

UNIVERSITE DE NANTES
FACULTE DE PHARMACIE

ANNEE 2003

THESE
POUR LE
DIPLOME D'ETAT
DE DOCTEUR EN PHARMACIE

PAR Grégory LINQUETTE

Présentée et soutenue publiquement le 26 mai 2003

Production, qualité, gestion et prix de l'eau potable :
Application à la ville de Nantes

Président : Madame B.M. IMBERT Professeur de bactériologie-virologie
Directeur de Thèse : Monsieur A. PINEAU Professeur de toxicologie
Membre du jury : Monsieur V. MENEUX Pharmacien

A Madame B-M. Imbert

Maître de conférences de Bactériologie-Virologie à la faculté de pharmacie de Nantes,

Vous me faites l'honneur de présider cette thèse, je vous en remercie sincèrement.

A Monsieur le Professeur A. Pineau
Professeur de Toxicologie à la faculté de pharmacie de Nantes,

Je vous remercie sincèrement pour toute l'aide que vous m'avez apportée ainsi que pour votre
disponibilité et votre gentillesse

Avec toute ma reconnaissance.

A Monsieur V. Meneux

Docteur en pharmacie exerçant à Clisson et, avant tout, ami de longue date,

Je le remercie pour sa disponibilité exemplaire, ses conseils avisés, son soutien, son matériel informatique... (la liste des services rendus serait trop longue)

Je ne saurais trop te remercier d'avoir accepté de juger mon travail.

A Monsieur Le Guennic

Responsable de l'eau potable à la DDASS de Loire-Atlantique,

Je vous remercie pour toute la documentation et les informations que vous m'avez gracieusement fournies, votre accueil toujours chaleureux et votre disponibilité.

A Anne-Laure qui partage ma vie et qui a supporté ma (rare) mauvaise humeur au cours de ce travail

A mes parents qui m'ont permis de faire ces longues études

A Arnaud (merci pour l'ordinateur)

A ma famille

A mes amis

SOMMAIRE

<u>LISTE DES ABREVIATIONS</u>	9
<u>INTRODUCTION</u>	10
<u>TRAITEMENT DES EAUX BRUTES</u>	14
1. <u>INTRODUCTION</u>	15
2. <u>FILIERE DE TRAITEMENT</u>	15
2.1 <u>LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE TRAITEMENT DES EAUX DE</u> <u>SURFACE DESTINEES A L'ALIMENTATION HUMAINE</u>	15
2.2 <u>FILIERE NANTAISE DE TRAITEMENT DES EAUX BRUTES</u> Erreur! Signet non défini.	
3. <u>CONCLUSION</u>	60
<u>QUALITE DE L'EAU POTABLE</u>	62
1. <u>LEGISLATION</u>	63
2. <u>LES 63 PARAMETRES DE LA QUALITE</u>	64
2.1 <u>PARAMETRES ORGANOLEPTIQUES</u>	64
2.2 <u>PARAMETRES PHYSICOCHIMIQUES EN RELATION AVEC LA</u> <u>STRUCTURE NATURELLE DES EAUX</u>	69
2.3 <u>PARAMETRES CONCERNANT DES SUBSTANCES INDESIRABLES</u>	93
2.4 <u>PARAMETRES CONCERNANT LES SUBSTANCES TOXIQUES</u>	130
2.5 <u>PESTICIDES ET PRODUITS APPARENTES</u>	144
2.6 <u>PARAMETRES MICROBIOLOGIQUES</u>	146
3. <u>LA QUALITE DE L'EAU POTABLE A NANTES</u>	152
3.1 <u>RESULTATS DES ANALYSES</u>	152
3.2 <u>ANALYSE DES REULTATS</u>	154
4. <u>CONCLUSION</u>	Erreur! Signet non défini.
<u>GESTION ET PRIX DE L'EAU</u>	157
1. <u>GESTION DES EAUX : LES AGENCES DE L'EAU</u>	158
1.1 <u>ORIGINE ET RÔLES</u>	158
1.2 <u>PRESENTATION DU BASSIN LOIRE-BRETAGNE</u>	158
1.3 <u>STRUCTURE</u>	Erreur! Signet non défini.
1.4 <u>RESSOURCES</u>	160
1.5 <u>AIDES ACCORDEES</u>	162
1.6 <u>LE BILAN FINANCIER</u>	165
2. <u>LE PRIX DE L'EAU</u>	165
2.1 <u>INTRODUCTION</u>	165
2.2 <u>LES TROIS ELEMENTS DU PRIX DU SERVICE DE L'EAU</u>	166
2.3 <u>LES VARIATIONS DU PRIX DU SERVICE DE L'EAU</u>	168
2.4 <u>CONCLUSION</u>	170
<u>CONCLUSION</u>	172
<u>TABLE DES MATIERES</u>	172
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	178
<u>LISTE DES TABLEAUX</u>	182
<u>LISTE DES FIGURES</u>	183
<u>ANNEXES</u>	185

LISTE DES ABREVIATIONS

ADN : acide désoxyribonucléique
AFNOR : association française de normalisation
CAG : charbon actif en grains
CAP : charbon actif en poudre
CEE : communauté économique européenne
COD : carbone organique dissout
CODB : carbone organique dissout biodégradable
COT : carbone organique total
cu : coefficient d'uniformité
DDASS : direction départementale des affaires sanitaires et sociales
DDT : dichlorodiphényltrichloroéthane
EDF : électricité de France
FNDAE : fond national de développement des adductions d'eau
HPA : hydrocarbures polycycliques aromatiques
MES : matières en suspension
NF : norme française
OMS : organisation mondiale de la santé
PCB : polychlorobiphényles
PCT : polychloroterphényles
PMPOA : programme de maîtrise des pollutions d'origine agricole
PVC : polychlorure de vinyle
SADGE : schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux
SAGE : schéma d'aménagement et de gestion des eaux
SEC : substances extractibles au chloroforme
TA : titre alcalimétrique
TAC : titre alcalimétrique complet
te : taille effective
THM : trihalométhanes
Tr : taux de rejet
TVA : taxe sur la valeur ajoutée
UC : unité de couleur
UJ : unité Jackson
UV : ultra-violet
Vh : vitesse de Hazen
VNF : taxe sur les voies navigables
Vs : vitesse de sédimentation
Y : taux de conversion

INTRODUCTION

L'eau est indispensable à la vie telle que nous la connaissons et est, de loin, le principal composant de la matière vivante. C'est chez les végétaux que sa teneur est globalement la plus importante (95% dans le melon, 85% dans la carotte, 78% dans le blé en herbe) ; chez l'homme, l'eau représente en moyenne 60% du poids d'un adulte et jusqu'à 75% de celui du nourrisson. Cette quantité d'eau est inégalement répartie dans le corps humain (figure 1) (12).

L'homme adulte a besoin quotidiennement de 2,5 litres d'eau pour compenser les pertes physiologiques dues aux selles, à la respiration et à la sueur essentiellement. L'apport est assuré par les aliments à raison d'environ 1 litre d'eau et il nous faut donc absorber 1,5 litre d'eau supplémentaire.

Toutefois, l'eau d'alimentation ne représente qu'une faible portion (7%, tableau 1) de notre consommation domestique journalière (en moyenne 147 litres/jour/personne). A cette consommation domestique individuelle, il faut ajouter les consommations collectives (écoles, lieux de travail, hôpitaux, lavages des rues,...). On aboutit alors à un total moyen par habitant de 210 litres/jour d'eau « rendue potable » (11).

En effet, avant d'arriver au robinet, l'eau d'alimentation est prélevée soit dans les eaux souterraines (60% des ressources en France, 34% en Loire-Atlantique) qui s'accumulent dans des réservoirs naturels aquifères (libres dans les alluvions, captifs entre deux couches géologiques imperméables), soit dans les eaux de surface des lacs, fleuves et rivières (40% des ressources en France, 66% en Loire-Atlantique) (19). Cette eau est ensuite traitée, stockée et distribuée aux consommateurs.

L'eau est le produit alimentaire dont la qualité est la plus rigoureusement réglementée et contrôlée à tous les stades de la production (lieux de captages et usines de traitements) et de la distribution.

De plus, l'eau est au cœur de la plupart des activités humaines de production : agriculture, production industrielle et production d'énergie principalement (figure 2). On estime les besoins du pays à 40 milliards de m³/an.

Pour satisfaire à tous ses besoins, la France reçoit en moyenne 440 milliards de m³/an d'eau (dont 60% s'évaporent, 15% ruissellent et 25% s'infiltrent dans le sol) sous forme de précipitations (pluie, neige, grêle). L'indice d'exploitation (volume estimé des besoins/volume annuel moyen des apports naturels) est donc d'environ 20%, ce qui situe la France dans la moyenne des pays industrialisés. Les ressources naturelles sont importantes

(5 000 m³/habitant/an) et le pays possède un degré d'indépendance tout à fait confortable puisque seulement 8% de nos ressources viennent de pays étrangers (11).

Enfin, les eaux usées (domestiques, industrielles et les eaux pluviales), chargées en polluants divers, doivent être collectées grâce au réseau d'assainissement puis dépolluées (stations d'épuration collectives ou assainissement individuel par l'intermédiaire de fosses septiques notamment) afin que leurs rejets dans les cours d'eau ou la mer ne dégradent pas les milieux naturels.

En France, ce sont les communes qui sont responsables de l'approvisionnement en eau potable et de la dépollution collective des eaux usées. Elles assurent ce service directement en régie (pour Nantes et 25% des Français) ou bien délèguent à des entreprises privées spécialisées (75% des Français) (Annexes 4 et 5).

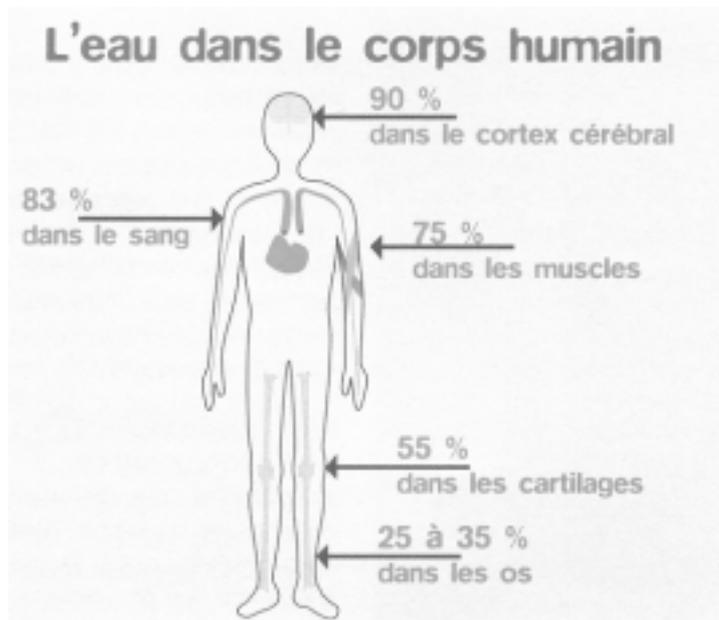


Figure 1 : répartition de l'eau dans le corps humain (11)

	Pourcentages par secteur de l'eau consommée à des fins domestiques
Boisson	1%
Nourriture	6%
Sanitaires	20%
Vaisselle et linge	22%
Bains et douches	39%
Lavage voiture, jardin	6%
Domestiques divers	6%

Tableau I : importance de l'eau dans la vie quotidienne (12)

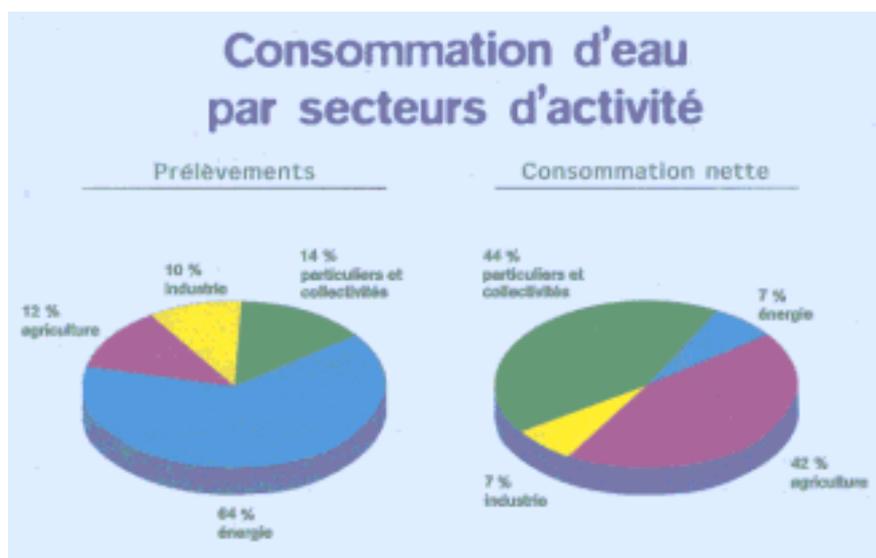


Figure 2 : consommation d'eau par secteur d'activité (11)

TRAITEMENT DES EAUX BRUTES

1. INTRODUCTION

Depuis septembre 1989, l'eau qui alimente la ville de Nantes en eau potable est pompée 15 km en amont de l'usine de traitement des eaux de La Roche (commune de Doulon), à Mauves/Loire, pour être hors d'atteinte du front salin et du bouchon vaseux présents dans l'estuaire. La conception de la station de pompage permet l'aspiration de l'eau dans les conditions d'étiage les plus sévères (amplitude de la marée à Mauves : maximum proche de 3 m, à Nantes, maximum proche de 6 m). En effet, elle admet un pompage pour une hauteur du fleuve comprise entre -1 m et +9,3 m. Un dégrillage ainsi qu'une cloison siphoniale protègent la station des pollutions de surface. De même, en période de crue, le pompage du sable est évité (25).

Ces installations fonctionnent entièrement automatiquement, sous la conduite et la surveillance (des capteurs physico-chimiques permettent une surveillance constante de l'eau pompée) de l'usine de La Roche (débit nominale : 300 000 m³/jour).

Le Bilan sanitaire 2002 de la DDASS (Annexe 2) concernant le contrôle des eaux brutes destinées à la consommation humaine, nous indique qu'elles sont de médiocre qualité sur le plan bactériologique et chimique, avec de fortes fluctuations saisonnières (catégorie A 3 : eaux brutes de qualité médiocre selon le décret N°89-3 du 3/01/1989). En conséquence, ces eaux devront subir un traitement de « potabilisation » complet, conformément à l'article 16 du Décret N°89-3 du 3/01/1989, avec « traitement physique, chimique poussé, affinage et désinfection » (Annexe 3).

2. FILIERE DE TRAITEMENT

2.1 LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE TRAITEMENT DES EAUX DE SURFACE DESTINEES A L'ALIMENTATION HUMAINE (17, 18, 23)

2.1.1 La clarification

C'est une étape indispensables pour les eaux de surface et les eaux souterraines karstiques (provenant de certains plateaux calcaires).

La clarification combine les procédés de coagulation-floculation, de décantation ou de flottation et de filtration. Elle permet d'obtenir une eau limpide par l'élimination des matières en suspension.

Il arrive qu'elle soit précédée d'un traitement de préoxydation par un agent chloré ou par l'ozone, qui, selon le cas, aura pour but de favoriser la coagulation, ou de protéger les décanteurs et les filtres contre le développement d'organismes vivants, ou encore d'empêcher la formation d'oxydes de fer ou de manganèse.

➤ *La coagulation-floculation*

La coagulation est le phénomène de déstabilisation des particules en suspension colloïdale « stable », pour permettre leur agrégation (floculation) quand le contact a lieu.

En effet, la turbidité est due à des particules en suspension, le plus souvent chargées négativement aux pH des eaux naturelles. Le signe de ces charges peut évoluer en fonction du pH avec un point d'équilibre situé vers pH 5.

Deux particules colloïdales au voisinage l'une de l'autre se repoussent du fait de leur charge négative, leur couche d'hydratation positive ne suffisant pas à saturer les charges négatives, et resteront de ce fait en suspension.

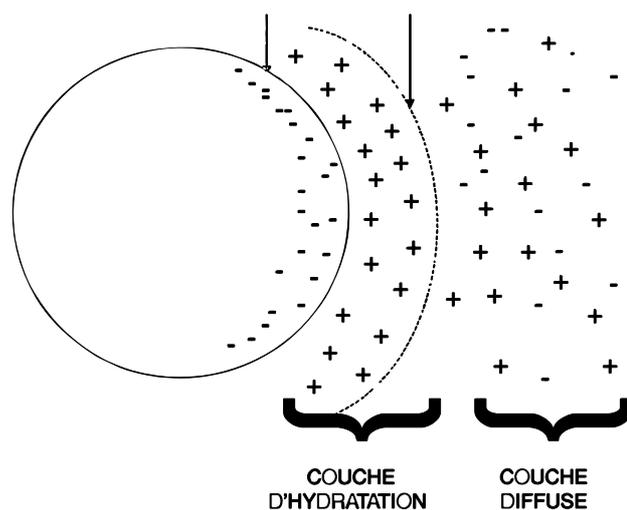


Figure 3 : Répartition des charges à la surface des particules (27)

Si l'on ajoute un cation trivalent, c'est à dire fortement électropositif (sulfate d'aluminium ou chlorure ferrique), celui-ci vient s'insérer dans la couche d'hydratation et neutralise la plus

grande partie des charges négatives de la particule. De plus, il s'hydrolyse, conduisant à la formation de précipités de trihydroxydes métalliques, amorphes et floconneux, qui vont piéger ou emprisonner les colloïdes pour les faire décanter. On aboutit à la formation d'une « micelle » électriquement neutre que l'on appelle particule « déstabilisée » qui peut avoir un avenir double :

Soit (cas le plus fréquent) rester dans cet état et dans ce cas, dépourvue de charge électrique externe, elle ne pourra plus repousser sa voisine mais, au contraire, elle va l'attirer proportionnellement à sa masse du fait de la loi de gravitation universelle et l'ensemble va sédimenter (phénomène de floculation).

Soit (quand, par exemple, les conditions d'agitation ne sont pas respectées et que la quantité de réactif est trop faible) se replier sur la particule elle-même, conduisant à une neutralisation insuffisante de sa charge et à son maintien en état de déstabilisation négatif. En revanche, un excès de réactif lui confère une charge positive et la restabilise.

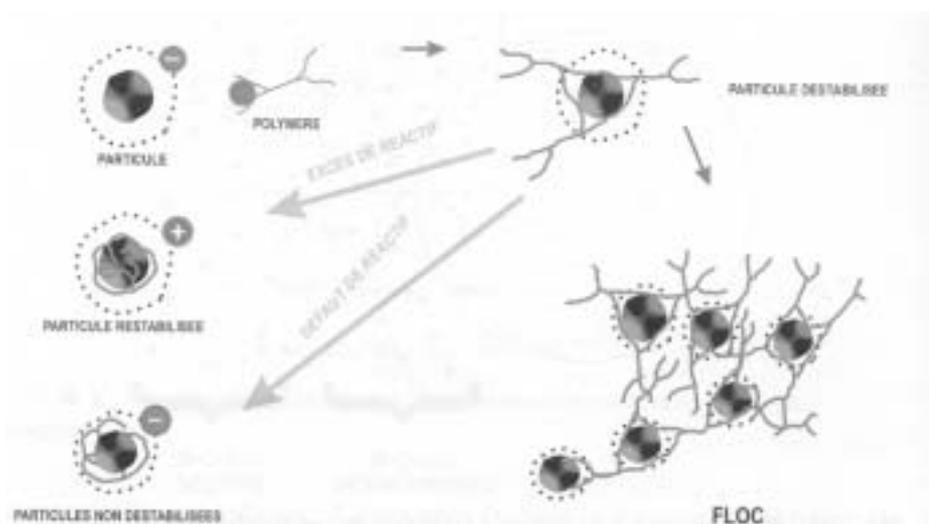


Figure 4 : Mécanisme de la floculation et incidence d'un excès ou d'un défaut de réactif (27)

Pour éviter ce genre de problème et favoriser l'augmentation de taille des particules, on utilise des adjuvants de floculation. Ceux-ci sont susceptibles de former par eux-mêmes de véritables réseaux capables de s'associer à l'aluminium, lui-même adsorbé sur la particule (exemples : la silice activée, le charbon actif en poudre, l'alginate de sodium, du polyacrylamide,...). Alors, le floculat obtenu est plus dense et sédimente mieux.

Pour déterminer la quantité de coagulant (voire de flocculant) à ajouter afin de provoquer la floculation ainsi que les conditions optimales de la réaction, on utilise la méthode dite du « Jar-Test » :

L'appareillage utilisé est généralement constitué d'un agitateur à hélices à 6 postes, muni d'un variateur de vitesse. A chacun des postes est disposé un bécher rempli d'un volume d'eau brute à traiter identique.

On introduit une dose croissante de coagulant sous agitation rapide de quelques minutes et on ajuste éventuellement le pH.

On ajoute le réactif flocculant toujours sous agitation rapide.

Agitation lente pendant 5 à 10 minutes de manière à avoir une floculation optimale puis décantation pendant 20 à 60 minutes.

On observe que la floculation augmente avec la dose de coagulant au fur et à mesure où les particules sont déstabilisées, passe par un maximum se traduisant par la limpidité du surnageant et, la dose augmentant, les particules se chargeant positivement se restabilisent à nouveau, se repoussent et ne flocculent plus.

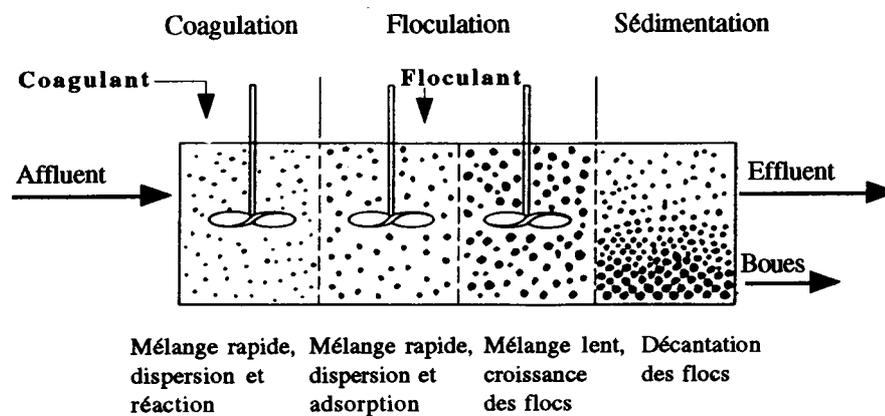


Figure 5 : Schématisation de la séquence des opérations de l'expérience de « Jar-test » (23)

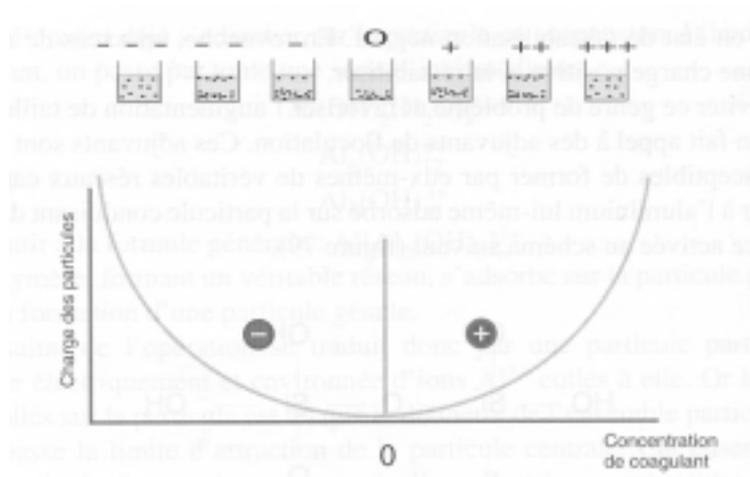


Figure 6 :Evolution de la charge des particules en fonction de doses croissantes de réactif (Jar-test) (27)

On peut effectuer cette réaction :

à pH variable, doses de coagulant et floculant constantes pour la détermination du pH optimal,

à pH optimal, doses croissantes de coagulant et dose constante de floculant pour la détermination de la dose idéale de coagulant,

à pH optimal, dose de coagulant idéale et doses de floculant variables pour la détermination de la dose de floculant à utiliser.

➤ **La décantation**

Cette étape suit la coagulation-floculation et comprend généralement deux étapes, la décantation et la filtration en profondeur. La décantation peut être remplacée par la flottation.

▪ **Théorie**

La décantation (ou sédimentation) correspond au déplacement d'une particule ou d'un ensemble de particules dans un liquide au repos ou en mouvement. Pour une particule isolée, de nature bien définie, sédimentant dans un liquide au repos, sa vitesse de sédimentation s'exprime de manière assez simple selon la loi de Stokes :

$$V_s = [d^2 g(\rho_S - \rho_L)] / 18\mu$$

avec d : diamètre moyen de la particule (en m)

g : accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m/s}^2$)

ρ_S : masse volumique de la particule (en kg/m^3)

ρ_L : masse volumique de l'eau (environ 1000 kg/m^3)

μ : viscosité de l'eau à la température considérée (en Poiseuille)

Cette loi permet de calculer le temps mis par une particule (de caractéristiques physiques connues) pour décanter sur une hauteur donnée. Par exemple, la décantation sur 1 mètre d'eau à 10°C , d'un grain de sable de $10 \mu\text{m}$, nécessite environ 10 minutes, celle d'un colloïde minéral de $0,1 \mu\text{m}$, environ 15 années, et celle d'un floc d'hydroxyde d'aluminium de $500 \mu\text{m}$, environ 40 minutes.

Toutefois, en traitement d'eau potable, il faut décanter en flux continu donc dans un liquide en mouvement. De plus, il est pratiquement impossible de connaître les dimensions et les masses volumiques de chaque particule et certaines d'entre elles peuvent continuer à flocculer pendant la sédimentation. La théorie devient donc compliquée et il faut alors déterminer expérimentalement, sur une colonne de décantation, la courbe de répartition des vitesses des particules de l'eau à décanter.

Pour chaque type d'appareil à décantation (décanteur), est déterminée une vitesse ascensionnelle (ou vitesse de Hazen) qui est proportionnelle au débit d'alimentation en eau brute rapporté à la surface de décantation.

Dans tous les cas, les particules éliminées sont celles dont la vitesse de sédimentation V_s est supérieure à la valeur de la vitesse de Hazen V_h propre à chaque appareil.

▪ Types de décanteurs

Il existe deux groupes de décanteurs : les décanteurs statiques et les décanteurs dynamiques.

Décanteurs statiques : ces ouvrages utilisent uniquement l'accélération de la pesanteur.

Décanteurs couloirs (V_h de 1 à $1,5 \text{ m/h}$) : ce sont de simples couloirs superposés avec une pente inclinée à l'envers. Leur longueur doit permettre au floculat d'arriver au fond avant que l'eau n'ait quitté le couloir.

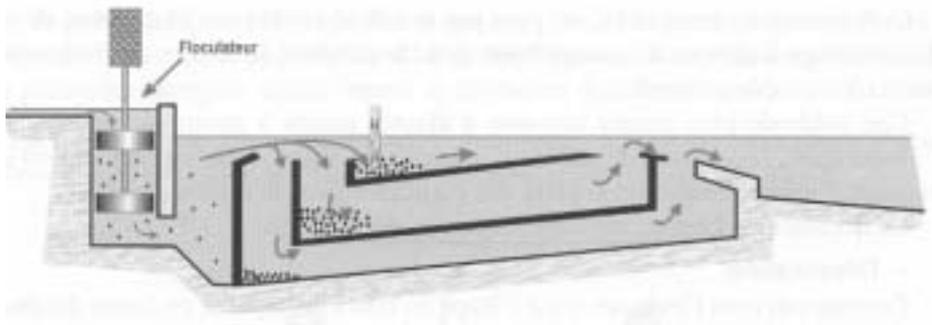


Figure 7 : Décanteur couloir (27)

Décanteurs lamellaires (Vh de 5 à 6 m/h) : ces appareils sont dérivés d'une observation simple ; si l'on prend deux éprouvettes à pied et que l'on fasse flocculer le contenu puis que l'on incline l'une en laissant l'autre verticale, on constate que le flocculat de l'éprouvette inclinée va gagner plus rapidement le fond que celui de l'éprouvette droite, tout simplement parce qu'il glisse le long de la paroi, alors que dans l'éprouvette droite, le flocculat est obligé de chasser l'eau pour gagner le fond.

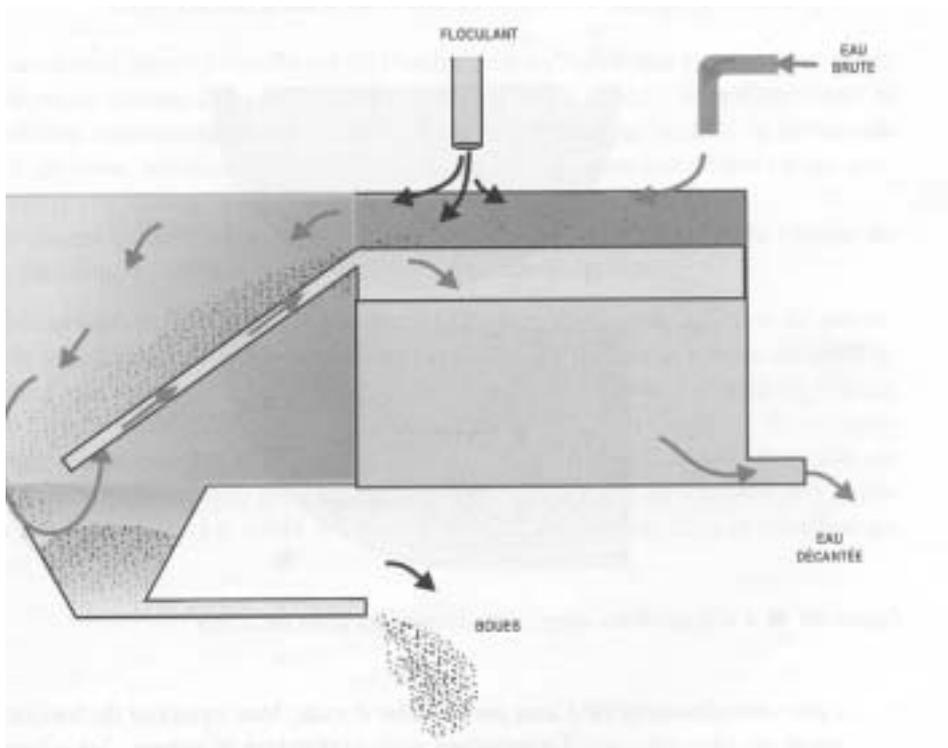


Figure 8 : Principe du décanteur lamellaire (27)

Décanteurs dynamiques :

Décanteurs à lit de boues : ils ont pour principe de réaliser la floculation dans une zone de boue, maintenue à un niveau constant dans un décanteur à flux vertical. Ainsi, le

temps d'agitation lente de l'eau coagulée (la phase de floculation), devient beaucoup plus important, de même que le volume en solides dans la zone de floculation. La vitesse de floculation est donc considérablement accrue et, par suite, les floccs étant plus gros, la vitesse ascensionnelle de l'eau à traiter V_h peut être plus élevée dans la zone de décantation.

Par entraînement mécanique de l'eau : leur principe consiste à ajouter un flocculant à l'eau à traiter et à la faire circuler dans un conduit semi-cylindrique à ciel ouvert muni d'un balancier. Celui-ci imprime à l'eau flocculée un mouvement ascendant. Le conduit s'élargissant, la vitesse de l'eau diminue et, à une certaine hauteur, la vitesse ascensionnelle de l'eau contrebalance exactement la vitesse de sédimentation du flocculat qui se concentre dans cette zone créant un « lit de boue » au travers duquel l'eau va filtrer en continu. L'eau ainsi décantée est récupérée dans des « goulottes », véritables gouttières situées de part et d'autre du décanteur. Un résultat équivalent peut être obtenu avec une roue à aube.

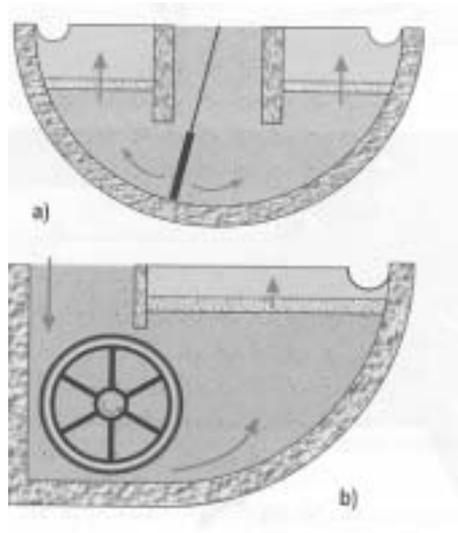


Figure 9 : Modèles simples de décanteurs à lits de boues (a : à balancier et b : à roue à aube) (27)

Par entraînement de l'eau par cloche à vide (type de décanteur utilisé à Nantes) : le principe reste le même (les boues ou flocculat sont maintenues en suspension entre deux eaux et jouent le rôle de filtre ascendant). Le vide est fait dans la cloche ce qui aspire l'eau brute ; il est ensuite cassé et l'eau aspirée retombe, créant un mouvement ascendant dans l'ouvrage. V_h est de l'ordre de 4 m/h (on ne peut guère dépasser cette valeur sinon le lit de boues est entraîné à la surface). Afin d'accélérer V_h , on rajoute des plaques de tôle au niveau

du lit de boue, recréant les conditions d'une décantation lamellaire, ce qui permet d'atteindre des valeurs de 6 à 8 m/h.

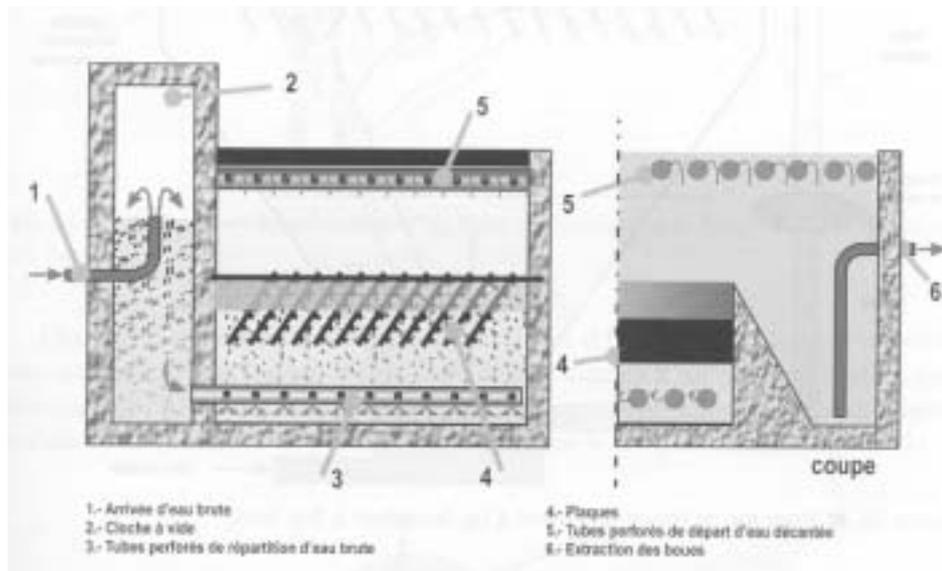


Figure 10 : Principe de fonctionnement d'un décanteur à cloche à vide (27)

Une petite quantité d'eau est aspirée au niveau des cloches. Durant cette phase, les floccs ont tendance à sédimenter. Le volume d'eau aspiré est relâché brusquement. Durant cette phase, les floccs sont entraînés par le flux ascendant. Les pulsations vont être entretenues pour créer un lit de boues.

Décanteurs à floc lesté (V_h de 10 à 12 m/h) : le lestage du floc est obtenu par injection de microsable de façon à alourdir celui-ci, ce qui permet d'augmenter la vitesse ascensionnelle V_h de l'eau, sans que le floc ne remonte à la surface, par une agitation hydraulique ou mécanique au fond du décanteur. Pour ce faire on injecte du sable calibré (25 à 100 μm) en même temps que les réactifs de floculation. Le floc se fixe sur les grains de sable et décante beaucoup plus vite. Ce sable est récupéré dans les boues, lavé et réutilisé en continu.

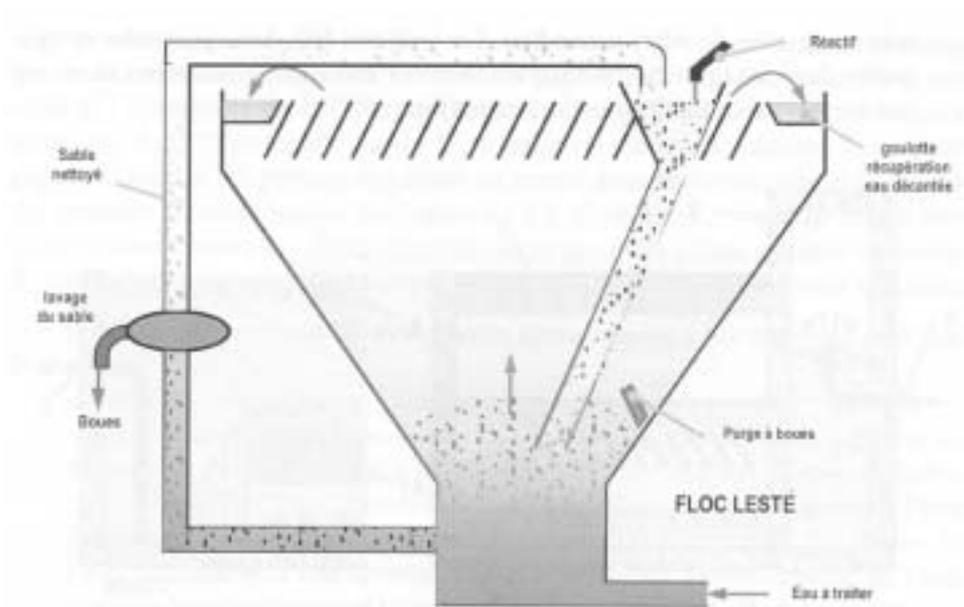


Figure 11 : Principe de fonctionnement d'un décanteur à floc lesté (27)

➤ **La flottation**

La flottation est une opération du traitement des eaux de surface assez peu utilisée en France, comparativement à la décantation. Toutefois, elle présente un intérêt pour la clarification des eaux contenant des algues et/ou des faibles valeurs de turbidité.

Le principe de base est de générer des bulles d'air afin qu'elles « s'attèlent » aux particules en suspension pour les faire flotter. La théorie et l'expérience montrent que le diamètre optimal des bulles doit être compris entre 50 et 70 μm . Pour obtenir ce diamètre, il faut pressuriser l'eau à des pressions comprises entre 4 et 5 bars, puis la détendre brusquement.

Il existe un appareil de laboratoire (le « flottatest ») pour tester la flottation d'une eau après coagulation-floculation. Il est muni de récipients cylindro-coniques à la base desquels peuvent être délivrés des volumes variables d'eau pressurisée (à différentes pressions). Les résultats obtenus sont souvent exprimés en turbidité ou en quantité de matières en suspension (MES) restantes et toujours en fonction du rapport A_s , volume d'air/masse de solides à flotter (en m^3/kg ou cm^3/mg).

Par analogie avec la vitesse ascensionnelle (ou vitesse de Hazen) en décantation, on utilise le terme de vitesse descensionnelle en flottation. De la même manière, celle-ci correspond au débit d'eau à traiter rapporté à la surface au sol de la zone de flottation. Ainsi, les particules dont la vitesse de flottation est supérieure à la vitesse descensionnelle de l'eau seront attirer vers la surface.

Pratiquement, c'est une partie de l'eau traitée qui est pressurisée, et non pas l'eau coagulée-floculée à cause de la fragilité des floccs.

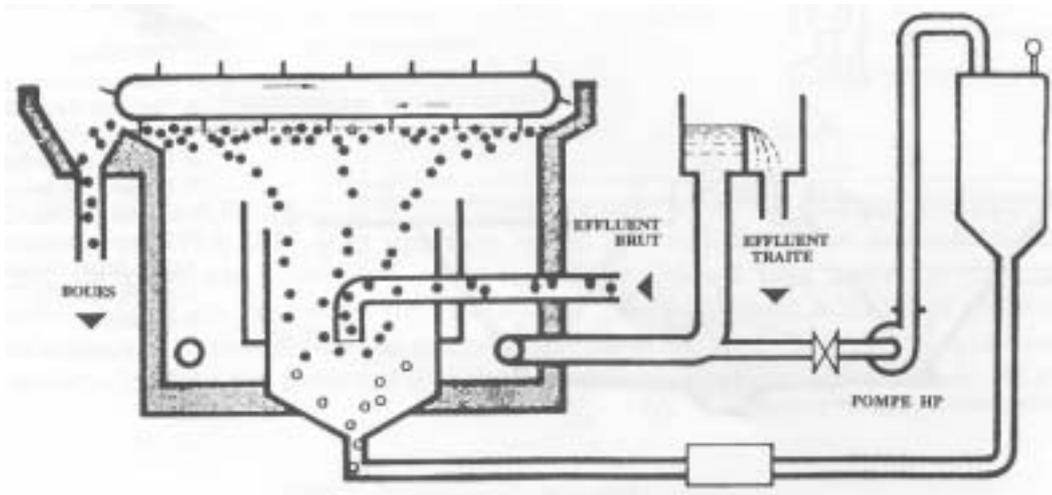


Figure 12 : Schéma de principe d'un flottateur à air dissous (RIVET P : guide de la séparation liquide-solide, 1981)

L'ozoflottation est une variante de la flottation qui a pour avantage d'utiliser conjointement la flottation ainsi que l'oxydation et la désinfection par l'ozone. Le réacteur est composé globalement de deux compartiments, l'un pour l'ozonation où le procédé produit de fines bulles de gaz ozoné (200 à 500 μm), l'autre pour la flottation. Le taux d'ozonation généralement utilisé est de 1 à 3 ppm. Il est utilisé spécialement dans le cas des eaux eutrophes, pour lutter contre les algues et le colmatage des filtres avant l'étape de filtration.

