

LISTE DES SIGLES ET DES ABREVIATIONS

ANSD	: Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie
AOX	: Adsorbable organique Halogen ou Composé Organohalogéné
BEA	: Bile Esculine Azide
DAEC	: Diffusely Adherent <i>Escherichia coli</i>
DCSMM	: Directive Cadre « Stratégie pour le Milieu Marin »
EAggEC	: EnteroAggregative <i>Escherichia coli</i>
EHEC	: Enterohemorrhagic <i>Escherichia coli</i>
EIEC	: Enteroinvasive <i>Escherichia coli</i>
EPEC	: Enteropathogenic <i>Escherichia coli</i>
ETEC	: Enterotoxigenic <i>Escherichia coli</i>
MES	: Matières En Suspension
NTU	: Nephelometric Turbidity Unit ou Unité Néphalométrique
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
ONAS	: Office National de l'Assainissement du Sénégal
PCA	: Plate Conte Agar
PED	: Pays En voie de Développement
SDE	: Sénégalaise Des Eaux
SONES	: Société Nationale des Eaux du Sénégal
THM	: Tri-Halo-Méthane
TOX	: Total Organo-halogenated compounds ou composés organo-halogénés totales
UV	: Ultra-Violet
WHO	: World Health Organisation

RESUME

Titre du mémoire : Etude des paramètres physico-chimiques et biologiques influençant le traitement des eaux brutes par le chlore

Candidate : Mame Diarra Bousso NDIAYE

Nature du mémoire : Master en Biotechnologies Végétales et Microbiennes

Résumé :

Le présent travail a pour objectif d'évaluer le résultat du traitement des eaux brutes par le chlore. Ainsi, l'expérimentation a montré que le pH, la conductivité et la température des eaux de turbidités différentes sont conformes aux critères de normalité de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Par ailleurs, la matière organique et l'ammonium affectent l'efficacité du chlore selon le niveau de turbidité des eaux prélevées. L'analyse bactériologique qui a permis de quantifier et d'identifier les germes a montré une réduction des germes totaux selon le niveau de turbidité des eaux. Par contre très peu voir aucun coliforme ou entérocoques n'ont été dénombrés après chloration des eaux brutes. L'ensemble de ces données suggèrent que la demande en chlore constitue une exigence pour déterminer la concentration résiduelle de chlore requis pour une désinfection efficace.

Mots clés : Eau, Chlore, SDE, OMS, Lac de Guiers, germes totaux, coliformes, entérocoques.

ABSTRACT

The objective of the present work is to evaluate the result of the treatment of raw water with chlorine. Thus, the experimentation showed that the pH, conductivity and temperature of waters of different turbidities are in accordance with the criteria of normality of the World Health Organization (WHO). On the other hand, organic matter and ammonium affect the effectiveness of chlorine depending on the turbidity level of the sampled water. The bacteriological analysis which allowed the quantification and identification of germs showed a reduction of total germs according to the turbidity level of the water. On the other hand, very few or no coliforms or enterococci were counted after chlorination of the raw water.

All these data suggest that chlorine demand is a requirement for determining the residual chlorine concentration required for effective disinfection.

Key words: Water, Chlorine, SDE, WHO, Lac de Guiers, total germs, coliforms, enterococci.

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Etapes de traitement des eaux brutes	11
Figure 2. Taux de dissolution de l'acide hypochloreux en fonction du pH.....	14
Figure 3. Courbe d'absorption du chlore.....	16
Figure 4. Organigramme de la structure d'accueil.....	19
Figure 5. Carte du Sénégal affichant le site de prélèvement des eaux brutes	21
Figure 6. Turbidimètre 2100Q et des accessoires	22
Figure 7. pH-mètre type "PHC101" et des accessoires.....	23
Figure 8. Multimètre HQ40D	23
Figure 9. Colorimètre HACH	25
Figure 10. Colorimètre de poche et des sachets DPD	26
Figure 11. Dispositif d'une rampe de filtration.....	27
Figure 12. Etapes d'une incorporation en gélose	28
Figure 13: relation entre les concentration de chlore et la matière organique à chaque niveau de turbidité.....	31
Figure 14: Relation entre les concentrations de chlore et l'ammonium à chaque niveau de turbidité.....	32
Figure 15: Effet du chlore, de la turbidité, de la matière organique (M.O) et de l'ammonium (NH₄⁺) sur les germes totaux (GT)	34

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Répartition de l'eau sur la planète terre	3
Tableau 2. Disponibilité de l'eau dans différents aliments	3
Tableau 3. Principales sources microbiologiques de risques sanitaires	7
Tableau 4. Normes de l'Organisation mondiale de la santé	29
Tableau 5. Paramètres physico-chimiques des eaux brutes non chlorées	30
Tableau 6: Distribution de la covariance	31
Tableau 7: Distribution de la covariance	32
Tableau 8: Paramètres bactériologiques des eaux brutes non chlorées	33
Tableau 9: Matrice de corrélation des paramètres étudiés.	33
Tableau 10: Régression des germes totaux par la turbidité, la matière organique, le chlore et l'ammonium	34

