/mg Fe	7.0	< 1h	Bonne
Manganèse	0.77 mg/mg Mn	7-8 9.5	1-3 h Minutes	Cinétique lente
Croissance biologique	1-2 mg/l	6-8		Bonne
Odeur/Goût	Variable	6-8	Variable	Variable
Élimination de couleur	Variable	4-6.8	Minutes	Bonne
Moules zébra	2-5 mg/l 0.2-0.5 mg/l		Niveau de choc Niveau résiduel	Bonne
Clovisses asiatiques	0.3-0.5 mg/l		Continu	Bonne

Un des désavantages de l'utilisation du chlore et ses dérivés est qu'il réagit avec beaucoup de matière organique et il produit des trihalométhanes (THM), dont beaucoup d'entre eux ont démontré être toxiques ou même carcinogéniques. Un autre inconvénient est la formation de chlorophénols dans les eaux qui contiennent des phénols, ce qui donnerait lieu à des mauvaises odeurs.

Le chlore réagit aussi avec l'ammoniac dissout dans l'eau pour former des chloramines. Ces produits ont eux aussi un certain pouvoir de désinfection, mais ils sont environ 25 fois moins effectifs que le chlore libre. Cependant, le temps de permanence dans l'eau est long et pour ceci quelque fois ils ont été utilisés comme réserve de chlore résiduel. Ces produits ont deux grands

inconvenients: ils peuvent donner lieu à des odeurs et des goûts, et ils sont potentiellement toxiques utilisés de façon chronique.



Un autre dérivé du chlore que l'on utilise comme désinfectant, est le dioxyde de chlore (ClO_2). Celui-ci est autant effectif que le chlore/hypochlorite, et moins sensible aux changes de pH en ce qui concerne son activité désinfectante. En plus, il ne se combine pas avec l'ammoniac ni avec beaucoup de matière organique, ce qui évite l'apparition de chloramines et d'autres composés aux goûts et aux odeurs désagréables. Cependant, il s'agit d'un gaz dix fois plus toxique que le chlore gaz, et en concentrations de 8-12% il est explosif dans l'air. En outre, en tant que produit de réaction, il donne lieu au chlorite, dont les risques pour la santé humaine n'ont pas été suffisamment étudiés.

2.3 DEMANDE DE CHLORE

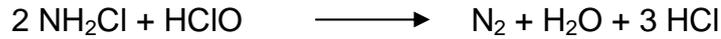
De tout ce qui précède on peut déduire que le chlore (et ses dérivés), en plus de réagir avec les micro-organismes, il le fait aussi avec d'autres substances dissoutes dans le moyen: matière organique, fer, manganèse,... pour ceci, pour avoir un niveau donné de chlore résiduel, la quantité nécessaire qui doit être ajoutée est assez plus que la valeur résiduelle obtenue.

Par conséquent, avant de décider la dose de chlore nécessaire pour désinfecter, il faut établir l'exigence de chlore, c'est-à-dire la quantité de chlore qui est consommée jusqu'à l'apparition du résiduel.

Dans la figure suivante on montre la variation de la quantité de chlore résiduel en fonction du chlore ajouté pour un cas hypothétique général.

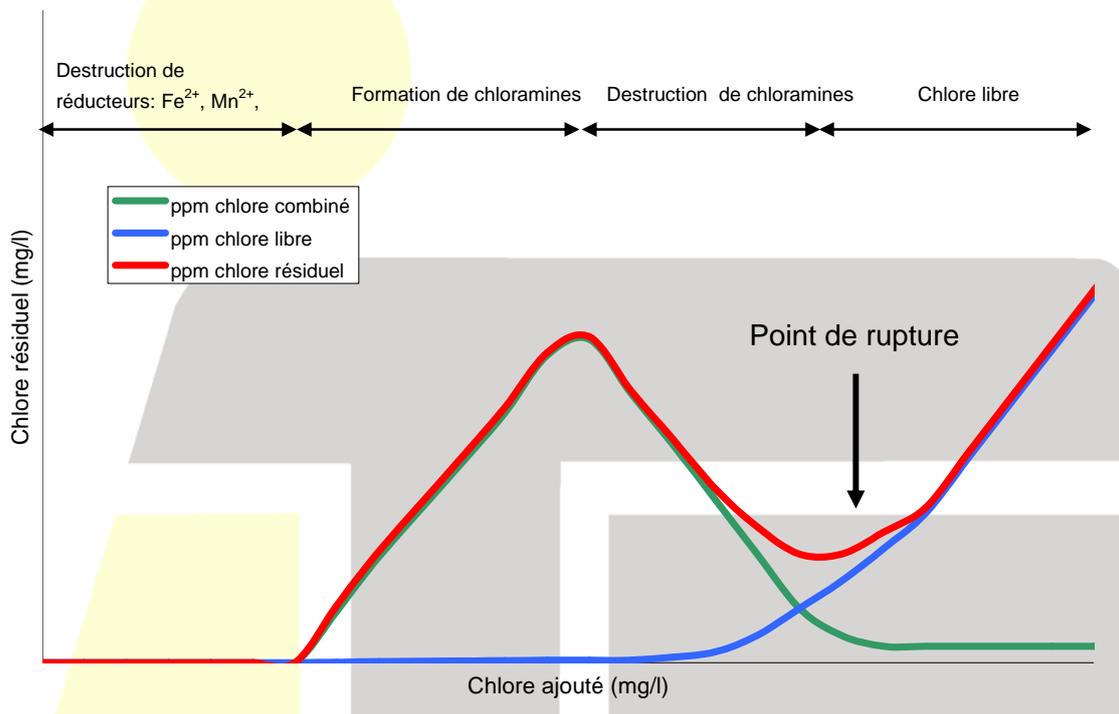
- dans une première étape a lieu l'oxydation de substances réductrices, spécialement inorganiques: Fe^{2+} , Mn^{2+} , H_2S ,... Tout l'hypochlorite qu'on ajoute est consommé, ceci fait qu'il n'y ait pas de chlore disponible.
- Quand ces substances ont été détruites, il commencerait une étape dans laquelle se formeraient les composés chlorés, principalement les chloramines, qui agiraient comme chlore résiduel, ce qui donnerait un certain caractère désinfectant au système.
- Quand tout l'ammoniac et les amines organiques ont réagit au chlore, après le sommet de la courbe, il commence une étape de destruction de ces composés chlorés formés dans l'étape antérieure. Encore qu'on y ajoute du chlore, il n'y a pas un accroissement de la quantité de chlore disponible, bien au contraire on observe une diminution, car l'on

consomme tant le chlore résiduel qui avait été formé, comme l'hypochlorite ajouté. Dans l'équation suivante on peut observer cet effet:



Alors la capacité désinfectante du système se réduit dans cette étape.