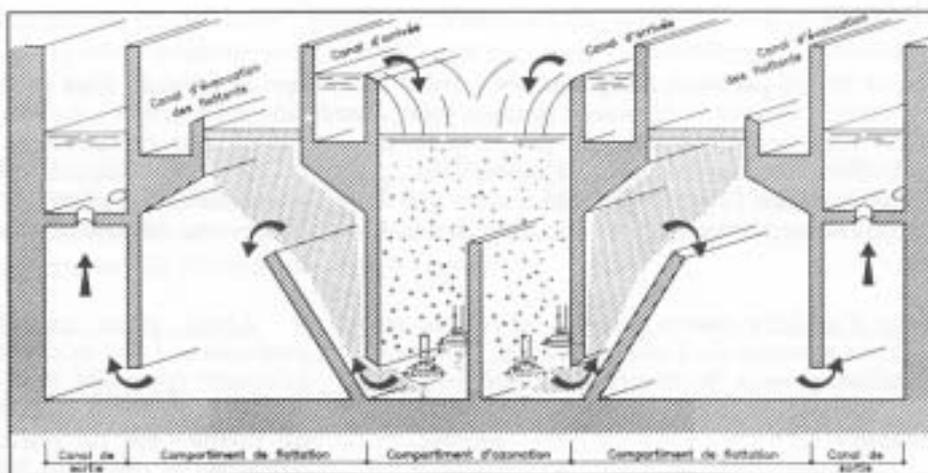


Figure 13 : Schéma de principe de l'ozoflottation (DERNAUCOURT J.C, DELAYE M. : l'eau, l'industrie et les nuisances, n°145, 1991)

➤ *La filtration en profondeur*

La filtration consiste à séparer les solides d'un liquide à l'aide d'un milieu filtrant. Ce milieu peut être de très faible épaisseur (papier, toile, membrane synthétique), il s'agit alors de filtration dite « en surface ». En fait, les milieux filtrants sont souvent constitués de masse granulaire épaisse et, dans ce cas, on parle de filtration « en profondeur » ou « dans la masse ». C'est ce procédé qui est majoritairement utilisé pour la clarification des eaux de surface, toujours (ou presque) après une coagulation-floculation et une décantation (ou flottation).

▪ **Théorie**

La perte de charge d'un filtre, même quand il est propre, est due à la résistance au passage de l'eau, créée par la masse filtrante. Elle est donnée par la formule suivante :

$$\Delta H/L = [kvU(1-\varepsilon)^2] / (gd^2\varepsilon^3\Phi^2)$$

avec ΔH : perte de charge (en m de colonne d'eau)

L : hauteur du lit filtrant (en m)

v : viscosité de l'eau (en m²/s)

U : vitesse de filtration (en m/s, rapport du débit d'alimentation sur la surface au sol du lit filtrant)

ε : porosité du lit filtrant

d : diamètre moyen des grains filtrants (en m)

Φ : facteur de forme (ou de sphéricité) moyen des grains

g : accélération de la pesanteur

k : constante de Kozeny (k=200)

Ainsi pour un lit filtrant de profondeur L=1 m, constitué d'un empilement (porosité 0,5) de grains de diamètre moyen 1 mm, dont le facteur de forme est de l'ordre de 0,7, la filtration d'une eau propre à une vitesse de 6 m/h et à une température de 10°C ($v=1,31 \cdot 10^{-6}$ m²/s), provoquera une perte de charge théoriquement égale à 18 cm de colonne d'eau (ce qui représente en fait la hauteur minimale d'eau restant au dessus du sable).

Evidemment, l'eau arrivant sur les filtres n'est pas pure et ceux-ci vont se colmater lors de la filtration. Aussi, la porosité ε va diminuer et $(1-\varepsilon)^2$ va augmenter. Donc la perte de charge va croître.

En pratique, il faudra bien suivre au cours de la filtration le fonctionnement des filtres et les laver régulièrement.

- **Diagnostic et suivi du fonctionnement d'un filtre**

C'est au niveau de l'usine de traitement que les contrôles analytiques de la filtration, en termes de perte de charge et de qualité de l'eau filtrée, sont les plus pratiqués et les plus utiles. Ils sont globalement de trois ordres :

- Contrôle de la granulométrie du milieu filtrant : il se fait grâce à une méthode normalisée (AFNOR NF X 11-507) qui conduit à la détermination de la taille moyenne en mm (ouverture du tamis laissant passer 50% de la quantité initiale de matériau), de la taille effective (t_e) en mm (celle qui laisse passer 10% ou qui retient 90%) et du coefficient d'uniformité (cu : rapport entre l'ouverture du tamis laissant passer 60% sur la taille effective).

En effet, à cause des lavages fréquents, une diminution parfois importante de la hauteur de lit est observée après quelques années de fonctionnement. Des prélèvements (carottages) au centre du filtre doivent être faits pour effectuer l'analyse granulométrique du milieu filtrant. Ce sont évidemment les petites tailles qui sont entraînées et par suite, le matériau granulaire restant, présente une taille effective trop importante. Un complément doit être réalisé en tenant compte des paramètres de l'analyse granulométrique (t_e et cu).

- Tracé des courbes de pression à l'intérieur du filtre : il est fondamental pour évaluer l'épaisseur de couche efficace dans le lit filtrant. Il faut pour cela que le filtre soit muni de prises de pression statique à différentes hauteurs de la masse filtrante. L'allure classique des courbes obtenues est la suivante :

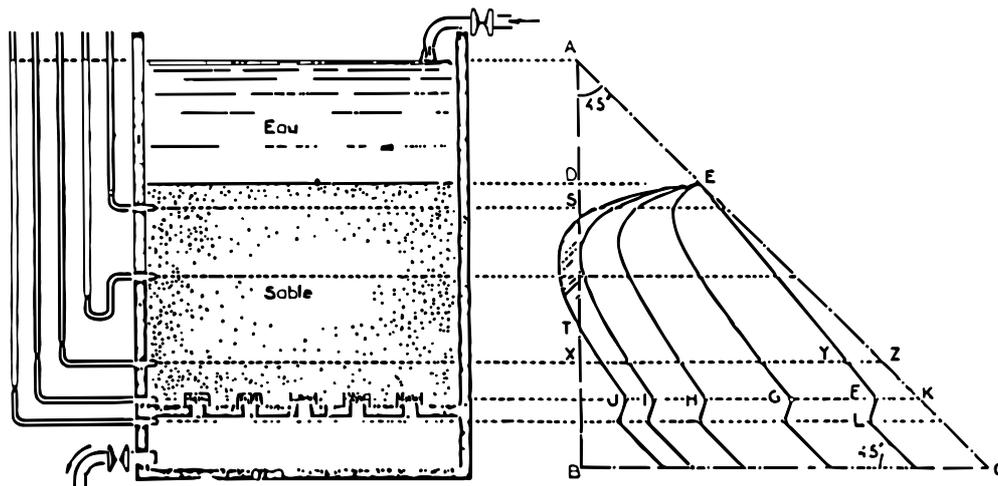


Figure 14 : Allures de courbes de pression dans un filtre sable (23)

Au début de la filtration, lorsque le filtre est propre, la courbe de pression à l'intérieur du filtre est une droite. En cours de filtration, le filtre s'encrasse et la porosité diminue. Si le dépôt était uniformément réparti dans tout le filtre, les courbes de pression seraient des droites de pente supérieure à celle du filtre propre. Comme seule une fraction du lit filtre effectivement, les courbes de pression présentent deux parties, une première partie concave dans laquelle la perte de charge est élevée, puis diminue jusqu'à devenir constante dans la seconde partie de la courbe. Lorsque cette seconde partie est parallèle à la courbe de perte de charge du filtre propre (cas fréquent), elle est la preuve de la présence de matériau propre au fond du filtre.

Plus la courbe de pression est concave vers le haut du filtre, plus celui-ci se colmatera rapidement et plus les lavages devront être fréquents.

Notons que lorsque le colmatage du filtre est particulièrement important dans les couches supérieures, il peut se produire une zone de dépression (par rapport à la pression atmosphérique) où l'air dissous dans l'eau va dégazer pour provoquer un phénomène dit « d'embolie gazeuse » dans le filtre (formation de microbulles empêchant la filtration).

- Suivi simultané de la perte de charge totale et de la qualité de l'eau filtrée, en fonction du temps : il permet de vérifier le bon fonctionnement du filtre. L'allure de la courbe de turbidité de l'eau filtrée en fonction du temps de filtration, comprend souvent trois périodes. Une période de maturation pendant laquelle l'eau est de plus ou moins bonne qualité, une période où la turbidité est faible et constante (fonctionnement normal du filtre) et une période finale où la turbidité augmente sans cesse (« crevaisson » ou fuite du filtre).

La courbe d'évolution de la perte de charge présente plutôt une croissance constante jusqu'à atteindre une perte de charge maximale admissible (définie par le type de filtre). Un filtre qui fonctionne correctement doit atteindre cette valeur à un temps t_2 légèrement inférieur à son

temps de « crevaison », correspondant à l'arrivée dans l'eau filtrée de la turbidité maximale (t_1).

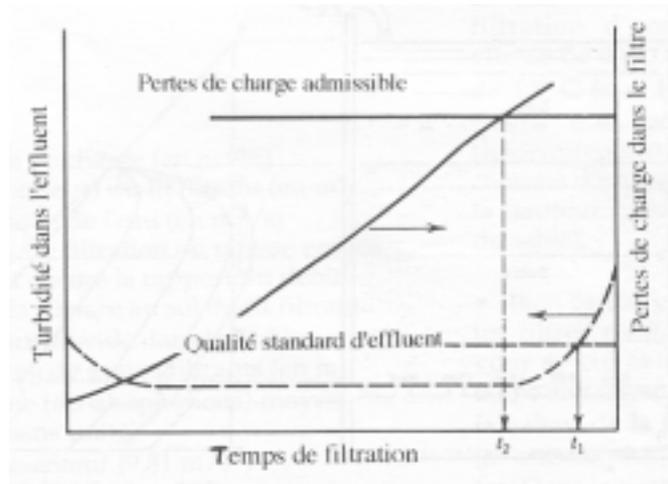


Figure 15 : Exemple de courbes de suivi de la qualité de la filtration en profondeur (MONTGOMERY J.M : water treatment principles and design, 1985)

- **Données sur la mise en œuvre de la filtration en profondeur**

On distingue deux types de filtres par la valeur de leur vitesse de fonctionnement : la filtration lente pour des vitesses de 2 à 10 $\text{m}^3 / \text{m}^2 / \text{jour}$ (soit 0,08 à 0,4 m/h), la filtration rapide à 5 à 10 m/h. Quel que soit le cas, les filtres sont toujours constitués d'un bâtiment rectangulaire (en béton armé), divisé en deux compartiments horizontaux par un faux plancher muni de crépines ou de dalles poreuses. Le plancher supporte le matériau filtrant sur une épaisseur variant de 0,5 à 2 mètres. L'eau décantée est admise au dessus du lit filtrant et est évacuée par dessous le plancher.

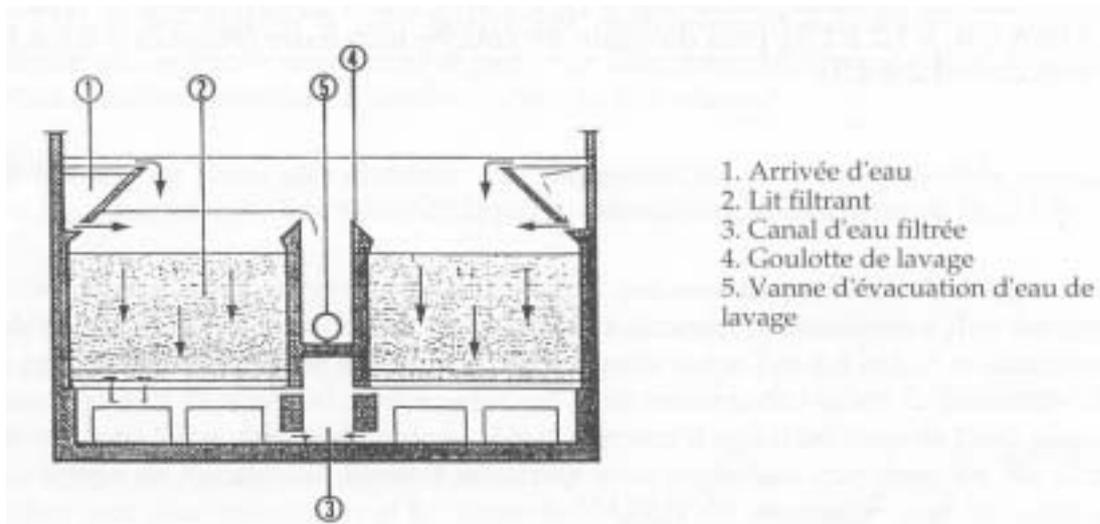


Figure 16 : Coupe d'un filtre gravitaire classique (Agence de l'eau Seine-Normandie : le traitement des eaux superficielles, volume 11)

Il existe également sur tous les filtres des dispositifs de lavage, le plus courant étant le lavage à contre-courant par injection d'un mélange air-eau, suivi d'un lavage à l'eau seule, par l'intermédiaire de buselures qui tapissent le fond des filtres.

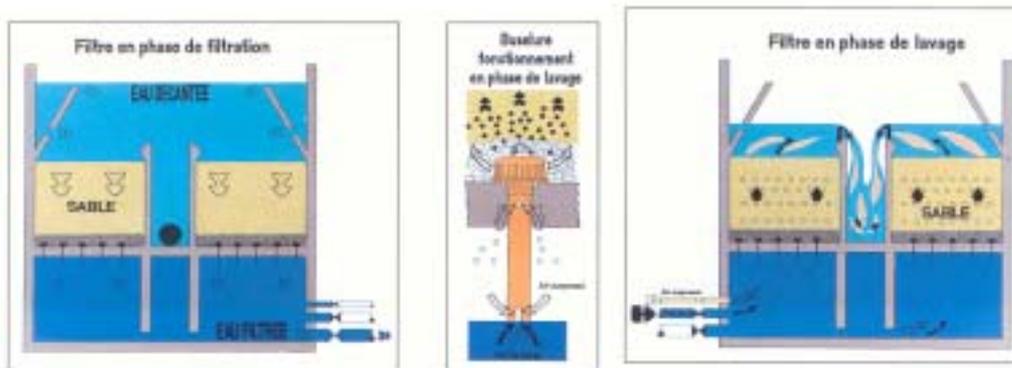


Figure 17 : Principe de fonctionnement d'un filtre à sable (Régie de l'eau)

Phase de filtration : l'eau décantée traverse gravitairement une couche de sable. Les floccs viennent se piéger entre les grains de sables. Cette masse filtrante tend à se colmater. Il devient nécessaire, au delà d'un certain seuil, de nettoyer le sable.

Phase de lavage : l'alimentation en eau est maintenue. Une vanne de mise à l'égout est ouverte. Après un détassage à l'air surpressé (par l'intermédiaire de buselures), un lavage à l'eau à contre courant (buselures) permet l'entraînement des particules piégées.

La filtration lente, précédée de deux étapes (dégrossissage à 3-6 m/h puis préfiltration à 1-2 m/h), est réalisée sur sable de granulométrie 0,8 à 1 mm. Un décolmatage de surface est effectué selon la perte de charge, et un lavage complet une fois par année. Ce procédé encore utilisé sur certaines anciennes filières présente de nombreux avantages. En effet, en plus de son pouvoir filtrant, il se forme à sa surface (au bout de quelques jours) une membrane biologique constituée d'une multitude de micro-organismes vivant aux dépens de différents produits présents dans l'eau (bactéries, plancton, protozoaires...). Par exemple, on obtient de bons résultats au niveau de la nitrification de l'azote ammoniacal et de la dégradation des matières organiques dissoutes biodégradables. Toutefois, elle nécessite une surface au sol extrêmement importante (environ 50 fois plus grande que pour la filtration rapide) et les problèmes de colmatage sont très fréquents malgré les étapes de préfiltration.

La filtration rapide sur « mono-couche » de sable est la plus répandue en traitement des eaux de surface. Selon les types de filtres, la hauteur du sable est comprise entre 0,8 et 1,5 m, sa taille effective est comprise entre 0,8 et 1,3 mm et son coefficient d'uniformité est de l'ordre de 1,3. La hauteur d'eau en surface varie entre 0,5 et 1 m, la perte de charge maximale pouvant atteindre 2,5 m de colonne d'eau. Le lavage est pratiqué en deux phases (parfois précédées d'un soufflage d'air de quelques secondes). La première phase a pour but d'agiter le lit par un mélange air-eau (50 à 60 m/h d'air et 5 à 10 m/h d'eau) pendant 5 à 10 minutes. Elle est suivie d'une phase de lavage à l'eau seule (20 m/h) jusqu'à l'obtention d'un effluent de lavage limpide (généralement plus de 10 minutes).

Le mode de filtration dit « bi-couche » est plutôt utilisé pour les eaux colmatantes. Sa mise en œuvre a pour but d'accroître la capacité des filtres, c'est à dire le temps de fonctionnement entre deux lavages. Le principe consiste à pré-filtrer l'eau sur une première couche (supérieure) de taille effective élevée, puis d'affiner la filtration sur une seconde couche (inférieure) de plus faible taille effective. De cette manière, il est possible de filtrer sur une profondeur de lit plus importante qu'en mode « mono-couche ». La même quantité de MES est alors retenue dans un plus grand volume de filtre et la perte de charge maximale est atteinte plus tardivement. L'inconvénient majeur de ce type de filtre est le risque d'inversion des couches pendant le lavage. Pour l'éviter, il faut utiliser en couche supérieure des matériaux de densité plus faible que le sable (anthracite, ponce ou encore le charbon actif), puis du sable en couche inférieure.

➤ *Conclusion sur la clarification*

La clarification a pour but la diminution de la charge en MES (source de turbidité) des eaux brutes. Quelque soit la filière de traitement utilisée pour les eaux superficielles, on retrouve toujours les 3 étapes suivantes :

- La coagulation-floculation : A Nantes, le coagulant utilisé est du sulfate d'alumine ;
- La décantation (ou la flottation) : L'usine de traitement à Nantes est équipée de décanteurs dynamiques à lit de boues obtenu par entraînement de l'eau par cloche à vide (type « Pulsator ») ;
- La filtration en profondeur : On utilise à Nantes la technique de filtration rapide sur « mono-couche » de sable.

La clarification permet, lorsque la dose de coagulant appliquée et les conditions de pH sont optimales, jusqu'à 90% d'abattement de la turbidité. Elle agit également sur les teneurs en sels métalliques (50 à 95% d'abattement) excepté les arséniates, chromates, bichromates et permanganates. Les HPA sont éliminés à 70% sauf les organochlorés volatils. Par contre, la clarification n'a que peu ou pas d'action sur les nitrates, les phénols, les acides humiques responsables d'une partie de la coloration des eaux et les agents de surface.

Le système de clarification choisit à Nantes est le plus répandu pour le traitement des eaux de surface. Il constitue un bon compromis entre l'efficacité d'élimination de la turbidité et le coût.

2.1.2 L'affinage

L'affinage de l'eau fait intervenir notamment des procédés d'ozonation, de filtration sur charbon actif ou de filtration sur membrane.

Il a pour effet l'oxydation et la biodégradation des matières organiques et l'élimination ou l'adsorption de certains micropolluants. En outre, il améliore les qualités organoleptiques de l'eau (saveur, odeur, limpidité).

Des traitements spécifiques sont mis en œuvre lorsque cela s'avère nécessaire, pour éliminer telle ou telle substance. Ceux-ci sont très variés et souvent associés à l'étape de clarification.

➤ *L'ozonation*

▪ **Propriétés de l'ozone**

L'ozone est un gaz produit à partir de l'oxygène de l'air (ou d'oxygène pur). Du fait de son instabilité, il est préparé sur le site d'utilisation. La molécule d'ozone (O_3) est soluble dans l'eau (13 fois plus que l'oxygène). Une fois dissous dans l'eau, l'ozone n'est pas stable. Outre sa forte réactivité avec de nombreux composés organiques et minéraux par lesquels il est consommé, l'ozone peut se dégazer (faible proportion) et se décomposer en entités radicalaires sous l'effet initiateur des ions hydroxyde (OH^-). Ces entités radicalaires peuvent elles-mêmes réagir à nouveau avec l'ozone pour régénérer le radical hydroperoxyde qui va aussi consommer de l'ozone pour produire des radicaux hydroxyle. Ainsi, une concentration de 5 mg/l d'ozone dans l'eau « pure » à pH 8, sera diminuée de moitié après 20 à 30 minutes. Si des composés organiques et/ou minéraux consommateurs d'ozone sont présents dans l'eau, la stabilité de l'ozone va généralement diminuer. Toutefois, certains composés stabilisent l'ozone dans l'eau (en piégeant les radicaux hydroxyle), les plus connus sont les ions bicarbonate et carbonate. Dans le cas de l'exemple précédent (5 mg/l d'ozone dans l'eau « pure » à pH 8), la présence de 25°F de TAC va approximativement doubler le temps nécessaire à la décomposition de la moitié de l'ozone dissous (soit 40 à 60 minutes).

L'ozone possède un potentiel standard d'oxydo-réduction très élevé (2,07 Volt) et va donc pouvoir oxyder de nombreux composés minéraux et organiques. Certaines de ces réactions sont très rapides (cas des nitrites, du fer, du manganèse et des sulfures, des composés aromatiques, des acides aminés), d'autres plus lentes comme les ions bromures oxydés en bromates ou encore l'oxydation de l'azote ammoniacal. Les principaux sous-produits d'ozonation des composés organiques possèdent des structures oxygénées de type acide carboxylique, cétone et aldéhyde.

L'ozone est le meilleur désinfectant des réactifs oxydants utilisés en traitement des eaux de consommation (pouvoir désinfectant 10 à 100 fois supérieur à celui du chlore). Son gain d'efficacité par rapport aux autres oxydants est surtout remarquable au niveau des virus et des kystes d'amibes.

La demande en ozone d'une eau est définie par le taux d'ozone à appliquer pour obtenir un résiduel de 0,4mg/l après 4 minutes de temps de contact.

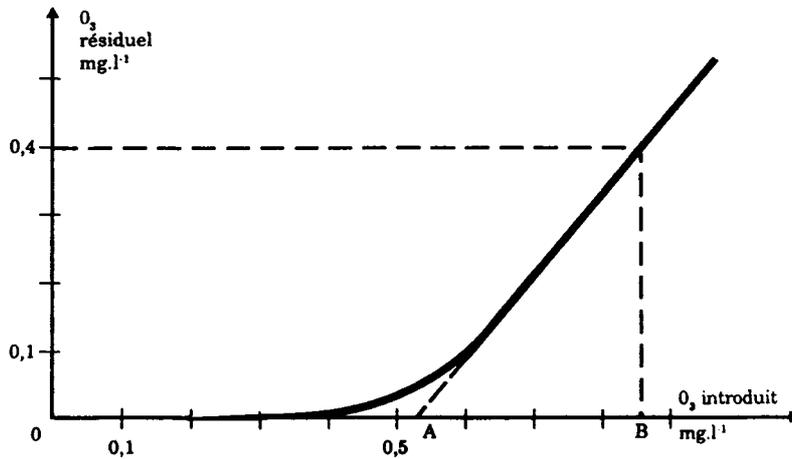


Figure 18 : Courbe de demande en ozone d'une eau (17)

▪ **Production, transfert dans l'eau et mise en œuvre de l'ozone**

En théorie, la synthèse de 48 g (1 mole) d'ozone à partir d'oxygène nécessite un apport d'énergie de 142,12 kJ. Cet apport ne peut pas être thermique, car toute élévation de température provoque la décomposition de l'ozone. Aussi, en pratique, on soumet de l'air séché et froid à une décharge électrique à haute tension. Or, 1 kWh correspondant à 3600 kJ, la production optimale devrait être de 1216 g d'O₃ par kWh mais le rendement énergétique n'est que de l'ordre de 5% car l'air contient d'autres molécules, comme N₂, H₂O et CO₂ en plus de O₂, susceptibles d'intervenir dans la réaction. Par exemple, l'azote est oxydé en anhydride nitrique N₂O₅ qui s'hydrolyse en acide nitrique HNO₃ causant la corrosion des parties métalliques.

Une installation de production d'ozone (ozoneur) comprend deux parties, une pour traiter l'air, l'autre pour produire l'ozone à partir de celui-ci :

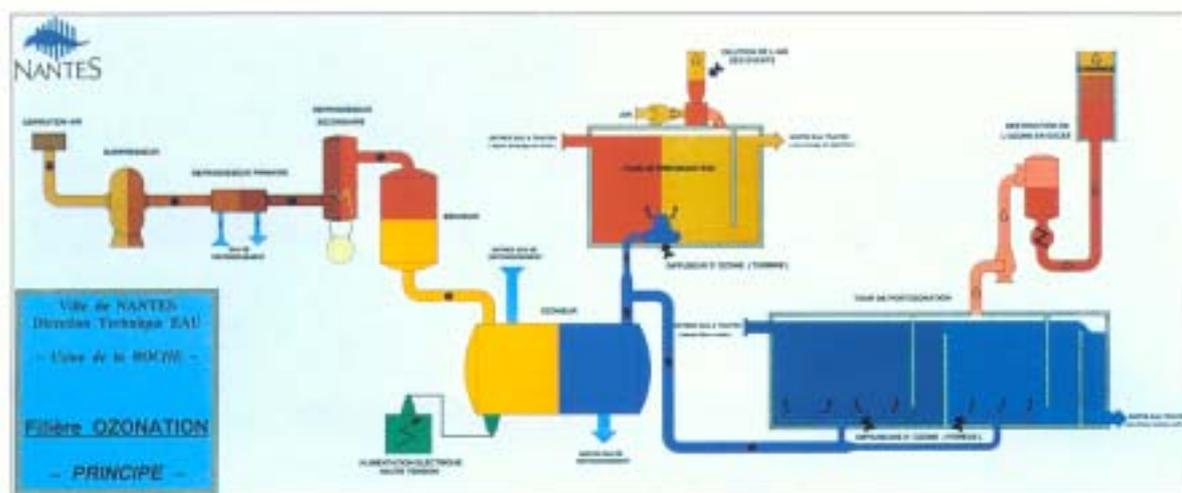


Figure 19 : Schéma du système d'ozonation de l'usine de la Roche (Régie de l'eau)

La première étape consiste en une condensation qui permet d'abaisser de 90% l'hygrométrie : l'air comprimé à haute température est admis au niveau de l'échangeur thermique (un étage air-eau et un étage air-eau glycolée maintenus à 2°C par un groupe frigorifique), il en sort à une température d'environ 5°C. La deuxième étape est une dessiccation sur adsorbant (cartouche d'alumine activée qui est un composé très hygroscopique). A la sortie, l'hygrométrie n'est plus que d'environ 0,04 g/m³. Le risque de formation d'acide nitrique est alors très faible. Pour finir, cet air est filtré deux fois afin d'éliminer la moindre particule de polluant.

L'ozone est formé en soumettant l'air séché à un champ électrique entre deux électrodes conductrices situées en regard l'une de l'autre. L'électrode centrale est en acier inoxydable et celle servant de masse, en acier inox refroidi par eau. L'espace délimité entre elles est constitué de tubes en verre à face interne recouverte d'aluminium pur, parcourus par l'air admis dans l'ozoneur. Sous l'action d'une tension élevée (15 000 à 20 000 V), l'air s'ionise et devient conducteur. On note l'apparition de décharges lumineuses bleutées et la formation d'ozone.

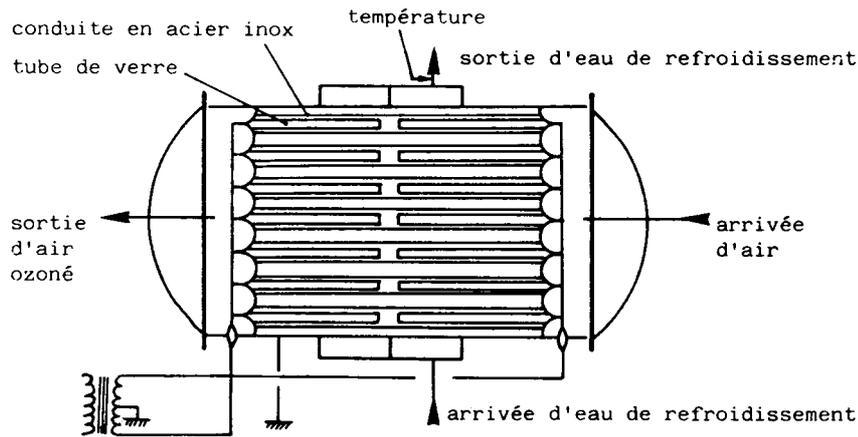


Figure 20 : Schéma d'un ozoneur industriel (DORE : chimie des oxydants et traitement des eaux, 1989)

Deux modes de diffusion peuvent être utilisés :

Les dômes poreux nécessitent un eau peu turbide et exempte de particules précipitables. Ils sont donc réservés à l'inter et la postoxydation. Ils sont insensibles aux variations de débit d'eau ou de gaz et possèdent un rendement de transfert de 95%. Les tours de postozonation, équipées de dômes poreux, comportent deux compartiments. Le premier correspond à la demande de l'eau en ozone et permet l'oxydation des différentes molécules (temps de contact 2 minutes et taux résiduel de 0,4 mg/l), le deuxième permet de maintenir une concentration minimale résiduelle (temps de contact 4 minutes et taux résiduel identique au premier compartiment).

La création de turbulences par turbines, hydroéjecteurs ou chicanes, permettent la diffusion du gaz dans l'eau. Ils sont réservés aux eaux brutes en vue de leur déferrisation ou démanganisation, en tête de filière de traitement donc lors d'une préozonation (temps de contact en général de 2 minutes).

▪ Place de l'ozonation dans la filière de traitement

La préozonation est pratiquée à des taux de 0,5 à 1,2 mg/l. Elle présente les applications suivantes qui sont souvent recherchées simultanément :

- Amélioration des qualités organoleptiques de l'eau par oxydation partielle des matières organiques (décoloration) et des précurseurs de goûts,
- Déferrisation et démanganisation partielle ou totale,
- Elimination des algues

- Amélioration de l'étape de coagulation-floculation en termes de turbidité éliminée ou de taux de coagulant appliqués, ou encore de durée de fonctionnement des filtres.

En inter-ozonation, pratiquée soit en amont des filtres à sable (rarement), soit entre les filtres à sable et les filtres à CAG (plus fréquemment), les taux d'ozone appliqués sont de 1 à 4 mg/l. Les objectifs sont les suivants :

- Déferriser et démanganiser totalement,
- Oxyder les pesticides et les autres micropolluants organiques,
- Améliorer les qualités organoleptiques de l'eau,
- Dégrader les composés organiques précurseurs de consommation de chlore et de formation de composés organo-halogénés,
- Augmenter la biodégradabilité des matières organiques, permettant ainsi leur élimination sur charbon actif biologique et, par voie de conséquence, conduisant à une réduction de la demande en chlore de l'eau,
- Désinfecter pour détruire les micro-organismes les plus réfractaires (virus, kystes, spores).

La postozonation se situe juste avant la désinfection finale à des taux d'ozone qui dépendent de ceux pratiqués en aval. Elle est facultative en présence d'inter-ozonation. Cette étape présente deux inconvénients :

- La formation de matière organique biodégradable (CODB) dans l'eau avant sa distribution, et par suite la possibilité de reviviscence bactérienne dans les réseaux de distribution,
- La nécessité de réduire les concentrations résiduelles d'ozone avant d'introduire dans l'eau un désinfectant rémanent (chlore ou dioxyde de chlore), pour éviter la formation de chlorates. Toutefois, en absence d'inter-ozonation, la postozonation doit être appliquée pour réaliser une excellente désinfection de l'eau.

➤ **Traitement au charbon actif**

Dans les usines de traitement d'eau de surface, le charbon actif peut être appliqué soit sous forme de poudre (CAP), généralement au niveau du décanteur, soit sous forme de grains (CAG) en deuxième étage de filtration, en particulier après une étape d'interozonation, ou parfois en premier étage de filtration (généralement en filtre bi-couche avec du sable).

Le charbon actif est un terme générique qui regroupe une large gamme de substances carbonées présentant une très grande porosité associée à une surface spécifique importante (500 à 1500m² /g).

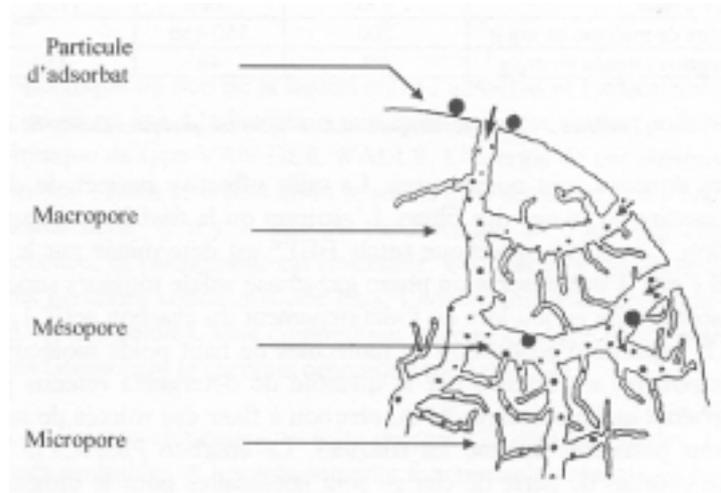
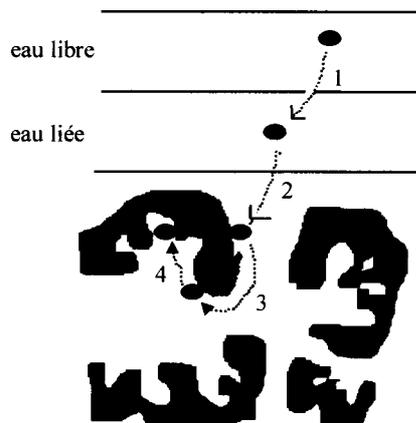


Figure 21 : Coupe schématique d'un grain de charbon actif (18)



Etape 1	Transfert de la particule de la couche externe d'hydratation vers l'interne	Très rapide
Etape 2	Déplacement de l'eau liée jusqu'au contact charbon	Rapide
Etape 3	Diffusion à l'intérieur du charbon sous l'influence du gradient de concentration	Lente
Etape 4	Adsorption dans une micropore	Très rapide

Figure 22 : Les différentes étapes de l'adsorption d'une particule par le charbon actif (18)

▪ Fabrication

Le procédé physique est le plus utilisé à ce jour et le plus ancien. Il comporte trois étapes successives :

- Le séchage de la matière première (tourbe, bois, charbon de houille, noix de coco),
- La carbonisation à 500-600°C, durant 5 à 6 heures,

- L'activation à 800-1000°C, durant 24 à 72 heures, permettant de développer la surface interne du matériau.

Le rendement global est assez faible (100 tonnes de matière première / 8 tonnes de charbon actif).

Le procédé chimique, plus récent, consiste à réaliser en une seule opération la carbonisation et l'activation à une température de l'ordre de 400 à 600°C durant 5 à 24 heures, en présence de catalyseurs. Le rendement final est de l'ordre de 30% (contre environ 8% pour le premier procédé). La résistance mécanique du produit final est cependant plus faible.

▪ Théorie

Deux modes d'adsorption existent pour décrire la rétention de molécules à la surface du charbon :

- L'adsorption physique (mode le plus important), résultant d'interactions de faible énergie et réversible,

- L'adsorption chimique mettant en jeu la formation de liaisons chimiques irréversibles.

L'isotherme d'adsorption décrit la relation, existant à l'équilibre et à une température donnée, entre la concentration du composé dans la phase liquide (C_e) et celle adsorbée à la surface de l'adsorbant (Q_e), exprimée par unité de masse d'adsorbant. Généralement obtenues à partir d'expériences type « Jar-Test » (voir coagulation-floculation), les équations d'isothermes sont nécessaires pour la détermination des taux de traitement, la sélection d'un charbon et le dimensionnement des filtres.

Parmi les nombreuses relations utilisées pour décrire les isothermes d'adsorption, l'équation de Freundlich est la plus employée :

$$Q_e = x / m = K C_e^{1/n}$$

avec Q_e : masse de soluté adsorbé par unité de masse de charbon à l'équilibre

x : masse de soluté adsorbé

m : masse d'adsorbant

K et n : constantes de Freundlich

Graphiquement, cette isotherme est généralement représentée sous sa forme linéarisée :

$$\text{Log } Q_e = \text{log } K + 1/n \text{ log } C_e$$

La pente de la droite permet de déterminer $1/n$ et l'ordonnée à l'origine, la valeur de K . Les paramètres influençant l'équilibre d'adsorption sont les caractéristiques physico-chimiques du

soluté (solubilité ou polarité) de la molécule (les substances hydrophobes sont les mieux adsorbées), la présence d'autres solutés adsorbables dans l'eau (phénomènes de désorption par compétition entre les molécules), la température (en pratique, peu de modification significative entre 5 et 20°C) et le pH.

- **Le charbon actif en poudre (CAP)**

L'introduction de CAP (granulométrie : 10 à 50 µm) en tête de filière de traitement, après les réactifs de coagulation-floculation, permet de lutter contre des pointes de pollutions temporaires (en micropolluants, matières organiques,...) ou accidentelles. Ceci permet de réduire la dose d'ozone en inter-ozonation et d'augmenter la durée de vie des filtres à charbon actif en grains (CAG) en suite de filière.

Les doses de CAP généralement appliquée sont de l'ordre de 10 à 50 g/m³ d'eau à traiter. La technique consiste à effectuer une suspension de CAP (mélange avec de l'eau appelé barbotine) et de l'injecter au niveau de la floculation, après le floculant. Les décanteurs à lit de boue économisent 15 à 40% de la dose de charbon à appliquer par rapport aux ouvrages statiques (décanteurs couloirs ou lamellaires) car le temps de contact est augmenté.

Les avantages du CAP par rapport à la filtration sur CAG sont : l'investissement réduit (2 à 3 fois moins cher que le CAG), la facilité de mise en œuvre, la possibilité de surdosage en cas de pointes de pollution, son adsorption rapide et l'amélioration de la décantation. Par contre, il n'est pas régénérable et nécessite de détecter à temps les pollutions en amont.

- **La filtration sur charbon actif en grains (CAG)**

L'élimination des micropolluants organiques et de la matière organiques est l'enjeu majeur de l'emploi de CAG.

Les pesticides et les composés sapides sont les principaux micropolluants organiques. Dans leur cas, seuls les phénomènes physico-chimiques d'adsorption interviennent.

La diminution de la concentration en matière organique dans l'eau à traiter est intéressante, en particulier au niveau de la matière organique dissoute biodégradable (CODB), responsable de la reviviscence bactérienne dans les réseaux, de la demande en chlore et des précurseurs de formation de composés organo-halogénés, et du mauvais goût. En effet, elle fait intervenir les phénomènes d'adsorption classique et de biodégradation, rendue possible par la présence d'une biomasse à la surface du charbon. Cette colonisation demande 1 à 2 mois. On retrouve

des bacilles Gram- (*Pseudomonas* et *Acinetobacter*), des bacilles Gram+ (*Bacillus*), quelques cocci Gram+ mais jamais de bactéries anaérobies strictes. Les rendements d'élimination de la CODB varient (temps de séjour de l'eau de 10 minutes) de 20 à 30% à 8°C et de 50 à 80% à 18°C.

Une inter-ozonation diminue l'adsorption mais favorise la bioélimination. L'ozone casse les macromolécules en éléments plus disponibles. Par contre, l'hydroxylation des sites électrophiles renforce le caractère hydrophile des solutés. Cette augmentation de polarité et de solubilité dans l'eau, inhibe toute adsorption hydrophobe sur charbon actif.

Parmi les autres propriétés des filtres à CAG, on peut signaler l'élimination de la turbidité et de l'azote ammoniacal par voie biologique, et la réduction des oxydants résiduels et de quelques sous-produits d'oxydation, comme les ions chlorite et bromate.

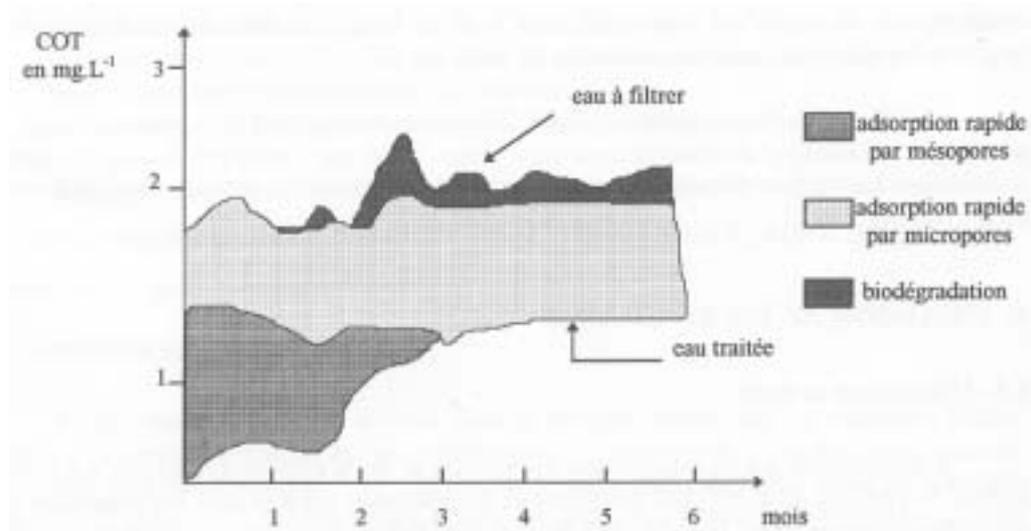


Figure 23 : Modes de fonctionnement d'un filtre à charbon actif en grain (18)

Le mode d'adsorption physico-chimique est le seul à fonctionner pendant les 30 premiers jours. Les mésopores sont saturés au bout de trois mois. L'efficacité des micropores est durable sauf si l'eau brute présente de fortes concentrations en polluant. La biodégradation des matières organiques adsorbées permet une régénération de l'adsorbant.