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	3
I. Généralités sur l'eau	3
1. Eau de consommation humaine	4
2. Qualités d'une eau potable	4
3. Pollution de l'eau de consommation.....	5
4. Maladies liées à l'eau	5
II. Qualité microbiologique des eaux de boissons	7
1. Bactéries pathogènes	8
1.1 Bactéries indicatrices d'une contamination fécale	8
1.1.1 Coliformes totaux	8
1.1.2 Coliformes fécaux	8
1.1.3 Streptocoques fécaux	9
1.2 Bactéries indicatrices de pollution	9
1.3 Traitement des eaux de consommation humaine	9
1.3.1 Traitement des eaux brutes dans les sociétés.....	10
1.3.2 Désinfection de l'eau	11
1.3.2.1 Chloration	12
1.3.2.2 Demande en chlore.....	12
1.3.2.3 Paramètres influents sur la désinfection de l'eau avec le chlore	13
a. potentiel d'Hydrogène (pH)	13
b. Température.....	14
c. Turbidité	14
d. Ammonium.....	15
e. Matière organique.....	17
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES	18

I. Zones d'étude	18
1. Présentation de la société de traitement des eaux brutes	18
1.1 Historique.....	18
1.2 Organisation administrative de la structure d'accueil	18
1.3 Sous-direction de Traitement des Eaux	19
1.3.1 Section microbiologie.....	19
1.3.2 Section chimie.....	20
1.3.3 Section Assistance à l'exploitation.....	20
2. Système Qualité Sécurité Environnement (QSE).....	20
3. Site de prélèvement des eaux brutes	21
II. Matériel et méthodes	22
1. Préparation des échantillons	22
2. Analyse physico-chimique--.....	22
2.1 Eaux brutes non chlorées.....	22
2.1.1 Mesure de la Turbidité.....	22
2.1.2 Mesure du pH	23
2.2 Chloration des eaux brutes	24
2.2.1 Préparation de la solution initiale.....	24
2.2.2 Chloration de l'échantillon	24
2.3 Eaux brutes chlorées.....	24
2.3.1 Détermination du taux de matière organique.....	24
2.3.2 Détermination du taux d'ammonium	24
2.3.3 Mesure du chlore résiduel.....	25
3. Analyse bactériologique.....	26
3.1 Technique de filtration sur membrane.....	26
3.2 Technique de l'incorporation en gélose	27
3.3 Culture bactérienne	28
4. Dénombrement des bactéries.....	28
4.1 Dénombrement des coliformes.....	28
4.2 Dénombrement des entérocoques.....	28
4.3 Expression des résultats.....	29
5. Traitement des données.....	29
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION	30
I. Résultats	30
1. Analyse physico-chimique	30

1.1 Eaux brutes non chlorées.....	30
1.2 Eaux brutes chlorées	31
1.2.1 Relation entre le chlore et la matière organique en fonction de la turbidité	31
1.2.2 Relation entre le chlore et l'ammonium en fonction de la turbidité	31
2. Analyse bactériologique.....	32
2.1 Eaux brutes non chlorées.....	32
2.2 Effet sur les germes totaux	33
II. Discussion	35
1. Désinfection par le chlore	35
2. Influence de la turbidité de l'eau sur la désinfection par le chlore	35
3. Influence de la matière organique et de l'ammonium sur la désinfection par le chlore	36
4. Temps de contact	36
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	37
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	38

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est une source indispensable à la vie. C'est un produit de l'économie et un élément majeur de l'environnement. En effet, près de 70 % de la planète Terre sont recouverts d'eau dont 97 % d'eau salée et 3 % d'eau douce (Rovel *et al.*, 2011).

En tant qu'élément essentiel à la vie, l'eau a eu une grande importance dans l'histoire de l'homme. Elle trouve un usage multiple à travers les ménages, mais aussi dans l'industrie et l'agriculture qui ne peuvent se passer d'eau de qualité en quantité suffisante.

Une eau est dite potable quand elle satisfait à un certain nombre de caractéristiques la rendant propre à la consommation humaine. En 2015, onze pour cent (11 %) de la population mondiale, soit 844 millions d'individus, n'ont pas eu accès à l'eau potable (OMS, 2017). Au Sénégal, l'accès à l'eau potable reste une problématique en zone rurale et dans certaines zones urbaines malgré un taux d'approvisionnement de 89 % (ANSD, 2015). En effet, les ressources en eau deviennent de plus en plus rares et le coût de leur mobilisation est cher. De plus, la demande est devenue croissante et certaines sources d'eau sont envahies par les plantes et les algues. C'est pourquoi, le Sénégal avait entrepris en 1995, une réforme sur le mode de gestion des ressources hydrauliques en vue de leur mise à la disposition des usagers, de la manière la plus satisfaisante et équilibrée. Cette réforme du sous-secteur de l'hydraulique a donné naissance à trois structures qui sont la Société Nationale Des Eaux du Sénégal (SONES), l'Office National de l'Assainissement du Sénégal (ONAS) et la Sénégalaise Des Eaux (SDE). La SDE est liée à l'état par un contrat d'affermage renouvelable et elle est chargée de la production et de la distribution d'eau potable dans les zones urbaines du Sénégal.

La production et la distribution de l'eau de robinet reposent sur l'exploitation des eaux de surface et des eaux souterraines. Pour assurer ce service, les sociétés ont adopté un processus de traitement des eaux conformément aux normes de qualité. Ainsi, pour la plupart des eaux souterraines, le traitement est fait par la désinfection alors que pour les eaux de surface, le processus de traitement nécessite plusieurs étapes : le prétraitement, la coagulation/floculation, la décantation, la filtration, la désinfection avec le chlore de l'eau brute (non traitée) et la reminéralisation (mise en équilibre). La désinfection de l'eau signifie l'élimination ou la désactivation des microorganismes pathogènes. Ces derniers sont détruits ou désactivés, inhibant ainsi leur développement et leur reproduction.

Lorsque les microorganismes ne sont pas éliminés, l'utilisation de cette eau peut provoquer des maladies dites hydriques puisque l'eau contaminée est l'un des vecteurs majeurs des maladies qui font le plus de morts sur la planète, notamment les diarrhées hydriques.