- Après du point de rupture (*breakpoint*) tout le chlore que on ajoute reste comme chlore libre. Pour ceci on considère que à partir de ce point, soit la désinfection comme l'élimination de matière organique oxydable par chlore, ont déjà eu lieu, et l'eau contient une valeur donnée de chlore libre résiduel.



La demande de chlore est la différence qui existe entre la quantité de chlore appliquée à l'eau et celle de chlore libre disponible. Ainsi on peut considérer que la demande de chlore correspond à peu près à la dose dans laquelle le point de rupture est atteint.

Le chlore libre résiduel peut apparaître sous forme de Cl_2 , HClO et/ou ClO^- , dépendant du pH de travail, et par conséquent il correspond à la somme de ces trois espèces.

2.4 CHLORATION: DOSES ET CONTACT

Avec ce qui précède nous avons les bases pour pouvoir discuter davantage et en profondeur quels paramètres nous permettent décider si une eau a été traitée correctement. Comme on l'a déjà vu, la chloration est correcte quand les valeurs de chlore libre résiduel sont supérieures à celles du point de rupture (qui correspondent environ aux valeurs de chlore résiduel libre). Les quantités de chlore libre résiduel recommandées par les institutions compétentes pour des eaux potables varient entre 0,5 et 1,0 ppm, et entre 1,5 et 3,0 ppm pour les piscines.

Cependant, il s'agit ici de chlore libre, c'est-à-dire que cette quantité n'est pas le chlore ajouté, étant donné qu'une partie de celui-ci a été consommée par des substances présentes dans l'eau (besoin de chlore).

Jusqu'à présent on n'a pas considéré du tout la vitesse de réaction du chlore (hypochlorite) avec les micro-organismes. À cet égard, il faut définir le concept CT, qui est le produit de la concentration dosée de hypochlorite par le temps de contact avec le chlore et le microorganisme, pour garantir la désinfection désirée. La valeur de CT dépend du micro-organisme en question et de la température de l'eau. En plus, tel que on a pu le voir auparavant, l'activité de l'hypochlorite est très influée par le pH, ceci signifie que, en ce qui concerne la désinfection, ce n'est pas la même chose avoir 5 ppm à un pH 7 que à un pH 8. Pour cette raison, le CT dépend aussi du pH de l'eau. Dans la table suivante on montre un exemple de CT. On peut observer que ces valeurs dépendent aussi de la concentration du chlore disponible. Le quotient CT s'exprime en mg·min/l, c'est-à-dire qu'il a des dimensions de concentration pour temps.

Concentration Chlore (mg/l)	Inactivation de Giardia Cysts à 20°C								
	pH 6.5			pH 7.5			pH 8.5		
	90%	99%	99.9%	90%	99%	99.9%	90%	99%	99.9%
0.6	15	30	45	21	43	64	31	61	92
1.0	16	31	47	22	45	67	33	65	98
1.4	16	33	49	23	47	70	34	69	103
1.8	17	34	51	25	49	74	36	72	108
2.2	18	35	53	26	51	77	38	75	113
2.6	18	37	55	27	53	80	39	78	117
3.0	19	38	57	28	55	83	41	81	122

Exemple 1
 Eau à 20°C
 pH 7.5
 Inactivation 99%
 Dose à utiliser 1 mg/l

Inactivation de Giardia Cysts à 20°C									
Concentration Chlore (mg/l)	pH 6.5			pH 7.5			pH 8.5		
	90%	99%	99.9%	90%	99%	99.9%	90%	99%	99.9%
0.6	15	30	45	21	43	64	31	61	92
1.0	16	31	47	22	45	67	33	65	98
1.4	16	33	49	23	47	70	34	69	103
1.8	17	34	51	25	49	74	36	72	108
2.2	18	35	53	26	51	77	38	75	113
2.6	18	37	55	27	53	80	39	78	117
3.0	19	38	57	28	55	83	41	81	122

Ainsi, Ct = 45 mg·min/l

Par conséquent, le temps de contact recommandé ressort de diviser cette valeur par la concentration

$$t_{\text{contact}} = 45/1 = 45 \text{ min.}$$

Exemple 2

Il faut traiter la même l'eau que dans l'exemple précédent, mais en utilisant une dose de chlore de 3 mg/l.

Dans ce cas-ci CT = 55, une valeur supérieur à la précédente, mais

$$t_{\text{contact}} = 55/3 = 18.3 \text{ min.}$$

Exemple 3

Il faut traiter la même eau que dans l'Exemple 1, mais maintenant le pH de l'eau est 8,5. Dans ce cas-ci CT = 65, une valeur supérieure à l'antérieure et

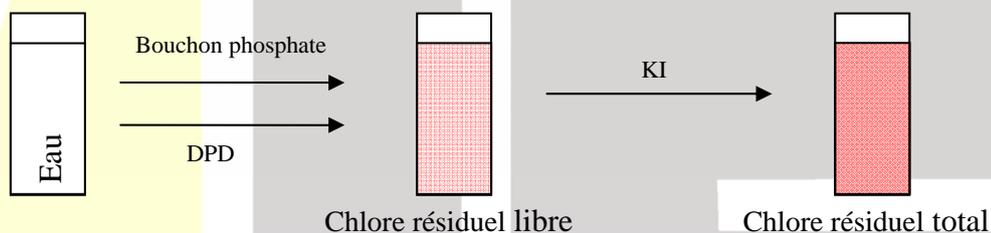
$$t_{\text{contact}} = 65/1 = 65 \text{ min.}$$

Comme on a pu le voir dans les exemples antérieurs, le temps de désinfection dépend de beaucoup de paramètres, et le fait de tenir une concentration donnée de chlore libre ne garantit pas une désinfection appropriée si on ne maintient pas un contrôle rigoureux soit du temps de contact comme de tous les autres facteurs: pH, température,...