Dans un premier temps, le CAG a été mis en œuvre en premier étage de filtration, en lieu et place du sable. Les caractéristiques granulométriques nécessaires à cette fonction étaient incompatibles avec les phénomènes d'adsorption et la fréquence des lavages inhibait l'activité biologique.

Désormais, le CAG est situé en deuxième étage de filtration en aval du sable. La granulométrie est de l'ordre de 0,5 à 0,8 mm en accord avec une adsorption correcte des solutés. La fréquence des rétrolavages est d'une à trois fois par mois et se fait de façon similaire à celle des filtres à sable. La mise en place d'une bicouche (CAG-sable) permet d'augmenter la capacité de production de 20 à 30%. Une hauteur de 1 à 2 m de matériau et une vitesse de filtration comprise entre 8 et 15 m/h, sont préconisées par les constructeurs.

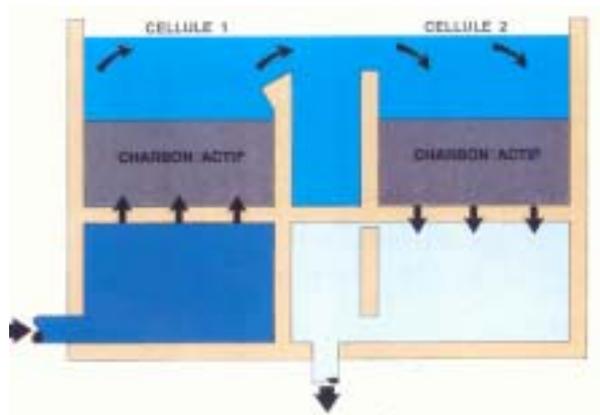


Figure 24 : Principe de fonctionnement d'un filtre à CAG (Régie de l'eau)

Chaque filtre comporte deux compartiments : le premier favorise l'accès des matières adsorbables au niveau des pores du charbon ; le second permet en plus de retenir les fines particules de charbon qui auraient pu se former. Le charbon mis en place est réactivable par de nouveaux traitements thermiques afin de conserver ses capacités d'adsorption.

Le CAG doit être remplacé ou régénéré dès que les concentrations en micropolluants à la sortie des filtres dépassent les concentrations maximales admissibles dans l'eau traitée. La régénération est généralement effectuée par le fournisseur et comprend les étapes suivantes :

- Extraction du CAG contenu dans les filtres et séparation éventuelle du sable,
- Elimination de la matrice minérale par attaque chimique,
- Lavages du CAG,
- Elimination de la matière organique par un traitement thermique,
- Contrôles des caractéristiques de matériau régénéré.

➤ Les procédés à membrane

Ce sont des techniques de séparation par filtration, sous l'effet d'un gradient de pression au travers de membranes, dont les tailles des pores varient de quelques dixièmes de micromètres à quelques dixièmes de nanomètres. La figure suivante permet de situer les différentes techniques par rapport à quelques exemples connus de composés présents dans les eaux.

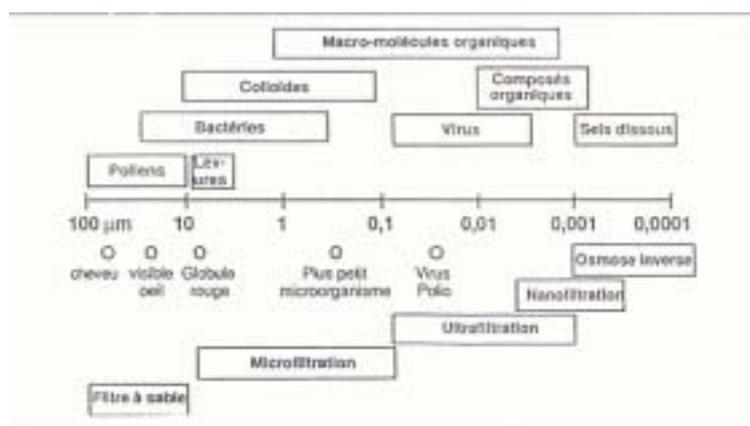


Figure 25 : Efficacité et domaines d'utilisation des procédés à membrane (23)

Ces procédés ne sont encore que rarement mis en œuvre en usine de traitement des eaux de surface (quelques essais uniquement sur des unités pilotes). Il s'agit soit de microfiltration ou d'ultrafiltration pour clarifier les eaux brutes (à la place de la filière coagulation-floculation-décantation-filtration en profondeur), soit de nanofiltration pour le traitement de finition des eaux clarifiées (à la place de l'ozonation et de la filtration sur CAG).

▪ Théorie

Le seuil de coupure d'une membrane est la masse de la plus grosse entité arrêtée par la membrane. On distingue, des plus petits seuils de coupure vers les plus grands :

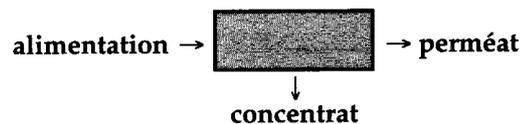
- L'osmose inverse (surtout utilisée dans le dessalement des eaux de mer ou saumâtres), qui permet théoriquement de retenir tous les composés autres que l'eau elle-même,
- La nanofiltration qui est une variante de l'osmose inverse, caractérisée par une bonne rétention des ions divalents tout en restant perméable aux ions monovalents,

- L'ultrafiltration qui permet la rétention des particules en suspension et de quelques macromolécules (colloïdales pour la plupart),

- La microfiltration qui n'arrête que les matières en suspension et les gros colloïdes.

Les appareils unitaires de séparation utilisant des membranes sont appelés modules.

La représentation schématique d'un module est la suivante :



Le taux de rejet est donné par : $Tr = (Co - Cp) / Co$ avec Co : concentration du composé à éliminer dans l'alimentation et Cp : concentration dans le perméat.

Le taux de conversion est donné par : $Y\% = 100(Qp / Qo)$ avec Qp : débit du perméat et Qo : débit d'alimentation.

La nature chimique des matériaux membranaires est soit organique (composés cellulosiques, polyacryliques, polyamides, polyuréthanes,...), soit minérale (alumine, oxyde de titane, carbure de silicium,...). Il existe des membranes symétriques qui possèdent une distribution régulière et uniforme des pores sur toute leur épaisseur (utilisée uniquement en microfiltration à cause de leur possibilité de colmatage en profondeur), des membranes asymétriques qui sont constituées d'une fine pellicule appelée « peau » (épaisseur 0,1 à 0,5 μm) déposée sur un support poreux de même nature chimique et des membranes composites dont la « peau » et le support sont de nature chimique différente.

Il existe plusieurs types de modules membranaires :

- Les modules à plaques : les membranes planes sont empilées et l'eau à traiter circule entre les membranes de deux plaques adjacentes, le perméat étant drainé par les plaques.

- Ces mêmes membranes peuvent être enroulées en spirale entre des espaceurs (le long desquels circule le liquide) avec un côté scellé à un tube collecteur de perméat.

- Les modules tubulaires où la membrane est enroulée sur elle-même et déposée à l'intérieur d'un tube support poreux.

- Les modules en fibres creuses où la « peau » semi-perméable peut être à l'intérieur ou l'extérieur (ils sont regroupés en faisceaux).

Ces procédés sont confrontés à deux problèmes :

- Le transport sélectif membranaire entraîne l'augmentation de la concentration en solutés à la surface membranaire, appelée polarisation de concentration, qui est parfois à

l'origine de la formation d'un gel (atteinte de la limite de solubilité de certains composés). Il en résulte une diminution du flux du perméat.

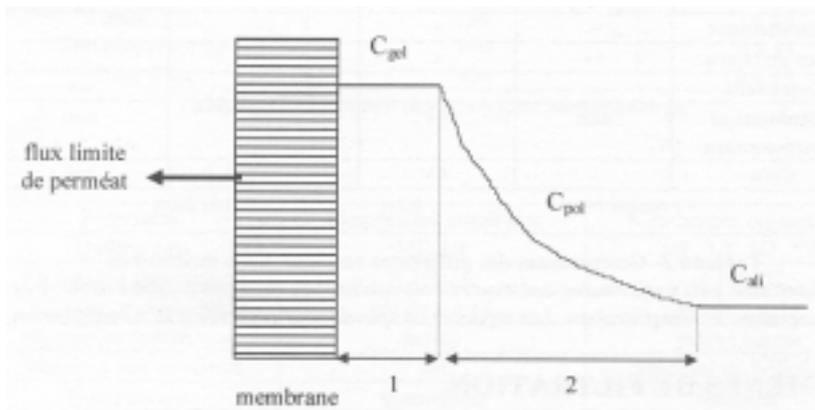


Figure 26 : Phénomènes de polarisation de concentration (18)

1 : couche secondaire de polarisation

2 : couche primaire de polarisation

C_{gel} : concentration du gel

C_{pol} : concentration de polarisation

C_{ali} : concentration d'alimentation

- Le colmatage par le dépôt de particules en amont de la membrane et par l'adsorption de certains composés organiques ou de bactéries.

Aussi, on réserve la nanofiltration et l'osmose inverse à des eaux très peu colmatantes ou on effectue un pré-traitement de clarification et/ou de microfiltration. Autre solution, on utilise une circulation d'eau tangentielle (et non frontale) permettant un balayage de la face amont de la membrane. Enfin, on effectue des rétrolavages hydrauliques, pneumatiques et, moins souvent, des lavages chimiques des modules membranaires.

▪ En pratique

Le choix d'un procédé à membrane dépend des objectifs fixés. Si le but est d'éliminer la turbidité et les bactéries, la figure montre que les procédés à utiliser sont soit la microfiltration, soit l'ultrafiltration. Si l'intérêt se situe au niveau de l'élimination des matières organiques ou des micropolluants, c'est la nanofiltration qui doit être appliquée, protégée toutefois par une microfiltration ou une clarification en amont.

Le flux d'alimentation peut être frontal (souvent le cas en microfiltration), avec un taux de conversion de 100%. L'alimentation peut être à flux tangentiel avec un débit de perméat de 5 à 60% du débit d'alimentation selon le procédé et le type de module. Dans ce cas, l'eau est recyclée ou envoyée sur un ou plusieurs étages de traitement permettant d'obtenir des taux globaux de conversion de 80% (nanofiltration).

Les installations comprennent généralement un ou plusieurs modules, une pompe d'alimentation dont la pression de fonctionnement dépend du procédé (7 à 9 bars pour la nanofiltration, 0,1 à 1,5 bar pour la microfiltration et l'ultrafiltration) et un ou plusieurs systèmes de rétrolavage.

▪ Performances en traitement des eaux douces superficielles

La microfiltration et l'ultrafiltration sont actuellement très peu applicables au traitement des eaux de surface car l'abattement de la matière organique est trop faible (30 à 50%), de même que celui des pesticides. Par contre, on obtient de très bons résultats pour le traitement des eaux souterraines à forte turbidité épisodique comme les eaux karstiques en cas de fortes précipitations. En effet, les traitements classiques de clarification ne sont pas très adaptés à ces modifications trop rapides.

La nanofiltration a été testée à l'échelle de prototype sur l'eau de l'Oise pré-traitée (pré-oxydée, coagulée, floculée, décantée et doublement filtrée). Les résultats obtenus sont très satisfaisants, tant sur le plan de la matière organique (et de ses incidences comme la demande en chlore) que sur celui des pesticides. L'inconvénient de cette technique est une dureté calcique d'eau trop basse, les ions Ca^{2+} ne passant que très peu au travers de la membrane (il faut reminéraliser l'eau en aval). De plus, ces ions, pour un pH supérieur à 5, vont précipiter en carbonate de calcium et donc colmater les nanofiltres. On doit donc acidifier l'eau avant la filtration ce qui va entraîner la formation d'acide carbonique en aval du filtre qu'il faudra neutraliser.

L'osmose inverse n'est pas actuellement utilisée en potabilisation des eaux.

2.1.3 La désinfection

L'étape centrale de la désinfection est commune à tous les traitements, et c'est la plus importante. Elle a pour but d'éliminer tous les micro-organismes pathogènes, bactéries et

virus principalement, ainsi que les germes communs moins résistants. Bien que les eaux souterraines en soient souvent naturellement exemptes, la désinfection prévient le risque d'une contamination par infiltration en maintenant dans l'eau un pouvoir désinfectant suffisamment élevé pour éviter les reviviscences bactériennes dans les réseaux de distribution. Elle peut être effectuée par des agents chlorés (chlore gazeux, eau de Javel, bioxyde de chlore), par l'ozone, par l'utilisation d'ultraviolets ou par des procédés physiques comme la filtration sur membranes.

➤ *Notions de base sur la désinfection*

Les mécanismes d'inactivation des micro-organismes ne sont pas très bien connus. Schématiquement, il semble que le chlore et le dioxyde de chlore puissent s'introduire à l'intérieur de la cellule bactérienne et y bloquer toute activité enzymatique, tandis que l'ozone attaquerait plutôt la membrane bactérienne. En absence de connaissances fondamentales suffisantes sur les mécanismes de désinfection, les conditions optimales de désinfection ont été définies à partir de nombreuses expériences. Les travaux ont toujours suivi la même démarche, c'est à dire l'étude de la mortalité des micro-organismes en fonction de deux paramètres, le temps (t), et la concentration résiduelle en désinfectant (C).

La loi de Chick est utilisée pour mettre en équation l'efficacité d'une désinfection en fonction de ces paramètres :

$$N_t/N_0 = \exp^{-kt} \text{ avec } k = \Lambda C^n$$

avec N_0 : nombre de micro-organismes présents initialement

N_t : nombre de micro-organismes survivants au temps t

C : concentration en désinfectant

k : constante de vitesse (dépend du type de micro-organisme, du désinfectant et des conditions opératoires)

t : temps de contact

Λ : coefficient spécifique de létalité du micro-organisme en présence du désinfectant

n : coefficient de dilution (constante voisine de 1)

Cette équation met en évidence l'importance du produit Ct, c'est à dire le produit du temps de contact t, avec la concentration en désinfectant C, supposée constante pendant toute l'inactivation (un désinfectant est d'autant plus efficace contre un germe que son Ct est faible

pour ce germe). Le tableau II présente des exemples de valeurs du Ct pour, respectivement, le chlore, les monochloramines, le dioxyde de chlore et l’ozone, en fonction de différents micro-organismes.

Micro-organismes	OHCl	NH ₂ Cl	ClO ₂	O ₃
<i>Escherichia coli</i>	0,034 - 0,05	95 - 180	0,4 - 0,75	0,02
Poliovirus	1,1 - 2,5	770 - 3740	0,2 - 6,7	0,1 - 0,2
Kystes <i>Giardia</i>	30 - 630	1400	7,2 - 18,5	1,8 - 2

Tableau II : Valeurs du produit Ct en fonction du micro-organisme (18)

Toutefois, il est difficile de calculer les valeurs de Ct à appliquer à une eau à traiter, pour obtenir une inactivation donnée, car il est évident que la teneur en composés consommateurs d’oxydant dans l’eau désinfectée, aura une importance considérable sur le maintien de la concentration C de l’équation de Chick. De même, le pH de l’eau qui conditionne souvent la forme majoritaire de l’oxydant dans l’eau (chlore, brome) et sa stabilité (ozone), ainsi que les vitesses d’oxydation chimique sur les composés organiques et minéraux, seront également des paramètres importants. Par suite, dans la pratique de la désinfection, un certain consensus s’est fait autour des conditions indiquées dans le tableau III qui montre que l’ozone est un désinfectant plus efficace que le chlore et le dioxyde de chlore.

Oxydant	Activité bactéricide	Activité virulicide
Chlore	0,1 à 0,2 mg/L 10 à 15 min	0,3 à 0,5 mg/L 30 à 45 min
Dioxyde de chlore	0,1 à 0,2 mg/L 5 à 10 min	0,3 à 0,5 mg/L 30 min
Ozone	0,1 à 0,2 mg/L 1 à 2 min	0,4 mg/L 4 min

Tableau III : Efficacité des désinfectants habituels sur les bactéries et virus (23)

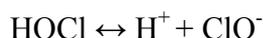
➤ *La chloration des eaux*

▪ **Propriétés du chlore et de ses dérivés**

Le chlore est un gaz jaune-vert qui lors sa dissolution dans l'eau se dismuté en acide hypochloreux (HOCl), ion chlorure (Cl⁻) et en proton (H⁺) selon un premier équilibre :



L'acide hypochloreux est un acide faible qui se dissocie dans l'eau en ion hypochlorite (ClO⁻) et en proton selon l'équilibre :



Les valeurs des constantes de ces deux équilibres permettent de calculer la proportion des différentes formes du chlore présent dans l'eau pure en fonction du pH, comme sur la figure. Ainsi, dans la grande majorité des cas d'eaux naturelles, le chlore sera sous forme d'acide hypochloreux et d'ion hypochlorite.

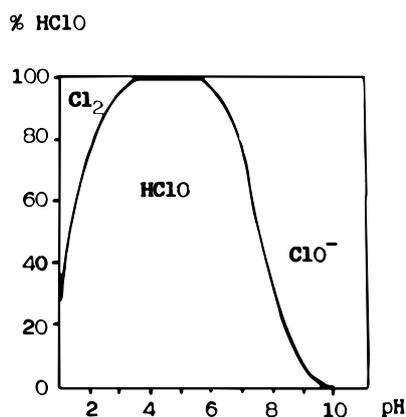
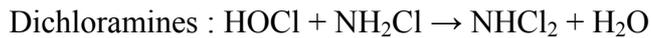


Figure 27 : Différentes formes du chlore dans l'eau pure à 20°C en fonction du pH (DORE : chimie des oxydants et traitement des eaux, 1989)

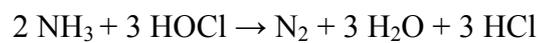
La somme de ces différentes formes de chlore constitue ce qui est appelé le chlore libre, qui peut être mesuré en nombre de degrés chlorométriques. Une solution d'un degré chlorométrique est une solution de chlore (quelle que soit sa forme), qui peut dégager un litre de chlore gazeux dans les conditions normales de température et de pression (0°C et 760 mm Hg). En d'autres termes :

1 degré chlorométrique = 71 g/22,4 l = 3,17 g/l (grammes de chlore Cl₂ par litre d'eau).

Le chlore peut réagir avec de nombreux composés minéraux, présents dans les eaux à des concentrations plus ou moins élevées. Parmi ces composés, les plus importants sont le fer, le manganèse, l'azote ammoniacal, les nitrites, les bromures et iodures, les sulfures et les cyanures. Pour ce qui concerne l'azote ammoniacal, il y a d'abord formation de chloramines (appelées « chlore combiné »), puis oxydation de celles-ci en azote moléculaire selon les réactions suivantes :



Réaction globale d'oxydation des chloramines en azote moléculaire :



Le chlore oxyde facilement les ions bromure en brome qui possède des propriétés chimiques très voisines de celles du chlore. Il se dismute dans l'eau en acide hypobromeux (et ion hypobromite). Il réagit avec l'azote ammoniacal et il est consommé par les composés organiques pour former des composés organobromés dont le bromoforme. Ceci explique pourquoi les eaux contenant des ions bromure peuvent produire des composés organobromés et organo-mixtes (chlorés et bromés) après une simple chloration. L'ensemble des trihalométhane formés (CHCl_3 , CHBrCl_2 , CHBr_2Cl , CHBr_3) est appelé couramment THM totaux.

Le chlore est un réactif qui peut oxyder de nombreux composés organiques, ce qui va inévitablement conduire à la formation de produits d'oxydation organochlorés. La réactivité du chlore avec les composés organiques peut être mesurée en termes de constante de vitesse, de consommation du chlore ou encore de rendement de produits de chloration formés (TOX : composés organohalogénés totaux, dont principalement le chloroforme). Cette consommation de chlore et la formation de chloroforme peut être très rapide et importante pour certains composés organiques simples (exemples : phénols, acides aminés). Dans le cas des composés organiques de structure macromoléculaire complexe (exemples : substances humiques, protéines), la réaction peut se poursuivre pendant plusieurs centaines d'heures tant les sites réactifs sont nombreux et de réactivité variée. Les autres produits organochlorés formés (autres TOX) lors de ces réactions ne sont pas tous connus. Les principaux sont les acides chloroacétiques (ou ions chloroacétate), les chloroacétonitriles, les chlorocétones, les chloroaldéhydes et les chlorofuranones.

Le pouvoir désinfectant du chlore est élevé. Il dépend évidemment du type de micro-organisme (les kystes d'amibes sont beaucoup plus résistants au chlore que les virus, eux-

mêmes plus résistants que les bactéries), mais aussi du pH, c'est à dire de la forme oxydante agissante, et du milieu environnant (force ionique, matière organique...). Pour ce qui concerne l'effet du pH en traitement des eaux, l'acide hypochloreux (HOCl) est plus efficace que l'ion hypochlorite (ClO⁻). A titre d'exemple, l'acide hypochloreux est au moins 10 fois plus actif que l'ion hypochlorite sur *Escherichia Coli*, et environ 5 fois plus sur le virus polyomélique de type 1. Notons que la monochloramine (NHCl₂) est encore moins active que l'ion hypochlorite.

▪ **Mise en œuvre du chlore et de l'hypochlorite de sodium**

Le chlore moléculaire (préparé par électrolyse du chlorure de sodium) est conditionné sous pression (sous forme liquide) en réservoir en acier, stocké dans des locaux réservés à cet effet (le chlore gazeux est vésicant, irritant et suffocant et en cas d'inhalations de fortes doses, entraîne la mort par arrêt respiratoire). Sa distribution est assurée par l'intermédiaire d'un chloromètre (ou doseur de chlore) et d'un hydro-éjecteur.

L'hypochlorite de sodium appelé « eau de Javel » est un liquide jaune verdâtre commercialisé sous forme d'une solution équimolaire d'hypochlorite de sodium et de chlorure de sodium, à une concentration de 48° chlorométriques (soit environ 150 g de chlore libre par litre). Il doit être stockée à l'abri de la lumière car les rayons UV décomposent rapidement le chlore. Sa mise en œuvre est assurée par pompes doseuses.

▪ **La demande en chlore des eaux**

Dans la pratique, la demande en chlore d'une eau doit être mesurée dans des conditions expérimentales qui dépendent des conditions locales (temps de séjour en réservoir de stockage, temps de séjour en réseau). On peut toujours distinguer deux méthodes de mesure de cette demande en chlore, qui vont conduire à l'évaluation du taux de chloration à appliquer.

La méthode dite du « point de rupture » consiste à ajouter dans une série de flacons contenant le même volume d'eau, des doses croissantes de chlore. La demande en chlore de l'eau est donnée par le premier flacon dans lequel on décèle du chlore libre, au bout d'un temps de contact donné (généralement de 2 heures).

Il est important de ne mesurer que le chlore libre car c'est la forme la plus efficace du chlore pour la désinfection. Toutefois le tracé de la courbe de la concentration résiduelle en chlore

total (libre + combiné) en fonction de la dose de chlore introduite dans chaque flacon est une méthode particulièrement adaptée aux eaux contenant de l'azote ammoniacal. Dans ce cas, on obtient une courbe de « point de rupture » pouvant inclure quatre zones comme détaillé dans la figure 26.

La désinfection optimale n'est obtenue que pour des taux de chlore appliqués supérieurs à celui correspondant au « point de rupture ». Théoriquement, ce taux (en mg/l de chlore) doit être égal à 7,6 fois la teneur en azote ammoniacal (en mg/l d'azote). En fait, la présence dans l'eau de nombreux composés consommateurs de chlore augmente significativement cette valeur. Par exemple, pour un temps de 3 heures de chloration, la demande en chlore (en mg/l) de quelques eaux brutes a été égale à $7,6 \times (\text{N-NH}_4^+ \text{ en mg/l}) + (0,5 \text{ à } 0,7) \times (\text{COT en mg/l})$.

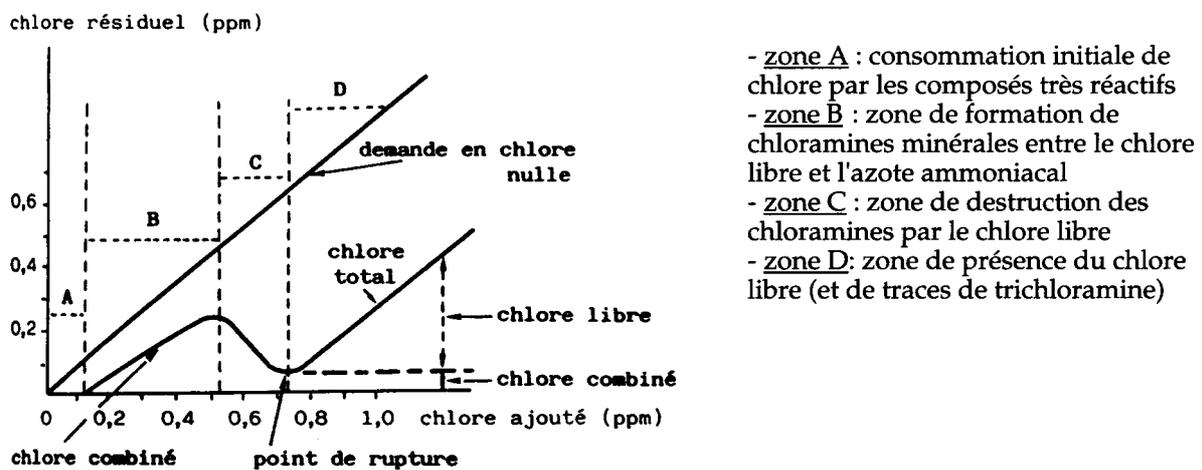


Figure 28 : Courbe typique de « point de rupture » d'une eau naturelle (DORE : chimie des oxydants et traitement des eaux, 1989)

La deuxième méthode consiste à suivre la concentration résiduelle en chlore libre en fonction du temps. Dans ce cas, les taux de chloration sont choisis de manière à ce qu'une concentration résiduelle de chlore libre soit encore présente après un temps donné. Les temps de chloration sont, soit de l'ordre de la durée du stockage en réservoir de chloration (demande en chlore immédiate), soit de quelques dizaines d'heures (24 à 72 heures) pour simuler la consommation en chlore par l'eau pendant son temps de séjour en réseau de distribution.

▪ Place de la chloration dans les filières et taux pratiqués

La pré-chloration et l'inter-chloration, bien qu'elles soient encore parfois utilisées, ne peuvent l'être qu'épisodiquement (en cas de développement important d'algues ou du

dysfonctionnement temporaire de la nitrification biologique sur les filtres...), car l'application du chlore ou de ses dérivés présentent de nombreux inconvénients à ces niveaux de traitement des eaux de consommation. Dans le cas de la pré-chloration, l'inconvénient majeur est la formation de THM, de TOX et de goûts, par réaction du chlore avec la matière organique, au moment où elle est la plus concentrée dans l'eau à traiter. Pour ce qui concerne l'inter-chloration, elle limite considérablement toute activité biologique sur les filtres à sable, voire sur les filtres à charbon actif, ce qui est préjudiciable à l'élimination de l'azote ammoniacal et de la matière organique.

L'utilisation du chlore en fin de traitement, c'est à dire en désinfection, est quant à elle, très largement pratiquée pour les simples raisons que le chlore est un puissant désinfectant, rémanent, facile à mettre en œuvre (surtout dans le cas de l'eau de Javel) et peu coûteux. Les taux à appliquer sont très variables puisqu'ils sont fonction de la demande en chlore de l'eau (elle-même fonction du temps de séjour de l'eau dans les réseaux de distribution). Le traiteur d'eau devra donc avoir comme objectif principal de réduire au mieux la valeur de cette demande en chlore, donc d'optimiser l'élimination de la matière organique et des composés minéraux consommateurs d'oxydants, lors des traitements antérieurs. L'élimination de la matière organique conduira également à un abattement de sa fraction biodégradable, donc à la diminution du risque de reviviscence bactérienne en réseau. Les taux à appliquer seront égaux à la demande en chlore plus le chlore libre nécessaire pour obtenir une bonne désinfection. Cette concentration complémentaire en chlore libre devra être de l'ordre de 0,3 à 0,5 mg/l pendant 30 à 45 minutes minimum (0,1 à 0,2 mg/l pendant 5 à 10 minutes en absence de virus).

➤ *L'utilisation du dioxyde de chlore*

▪ **Propriétés du dioxyde de chlore**

Le dioxyde de chlore (ClO_2), gaz dense (2,4 fois la densité de l'air) et jaune verdâtre, doit être préparé in situ du fait de son instabilité. Sa solubilité dans l'eau est élevée (dix fois plus que celle du chlore), où il s'hydrolyse lentement. Une solution à 10g/l de dioxyde de chlore maintenue à l'abri de la lumière ne perd que 1% de sa concentration initiale après sept semaines. Cependant, en milieu basique, il se dismute irréversiblement en chlorite et en chlorate.

En présence de lumière ($\lambda=365$ nm), les solutions de dioxyde de chlore sont décomposées à une vitesse qui dépend du temps et de l'intensité de l'exposition aux photons. L'augmentation de température entraîne également la décomposition du dioxyde de chlore gazeux en chlore et oxygène gazeux.

Le dioxyde de chlore, comme le chlore et ses dérivés, réagit rapidement sur le fer, le manganèse, les ions nitrite, sulfure et cyanure. Il réagit également sur les ions iodure mais pas sur les ions chlorure et bromure, ce qui limite considérablement la possibilité de formation d'organohalogénés par la présence d'ions halogénure dans l'eau à traiter. Il faut noter que le dioxyde de chlore ne réagit pas avec l'azote ammoniacal. Il présente une réactivité élevée avec certains composés organiques (phénols et amines) ce qui se traduit par une consommation de dioxyde de chlore et la formation d'ions chlorite.

Il est important de signaler que le chloroforme n'est théoriquement jamais formé lors de la réaction directe du dioxyde de chlore sur ces composés organiques. Toutefois, la présence de lumière, de charbon actif ou encore de réactions secondaires, convertit partiellement les ions chlorite et le dioxyde de chlore en acide hypochloreux, qui peut ensuite former du chloroforme. En fait, les principaux sous-produits d'oxydation par le dioxyde de chlore sont les aldéhydes (exemple : à partir des amines), des quinones (exemple : à partir des phénols) et des diacides insaturés et saturés (exemple : à partir des composés aromatiques).

En règle générale, 60 à 70% du dioxyde de chlore consommé se retrouve sous forme de chlorites, tandis que les ions chlorates sont probablement beaucoup moins présents (peu de données sont disponibles). Les atomes de chlore d'une partie du dioxyde de chlore consommé sont inclus dans des composés organochlorés formés (quelques pourcents), principalement sous forme d'acides dichloroacétique et trichloroacétique.

Les propriétés bactéricides, virulicides, sporicides et algicides du dioxyde de chlore sont dans la plupart des cas supérieures à celles du chlore. De plus, la rémanence du dioxyde de chlore est importante (temps de demi-vie à l'abri de la lumière d'environ 48 heures), contrairement à celle de l'ozone. A titre d'exemple, l'effet du dioxyde de chlore sur *Escherichia Coli* est plus élevé que celui du chlore, et relativement constant dans une large gamme de pH (6 à 10), contrairement au chlore.

▪ Production et mise en œuvre

Le dioxyde de chlore étant explosif dans l'air à des concentrations supérieures à 10% en volume, il est préparé sur le site d'utilisation sous forme de solution aqueuse. Il existe deux méthodes de production en solution aqueuse à partir d'une solution de chlorite de sodium.

Le procédé au chlore est le plus utilisé. Il a l'avantage de pouvoir faire un double traitement au dioxyde de chlore et au chlore si nécessaire, mais présente toutefois les inconvénients de former des traces de chlorates ainsi que de produire des traces de THM.

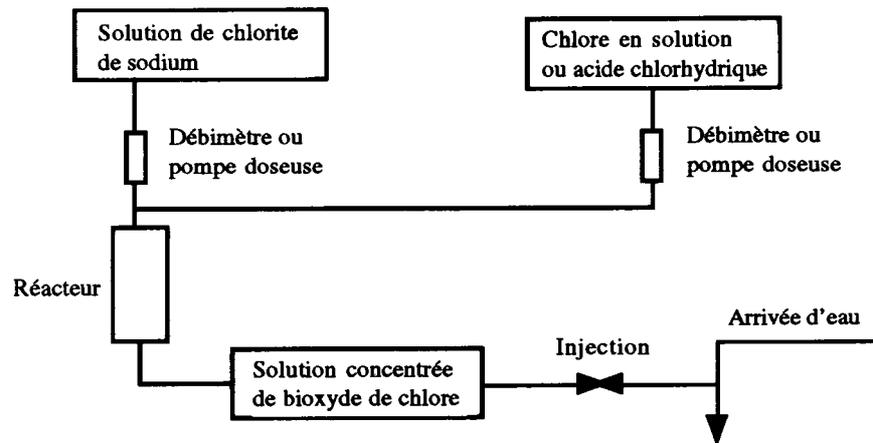


Figure 29 : Principe de la génération du dioxyde de chlore (ATO-CHEM)

Le procédé à l'acide chlorhydrique consomme plus de chlorite de sodium, mais évite les inconvénients de la présence de chlore sur l'usine (stockage) et dans l'eau (formation de chlorates et de composés organochlorés). La figure présente le schéma général du principe. Les installations peuvent produire entre 30 et 10 000 g/heure de ClO_2 .

Les solutions préparées (3 à 5 g/l) sont injectées (par une pompe doseuse) dans l'eau au taux voulu. Ces solutions sont corrosives, les matériaux à leur contact doivent être choisis en tenant compte de ce facteur.

▪ La demande en dioxyde de chlore des eaux

Comme dans le cas du chlore, la demande en dioxyde de chlore d'une eau dépend principalement du temps de contact et du taux de ClO_2 appliqué. Les valeurs des demandes en dioxyde de chlore (après 24 heures) des eaux brutes sont proches de 1mg/mg COD.

- **Place du dioxyde de chlore dans la filière et taux pratiqués**

Les trois qualités essentielles du dioxyde de chlore sont qu'il est un désinfectant puissant et rémanent, qu'il améliore les qualités organoleptiques des eaux traitées (contrairement au chlore), qu'il ne conduit pas (ou peu) à la formation de THM et autres TOX (à la différence du chlore).

C'est principalement en désinfection qu'il est le plus utilisé. Les taux de traitement pratiqués à ce niveau de la filière sont fonction de la qualité de l'eau et de la longueur du réseau. Le résiduel de ClO_2 doit être de l'ordre de 0,1 mg/l, pour l'action bactéricide et de 0,5 mg/l, pour l'action virulicide.

Le dioxyde de chlore peut être également utilisé en pré-oxydation, pour lutter contre la prolifération d'algues sur les ouvrages et pour oxyder le fer et le manganèse. Les taux pratiqués sont de l'ordre de 0,5 à 2 mg/l.

➤ ***Autres techniques d'oxydation et de désinfection***

D'autres oxydants peuvent être utilisés pour le traitement des eaux de surface comme :

- Le permanganate de potassium
- La monochloramine
- L'oxydation avancée par $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$
- L'irradiation UV

- **La monochloramine**

La chloramination n'est pas pratiquée en France. Elle consiste à remplacer le chlore par la monochloramine (NH_2Cl) préparée in situ (avant injection dans l'eau à traiter), à partir d'ammoniaque et de chlore. Dans la pratique, il faut introduire un léger excès de chlore et faire la réaction à pH élevé (voisin de 10), pour éviter la formation de la dichloramine (précurseur de goûts et mauvais désinfectant). Les avantages de la chloramination sont une limitation importante de la formation de THM et de TOX, la réduction des goûts et odeurs de chlore et une bonne action algicide. Par contre, le pouvoir bactéricide et virulicide est limité par rapport aux désinfectants traditionnels.

- **Le permanganate de potassium**

En traitement de surface, il est utilisé surtout en pré-oxydation pour son action algicide et pour oxyder le manganèse. Toutefois, son potentiel élevé lui confère des propriétés oxydantes vis-à-vis d'autres composés minéraux (fer, nitrites, sulfures) et des composés organiques. Sa mise en œuvre consiste à préparer des solutions concentrées et les injecter par des pompes doseuses. L'analyse de ces solutions peut être effectuée par la méthode iodométrique.

- **L'irradiation UV**

Le domaine des rayons ultraviolets se situe dans une gamme de longueurs d'onde de 200 à 400 nm (UVA : 400-315 nm, UVB : 315-280 nm, UVC : 280-200 nm). Seuls les UVC présentent une action germicide, dont l'effet est maximum pour une longueur d'onde de 253,7 nm (le spectre d'absorption en UV des micro-organismes est compris entre 200 et 300 nm), par inhibition de la réplication de l'ADN (dimérisation des bases thymines adjacentes).

L'irradiation n'est pas un procédé d'oxydation (les propriétés physico-chimiques de l'eau sont conservées et aucun sous-produit n'est formé) mais plutôt de désinfection, utilisant des lampes à basse pression dont la longueur d'onde est majoritairement à 253,7 nm.

Le degré de désinfection obtenu par ces rayonnements dépend du type de micro-organisme et de la quantité d'énergie absorbée par celui-ci. On parle de dose d'exposition aux UV en $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ ou mJ/cm^2 . Cette dose est de quelques mJ/cm^2 pour inactiver la plupart des micro-organismes (la législation française impose une dose d'exposition de $25 \text{ mJ}/\text{cm}^2$).

- **L'oxydation avancée par $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$**

La dégradation des micropolluants organiques réfractaires à une oxydation classique peut être envisagée par ce procédé. Son efficacité vis-à-vis de ceux-ci résulte de la génération in-situ d'espèces radicalaires très réactives (principalement les radicaux hydroxyles).

Ce procédé est inséré entre la filtration sur sable et la filtration sur charbon actif en grains. Ce traitement a pour objectif principal d'abaisser la teneur en pesticides avant la filtration sur CAG, pour augmenter la durée de vie du CAG. L'efficacité de l'oxydation est optimale pour un rapport $\text{O}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$ proche de 0,4 à 0,6 de peroxyde d'hydrogène par gramme d'ozone introduit et pour un pH compris entre 7,5 et 8. L'oxydation est généralement effectuée avec

des temps de séjour de l'eau de l'ordre de 10 minutes dans des contacteurs d'ozone avec injection de H₂O₂

2.2 FILIERE NANTAISE DE TRAITEMENT DES EAUX BRUTES

2.2.1 Introduction (23, 25)

La production d'eau potable est assurée par la régie municipale de l'eau située à l'usine de La Roche. Celle-ci s'étend sur une superficie de 12 hectares et 30 personnes assurent la production d'eau de qualité alimentaire 24 heures/24.

L'eau de la Loire pompée à Mauves appartient à la classe des « eaux de surface dures et moyennement contaminées » (Annexe 2). En effet, les eaux brutes sont classées en fonction de leur origine et de paramètres physico-chimiques (pH, TAC, teneur en matières organiques essentiellement). A chaque catégorie correspond une filière de traitement adaptée aux caractéristiques de la ressource et à la capacité de traitement demandée afin de produire de l'eau potable en quantité suffisante et à moindre coût.

La représentation schématique de la filière de « potabilisation » nantaise est la suivante :

Figure 30 : Schéma de la filière de traitement nantaise (Régie de l'eau)

La préozonation a pour objectif principal d'améliorer la coagulation-floculation en termes de turbidité éliminée, durée de vie des filtres et économie de réactifs.

La coagulation-floculation est réalisée avec du sulfate d'aluminium à faibles doses (quelques ppm).

L'injection de CAP permet de lutter contre les pointes de pollutions temporaires (micropolluants organiques, métaux lourds, germes...) ou accidentelles et d'optimiser l'étape de décantation.

Lors de la décantation, les particules coagulées forment des boues qui sont séparées de l'eau.

La filtration rapide sur « mono-couche » de sable retient les particules ayant échappé au traitement précédent.

La postozonation a trois objectifs principaux. Le premier est de désinfecter. Le second est de transformer une partie du COD restant en CODB éliminable ensuite (partiellement) sur les filtres à CAG « biologiques ». Le troisième est d'oxyder les pesticides.

La filtration sur CAG permet un abattement de la matière organique de 10 à 30% (surtout par voie biologique) et retient par adsorption certains micropolluants organiques comme les pesticides.

La désinfection finale se fait à l'eau de javel (solution d'hypochlorite de sodium). Celle-ci empêche la multiplication des germes dans les réseaux de distribution et les sites de stockage.

La concentration en chlore résiduelle est de l'ordre de 0,5 mg/litre d'eau en sortie d'usine et il existe des systèmes de « rechloration » sur les sites de stockage.