La désinfection peut être réalisée par des désinfectants physiques (lumière ultraviolet (UV) les rayons gamma, les radiations électriques...) ou chimiques (le chlore (Cl_2), l'ozone (O_3), le permanganate de potassium *etc*).

La désinfection de l'eau dans les sociétés est assurée par le chlore qui est le désinfectant le plus utilisé du fait de son action biocide, de son faible coût et de son action rémanente qui assure une protection de l'eau contre toute contamination dans les réseaux de distribution d'eau potable. Le chlore se dissocie dans l'eau et donne l'acide hypochloreux (chlore actif) et l'ion hypochlorite. A pH acide, le chlore actif est prédominant alors qu'à pH alcalin, l'ion hypochlorite prédomine et est peu désinfectant. Le chlore assure l'oxydation des matières organiques et inorganiques (Fer, Mn...), détruit une flore microbienne contenue dans une quantité d'eau donnée tout en gardant l'action rémanente dans l'eau destinée à la production d'eau potable. Cependant, la désinfection avec le chlore est influencée par des paramètres physico-chimiques et biologiques de l'eau pouvant entraîner l'inefficacité du désinfectant.

Une bonne connaissance des facteurs qui peuvent influencer la qualité de l'eau dans les réseaux est indispensable pour les services d'exploitation (en usine de production ou sur le réseau) afin d'anticiper et d'éviter des problèmes potentiels.

L'objectif de ce travail est d'étudier les paramètres pouvant influencer la qualité de la désinfection des eaux par le chlore, avec comme objectifs spécifiques : i) déterminer les paramètres physico-chimiques qui influencent la désinfection de l'eau par le chlore ; ii) déterminer les paramètres biologiques qui influencent la désinfection et iii) déterminer l'abattement des germes en fonction du taux de chlore utilisé.

Le document s'articulera sur trois chapitres. Le premier chapitre traitera la synthèse bibliographique et les deux autres chapitres présenteront respectivement la méthodologie et les résultats obtenus. Enfin, nous terminerons par une conclusion et des recommandations.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I. Généralités sur l'eau

L'hydrosphère est l'ensemble des eaux qui recouvre la croûte terrestre : les océans, les mers fermées, les lacs, les fleuves et les rivières souterraines. Le volume de cette hydrosphère est d'environ 1385.10^6 Km^3 dont 97,4 % sont représentés par les océans ; 2 % sont sous forme de glace et 0,6 % représente les eaux douces continentales (Rovel et *al.*, 2011).

Tableau 1. Répartition de l'eau sur la planète terre

Réservoirs	Stocks (10^3 Km^3)
Océans	1 338000
Eaux continentales	10 530
Glaciers	24 064
Eaux souterraines	23 400
Lacs et eau douce	267,4
Humidité des sols	16,5
Atmosphère (humidité de l'air)	12,9
Rivières	2,1
Biosphère (cellules vivantes)	1 100

Source: Morel, 2007

L'eau est une source indispensable. Elle est surtout synonyme de vie biologique car représente le constituant majeur de la matière vivante (80 % de sa composition) ; 60 à 70 % chez les animaux majeurs et 98 % chez les organismes marins (méduse ou certaines algues). Cependant, chez les bactéries sporulées, ce taux est réduit à 50 %.

Tableau 2. Disponibilité de l'eau dans différents aliments

Aliments	Eau (%)
Pomme de terre	78
Poisson	80
Laitue	95
Viande	60
Œuf	75
Tomate	91

Source : DCSMM, 2012

1. Eau de consommation humaine

L'eau desservie à la population peut provenir de deux sources aux caractéristiques différentes :

- Eaux de surface : elles proviennent des lacs, rivières, barrages, *etc.* Les eaux de surface sont ouvertes à l'environnement et sont exposées à des impuretés telles que les matières en suspension (matières organiques dont les algues et colloïdes), des matières organiques dissoutes (naturelles ou artificielles), des organismes pathogènes (virus, bactéries, protozoaires parasites *etc.*) et des minéraux particuliers comme les métaux lourds (Rovel *et al.*, 2011).
- Eaux souterraines : elles proviennent de l'infiltration des eaux superficielles à travers les couches terrestres pour s'accumuler à la nappe aquifère (Rovel *et al.*, 2011). Elles sont desservies aux populations à travers des puits, des forages *etc.*

2. Qualités d'une eau potable

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), l'eau potable est une eau qui ne contient pas d'agents pathogènes ou d'agents chimiques à des concentrations pouvant nuire à la santé (OMS, 2004). Cela inclut les eaux de surface traitées et les eaux de surface non traitées, mais non contaminées, comme les sources d'eau, les forages et les puits (DCSMM, 2012). Les paramètres pouvant être réglementés sont : la qualité organoleptique (couleur, turbidité, odeur, saveur), les paramètres physico-chimiques (selon l'OMS : température, pH, chlorures : 200 mg/l, sulfates : 250 mg/l, fluorures : 1,5mg/l, *etc.*) ; les substances indésirables (selon l'OMS nitrates : 50 mg/l, nitrites : 0,3mg/l, pesticides, *etc.*) ; les substances toxiques (arsenic, cadmium, plomb, hydrocarbures, *etc.*) ; les paramètres microbiologiques (l'eau ne doit pas contenir d'organismes pathogènes et une quantité limitée d'organismes non pathogènes). Selon ces normes, une eau potable doit être exempte de germes pathogènes (bactéries, virus), d'organismes parasites et une quantité limitée de germes non pathogènes car les risques sanitaires liés à ces micro-organismes sont énormes (OMS, 2004). À l'inverse, la présence de certaines substances comme les oligo-éléments, peut être jugée nécessaire à l'organisme. Une eau potable doit aussi être une eau agréable à boire : elle doit être claire, ne doit pas avoir une odeur particulière et avoir un bon goût. Pour le goût, l'eau doit contenir un minimum de sels minéraux dissous (de 0,1 à 0,5 gramme par litre), lesquels sont par ailleurs indispensables à l'organisme. Enfin, elle ne doit pas corroder les canalisations afin d'arriver « propre » à la sortie des robinets (DCSMM, 2012).