2.5 MÉTHODOLOGIE ANALYTIQUE

Habituellement, la détermination de chlore résiduel dans les eaux, est effectuée par réaction avec o-toluidine ou avec N,N-dyétil-p-phénylènediamine (DPD, *N,N-diethyl-p-phenylen-diamine*). La première est réalisée de manière simple, bien qu'elle présente l'inconvénient de ne pas permettre une bonne différenciation entre le chlore résiduel libre et celui combiné. L'o-toluidine réagit rapidement avec le chlore libre, et à partir de 5 secondes elle réagit aussi avec le combiné, de manière à ne pas pouvoir les quantifier séparément, dans la mesure où il s'avère impossible de réaliser l'analyse séparément sur une échelle de temps aussi courte. Puisqu'il n'est pas possible de déterminer s'il existe réellement du chlore libre (et en quelle quantité), nous pouvons avoir une eau mal chlorée : un haut contenu en chlore combiné, mais une absence de chlore libre (c'est-à-dire que nous chlorerions en dessous du point de rupture). De plus, l'o-toluidine est un produit toxique potentiellement cancérigène.

Sur la base des considérations précédemment exposées, il est recommandé d'utiliser de la DPD, qui permet de distinguer entre chlore libre et chlore combiné. La DPD, à pH entre 6.2 et 6.5 donne lieu à une coloration rougeâtre qui est proportionnelle à la quantité de chlore libre présent dans le milieu. Par comparaison sur une échelle de couleur, il est possible de déterminer la quantité de chlore libre. Sur le même échantillon, on ajoute de l'iodure de potassium, qui libère le chlore combiné et fait que celui-ci réagisse avec la DPD, ainsi finalement nous disposons de la lecture de chlore résiduel total. Par la différence entre ces deux valeurs, nous pouvons déterminer le chlore résiduel combiné.



Cette réaction peut être surveillée de manière simple sous la forme de kits de réaction, fournis par de multiples fournisseurs. Il existe une forme plus précise de réaliser cette détermination en utilisant un photomètre, qui est un instrument qui effectue la lecture de l'intensité de couleur et qui permet de la mettre en relation avec la concentration des produits. La détermination colorimétrique de chlore par réaction avec DPD est reconnue comme étant le modèle standard de l'EPA 4500-Cl G. Il existe sur le marché des dispositifs qui permettent la réalisation de ces réactions en ligne, mais leur coût et leur complexité limitent leur utilisation habituelle.

Dans la mesure où le chlore et ses dérivés sont des substances oxydantes, leur présence dans le milieu donne lieu à une variation de la valeur du potentiel redox de l'eau, (ORP, *oxidation-reduction potential*). Maintenir une valeur d'ORP dans le rang assigné nous assure que la quantité d'oxydant est la

correcte afin de garantir le processus de désinfection. Cependant, il n'existe pas de relation directe entre la valeur d'ORP et la concentration de chlore, c'est-à-dire, que des eaux de différente nature avec des concentrations de chlore différentes peuvent présenter la même valeur d'ORP. L'Organisation Mondiale de la Santé a adopté en 1972 une valeur de 650mV comme valeur adéquate pour eau purifiée. La German Standards Agency a adopté une valeur de 750mV pour la désinfection des piscines publiques, alors que le National Swimming Pool Institute a proposé une valeur de 650mV pour les spas publics.

Le potentiel redox du milieu est facilement mesuré par le biais d'électrodes permettant aussi de réaliser des lectures en continu du débit d'eau traitée. De plus, il s'agit d'éléments très bon marché. Tout cela rend particulièrement intéressant le contrôle de la chloration par le biais du potentiel redox. Néanmoins, il convient d'être conscients de que la mesure d'ORP peut uniquement être prise comme système d'orientation. Tout changement de la nature de l'eau (y compris en maintenant le niveau de chlore constant) provoque un changement de la lecture du potentiel redox.

En général, il n'est pas recommandé d'utiliser l'ORP comme système de surveillance du chlore libre, sauf lorsque les caractéristiques de l'eau traitée, ni sa composition, ni le pH, ni la température ne changent. Il ne s'agirait pas non plus d'un système adéquat dans les installations où le niveau exact de chlore présent dans l'eau est important, comme la chloration d'eau potable.

La méthode ampérométrique est un autre système de détermination du chlore. Dans ce système, est introduit un senseur au sein de la solution où dans un des électrodes se produit la réduction du chlore présent dans l'eau, ce qui génère une intensité de courant proportionnel à la concentration de chlore. Il existe plusieurs versions pour déterminer uniquement du chlore libre ou pour déterminer du chlore total avec des caractéristiques bien différenciées, qui seront présentées à la section 2.6. Le grand avantage de cette méthode est la possibilité de réaliser des lectures en continu, ce qui permet un contrôle en ligne de la chloration avec des lectures réelles des valeurs de chlore dans l'échantillon.

2.6 DÉTERMINATION DE CHLORE EN CONTINU

Précédemment ont été exposées les méthodologies analytiques les plus habituelles en ce qui concerne la détermination de chlore libre. Aujourd'hui, les seules méthodologies recommandées pour les mesures en continu, sont la méthode colorimétrique avec DPD et la méthode ampérométrique. Ci-dessous sont débattues chacune de ces techniques.

2.6.1 Colorimétrie

La base de la méthode colorimétrique est l'ajout de réactifs qui donnent lieu à un développement de couleur. L'applicabilité de cette méthode à niveau de laboratoire ou comme mesure ponctuelle, est indiscutable dans la mesure où l'ajout séquentiel de réactifs est effectué sur un échantillon statique qui est toujours le même. Cependant, sur les systèmes en continu l'aliquote à analyser change continuellement.