2.2.2 Quelques chiffres (25) :

➤ *Concernant la capacité de production*

Capacité nominale de production : 240 000 m³/jour

Production moyenne journalière : 106 000 m³/jour

Production maximum (juin 1976) : 196 000 m³

➤ *Concernant les caractéristiques techniques du traitement*

3 décanteurs type « Pulsator » :

- capacité unitaire de traitement : 3900 m³/heure

- vitesse de décantation : 3,45 m³/m² /heure

14 filtres à sable :

- capacité unitaire de traitement : 828 m³/heure
- vitesse de filtration : 6,85 m³/m² /heure

3 ozoneurs :

- capacité de production : 42 kg/heure (préozonation : 12 kg et postozonation : 30 kg)
- tours de contact : 2 tours de préozonation (volume total : 400 m³)
3 tours de postozonation (volume total : 1800 m³)

CAP : taux de traitement de 0 à 15 g/m³ selon l'importance de la pollution

14 filtres à CAG : vitesse de passage de l'eau de 16 m/heure

➤ ***Concernant le stockage de l'eau potable :***

Site de La Roche : 3 citernes d'une capacité totale de 22 000 m³

Site du Bout des Landes : capacité 5 000 m³

Site de La Contrie : 9 compartiments d'une capacité totale de 120 000 m³

3. CONCLUSION

Du fait d'une médiocre qualité (mais assez stable depuis 1990), l'eau de la Loire est traitée selon un processus complexe et complet conformément à la loi.

La quantité produite pour l'approvisionnement des 8 communes gérées par le service de l'eau de la communauté urbaine de Nantes, soit environ 412 500 habitants (Nantes, St Sébastien-sur-Loire, Ste Luce-sur-Loire, Thouaré-sur-Loire, Carquefou, La Chapelle-sur-Erdre, Orvault et St-Herblain) est suffisante à ce jour. Cependant, 80% de la population de Loire-Atlantique dépend de la Loire comme unique ressource (50% de la population desservie par l'usine de La Roche et 30% desservie par l'usine de Basse-Goulaine dont les captages sont effectués dans la nappe alluviale-26).

« Une pollution accidentelle importante de la Loire serait catastrophique » pour l'alimentation en eau potable du département » selon M. Le Guennic, responsable de l'eau potable à la DDASS de Loire-Atlantique, « surtout si la nappe alluviale de Basse-Goulaine était

concernée ». En effet, une nappe souterraine est toujours beaucoup plus difficile à dépolluer à court terme. Aussi, faut-il protéger la Loire vis-à-vis des pollutions.

Le code de la santé publique (article 20) impose aux communes de protéger les captages avant le 4 janvier 1997 en délimitant 3 zones de protection (immédiate, rapprochée et éloignée) dans lesquelles les activités humaines sont très réglementées (Annexe 3, 21). Or, à Nantes (captage de Mauves), la procédure est toujours bloquée à la phase d'étude (seuls 3 captages sur 16 en Loire-Atlantique bénéficient d'une déclaration d'utilité publique-Annexe 2). Toutefois, à l'initiative des DDASS des départements de Loire-Atlantique et du Maine et Loire, a été mis récemment en place un « plan d'alerte Loire » en cas de pollution accidentelle. Ce plan prend en compte certaines caractéristiques des polluants comme la toxicité, la densité et la solubilité ainsi que leurs différents types de diffusions hydrographiques obtenus à partir de modèles d'études.

En résumé, l'agglomération nantaise dispose d'une unique ressource, la Loire, et de dispositifs de traitements suffisants pour alimenter en eau l'ensemble de la communauté urbaine de Nantes. Le meilleur moyen d'apprécier l'efficacité de ces traitements est de contrôler la qualité de l'eau distribuée aux abonnés par des prélèvements d'échantillons d'eau au niveau de l'usine de « potabilisation » mais également dans le réseau de distribution.

QUALITE DE L'EAU POTABLE

1. LEGISLATION

« () quiconque offre au public de l'eau en vue de l'alimentation humaine () est tenu de s'assurer que cette eau est propre à la consommation » (Code de la santé publique, article 19-Annexe 3).

« Sont considérées comme eaux destinées à la consommation humaine :

Les eaux livrées à la consommation, conditionnées ou non, à l'exclusion des eaux minérales naturelles.

Les eaux utilisées dans les entreprises alimentaires à des fins de fabrication, de traitement, de conservation ou de mise sur le marché de produits ou de substances destinés à être consommés par l'homme et qui peuvent affecter la salubrité de la denrée alimentaire finale.

La glace alimentaire d'origine hydrique. » (Décret N° 89-3 du 3 janvier 1989, article 1^{er}-Annexe 3)

Dans les faits, et conformément à la loi (Annexe 3), l'eau destinée à l'alimentation subit un double contrôle (3, 15).

D'une part, l'eau étant un produit local, on a des contrôles officiels départementaux sous l'autorité du préfet. Ce dernier donne délégation à la DDASS qui réalise les programmes de contrôle réglementaire concernant le type de prélèvement (ressource, unité de production ou réseau de distribution), leur nombre (en fonction du débit journalier de production et du nombre d'utilisateurs) et les types d'analyses à effectuer. La DDASS transmet les résultats d'analyses au maire qui est tenu de les afficher à disposition du public.

Les prélèvements sont analysés par le laboratoire départemental d'hygiène agréé par le ministère de la santé (en Loire-Atlantique : Institut départemental d'analyse et de conseil, ou IDAC, situé à La Chantrerie, Nantes). Toutefois, des variations de la qualité de l'eau peuvent se produire de manière très soudaine (exemple : pollution accidentelle au niveau de la ressource). Aussi, les contrôles ponctuels opérés par la DDASS ne suffisent pas à garantir une qualité constante.

C'est pourquoi, la fourniture de l'eau et sa qualité étant sous la responsabilité des communes, l'exploitant doit aussi surveiller la qualité de l'eau distribuée. Ceci se fait, en général par trois types d'autocontrôles :

- Des analyses automatisées permanentes sur les lieux de pompage, de production et de distribution. Ces automates mesurent un nombre déterminé de paramètres en continu et, en cas de dépassement des normes de qualité, peuvent déclencher une alarme.

- Des analyses fréquentes et systématiques effectuées dans des laboratoires de terrain.

- Des analyses spécifiques et fines dans un laboratoire spécialisé (Ceci est surtout vrai pour les exploitants privés, la municipalité de Nantes travaillant en régie, c'est également l'IDAC qui effectue ces analyses).

2. LES 63 PARAMETRES DE LA QUALITE (2, 15, 24)

En France, l'eau « propre à la consommation humaine » doit répondre à 63 critères, qui reflètent deux préoccupations permanentes :

En priorité, celle de la santé publique : fournir au consommateur une eau garantie contre tous les risques, immédiats ou à long terme (c'est le principe de précaution maximum qui préside à l'établissement des normes).

Ensuite, celle du confort et du plaisir : offrir une eau agréable à boire, claire, inodore et équilibrée en sels minéraux.

2.1 PARAMETRES ORGANOLEPTIQUES

Ces critères n'ont pas de valeur sanitaire directe. Une eau peut être trouble, colorée, sentir le chlore et être parfaitement consommable.

2.1.1 Couleur

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

La couleur est due à la présence de matières organiques colorées (substances humiques), de métaux ou de rejets industriels (industries papetières et textiles principalement).

Les métaux qui colorent l'eau sont notamment le fer (couleur rouge), qui provient soit de la composition naturelle des eaux, soit de la dissolution des tuyauteries métalliques des réseaux

de distribution, et le manganèse (couleur noire). Dans les cas extrêmes, une coloration bleu clair peut apparaître en présence de cuivre. Cependant, la couleur de l'eau résulte essentiellement de particules colloïdales en suspension, peu ou pas décantables.

La couleur réelle de l'eau est liée aux seules substances dissoutes donc après élimination de la turbidité.

➤ ***Effets, nuisances***

L'importance de la couleur est surtout d'ordre organoleptique, c'est-à-dire de produire un effet sensoriel. Elle peut être l'indice d'une pollution par diverses substances chimiques. La coloration d'une eau peut être préjudiciable pour certains traitements de désinfection comme les ultraviolets.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Le principe de la mesure de la coloration d'une eau est la comparaison de la couleur d'un échantillon avec des témoins de référence. Le seuil d'apparition est déterminé par des dilutions successives (NF* en ISO 7887).

On considère qu'une unité de couleur UC correspond à 1 mg de platine en présence de cobalt (échelle colorimétrique platine/cobalt ou échelle Hazen). A partir de 15 UC, le consommateur peut percevoir la coloration de l'eau dans un verre d'eau.

Norme de potabilité française** : inférieure à 15 UC

➤ ***Recommandations, traitements***

La clarification de l'eau permet de supprimer la couleur due aux matières en suspension.

Les traitements de déferrisation et démanganisation éliminent les colorations dues à ces métaux.

*l'ensemble des méthodes de référence pour l'analyse sont regroupées dans : AFNOR, qualité de l'eau, tomes 1 à 4, 6^e édition, 2001.

**l'ensemble des normes de potabilité se trouvent en Annexe 3 et sont récapitulées en Annexe 6

2.1.2 Turbidité

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

La turbidité de l'eau a pour origine la présence de matières en suspension (argile, limons, particules fibreuses, particules organiques colloïdales, plancton, organismes microscopiques) qui donnent un aspect trouble à l'eau.

Des turbidités d'apparition occasionnelle surviennent dans les réseaux du fait de dépôts dans les canalisations, de phénomènes de corrosion ou de perturbations dans le traitement. La pluviométrie joue aussi un rôle important vis-à-vis de ce paramètre dans les eaux superficielles et souterraines selon leurs origines (karst, nappes peu profondes).

➤ *Effets, nuisances*

Les risques sanitaires ne sont pas directement liés à la présence des particules en suspension mais aux bactéries, kystes, parasites et surtout virus qui s'y fixent et sont ainsi protégés des désinfectants. Le risque microbiologique est aggravé dans le cas des matières organiques qui neutralisent le désinfectant, favorisant la survie des germes et leur prolifération ultérieure dans les réservoirs et le réseau de distribution (reviviscence biologique).

Les sous-produits issus de la recombinaison des particules organiques avec le désinfectant engendrent un risque chimique.

Par ailleurs, les particules en suspension peuvent générer des saveurs et des odeurs désagréables. Le consommateur préférera une eau non contrôlée à la limpidité parfaite plutôt qu'une eau trouble aux qualités hygiéniques satisfaisantes.

➤ *Normes, interprétation des résultats*

La turbidité représente une mesure non spécifique de la concentration des particules en suspension.

Les mesures de turbidité (turbidimétrie), exprimées en unités Jackson UJ, correspondent à une mesure optique de passage de la lumière (NF en ISO 7027).

Norme de potabilité française : inférieure à 2 UJ

➤ ***Recommandations, traitements***

La turbidité des eaux brutes est éliminée par simple filtration ou mieux, par coagulation-sédimentation-filtration.

Afin d'assurer une bonne désinfection, il est préconisé de maintenir une turbidité inférieure à 1 UJ.

2.1.3 Odeur

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

L'odeur a pour origine principale la présence de substances organiques volatiles ou de certains gaz :

- D'origine biologique, les odeurs révèlent la présence de micro-organismes qui peuvent signifier une augmentation de la concentration en germes pathogènes ;

- Elles peuvent aussi provenir de pollutions issues des activités humaines (effluents industriels ou agricoles). Elles sont considérées dans ce cas comme précurseurs de pollution, éventuellement toxique, des captages ou des réseaux.

Le chlore utilisé comme désinfectant peut générer des produits à haut pouvoir olfactif avec certaines molécules organiques.

Les odeurs non spécifiques de poisson, de moisi ou d'herbe, qui vont en général de pair avec les proliférations biologiques, se manifestent surtout dans les eaux de surface pendant les mois d'été.

➤ ***Effets, nuisances***

L'existence d'une odeur inhabituelle dans l'eau de distribution publique est révélatrice d'une dégradation de la qualité.

Elle peut, par ailleurs, détourner le consommateur de l'eau du robinet.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

La méthode d'estimation de l'odeur de l'eau est basée sur la détermination du seuil d'apparition de celle-ci après dilutions successives de l'eau à analyser par comparaison avec une eau servant de témoin (NF en 1622).

Norme de potabilité française : absence d'odeur pour un taux de dilution de 2, à 12°C et de 3, à 25°C

➤ ***Recommandations, traitements***

Les problèmes d'odeur sont souvent associés à ceux de la saveur.

Les techniques de désodorisation le plus souvent appliquées utilisent l'absorption de gaz odorants dans les tours de lavage avec oxydation au chlore ou à l'ozone. Plus récemment se sont développés les traitements des composés odorants par voie biologique.

2.1.4 Saveur

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

La saveur représente les sensations perçues à la suite de la stimulation des papilles gustatives par certaines substances solubles.

L'apparition de goût provient souvent d'une croissance de micro-organismes à l'intérieur du système de distribution ou bien d'une contamination occasionnelle par les matériaux utilisés pour la construction ou l'entretien du réseau. Parfois, l'eau naturelle présente une saveur particulière. Enfin, le traitement au chlore de l'eau de distribution produit des substances organochlorées à haut pouvoir gustatif dans certaines conditions.

➤ ***Effets, nuisances***

La saveur de l'eau n'est pas toujours révélatrice de sa qualité.

De nombreuses substances minérales peuvent donner une saveur désagréable à des concentrations beaucoup plus faibles que celles qui provoqueraient des effets toxiques.

Au contraire, une eau au goût agréable peut se révéler non conforme aux normes de potabilité. Cependant, la modification des caractéristiques gustatives constitue un bon indicateur de dégradation possible de la qualité.

Norme de potabilité française : absence de saveur pour un taux de dilution de 2, à 12°C et de 3, à 25°C

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

La méthode d'estimation de la saveur de l'eau est basée sur la détermination du seuil d'apparition de celle-ci après dilutions successives de l'eau à analyser et dégustation, par comparaison avec une eau de référence (NF en 1622).

➤ ***Recommandations, traitements***

Il est possible de limiter l'importance des problèmes par un entretien préventif du système de distribution comportant la pratique régulière du nettoyage de l'intérieur des conduites, ainsi que par la détection et la réparation des fuites. En cas de problèmes persistants, on peut être amené à changer de ressources.

Le contrôle d'échantillons d'eau prélevés en différents points du réseau permet habituellement de repérer la source de pollution.

Les procédés de traitement de l'eau sont soit les techniques de filtration soit l'oxydation dans le cas de matières organiques, soit une meilleure aération de l'eau, soit l'adsorption sur charbon actif.

2.2 PARAMETRES PHYSICOCHIMIQUES EN RELATION AVEC LA STRUCTURE NATURELLE DES EAUX

Il s'agit des caractéristiques que l'eau a pu acquérir dans son parcours naturel (dissolution de nombreux éléments minéraux notamment), de la température, de la conductivité et du pH de l'eau.

2.2.1 Température

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Les eaux souterraines sont à température relativement constante toute l'année, 12 à 15°C environ lorsque leur environnement n'est pas modifié (mise à nu de la nappe,...).

La température des eaux superficielles (rivières, lacs, retenues) est très variable selon les saisons et peut passer de 2°C en hiver à 30°C en été.

La source principale de l'augmentation de température d'origine anthropique pour les eaux de surface est constituée par les centrales nucléaires (70 à 80%), le reste étant lié à la métallurgie, aux industries chimiques et alimentaires, etc...

➤ ***Effets, nuisances***

La température optimale pour se désaltérer se situe vers 12 à 15°C. En pratique, elle n'a pas d'action directe sur la santé de l'homme.

La diminution de la température entraîne les effets suivants :

- Diminution de l'efficacité des traitements dont la désinfection ;
- Augmentation de la viscosité de l'eau ;
- Diminution des vitesses de sédimentation et de filtration.

L'augmentation de la température a diverses conséquences :

- Croissance bactérienne favorisée induisant des problèmes de saveur, de couleur, de corrosion voire d'hygiène ;
- Diminution du pH optimal pour la coagulation ;
- Augmentation de la vitesse de formation des trihalométhanes avec une eau traitée au chlore ;
- Augmentation de la corrosion dans les stations de traitement ;
- Augmentation des odeurs dues aux composés volatils.

Lors des travaux d'adduction ou d'exploitation il faut tenir compte des risques de gel.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Dosage électronique.

Norme de potabilité française : inférieure à 25°C

➤ ***Recommandations, traitements***

La maîtrise de la température doit intervenir, en premier lieu, au niveau des rejets d'eau chaude dans le milieu naturel par l'utilisation de tours de réfrigération pour les rejets des centrales de production électrique.

Par ailleurs, des travaux d'amélioration peuvent s'avérer utiles sur le réseau d'adduction/distribution :

- Etanchéification des réservoirs et éventuellement des canalisations ;
- Enfouissement plus profond des tuyaux d'alimentation dans les tranchées ;
- Le cas échéant, recherche d'une ressource en eau présentant naturellement des caractéristiques plus favorables.

2.2.2 pH

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

Le pH correspond, pour une solution diluée, à la concentration en ions hydrogènes. Il mesure l'acidité ou la basicité (alcalinité) d'une eau.

Le pH d'une eau naturelle dépend de l'origine de celle-ci et de la nature des terrains traversés. Des eaux issues de massifs cristallins auront un pH plutôt acide. A l'inverse, des eaux provenant de régions calcaires auront un pH plutôt basique. Certaines eaux superficielles ont parfois un pH s'élevant brutalement en été, résultant d'une forte production végétale. Généralement, il se situe dans la plupart des eaux brutes entre 6,5 et 8,5.

Le pH interfère avec d'autres paramètres de qualité dans des réactions chimiques complexes (dureté, alcalinité, etc...).

➤ *Effets, nuisances*

Le pH est si intimement lié à d'autres éléments de la qualité de l'eau de boisson qu'il est difficile de savoir s'il exerce une influence directe sur la santé dans la fourchette des valeurs généralement observées.

Un des objectifs principaux de la maîtrise de pH est la diminution de la corrosion, de la dissolution des métaux et des incrustations dans les canalisations et accessoires de plomberie, qui résultent des réactions complexes entre le pH et d'autres paramètres : dioxyde de carbone, dureté, alcalinité et température.

Des pH inférieurs à 7 peuvent provoquer une corrosion sévère des tuyauteries métalliques conduisant à une augmentation des concentrations de certaines substances métalliques (plomb, cadmium).

Des pH supérieurs à 8 entraînent une diminution de l'efficacité du processus de désinfection au chlore, car celui-ci se retrouve sous forme non bactéricide. Un pH élevé peut conduire à

des dépôts incrustants dans les circuits de distribution. Par ailleurs, il peut intensifier une possible coloration et donner une saveur amère.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

L'échelle du pH s'étend de 0 à 14. Une eau est dite neutre à pH 7. Des eaux ayant des pH inférieurs à 7 ou supérieurs à 7 sont respectivement acides ou basiques.

Méthode de référence pour l'analyse : méthode potentiométrique avec électrode de verre (NF T 90-008).

Norme de potabilité française : pH compris entre 6,5 et 9

➤ ***Recommandations, traitements***

L'efficacité des mécanismes de floculation et de coagulation, voire la filtration, dépend du pH.

La correction des tendances agressives de l'eau peut s'effectuer, entre autres, par aération, ou adjonction de carbonate de calcium par exemple, jusqu'à un pH d'équilibre de 8 à 8,5.

Les effets néfastes peuvent être également limités par injections de divers produits créant, à l'intérieur des conduites, des dépôts insolubles.

Il existe plusieurs moyens de lutte contre l'acidité de l'eau :

Neutralisation de l'eau par des réactifs alcalins (chaux, soude, carbonate de sodium) ;

Filtration sur produits alcalino-terreux (marbre, etc...).

Par ailleurs, il peut être intéressant d'employer des conduites résistant à la corrosion (PVC qualité alimentaire).

La chloration par chlore gazeux abaisse le pH.

2.2.3 Conductivité

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Il existe une relation entre la teneur en sels dissous d'une eau et la résistance qu'elle oppose au passage d'un courant électrique. Cette résistance peut s'exprimer de deux manières : la résistivité ou son inverse, la conductivité. La conductivité est proportionnelle au

degré de minéralisation (teneur globale en espèces minérales généralement ionisées) et varie en fonction de la température.

Le lessivage des sols entraîne naturellement la dissolution d'un certain nombre de sels (carbonates, bicarbonates, chlorures, sulfates, nitrates, calcium, sodium, potassium, magnésium pour les principaux). Certaines activités industrielles et agricoles rejettent également des sels et provoquent donc un accroissement de la conductivité.

➤ *Effets, nuisances*

La conductivité en tant que telle n'a pas d'effet sur la santé, puisqu'elle reflète la concentration de l'ensemble des minéraux dissous.

La minéralisation des eaux peut entraîner selon les cas un goût salé (variable selon la nature des sels présents), une accélération de la corrosion, des dépôts dans les tuyauteries (entartrage).

➤ *Normes, interprétation des résultats*

La mesure de la conductivité C se fait par un conductimètre (NF en 27888).

L'unité utilisée est le micro-Siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Pour la résistivité électrique R , l'unité est l'ohm-centimètre.

La relation entre ces deux paramètres est : $C (\mu\text{S}/\text{cm}) = 1\,000\,000/R (\text{ohm-centimètre})$.

La valeur de la conductivité est peu significative en elle-même. Par contre, les variations de ce paramètre reflètent une évolution des conditions hydrogéologiques ou environnementales qui justifient la mise en œuvre d'une surveillance accrue.

La conductivité d'une eau déminéralisée la plus pure obtenue est $0,042 \mu\text{S}/\text{cm}$ tandis que celle de l'eau de mer est de l'ordre de $30\,000 \mu\text{S}/\text{cm}$. Les eaux potables ont généralement une conductivité comprise entre 200 et $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$.

On peut classer les eaux de boisson en fonction de leur conductivité :

Norme de potabilité française : inférieure à $400 \mu\text{S}/\text{cm}$

➤ *Recommandations, traitements*

La minéralisation d'une eau peut être diminuée par des procédés onéreux (échange d'ions, osmose inverse, électrodialyse). Ils sont donc utilisés dans des cas très spécifiques (rarement en adduction publique).

Une minéralisation trop faible peut être augmentée par différents traitements :

- Gaz carbonique et chaux ou carbonate de calcium ;
- Bicarbonate de sodium et sel de calcium ;
- Bicarbonate de sodium et chaux ;
- Carbonate de sodium et gaz carbonique ;
- Percolation sur matériaux spécifiques.

2.2.4 Chlorures

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

Très répandus dans la nature, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl), de potassium (KCl) et de calcium (CaCl₂), les ions chlorures, dont la plus grande partie se trouve dans les océans, constituent environ 0,05% de la lithosphère (partie solide de la croûte terrestre). De façon générale, l'ion chlorure est présent dans toutes les eaux à des concentrations variables.

Indépendamment de la nature de la formation géologique traversée, la présence de chlorures dans les eaux naturelles peut être attribuée à la dissolution de dépôts de sel gemme, à la pollution provenant du salage des routes, aux effluents de l'industrie chimique, à l'exploitation des puits de pétrole, des mines de potasse, aux rejets des égouts, aux drainages d'irrigation, à la pollution par lixiviation des décharges et à la pénétration de l'eau de mer dans les régions côtières. Des additifs utilisés pour le traitement de l'eau sont aussi responsables d'une augmentation des teneurs en chlorures.

Dans les eaux de surface, ils sont présents à faible concentration : pour une eau non polluée, le niveau est souvent inférieur à 10 mg/l voire à 1 mg/l. Dans les eaux souterraines, les teneurs en ions chlorures peuvent atteindre quelques grammes par litre au contact de certaines formations géologiques.

La principale source de chlorures pour l'organisme humain est fournie par l'alimentation, la dose moyenne journalière est de 6 grammes voire 12 grammes si l'on utilise du sel comme condiment. L'apport par inhalation reste négligeable. En pratique, l'évaluation de l'ingestion

quotidienne des aliments est très variable suivant les habitudes culinaires. L'ingestion par l'eau de boisson représente environ 100 mg/jour.

➤ ***Effets, nuisances***

Le régime alimentaire quotidien d'un adulte doit absolument lui fournir 600 mg de chlorure qui constitue d'ailleurs l'anion le plus abondant du corps humain.

Les eaux chlorurées alcalines sont laxatives, mais généralement les chlorures présents dans l'eau potable n'ont pas de conséquences toxiques pour l'homme, même à de fortes concentrations (1000 mg/l). Cependant, ils peuvent être préjudiciables aux personnes atteintes de maladies rénales ou cardio-vasculaires.

Des concentrations élevées de chlorures nuisent au goût de l'eau en lui conférant une saveur salée à partir de 250 mg/l, surtout lorsqu'il s'agit de chlorure de sodium. Mais le seuil gustatif demeure très variable selon les individus.

Des teneurs élevées de chlorures attaquent également les métaux du réseau de distribution, surtout lorsque les eaux sont faiblement alcalines.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthode de référence pour l'analyse : méthode titrimétrique (NF ISO 9297).

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 200 mg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Les traitements possibles sont :

- La distillation ;
- L'osmose inverse ;
- L'électrodialyse.

Cependant, ils imposent des investissements financiers conséquents au niveau d'une mise en place sur la distribution publique ; le remède le plus économique semble être une dilution des eaux chargées de chlorures avec les eaux de ressources qui en contiennent peu. Par exemple, à

Nantes, la remontée du bouchon vaseux et du front salin de l'estuaire vers l'amont de la Loire a nécessité de capter l'eau brute au niveau de Mauves (15 km en amont de Nantes).

2.2.5 Sulfates

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

Composés naturels des eaux, les ions sulfates sont liés aux cations majeurs : calcium, magnésium et sodium. A part ceux du baryum, du plomb et du strontium, la plupart des sulfates sont solubles dans l'eau. Ils peuvent néanmoins être réduits en sulfure, volatilisés dans l'air en hydrogène sulfuré (H₂S), précipités en sel insoluble ou assimilés par des organismes vivants.

La concentration en sulfates dans les eaux naturelles est très variable mais ne dépasse généralement pas le gramme par litre.

De nombreuses industries déversent dans le milieu naturel des effluents aqueux chargés en sulfates (tanneries, industries papetière et textile, ateliers de décapage métallique, etc...).

Le dioxyde de soufre atmosphérique (SO₂), résultant de la combustion des éléments fossiles, peut lui aussi contribuer à l'apparition des sulfates dans les eaux superficielles. Les sulfates d'aluminium et de fer, largement utilisés pour la floculation dans le traitement de l'eau, augmentent également la teneur en sulfates des eaux traitées.

➤ *Effets, nuisances*

Les ions sulfates sont par eux-mêmes peut toxiques. Des doses comprises entre 1 et 2 grammes ont un léger effet purgatif chez l'adulte. Cependant, des concentrations inférieures peuvent affecter les enfants et les nouveaux consommateurs d'eau (troubles gastro-intestinaux et diarrhéiques). La consommation régulière d'eau chargée en sulfates fait disparaître ces effets laxatifs.

Les seuils de détection gustative pour les sulfates les plus courants vont de 200 à 500 mg/l pour le sulfate de sodium, de 250 à 900 mg/l pour le sulfate de calcium et de 400 à 600 mg/l pour le sulfate de magnésium.

Certaines eaux minérales contiennent jusqu'à 1200 mg/l de sulfates.

Des teneurs supérieures à 300 mg/l peuvent contribuer à la corrosion des systèmes de distribution, surtout avec des eaux faiblement alcalines.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthode de référence pour l'analyse : méthode néphélométrique (NF T 90-040).

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 250 mg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

L'élimination des sulfates dans les eaux de distribution publique est peu pratiquée. Les procédés employés sont l'électrodialyse, l'osmose inverse et les résines échangeuses d'ions.

2.2.6 Silice

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

La silice (SiO_2), l'oxyde de silicium, et les silicates (combinaison de silice avec divers oxydes métalliques) sont extrêmement abondants dans l'écorce terrestre. Les silicates jouent un rôle très important dans l'industrie du verre, du mica, de la porcelaine, du ciment,...

La silice a une origine essentiellement naturelle et se rencontre, dans les eaux brutes, sous deux formes : soluble (ionique) ou colloïdale. Sa solubilité dépend principalement de la température et du pH ; la concentration saturante allant de 5 mg/l à 0°C à 140 mg/l à 25°C. Les eaux de région granitique peuvent en contenir plusieurs dizaines de mg/l.

Les silicates peuvent aussi provenir d'un traitement des eaux, associés ou non aux polyphosphates, car ils sont employés comme coagulants et inhibiteurs de la corrosion. En effet, ils libèrent de la silice colloïdale qui s'adsorbe sur les parois des canalisations et réagit avec les ions métalliques des surfaces corrodées pour donner un film de protection. Les alliages d'aluminium et les aciers (noirs et galvanisés) sont ainsi protégés.

➤ ***Effets, nuisances***

Aux teneurs observées dans les eaux naturelles ou traitées, le silicium ne paraît pas avoir d'effet toxique. En dehors des manifestations pathologiques au niveau du poumon en cas d'inhalation, son action biologique a été peu étudiée. Par ailleurs, il pourrait être associé au calcium dans les processus de minéralisation des tissus osseux.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthode de référence pour l'analyse : spectrométrie d'absorption moléculaire (NF T 90-007).

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 10 mg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Il existe plusieurs types de traitements industriels susceptibles d'éliminer la silice par un processus d'adsorption (désiliciages par l'aluminate de sodium et par la magnésie).

2.2.7 Calcium (5)

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates. Ses sels se rencontrent dans presque toutes les eaux naturelles. Leur teneur dans l'eau, qui peut varier de 1 à 150 mg/l, est directement liée à la nature géologique des terrains traversés.

L'oxyde de calcium est utilisé dans le bâtiment, la production du papier, le raffinage du sucre et du pétrole, la tannerie et le traitement des eaux brutes et résiduaires. La neutralisation d'effluents acides s'effectue souvent par la chaux, ce qui ajoute du calcium dans le milieu naturel en quantité non négligeable. Dans les cours d'eau pollués organiquement, la concentration en calcium peut être accrue car les protéines et acides faibles provenant de l'oxydation des matières organiques augmentent la mise en solution du carbonate de calcium.

Les sels de calcium sont obtenus en majorité lors de l'attaque de roches calcaires par l'anhydride carbonique dissous (CO₂). Il constitue l'élément cationique dominant des eaux superficielles.

Le calcium est l'élément principal de la dureté de l'eau.

L'alimentation (produits laitiers) est la voie principale qui apporte, dans le cadre d'un régime moyen, 1000 mg de calcium par jour. La part moyenne de l'eau dans l'ingestion totale varie de 5 à 20%.

➤ ***Effets, nuisances***

Elément essentiel (99% dans le squelette), le calcium doit être fourni au corps humain à raison de 0,7 à 2 g/jour.

Des concentrations élevées dans l'eau ne présentent pas de danger pour la santé. Le seuil de détection gustative se situe vers 100 à 300 mg/l d'eau.

Dépendant de la température, du pH et de l'alcalinité de l'eau, la concentration en calcium constitue un facteur favorisant selon le cas, soit l'entartrage (forte teneur), soit la corrosion (faible teneur) des canalisations. Une teneur suffisante peut provoquer un léger dépôt de carbonate sur les conduites métalliques et les protéger de la corrosion.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthodes de référence pour l'analyse : spectrométrie d'absorption atomique (NF en ISO 11885).

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 100 mg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Les traitements d'adoucissement proposés pour corriger une dureté excessive de l'eau consistent à :

- Eviter la précipitation du calcaire (injection de polyphosphates,...) ;
- Eliminer les ions Ca²⁺ sur résines échangeuses cationiques ;

- Adoucir à la chaux ou à la soude ce qui revient à faire précipiter le carbonate de calcium que l'on sépare ensuite.

Au contraire, si l'eau est trop douce, il faut procéder à un traitement de reminéralisation de l'eau (par exemple à l'eau de chaux) pour éviter toute dégradation des canalisations.

2.2.8 Magnésium

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

Le magnésium est un élément très répandu dans la nature, dans de nombreux minéraux et dans les calcaires (2,1% de l'écorce terrestre). Son abondance géologique, sa grande solubilité, sa large utilisation industrielle (industrie de la potasse, alliages, pyrotechnie, batteries sèches, réducteur chimique, engrais, céramiques, explosifs, médicaments,...) font que les teneurs dans l'eau peuvent être importantes (quelques mg/l à plusieurs centaines de mg/l).

La plupart des eaux naturelles présentent des teneurs comprises entre 5 et 10 mg/l. Cette concentration est en relation directe avec la nature géologique des terrains traversés. Le magnésium dans l'eau provient de l'attaque par l'acide carbonique des roches magnésiennes et de la mise en solution de magnésium sous forme de carbonates ($MgCO_3$) et de bicarbonates. Dans les eaux des massifs anciens, les teneurs sont inférieures à 5 mg/l voire au mg/l.

Le magnésium contribue à la dureté de l'eau sans en être l'élément essentiel. En effet, le rapport magnésium/calcium est en général très inférieur à 1.

La source principale d'apport est alimentaire (viandes et produits d'origine végétale) qui fournit de 200 à 400 mg/l. Suivant l'ingestion alimentaire, la part de l'eau pour une teneur de 50 mg/l varie de 20 à 30%.

➤ *Effets, nuisances*

Le magnésium est indispensable pour la croissance (50% dans les os) et pour la production de certaines hormones. Il intervient également dans nombre de systèmes enzymatiques (métabolisme des protéines, des lipides). Un déficit entraîne des troubles neuro-musculaires voire des manifestations cardiaques. L'apport journalier nécessaire pour un adulte est de l'ordre de 420 mg .

A partir de 100 mg/l, le magnésium peut procurer une saveur amère à l'eau pour les sujets sensibles. S'ils ne provoquent pas de phénomène toxique (sauf chez les sujets insuffisants rénaux), les sels de magnésium, essentiellement les sulfates, peuvent avoir un effet laxatif à partir de 400 mg/l qui disparaît avec l'habitude. Les jeunes enfants y sont particulièrement sensibles.

La fixation des normes associées à ce paramètre résulte des inconvénients liés à la dureté de l'eau (problème d'entartrage des canalisations).

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthode de référence pour l'analyse : spectrométrie d'absorption atomique (NF en ISO 11885).

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 50 mg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Les traitements d'adoucissement proposés pour corriger une dureté excessive de l'eau consistent à :

- Eliminer les ions magnésium sur résines échangeuses cationiques ;
- Adoucir à la chaux ou à la soude, ce qui revient à faire précipiter l'hydroxyde de magnésium.

Dans le cas d'eau trop douce, il convient de procéder à la reminéralisation de l'eau.

2.2.9 Sodium

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Ce métal, très abondant (environ 26 g/kg de la croûte terrestre soit 2,83%), ne se rencontre pas naturellement à l'état natif mais toujours associé à d'autres éléments chimiques (chlorures, sulfates...). Le principal minéral contenant du sodium et l'un des plus répandus est le sel gemme (chlorure de sodium).

Les sels de sodium sont employés en cuisine, en salage de routes verglacées et dans diverses industries. En agriculture, ils contribuent au maintien de la perméabilité des sols.

L'omniprésence et la grande solubilité de ses sels expliquent qu'ils se retrouvent dans la majorité des eaux. Des teneurs anormalement élevées peuvent provenir d'apports industriels ou domestiques, du lessivage ou de la percolation de terrains salés et d'infiltrations d'eaux saumâtres. Dans les régions côtières, les embruns jouent un rôle considérable.

Les concentrations dans l'eau de boisson sont normalement inférieures à 50 mg/l (en moyenne 20 mg/l), mais elles peuvent augmenter au cours des traitements d'adoucissement (par échange d'ions) des eaux calcaires. Des doses de plus de 1000 mg/l ont été signalées dans certaines eaux de boisson.

Le sodium est ingéré quotidiennement à partir de l'eau et des aliments qui représentent la source principale. La part imputable à l'eau, difficile à estimer du fait des habitudes alimentaires, est de l'ordre de 1 à 7% pour des teneurs variant de 20 à 200 mg de sodium par litre d'eau.

➤ *Effets, nuisances*

Le sodium est vital et les besoins journaliers pour l'adulte et l'enfant sont respectivement de 2000 et 200 mg/jour.

En général, par suite de l'efficacité d'excrétion rénale du sodium, ses sels ne présentent pas de toxicité aiguë. Une ingestion excessive de chlorure de sodium provoque des vomissements qui entraînent l'élimination d'une grande partie du sel. L'ingestion chronique de fortes doses joue un rôle important dans le développement de l'hypertension artérielle chez les sujets prédisposés.

Les risques sanitaires dus à l'excès de sodium intéressent principalement deux catégories de sujets : les nourrissons, en raison de l'immaturation de leurs reins ou du fait d'affections gastro-intestinales entraînant une déshydratation avec hypernatrémie, et les personnes atteintes de troubles cardio-vasculaires et rénaux qui doivent suivre un régime hyposodé.

➤ *Normes, interprétation des résultats*

Méthodes de référence pour l'analyse : spectrométrie d'émission atomique (NF en ISO 11885).

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 150 mg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Déminéralisation des eaux.

2.2.10 Potassium

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Le potassium est un élément naturel des eaux, où sa concentration, à peu près constante, ne dépasse pas habituellement 10 à 15 mg/l (sauf dans certains contextes géologiques particuliers).

Cette substance peut provenir des industries extractives (mines de sel et potasse), des usines d'engrais et des industries du verre et des matériaux connexes.

Il faut noter également qu'une partie de la radioactivité naturelle des eaux provient de l'isotope 40 du potassium.

La part de l'eau représente généralement moins de 1% de la quantité totale journalière ingérée par un adulte (2 à 4,5 grammes) fournie essentiellement par l'alimentation (légumes verts, fruits).

➤ ***Effets, nuisances***

Le potassium joue un rôle essentiel chez l'homme (transmission de l'influx nerveux) dont les besoins de l'organisme sont de l'ordre de 3 à 4 grammes par jour. Une déficience induira, entre autres symptômes, une faiblesse musculaire.

Excepté une action purgative pour une ingestion d'eau contenant plus de 1000 mg/l, le potassium est jugé sans effets physiologiques sur l'homme.

Le seuil de perception gustative, variable suivant les individus, se situe aux environs de 340mg/l pour le chlorure de potassium.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthode de référence pour l'analyse : spectrométrie d'émission atomique (NF en ISO 11885).

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 12 mg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Les traitements sont de l'ordre de la déminéralisation des eaux (échanges d'ions).

2.2.11 Aluminium

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

L'aluminium est le troisième élément le plus abondant de la croûte terrestre. Il entre dans la composition de tous les sols, plantes et tissus animaux. De ce fait, et à cause de l'activité humaine, il est présent dans l'air, les aliments et l'eau sous formes de sels solubles, de colloïdes ou de composés insolubles.

Les rejets industriels, l'érosion, le lessivage des minéraux et des sols, la contamination par les poussières atmosphériques et les précipitations constituent pour l'aluminium les principales voies d'accès au milieu aquatique.

Une des causes les plus courantes de la présence d'aluminium est le traitement de l'eau par des sels d'aluminium comme agent de coagulation, pour éliminer la couleur et la turbidité. Ces sels nécessitent des conditions de pH très précises qui, si elles ne sont pas respectées, sont à l'origine de fuites d'aluminium soluble dans les eaux superficielles traitées. Leur présence peut également signifier un traitement de coagulation défaillant, une rupture de filtre ou toute autre anomalie dans le processus d'épuration.

L'ingestion d'aluminium par l'eau de boisson est faible par rapport à l'alimentation. En effet, elle correspond, en moyenne, à moins de 1% des apports totaux pour une eau contenant 0,2 mg/l.

➤ ***Effets, nuisances***

L'aluminium n'est pas un élément indispensable pour l'homme. Ses sels contenus dans les aliments et l'eau ne sont pas normalement stockés (sauf dans les os) dans l'organisme et sont donc excrétés. Il ne semble pas induire d'effets nocifs pour un individu sain. En revanche, un excès d'aluminium présente un danger d'encéphalopathie chronique pour des personnes insuffisantes rénales chroniques et traitées par hémodialyse. Les équipements de dialyse doivent comporter des traitements individuels (osmoseurs, déioniseurs,...) afin de

ramener la teneur en aluminium de 0,2 mg/l, norme de potabilité, à 0,03 mg/l, norme de qualité de la pharmacopée pour l'hémodialyse (en fait, une eau contenant moins de 0,01 mg/l est souhaitable en pratique).

Un excès d'aluminium provoque une dégradation de la qualité des eaux traitées par des phénomènes de postfloculation qui favorisent la création de dépôts dans les canalisations. Pour des concentrations supérieures à 1 mg/l, une coloration parasite peut se produire en présence de fer.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthode de référence pour l'analyse : spectrométrie d'émission atomique (NF en ISO 11885).

L'introduction d'un seuil correspond davantage à un critère médical visant à permettre l'utilisation de l'eau pour la dialyse chez les insuffisants rénaux, qu'à une norme sanitaire liée à l'ingestion.

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 0,2 mg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

L'aluminium observé en distribution est le plus fréquemment issu de l'usage de sels comme coagulants dans les stations de traitement. La décantation et la filtration permettent d'éliminer la majeure partie de cet élément sous forme de sels insolubles.

Il convient cependant de :

- Garantir la fiabilité des unités de traitement par la bonne régulation du pH et de la minéralisation ;

- Réaliser des campagnes systématiques d'entretien des réseaux (purges, nettoyages des réservoirs).

Enfin, la protection des traitements de dialyse doit être assurée par la mise en place d'osmoseurs ou déioniseurs chez les malades pour respecter la norme de 0,03 mg/l (pharmacopée française).

2.2.12 Résidus secs

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

La détermination des résidus totaux sur une eau non filtrée reflète le teneur en matières dissoutes et en suspension non volatiles. La mesure des résidus secs après filtration correspond, quant à elle, aux matières dissoutes (dimension inférieure à 1 nm).