3. Pollution de l'eau de consommation

La dégradation de l'eau peut être d'origine :

- Domestique : par les égouts et les latrines qui contiennent des matières putrescibles (eaux - vannes) ou par les eaux de linge, de cuisine, de la vaisselle, eaux grises *etc.* ;
- Industrielle : par les effluents rejetés par les usines contenant des matières fermentescibles, des sels dissouts dont certains sont toxiques (cyanures, phénols...) ;
- Agricoles : par les eaux de ruissellement qui entraînent les sels minéraux des engrais (DCSMM, 2012).

Selon l'OMS, une eau potable ne doit pas contenir d'agents pathogènes ou d'agents chimiques à des concentrations pouvant nuire à la santé (OMS, 2017). Cependant, si ces références ne sont pas respectées, l'eau consommée peut induire des maladies.

4. Maladies liées à l'eau

Les maladies liées à l'eau sont celles contractées par ingestion, par contact direct ou encore les maladies pour lesquelles l'eau est le milieu de vie d'hôtes de larves ou de parasites (Somé, 2014).

Il s'agit essentiellement :

- Des maladies du péril fécal, très fréquentes sous les tropiques :
 - le choléra et tous les syndromes cholériformes qui sont des infections intestinales aiguës caractérisées par une diarrhée liquide due à des germes non invasifs *Vibrio cholerae*, en particulier chez l'enfant à des virus gastroentériques dont les rotavirus, agents les plus fréquents des diarrhées du nourrisson et de l'enfant de moins de 3 ans (Aubry *et al*, 2012).
 - la fièvre typhoïde, une infection potentiellement mortelle causée par la bactérie *Salmonella typhi* caractérisée par une fièvre prolongée, une fatigue, des nausées, des douleurs abdominales et des troubles du transit (constipation ou diarrhée). La contamination se fait par les eaux ou les aliments souillés par des selles infectées (Aubry *et al*, 2012).
 - la poliomyélite : sa transmission se fait dans les pays en voie de développement (PED) par voie féco-orale. C'est une maladie infectieuse essentiellement neurotrope due aux poliovirus sauvages 1 et 3. L'apparition de poliovirus dérivés du VPO (VDPV), devenus pathogènes, est à l'origine de flambées de poliomyélite dans les PED (Aubry *et al*, 2012)
- Les diarrhées aiguës et les dysenteries : elles représentent la deuxième cause de mortalité infantile dans les PED. La mortalité survient dans les deux (2) premières années de la vie dans 80 % des cas (Aubry *et al*, 2018).

Ce sont des maladies transmissibles dues à un ou plusieurs agents pathogènes : bactéries, virus ou parasites. Le principal facteur de gravité de la diarrhée aiguë hydrique est la déshydratation, surtout chez les jeunes enfants et les personnes âgées. Elle est habituellement due à des germes non invasifs : Entérotoxino-gènes (ETEC) *Escherichia coli*, *Vibrio cholerae* O1, *Rotavirus*, *Cryptosporidium parvum* etc.

Les ETEC sont la cause principale de maladie diarrhéique dans les PED tant chez l'enfant que chez l'adulte. On distingue deux types de diarrhées :

- La diarrhée dite invasive est causée par des bactéries (*Shigella*, *Salmonella*, *Campylobacter*, *Yersinia*, *Escherichia coli* entero-invasif (EIEC), *Clostridium difficile* ; et rarement parasitaire : *E. histolytica*. La diarrhée invasive se caractérise par une diarrhée glaireuse ou purulente et/ou sanglante, accompagnée de douleurs abdominales à type d'épreintes, de faux besoins.

- La diarrhée dite hydrique est caractérisée par une perte abondante d'eau, d'installation rapide, sans douleurs abdominales avec des vomissements. Elle est causée par des virus (rotavirus, norovirus), par des bactéries (*Vibrio cholera*, Entérotoxino-gène *E. coli* (ETEC), *Staphylococcus aureus* ou *Bacillus cereus*), par des parasites : *Cryptosporidium*.

Le syndrome dysentérique représente environ 10 % des maladies diarrhéiques aiguës d'origine infectieuse. Les agents en cause sont des bactéries entéro-invasives : *Shigella* spp., *Salmonella* spp., *Campylobacter jejuni*, *Yersinia entérocolitica*, ...ou des parasites : *Entamoeba histolytica*, *Balantidium coli*, ... (Aubry et al, 2018). La dysenterie peut entraîner une large gamme de symptômes, mais la létalité est faible.

Campylobacter est un agent commun de diarrhée dans le monde entier. Comparer à d'autres bactéries pathogènes, la dose infectieuse de *Campylobacter* est relativement faible et peut être inférieure à 1000 organismes. Cette bactérie est relativement commune dans l'environnement et des flambées liées à l'eau ont été enregistrées (OMS, 2017).