Les systèmes colorimétriques de lecture en continu sont basés sur un échantillonnage temporisé d'eau et sont ajoutés tous les réactifs dans chacun de ces échantillons d'eau. Ainsi, nous disposons de lectures ponctuelles réparties dans le temps, qui nous donnent une idée de l'évolution du système, mais non la lecture à chacun des moments. Ce fait est encore plus grave si nous tenons compte que l'ajout et le mélange des réactifs et le développement de la couleur requièrent un certain temps, diminuant ainsi la fréquence d'échantillonnage. Un autre problème lié à la cinétique est la vitesse de réaction qui dépend de la salinité du milieu. Ainsi, dans des systèmes présentant des variations considérables de salinité, il pourrait se produire que pour le temps établi de réaction, la couleur se développe dans certains cas et dans d'autres cas non.

Pour tout cela, les équipements colorimétriques pour des déterminations en continu sont assez complexes. Ils incorporent des électrovalves pour réaliser l'échantillonnage et des pompes pour l'ajout de chacun des réactifs. L'automatisation de ces composants est aussi une question importante, étant donné que l'exactitude de la lecture dépend de leur bonne coordination. De plus, réaliser une bonne maintenance de chacun de ces composants et éviter les obstructions des circuits hydrauliques de l'équipement sont primordiaux afin de garantir des lectures correctes. Cela est évident, mais il convient de souligner qu'il y a une consommation continue de réactifs qu'il faut recharger à une fréquence déterminée et dont l'épuisement pourrait donner lieu à l'absence de lecture.

Cette méthode est considérée destructive, dans la mesure où les échantillons d'eau qui ont été analysés ne peuvent pas être de nouveau utilisés en raison du fait qu'on leur a ajouté les réactifs qui développent la couleur. Ce détail est important dans le cas des eaux potables.

Enfin, il convient de remarquer que ce système ne peut pas être utilisé avec des systèmes qui travaillent à pression, dans la mesure où ils pourraient endommager la partie optique, celle-ci étant la partie la plus délicate.

En résumé, nous pourrions conclure que le système colorimétrique constitue le système de référence, mais que son adaptation aux systèmes de lecture en continu n'est pas encore bien réglée.

2.6.2 Ampérométrie

Le système ampérométrique de mesure, bien qu'il soit plus complexe conceptuellement, est beaucoup plus simple à installer que le système colorimétrique. Simplement, il s'agit d'un senseur composé de plusieurs électrodes sur la surface desquelles le chlore réagit en donnant lieu à une intensité de courant. Il existe plusieurs technologies appliquées à ce type de mesure, que nous détaillons ci-dessous.

Senseur galvanométrique

Système électrodique formé par deux électrodes Cu et Pt (Au) entre lesquelles est créée une différence de potentiel adéquate pour la réduction du chlore. De fait, ce serait l'équivalent à une pile galvanique qui donne lieu à un voltage qui correspond à celui du chlore. Ainsi, il s'agit d'un voltage généré spontanément et comme tel, totalement incontrôlé. Tout type de changement dans l'environnement électrodique: pH, conductivité, composition de l'échantillon,... peut provoquer des changements du voltage généré avec le changement correspondant dans la réponse électrique obtenue. Dans la mesure où la surface de l'électrode en cuivre est continuellement oxydée, les changements de sa composition provoqueraient aussi la modification du voltage généré. Pour cette raison, il est très important de toujours maintenir la surface propre, et habituellement, sont utilisés des systèmes abrasifs de nettoyage (brosses ou boules en verre accélérées par la vitesse de l'eau) qui ne sont pas toujours efficaces à 100%.

À cause de ce mode de fonctionnement, se produit une perte continue de masse de l'électrode qui entraîne un besoin de rechargement après l'usure. De plus, les cas de dérèglement des équipements sont fréquents, dans la mesure où il n'est pas possible de garantir que le système électrodique travaille toujours en conditions optimales.

Senseur potentiostatique de cellule fermée

Dans le but d'avoir un contrôle sur le voltage de travail, c'est-à-dire, travailler à potentiel constant (=potentiostatique) il faut utiliser une électrode de référence qui nous permet de régler le voltage appliqué, en fonction des changements observés dans le milieu. La mesure est ainsi beaucoup plus stable que dans le cas du senseur galvanométrique.

Pour éviter que les électrodes de travail se salissent, tout le système électrodique est séparé du moyen de lecture par une membrane sélective qui permet de cette manière, de discriminer parmi les différents types d'analyte avec le même système de lecture. La cellule dans laquelle sont submergées les électrodes contient un électrolyte support qui permet la diffusion du chlore depuis l'eau jusqu'aux électrodes. La composition de cet électrolyte change continuellement, en raison du flux continu de matière vers l'intérieur et pour cela, il convient de le remplacer avec une certaine fréquence.

Un problème associé à l'utilisation de membranes est leur colmatage. Si la membrane s'obstrue, l'analyte ne peut atteindre le système électrode et l'on n'obtiendra pas la réponse correcte. Pour cette raison, l'utilisation de ce type de senseurs n'est pas recommandée, en eaux sales.

D'autre part, la résistance à la pression et à la dépression de ce type de membranes est basse, et leur rupture est fréquente.

Senseur ampérométrique de cellule ouverte

Dans le but de remédier aux limites décrites précédemment, ont été développés des senseurs de toute dernière technologie qui permettent de travailler dans des conditions particulièrement complexes.

Ce type de senseurs n'est pas protégé par une membrane, et donc tous les problèmes dérivés de leur utilisation sont évités, en particulier ceux de maintenance. En revanche, les électrodes de travail sont exposées au milieu à tout moment et sont donc susceptibles d'être salies. Cependant, l'utilisation d'un système de nettoyage électrochimique, pendant lequel est changé le potentiel de travail afin de produire une réaction électrochimique, permet de remettre la surface électrode à son état original.

ITC a développé son propre senseur basé sur cette technologie pour la détermination de chlore libre dans tout type d'eaux, les eaux potables comme les eaux de process avec une concentration maximale de 3 mg/l et un pH de travail entre 6.5 et 9.0.