Ces valeurs, qui sont à relier avec la mesure de la conductivité, sont influencées par la température et la durée de la dessiccation. Les résidus secs permettent d'apprécier la minéralisation d'une eau.

Celle-ci est étroitement liée à la nature géologique des terrains traversés. Les eaux en contact avec du granit, des sables siliceux, des sols bien lavés ou d'autres matières relativement insolubles ne présentent que de faibles concentrations en résidus secs (inférieures à 30 mg/l). Dans les roches sédimentaires, les teneurs s'échelonnent entre 200 et 1100 mg/l. la minéralisation est généralement plus élevée dans les eaux souterraines que superficielles. En plus de ces origines naturelles, les effluents liés aux activités humaines peuvent contribuer à l'augmentation de la minéralisation.

D'après l'OMS, une eau est considérée comme d'excellente qualité pour une teneur de l'extrait sec inférieure à 300 mg/l et inacceptable pour une teneur supérieure à 1200 mg/l.

➤ *Effets, nuisances*

Les résidus secs n'ont pas, en eux-mêmes, d'effets sur la santé. Ils constituent un indice représentatif de la minéralisation de l'eau soit de sa charge en substances dissoutes.

Les eaux très minéralisées semblent contribuer à l'équilibre des différentes constantes de l'homme et surtout de l'enfant. Cependant, elles peuvent poser des problèmes endocriniens complexes.

Les matières dissoutes influent sur la saveur de l'eau.

Certains sels agissent sur la corrosion ou l'incrustation dans les réseaux de distribution.

➤ *Normes, interprétation des résultats*

Méthode de référence pour l'analyse : élimination de l'eau par évaporation suivie d'une pesée (NF T 90-029).

Résidu sec à 100-105°C : résulte de l'évaporation simple de l'eau et de l'évaporation, en totalité ou en partie, de l'eau occluse et de l'eau de cristallisation des sels.

Résidu sec à 175-185°C : résulte de l'élimination quasi totale de l'eau occluse et de l'eau de cristallisation, décomposition de certains sels (Norme de potabilité française : concentration, inférieure à 1500 mg/l).

Résidu calciné à 525°C +/- 25°C : résulte de la volatilisation totale des matières organiques et de certains sels minéraux. La différence entre les résidus à 180°C et calcinés correspond à une estimation grossière de la teneur en matières organiques.

➤ ***Recommandations, traitements***

Les traitements de déminéralisation sont peu pratiqués dans le cadre des eaux destinées à la consommation humaine. Dans le cas de difficultés d'exploitation de réseaux liés à une minéralisation excessive, des ressources moins chargées seront privilégiées dans la mesure du possible.

2.2.13 Oxygène dissous

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

L'eau contient toujours de l'oxygène dissous dont les concentrations varient avec la température et la pression partielle dans l'atmosphère. Du fait de l'équilibre entre l'oxygène de l'air et de l'eau, plus les eaux sont superficielles et plus elles sont chargées en oxygène. Les teneurs maximales atteintes dépassent rarement 10 mg/l.

Dans les milieux à faible taux de renouvellement (lacs, retenues de barrages, baies,...), la teneur en oxygène dissous tend à diminuer avec la profondeur, et des phénomènes anaérobies peuvent alors apparaître.

Dans le cas des eaux souterraines, la concentration en oxygène dissous des nappes libres, qui sont à la pression atmosphérique, est proche de celle rencontrée dans les eaux superficielles avec lesquelles elles sont en contact. Quant aux nappes captives, elles sont peu chargées en oxygène dissous.

Dans certains réseaux de distribution, le niveau de l'oxygène dissous peut décroître du fait de mécanismes de corrosion ou de besoins en oxygène des micro-organismes.

➤ ***Effets, nuisances***

La diminution de l'oxygène dissous jusqu'à moins de 80% environ de la saturation entraîne une altération organoleptique de l'eau. Cependant, elle ne présente aucun effet direct sur la santé.

Par ailleurs, ce paramètre revêt une certaine importance dans les phénomènes de corrosion.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthode de référence pour l'analyse : réduction électrochimique de l'oxygène moléculaire (NF T 90-106).

Norme de potabilité française : teneur supérieure à 75% de la valeur de saturation

➤ ***Recommandations, traitements***

En raison des inconvénients résultant de la distribution d'une eau peu oxygénée, on privilégiera les ressources bien aérées. D'autre part, on s'attachera à rechercher les causes de toute variation anormale de ce paramètre. Pour maintenir une concentration d'oxygène dissous satisfaisante, il faut veiller, par exemple, à ce que les teneurs en matières oxydables demeurent aussi faibles que possible.

2.2.14 Anhydride carbonique libre et alcalinité : TA et TAC

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Dans l'anhydride carbonique total des eaux, on distingue :

- Anhydride carbonique libre dissous ou gaz carbonique libre (CO₂) ;
- Anhydride carbonique des ions bicarbonates ou hydrogénocarbonates ;
- Anhydride carbonique des ions carbonates (CO₃²⁻).

L'un des constituants principaux de la minéralisation des eaux est le bicarbonate de calcium. Très soluble, il est en équilibre avec le CO₂ et le carbonate de calcium peu soluble. Cet équilibre calco- carbonique dépend essentiellement du pH, de l'alcalinité et de la température de l'eau. Il est régi par des lois relativement complexes qui conduisent à des réactions chimiques de dissolution des carbonates (détartrage) ou d'entartrage.

A l'équilibre calco-carbonique, la teneur en CO₂ libre est appelée « CO₂ équilibrant ». Si la concentration réelle devient supérieure à cette valeur, l'excès est appelé « CO₂ agressif » et peut dissoudre le calcaire (eau agressive). La dissolution du calcaire se poursuit jusqu'à obtention de l'équilibre. Si la concentration en CO₂ est inférieure à celle du CO₂, il y aura précipitation des carbonates (eau entartrante ou incrustante).

Généralement les eaux de surface ne contiennent pas plus de 10 mg/l d'anhydride carbonique libre, l'excès étant rapidement libéré dans l'atmosphère. La teneur du CO₂ dans l'eau peut être plus élevée pour différentes raisons : contact direct avec l'atmosphère, présence de sources naturelles de gaz, lessivage des terrains calcaires, décomposition de substances organiques. Certaines eaux minérales ont des teneurs supérieures à 100 mg/l.

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence d'ions hydroxydes (OH⁻), de carbonates et de bicarbonates, et dans une moindre mesure aux ions phosphates (PO₄³⁻) et silicates (HSiO₃⁻) ou encore aux espèces moléculaires des acides faibles. Étroitement liée à la dureté, sa valeur en est généralement proche lorsqu'elle est due à la présence de CO₃²⁻ et de HCO₃⁻. Dans les eaux naturelles, l'alcalinité varie de 10 à 350 mg/l d'hydrogencarbonate. Elle est augmentée par des apports d'origine urbaine (phosphate, ammoniacale, matières organiques) ou industrielle (produits basiques ou acides).

Le titre alcalimétrique (TA) et le titre alcalimétrique complet (TAC) traduisent l'alcalinité d'une eau. La connaissance de ces valeurs est essentielle pour l'étude de l'agressivité d'une eau puisqu'elles dépendent de l'équilibre calco-carbonique.

Le TA et le TAC mesurent respectivement les concentrations en ions hydroxydes et carbonates et l'ensemble des anions HCO₃⁻, CO₃²⁻, OH⁻,...

Dans les eaux potables, la concentration en OH⁻ étant faible et donc négligeable, l'alcalinité de l'eau est constituée des seuls HCO₃⁻ ou d'un mélange carbonates/hydrogencarbonates :

- Eau ne contenant que des hydrogencarbonates : TA=TAC=[HCO₃⁻]

- Eau contenant un mélange carbonates/hydrogencarbonates :

$$TA = [\text{CO}_3^{2-}] / 2 \quad TAC = [\text{HCO}_3^-] + 2 \text{ TA}$$

➤ ***Effets, nuisances***

La présence de CO₂ donne une saveur plus agréable à l'eau et ne présente aucun inconvénient pour la santé.

La pellicule de carbonate de calcium joue un rôle important pour protéger les tuyaux de la corrosion. Avec une eau agressive, les canalisations sont dénudées de leur couche protectrice, et la corrosion est facilitée. Ceci peut conduire à des dépôts, des colorations et, plus grave, à la dissolution de métaux (plomb) des branchements. Si, au contraire, l'eau est trop incrustante, les tuyaux se bouchent par entartrage.

➤ ***Normes, interprétation des résultats (NF T 90-040)***

Méthode de référence pour l'analyse pour le CO₂ libre :

Dosage volumétrique en présence d'un indicateur coloré (phénolphtaléine) ;

Mesure de l'agressivité : essai au marbre

Le contact eau/marbre est réalisé à l'abri de l'air durant 24 heures. La comparaison des valeurs de pH et de TAC avant et après l'essai permet de déterminer le caractère agressif ou entartrant de l'eau.

Si, au cours de la mesure, le pH et le TAC augmentent, l'eau est agressive. Inversement, s'ils diminuent, l'eau est entartrante.

Méthode de référence pour l'analyse pour les TAC et TA : dosage volumétrique (titrimétrique) par addition de solutions diluées d'acide (acide sulfurique, chlorhydrique ou nitrique), en présence d'indicateurs colorés, nécessaires pour neutraliser le volume d'eau à analyser.

TA : mesure en présence de phénolphtaléine qui vire à pH 8,3 (rouge à pH>8,3 et incolore à pH<8,3).

TAC : mesure en présence de méthylorange (ou hélianthine) qui vire à pH 4,3 (jaune à pH>4,3 et rouge à pH<4,3).

Le TA et le TAC s'expriment en degrés français ou en milliéquivalents par litre, avec la correspondance suivante : 1°F=0,2 méq/l

Norme de potabilité française : concentration supérieure à 2,5°F (concerne les eaux adoucies ou déminéralisées)

➤ ***Recommandations, traitements***

Généralement, l'eau doit permettre de favoriser la formation d'une couche protectrice (donc légèrement incrustante) sur les surfaces métalliques des tuyaux et éviter ainsi les risques de corrosion.

Dans le cas d'une eau douce (peu minéralisée) et en présence d'un excès de CO_2 , il convient d'ajouter du carbonate de calcium pour donner à l'eau une certaine teneur en bicarbonate de calcium afin qu'elle soit capable de déposer cette couche protectrice sur les conduites.

Dans le cas d'une eau agressive (acide et peu minéralisée), le CO_2 en excès sera éliminé par simple aération.

2.2.15 Dureté (5)

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

Initialement, la dureté exprimait l'aptitude d'une eau à réagir au savon. Elle correspond essentiellement à la présence de sels de calcium et de magnésium, et est directement liée à la nature géologique des terrains traversés. Ainsi, un sol calcaire ou crayeux donnera une eau dure (fortement minéralisée en calcium et magnésium), alors qu'une eau traversant un sol cristallin (granitique) comme le sable sera douce.

L'eau souterraine est souvent plus dure que l'eau de surface. En effet, plus riche en acide carbonique et en oxygène dissous, elle possède un haut pouvoir solubilisant vis-à-vis des sols et des roches. Quant aux causes de pollution, elles sont généralement dues à l'industrie minérale et aux mines.

La dureté temporaire correspond à la combinaison des cations Ca^{2+} et Mg^{2+} avec les anions HCO_3^- et CO_3^{2-} qui peuvent être supprimés ou précipités par ébullition.

Dureté totale = dureté calcique + dureté magnésienne = dureté carbonatée (temporaire) + dureté non carbonatée (permanente).

Les eaux agressives sont des eaux présentant une faible minéralisation, donc douces associées à un pH acide.

➤ *Effets, nuisances*

Une eau dure couvrirait environ un tiers des besoins en calcium et magnésium d'un homme. Des hypothèses ont été avancées quant à la corrélation entre la consommation d'une eau douce et la fréquence d'apparition de maladies cardio-vasculaires. Ainsi, une eau dure assurerait une protection à l'encontre de ces pathologies.

Une eau douce ne permet pas l'instauration de la couche carbonatée assurant une protection des canalisations contre les risques de corrosion. Par contre, une dureté élevée constitue un risque important d'entartrage des canalisations. Au-delà de 20°F (degré français : définition paragraphe suivant), l'eau peut devenir entartrante, et en-dessous de 10°F, elle risque de devenir agressive et susceptible de détériorer les canalisations. Ces phénomènes de corrosion entraînent la solubilisation d'éléments tels que le fer, le cuivre et, plus grave, le plomb ou le cadmium. Ils sont également fonction du pH, de l'alcalinité et de la concentration en oxygène dissous.

Une eau dure est plus agréable à boire mais présente certains inconvénients d'ordre domestique :

- Utilisation accrue de savon ;
- Entartrage des tuyaux d'eau chaude, des chaudières, etc... ;
- Augmentation du temps de cuisson des légumes.

Une eau douce se remarque à un moussage important et à une absence de dépôt sur les récipients.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthode de référence pour l'analyse : dosage titrimétrique à l'EDTA (NF T 90-003).

L'eau destinée à la consommation humaine ne doit pas être agressive. Pour tenir compte à la fois de l'intérêt de la consommation d'une eau dure pour la santé et des inconvénients liés à l'entartrage, il est admis qu'une dureté comprise entre 15°F et 20°F est idéale.

La dureté s'exprime en degré français : 1°F = 4 mg/l Ca ou 2,43 mg/l Mg ou 10 mg/l CaCO₃.

Norme de potabilité française : concentration supérieure à 15°F (concerne les eaux adoucies ou déminéralisées)

➤ ***Recommandations, traitements***

Face à l'agressivité de l'eau, des mesures doivent être prises : reminéralisation pour relever la dureté ou installation de conduites résistantes à la corrosion.

La dureté de certaines eaux naturelles est parfois telle qu'elle nécessite un traitement d'adoucissement :

- Adoucissement à la soude, à la chaux ou sur échangeurs d'ions ;
- Injection de polyphosphates.

Il faut veiller à entretenir les appareils d'adoucissement (régénération, lavage et désinfection) afin d'éviter les proliférations bactériennes.

Les eaux d'origine superficielle, compte tenu de leur faible dureté, sont toujours reminéralisées à l'usine de traitement (dureté de l'eau distribuée comprise entre 10 et 15°F).

Les eaux d'origine souterraine sont classées en deux catégories :

- Eaux de nappes situées en terrains granitiques, schisteux et qui subissent, en général, une reminéralisation avant distribution ;
- Eaux contenues dans des formations calcaires (dureté supérieure à 25°F), qui ne subissent pas de traitement d'adoucissement avant distribution.

Les eaux peuvent être classées de la façon suivante :

Degrés français	Dureté de l'eau
1 à 6	Très douce
6 à 15	Douce
15 à 30	Moyennement dure
30 et +	Dure

2.3 PARAMETRES CONCERNANT DES SUBSTANCES INDESIRABLES

Ce sont des substances dont la présence est tolérée tant qu'elle reste inférieure à un certain seuil. On trouve parmi elles aussi bien des substances dont l'effet se limite à un désagrément pour l'utilisateur (traces de rouille sur le linge dues à une concentration excessive en fer) que d'autres qui peuvent avoir une incidence sur la santé (teneur excessive en fluor). Les nitrates font partie de ce groupe.

2.3.1 Nitrates (7)

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

L'azote est présent en abondance dans la nature sous forme gazeuse, organique ou minérale. Les nitrates (NO_3^{2-}) constituent le stade final d'oxydation de l'azote organique. Les nitrates sont abondamment répandus dans le sol, dans la plupart des eaux et dans les plantes où ils sont nécessaires à la synthèse des végétaux. Solubles dans l'eau, ils se retrouvent naturellement en faible concentration dans les eaux souterraines et superficielles. Sans apport artificiel, les eaux de surface ne contiennent pas plus de 10 mg/l de nitrates. Les effluents industriels, agricoles, urbains, les déjections humaines ou animales et les produits des activités humaines élèvent les teneurs en nitrates des eaux de surface et souterraines (infiltrations dans les nappes). Les doses importantes ont pour origine essentielle les engrais et les rejets d'eaux usées. Les nitrates sont également employés dans la fabrication des explosifs, dans l'industrie chimique comme oxydants, et comme conservateurs dans les denrées alimentaires.

L'eau de boisson ne représente que le quart des ingestions journalières, sauf pour les jeunes enfants chez qui elle peut être majoritaire. Selon le régime alimentaire (principalement les légumes), l'ingestion moyenne correspond à 120-300 mg par jour. Mais la part de l'eau dans l'apport total peut devenir prépondérante si la concentration dépasse les 50 mg/l (50% et plus).

➤ *Effets, nuisances*

Les effets des nitrates ne sont pas en eux-mêmes dangereux pour la santé mais c'est leur transformation en nitrites dans l'organisme qui présente un risque potentiel toxique (voir chapitre suivant : Nitrites) : la transformation de nitrates en nitrites dans l'appareil digestif peut être particulièrement grave chez les nourrissons et s'explique par la faible acidité de leur estomac qui permet la prolifération des bactéries aptes à faire cette conversion.

Par ailleurs, il est estimé que l'absorption de 500 mg de nitrates peut provoquer une inflammation des muqueuses intestinales chez les adultes.

La dose journalière admissible est de 255 mg/jour pour un adulte.

Les nitrates en excès contribuent, avec d'autres éléments nutritifs (phosphates), à l'eutrophisation des eaux superficielles et donc à la dégradation de la qualité des ressources en eau de surface.

➤ *Normes, interprétation des résultats*

Méthode de référence pour l'analyse : dosage spectrométrique (NF en ISO 13395).

1 mg d'azote correspond à 4,4 mg de nitrates.

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 50 mg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Dans un souci de préservation de la qualité des eaux naturelles et du fait de la difficulté d'éliminer les nitrates dans des conditions techniques satisfaisantes, il convient de s'attacher dans un premier lieu à la réduction des apports des substances azotées en agriculture et de diminuer l'impact des rejets d'eaux urbains dans le milieu naturel.

Solution préventive :

- Meilleure maîtrise de la fertilisation avec réadaptation de certaines pratiques agricoles ;
- Traitement des rejets d'eaux usées et de résidus divers et adaptation au milieu naturel ;
- Instauration et respect des périmètres de protection adaptés à la lutte contre les nitrates.

Solution curative :

- Raccordement en totalité ou en partie, en opérant une dilution, des secteurs concernés par une teneur excessive en nitrates à une ressource non polluée ;
- Changement des ressources et suppression de certains captages ;
- Procédés physicochimiques : l'échange d'ions, l'osmose inverse et l'électrodialyse ont comme caractéristique principale de déplacer les nitrates et non pas de les détruire ou de les transformer ;
- Procédés biologiques : la dénitrification a pour caractéristique principale d'éliminer les nitrates par l'intermédiaire de micro-organismes (sans générer de polluant) mais le coût reste élevé.

2.3.2 Nitrites

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

L'azote, élément essentiel de la vie, est présent en abondance dans la nature sous forme gazeuse, minérale ou organique. Les nitrites (NO_2^-) proviennent soit d'une oxydation

incomplète de l'ammoniaque, soit d'une réduction des nitrates sous l'influence d'une action dénitrifiante.

Les nitrites sont présents dans le sol, dans les eaux et dans les plantes mais en quantités relativement faibles. En général, dans les eaux de surface, leur teneur excède rarement 1 mg/l. Il est toutefois important de signaler que les eaux en contact avec certains terrains et certaines conduites peuvent contenir des nitrites indépendamment de toute souillure. De plus, des nitrites, non liés à une pollution, se retrouvent parfois dans les eaux pauvres en oxygène (sondages profonds). Leur présence a également été signalée dans les eaux de pluie et dans celles provenant de la fonte des neiges. En effet, la pollution atmosphérique (oxyde d'azote) favorise l'augmentation des teneurs en nitrites.

Ils sont employés comme conservateurs alimentaires en général.

Toutefois, une eau qui renferme des nitrites est à considérer comme suspecte car cette présence est souvent liée à une détérioration de la qualité microbiologique.

L'alimentation demeure la principale voie d'exposition, avec une ingestion quotidienne de l'ordre de 2 à 5 mg/l. La salive en contiendrait environ 10 mg/l. Leur teneur est, contrairement aux nitrates, beaucoup plus faible au robinet par suite de l'oxydation due à certains traitements. L'apport par voie hydrique est donc négligeable.

➤ *Effets, nuisances*

Les nitrites, issus de la transformation des nitrates dans l'estomac, oxydent l'hémoglobine en méthémoglobine, inapte au transport de l'oxygène des poumons aux tissus. Cette affection (méthémoglobinémie) se manifeste par une cyanose et touche essentiellement les nourrissons, du fait de la part prépondérante de l'eau comme aliment lors de la reconstitution de lait (un enfant de 6 mois peut consommer jusqu'à un litre d'eau par jour).

De plus, il existerait une prédisposition à cette maladie pour les nouveau-nés dont les mères auraient consommé des eaux riches en nitrates pendant leur grossesse.

Les nitrites pourraient être à l'origine de la formation de composés N-nitrosés (nitrosamines et nitrosamides), dans l'appareil digestif, qui sont suspectés d'être cancérigènes.

Ils sont aussi susceptibles de se former, sous l'action de bactéries et à des températures élevées, à partir des chloramines créées au cours de la désinfection par réaction sur l'ammoniaque.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthodes de référence pour l'analyse : Dosage par spectrométrie d'absorption moléculaire (NF en ISO 13395).

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 0,1 mg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Les nitrites sont transformés en nitrates par action d'un oxydant (chlore ou ozone).

2.3.3 Ammonium

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Sont désignés sous le terme ammoniacque des formes ionisées (ion ammonium, NH_4^+) et non ionisées (NH_3). L'azote ammoniacal est assez souvent rencontré dans les eaux et traduit habituellement un processus de dégradation incomplète de la matière organique. Il constitue un des maillons du cycle de l'azote. L'ammoniacque est un gaz soluble dans l'eau, mais suivant les conditions de pH, il se transforme soit en un composé non combiné, soit sous forme ionisée.

L'azote ammoniacal des eaux superficielles peut avoir pour origine naturelle la décomposition des déchets végétaux et animaux. L'ammoniacque se transformant assez rapidement en nitrites et nitrates par oxydation, sa teneur dans les eaux de surface est normalement faible (inférieur à 0,2 mg/l). Sa présence est à rapprocher des autres éléments azotés identifiés dans l'eau (nitrites et nitrates) et des résultats de l'analyse bactériologique.

L'ammoniacque peut être rencontrée dans les eaux de pluie (0,1 à 2 mg/l) et dans celles provenant des sols tourbeux et marécageux ; dans ce dernier cas, elle a une origine purement végétale.

Des eaux profondes peuvent également se charger en ammoniacque par réduction des nitrates sous l'action de bactéries ou par des sables qui renferment des minéraux contenant du fer. Habituellement, les eaux souterraines sont pauvres en azote ammoniacal. Mais des eaux issues de sols riches en substances humiques ou riches en fer peuvent présenter des teneurs de l'ordre de 1 à 3 mg/l.

La présence d'azote ammoniacal en quantité relativement importante peut être l'indice d'une pollution par des rejets d'origine humaine ou industrielle (industries chimiques, engrais azotés, cokeries, fabriques de glace, industries textiles, etc...).

➤ ***Effets, nuisances***

Dans la plupart des eaux courantes, le pH étant compris entre 6,5 et 8,5, la plus grande partie de l'azote ammoniacal se trouve sous forme ionisée (ammonium), relativement peu toxique.

Même s'il n'est pas directement nocif, l'azote ammoniacal peut engendrer indirectement divers inconvénients.

L'oxydation biologique de l'ammoniaque peut développer des zones anaérobies dans certaines parties des réseaux de distribution et peut provoquer la corrosion des conduites (surtout si elles sont en cuivre).

L'ammoniaque présente aussi l'inconvénient de diminuer l'efficacité du traitement de désinfection car elle réagit avec le chlore disponible et produit des composés organochlorés indésirables pour la santé. Pratiquement, il faut environ 10 mg de chlore par mg d'azote d'origine ammoniacale pour oxyder les chloramines en azote gazeux.

L'azote ammoniacal peut servir de nutriment pour des micro-organismes, responsables de saveurs et odeurs désagréables.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthodes de référence pour l'analyse : analyse en flux et détection spectrométrique (NF en ISO 11732).

Ce paramètre est intéressant par le fait qu'il peut être l'indice de contamination fécale.

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 0,5 mg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

L'élimination de l'ammoniaque pour la production d'eau potable peut se faire par les résines échangeuses d'ions, l'oxydation par le chlore ou la nitrification biologique. L'emploi de résines échangeuses d'ions étant coûteux et l'oxydation par le chlore ayant l'inconvénient

de former des sous-produits indésirables, l'élimination biologique fait l'objet d'un certain développement.

La nitrification biologique consiste en un développement de bactéries nitrifiantes sur un lit filtrant (filtre à sable ou à charbon) et se déroule en deux temps :

- Nitritation : oxydation des ions ammoniums en nitrites ;
- Nitratisation : oxydation des nitrites en nitrates.

2.3.4 Azote Kjeldahl

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

L'azote est présent sous de multiples formes dans les eaux naturelles. Il est utile d'évaluer les niveaux de pollution de ces milieux, en mesurant les quantités globales d'azote non oxydé dans les eaux. L'azote Kjeldahl, du nom du chimiste qui a mis au point la méthode d'analyse, permet de mesurer ces concentrations, que l'azote soit sous forme organique ou ammoniacale, à l'exception des nitrates et nitrites.

L'origine des substances azotées peut être :

- La décomposition naturelle des déchets organiques (protéines) ;
- Les déjections animales et humaines (urée) ;
- Les rejets urbains, industriels (industries papetière, textile, acier, agroalimentaire) et agricoles (engrais azotés) ;
- Les adjuvants de certains détergents.

Leur présence est donc essentiellement un signe de pollution.

Les eaux de pluie sont aussi susceptibles de transporter différentes formes azotées (ammoniacale, oxydes d'azote...).

Ces dernières années, un net accroissement de la pollution azotée dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines a été noté.

➤ *Effets, nuisances*

Ce paramètre ne permet pas d'apprécier les possibles effets de l'azote sur la santé puisqu'il regroupe un ensemble de substances de toxicité variable. Il convient plutôt de considérer les effets de chaque élément séparément.

Par ailleurs, il constitue un indice significatif d'un milieu pollué et permet de suivre l'évolution de ce dernier.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

La méthode de Kjeldahl convertit l'azote organique en ammoniac.

Méthodes de référence pour l'analyse (NF en 25663) :

- Dosage par titrimétrie après minéralisation et distillation, applicable aux eaux dont la teneur en azote Kjeldahl est supérieure à 2 mg/l ;

- Dosage par spectrophotométrie après minéralisation, applicable aux eaux dont la teneur en azote Kjeldahl est compris entre 0,2 et 2 mg/l.

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 1 mg/l (azote des nitrates et nitrites exclu)

➤ ***Recommandations, traitements***

Les traitements classiques (oxydation, floculation, filtration...) pour la production d'eau potable permettent d'éliminer les matières azotées.

2.3.5 Oxydabilité au permanganate de potassium (KMnO₄)

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

La mesure de l'oxydabilité au permanganate de potassium, permet, de façon indirecte, d'évaluer la quantité de matières oxydables, essentiellement organiques (matières non minérales), contenues dans l'eau. Ces matières organiques sont composées de matières protéiques et de lipides.

Les substances organiques naturelles dérivent du lessivage des sols et surtout des produits du métabolisme des organismes vivants (végétaux, animaux, micro-organismes). Cependant, pour l'essentiel, elles sont issues des activités humaines (rejets agricoles, urbains et industriels).

Leur teneur dans les eaux distribuées est intimement liée à l'origine des eaux captées :

- Les eaux des nappes sont généralement peu chargées, de l'ordre du mg/l d'oxygène ;

- Les eaux superficielles courantes présentent des teneurs très variables (entre 5 et 12 mg/l d'oxygène). Après un traitement, ces eaux conservent une concentration variant de 1 à 4 mg/l d'oxygène suivant les conditions météorologiques et la qualité du traitement ;

- Les eaux des étangs et des retenues sont encore plus chargées (pointes à 15 mg/l d'oxygène). Après traitement, l'élimination des matières organiques demeure souvent insuffisante : teneur variant entre 4 et 8 mg/l d'oxygène.

➤ *Effets, nuisances*

La présence de matières organiques dans les eaux de consommation n'est pas directement liée à un risque particulier pour la santé humaine (l'oxydabilité équivalente à une tasse de thé est d'environ 2000 mg/l d'oxygène). Certaines eaux artésiennes, les eaux des régions tourbeuses et chargées d'humus possèdent des teneurs assez élevées tout en étant inoffensives.

Par contre, la présence d'une augmentation de ce paramètre peut être révélatrice de l'existence d'autres polluants dangereux pour la santé. Si la matière organique n'est pas directement nocive, elle risque de réagir avec les composés halogénés utilisés dans le traitement de l'eau et donner des sous-produits indésirables voire toxiques. En effet, les trihalométhanes (chloroforme, bromoforme, etc...), par exemple, ont un fort pouvoir mutagène voire cancérigène.

Certaines matières organiques sont à l'origine de couleur et de goût désagréables car elles favorisent la reviviscence d'organismes (algues, champignons, bactéries). Ceux-ci peuvent alors former des dépôts dans les conduites et ouvrages de stockage et libérer des essences malodorantes.

Dans tous les cas, une eau riche en matières organiques doit toujours être suspectée de contamination bactériologique ou de pollution chimique.

➤ *Normes, interprétation des résultats*

On regroupe sous l'expression « matières organiques » toutes les substances capables d'être oxydées par le permanganate de potassium pendant un temps donné (10 minutes à température d'ébullition ou 4 heures à froid) en milieu acide ou alcalin. La dose d'oxydant consommée reflète la quantité de matières organiques présentes dans l'eau.

Les résultats sont exprimés en mg/l d'oxygène ou en mg/l de permanganate de potassium (1 mg/l d'oxygène = 3,95 mg/l KMnO_4). La méthode de référence doit être obligatoirement précisée (généralement à chaud en milieu acide / NF en ISO 8467).

Ce paramètre permet d'estimer la pollution globale d'une eau et d'apprécier l'efficacité des traitements d'oxydation (chlore, ozone,...) car ils reposent sur le même principe. Mais il n'a aucune signification particulière au regard de la santé puisqu'il ne définit pas la nature des composés.

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 5 mg/l en oxygène (10 minutes à chaud et en milieu acide)

➤ **Recommandations, traitements**

Les recommandations sont différentes selon l'origine de l'eau.

Eaux souterraines :

- Entretien des ouvrages et de leurs abords ;
- Abandon des ressources vulnérables ;

Eaux superficielles :

- Amélioration de l'efficacité des filières de traitement par affinage des rendements de traitements, une automatisation des contrôles (mesure de turbidité), des asservissements des pompes doseuses (pH, sulfate d'alumine), etc... ;
- Recherche d'eaux brutes peu chargées.

La solution la plus sûre pour obtenir une eau de qualité satisfaisante réside dans une politique de prévention. A court terme, des mesures curatives peuvent s'avérer indispensables :

- Modernisation des stations de traitement ;
- Entretien méticuleux des réseaux de distribution (purges, chloration complémentaire, nettoyages,...).

L'élimination des matières organiques est limitée (de 10 à 30% de la teneur existant dans l'eau brute) lorsqu'on fait appel à l'oxydation chimique (même avec l'ozone), ou à la coagulation partielle sur filtres. Une bonne coagulation-floculation-décantation permet d'atteindre des rendements d'élimination de 40 à 70% avec injection éventuelle de charbon actif en poudre dans le décanteur. La suppression de la majeure partie de la fraction restante peut être obtenue par filtration sur charbon actif.

2.3.6 Carbone organique total (COT)

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

Dans l'eau, les teneurs en substances organiques sont souvent mesurées indirectement en terme d'équivalent d'oxygène consommé (demande chimique en oxygène, demande biochimique en oxygène à 5 jours ou oxydabilité).

La mesure du carbone organique total fournit une indication directe de la charge organique d'une eau (composés organiques volatils ou fixes, naturels ou de synthèse car tous contiennent du carbone). Le carbone organique, présent dans l'eau, existe sous forme particulaire ou dissoute.

Les matières organiques sont présentes essentiellement dans les eaux superficielles où la teneur en COT varie de 0,2 à 2 mg/l. La valeur du COT dans les eaux d'alimentation est généralement inférieure à 0,2 mg/l.

L'origine des composés organiques est liée aux activités naturelles (substances humiques dont la concentration varie avec les saisons et les débits des cours d'eau) et aux activités humaines.

➤ *Effets, nuisances*

L'effet principal des rejets de matières organiques dans le milieu naturel est la consommation d'oxygène qui résulte de leur dégradation. Leur présence peut engendrer une prolifération de micro-organismes et la production de composés halogénés, indésirables pour la santé, par le traitement des eaux par le chlore.

Le COT n'a pas de réelle signification pour la santé car il ne permet pas de connaître la nature des composés. Son intérêt réside dans le fait qu'il permet, en association avec d'autres paramètres, de suivre l'évolution d'une pollution organique et de participer au contrôle de la qualité de l'eau.

➤ *Normes, interprétation des résultats*

Méthode de référence pour l'analyse (NF en 1484) : le principe de dosage du COT est l'oxydation du carbone en dioxyde de carbone, qui sera dosé indirectement ou après réduction en un composé. Diverses techniques analytiques sont proposées : spectrométrie aux infrarouges, dosage volumétrique, conductivité thermique, électrode spécifique du CO₂.

Pas de norme en France, mais toute cause d'augmentation des concentrations habituelles sera recherchée.

➤ ***Recommandations, traitements***

Une bonne coagulation-floculation-décantation-filtration et une oxydation permettent d'atteindre des rendements d'élimination de 50 à 80%. Ce traitement est éventuellement suivi d'une injection de charbon actif en grains.

2.3.7 Hydrogène sulfuré

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

L'hydrogène sulfuré ou sulfure d'hydrogène est un gaz très toxique, inflammable avec une odeur caractéristique d'œuf pourri. Les sulfures existent à l'état naturel dans les gisements de minerais, de pétrole, de charbon et dans certaines roches.

L'hydrogène sulfuré et les sulfures susceptibles d'être rencontrés dans les eaux peuvent provenir d'eaux usées, de pollutions industrielles (déchets de l'industrie pétrolière et pétrochimique, des usines de gaz, des papeteries, des usines d'eau lourde et des tanneries).

De plus, les sulfates se dissocient dans l'eau pour former de l'hydrogène sulfuré à pH acide.

L'hydrogène sulfuré se remarque particulièrement dans les eaux souterraines et dans l'eau stagnante dans les réseaux de distribution. En effet, en raison du manque d'oxygène, les sulfates sont réduits en sulfures par des bactéries anaérobies.

Bien que des sulfures se trouvent dans bon nombre d'aliments crus ou cuits (viandes, légumes...), les données actuelles ne permettent pas d'estimer leur ingestion quotidienne par voie alimentaire. Dans l'atmosphère, les concentrations correspondent à une exposition de 3 à 10 mg/jour. En ce qui concerne l'eau de boisson, l'absence de données sur les teneurs rencontrées interdit toute évaluation.

➤ ***Effets, nuisances***

Sa présence dans l'eau, avec son odeur et sa saveur désagréables, peut être une cause de plaintes de la part des usagers. Les seuils gustatif et olfactif sont estimés entre 50 et 100 mg/l.

Le sulfure d'hydrogène associé au fer soluble génère des dépôts noirs dans les canalisations, sur les accessoires de plomberie et provoque des taches noires sur le linge.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthodes de référence pour l'analyse : détection qualitative et spectrophotométrie d'absorption.

Comme il est peu probable qu'une personne avale une dose nocive de sulfures, vu leur mauvais goût à des teneurs nettement plus faibles que les niveaux toxiques, il a été choisi pour valeur un seuil non décelable par le consommateur.

➤ ***Recommandations, traitements***

La présence de sulfure d'hydrogène dans l'eau de boisson exige l'application immédiate de mesures d'élimination. Il peut être aisément supprimé par simple aération atmosphérique.

Cependant, la présence de sulfure d'hydrogène peut être l'indice de développements bactériens dans les canalisations, qui requièrent la mise en œuvre d'un traitement (désinfection, purge,...). Le sulfure d'hydrogène peut aussi précipiter en présence de fer, et nécessiter la mise en place d'un traitement de déferrisation.

2.3.8 Substances extractibles au chloroforme (SEC)

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Le seul caractère commun des substances extractibles par le chloroforme (SEC) est leur solubilité dans le chloroforme. Il s'agit d'une méthode d'analyse non spécifique qui ne permet pas d'identifier les substances.

De nature organique ou organo-métallique, les SEC proviennent essentiellement de pollutions liées aux activités industrielles (industries chimiques et pharmaceutiques, pétrochimie), agricoles (pesticides) ou aux usagers domestiques (détergents, graisses,...). Toutefois, elles peuvent être aussi naturellement présentes dans les eaux brutes du fait des conditions géologiques.

En général, les eaux de bonne qualité ne contiennent pas plus de 0,05 mg/l de résidus secs de SEC ; les eaux fortement colorées en contiennent souvent davantage.

➤ ***Effets, nuisances***

Vu l'hétérogénéité des substances extractibles au chloroforme, il n'est guère possible de donner des précisions quant à leur éventuelle toxicité. Leur présence se manifeste fréquemment par de possibles modifications organoleptiques de l'eau. En pratique, les eaux qui contiennent un extrait chloroformique supérieur à 0,2 mg/l seraient susceptibles d'entraîner des inconvénients voire des risques pour la santé.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthode de référence pour l'analyse : extraction liquide-liquide par du chloroforme purifié à pH neutre et pesée du résidu.

En présence de teneurs de SEC anormales, on s'attachera à identifier individuellement chaque substance.

Il faut être prudent lors de l'emploi du chloroforme (cancérogène potentiel) au cours de l'analyse à la fois pour le personnel travaillant en laboratoire et pour les possibles rejets de ce solvant dans l'environnement (cause de pollution de l'eau).

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 0,1 mg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Sur un plan général, il convient de limiter au minimum les pollutions par des substances organiques de toutes origines. L'élimination des SEC étant délicate, il est souhaitable d'utiliser dans la mesure du possible des ressources de qualité satisfaisante, c'est-à-dire contenant peu de SEC.

2.3.9 Hydrocarbures dissous

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Les hydrocarbures (ou huiles minérales) rencontrés dans les eaux brutes proviennent, hormis les hydrocarbures d'origine naturelle, d'effluents divers : usines à gaz, pétrochimie,

ateliers de mécanique, bitumes, mais aussi de fumées dont les particules sont entraînées par les eaux de pluie.

La biodégradabilité des hydrocarbures est lente dans l'environnement. Dans les eaux souterraines, les hydrocarbures peuvent persister longtemps (jusqu'à quelques années en raison du pouvoir de rétention du sol et de la roche réservoir). Aussi, les ressources utilisées pour l'alimentation humaine doivent être particulièrement protégées pour éviter un quelconque risque de pollution.

➤ *Effets, nuisances*

Généralement, les hydrocarbures stricto sensu ne présentent pas de toxicité élevée. Une intoxication se manifesterait par des irritations digestives, des troubles neurologiques, une atteinte rénale. Par contre, les additifs (phénols, polyesters, amines aromatiques,...) incorporés à ces produits leur attribuent un caractère toxique.

En fait, une pollution des eaux par des hydrocarbures se détecte à des teneurs infimes en raison de leurs odeurs et saveurs très désagréables. Aussi, il est peu probable qu'une telle eau soit consommée et puisse engendrer des effets nocifs (les doses de toxicité étant largement supérieures aux seuils de détection organoleptique). Le goût désagréable peut être accentué par un traitement à base de chlore.

Par ailleurs, les films huileux nuisent à la réoxygénation des eaux de surface et perturbent les mécanismes de coagulation-floculation-filtration dans les stations de traitement d'eau potable.

➤ *Normes, interprétation des résultats*

Méthode référence pour l'analyse : dosage des hydrocarbures totaux par spectrophotométrie infrarouge (NF T 90-114).

Les hydrocarbures totaux correspondent à ceux extractibles par le tétrachlorure de carbone (CCl₄) ou éther en milieu acide.

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 10 µg/l

➤ *Recommandations, traitements*

En dehors d'une pollution accidentelle, les films d'hydrocarbures sont généralement éliminés à la prise d'eau. Les traitements classiques (oxydation) et l'utilisation de charbon actif permettent d'obtenir des diminutions de concentration satisfaisantes.

Cependant, pour limiter les risques de déversement ou d'infiltration, une attention particulière devra être portée aux usages possibles de ces produits dans les périmètres de protection des captages. Des mesures préventives spécifiques pourront localement être instaurées vis-à-vis des risques existants : stockages à double paroi, fossés routiers étanches, etc...

2.3.10 Phénols

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

Le terme « phénols » désigne habituellement un ensemble de composés dérivés du benzène. La présence de phénols dans les eaux provient le plus souvent de pollutions industrielles : industries pétrolières, pétrochimiques, chimiques (par exemple, produits phytosanitaires) et pharmaceutiques. Parfois, l'utilisation de revêtements bitumeux dans des canalisations ou des réservoirs peut être la cause de l'introduction de quantités limitées de phénols dans les réseaux (à l'occasion de mise en service ou de réparations). La décomposition de produits végétaux conduit aussi à la production de composés phénolés. Les teneurs en composés phénolés d'une eau brute (superficielle ou souterraine) et d'une eau d'alimentation sont comprises entre 1 et 10 µg/l.

➤ *Effets, nuisances*

Les effets sur l'homme sont surtout connus, pour des concentrations relativement importantes, en hygiène industrielle et en milieu domestique ; les accidents surviennent par contact, par inhalation, ou encore par ingestion accidentelle. Les substances phénoliques peuvent réagir avec le chlore utilisé dans le traitement et produire des chlorophénols de saveur désagréable qui sont perceptibles à partir d'une dose de 0,1 µg/l. Pour éviter cet inconvénient, il est donc souhaitable que les teneurs en phénols ne dépassent pas 0,1 µg/l avant chloration.