L'infection à *E. coli* O157 et à d'autres souches de *E. coli* entérohémorragiques transmise par l'eau est nettement moins fréquente que l'infection à *Campylobacter*, mais les symptômes de l'infection sont plus graves, notamment le syndrome hémolytique et urémique ainsi que des décès. La dose infectieuse peut être très faible ; moins de 100 organismes (OMS, 2017)

Shigella provoque plus de 2 millions d'infections chaque année, entraînant près de 60 000 décès, principalement dans les PED (OMS, 2017).

La dose infectieuse est faible et peut ne pas excéder 10 à 100 organismes (OMS, 2017). Des flambées liées à l'eau ont été enregistrées (OMS, 2017).

Les *Salmonella* non typhoïdiennes provoquent rarement des flambées liées à l'eau mais *S. typhi* est à l'origine de flambées importantes et dévastatrices de fièvre typhoïde liée à l'eau (OMS, 2017).

II. Qualité microbiologique des eaux de boissons

Des micro-organismes peuvent être trouvés dans des rivières, des lacs, des eaux souterraines, dans l'air et même dans ou sur d'autres êtres vivants ; ils sont dits ubiquitaires. Chez les humains, ils sont commensaux. Les microorganismes peuvent faire partie des flores cutanée, digestive, buccale et génitale. Cependant, même si tous les micro-organismes ne sont pas nuisibles pour notre santé, il y en a certains qui peuvent causer des maladies graves ; ils sont appelés pathogènes (Rodier, 2011).

Tableau 3. Principales sources microbiologiques de risques sanitaires

Type	Souches microbiennes
Bactéries	<i>Salmonella spp.</i> , <i>Shigella spp.</i> , <i>Escherichia coli</i> pathogènes, <i>Vibrio cholerae</i> , <i>Campylobacter jejuni</i> , <i>Clostridium perfringens</i> , <i>Yersina enterocolitica</i> , <i>Clostridium difficile</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Bacillus cereus</i> , ...
Virus	<i>Virus Norwalk</i> , <i>Enterovirus</i> , <i>Rotavirus</i> , <i>VHA</i> , <i>VHE</i> ,...
Parasites	<i>Giardia spp.</i> , <i>Cryptosporidium spp.</i> , <i>Isospora belli</i> , <i>Entamoeba histolytica</i> ,

Source : Aubry et Gaüzère, 2012

1. Bactéries pathogènes

1.1 Bactéries indicatrices d'une contamination fécale

1.1.1 Coliformes totaux

Ce sont des entérobactéries à Gram négatif non sporulées oxydase négatif aérobie et anaérobie facultatifs. Ils sont capables de se multiplier en présence de sels biliaires et de fermenter le lactose avec production de gaz à une température comprise entre 35 et 37° C (Poénaru, 2019). Les coliformes totaux sont des entérobactéries incluant des espèces bactériennes qui vivent dans l'intestin des animaux homéothermes, mais aussi dans l'environnement en général (sol, végétation et eau). Ce groupe bactérien est utilisé comme indicateur de la qualité microbienne de l'eau parce qu'il contient notamment des bactéries d'origine fécale, comme *Escherichia coli*. En effet, après la désinfection de l'eau, les coliformes doivent être absents. Leur présence révèle un traitement inefficace. La présence de coliformes totaux dans les réseaux de distribution et d'approvisionnements en eau stockée peut révéler une reprise de la croissance et une formation possible de biofilms ou une contamination par une intrusion de matériaux étrangers, notamment du sol ou des plantes (OMS, 2017). Les coliformes totaux sont généralement mesurés dans des échantillons d'eau de 100 ml. Diverses méthodes relativement simples sont disponibles et fondées sur la production d'acide à partir du lactose ou sur la production de β -galactosidase. Les méthodes correspondent à la filtration sur membrane, puis à l'incubation des membranes sur des milieux sélectifs à 35-37 °C pendant 24 heures et enfin le comptage des colonies. D'autres méthodes comme la méthode du nombre le plus probable (MNP) utilise des tubes ou des plaques de micro titration, et les tests de présence/absence. Des kits de test de terrain sont également disponibles (OMS, 2017).

1.1.2 Coliformes fécaux

Les coliformes fécaux (CF), ou coliformes thermotolérants (CT), sont un sous-groupe de coliformes totaux capables de fermenter le lactose à une température de 44,5 °C (Poénaru, 2019). L'espèce la plus fréquemment associée à ce groupe bactérien est *Escherichia coli* et, dans une moindre mesure, certaines espèces des genres *Citrobacter*, *Enterobacter* et *Klebsiella* (Barton, 2005). Il existe en effet diverses souches de *E. coli* dont certaines sont inoffensives alors que d'autres sont pathogènes et responsables de dysenteries d'infection urinaire et de méningite néonatales. La souche 0157 : H7 est particulièrement virulente puisqu'elle a engendré des cas mortels aux USA, au Canada, en Ecosse... (Momento technique de l'eau, 2011). La présence de *E. coli* indique une contamination fécale récente. Sa détection devrait amener à envisager d'autres mesures.

Ces dernières correspondent à la recherche de sources potentielles telles qu'un traitement inapproprié ou des défauts d'étanchéité dans le réseau de distribution. Les CF sont aussi de bons indicateurs de l'efficacité du traitement de l'eau. Les bactéries *Escherichia coli* sont généralement recherchées dans des échantillons d'eau de 100 ml. Diverses procédures relativement simples sont disponibles et fondées sur la production d'acide et de gaz à partir du lactose ou sur la production de β -glucuronidase (OMS, 2017).