2.7 PROTOCOLE DE CHLORATION

De manière générale, il est possible d'établir un protocole de chloration qui comprend plusieurs étapes:

1. Estimation de la demande de chlore ou point de rupture. Cela nous permettra de déterminer la dose de chlore à fournir afin d'obtenir une désinfection complète de l'eau.
2. Établissement de la valeur de Ct à laquelle nous devons travailler. Cela permettra de régler le temps de contact entre l'hypochlorite et les microorganismes afin d'obtenir une eau désinfectée. Habituellement, le dosage de désinfectant est réalisé dans un réservoir dans le réseau de distribution pour permettre l'homogénéisation maximale de l'eau. Les dimensions des réservoirs de traitement doivent tenir compte du paramètre Ct pour permettre un temps de permanence adapté au traitement. En général, il est considéré qu'à pH inférieur à 8, un temps de contact de 30 minutes est suffisant. Il est recommandé que le temps de permanence de l'eau dans le réservoir soit inférieur à 48 heures. Si le réservoir est déjà en fonctionnement avant le commencement de la chloration et qu'il n'est pas suffisamment dimensionné, il peut se produire que le temps de permanence de l'eau ne soit pas suffisant, ce qui donne lieu à une mauvaise désinfection. Dans ces cas, pour maintenir le paramètre Ct il est nécessaire d'augmenter la dose de traitement.
3. Une fois l'eau désinfectée, il faut vérifier, au moyen d'un kit de détermination de chlore, que la quantité de chlore résiduel au point le plus éloignée du réseau de distribution est dans les limites stipulées par les autorités compétentes. Si cela n'est pas le cas, il faut augmenter la dose de chlore fournie, après la désinfection. En revanche, si la dose est trop élevée – comme ce serait le cas dans un réservoir non suffisamment dimensionné -, l'ajout d'un réducteur (comme le bisulfite sodique ou le métabisulfite) permet l'élimination du chlore résiduel jusqu'au niveau nécessaire.

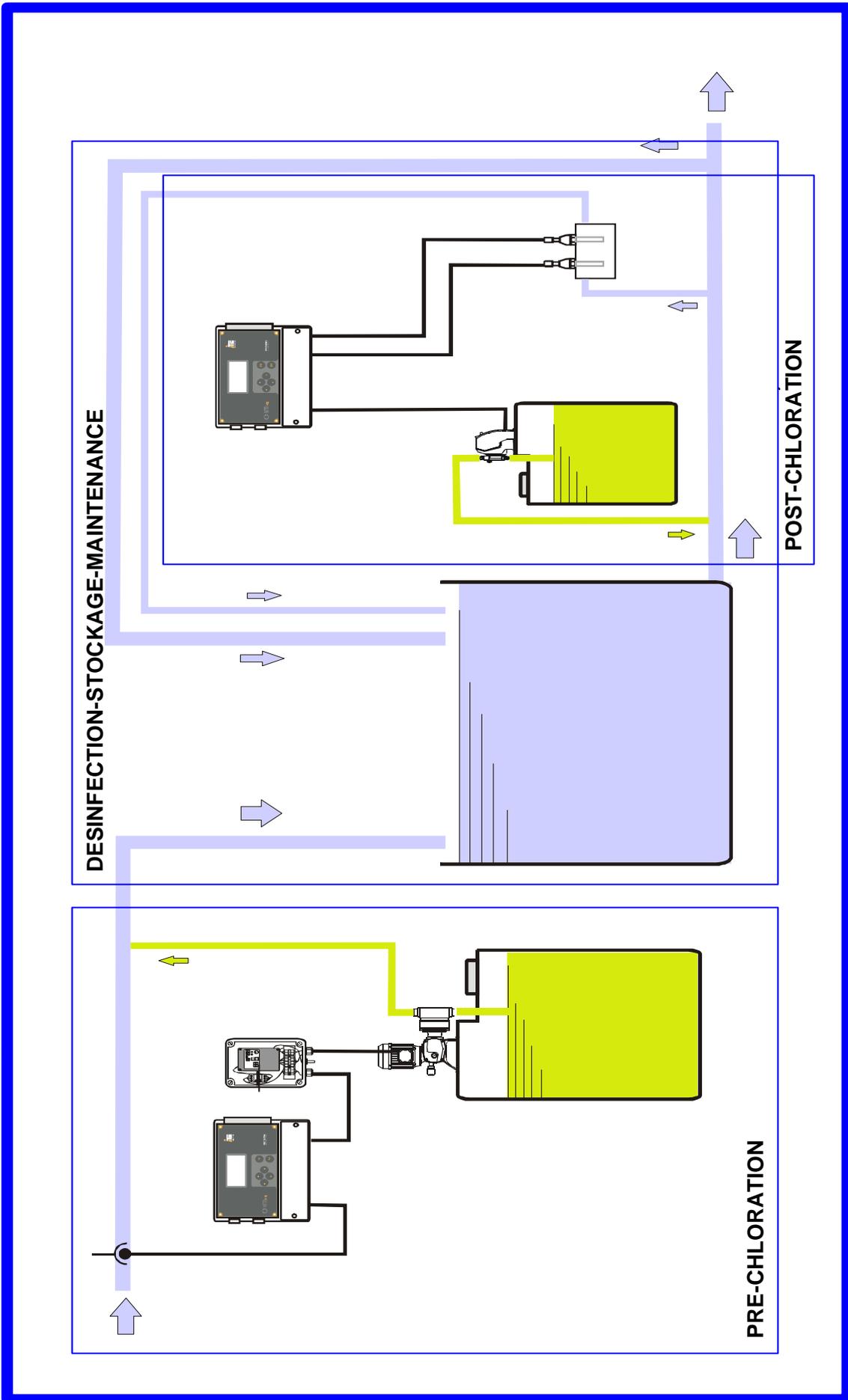
Ce procédé est purement d'orientation et ne constitue en aucun cas une recette exacte à suivre. En cas de doute, il est recommandé de demander conseil aux organismes compétents en matière de Santé Publique.