Certains composés phénolés sont connus pour être toxiques, mais pour des concentrations très supérieures au seuil de détection organoleptique. En raison de leur mauvais goût, il est peu probable que de telles eaux soient consommées.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthode de référence pour l'analyse : détermination spectrophotométrique d'absorption moléculaire de l'indice phénol (NF T 90-109).

Norme de potabilité française : teneur telle que les composés ne soient pas détectables organoleptiquement après ajout de chlore ; en cas de détection, concentration inférieure à 0,5 µg/l.

➤ ***Recommandations, traitements***

Afin d'empêcher la formation de chlorophénol, principale substance indésirable, notamment en présence d'un traitement de désinfection par le chlore, l'élimination des phénols peut être pratiquée par la fixation sur charbon actif.

2.3.11 Bore

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Le bore n'existe jamais à l'état élémentaire dans la nature, mais sous différentes formes (borate de sodium ou borax, borate de calcium, acide borique, borates et polyborates, boranes ou hydrures de bore) dans les dépôts minéraux et les eaux naturelles.

C'est un métalloïde très dur utilisé dans l'industrie atomique comme absorbant de neutrons, et en métallurgie comme désoxydant. Les hydrures de bore sont aussi employés pour la propulsion des fusées, comme accélérateurs de polymérisation dans l'industrie des parfums et l'industrie pharmaceutique. Les borates sont également utilisés dans les lessives.

Si le bore n'apparaît qu'exceptionnellement dans les eaux de distribution, il est plus fréquent dans les eaux résiduaires.

Un régime alimentaire ordinaire fournit de 2 à 5 mg de bore par jour.

➤ ***Effets, nuisances***

La toxicité des dérivés du bore est éminemment variable. Les hydrures de bore sont très toxiques par voies digestive, respiratoire ou cutanée.

Cependant, les formes de bore présentes dans l'eau de boisson ne sont généralement pas considérées comme nocives pour la santé. L'OMS préconise une dose journalière admissible d'environ 6 mg pour un adulte de 70 kg.

Selon l'OMS, des quantités de l'ordre du mg/l dans l'eau ne semblent pas présenter d'inconvénients pour la santé humaine.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthode de référence pour l'analyse : spectrométrie d'absorption moléculaire (NF T 90-041).

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 100 µg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Il existe peu d'information concernant les filières de traitement.

2.3.12 Agents de surface

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Les agents de surface ou surfactifs sont des produits tensioactifs exclusivement synthétiques entrant dans la composition des détergents. Ces derniers comprennent toutes les substances possédant des propriétés de nettoyage importantes et tendent à remplacer les savons. Leur présence dans les eaux est due aux rejets d'effluents urbains et industriels. Leur teneur dans les eaux de surface, qui avait tendance à s'élever constamment, est actuellement limitée par l'utilisation de composés biodégradables.

Les agents de surface sont classés en produits anioniques (très employés), cationiques (peu utilisés) et non ioniques (usage croissant). La biodégradabilité de ces produits est très variable, même à l'intérieur d'une classe donnée.

On émet l'hypothèse qu'un individu ingère jusqu'à 3 mg d'agents de surface quotidiennement.

➤ *Effets, nuisances*

La présence de détergents a pour conséquence l'apparition d'un certain nombre de nuisances dont :

- La formation de mousses, celles-ci freinent le processus d'épuration, concentrent les impuretés, obturent les canalisations et sont susceptibles de disséminer bactéries et virus. Des teneurs en détergents anioniques supérieures ou égales à 300 mg/l sont suffisantes pour obtenir une mousse stable ;

- L'apparition de problèmes d'ordre organoleptique pour des concentrations nettement supérieures au seuil de moussage. Cependant, un goût de savon peut être remarqué pour des doses très inférieures ;

- L'augmentation de la teneur en phosphates, provenant des polyphosphates combinés aux agents de surface, qui facilite l'eutrophisation des lacs ;

- Une action synergique possible avec des substances toxiques (métal, pesticides).

D'une façon générale, il apparaît que les détergents non ioniques sont sensiblement deux fois plus toxiques que les anioniques ; leurs effets toxiques sont d'autre part plus rémanents dans l'eau que ceux des anioniques. Toutefois, on admet qu'ils ne sont pas toxiques pour l'homme même pour une ingestion quotidienne de 100 à 1000 mg. Mais ils peuvent faciliter la pénétration de benzo(3,4) pyrène (cancérogène) dans l'organisme.

➤ *Normes, interprétation des résultats*

Méthodes de référence pour l'analyse :

- Agent anionique : mesure spectrophotométrique après formation d'un sel coloré en bleu résultant d'une réaction entre l'agent de surface et le bleu de méthylène ;

- Agent non ionique : mesure potentiométrique après précipitation de l'agent avec un réactif au bismuth.

L'OMS recommande de ne pas tolérer la présence dans l'eau de boisson de concentrations de détergents capables de poser des problèmes de formation de mousse, de goût et d'odeur.

En France, le rejet de détergents dans les eaux superficielles, souterraines et dans les eaux de mer est interdit, lorsque la biodégradabilité moyenne des agents de surface est inférieure à 90%.

La présence de ces produits constitue toujours un indice de pollution des eaux.

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 200 µg/l (exprimés en lauryl-sulfate)

➤ ***Recommandations, traitements***

L'élimination des surfactifs peut se faire par différents traitements physicochimiques ou biologiques, dont les rendements sont très variables selon les méthodes employées :

- Moussage, aération ou flottation ;
- Oxydation à l'ozone ;
- Coagulation-floculation ;
- Adsorption sur matières inertes ;
- Adsorption sur charbon actif ;
- Traitement par résines échangeuses d'ions ;
- Traitement biologique (lits bactériens).

2.3.13 Fer

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Le fer est classé au quatrième rang des éléments présents dans la croûte terrestre par ordre d'abondance. Il s'emploie largement dans la métallurgie et ses utilisations secondaires dans la chimie sont très variées.

Dans les eaux bien aérées, sa concentration est rarement importante. En revanche, dans les eaux souterraines (en particulier dans les nappes captives, dans les nappes alluviales peu aérées, etc...), on peut observer de fortes concentrations en fer quand les conditions de solubilisation sont réunies. En effet, le fer se trouve en solution dans les eaux privées d'oxygène. Suivant les cas, le fer pourra exister sous forme colloïdale, à l'état de complexes organiques ou minéraux. Au contact de l'air, on assiste à une précipitation due à l'oxydation de ce métal. Il est fréquemment associé au manganèse avec lequel il a la propriété de coprécipiter.

Sa présence dans l'eau peut avoir diverses origines :

- Lessivage des terrains avec dissolution des roches et des minerais contenus dans le sous-sol ;
- Rejets industriels (pollutions minière, métallurgique, sidérurgique) ;
- Corrosion des canalisations métalliques (en fonte ou en acier) ou existence de dépôts antérieurs ;

- Utilisation de sels de fer comme agents de coagulation dans la production d'eau potable.

La présence de fer dans l'eau du robinet peut être le signe d'une coagulation défective, d'un mauvais contrôle de pH, d'une rupture de filtre ou d'une anomalie dans le processus d'épuration.

On rencontre normalement dans l'eau de boisson moins de 0,3 mg/l. De ce fait, l'ingestion par les aliments constitue la voie principale d'exposition. L'ingestion quotidienne moyenne d'un individu a été estimée entre 15 et 22 mg.

➤ *Effets, nuisances*

Le fer est un élément indispensable au fonctionnement du corps humain (synthèse de l'hémoglobine du sang). Les besoins journaliers en fer sont estimés, au minimum, à environ 10 mg par jour et varient selon l'âge et le sexe.

Les seules intoxications remarquées ont été liées à l'absorption de sels de fer chez les enfants (avec des symptômes d'ordre digestif). Aucune toxicité n'a été observée chez l'homme, et ce, même à des doses élevées (5 mg/l). Le fer entraîne, à des concentrations supérieures à 0,3 voire 0,1 mg/l, des effets indirects gênants pour l'utilisateur :

- Neutralisation des désinfectants pouvant générer la prolifération des micro-organismes dans les réseaux de distribution ;
- Conséquences de la corrosion dans les canalisations métalliques avec libération du métal ;
- Distribution d'eau de couleur rouille, au robinet de l'utilisateur, qui tache le linge et les installations de plomberie ;
- Inconvénients d'ordre organoleptique (goût métallique de l'eau, turbidité, coloration rouge) ;
- Réduction progressive des débits de conduite (formation de dépôts) en association avec le manganèse.

➤ *Normes, interprétation des résultats*

Méthodes de référence pour l'analyse : spectroscopie d'émission atomique (NF en ISO 11885).

La fixation de ces normes relève davantage de conséquences organoleptiques ou de difficultés d'exploitation de réseaux que d'objectifs sanitaires du fait du seuil de toxicité élevée.

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 200 µg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

La déferrisation par oxydation (à l'air ou autre oxydant), suivie d'une filtration, est généralement utilisée pour les eaux d'origine profonde.

L'élimination peut se faire également par voie biologique (utilisation de bactéries qui oxydent et précipitent le fer dissous). Ces traitements permettent d'atteindre des niveaux acceptables en distribution.

La mise en œuvre de tels traitements s'accompagne le plus souvent d'un curage des réseaux car des dépôts importants résultant d'une pollution antérieure de l'eau de distribution peuvent subsister.

2.3.14 Manganèse

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Assez répandu dans la nature, le manganèse s'emploie dans de nombreuses applications industrielles : métallurgie (acières, alliages, soudures), industrie électrique (électrodes, piles sèches), industrie chimique (catalyseurs, colorants), industrie du verre et de la céramique, carburants (additifs organométalliques).

Le manganèse est présent dans les eaux à l'état soluble, en suspension, ou sous forme de différents complexes, mais non à l'état libre. Sa solubilité dépend du pH, de l'oxygène dissous, de la présence d'agents complexants. Certaines eaux souterraines ont des teneurs de l'ordre de 1 mg/l ; les eaux de surface en contiennent le plus souvent moins de 0,05 mg/l. Fréquemment associé au fer, avec lequel il a la possibilité de coprécipiter, le manganèse peut exister dans les eaux profondes (en absence d'oxygène) et dans les nappes alluviales sous forme dissoute. Dans les eaux aérées, il est généralement à l'état oxydé et précipité.

L'absorption se fait par inhalation, par voie hydrique et principalement par les aliments (thé, céréales,...). On estime qu'un individu en consommerait de 2 à 9 mg par jour. L'exposition par l'eau de boisson, normalement inférieure à 0,1 mg par jour, dépasse très rarement 1 mg.

➤ ***Effets, nuisances***

Le manganèse est un élément minéral indispensable au fonctionnement du corps humain (croissance, métabolisme des glucides et lipides). La quantité moyenne nécessaire pour assurer les fonctions physiologiques normales est évaluée entre 2 et 5 mg par jour pour un adulte et moins de 1,5 mg pour un enfant.

Les intoxications sont extrêmement rares et en dehors d'une absorption accidentelle en quantités importantes, le risque est exclusivement d'origine professionnelle (la voie pulmonaire étant le mode de pénétration le plus dangereux). Dans ce cas, les organes cibles sont les poumons et le système nerveux central.

A des concentrations supérieures à 0,15 mg/l, le manganèse entraîne des effets indirects gênants pour l'utilisateur :

- Neutralisation des désinfectants pouvant générer la prolifération de micro-organismes dans les réseaux de distribution ;
- Phénomènes de corrosion dans les canalisations ;
- Formation d'une couche noire (à partir de 0,05 mg/l) à l'intérieur de ces canalisations, qui peut s'arracher et être entraînée sous forme de particules ;
- Distribution d'eau colorée noire au robinet, qui tache le linge et les installations de plomberie ;
- Inconvénients d'ordre organoleptique (goût métallique, couleur noire) ;
- Réduction progressive des débits de conduite (formation de dépôts) en association avec le fer.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthodes de référence pour l'analyse : spectroscopie d'émission atomique (NF en ISO 11885).

La limitation imposée résulte du goût métallique et de la turbidité qu'il engendre.

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 50 µg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Les traitements de démanganisation reposent sur l'utilisation d'oxydants, à pH élevé, qui permettent la précipitation des sels. Ils sont suivis au besoin d'une filtration. Leur mise en œuvre doit le plus souvent s'accompagner d'un curage des réseaux pour éliminer les dépôts importants.

2.3.15 Cuivre

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

Le cuivre, métal largement présent dans la croûte terrestre, existe sous différentes formes (libre, minerais oxydés ou sulfurés). Les teneurs en cuivre des sols varient, entre autres, selon les caractéristiques géographiques locales.

Il est très employé dans les alliages, parmi lesquels le laiton (cuivre-zinc), le bronze (cuivre-étain), le maillechort (cuivre-zinc-nickel), et dans l'industrie électrique. Il est également répandu dans les réseaux de distribution du fait de sa résistance à la corrosion. Les sels de cuivre sont largement utilisés dans l'agriculture comme fongicides, insecticides, algicides, et dans l'industrie textile et photographique, la fabrication de pigments, les tanneries, les traitements de surface, la céramique. Les activités anthropiques constituent donc la principale cause de pollution cuprique des eaux naturelles.

Si le cuivre métallique est insoluble dans l'eau, bon nombre de ses sels sont solubles. Cependant, les teneurs sont généralement inférieures à 1 mg/l dans les eaux de surface. Dans l'eau, la nature du cuivre dépend du pH, de la concentration en carbonate et des autres anions en solution.

Bien que l'eau de boisson puisse en contenir une certaine quantité, la principale source d'apport est fournie par l'alimentation (de l'ordre de 1 à 5 mg/l).

➤ *Effets, nuisances*

Le cuivre est un élément essentiel pour le métabolisme humain. La quantité de cuivre nécessaire à l'organisme adulte est d'environ 3 mg/jour et de 2 mg/jour pour les enfants.

La toxicité du cuivre par l'ingestion d'eau est inhabituelle chez l'homme. De plus, les sels de cuivre ayant une saveur désagréable, de fortes teneurs n'incitent pas le consommateur à boire une telle eau (seuil de détection situé entre 1 et 2 mg/l). Des concentrations supérieures à 5

mg/l rendent l'eau imbuvable. A partir de 1 mg/l des taches peuvent apparaître sur le linge et les équipements sanitaires.

Par ailleurs, le cuivre augmente la corrosion des ustensiles et des accessoires en zinc et en aluminium.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthodes de référence pour l'analyse : spectrométrie d'émission atomique (NF en ISO 11885).

La réglementation tient compte des contraintes d'ordre organoleptique.

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 1 mg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Les traitements habituels (oxydation, coagulation, floculation,...) éliminent généralement les oligo-éléments métalliques mais la concentration en cuivre au robinet de l'utilisateur, du fait de l'utilisation de canalisations en cuivre, peut être plus élevée qu'au niveau du captage ou que de l'eau traitée alimentant le réseau. Ces défauts se corrigent par un traitement anti-corrosion ou par le changement des tuyaux existants.

2.3.16 Zinc

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Le zinc, métal couramment répandu sur le globe (0,04 g/kg de terre), se rencontre notamment à l'état naturel au niveau des gisements de plomb.

L'industrie l'emploie dans des domaines aussi variés que : la galvanisation, les alliages (laiton), l'imprimerie, la teinturerie, etc... Les sels de zinc sont utilisés pour la fabrication de caoutchouc, de produits luminescents, de piles, d'insecticides, d'engrais, ainsi que dans les industries de traitements de surface et pharmaceutiques, etc...

La concentration du zinc dans l'eau naturelle est généralement faible et diminue encore par suite de son adsorption dans les sédiments. Par contre, la solubilité des sels de zinc peut être importante. La teneur de l'eau du robinet risque d'être beaucoup plus élevée, en général entre 0,01 et 1 mg/l, que dans les eaux de surface, par suite du lessivage du zinc contenu dans les

tuyaux galvanisés, les accessoires de plomberie et le laiton. D'une façon générale, plus les eaux sont à pH acide, plus elles ont des concentrations en zinc importantes.

Les aliments demeurent de loin la voie d'exposition la plus importante pour l'homme. Un individu ingérerait ainsi plus de 12 mg par jour alors qu'il ne recevrait pas plus de 4 mg par l'eau de boisson.

➤ ***Effets, nuisances***

Le zinc est un élément essentiel au métabolisme humain. Les besoins quotidiens vont de 4 à 10 mg/jour, voire 16 mg pour les femmes enceintes et les nouveau-nés.

Le zinc dans l'eau de boisson ne présente pas de risque toxique pour l'homme. Les manifestations d'intoxication aiguë se traduisent par des troubles digestifs. Des accidents rénaux aigus ont été attribués au chlorure de zinc.

Les effets gênants du zinc sont essentiellement d'ordre organoleptique. Des concentrations de zinc supérieures à 5 mg/l procurent à l'eau une saveur astringente déplaisante, une opalescence et des dépôts granuleux.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthode de référence pour l'analyse : spectroscopie d'émission atomique (NF en ISO 11885).

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 5 mg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Dans la mesure du possible, le zinc doit être éliminé des eaux usées avant leur rejet dans le milieu naturel.

Les méthodes de traitement, en vue de la production d'eau d'alimentation, les plus couramment employées sont la précipitation et l'échange d'ions.

Le zinc est précipité soit par la soude ou le lait de chaux pour un pH compris entre 7,6 et 9,5, soit par le carbonate de soude pour un pH situé entre 7,4 et 8,5.

Les défauts de corrosion se corrigent par un traitement spécifique ou par le changement des tuyaux existants.

En présence de teneurs élevées en zinc, il faut se souvenir que ce métal peut contenir 1% de cadmium ; il conviendra de rechercher ce toxique, en particulier si l'eau a séjourné sur des surfaces galvanisées. Dans les eaux résiduaires de traitement de surface, le zinc est habituellement accompagné de plomb et de cadmium.

2.3.17 Phosphore

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

Le phosphore existe sous forme minérale ou organique. Les ions phosphates (PO_4^{3-}) contenus dans les eaux de surface ou de nappe peuvent être d'origine naturelle (produit de décomposition de la matière organique, lessivage des minéraux), mais à l'heure actuelle, leur présence est surtout due aux rejets industriels (agroalimentaires, laverie, ateliers de traitement de surface), domestiques (polyphosphates des détergents) ou agricoles (engrais, pesticides). Ils peuvent aussi provenir des traitements des eaux contre la corrosion et l'entartrage (polyphosphates).

Les formes chimiques sous lesquelles se rencontre le phosphore dépendent de l'acidité du milieu. Dans les eaux naturelles de pH compris entre 5 et 8, seules les formes H_2PO_4^- et HPO_4^{2-} existent en quantités appréciables.

Dans les eaux de surface, le teneur naturelle en phosphates ou orthophosphates est de l'ordre de 0,1 à 0,3 mg/l. La présence de phosphore dans les eaux souterraines est généralement un indice de pollution.

L'apport alimentaire est élevé du fait de la teneur significative en phosphore des aliments. La plupart des eaux de boisson contiennent des doses inférieures à 0,1 mg/l.

➤ *Effets, nuisances*

Le phosphore est un élément indispensable pour le métabolisme humain, dont les besoins quotidiens sont de l'ordre de 1 à 3 grammes. Sa carence peut entraîner faiblesse, anorexie et douleurs osseuses.

A doses élevées, les sels de pyro et métaphosphates peuvent inhiber l'utilisation des sels de calcium et engendrer nausées, diarrhées, hémorragies gastro-intestinales, ulcérations, atteintes rénales et hépatiques. En revanche, l'orthophosphate ne représente pas un risque pour la santé. Les phosphates (teneurs supérieures à 0,2 mg/l) favorisent la prolifération des algues qui conduisent à l'eutrophisation des lacs, des cours d'eau,... Il en résulte une véritable dégradation de la vie aquatique qui peut compromettre l'utilisation de ces eaux en vue de la production d'eau destinée à la consommation humaine.

Dans le cas du traitement des eaux brutes, les phosphates peuvent perturber l'efficacité de la coagulation et de l'adoucissement.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthodes de référence pour l'analyse (NF en ISO 11885) :

Dosage du phosphore total par spectroscopie d'émission atomique (Norme de potabilité française : concentration inférieure à 5 mg/l) ;

Dosage de l'orthophosphate par spectrométrie après formation d'un complexe ou par chromatographie ionique (pas de norme).

➤ ***Recommandations, traitements***

Les phosphates peuvent être éliminés par les procédés de déminéralisation ou de coprécipitation avec le fer, l'aluminium ou le calcium.

2.3.18 Argent

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Concentré à environ 0,1 mg/kg dans la croûte terrestre, l'argent se présente à l'état natif sous forme de minerai, ou associé à des minerais de plomb, d'or, de cuivre et de zinc. Il est employé dans divers alliages et soudures, en photographie, dans l'appareillage électrique, dans la fabrication de fongicides, dans l'argenterie, la joaillerie, la monnaie, la dentisterie et pour colorer les verres.

L'argent est pratiquement inexistant dans l'eau. Généralement, les concentrations sont de l'ordre de 1 µg/l et rares sont les eaux qui en contiennent plus de 10 µg/l. Cependant, il arrive

que la teneur soit élevée dans l'eau du robinet du fait de la présence à l'état de traces dans certains accessoires de plomberie.

On estime que l'ingestion moyenne par voie alimentaire d'un individu se situe entre 20 et 80 $\mu\text{g}/\text{jour}$, mais ces valeurs peuvent être beaucoup plus élevées lorsque des ustensiles en argent sont utilisés. L'exposition par voie atmosphérique serait négligeable. Enfin, l'application de certains produits pharmaceutiques contenant de l'argent peut entraîner une exposition considérable.

Pour une eau contenant environ 1 $\mu\text{g}/\text{l}$ d'argent, les apports hydriques sont estimés à moins de 5% des apports alimentaires totaux.

➤ *Effets, nuisances*

L'argent n'est pas un élément particulièrement toxique pour l'homme aux doses rencontrées habituellement, car seulement 10% de la quantité absorbée sont fixés par l'organisme.

L'intoxication chronique peut se développer à partir d'une ingestion quotidienne de 400 μg , et ce, au cours d'une vie entière. Elle se traduit par des troubles digestifs, une coloration grise anormale de la peau, des cheveux et des ongles (argyrose).

Des doses supérieures à 15 $\mu\text{g}/\text{l}$ peuvent générer une opalescence de l'eau par formation de chlorure d'argent colloïdal.

➤ *Normes, interprétation des résultats*

Méthode de référence pour l'analyse : spectroscopie d'émission atomique (NF en ISO 11885).

L'emploi de l'argent comme traitement de désinfection de l'eau destinée à la consommation humaine n'est pas autorisé en France.

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 10 $\mu\text{g}/\text{l}$

➤ *Recommandations, traitements*

La coagulation par le sulfate d'alumine suivie de filtration élimine pratiquement tout l'argent. La chloration associée aux précédentes techniques améliore l'élimination, en

particulier lorsque la dose de chlore utilisée est légèrement supérieure à celle correspondant au point critique.

2.3.19 Fluor

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

Le fluor n'existe pas à l'état libre mais sous forme de fluorures en association avec d'autres éléments (calcium, aluminium, sodium,...). Le fluor et ses dérivés sont largement employés dans diverses industries comme les traitements de surface, les industries transformatrices de minerais, les industries du verre, de la céramique, la fabrication d'engrais, d'insecticides, d'antifongiques,...

Les fluorures sont présents naturellement dans les eaux à des teneurs généralement inférieures à 1 mg/l dans les eaux superficielles et qui peuvent atteindre parfois 10 mg/l voire exceptionnellement 100 mg/l dans les eaux profondes.

Presque tous les produits alimentaires contiennent au moins des traces de fluor, et certains en sont riches (thé, fruits exotiques et certains poissons). Les composés du fluor sont présents dans l'air, surtout du fait des émissions industrielles. L'exposition moyenne inférieure à 1 µg/m³ demeure insignifiante par rapport au fluor ingéré.

Pour une teneur dans l'eau de 0,5 à 1,5 mg/l, la part totale de l'eau dans l'alimentation varie de 50 à 75%.

➤ *Effets, nuisances*

Une carence ou un excès en fluor provoquent des inconvénients alors que des doses modérées sont bénéfiques pour la santé. Les fluorures ingérés avec l'eau sont résorbés presque en totalité et se répartissent rapidement dans l'organisme (essentiellement le squelette et les dents).

Les marges entre doses utile et toxique se résument comme suit :

- Moins de 0,5 mg/l : déficience en fluor pour prévenir les caries dentaires ;
- Entre 0,5 et 1,5 mg/l : dose optimale pour prévenir les caries ;
- Entre 1,5 et 4 mg/l : risque de fluorose dentaire (taches sur l'émail) ;
- Plus de 4 mg/l : risque de fluorose osseuse (douleurs osseuses et articulaires accompagnées de déformations).

Du fait de la fixation de l'ion calcium par l'ion fluor, ce dernier entraîne une hypocalcémie.

A très forte dose (quelques centaines de mg), l'ion fluor peut provoquer des états pathologiques, tels que gastro-entérite hémorragique, néphrite aiguë et diverses lésions au niveau du foie et du muscle cardiaque. Des vomissements, douleurs abdominales, nausées, diarrhées voire convulsions sont les premiers symptômes de l'intoxication.

Les personnes dialysées constituent une population à risque.

➤ *Normes, interprétation des résultats*

Méthode de référence pour l'analyse : dosage potentiométrique (NF T 90-004).

Norme de potabilité française :

- concentration inférieure à 1500 µg/l (température comprise entre 8 et 12°C)
- concentration inférieure à 700 µg/l (température comprise entre 25 et 30°C)
- par interpolation linéaire pour les températures comprises entre 12 et 25°C

➤ *Recommandations, traitements*

Pour des concentrations inférieures à 0,5 mg/l dans l'eau de distribution, la prévention optimale de la carie dentaire justifie un apport complémentaire (sel fluoré, comprimés, eaux minérales fluorées, dentifrice, gel et bains de bouche fluorés).

L'excès de fluor peut être éliminé par un adoucissement à la chaux. D'autres procédés de décantation-filtration (phosphate tricalcique, sulfate d'alumine) existent également.

Il convient si possible de changer de ressource ou d'assurer une dilution correcte (eau non chargée en fluor) dans le cas d'une eau dont la teneur en fluor est largement supérieure à la valeur limite.

2.3.20 Baryum

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

Le baryum est un métal présent à l'état de traces dans la plupart des sols. Ses composés sont employés dans le forage des puits de pétrole, le traitement des carburants pour moteurs Diesel, la fabrication des peintures, du papier, du caoutchouc, du linoléum et des produits analogues, dans les industries de la céramique, du verre, de la photographie et de l'électronique et dans certains produits nécessaires pour les diagnostics.

La plupart des eaux contiennent du baryum à une concentration bien inférieure à 100 mg/l. Sa présence est généralement d'origine géologique. Ces basses teneurs sont dues à la très faible solubilité du sulfate de baryum. Celle-ci est toutefois susceptible de s'accroître en présence de chlorures et autres anions. En pratique, le baryum ne peut exister naturellement dans l'eau qu'à l'état de carbonate, sa présence étant incompatible avec l'ion sulfate pour des valeurs supérieures à 1 mg/l.

Le baryum est présent à l'état de traces dans de nombreux produits alimentaires, et il est peu probable que l'eau (pour une concentration de 50 µg/l) intervienne pour plus de 15% dans l'ingestion totale quotidienne. Cependant, lorsque la dose est élevée (supérieure à 1 mg/l), l'eau de boisson pourrait contribuer pour plus de 75% de cette quantité totale.

➤ *Effets, nuisances*

L'appareil digestif est très perméable au baryum (sauf au sulfate de baryum) et permet un transfert rapide de celui-ci dans la circulation générale. L'essentiel s'accumule dans les os (plus de 90%). La toxicité du baryum dépend de la solubilité de ses sels, les plus toxiques étant les chlorures, les nitrates et les carbonates.

Suite à l'ingestion de fortes doses de sels solubles de baryum (plus de 200 mg/l), la toxicité aiguë se traduit par un effet stimulant marqué et prolongé sur tous les muscles (cardiaques, squelettiques et de l'appareil digestif), pouvant être suivi par une paralysie.

La dose mortelle de chlorure de baryum correspond à environ un gramme.

➤ *Normes, interprétation des résultats*

Méthode de référence pour l'analyse : spectroscopie d'émission atomique (NF en ISO 11885).

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 100 µg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Aucune donnée disponible.

2.3.21 Chlore résiduel (6)

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Le chlore est l'un des réactifs les plus utilisés pour la désinfection de l'eau (Cf 2.1.3-La désinfection), où il est employé essentiellement sous forme de chlore gazeux ou d'hypochlorite de soude (eau de Javel). Doté d'un pouvoir oxydant très important, il est de plus rémanent. A l'origine, les premières industries utilisatrices de chlore furent les industries textiles et papetières, puis l'industrie de synthèse organique.

Dans l'eau, le chlore se trouve sous trois formes en équilibre, dépendant du pH et de la température : l'acide hypochloreux, l'ion hypochlorite et l'ion chlorure. L'acide hypochloreux possède l'action biocide la plus efficace ; il est majoritaire en milieu acide. La quantité de chlore nécessaire dépendra de la nature des composés à détruire et de leur concentration.

Le chlore introduit est consommé prioritairement par les matières organiques (azotées, phénoliques) pour donner du chlore combiné (composés chlorés tels que les chloramines, les chlorophénols et trihalométhanes) à faible pouvoir germicide. Dans un deuxième temps, le chlore fourni sert à détruire ces composés qui seront transformés en matières minérales (point critique). Dans une troisième phase, le chlore ajouté possède les propriétés désinfectantes recherchées et constitue le chlore libre résiduel (acide hypochloreux, hypochlorite). Le chlore total correspond aux formes libre et combinée.

➤ ***Effets, nuisances***

Il n'a pas été décrit d'effets nocifs chez l'homme pour les doses de chlore présentes dans l'eau de boisson. Cependant, certaines pathologies (colites) semblent apparaître d'après certains auteurs.

Par ailleurs, les sous-produits issus de la réaction du chlore sur les matières organiques induisent des nuisances gustatives et olfactives. Plus graves, les sous-produits organochlorés (dont les trihalométhanes, THM) sont très fortement suspectés d'être responsables de l'apparition de certains cancers (cas du chloroforme).

Aussi, en raison de l'injection du chlore pour la désinfection, l'eau issue du traitement peut avoir des qualités organoleptiques inférieures à celles de la ressource.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthode de référence pour l'analyse : méthodes colorimétrique et titrimétrique à la N,N-diéthylphénylène-1,4 diamine (NF en ISO 7393).

En distribution, la teneur résiduelle en chlore constitue un indicateur de non-contamination du réseau après le traitement et un témoin de l'efficacité du traitement de désinfection. L'absence accidentelle de chlore résiduel dans une eau habituellement légèrement désinfectante pour révéler l'introduction ou le contact avec des matières organiques, un défaut d'entretien du réseau, ou encore une défaillance de la filière de traitement.

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 0,1 mg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

De nombreuses techniques d'injection de chlore existent dans le commerce. On privilégiera toujours les techniques asservissant les quantités d'oxydants (chlore, eau de Javel,...) injectées au débit d'eau à traiter. Par ailleurs, un contrôle après traitement, de préférence en continu, devra systématiquement être prévu.

L'efficacité du traitement de désinfection est liée au temps de contact avec l'eau. On s'assurera qu'il sera suffisant quelles que soient les conditions d'exploitation du réseau.

Pour éviter l'apparition de trop nombreux composés chloreux, il conviendra d'éliminer au maximum les matières organiques contenues dans l'eau brute.

2.3.22 Organochlorés (autres que les pesticides)

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Les hydrocarbures chlorés ou « solvants chlorés » n'ont pas d'origine naturelle et résultent des activités humaines. Il existe une multitude de composés (tétrachlorure de carbone, dichloroéthane, trichloroéthylène, tétrachloroéthylène,...) qui trouvent diverses applications : solvants pour le nettoyage ou pour l'extraction et la séparation de certains produits, réfrigérants, propulseurs, agents anesthésiques et hydratants, bactéricides, etc...

Leur présence dans les eaux provient aussi bien d'usages industriels qu'urbains. Elle est due soit à des rejets directs, soit aux retombées atmosphériques avec les eaux de pluie, soit aux décharges (ménagères ou industrielles).

De façon générale, leurs concentrations dans les eaux de surface sont limitées du fait de la volatilité des composés. En revanche, comme ils sont peu biodégradables, ils tendent à s'accumuler dans les eaux souterraines après percolation dans le sol. Dans ce cas, ces substances proviennent de décharges, de certains épandages ou rejets d'effluents industriels infiltrés dans le sol. L'entraînement des organochlorés vers les nappes phréatiques constitue un risque sérieux de pollution pour l'environnement.

La formation des haloformes, en particulier des trihalométhanes (chloroforme,...), est le résultat de réactions entre le chlore de traitement et des composés organiques précurseurs d'origine naturelle (acides humiques) ou artificielle (résidus de pesticides, phénols,...).

En raison de la volatilité de ces composés, l'exposition atmosphérique peut être importante.

Par ailleurs, il existe des traces de ces substances dans beaucoup de produits alimentaires.

➤ *Effets, nuisances*

La toxicité des organochlorés est très variable selon le produit en question. La plupart des intoxications relevées proviennent de produits inhalés. De plus, les transformations de ces composés peuvent conduire à des produits intermédiaires très réactifs à l'origine de toxicités aiguës ou chroniques.

Plus généralement, les produits organochlorés sont responsables d'atteintes hépatiques, rénales, cardio-vasculaires, neurologiques, et sont des déprimeurs du système nerveux central.

Par ailleurs, certains de ces éléments sont supposés ou confirmés être des cancérigènes. En effet, des études ont mis en évidence la relation entre le chloroforme dans l'eau de boisson à des doses significatives et l'apparition de certains cancers.

➤ *Normes, interprétation des résultats*

Méthode de référence pour l'analyse : chromatographie en phase gazeuse (NF en ISO 10301).

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 1 µg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Il est nécessaire de prévenir toute pollution, que ce soit par la récupération des solvants au point d'utilisation ou par le contrôle et la surveillance des décharges dans le cas des eaux souterraines.

Le traitement en vue de leur élimination peut s'avérer délicat. La combinaison de différents procédés classiques (clarification, oxydation, aération forcée, adsorption sur charbon actif, biodégradation) doit permettre d'obtenir des résultats satisfaisants. L'emploi de charbon actif et l'aération, plus économique, réalisés dans des conditions adéquates, permettent d'éliminer presque totalement ces composés.

Par ailleurs, le chlore tend à être abandonné (au profit de l'ozone) dans les filières de traitement notamment en préchloration.

2.3.23 Matières en suspension (MES)

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Les matières en suspension dans l'eau, généralement visibles à l'œil nu (dimensions supérieures à 10 µm), déterminent la turbidité.

Les MES sont des particules solides très fines qui se classent en :

- Matières décantables qui se séparent naturellement quand l'eau est au repos ;
- Matières colloïdales trop fines pour décanter par simple gravité, mais éliminables par coagulation.

Les MES n'incluent pas les matières dissoutes.

Elles se composent d'argiles, de limons, de sables, de boues diverses, de particules colloïdales organiques, de plancton, de micro-organismes, etc...

La teneur et la composition des matières en suspension sont très variables selon l'origine de l'eau. Elles sont fonction de la nature des terrains traversés, de la saison, de la pluviométrie, des travaux, des rejets,... La concentration peut varier de plusieurs grammes par litre (rivière en crue par exemple) à moins de 1 mg/l dans certaines nappes souterraines.

➤ ***Effets, nuisances***

Les MES ayant une large surface d'adsorption forment un support idéal pour les ions, les molécules diverses et les agents biologiques. De ce fait, elles peuvent constituer un vecteur

pour la pénétration de ces produits dans l'organisme, leur action étant ensuite fonction de leur libération éventuelle lors du transit alimentaire.

Des teneurs élevées dans les eaux limitent la pénétration de la lumière, diminuent l'oxygène dissous et nuisent au développement de la vie aquatique, créant ainsi des déséquilibres entre les diverses espèces. Les dépôts dans les zones calmes peuvent entraîner des développements bactériens anaérobies avec leurs conséquences habituelles (odeurs).

Les MES n'ont pas de signification précise sur le plan sanitaire puisqu'elles ne définissent pas la nature des composés.

Toutefois, leur présence à des niveaux significatifs peut inhiber une désinfection efficace.

➤ *Normes, interprétation des résultats*

Méthodes de référence pour l'analyse :

- Filtration sur membrane poreuse de 0,45 µm, séchage à 105°C et pesée (NF en 872) ;
- Centrifugation (temps minimum 15 mn, accélération moyenne 2800 à 3200 g),

séchage à 105°C et pesée (NF T 90-105-2).

Cette notion de quantité est toutefois insuffisante pour exprimer totalement la turbidité car, pour une même teneur en MES, deux eaux peuvent avoir des turbidités très différentes selon la nature de ces MES.

La présence de MES est également révélatrice d'un traitement insuffisant.

Absence de norme en France.

➤ *Recommandations, traitements*

La clarification a pour but d'éliminer les MES responsables de turbidité, de couleur, ...
Suivant la teneur en MES, ce traitement concernera l'ensemble ou une partie des étapes suivantes : coagulation-floculation, décantation et filtration.

La clarification est toujours nécessaire pour les eaux de surface et relativement fréquente pour les eaux souterraines.

2.4 PARAMETRES CONCERNANT LES SUBSTANCES TOXIQUES

Les normes retenues pour ce groupe de substances tels le plomb et le chrome sont calculées en tenant compte de la « marge d'incertitude » adoptée en toxicologie, c'est-à-dire qu'elles fixent des limites sensiblement inférieures aux seuils considérés comme acceptables.

2.4.1 Arsenic

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

Largement distribuée dans la nature, l'arsenic représente environ 2 mg/kg de la croûte terrestre, mais peut atteindre 10 mg/kg. Il est présent dans un grand nombre de minerais, essentiellement sous forme de sulfures.

L'arsenic métal est principalement employé dans la fabrication des alliages. Quant aux composés arsenicaux, ils sont utilisés comme produits phytosanitaires, dans l'industrie du verre et de la céramique, dans les tanneries et les fabriques de peintures. Les principales sources artificielles de contamination sont issues de l'industrie métallurgique, du brûlage du charbon et du fioul domestique. En dehors d'origine naturelle comme le volcanisme, la majeure partie de l'arsenic dans l'eau provient des activités humaines.

La plupart des eaux d'alimentation contiennent de faibles quantités d'arsenic (moins de 10 µg/l). L'arsenic est présent dans presque tous les aliments (légumes, fruits et surtout poissons et crustacés) qui représentent la principale source d'exposition. La voie atmosphérique (en moyenne 0,2 µg/m³), l'exposition professionnelle (notamment les fonderies) et le tabac peuvent constituer d'autres voies d'exposition.

La part totale de l'eau dans l'ingestion est relativement faible. On estime que la quantité résorbée par l'homme à partir des différentes voies varie entre 100 et 300 µg/jour. Pour une concentration de 50 µg/l, l'eau représente la moitié voire les 2/3 de la dose totale résorbée.

➤ *Effets, nuisances*

Tous les composés de l'arsenic présentent des risques toxiques pour l'homme qui varient selon leur solubilité dans l'eau.

Les intoxications aiguës sont le plus souvent dues à une ingestion accidentelle. Elles atteignent le tube digestif, le système nerveux central, l'appareil respiratoire et la peau. Une dose de 100 mg peut causer un empoisonnement grave. A long terme, une ingestion quotidienne de 3 à 6 mg peut induire des problèmes musculaires, perte d'appétit et nausées, inflammations des muqueuses, lésions cutanées voire des tumeurs malignes.

Aux concentrations généralement rencontrées dans les eaux d'alimentation, l'arsenic semble sans danger pour la santé.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthode de référence pour l'analyse : spectroscopie d'émission atomique (NF en ISO 11885).

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 50 µg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Les méthodes de traitement employées sont la précipitation avec certaines formes métalliques, l'adsorption sur un floc de coagulation, l'adoucissement à la chaux, l'adsorption sur charbon actif et l'échange d'ions.

Les traitements habituels de floculation des eaux, et en particulier ceux par le chlorure de fer précédés d'une oxydation par le chlore, permettent d'éliminer la majeure partie de l'arsenic présent dans les eaux brutes.

2.4.2 Cadmium

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Le cadmium, élément assez rare dans la croûte terrestre, se rencontre à l'état de traces dans la plupart des sols et presque toujours associé avec des minerais de zinc ou de plomb.

Il est utilisé dans l'industrie des revêtements, la fabrication d'alliages et de soudures, de pigments, de peintures, de stabilisants pour matières plastiques et batteries, des céramiques, des engrais phosphatés, l'industrie atomique,...

Seul certains de ses sels sont solubles (chlorures, nitrates, sulfates,...), et les carbonates et hydroxydes de cadmium le deviennent à pH acide. Les eaux non polluées ont, en général, une

dose inférieure à 1 µg/l pouvant aller parfois jusqu'à 5 voire 10 µg/l dans de rares cas. Les nappes phréatiques et les eaux de surface en contenant davantage peuvent avoir été polluées par des effluents industriels ou agricoles ou des infiltrations. Quant aux teneurs parfois fortes relevées au robinet, elles sont dues au cadmiage des accessoires de plomberie, aux soudures à l'argent et aux tuyauteries en acier galvanisé.