1.1.3 Streptocoques fécaux

Ce sont des bactéries à Gram positif sphériques ou ovoïdes formant des chainettes non sporulées catalase négatif possédant l'antigène D. Ils sont capables d'hydrolyser l'esculine en présence de bile (Poénaru, 2019). La législation ancienne parlait de « streptocoques fécaux ». Sous cette dénomination générale, il faut comprendre l'ensemble des streptocoques possédant l'acide teichoïque, substance antigénique caractéristique du groupe D de Lancefield. Ce groupe est essentiellement composé de : *Enterococcus faecalis*, *E. faecium*, *E. durans*, *E. hirae*, *Streptococcus bovis*, *S. suis* et *S. equinus*. Ces streptocoques du groupe D sont généralement des témoins de pollution fécale, car tous ont un habitat fécal (Rodier, 2011). Ils témoignent d'une contamination d'origine fécale ancienne tandis que les coliformes fécaux témoignent d'une contamination d'origine fécale récente. Les entérocoques intestinaux sont utilisés pour tester l'eau brute comme indicateurs d'agents pathogènes fécaux capables de survivre plus longtemps que *E. coli*. Ce traitement est utilisé pour compléter les tests de détection de *E. coli* pour les eaux de boisson (OMS, 2011).

Le dénombrement des entérocoques présumés est rarement effectué indépendamment du dénombrement de coliformes totaux et coliformes thermotolérants pré-cités. Les méthodes sont similaires pour ces deux types d'indicateurs. Cependant, leurs milieux de culture sont différents (Rodier, 2011).

1.2 Bactéries indicatrices de pollution

Elles comprennent tous les micro-organismes capables de croître dans la matière nutritive. Il s'agit essentiellement des bactéries aérobies, anaérobies, des champignons saprophytes *etc.* Ils sont connus sous le nom de germes totaux.

1.3 Traitement des eaux de consommation humaine

Le traitement de l'eau vise un double objectif (Mathieu-Hermet *et al.*, 2016) :

- Eliminer dans de l'eau brute les agents biologiques et chimiques susceptibles de constituer un risque pour la santé ;
- Maintenir la qualité de l'eau au cours de son transport du captage jusqu'au robinet du consommateur.

1.3.1 Traitement des eaux brutes dans les sociétés

Les eaux souterraines, protégées par le sol sont souvent bonnes pour la consommation. Cependant, elles peuvent nécessiter un traitement physico-chimique pour corriger certaines teneurs (fer, fluor, nitrates...) et les rendre conformes aux normes. Pour garantir la qualité bactériologique de l'eau desservie au robinet, une désinfection au chlore est toujours effectuée par les sociétés. Le processus de traitement comporte essentiellement plusieurs étapes principales, garantissant toujours et partout une eau consommable. Ces étapes sont (Figure 1) :

- Etape 1 : Prétraitement

Les eaux brutes sont d'abord captées puis dégrillées et tamisées pour éliminer les gros et petits déchets respectivement, enfin pré-chlorées pour démarrer l'oxydation des matières organiques ou minérales oxydables.

- Etape 2 : Coagulation/Floculation

Les procédés de coagulation et de floculation avec le sulfate d'alumine comme coagulant facilitent l'élimination des matières en suspension (MES) et des colloïdes en les rassemblant sous forme de floc dont la séparation est ensuite effectuée par des systèmes de décantation.

- Etape 3 : Décantation

Les eaux prétraitées sont ensuite floculées/décantées pour éliminer 90 % des MES qui se déposent au fond des bassins grâce à un coagulant (Sulfate d'alumine ou chlorure ferrique) ajouté à l'eau.

- Etape 4 : Filtration

Les eaux décantées sont filtrées sur une couche de sable fin.

- Etape 5 : Désinfection

Après filtration, les eaux sont désinfectées en ajoutant du chlore sous forme gazeuse pour éviter toute prolifération bactérienne dans le réseau de distribution.

- Etape 6 : Reminéralisation (mise en équilibre)

L'eau est ensuite reminéralisée avec de l'eau de chaux pour assurer l'équilibre calco-carbonique.