3. ÉQUIPEMENTS DE CHLORATION

Dans le processus de désinfection de l'eau de consommation, il est possible de différencier trois étapes, au cours desquelles il est nécessaire d'appliquer des procédés différenciés :

- A. **Pré-chloration:** Au cours de cette étape, est ajoutée la quantité de chlore nécessaire afin de dépasser le point de rupture. De cette manière on garantit que le niveau de chlore résiduel est l'adéquat pour la postérieure désinfection. Habituellement, le dosage du chlore est effectué de manière proportionnelle au débit de l'eau qui doit être traité.
- B. **Désinfection-stockage-maintenance:** Cette étape se déroule à l'intérieur du réservoir et représente le moment de la désinfection proprement dite. Si le temps de permanence est élevé, il faut maintenir un niveau résiduel de chlore qui garantit qu'il n'y ait pas eu une nouvelle pollution microbologique. Pour réaliser l'apport correspondant de chlore, il faut disposer d'un système de surveillance et de dosage dans le réservoir. La même méthodologie de travail est applicable aux réservoirs qui agissent comme poumon et qui reçoivent de l'eau qui a déjà été préalablement traitée ou dans un système fermé comme une piscine.
- C. **Post-chloration:** Une fois que l'eau est sortie du réservoir et est distribuée pour son utilisation, il est possible qu'il soit nécessaire de réaliser un apport additionnel de chlore afin de garantir que les niveaux de chlore résiduel soient ceux exigés aux points de consommation. Il s'agit de stations de rechloration dans de vastes réseaux de distribution. Dans ce cas, l'équipement de contrôle en ligne revêt une grande importance, dans la mesure où il sera responsable final de maintenir le niveau de chlore.

Nous décrivons ci-dessous, la nature des équipements qui sont utilisés à chaque étape.



3.1 PRÉ-CHLORATION

L'objectif principal de cette étape est l'ajout de la quantité de chlore nécessaire afin de garantir que le point de rupture a été dépassé. Habituellement, il s'agit de l'étape du processus de chloration pendant laquelle est nécessaire la plus importante quantité de chlore, et pour cela il faut utiliser des pompes de taille relativement grande.

La chloration peut être réalisée sur la ligne de d'apport de l'eau, avant son entrée dans le réservoir de désinfection. Pour cette raison, la forme d'arrivée de l'eau marquera deux méthodologies de travail différenciées, dans le but de maintenir la même proportion de chlore dans l'eau.

1.- Entrée de l'eau à débit constant: Dans ce cas, pour maintenir une proportionnalité entre l'eau d'entrée et le chlore, il suffit de maintenir un débit constant de dosage. Au moment où l'entrée de l'eau se produit, il faut aussi mettre en marche la pompe de dosage. En fonction des besoins de chlore du système, il existe deux modèles de pompe adéquats : **DOSITEC MD** (pour débits de jusqu'à 9l/h) y **DOSTEC** (pour des débits supérieurs).

2.- Entrée de l'eau à débit variable: Si le débit de l'eau n'est pas constant, il faut disposer d'un système de surveillance de celui-ci qui nous permette de régler le débit dosé conformément à cette variable. Dans ce cas, le système est plus complexe que le précédent, dans la mesure où il faut disposer de plus d'éléments. Ainsi, pour des débits inférieurs à 9l/h il est possible d'utiliser un **compteur d'eau** qui envoie des pulsations à une pompe **DOSITEC Q** qui travaille de manière proportionnelle à ces pulsations. Au contraire, pour des débits supérieurs, le système est composé par un contrôleur **WTRpro Q** qui modifie le réglage de la pompe **DOSTEC** afin de maintenir la proportionnalité préalablement fixée.

Pour une correcte chloration au cours de cette étape, il faut que la demande de chlore (point de rupture) de l'échantillon d'eau ait été bien déterminée. Dans des installations où l'apport d'eau est réalisé à partir d'une origine unique dont la nature ne varie pas (comme par exemple un puits ou une source), ce paramètre est clairement défini. Cependant, si la composition de l'eau d'apport peut être variable (mélange de différentes origines, par exemple), il faut connaître les besoins de chacun des échantillons d'eau et effectuer la chloration à des niveaux qui dépassent le point de rupture de chacun des échantillons. En cas contraire, il peut se produire que le niveau de chlore résiduel soit inférieur à celui nécessaire, si l'eau d'apport est riche en eau avec un haut niveau de demande de chlore.

La taille du réservoir de désinfection/stockage et le paramètre C.t sont d'autres facteurs à tenir en compte pour la définition de la quantité de chlore à ajouter dans la mesure où cela déterminera le niveau de chlore résiduel nécessaire à la correcte désinfection.

Ainsi, il est possible d'établir une formule générale pour calculer le dimensionnement de la pompe doseuse:

$$Q_{Cl} = \frac{Q_{H_2O} \times (D + C)}{10 \times \%}$$

Où:

Q_{Cl} est le débit d'hypochlorite exprimé en l/h

Q_{H_2O} est le débit d'eau à traiter en m³/h

D est la demande de chlore de l'échantillon d'eau, exprimée en ppm (mg/l)

C est le niveau de chlore résiduel conformément au paramètre C-t, exprimé en ppm

% est le pourcentage de pureté de l'hypochlorite commercial

Exemple

Nous avons besoin de chlorer une eau de source avec un débit d'entrée dans la cuve de traitement de entre 50 et 250 m³/h. La demande de chlore de l'échantillon est de 10 mg/l et conformément au temps de permanence dans le réservoir (et selon les tableaux C-t) est nécessaire un résiduel de chlore de 1 mg/l. Le produit que l'on prétend injecter est un produit commercial avec une richesse de 5% en chlore actif.

Dans la mesure où le débit en eau est variable, il convient de faire une estimation du débit de pompe nécessaire en conditions extrêmes.

Ainsi, lorsque le débit de l'eau est de 50 m³/h, le calcul est

$$Q_{Cl} = \frac{50 \times (10 + 1)}{10 \times 5} = 11 \text{ l/h}$$

Et pour 250 m³/h

$$Q_{Cl} = \frac{250 \times (10 + 1)}{10 \times 5} = 55 \text{ l/h}$$

Donc, pour pouvoir garantir la chloration correcte au cours de cette étape, il faut disposer d'une pompe de la gamme **DOSTEC** capable de doser 55l/h, avec un système **WTRpro Q**. Cette gamme de pompes peut être réglée jusqu'à 10% de son débit nominal, de manière à couvrir les besoins dans les deux cas extrêmes.