La part de l'eau (concentration en cadmium de 5 µg/l) correspondrait au quart de l'apport alimentaire quotidien. Les aliments (mollusques, crustacés), voire la contamination par la vaisselle en émail et céramique représentent la principale voie d'exposition (15 à 60 µg/jour/personne). Les apports par l'air, le tabac et l'exposition industrielle demeurent plus négligeables. La dose journalière admissible est de 71 µg.

➤ *Effets, nuisances*

Le cadmium, élément non essentiel, est toxique pour l'homme même à faible dose (à partir de 100 µg/jour). Son principal danger réside dans son effet cumulatif car il ne s'élimine pratiquement pas. Ses divers composés présentent des effets variables selon leur solubilité, et donc la facilité de l'organisme à les assimiler.

Le cadmium, une fois assimilé, se concentre dans certaines parties du corps (foie et surtout reins, pour 30 à 40%). Des intoxications chroniques se traduisent par des troubles gastro-intestinaux, pulmonaires, rénaux et nerveux, des lésions osseuses, une hypertension artérielle. Un cas d'intoxication aiguë (600 µg/jour par de l'eau de cuisson contaminée par des rejets d'une mine de zinc proche) a entraîné au Japon des lésions osseuses irréversibles essentiellement chez des femmes âgées. En effet, les personnes âgées et les insuffisants rénaux constituent des populations sensibles.

➤ *Normes, interprétation des résultats*

Méthode de référence pour l'analyse : spectroscopie d'émission atomique (NF en ISO 11885).

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 5 µg/l

➤ *Recommandations, traitements*

Il faut s'efforcer de limiter les apports de cadmium du fait des activités humaines :

Au niveau de l'exploitation du réseau : diminuer la pollution par le cadmiage des canalisations (par correction de l'agressivité de l'eau voire changement des branchements ou tuyauteries du réseau) ;

Au niveau de la protection des eaux :

- Proscrire l'épandage des boues de traitement des eaux usées contenant des quantités importantes et les rejets de cette substance dans l'environnement ;

- Utiliser des engrais phosphatés contenant moins de cadmium ;

Au niveau environnemental :

- Recycler au maximum le cadmium et s'assurer que les dépôts de déchets ne diffusent pas le cadmium dans les aquifères ;

- Réduire les rejets de poussières contenant du cadmium dans l'atmosphère.

Quant à l'élimination dans les eaux d'alimentation, la précipitation et l'échange d'ions sont les plus utilisés.

2.4.3 Cyanures

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

Les cyanures (minéraux et organiques) sont indissociables de la vie (intermédiaires du métabolisme) et de l'industrie. Les plus courants sont le cyanure d'hydrogène (acide cyanhydrique en solution), les sels solubles dans l'eau et les complexes appelés cyanométallates. Ils sont employés ou retrouvés dans divers procédés : extraction de l'or et de l'argent, production d'acier, industrie pétrochimique, cokeries, galvanoplastie, eau de lavage des hauts-fourneaux, industrie chimique (fabrication de plastiques, de pesticides, de teintures), etc...

Généralement les teneurs dans les eaux naturelles sont très faibles (inférieures à 100 µg/l) voire analytiquement absentes. Leur présence est due aux rejets d'effluents industriels ou agricoles. Dans l'eau, l'acide cyanhydrique se dissocie, en fonction du pH, en ion cyanure (CN⁻) et ion hydrogène (H⁺).

A part certains aliments particuliers (comme les amandes), l'absorption des cyanures par la voie digestive semble très limitée même si la plupart des denrées contiennent des traces. En outre, comme la chaleur les décompose, il y en aurait moins dans les aliments cuits.

➤ ***Effets, nuisances***

La forme la plus toxique est l'acide cyanhydrique pour lequel une seule dose de 50 à 60 mg peut être mortelle pour l'homme.

L'intoxication suraiguë est foudroyante : vertiges, perte de connaissance, convulsions, cyanose, arrêt respiratoire.

L'intoxication chronique se caractérise par une asthénie, une perte de poids, des troubles digestifs, nerveux et cardiaques.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthode de référence pour l'analyse : spectrométrie d'absorption moléculaire (NF T 90-107).

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 50 µg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Leur élimination est réalisée par oxydation avec du bioxyde de chlore, du chlore ou du permanganate de potassium.

2.4.4 Chrome

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

La plupart des roches et des terrains renferment de faibles quantités de chrome. A l'état naturel, il est hautement insoluble, mais il peut dans certaines conditions devenir plus soluble par l'érosion, l'oxydation et l'action des bactéries. Il est principalement utilisé pour le chromage, la fabrication d'alliages, d'agents oxydants, d'inhibiteurs de la corrosion, de pigments, ainsi que dans les industries du textile, de la céramique, de la verrerie et de la photographie.

En pratique, sa présence dans l'eau n'est pas fréquente et est le plus souvent liée à des rejets d'eaux usées ou à des infiltrations par des champs d'épandage de boues de stations d'épuration. L'oxydation des composés chromeux étant instantanée, le chrome peut se trouver à l'état trivalent (chromites) ou hexavalent (chromates et dichromates). Dans l'eau chlorée ou aérée, le chrome hexavalent prédomine. Les teneurs dans l'eau brute sont généralement basse

(10 µg/l, rarement plus de 25 µg/l) en raison de la grande insolubilité du chrome. Les concentrations dans l'eau traitée sont habituellement identiques à celles de l'eau brute. Il est très rare de trouver 20 µg/l de chrome à l'eau du robinet bien que celui-ci, employé en robinetterie, puisse être un facteur de pollution.

On estime donc que l'exposition quotidienne par l'eau de boisson peut varier d'environ 10 à 40 µg/l. L'ingestion alimentaire (il existe des traces naturelles dans les aliments) compterait pour 100 à 300 µg/jour. Quant à la teneur dans l'atmosphère urbaine (moyenne 0,02 µg/m³), elle équivaldrait à une absorption d'environ 2 µg/jour, le tabac pouvant apporter, pour sa part, quelques µg/jour supplémentaires.

A 50 µg/l de chrome, l'eau apporte moins de la moitié de l'absorption totale journalière.

➤ *Effets, nuisances*

Le chrome trivalent est un élément essentiel du métabolisme humain. Des études ont montré qu'il améliorerait la croissance et favorisait un bon métabolisme du glucose, des lipides et des protéines.

Par contre, le chrome hexavalent, le plus hydrosoluble, est fortement toxique (cancérogène reconnu). Il provoquerait, à faible dose, une irritation de la muqueuse gastro-intestinale, et à forte dose (10 µg/kg de poids corporel), une nécrose hépatique et une néphrite. Il a également été mis en cause dans l'apparition de cancers de l'appareil digestif.

➤ *Normes, interprétation des résultats*

Méthode de référence pour l'analyse : spectroscopie d'émission atomique (NF en ISO 11885).

En réalité, la limite indiquée pour le chrome est très inférieure à la dose toxique, mais il est estimé que l'eau de boisson ne doit pas en contenir car sa présence est un indice de pollution.

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 50 µg/l

➤ *Recommandations, traitements*

Les méthodes les plus utilisées sont la précipitation et l'échange d'ions, cette dernière permettant le recyclage des eaux traitées et la récupération des produits.

2.4.5 Mercure

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

Élément rare de la croûte terrestre, le mercure se rencontre principalement dans les minerais sulfurés. D'origine naturelle, il provient des émanations volcaniques ou de l'érosion des roches par l'eau. Le mercure et ses dérivés sont employés dans diverses activités humaines : exploitation du minerai, utilisation de combustibles fossiles, antifongiques et bactéricides, industrie chimique pour l'électrolyse et la catalyse, peintures, industries de l'électricité et fabriques d'instruments de mesure, industries papetière et pharmaceutique, fabrication des explosifs, incinération des déchets, mise en décharge,...

Le mercure existe sous forme de métal insoluble, de sels monovalents (la plupart insolubles) et bivalents (la plupart solubles) ou de composés organomercuriels, dont le plus important est le méthylmercure.

Sa présence naturelle dans les eaux est de l'ordre de 0,1 µg/l pour les eaux souterraines et de 0,1 à 2 µg/l pour les eaux superficielles. Cependant, à proximité des complexes industriels et des lieux d'exploitation des minerais, sa teneur peut atteindre 80 µg/l.

La nourriture (surtout le poisson et ses préparations) demeure la principale voie d'exposition, en dehors de certaines activités professionnelles. La consommation d'eau, pour une teneur proche de la norme, représente environ le cinquième de l'apport total.

➤ *Effets, nuisances*

Le mercure et ses composés sont toxiques pour l'homme, particulièrement le méthylmercure résultant de la transformation du mercure par les bactéries. Sa présence dans l'eau est préoccupante d'autant que cet élément s'accumule dans les organismes tout au long de la chaîne alimentaire.

Une ingestion quotidienne prolongée d'environ 0,25 mg de méthylmercure chez un adulte provoquerait une dégradation du système nerveux. L'intoxication par le mercure se manifeste principalement par des troubles neurologiques et rénaux associés respectivement aux composés organiques et minéraux. Dans le cas d'intoxications graves, ces symptômes sont irréversibles. Les éléments mercuriels seraient également mutagènes.

Cependant, c'est la forme minérale peu résorbable qui prédomine dans l'eau de boisson et les intoxications sont donc rares.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthode de référence pour l'analyse : spectrométrie d'absorption atomique (NF T 90-131).

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 1 µg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Il faut éliminer ou tout au moins réduire au minimum les rejets de mercure dans l'environnement.

Le mercure étant souvent lié aux particules en suspension, les traitements classiques peuvent conduire à 80% d'élimination :

- Coagulation-floculation-décantation ;
- Filtration sur sable ou adsorption sur le charbon actif en grains ;
- La chloration améliore les procédés précédents.

2.4.6 Nickel

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Le nickel (0,016% de la croûte terrestre) trouve une large gamme d'utilisations dans le domaine industriel (alliages, revêtement, céramique, verre,...). Il sert également de catalyseur et entre dans la composition de certains accumulateurs et de divers fongicides.

Sa présence est surtout liée aux activités humaines. Les concentrations des eaux souterraines sont très souvent faibles. Dans les eaux de surface, les teneurs sont souvent inférieures à quelques dizaines de mg/l. Les concentrations dans l'eau traitée peuvent être parfois significatives du fait de l'utilisation de plomberies nickelées.

L'ingestion quotidienne de nickel à partir de l'alimentation est estimée entre 200 et 900 µg/jour pour un adulte. L'exposition par l'eau ne dépasse pas normalement les 10 à 20 µg/jour. La teneur dans l'air (0,5 µg/m³), l'exposition professionnelle et le tabac sont d'autres voies possibles d'exposition.

➤ ***Effets, nuisances***

La majeure partie n'étant pas résorbée par l'intestin, le nickel, oligo-élément, et ses sels sont relativement peu toxiques par voie digestive. Il ne se révèle pas dangereux aux doses rencontrées habituellement dans les aliments et l'eau.

Il est susceptible de provoquer des corrosions dans les circuits de distribution.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthode de référence pour l'analyse : spectroscopie d'émission atomique (NF en ISO 11885).

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 50 µg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Une filtration en présence de chlore diminue la teneur en nickel de l'eau.

2.4.7 Plomb (8)

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Constituant naturel de l'écorce terrestre, le plomb, largement distribué, se trouve dans de nombreux minéraux, dont le plus important est la galène (sulfure de plomb). Ce métal est employé dans la fabrication des accumulateurs acides, des composés pour l'essence, de la soudure, des pigments, des munitions et pour le gainage des câbles. Les mines et les fonderies de plomb contribuent également à la pollution de l'environnement.

Les eaux de surface peuvent atteindre des concentrations de l'ordre de 600 µg/l. Le plomb est facilement éliminé par certains traitements classiques. Néanmoins, la corrosion des canalisations en plomb peut conduire à des niveaux beaucoup plus élevés. Le contact entre l'eau et les tuyauteries en plomb joue un rôle essentiel sur les teneurs observées en distribution (la saturation est atteinte après plusieurs heures de contact).

L'alimentation (légumes, céréales et fruits) constitue la principale source de plomb ingérée. Quant à l'inhalation de plomb atmosphérique, elle ne participe que relativement peu à la fixation de ce métal dans l'organisme (teneur moyenne dans l'air : 1 µg/m³). La quantité de

plomb d'origine hydrique représente moins de la moitié de l'ingestion totale pour une teneur de 50 µg/l.

Certaines habitudes domestiques constituent d'importantes voies d'exposition notamment pour les jeunes enfants : éclats de peinture (pica), poteries, ustensiles de cuisine,...

➤ ***Effets, nuisances***

Une eau de distribution contenant du plomb conduit à une ingestion de petites quantités mais de façon permanente. Il s'agit typiquement d'un toxique cumulatif. Généralement, 10% du plomb des solutions aqueuses sont résorbés par voie intestinale chez l'adulte (mais peut être supérieur à 50% chez l'enfant de moins de 5 ans). Le plomb résorbé pénètre dans le sang puis est surtout stocké dans le tissu osseux (environ 95% du plomb de l'organisme). La libération progressive du plomb avec le temps provoquera des troubles plus ou moins graves (principaux organes touchés : systèmes nerveux, sang et reins).

L'intoxication (saturnisme) se manifeste par des symptômes difficiles à mesurer : encéphalopathie, retard du développement intellectuel et modification du comportement chez l'enfant ; anémie, troubles digestifs et neurologiques chez l'adulte.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthode de référence pour l'analyse : spectroscopie d'émission atomique (NF en ISO 11885).

Si un prélèvement direct ou après écoulement dépasse fréquemment ou sensiblement la teneur de 100 µg/l, des mesures devront être prises afin de réduire les risques d'exposition du consommateur.

Enfin, il est possible qu'une concentration de 50 µg/l n'apporte pas une marge suffisante de sécurité, en particulier pour le fœtus, le nouveau-né et l'enfant.

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 50 µg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Les traitements classiques (oxydation, coagulation par le sulfate d'alumine, filtration sur charbon actif,...) permettent d'éliminer en grande partie le plomb de l'eau. L'oxydation améliore les précédents procédés.

Des mesures sont aussi envisageables pour limiter le risque de saturnisme hydrique :

- Purge des canalisations avant consommation et après tout séjour prolongé de l'eau ;
- Remplacement des tuyauteries en plomb ou contenant du plomb dans les réseaux de distribution ;
- Mise en place d'un traitement collectif pour combattre l'agressivité de l'eau (élévation du pH au-dessus de 7,5, revêtement protecteur de sels calcaires de sulfate et carbonate dans les conduites, utilisation de phosphates et polyphosphates pour stabiliser l'eau).

2.4.8 Antimoine

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

L'antimoine présente une grande similitude avec l'arsenic mais possède une toxicité moindre. Son utilisation dans les alliages (étain, plomb) permet d'augmenter la dureté de ces derniers. Certains de ses sels sont également employés comme catalyseurs dans l'industrie chimique.

La présence de l'antimoine a été signalée dans l'eau de mer et dans certaines eaux minérales. Il n'est qu'exceptionnellement retrouvé dans les eaux de surface et son origine est alors probablement due aux rejets industriels.

➤ *Effets, nuisances*

L'intoxication aiguë peut s'observer après absorption d'un gramme d'antimoine ; elle se caractérise entre autres par des symptômes intestinaux.

L'intoxication chronique fait apparaître des troubles hématologiques et neurologiques.

➤ *Normes, interprétation des résultats*

Méthode de référence pour l'analyse : spectroscopie d'émission atomique (NF en ISO 11885).

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 10 µg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Il n'existe pas de techniques spécifiques d'élimination de l'antimoine.

2.4.9 Sélénium

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Le sélénium, métalloïde largement répandu dans la nature (1 à 6 mg/kg dans l'écorce terrestre), est employé dans la préparation de colorants, en verrerie, en métallurgie, dans les industries des semi-conducteurs, dans la fabrication des insecticides, le traitement des textiles ainsi que dans la fabrication des cellules photoélectriques.

Le sélénium métalloïde, insoluble, est présent dans l'eau sous forme de sélénites ou de séléniates. La forme chimique dépend du pH et de la présence de sels de certains métaux (comme le fer). Des teneurs en sélénium total de 100 à 200 µg/l ont été mesurées dans certaines rivières, mais la plupart des eaux en contiennent moins de 10 µg/l. Un lessivage des terrains peut être la cause de sa présence dans les eaux superficielles.

Hormis l'exposition professionnelle, où l'air et les contacts épidermiques revêtent une importance particulière, l'alimentation est la voie principale d'exposition. Elle semble conduire à une ingestion de 200 µg/jour (variable suivant les habitudes culinaires et la nature des denrées), l'apport hydrique demeurant très faible.

➤ ***Effets, nuisances***

Le sélénium résorbé se répartit dans tous les organes et tissus, principalement le foie et les reins.

Il est nécessaire à l'homme (protection contre le vieillissement et le cancer).

Cependant, des effets toxiques ont été observés et correspondraient à l'ingestion d'une dose de 700 à 7000 µg/jour pour un adulte. Ils entraînent des caries dentaires et des gingivites, une pâleur de la peau. L'intoxication grave se traduit par des troubles pulmonaires, digestifs, nerveux et cutanés.

➤ ***Normes, interprétation des résultats***

Méthode de référence pour l'analyse : spectroscopie d'émission atomique (NF en ISO 11885).

Norme de potabilité française : concentration inférieure à 10 µg/l

➤ ***Recommandations, traitements***

Les traitements classiques de coagulation-floculation-décantation-filtration-oxydation et l'utilisation du charbon actif permettent une bonne élimination.

2.4.10 Hydrocarbures polycycliques aromatiques (HPA)

➤ ***Nature, origine des contaminations, voies d'exposition***

Les HPA sont des composés organiques largement retrouvés dans l'environnement. La plupart d'entre eux résultent des activités humaines, liées en particulier à l'industrie pétrolière et à la combustion incomplète d'hydrocarbures dans les foyers domestiques (fioul de chauffage) ou dans les moteurs à combustion (essence). Cependant, ils peuvent également avoir une origine naturelle et être synthétisés par quelques bactéries, algues et végétaux supérieurs.

Bien que peu hydrosolubles, les HPA peuvent être présents dans l'eau car ils se fixent fortement sur les matières particulaires et les argiles.

En pratique, il est impossible de distinguer séparément tous les HPA. Aussi, il a été proposé (OMS) de choisir des indicateurs représentatifs de l'ensemble des HPA et facilement identifiables.

Six indicateurs ont été retenus :

- Le fluoranthène ;
- Le benzo (3,4) fluoranthène ;
- Le benzo (11,12) fluoranthène ;
- Le benzo (3,4) pyrène ;
- Le benzo (1,12) pérylène ;
- L'indéno (1,2,3-cd) pyrène ;

Leur concentration varie de 0,01 à 0,05 µg/l dans les eaux souterraines et de 0,05 à 0,25 µg/l dans les cours d'eau relativement peu pollués ; elle atteint des teneurs plus importantes dans

les cours d'eau pollués et les effluents. La dose dans l'eau de boisson est en général inférieure à 0,05 µg/l.

Dans certains cas, le revêtement interne à base de goudron des canalisations des réseaux peut engendrer une augmentation des teneurs en HPA dans l'eau de distribution.

L'exposition humaine dépend surtout des aliments, accessoirement de l'air et de l'eau. En effet, il est estimé que la part de l'eau correspond à 0,1% de l'ingestion totale, la part de l'air à 0,9% et celle des aliments aux 99% restants.

➤ *Effets, nuisances*

Les HPA franchissent facilement les parois intestinales et pulmonaires pour s'accumuler dans les graisses.

Ils sont fortement suspectés d'être cancérigènes (notamment le benzo (3,4) pyrène) et d'induire des cancers de la peau ; peu d'informations existent sur les HPA quant à leurs différentes formes de toxicité. Par ailleurs, l'exposition simultanée à plusieurs HPA pourrait augmenter le pouvoir cancérigène de chaque composé pris individuellement.

➤ *Normes, interprétation des résultats*

Méthode de référence pour l'analyse : dosage par chromatographie liquide haute performance (NF T 90-115).

La norme globale repose sur le principe que l'eau de boisson doit avoir une qualité comparable à celle des eaux souterraines non polluées.

Norme française : concentration inférieure à 0,2 µg/l pour le total des 6 indicateurs, et inférieure à 0,01 µg/l pour le benzo (3,4) pyrène.

➤ *Recommandations, traitements*

Les HPA étant associés aux matières en suspension, ils sont relativement bien éliminés par les traitements classiques (floculation, filtration, adsorption sur charbon actif, oxydation par le chlore ou l'ozone).

Il faut supprimer l'emploi des revêtements intérieurs en goudron dans les réseaux de distribution.

2.5 PESTICIDES ET PRODUITS APPARENTES (9)

➤ *Nature, origine des contaminations, voies d'exposition*

Les pesticides ou produits phytosanitaires désignent des substances chimiques ou leurs dérivés utilisés pour lutter contre les organismes animaux ou végétaux considérés comme nuisibles pour les végétaux. Leurs usages (herbicides, fongicides, insecticides,...) sont très larges. On peut les classer en fonction de leurs caractéristiques chimiques et l'on distingue alors les principales familles :

- Composés organochlorés employés comme insecticides et herbicides : DDT, lindane (HCH), dieldrine, aldrine,... ;
- Composés organophosphorés employés comme insecticides : parathion, malathion,... ;
- Composés organométalliques employés comme fongicides et insecticides : carbamates, dithiocarbamates,... ;
- Composés organoazotés employés comme herbicides : triazines (atrazine, simazine) ;
- Pyréthrinoïdes de synthèse employés comme insecticides ;
- Substances minérales : soufre, sulfate de cuivre, arséniate de calcium et de plomb.

Les pesticides sont employés en agriculture (traitement par épandage ou pulvérisation), dans les industries (textiles et bois), dans les constructions, pour le désherbage (voies de communication par exemple), pour la désinfection. En France, près de 100 000 tonnes de pesticides sont utilisés chaque année. Les herbicides, fongicides, insecticides représentent plus de 90% des ventes.

La pollution des eaux par ces produits est liée à leur entraînement par ruissellement (contamination des eaux de surface) ou par infiltration (contamination des eaux souterraines) qui peut être favorisée par l'usage concomitant de produits « mouillants ». Cette pollution est généralement provoquée par leurs utilisations pré-citées ainsi que par les usages domestiques et les déversements d'industries de fabrication et de conditionnement. L'emploi accru des herbicides pour lutter contre la végétation dans les eaux de surface contribue également à l'apparition de teneurs non négligeables.

Les facteurs influant sur le transfert des pesticides jusqu'au milieu hydrique naturel sont leur solubilité dans l'eau, leur résistance à la dégradation physique et biochimique, la nature du sol, le volume et l'intensité des pluies.

Les teneurs en pesticides des eaux étant susceptibles de fluctuer largement, il est difficile d'évaluer des concentrations moyennes. Dans certains cas, les doses rencontrées sont bien supérieures aux valeurs limites.

Les concentrations habituellement trouvées dans l'eau ne représentent qu'une partie de l'apport quotidien total, issu pour l'essentiel des aliments. En effet, la persistance de ces produits étant très variable dans l'environnement, les plus stables sont susceptibles de s'accumuler tout au long des chaînes alimentaires.

➤ *Effets, nuisances*

La toxicité des pesticides n'est pas la même selon leur nature et leur formule chimique. Dans l'ensemble, les produits organochlorés ont une toxicité chronique plus importante que les produits organophosphorés.

Les pesticides peuvent être responsables d'intoxications aiguës, liées à une absorption accidentelle, se manifestant par divers troubles (nerveux, digestifs, cardio-vasculaires, musculaires).

En présence de teneurs élevées dans l'eau, les pesticides organochlorés sont stockés dans les graisses (tissus adipeux), et peuvent entraîner des effets toxiques chroniques notamment au niveau du système nerveux central (cas de l'aldrine et du dieldrine) et du foie, voire pour certains des effets cancérogènes (cas de l'hexachlorobenzène).

Par ailleurs, les pesticides peuvent générer des nuisances organoleptiques (odeur, saveur), avec des seuils de détection allant de 0,1 à 1000 µg/l suivants les produits.

L'atrazine est considérée comme un bon indicateur de la présence d'autres produits chimiques dans les eaux.

➤ *Normes, interprétation des résultats*

Méthode de référence pour l'analyse : chromatographie en phase liquide haute performance, après extraction par des solvants appropriés et purification (NF en ISO 11369).

Norme française : pour les insecticides organochlorés persistants, organophosphorés et carbamates, les herbicides, les fongicides, les PCB et PCT, les valeurs des concentrations doivent être inférieures ou égales aux valeurs ci-après :

Par substance (sauf pour les substances ci-dessous) : 0,1 µg/l

Aldrine et dieldrine : 0,03 µg/l

Heptachlorure et époxyde d'heptachlorure : 0,03 µg/l

Pour le total des substances mesurées : 0,5 µg/l

➤ *Recommandations, traitements*

La prévention passe par la sensibilisation du public. Cette action doit particulièrement s'adresser au monde agricole et aux agents d'entretien des voies de communication.

Une attention particulière doit être portée à l'usage de ces produits en amont des ressources en eau destinées à la consommation humaine, notamment dans les périmètres de protection.

Le traitement classique seul (floculation-décantation-filtration) est inefficace pour l'ensemble des pesticides (sauf DDT).

Élimination par oxydation :

Chlore, dioxyde de chlore et permanganate de potassium : ne sont pas suffisamment efficaces ;

Ozone : détruit certains produits chlorés.

Élimination par adsorption :

Charbon actif en poudre et en grains : en fonction des quantités utilisées, ils permettent d'obtenir des rendements d'élimination de l'ordre de 90%.

2.6 PARAMETRES MICROBIOLOGIQUES

Il est théoriquement, techniquement et financièrement impossible de contrôler dans l'eau de boisson tous les micro-organismes pathogènes susceptibles d'engendrer des infections d'origine hydrique.

En effet :

La recherche de tous les germes pathogènes n'est pas concevable, car d'une part certains d'entre eux ne sont pas identifiables dans la pratique courante des laboratoires et d'autre part, tous ne sont pas encore connus ;

Les germes pathogènes sont, en général, présents irrégulièrement dans les eaux de consommation. Or, il est impossible de les rechercher de façon continue ;

Les délais d'obtention des résultats d'analyse seraient dans un tel cas beaucoup trop longs, pour permettre un contrôle efficace de la qualité de l'eau et donc une protection satisfaisante des consommateurs.

On doit donc s'efforcer de trouver des « indicateurs » qui révèlent la présence possible de germes pathogènes ou, encore mieux, leur absence.

Les germes pathogènes retrouvés dans l'eau sont en pratique toujours d'origine fécale. Or, il existe également des germes intestinaux, en principe non pathogènes, présents dans les déjections de l'homme et des animaux à sang chaud.

En conséquence, on cherchera à identifier ces micro-organismes non pathogènes, qui sont plus faciles, plus rapides et plus économiques à mettre en évidence. De tels micro-organismes sont dits « indicateurs » ou « germes tests ». Ceux-ci constituent un indice d'une pollution microbienne de l'eau et induisent une augmentation du risque de pathologies gastro-intestinales.

La détection de tels microbes permettra de conclure à une pollution d'origine fécale. Dans ce cas, l'eau sera déclarée non potable. La suspicion de contamination par des germes pathogènes donnera lieu à une recherche plus approfondie.

Par ailleurs, l'absence de germes indicateurs ne signifie pas obligatoirement que l'eau est exempte de micro-organismes pathogènes. On conclura seulement que l'échantillon prélevé n'est pas pollué par les germes habituellement recherchés et, de ce fait, que l'eau ne présente pas de risques microbiologiques particuliers pour la santé humaine.

Toutefois, les germes tests ne se comportent pas toujours de manière identique aux germes pathogènes. Par exemple, certains de ces derniers peuvent s'avérer résistants à un traitement jugé adéquate vis-à-vis des germes tests.

2.6.1 Coliformes totaux

Les bactéries coliformes existent dans les matières fécales mais se développent également dans les milieux naturels (sol, végétation, eaux naturelles). Les eaux traitées ne doivent pas contenir de coliformes. Cependant, l'absence de ces derniers ne signifie pas nécessairement que l'eau ne présente pas un risque pathogène car les kystes de certains parasites, notamment, sont plus résistants à la désinfection que les coliformes.

La présence d'un petit nombre de coliformes (1 à 10/100 ml) dans les eaux souterraines non traitées n'a qu'une signification réduite sur le plan sanitaire, lorsqu'elle ne s'accompagne pas de coliformes fécaux.

Norme de potabilité française : 95% au moins des échantillons ne doivent pas contenir de coliformes dans 100 ml d'eau (NF en ISO 9308-1 : méthode par filtration sur membrane).

2.6.2 Coliformes fécaux ou thermotolérants

Ces coliformes sont capables de se développer à 44°C alors qu'aucune croissance n'est observée à cette température pour les souches non fécales.

La principale bactérie coliforme spécifiquement d'origine fécale est *Escherichia coli* (*E.coli*). Celle-ci apparaît toujours en grande quantité dans les déjections humaines et animales et ne se trouve qu'exceptionnellement dans les sols et les eaux qui n'ont pas été l'objet d'une pollution fécale.

Les coliformes fécaux ou thermotolérants constituent un bon test de contamination des eaux par les matières fécales.

Norme de potabilité française : l'eau ne doit pas en contenir dans 100 ml d'eau (NF T 90-413 : méthode par ensemencement en milieu liquide).

2.6.3 Streptocoques fécaux

Ce sont les hôtes normaux de l'intestin de l'homme et des animaux à sang chaud ; ce groupe n'est généralement pas considéré comme pathogène.

Les streptocoques fécaux (groupe D) constituent, associés aux coliformes fécaux, un bon indice de contamination fécale.

Norme de potabilité française : l'eau ne doit pas en contenir dans 100 ml d'eau (NF T 90-411 : méthode par ensemencement en milieu liquide).

2.6.4 Spores de bactéries sulfite-réductrices

Ce sont des formes de résistance d'organismes anaérobies, dont les plus fréquentes et les plus faciles à mettre en évidence sont les clostridies. Elles sont normalement présentes dans les matières fécales mais en plus petite quantité que *E.coli*. Elles sont également présentes dans le sol et les rivières. Leur absence dans une nappe souterraine ou une nappe alluviale est un signe d'efficacité de la filtration naturelle. De même, l'absence de spores après un traitement de filtration sur sable est un signe de son efficacité.

Leur présence en l'absence de germes fécaux dans les eaux peut être interprétée de deux manières ; si elle est constante, il faut les considérer comme des germes habituels de la nappe,

bien que le cas soit rare. Par contre, la nappe n'est pas totalement protégée contre la présence d'une flore bactérienne étrangère si elles sont observées irrégulièrement.

Leur persistance dans les eaux désinfectées peut être le signe de défauts dans les traitements physico-chimiques, d'un manque d'efficacité de certains désinfectants ou d'une filtration insuffisante.

Du fait de leur similitude de comportement avec les parasites, les spores constituent un bon indicateur pour ces micro-organismes. En outre, ces formes résistent à la chloration. Ceci explique que, pour ce paramètre particulier, ce ne sont pas les bactéries elles-mêmes mais leurs spores qui sont recherchées.

Norme de potabilité française : l'eau ne doit pas contenir plus d'une spore de bactéries anaérobies sulfito-réductrices par 20 ml d'eau (NF T 90-415 : méthode par incorporation en gélose en tubes profonds).

2.6.5 Germes totaux

La recherche des micro-organismes bactériens aérobies dits « revivifiables » permet de dénombrer les bactéries se développant dans des conditions habituelles de culture et représente la teneur moyenne en bactéries d'une ressource naturelle. Ces germes n'ont pas d'effets directs sur la santé mais, sous certaines conditions, ils peuvent générer des problèmes dans les systèmes de dialyse. Ce paramètre permet de mesurer les conditions sanitaires de la distribution (stagnation de l'eau, entretien déficient, présence de nutriments,...) et du résiduel de désinfection. Une concentration en germes totaux trop importante peut entraîner des problèmes d'ordre organoleptique. Une faible valeur est le témoin de l'efficacité du traitement et de l'intégrité du système de distribution.

Les déterminations sont réalisées au niveau du traitement et dans les réseaux de distribution.

Méthode de référence pour l'analyse : calcul du nombre de germes par ml d'eau :

- Germes totaux à 22°C : comptage des colonies obtenues après incubation à 22°C durant 72 heures en gélose (Norme de potabilité française : l'eau ne doit pas en contenir dans 100 ml d'eau NF en ISO 6222 : ensemencement en milieu de culture nutritif gélosé).

- Germes totaux à 37°C : comptage des colonies obtenues après incubation à 37°C durant 24 heures en gélose (Norme de potabilité française : dénombrement inférieur à 20 par ml d'eau - NF en ISO 6222 : ensemencement en milieu de culture nutritif gélosé).

2.6.6 Micro-organismes pathogènes

Le réservoir majeur des bactéries responsables des maladies transmises par l'eau demeure l'appareil digestif de l'homme et des animaux à sang chaud. Ainsi, les matières fécales contiennent une grande diversité d'organismes pathogènes (bactéries, parasites et virus) qui peuvent entraîner des maladies microbiennes et contaminer des porteurs sains.

Les contaminations fécales affectent le plus souvent la ressource en eau elle-même, moins fréquemment le réseau. Elles se manifestent notamment lorsque le traitement de désinfection est déficient.

Les germes pathogènes peuvent être responsables d'infections sans gravité (gastro-entérite bénigne, diarrhée) ou d'infections graves voire fatales (choléra, typhoïde,...). Certaines bactéries dites « opportunistes », normalement présentes chez l'homme, peuvent infecter des personnes immuno-déprimées.

Les bactéries pathogènes se transmettent en particulier par ingestion d'eau ou de nourriture souillées, par contact avec des personnes ou animaux infectés et par exposition aux aérosols. La transmission hydrique influe de façon très variable sur la propagation des infections intestinales d'origines bactériennes en fonction des germes (nombre, virulence) et des conditions locales.

Si les conditions d'hygiène, le contrôle sanitaire, les traitements médicaux et les vaccinations dans les pays occidentaux ont entraîné une diminution du nombre de cas de maladies bactériennes d'origine hydrique, les infections d'origines virales et parasitaires demeurent encore fréquentes.

➤ *Salmonelles*

Elles sont responsables d'une multitude de syndromes (fièvres typhoïdes et paratyphoïdes, salmonelloses,...). Fréquemment responsables d'intoxications alimentaires, elles sont aussi présentes dans les eaux.

Norme de potabilité française : absence dans 5 litres d'eau.

➤ *Staphylocoques pathogènes*

Ces germes sont à l'origine d'une très large variété d'infections (cutanées, impétigo, septicémie, endocardite, ostéomyélite,...).

Ils ne présentent pas d'intérêt vis-à-vis de l'évaluation de la qualité des eaux d'alimentation.
Norme de potabilité française : absence dans 100 ml d'eau (NF T 90-421).

➤ ***Entérovirus***

Abondamment excrétés avec les matières fécales, ils risquent de contaminer les eaux d'alimentation. Les principaux entérovirus sont les poliovirus, responsables de la poliomyélite, les virus Coxsackie et les Echovirus. Dans l'ensemble, ils peuvent induire un large éventail de syndromes dont des éruptions cutanées, de la fièvre, des gastro-entérites, des myocardites, des méningites, des affections respiratoires et des hépatites.

Norme de potabilité française : absence dans 10 litres d'eau (XP T 90-451 : méthode par concentration sur laine de verre et détection par culture cellulaire).

➤ ***Bactériophages fécaux***

Ces virus sont spécifiques des bactéries fécales qui leur correspondent. Egalement actifs sur les agents responsables d'infections, on les retrouve dans les eaux souillées par des matières fécales. Ils constituent donc un bon indice de ces contaminations.

Leur présence peut signaler une contamination ancienne ou intermittente. Leur isolement à partir d'une eau de nappe souterraine constitue un indice précurseur d'une pollution fécale ; grâce à leur résistance aux traitements chlorés, ils peuvent être détectés dans un réseau et être les seuls témoins d'une contamination antérieure.

Ils ne sont pas vraiment considérés comme germes pathogènes.

Norme de potabilité française : absence dans 50 ml d'eau.

2.6.7 Autres organismes pathogènes

➤ ***Algues***

Elles jouent un rôle positif pour l'équilibre des biotopes aquatiques, en assurant entre autre l'oxygénation de l'eau par photosynthèse. Inversement, leur prolifération va entraîner des nuisances pour l'eau potable. Pratiquement absentes en hiver, les algues peuvent connaître un développement important l'été.

Sur le plan sanitaire, elles ne présentent pas un grand intérêt si ce n'est qu'elles peuvent abriter des germes pathogènes et les protéger d'une éventuelle désinfection.

Les principales algues toxiques pour l'homme sont les algues bleues qui excrètent des toxines responsables d'allergies cutanées et respiratoires, de nausées, de gastro-entérites ou de dysenteries.

Par ailleurs, elles peuvent gêner les installations de filtration en provoquant le colmatage des filtres. Plus généralement, les algues peuvent induire des problèmes d'ordre organoleptiques.

➤ *Parasites*

Les principaux sont les protozoaires et les helminthes (vers).

Les protozoaires (dont les amibes) intestinaux pathogènes pour l'homme sont responsables de certaines dysenteries, de gastro-entérites. Leurs kystes sont parmi les formes les plus résistantes aux traitements d'eau potable.

Les helminthes qui peuvent contaminer les eaux d'alimentation sont nombreux. L'un des plus connus est responsable de la bilharziose, maladie grave à localisation urinaire, digestive ou artério-veineuse, fréquente dans les pays en voie de développement. Ces vers et leurs œufs ne sont pas détruits par la désinfection mais sont facilement éliminés par filtration.

Le zooplancton qui comprend les parasites précédemment cités concerne également des formes de crustacés, de mollusques,...

La réglementation française et la directive CEE indiquent que les eaux destinées à la consommation humaine ne doivent pas contenir d'organismes parasites, d'algues et autres éléments figurés (animalcules).

3. LA QUALITE DE L'EAU POTABLE A NANTES

3.1 RESULTATS DES ANALYSES

Toutes les analyses sont effectuées par l'institut départemental d'hygiène et de conseil (IDAC) et concernent (tous les résultats sont regroupés en Annexes 1 et 2) :

- L'eau brute de la Loire à Mauves pour la ressource ;
- L'eau traitée en sortie d'usine pour la production ;
- L'eau distribuée dans le réseau pour laquelle les prélèvements sont effectués à des points fixes en moyenne 1 fois tous les 2 mois (liste des points fixes : Annexe 1).

Pour les années 2001-2002 et 2002-2003, le programme officiel de surveillance analytique annuel organisé par la DDASS de Loire-Atlantique était le suivant :

	Nombre de prélèvements	Programme d'analyses (Annexe 3)
Ressource	52	12 B1 C3 C4abcd + 40 B3 C2 + Matières en suspension
Production	422	254 B3 + 12 C3 C4c + 156 C2
Distribution	916	916 B2 C1 + Fer

Tableau IV : Programme annuel de surveillance analytique

Les taux de conformité des analyses par rapport aux normes de potabilité françaises figurent dans les tableaux suivants :

Taux de conformité des analyses (nombre d'analyses)	Production	Distribution
Paramètres microbiologiques	100% (1116)	99,9% (3305)
Paramètres physico-chimiques	100% (736)	99,9% (3459)
Paramètres chimiques indésirables	100% (783)	99,8% (1715)
Paramètres phyto-sanitaires	Pas de donnée	100% (88)

Tableau V : Bilan de conformité des analyses aux normes de potabilité durant l'année 2001

Taux de conformité des analyses (nombre d'analyses)	Production	Distribution
Paramètres microbiologiques	100% (892)	99,5% (2846)
Paramètres physico-chimiques	100% (672)	99,9% (5435)
Paramètres chimiques indésirables	100% (710)	99,2% (957)
Paramètres phyto-sanitaires	100% (41)	Pas de donnée

Tableau VI : Bilan de conformité des analyses aux normes de potabilité durant l'année 2002

3.2 ANALYSE DES RESULTATS

- L'eau produite durant la période 2001-2003 est d'excellente qualité au regard de la législation française.
- Hormis une « légère contamination ponctuelle mise en évidence et non confirmée par les prélèvements de contrôle » (« le secteur a été purgé et la désinfection augmentée temporairement par mesure de précaution »-Annexes 1 et 2), l'eau distribuée durant la même période est de qualité satisfaisante.
- Dureté : Elle est liée à la présence de calcium et de magnésium dans l'eau. Pour tenir compte à la fois de l'intérêt de la consommation d'une eau dure (eau calcaire) pour la santé et des inconvénients liés à l'entartrage, il est admis qu'une dureté comprise entre 10°F et 20°F est idéale. La dureté moyenne de l'eau produite et distribuée est bien dans cette gamme en 2002 (production : 15°F et distribution : 18°F).
- Teneur en fluor en 2002 : Entre 0,5 et 1,5 mg/l, le fluor est bénéfique pour la prévention des caries dentaires. En dessous de 0,5 mg/l, comme c'est le cas de l'eau distribuée par l'usine de Nantes, il est utile d'effectuer un apport complémentaire (comprimés, sel, dentifrice).
- Teneur en plomb en 2002 : Il n'existe plus de canalisations de distribution en plomb. Quelques branchements existent encore mais sont en cours de rénovation. L'eau distribuée

n'étant pas agressive (pH=8 et dureté satisfaisante), elle ne favorise pas la dissolution des sels de plomb dans les canalisations privées en plomb encore présentes.

- Teneur en pesticides en 2002 : Elle est très faible et toujours inférieure aux normes de potabilité françaises.

- Teneur en nitrates en 2002 : La norme de 50 mg/l n'est jamais dépassée (teneur moyenne en production : 15,2 mg/l, teneur moyenne en distribution : 16 mg/l). L'eau est donc propre à la consommation, y compris pour les nourrissons et les femmes enceintes.