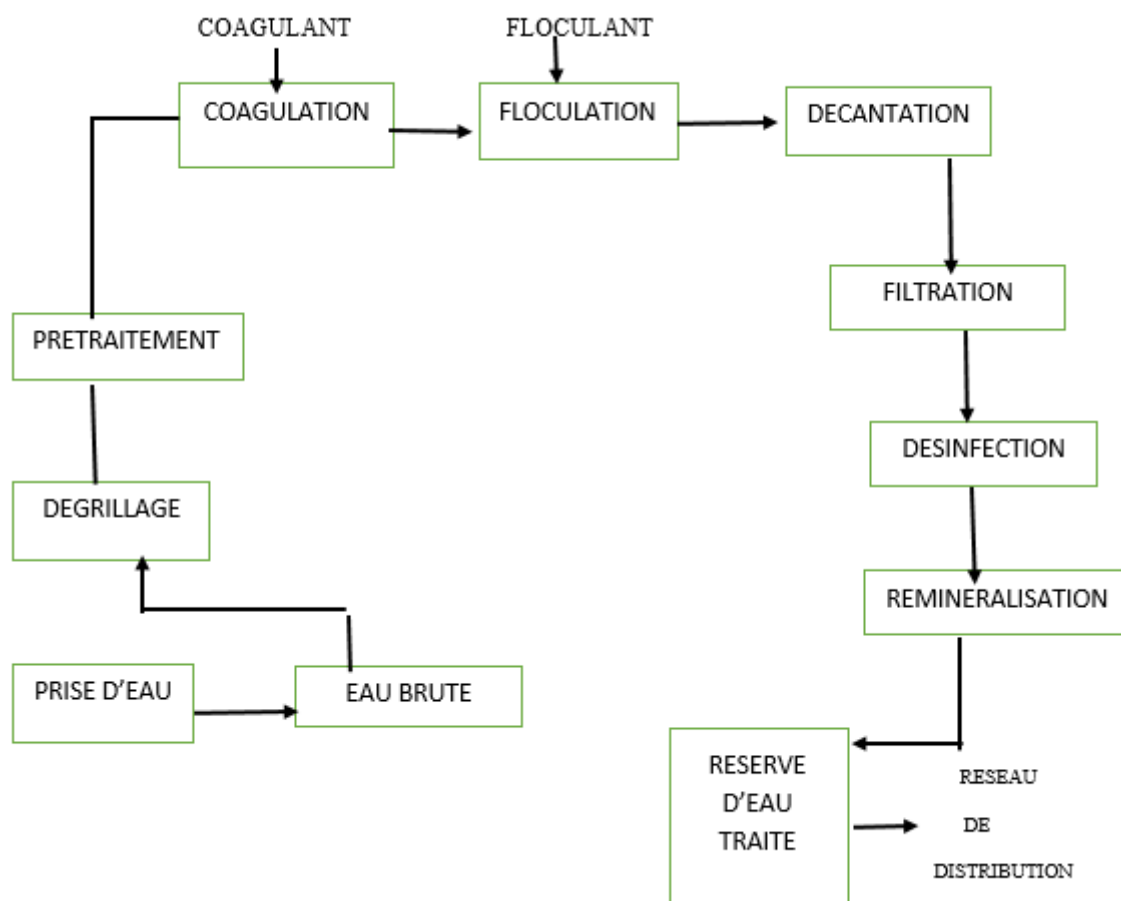


Figure 1. Etapes de traitement des eaux brutes

1.3.2 Désinfection de l'eau

La désinfection est un des procédés indispensables dans le traitement de l'eau de consommation. Elle consiste à inactiver les organismes pathogènes diffusés par l'eau tels que les bactéries, les virus et les parasites (Rovel et *al.*, 2011). Le produit ou le procédé de désinfection choisi devra avoir des propriétés bactéricide et/ou virulicide et éventuellement un effet rémanent qui repose sur le maintien de la concentration du désinfectant assurant la continuité de la désinfection dans les réseaux de distribution d'eau potable et limitant ainsi les risques de re-croissance bactérienne (Rodier, 2011). Cette désinfection peut être effectuée par des procédés physiques tels que la coagulation/floculation et la filtration ou en utilisant des produits chimiques comme le chlore, le dioxyde de chlore ou l'ozone ou l'inactivation des germes par rayonnement UV (Soulama, 2011). Elle doit être satisfaite avant qu'une concentration de désinfectant résiduel soit établie. Pour une désinfection adéquate de l'eau, il est ainsi requis de fournir à l'eau une concentration de désinfectant plus élevée que ce qui était, à *priori* requis, pour tuer les microorganismes pathogènes (Soulama, 2011).

1.3.2.1 Chloration

Le chlore (Cl), avec ses dérivés ; l'hypochlorite de sodium (eau de javel) et l'hypochlorite de calcium, demeure le désinfectant le plus utilisé du fait de son action biocide, de son faible coût et de son action rémanente qui assure une protection de l'eau contre toute contamination dans les réseaux de distribution d'eau potable (Samira et *al.*, 2011).

1.3.2.2 Demande en chlore

La demande en chlore correspond à la détermination de la dose de chlore à utiliser afin d'avoir une concentration résiduelle de chlore requise pour une désinfection efficace (Rodier, 2011). Cette quantité de chlore doit assurer l'oxydation des matières organiques et inorganiques, détruire une flore microbienne contenue dans une quantité d'eau donnée tout en gardant l'action rémanente du chlore qui assurera la protection de l'eau dans les réseaux de distribution. (Soulama, 2011).

Par conséquent, avant de décider de la dose de chlore nécessaire pour désinfecter l'eau, il faut établir l'exigence de chlore, c'est-à-dire la quantité de chlore qui est consommée jusqu'à l'apparition du résiduel (Rodier, 2011).

Cette exigence met en évidence l'importance du concept Ct qui dérive de la loi cinétique d'inactivation des germes de Chickwatson (Rodier, 2011) exprimée en :

$$\log N/N_0 = k.C.t$$

Le Ct correspond au produit de la concentration résiduelle (C) du désinfectant (en mg/L) par le temps (t) de contact (en minutes). Elle est directement proportionnelle à l'inactivation des germes.

L'inactivation des germes nécessite donc la détermination d'une dose suffisante de désinfectant pendant une durée définie. Ces deux paramètres dépendent du type de germe et des caractéristiques physico-chimiques de l'eau (température, pH).

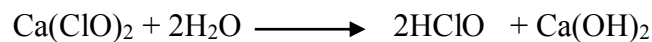
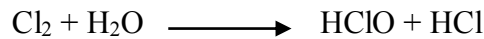
Pour le chlore, le maintien d'une teneur résiduelle de 0,5 mg/L en chlore libre pendant un temps de contact de 30 minutes ($Ct = 15 \text{ mg. min. L}^{-1}$) est recommandé (Rodier, 2011).