3.2 STOCKAGE- MAINTENANCE

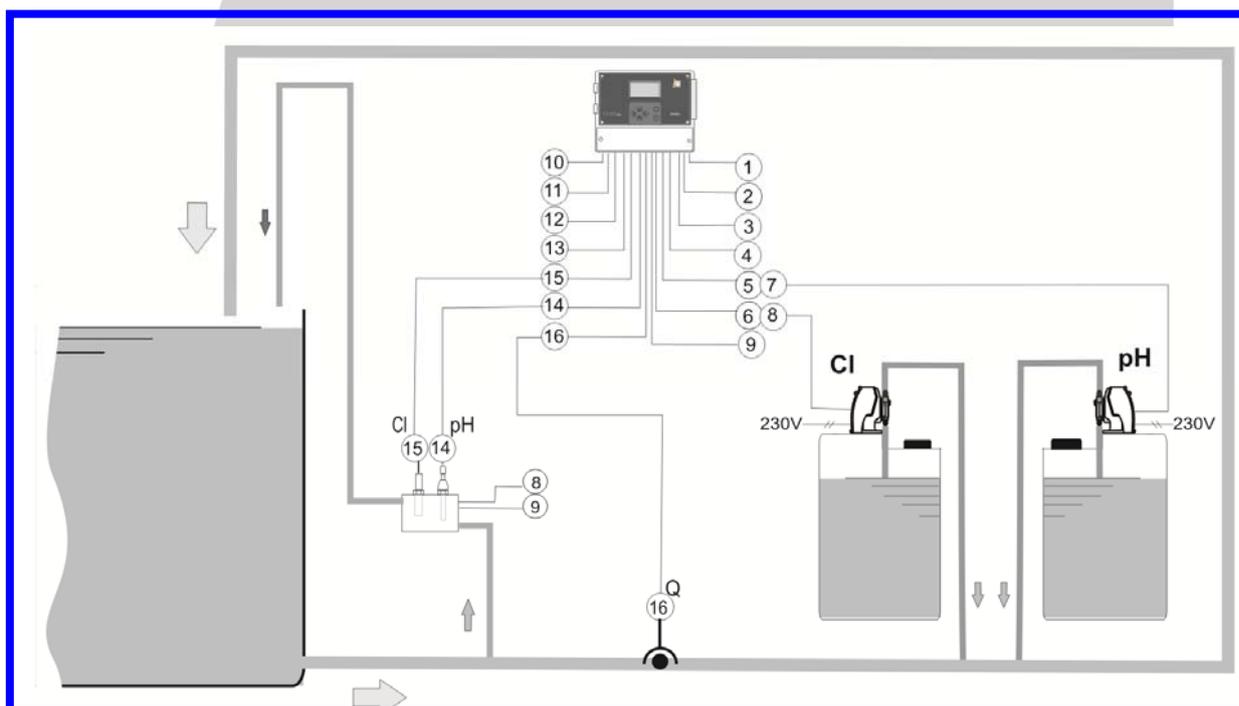
Une fois écoulé le temps minimum de contact nécessaire, on peut considérer que l'eau a été dûment chlorée et donc qu'elle est désinfectée. Cela est garanti par la présence d'un niveau de chlore résiduel dans l'eau stockée dans le réservoir. Néanmoins, si le temps de permanence est trop élevé, il est possible que se produisent des pertes de chlore qui mettent en danger sa désinfection. Pour cette raison, il faut maintenir un niveau résiduel de chlore non seulement pendant la désinfection, mais aussi pendant le stockage. Le processus de chloration est mené à terme, au cours de cette étape, en accord avec une consigne de chlore libre résiduel. C'est à dire, que de manière continue, on

surveille le contenu de chlore à l'intérieur du réservoir, et que l'on effectue des ajouts de produit chimique pour maintenir les niveaux exigés.

Cette approche est similaire à la gestion d'un réservoir d'eau qui agit comme poumon, dans le but de pouvoir réaliser une distribution à tous les moments de forte demande, comme dans les hôtels, les usines,... Dans ce cas, l'eau qui alimente le réservoir est une eau de consommation dûment chlorée, mais pendant son stockage, le chlore présent peut disparaître et il s'avère nécessaire de réaliser des apports supplémentaires qui maintiennent le niveau conformément à la normative en vigueur pour les eaux destinées à la consommation humaine.

On utiliserait aussi le même équipement pour maintenir le niveau de chlore dans une piscine ou dans toute autre installation consistant en un réservoir (plus ou moins grand) qui contienne de l'eau préalablement chlorée et où il est nécessaire de maintenir un niveau déterminé de chlore libre.

Le matériel nécessaire comprend un équipement de surveillance et de contrôle de chlore libre **WTRpro pH-Cl** avec les **senseurs de chlore et de pH** correspondants et une pompe doseuse **DOSTEC** ou **DOSITEC** en fonction du débit nécessaire à apporter.



L'équipement **WTRpro pH-Cl** réalise la mesure de la quantité de chlore présente dans l'eau à tout moment. Dans la mesure où la lecture des senseurs de chlore dépend du pH de l'échantillon où elle est prise, il est nécessaire de réaliser sa correction en tenant compte de la valeur du pH. Une fois la lecture du chlore effectuée, si la valeur obtenue est inférieure à la consigne requise, l'équipement **WTRpro** met en marche la pompe doseuse jusqu'à ce qu'elle l'atteigne. L'apport additionnel de chlore est contrôlé de manière proportionnelle à la différence entre la lecture réelle et la consigne. Ainsi, la quantité ajoutée