4. CONCLUSION

L'eau produite à l'usine de La Roche, et distribuée dans la communauté urbaine de Nantes, est conforme aux normes de potabilité fixées par la législation française, sauf en cas de pollution(s) accidentelle(s) dans le réseau de distribution. Sur la communauté urbaine, ces accidents restent exceptionnels avec pourtant un réseau de distribution comptant plus de 1300 km de canalisations et 69 000 branchements d'abonnés.

Toutefois, ce bilan ne présente pas de garantie concernant le risque de contamination virale et parasitaire des eaux traitées. En effet, aucune méthode de référence spécifique de ces paramètres n'existe actuellement (22).

Enfin, une nouvelle législation concernant les limites de qualité des eaux entre en vigueur le 25 décembre 2003, suite à la directive européenne du 3 novembre 1998 (16). Celle-ci traduit un renforcement du principe de précaution en matière de qualité de l'eau et de santé publique. Le nombre de paramètres diminue de 63 à 48 : Les législateurs se sont focalisés sur les éléments susceptibles de présenter des risques pour la santé à court, moyen et long terme, pour établir des normes impératives, les « limites de qualité ». Les principales évolutions sont les suivantes (Annexe 10) :

- On retrouve tous les paramètres toxiques ; 4 normes sont même plus sévères (plomb, arsenic, nickel et antimoine). Les normes du plomb et de l'arsenic passent de 50 à 10µg/l. Cette révision de la norme relative au plomb (même si la norme actuelle est suffisante pour protéger la santé) augmente la marge de sécurité sur la santé à long terme. Cela risque d'entraîner un surcoût pour les consommateurs qui devront payer le changement ou les réparations de leurs installations intérieures défectueuses.

- Les normes microbiologiques sont limitées à 2 paramètres (*Escherichia coli* et entérocoques) mais ceux-ci sont des germes « indicateurs » de contamination bactérienne

fécale de l'eau plus spécifiques (22). On note encore l'absence de paramètre de contrôle viral et parasitaire.

- De nouveaux paramètres apparaissent, notamment :

- Des « indicateurs » de radioactivité (dose radioactive totale et tritium)
- Des sous-produits de désinfection : bromates, THM, chlorites, tous suspectés d'être cancérogènes, également dosage du chlore libre et total responsables d'odeur et de saveur désagréables.

- La qualité de l'eau devra être contrôlée au robinet du consommateur et non plus seulement dans les installations de production et le réseau public de distribution.

- La norme de turbidité est plus sévère : Elle passe de 2 UJ en distribution à 1 UJ et devra respecter la valeur de 2 UJ au robinet du consommateur. Cela impliquera une vigilance accrue en production et en distribution car une turbidité faible est toujours un indice du bon fonctionnement des installations de production et aussi une garantie du bon état du réseau de distribution.

- Comme pour la turbidité, des nouveaux paramètres et des anciens deviennent « indicateurs » de bons procédés de traitement. Ceux-ci n'ont pas de caractère impératif mais sont garants du bon fonctionnement des installations de production.

GESTION ET PRIX DE L'EAU

1. GESTION DES EAUX : LES AGENCES DE L'EAU (1)

1.1 ORIGINE ET RÔLES

Créées pour mettre en œuvre le principe défini dans la loi sur l'eau de 1964 réaménagée par celle du 3 janvier 1992 (« le pollueur est le payeur »), elles sont six en France : une par bassin hydrographique.

Ce sont des organismes financiers destinés à percevoir des redevances et éventuellement des amendes prélevées auprès des utilisateurs de l'eau qui la polluent peu ou prou : industries, agriculteurs et simples particuliers et d'en reverser le montant sous forme d'aides financières à toute opération de dépollution ou de sauvegarde de la qualité des eaux.

Chacune d'entre elles constitue un établissement public de l'Etat, placée sous la tutelle du ministère de l'environnement.

Chaque agence comprend un comité de bassin, un conseil d'administration et un exécutif.

Nous prendrons comme exemple l'agence de l'eau Loire-Bretagne*.

1.2 PRESENTATION DU BASSIN LOIRE-BRETAGNE (20)

10 régions, 31 départements concernés, 7283 communes, 11,5 millions d'habitants.

155 000 km², soit 28% du territoire national métropolitain, correspondant au bassin de la Loire et de ses affluents, au bassin de la Vilaine, et aux bassins côtiers bretons et vendéens.

Environ 2000 km de côtes, soit 40% de la façade maritime du pays.

Un réseau hydrographique codifié de 135 000 km très contrasté (peu d'eau souterraine sous les massifs anciens et des réserves importantes en plaine, mais parfois trop sollicitées).

Un territoire à l'empreinte rurale marquée : la densité moyenne est de 75 h/km² et si le bassin comprend 20 villes de plus de 50 000 habitants, plus de 2700 communes comptent, elles, moins de 400 habitants.

*Coordonnées : Agence de l'eau Loire-Bretagne, avenue Buffon, BP 6939, 45 063 Orléans cédex 02 (tél. : 02.38.51.73.73)

Les deux tiers des activités d'élevage français (la moitié dans les seuls départements bretons) ; la moitié des productions céréalières (régions du Centre et du Poitou-Charentes surtout).

20% de la production industrielle nationale.

Région de pêche et de conchyliculture (50% de l'activité française), de tourisme.

1.3 STRUCTURE

1.3.1 Le comité de bassin

C'est le « parlement de l'eau », constitué de trois collèges (représentants des usagers, élus locaux et représentants de l'Etat) élus ou nommés pour 6 ans :

8 représentants des régions, 29 représentants des départements, 12 représentants des communes,

49 représentants des usagers,

23 représentants de l'Etat et 8 personnalités désignées par les conseils économiques et sociaux des régions,

1 président élu au sein du comité.

Il est consulté sur les grandes options de la politique de l'eau dans le bassin :

Il approuve les programmes d'intervention de l'agence l'eau,

Il donne son avis conforme pour que les décisions du conseil d'administration relatives à la fixation des redevances soient applicables,

Il suit l'exécution du plan Loire grandeur nature pour ses volets relatifs à l'eau,

Il met en œuvre, dans le bassin Loire-Bretagne, la directive cadre pour une politique communautaire de l'eau,

Il élabore le schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux, le SADGE, du bassin Loire-Bretagne, et il en suit la mise en œuvre.

1.3.2 Le conseil d'administration

Emanation directe du comité de bassin, le conseil d'administration est l'organe décisionnel de l'agence de l'eau. Il élabore le programme d'intervention en tenant compte des problèmes de gestion des eaux dans le bassin, des objectifs de qualité, des besoins quantitatifs

et qualitatifs des usagers de l'eau et du milieu naturel, mais aussi des capacités financières des partenaires.

En outre, le conseil d'administration :

Définit les redevances nécessaires au financement des programmes,

Définit les règles et modes d'attribution des aides,

Attribue les participations financières de l'agence.

Il est composé de 35 membres nommés ou élus pour 6 ans :

11 représentants des collectivités locales élus parmi les membres du comité de bassin,

11 représentants des usagers élus parmi les membres du comité de bassin,

11 représentants de l'Etat,

1 représentant du personnel de l'agence de l'eau,

1 président nommé pour 3 ans par arrêté du Premier Ministre.

1.3.3 Exécutif

Il est composé d'un directeur, nommé par arrêté du Premier Ministre.

En 2002, l'effectif de l'agence était de 300 personnes dont une centaine réparties dans les six délégations de l'agence (Nantes, Saint-Brieuc, Orléans, Le Mans, Poitiers et Clermont-Ferrand), chargées de promouvoir directement la politique de l'agence sur le terrain et de la représenter auprès de ses interlocuteurs.

1.4 RESSOURCES

Elles sont de deux natures, l'une au titre des ressources en eau, l'autre au titre de la pollution.

1.4.1 La redevance « prélèvement »

Elle est fonction des volumes prélevés, pondérée par un coefficient d'usage et modulée géographiquement selon la sensibilité des ressources en eau.

En 2001, elle représente 50,34 millions d'euros pour un volume d'eau prélevé de 3,91 milliards de m³.

Les prélèvements les plus importants sont effectués par EDF pour le refroidissement des centrales thermiques, notamment la centrale de Cordemais sur l'estuaire de la Loire et celle de Chinon.

Le volume annuel prélevé est en diminution de 8% par rapport à l'année précédente, variation due essentiellement à la baisse des prélèvements d'EDF (-10%) et des irrigants (-18%).

1.4.2 Les redevances de pollution

➤ *Redevance de pollution domestique*

Elle concerne les communes de plus de 400 habitants « agglomérés » permanents et saisonniers. Elle est calculée sur la base de la quantité, fixée forfaitairement, de pollution produite quotidiennement par habitant, et en fonction du nombre d'habitants « agglomérés ».

En 2001, 2930 communes ont été concernées, soit un total de 10 056 462 habitants.

Cette redevance est répercutée sur la facture d'eau sous la forme d'une « contre-valeur ». En 2001, la contre-valeur moyenne est de 0,315 euro/m³, en augmentation de 3% par rapport à 2000.

Le montant global de la redevance 2001 s'élève à 161,44 millions d'euros.

➤ *Redevance de pollution des industries (2575 établissements industriels redevables)*

Elle est assise sur les déversements d'eaux usées dans le milieu naturel ou les réseaux d'assainissement publics.

La redevance nette est la contraction entre une redevance brute (correspondant à la pollution produite) et une prime pour épuration (correspondant à la pollution éliminée par les stations d'épuration des industries). Son montant, en 2001, est de 22,4 millions d'euros. Les plus gros contributeurs sont :

Abattoirs	15%
Conserverie de produits animaux	13%
Traitement de surface	12%
Industrie laitière	10%

➤ *Redevance de pollution des élevages*

Les élevages sont intégrés progressivement dans le système « aides/redevances » des agences selon un calendrier déterminé nationalement dans le cadre du programme de maîtrise des pollutions d'origine agricole (PMPOA).

Ainsi, les redevances des éleveurs intégrables en 1994 et 1995 ne sont établies qu'à compter de l'année d'activités 1999, dès lors qu'ils se sont engagés dans la maîtrise des pollutions dues à leurs activités ; en revanche s'ils n'ont pas intégré le PMPOA dans les délais impartis, la redevance est établie dès l'année d'intégration prévue par le calendrier national.

En 2001, son montant était de 2,81 millions d'euros dont :

- 0,39 million pour les éleveurs intégrables entre 1994 et 1998 n'ayant pas intégré le PMPOA dans les délais impartis
- 2,42 millions pour 1957 éleveurs redevables.

1.5 AIDES ACCORDEES

1.5.1 Le cadre de l'action

La loi sur l'eau du 3 janvier 1992 a instauré les schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) pour chacun des six grands bassins hydrographiques.

Elaboré par le comité de bassin à partir de 1992, et approuvé par l'Etat, le SDAGE Loire-Bretagne est entré en application fin 1996 pour une durée de dix ans environ.

Le socle du SDAGE Loire-Bretagne est constitué de 7 objectifs vitaux autour desquels sont articulés des préconisations générales et locales qui s'imposent aux décisions publiques. Il fixe ainsi les grandes orientations de la politique de gestion de l'eau à dix ou quinze ans.

Les objectifs vitaux sont les suivants :

- Gagner la bataille de l'alimentation en eau potable,
- Poursuivre l'amélioration de la qualité des eaux de surface,
- Retrouver des rivières vivantes et mieux les gérer,
- Sauvegarder et mettre en valeur les zones humides,
- Préserver et restaurer les écosystèmes littoraux,
- Réussir la concertation notamment avec l'agriculture,
- Savoir mieux vivre avec les crues.

Les prochains SDAGE seront désormais révisés et adoptés en 2009.

La mise en œuvre des SDAGE se décline essentiellement dans les SAGE, schémas d'aménagement et de gestion des eaux d'initiative locale (Annexe 8).

Objectifs	Montants des travaux (en millions d'euros)	Montants d'aides
1 - Améliorer la collecte et le traitement des eaux usées domestiques	2353	924
2 - Poursuivre la dépollution des rejets industriels	301	162
3 - Lutter contre les pollutions d'origine agricole	766	233
4 - Améliorer la qualité des eaux destinées à l'alimentation en eau potable	481	113
5 - Améliorer la gestion de la ressource en eau	298	120
6 - Entretien et réhabiliter les milieux aquatiques	103	37
TOTAL	4302	1589

*Tableau VII : Les financements mobilisés par l'agence pour la période 1997-2002
(Agence de l'eau Loire-Bretagne)*

Fin 2001, 32 SAGE sont lancés en Loire-Bretagne ; ils couvrent près de la moitié du bassin. L'engagement de l'agence de l'eau pour l'élaboration des SAGE se concrétise par la mise en place de financements pour la réalisation d'études et le fonctionnement des structures d'animation.

1.5.2 Les aides

(montants exprimés en millions d'euros)	Décisions d'engagement	Montant des travaux aidés
Pour la lutte contre la pollution	-	-
Station d'épuration des collectivités	90	219,1
Réseaux d'assainissement	27,6	127,6
Primes pour épuration	29,5	-
Aide au bon fonctionnement	1,4	-
Dépollution dans l'industrie	23,8	43,6
Élimination des déchets	1	2,7
Assistance technique et auto-surveillance	2,1	6,5
Dépollution dans l'agriculture	19,1	60,5
Sous total	194,5	460
Pour la gestion des ressources en eau	-	-
Gestion des eaux superficielles	2,7	6,9
Gestion des eaux souterraines	2	8,5
Restauration des milieux aquatiques	4,5	15,4
Alimentation en eau potable	25,5	116,3
Appui à la gestion concertée	17,1	47,1
Sous total	51,8	194,2
Total	246,3	654,2

*Tableau VIII : Les investissements soutenus par l'agence Loire-Bretagne en 2001
(Agence de l'eau Loire-Bretagne)*

Les aides à l'investissement pour la lutte contre la pollution en 2001 sont en nette baisse par rapport à l'année précédente (194,5 millions d'euros contre 238 précédemment) du fait :

D'une part de l'arrêt temporaire du traitement des dossiers du programme de maîtrise des pollutions d'origine agricole dans les directions départementales de l'agriculture et de la forêt,

D'autre part du plafonnement des aides aux extensions de réseaux de collecte.

A contrario, les besoins en matière de stations d'épuration des collectivités et de dépollution dans l'industrie sont demeurés élevés.

1.6 LE BILAN FINANCIER

Avec 313 millions d'euros, les recettes sont en augmentation de 10,1% par rapport à l'année 2000. Les dépenses n'ayant augmenté que de 2,1%, l'équilibre est obtenu par une augmentation du fonds de roulement de 25 millions d'euros.

Les redevances constituent 76,8% des recettes totales :

La redevance de pollution domestique représente 50% des recettes (au lieu de 55,6% l'année précédente),

Les redevances agricoles augmentent de 45% par rapport à l'année 2000, 86,6% des dépenses sont consacrées aux interventions.

Les frais de fonctionnement (personnel, frais généraux, informatique, hors investissement de l'agence) représentent 7,3% du compte administratif.

2. LE PRIX DE L'EAU (14)

2.1 INTRODUCTION

Il vaut mieux parler du prix du service de l'eau que de prix de l'eau. En effet, si la ressource en eau est gratuite à l'état naturel, son traitement pour la rendre potable, son transport pour l'acheminer au domicile, le coût de l'assainissement des eaux usées pour la protection de notre environnement sont les multiples éléments du prix du service de l'eau.

Aujourd'hui, l'eau représente une dépense moyenne annuelle de 353 euros pour une famille de quatre personnes (consommation moyenne annuelle de 120 m³).

Le prix du service de l'eau peut varier d'une commune à l'autre mais, après plusieurs années d'augmentation sensible, la tendance générale est plutôt à la stabilisation des tarifs. De fait, entre 1990 et 1995, celui-ci a progressé de près de 10% par an, en moyenne. Depuis, ce rythme ne cesse de se ralentir :

3,5% en 1996,

2,2% en 1997,

2% en 1998.

2.2 LES TROIS ELEMENTS DU PRIX DU SERVICE DE L'EAU

Une nouvelle réglementation sur la présentation des factures (Annexe 9) d'eau a vu le jour avec l'arrêté du 10 juillet 1996. Ce texte définit l'harmonisation du libellé des factures pour l'ensemble des services d'eau en fonction notamment des principes suivants :

Les trois parties de la facture devront toujours être dénommées « distribution de l'eau », « collecte et traitement des eaux usées » et « organismes publics ».

Le niveau des anciens et nouveaux index et le volume consommé devront être mentionnés.

Les périodes de facturation devront figurer sur la facture et l'abonné devra pouvoir s'acquitter des sommes dues en, au moins, deux paiements annuels.

Les coordonnées précises des services de distribution de l'eau et/ou de collecte et de traitement des eaux usées apparaîtront sur les factures.

Des éléments synthétiques sur la qualité de l'eau distribuée seront portés à la connaissance des abonnés par l'intermédiaire de la facture, une fois par an.

2.2.1 Production et distribution de l'eau

Livrer 24h/24 à domicile, tout au long de l'année, de l'eau potable nécessite de nombreuses étapes :

- Construire et faire fonctionner des ouvrages souvent complexes pour puiser l'eau, la traiter afin de la rendre potable et la transporter (stations de pompage, usines de traitement, réservoirs, canalisations nécessaires à son acheminement),
- Contrôler la qualité sanitaire de l'eau fournie aux différents points de la chaîne, dans les réservoirs, les châteaux d'eau et les canalisations, jusqu'au compteur,
- Entretenir le réseau des canalisations,
- Gérer tous les services aux clients (abonnements, relevés de compteurs, factures, demandes de renseignements, conseils, etc...

Cet élément de la facture comporte le plus souvent trois parts :

- L'abonnement ou « part fixe » qui prend en compte une part des coûts de mise à disposition du service de l'eau. Il varie généralement suivant le diamètre du compteur ou du branchement,
- La location du compteur, identifiée à part quand elle n'est pas incluse dans l'abonnement, elle couvre également souvent son entretien,

- La « consommation » est la part facturée selon le relevé au compteur. Elle peut faire l'objet d'un tarif progressif ou dégressif.

Depuis une loi de 1790, la fourniture d'eau potable est sous la responsabilité des collectivités locales (commune ou syndicats intercommunaux). Elles sont toujours propriétaires des installations et en charge de la fixation du prix de l'eau selon le principe comptable « l'eau paie l'eau » (les recettes doivent équilibrer les dépenses).

Si la collectivité locale choisit de déléguer le service de l'eau à une société spécialisée, elle décide, par un vote de son assemblée délibérante, du choix de cette société* en fonction de la qualité de sa prestation et du prix qu'elle propose dans le cadre d'un appel à la concurrence régi par la loi. La rémunération de ladite société est alors fixée pour la durée du contrat qui la lie avec la collectivité. Ce contrat précise également les modalités d'évolution du prix en fonction d'indices statistiques officiels. Outre cette rémunération, la facture peut également comprendre la collecte de sommes reversées à la collectivité, notamment pour le financement des investissements engagés par celle-ci pour l'amélioration du service de l'eau. Le montant de ce dernier élément (parfois appelé surtaxe) est fixé par l'assemblée délibérante de la collectivité.

Dans le cas d'un service géré par la collectivité elle-même (formule dite de régie), l'ensemble des coûts d'exploitation et d'investissements doit être également répercuté sur la facture.

2.2.2 Collecte et traitement des eaux usées

Après utilisation de l'eau, il faut collecter et dépolluer les eaux usées avant de les rendre au milieu naturel. C'est une étape importante du service de l'eau car elle conditionne l'avenir et la qualité de nos réserves d'eau.

L'épuration des eaux usées représente toute une chaîne :

La construction, l'entretien et l'exploitation des réseaux de collecte des eaux usées (égouts),

La construction et le fonctionnement des stations d'épuration,

L'élimination des produits résiduels après assainissement des eaux (boues, huiles, graisses, etc...)

*Annexe 4 : Les différentes entreprises productrices d'eau potable en Loire-Atlantique

Ce poste couvre les frais du service d'assainissement. De manière similaire à l'eau potable, l'assainissement est facturé parfois avec un abonnement.

Il est également sous la responsabilité des collectivités locales*.

2.2.3 Contributions aux organismes publics

Le troisième élément du prix du service de l'eau se compose de redevances et taxes prélevées pour le compte d'organismes publics :

- La redevance de prélèvement et la redevance de lutte contre la pollution sont reversées à l'agence de l'eau du bassin auquel est rattaché géographiquement le consommateur. Leurs montants sont décidés et votés par le comité de bassin concerné. Facturées à l'utilisateur en fonction de sa consommation, elles permettent aux agences de l'eau de financer des prêts ou des subventions aux collectivités locales pour les équipements des services d'eau et d'assainissement, et de participer à la protection des ressources en eau.

- La redevance FNDAE (fond national de développement des adductions d'eau) sert à financer des travaux d'amélioration ou d'extension des installations d'eau potable ou d'assainissement en zone rurale. Dans ces zones, en effet, la dispersion des habitations et l'étendue du réseau entraînent des investissements importants pour que les habitants des campagnes puissent être bien desservis. Tous les usagers, citadins ou ruraux, paient cette redevance dont le montant est voté par le Parlement.

Toutes ces redevances sont une participation de solidarité de l'ensemble des utilisateurs d'eau pour le maintien et l'amélioration de la distribution et de l'assainissement de l'eau en France.

- La taxe sur les voies navigables (voté par le Parlement) n'est perçue que dans les communes prélevant ou rejetant leur eau dans le réseau (rivières, fleuve, canaux) géré par Voies Navigables de France. Reversée à cet organisme pour l'entretien de son réseau, elle ne contribue pas au service de l'eau potable.

- Enfin, la TVA, au taux de 5,5% (produits alimentaires), s'applique à l'ensemble des postes de la facture.

* Annexe 5: Les différentes entreprises s'occupant de l'assainissement en Loire-Atlantique

2.3 LES VARIATIONS DU PRIX DU SERVICE DE L'EAU

La qualité de la source joue un rôle prépondérant : Par exemple, l'eau prélevée à partir d'une nappe souterraine ne nécessitera parfois, grâce à la filtration naturelle du sol, que d'un simple traitement de désinfection. En revanche, souvent plus polluées, les eaux de surface devront subir un traitement plus complet et leur coût de production sera plus élevé ; Certaines zones de cultures utilisant des engrais nécessitent des installations plus complexes (par exemple pour le traitement des nitrates).

La situation géographique est tout aussi importante : En effet, plus la source sera éloignée et, donc, la longueur des canalisations importante, plus le coût de transport sera élevé. La profondeur à laquelle la nappe se situe et la géographie de la zone à distribuer peuvent également avoir un impact sur le coût en raison des dépenses énergétiques des installations de pompage.

La nature des sols peut augmenter la vitesse de vieillissement des canalisations, et, donc, leur rythme de renouvellement.

Le type d'habitat entraîne d'autres différences :

Les coûts d'entretien par abonné sont supérieurs en zones rurales par rapport aux zones urbaines (entretien à la charge de moins de consommateurs donc, plus onéreux).

Dans les zones touristiques, les installations sont conçues pour faire face au pics de consommation des hautes saisons, d'où des coûts de production plus élevés.

La loi du 3 janvier 1992, relative aux « eaux urbaines résiduaires » (10), faisait obligation aux communes de plus de 15 000 habitants d'être raccordées à une station d'épuration d'ici à 2001, et aux communes de plus de 2000 habitants de le faire à l'horizon 2006. L'importance des travaux à entreprendre a conduit à des investissements lourds, répercutés sur les factures d'eau. En effet, une enquête de la Direction générale de la consommation, de la concurrence et de la répression des fraudes estimait que, sur la période 1992-1998, les prix de l'assainissement (*collecte et traitement des eaux usées + redevance pollution*) avaient progressé près de trois fois plus vite que ceux de la seule distribution d'eau potable. En résumé, là où les investissements ont été entrepris, l'augmentation se stabilisera à moyen terme, là où ils ne l'ont pas été, il faut s'attendre à des hausses.

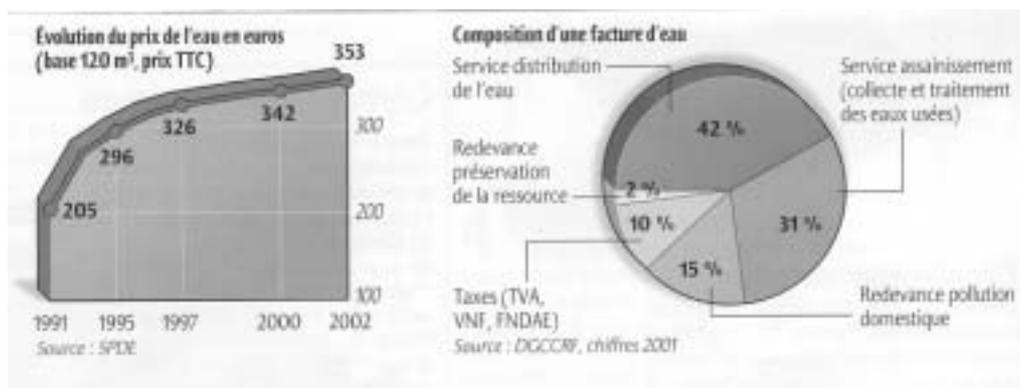


Figure 31 : Evolution du prix de l'eau (moyennes nationales) entre 1991 et 2002
Composition d'une facture d'eau en 2001 (moyennes nationales)

2.4 CONCLUSION

Le tableau qui suit indique le prix du m³ et son augmentation annuelle pour la période 1990-2004 (tous les tarifs se trouvent en Annexe 7) :

Années	Prix du m ³ d'eau en euros	Augmentation annuelle
1990-1991	1,28	
1991-1992	1,35	5,5%
1992-1993	1,47	8,9%
1993-1994	1,65	12,2%
1994-1995	1,79	8,5%
1995-1996	1,89	5,6%
1996-1997	2,07	9,5%
1997-1998	2,27	9,7%
1998-1999	2,44	7,5%
1999-2000	2,50	2,5%
2000-2001	2,57	2,8%
2001-2002	2,60	1,2%
2002-2003	2,66	2,3%
2003-2004	2,69	1,1%

Tableau IX : Prix de l'eau par m³ et par années et son augmentation pour la ville de Nantes

Le prix TTC de l'eau par m³ à Nantes en 2002 était sensiblement identique à la moyenne nationale (2,65 euros et 2,66 à Nantes). Ce prix a augmenté de 81% en 10 ans avec notamment une hausse importante sur la période 1992-1998 (+66% en 7 ans). Cette hausse est due principalement aux investissements accordés à l'assainissement collectif (la part de l'assainissement dans le prix de l'eau a été multipliée par 2,5 sur cette période). Depuis, le rythme se stabilise à 2% d'augmentation par an en moyenne. Aujourd'hui, la répartition des sommes imputables au service de l'eau est la suivante :

- Assainissement (*collecte et traitement des eaux usées + redevance pollution*) : 56%,
- Production et distribution d'eau (*distribution + redevance « préservation des ressources »*) : 38%,
- Taxes (*FNDAE + VNF + TVA*) : 6%.

CONCLUSION

A Nantes, du fait de la remontée du bouchon vaseux et du front salin présents dans l'estuaire, la Régie municipale puise l'eau brute 15 km en amont, à Mauves-sur-Loire. Ces eaux de médiocre qualité subissent un traitement complet de « potabilisation » à l'usine de La Roche à Nantes. Comme pour la majeure partie des eaux de surface, ce traitement comporte trois étapes essentielles : la clarification, l'affinage et la désinfection. L'eau est ensuite distribuée aux abonnés.

L'étude des bilans d'analyses effectués par la DDASS de Loire-Atlantique indique que l'eau produite à Nantes respecte les normes de potabilité française actuelles.

Le prix de l'eau, après une forte augmentation, est désormais stable et conforme à la moyenne nationale.

Les grands défis de l'avenir seront les suivants :

- Améliorer la qualité de la ressource en améliorant le taux de collecte des eaux usées domestiques et surtout industrielles mais également en relançant les PMPOA,
- Conserver une qualité d'eau potable excellente à la production en adaptant la filière de traitement aux exigences réglementaires. L'utilisation de la nanofiltration à la place de l'affinage sur CAG semble être une solution d'avenir dans une perspective de 10 à 15 années,
- Trouver d'autres ressources en eaux brutes car le département de Loire-Atlantique dépend trop de la Loire.

TABLE DES MATIERES

<u>LISTE DES ABREVIATIONS</u>	9
<u>INTRODUCTION</u>	10
<u>TRAITEMENT DES EAUX BRUTES</u>	14
1. <u>INTRODUCTION</u>	15
2. <u>FILIERE DE TRAITEMENT</u>	15
2.1 <u>LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE TRAITEMENT DES EAUX DE</u> <u>SURFACE DESTINEES A L'ALIMENTATION HUMAINE</u>	15
2.1.1 <u>La clarification</u>	15
2.1.2 <u>L'affinage</u>	32
2.1.3 <u>La désinfection</u>	46
2.2 <u>FILIERE NANTAISE DE TRAITEMENT DES EAUX BRUTES</u> Erreur! Signet non défini.	
2.2.1 <u>Introduction</u>	58
2.2.2 <u>Quelques chiffres :</u>	59
3. <u>CONCLUSION</u>	60
<u>QUALITE DE L'EAU POTABLE</u>	62
1. <u>LEGISLATION</u>	63
2. <u>LES 63 PARAMETRES DE LA QUALITE</u>	64
2.1 <u>PARAMETRES ORGANOLEPTIQUES</u>	64
2.1.1 <u>Couleur</u>	64
2.1.2 <u>Turbidité</u>	66
2.1.3 <u>Odeur</u>	67
2.1.4 <u>Saveur</u>	68
2.2 <u>PARAMETRES PHYSICOCHEMIE EN RELATION AVEC LA</u> <u>STRUCTURE NATURELLE DES EAUX</u>	69
2.2.1 <u>Température</u>	69
2.2.2 <u>pH</u>	71
2.2.3 <u>Conductivité</u>	72
2.2.4 <u>Chlorures</u>	74
2.2.5 <u>Sulfates</u>	76
2.2.6 <u>Silice</u>	77
2.2.7 <u>Calcium</u>	78
2.2.8 <u>Magnésium</u>	80
2.2.9 <u>Sodium</u>	81
2.2.10 <u>Potassium</u>	83
2.2.11 <u>Aluminium</u>	84
2.2.12 <u>Résidus secs</u>	86
2.2.13 <u>Oxygène dissous</u>	87
2.2.14 <u>Anhydride carbonique libre et alcalinité : TA et TAC</u>	88
2.2.15 <u>Dureté</u>	91
2.3 <u>PARAMETRES CONCERNANT DES SUBSTANCES INDESIRABLES</u>	93
2.3.1 <u>Nitrates</u>	93
2.3.2 <u>Nitrites</u>	95
2.3.3 <u>Ammonium</u>	97
2.3.4 <u>Azote Kjeldahl</u>	99
2.3.5 <u>Oxydabilité au permanganate de potassium (KMnO₄)</u>	100
2.3.6 <u>Carbone organique total (COT)</u>	103
2.3.7 <u>Hydrogène sulfuré</u>	104
2.3.8 <u>Substances extractibles au chloroforme (SEC)</u>	105

2.3.9	Hydrocarbures dissous	106
2.3.10	Phénols	108
2.3.11	Bore	109
2.3.12	Agents de surface	110
2.3.13	Fer	112
2.3.14	Manganèse	114
2.3.15	Cuivre	116
2.3.16	Zinc	117
2.3.17	Phosphore	119
2.3.18	Argent	120
2.3.19	Fluor	122
2.3.20	Baryum	123
2.3.21	Chlore résiduel	125
2.3.22	Organochlorés (autres que les pesticides)	126
2.3.23	Matières en suspension (MES)	128
2.4	PARAMETRES CONCERNANT LES SUBSTANCES TOXIQUES	130
2.4.1	Arsenic	130
2.4.2	Cadmium	131
2.4.3	Cyanures	133
2.4.4	Chrome	134
2.4.5	Mercure	136
2.4.6	Nickel	137
2.4.7	Plomb	138
2.4.8	Antimoine	140
2.4.9	Sélénium	141
2.4.10	Hydrocarbures polycycliques aromatiques (HPA)	142
2.5	PESTICIDES ET PRODUITS APPARENTES	144
2.6	PARAMETRES MICROBIOLOGIQUES	146
2.6.1	Coliformes totaux	147
2.6.2	Coliformes fécaux ou thermotolérants	148
2.6.3	Streptocoques fécaux	148
2.6.4	Spores de bactéries sulfito-réductrices	148
2.6.5	Germe totaux	149
2.6.6	Micro-organismes pathogènes	150
2.6.7	Autres organismes pathogènes	151
3.	LA QUALITE DE L'EAU POTABLE A NANTES	152
3.1	RESULTATS DES ANALYSES	152
3.2	ANALYSE DES RESULTATS	154
4.	CONCLUSION	Erreur! Signet non défini.
GESTION ET PRIX DE L'EAU		157
1.	GESTION DES EAUX : LES AGENCES DE L'EAU	158
1.1	ORIGINE ET RÔLES	158
1.2	PRESENTATION DU BASSIN LOIRE-BRETAGNE	158
1.3	STRUCTURE	Erreur! Signet non défini.
1.3.1	Le comité de bassin	159
1.3.2	Le conseil d'administration	159
1.3.3	Exécutif	160
1.4	RESSOURCES	160
1.4.1	La redevance « prélèvement »	160
1.4.2	Les redevances de pollution	161

1.5	<u>AIDES ACCORDEES</u>	162
1.5.1	<u>Le cadre de l'action</u>	162
1.5.2	<u>Les aides</u>	164
1.6	<u>LE BILAN FINANCIER</u>	165
2.	<u>LE PRIX DE L'EAU</u>	165
2.1	<u>INTRODUCTION</u>	165
2.2	<u>LES TROIS ELEMENTS DU PRIX DU SERVICE DE L'EAU</u>	166
2.2.1	<u>Production et distribution de l'eau</u>	166
2.2.2	<u>Collecte et traitement des eaux usées</u>	167
2.2.3	<u>Contributions aux organismes publics</u>	168
2.3	<u>LES VARIATIONS DU PRIX DU SERVICE DE L'EAU</u>	168
2.4	<u>CONCLUSION</u>	170
	<u>CONCLUSION</u>	172
	TABLE DES MATIERES	172
	<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	178
	<u>LISTE DES TABLEAUX</u>	182
	<u>LISTE DES FIGURES</u>	183
	<u>ANNEXES</u>	185

BIBLIOGRAPHIE

1.AGENCE DE L'EAU LOIRE-BRETAGNE

Rapport d'activité 2001

2002, 1 – 26

2.BISMUTH C.

Toxicologie clinique

2000, 5^e édition, 513 – 933

3.CIEAU*

La réglementation de la qualité

1999, 1 – 21

4.CIEAU

La qualité de l'eau du robinet

1999, 1 – 21

5.CIEAU

Le calcaire dans l'eau potable

1996, 1 – 6

6.CIEAU

Le chlore dans l'eau potable

1996, 1 – 2

*CIEAU : centre d'information sur l'eau

7.CIEAU

Les nitrates et l'eau potable

2002, 1 – 8

8.CIEAU

Le plomb et l'eau potable

2002, 1 – 10

9.CIEAU

Les pesticides et l'eau potable

2002, 1 – 6

10.CIEAU

L'assainissement des eaux usées

2000, 17 – 18

11.CIEAU

De la ressource au robinet : la maîtrise de l'eau en France

2000, 1 – 8

12.CIEAU

Le cycle de l'eau potable

1999, 1 – 6

13.CIEAU

Les contrôles de la qualité

1999, 1 – 6

14.CIEAU

Le prix du service de l'eau

1999, 1 – 13

15.CIEAU

Les normes de qualité

1999, 6 – 14

16.CIEAU

Une nouvelle directive européenne relative à la qualité de l'eau

1999, 1 - 4

17.DEGREMONT

Mémento technique de l'eau

1978, 8^e édition, 57 – 106

18.DESJARDINS R.

Le traitement des eaux

1997, 2^e édition, 27 – 131

19.DIRECTIONS REGIONALES ET DEPARTEMENTALES DES AFFAIRES
SANITAIRES ET SOCIALES DES PAYS DE LA LOIRE

L'eau potable dans les Pays de la Loire

1998, 14 – 15

20.DIRECTIONS REGIONALES ET DEPARTEMENTALES DES AFFAIRES
SANITAIRES ET SOCIALES DU BASSIN LOIRE-BRETAGNE

Bilan de potabilité des eaux d'alimentation dans le bassin Loire-Bretagne

1999, 1 – 4

21.DIRECTIONS REGIONALES ET DEPARTEMENTALES DES AFFAIRES
SANITAIRES ET SOCIALES DU BASSIN LOIRE-BRETAGNE

Périmètres de protection des captages d'eau destinée à la consommation humaine : état
d'avancement dans le bassin Loire-Bretagne en décembre 2000

2001, 5 - 6

22.HASLAY C., LECLERC H.

Microbiologie des eaux d'alimentation

1993, 97 - 114

23.LEGUBE B.

Le traitement des eaux de surface pour la production d'eau potable

1996, 13 – 179

24.POTELON B., ZYSMAN K.

Le guide des analyses de l'eau potable

1998, 65 – 213

25.REGIE DE L'EAU

Production et distribution de l'eau potable dans la communauté urbaine de Nantes

1998, 1 – 22

26.SAUR*

Syndicat mixte des collectivités du sud-est de Loire-Atlantique : production et distribution de l'eau potable dans le sud de la Loire-Atlantique

1998, 1 – 6

27.VILAGINES R.

Eau, environnement et santé publique

2000, 118 – 170

*SAUR : société d'aménagement urbain et rural

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : importance de l'eau dans la vie quotidienne

Tableau II : Valeurs du produit Ct en fonction du micro-organisme

Tableau III : Efficacité des désinfectants habituels sur les bactéries et virus

Tableau IV : Programme annuel de surveillance analytique

Tableau V : Bilan de conformité des analyses aux normes de potabilité durant l'année 2001

Tableau VI : Bilan de conformité des analyses aux normes de potabilité durant l'année 2002

Tableau VII : Les financements mobilisés par l'agence pour la période 1997-2002

Tableau VIII : Les investissements soutenus par l'agence Loire-Bretagne en 2001

Tableau IX : Prix de l'eau par m³ et par années et son augmentation pour la ville de Nantes

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : répartition de l'eau dans le corps humain
- Figure 2 : consommation d'eau par secteur d'activité
- Figure 3 : Répartition des charges à la surface des particules
- Figure 4 : Mécanisme de la floculation et incidence d'un excès ou d'un défaut de réactif
- Figure 5 : Schématisation de la séquence des opérations de l'expérience de « Jar-test »
- Figure 6 : Evolution de la charge des particules en fonction de doses croissantes de réactif
- Figure 7 : Décanteur couloir
- Figure 8 : Principe du décanteur lamellaire
- Figure 9 : Modèles simples de décanteurs à lits de boues (a : à balancier et b : à roue à aube)
- Figure 10 : Principe de fonctionnement d'un décanteur à cloche à vide
- Figure 11 : Principe de fonctionnement d'un décanteur à flocc lesté
- Figure 12 : Schéma de principe d'un flottateur à air dissous
- Figure 13 : Schéma de principe de l'ozoflottation
- Figure 14 : Allures de courbes de pression dans un filtre sable
- Figure 15 : Exemple de courbes de suivi de la qualité de la filtration en profondeur
- Figure 16 : Coupe d'un filtre gravitaire classique
- Figure 17 : Principe de fonctionnement d'un filtre à sable
- Figure 18 : Courbe de demande en ozone d'une eau
- Figure 19 : Schéma du système d'ozonation de l'usine de la Roche
- Figure 20 : Schéma d'un ozoneur industriel
- Figure 21 : Coupe schématique d'un grain de charbon actif
- Figure 22 : Les différentes étapes de l'adsorption d'une particule par le charbon actif
- Figure 23 : Modes de fonctionnement d'un filtre à charbon actif en grain
- Figure 24 : Principe de fonctionnement d'un filtre à CAG
- Figure 25 : Efficacité et domaines d'utilisation des procédés à membrane
- Figure 26 : Phénomènes de polarisation de concentration
- Figure 27 : Différentes formes du chlore dans l'eau pure à 20°C en fonction du pH

Figure 28 : Courbe typique de « point de rupture » d'une eau naturelle

Figure 29 : Principe de la génération du dioxyde de chlore

figure 30 : schéma de la filière de traitement nantaise

Figure 31 : Evolution du prix de l'eau (moyennes nationales) entre 1991 et 2002

Composition d'une facture d'eau en 2001 (moyennes nationales)

ANNEXES

Annexe 1 : Bilan 2001 de la qualité de l'eau dans la communauté urbaine de Nantes

Annexe 2 : Bilan 2002 de la qualité de l'eau dans la communauté urbaine de Nantes

Annexe 3 : Législation française concernant les eaux

Annexe 4 : Les différentes entreprises productrices d'eau potable en Loire-Atlantique

Annexe 5 : Les différentes entreprises s'occupant de l'assainissement en Loire-Atlantique

Annexe 6 : Liste des normes de potabilité françaises

Annexe 7 : Tarifs de facturation de l'eau potable dans la communauté urbaine de Nantes

Annexe 8 : Récapitulatif des SAGE en Loire-Atlantique

Annexe 9 : Exemple de facture d'eau potable d'un habitant nantais

Annexe 10 : Les nouvelles normes de potabilité européennes applicables à partir du 25/12/03

Vu, Le Président du Jury

Vu, le Directeur de Thèse

Vu, le Directeur de l'U.E.R