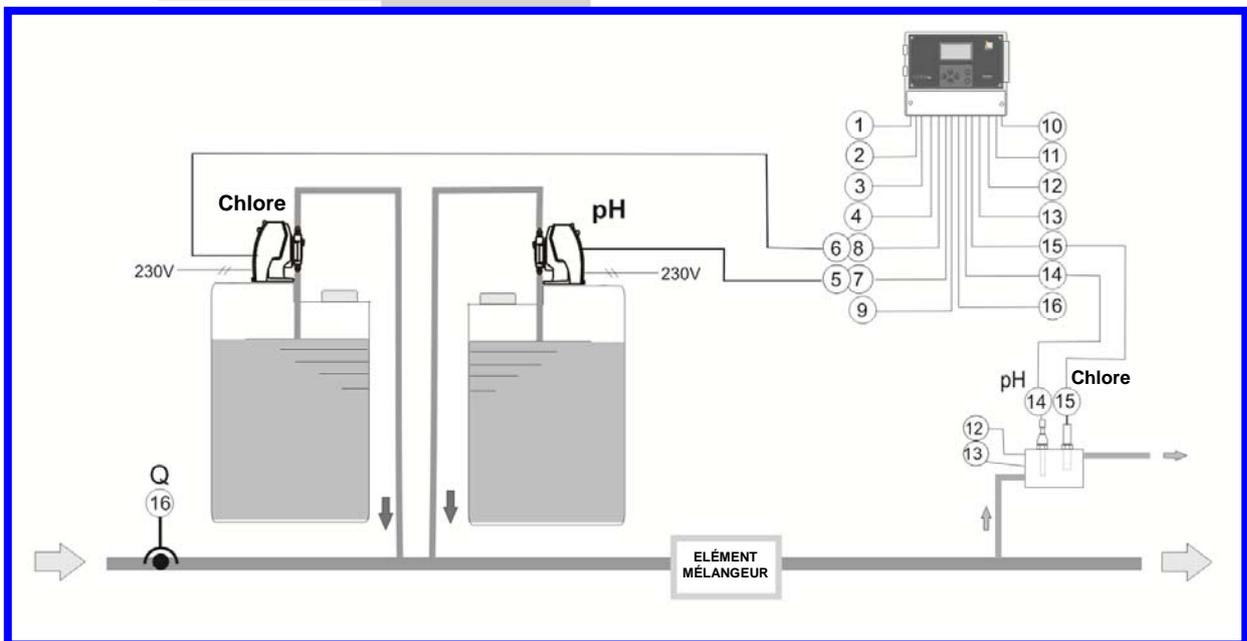
est plus petite à mesure que nous nous approchons de la consigne, dans le but de minimiser le surdosage. La sortie de contrôle peut être un relais proportionnel ou un signal analogique 4-20mA. Le premier nous permet de contrôler une pompe **DOSITEC MD**, alors que pour contrôler une pompe **DOSTEC** il faut utiliser un signal 4-20mA.

Dans la mesure où les apports de chlore sont toujours effectués sur le même échantillon d'eau, il est important de garantir son homogénéisation appropriée afin d'éviter des lectures et des actions erronées qui pourraient entraîner des surdosages.

3.3 POST-CHLORATION

Dans certaines occasions, il est possible qu'il soit nécessaire de réaliser un apport additionnel de chlore dans la conduite même. C'est le cas, par exemple, d'une station de pompage et de re-chloration sur la ligne principale de distribution de l'eau.

Le matériel nécessaire pour le contrôle et le réglage de la quantité de chlore libre dans un système en ligne est exactement le même que dans le cas du dosage à l'intérieur d'un réservoir: un équipement de surveillance et de contrôle de chlore libre **WTRpro pH-Cl** avec les **senseurs de chlore et de pH** correspondants et une pompe doseuse **DOSTEC** ou **DOSITEC** en fonction du débit qu'il est nécessaire d'apporter ; mais la mise en marche doit être configurée de manière différente.



Au dosage en ligne, la quantité de chlore ajoutée est mélangée avec une portion concrète d'eau, dans la mesure où celle-ci flue de manière continue. L'effet accumatif des ajouts successifs à l'intérieur d'un réservoir, n'existe pas. Ainsi, pour atteindre la consigne, il n'est pas possible d'utiliser l'approche proportionnelle, comme dans le cas d'un réservoir, puisque chaque portion d'eau qui est traitée passe une seule fois par le point de traitement. Dans ces

situations est utilisé un algorithme mathématique proportionnel-intégral (PI), capable de réaliser des réglages en ligne.

L'approche proportionnelle-intégrale est basée sur l'analyse continue de l'effet de chacun des ajouts de produit chimique. Pour cela, la lecture du contenu de chlore est effectuée après l'injection. De cette manière, l'équipement de contrôle est capable d'analyser quel a été l'effet sur le niveau de chlore libre du dernier ajout de chlore et en fonction de cela règle de nouveau la quantité qu'il faut ajouter à l'injection suivante de chlore. Pour qu'un processus PI soit couronné de succès, il s'avère nécessaire que tous les autres paramètres qui ont une influence sur la lecture (pH, débit de l'eau,...) restent constants, en effet en cas contraire, des changements de lecture de chlore dus à ces paramètres seraient attribués de manière erronée aux changements de la quantité dosée.

Dans de nombreux cas de post-chloration en ligne, la quantité d'eau qui passe par les tuyaux est variable puisqu'elle dépend de la consommation instantanée d'eau. Par exemple, la consommation d'eau à l'aube est beaucoup plus basse que tôt le matin. Si les changements de débit d'eau sont fréquents, on peut avoir le cas de ne jamais parvenir à la consigne. Pour éviter ce type de problématique, ITC a développé des équipements spéciaux de contrôle **WTRpro PIQ** qui, en sus des entrées habituelles pour pH et chlore, comprennent aussi un point de connexion d'un débitmètre. De cette manière, il est possible de réaliser une lecture continue du débit instantané et de corriger immédiatement la quantité de chlore dosé.

Considérons le cas d'une installation avec un débit de $10\text{m}^3/\text{h}$, où la consigne de chlore libre est 1mg/l et que celle-ci est obtenue lorsque la pompe doseuse travaille à 20% de sa capacité. À un moment déterminé le débit qui circule par l'installation passe instantanément à $20\text{m}^3/\text{h}$. Si l'équipement de contrôle est un **WTRpro pH-CI** il ne détecte pas le changement de débit et la pompe doseuse continue à travailler dans les mêmes conditions et, dans la mesure où le débit circulant est doublé, la quantité de chlore présent passe à 0.5mg/l . À partir de ce moment le contrôleur met de nouveau en marche le processus d'approche à la consigne jusqu'à l'atteindre une autre fois. Néanmoins, si l'équipement installé avait été un **WTRpro PIQ**, le changement de débit aurait été détecté immédiatement et le contrôleur aurait modifié le réglage de la pompe doseuse en fonction de ce nouveau débit. Ainsi, dans l'exemple précédent, la pompe serait passée automatiquement à 40% et la consigne se maintiendrait à 1mg/l tout le temps.