1.3.2.3 Paramètres influents sur la désinfection de l'eau avec le chlore

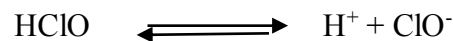
Le chlore demeure l'un des produits les plus utilisés pour la désinfection de l'eau. En effet, il a une action bactéricide et un pouvoir rémanent dans l'eau (Soulama, 2011). Cependant, son action peut être fortement influencée par certains facteurs tels que le pH, la turbidité, la température, les matières organiques *etc.*

a. potentiel d'Hydrogène (pH)

Lorsque le chlore est introduit dans l'eau sous forme gazeuse, ou d'hypochlorite de sodium (eau de javel) ou d'hypochlorite de calcium, il est dissout et est rapidement hydrolysé formant ainsi l'acide hypochloreux (désinfectant le plus efficace) et l'acide chloridrique (Soulama, 2011) suivant les équations ci-dessous :



L'acide hypochloreux n'est pas stable dans l'eau. Il se dissocie selon le pH du milieu en ion hydrogène (H^+) et en ion hypochlorite (ClO^-) (Rovel *et al*, 2011) :



L'acide hypochloreux (HClO) est le composé le plus actif dans les mécanismes de désinfection. C'est pourquoi, il est aussi appelé « chlore actif ». L'ion hypochlorite (ClO^-) est peu bactéricide et peu oxydant. La dissociation de l'acide hypochloreux est fonction du pH (Rovel *et al*, 2011) comme le montre la figure 2. L'OMS recommande un pH inférieur à 8 pour une désinfection efficace (OMS, 2017).

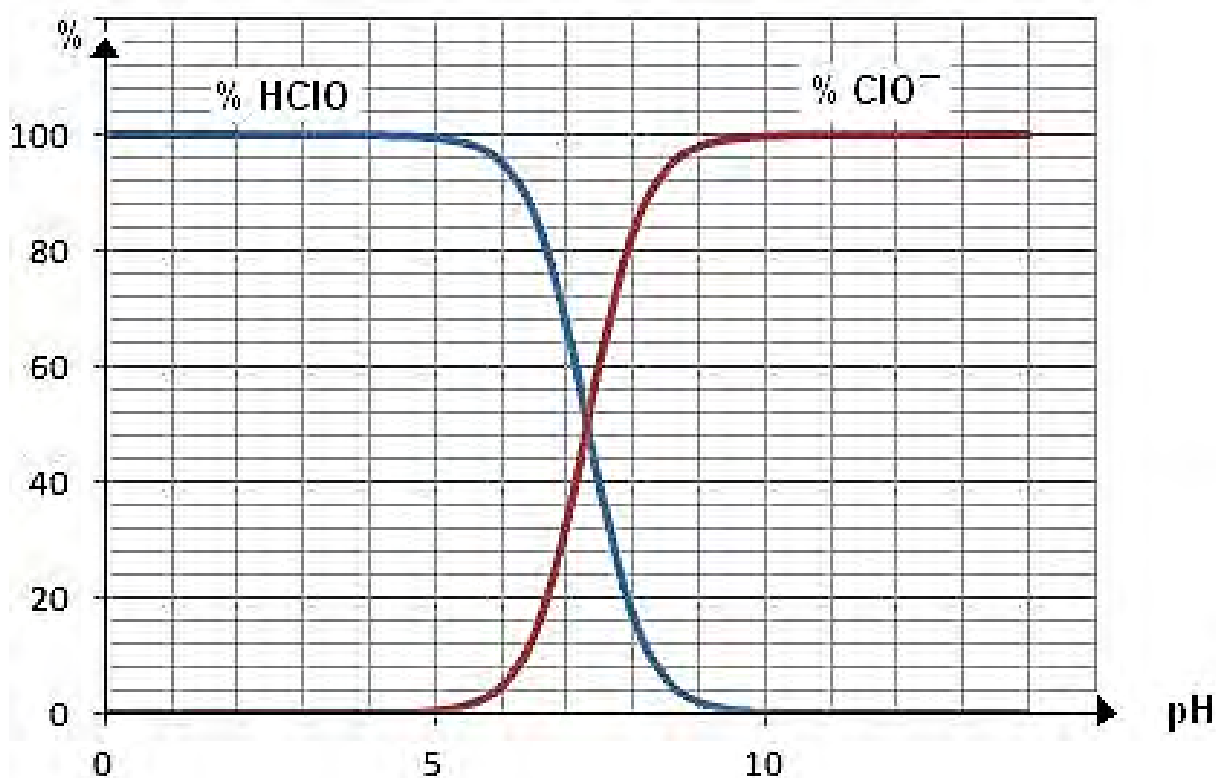


Figure 2. Taux de dissolution de l'acide hypochloreux en fonction du pH.

Source : <http://c.21-bal.com/doc/5420/index.html> (Consulter le 07/10/2019 à 15h30mn)

b. Température

La rapidité de l'effet bactéricide du chlore est proportionnelle à la température de l'eau. Cette rapidité augmente dans des eaux de température élevée. En revanche, elle diminue dans des eaux froides mais le chlore est plus stable dans l'eau froide, donc subsiste plus longtemps, ce qui compense dans une certaine mesure la lenteur de la réaction. Ces effets variables nécessitent d'ajuster les dosages du chlore en fonction des variations de la température (OMS, 2004).

c. Turbidité

Toute eau de surface contient des MES. Il s'agit de sédiments, essentiellement d'origine minérale comme l'argile, le limon, les microorganismes *etc*, qui se déposent au cours du temps dans les canalisations. Dans certaines conditions, par une remise en suspension de ces sédiments, l'eau devient trouble ou turbide (Tfeila et *al.*, 2016). La turbidité est exprimée en Unité de Turbidité Néphélométrique (UTN ou NTU pour *Nephelometric Turbidity Unit*), et donne une idée sur la teneur en MES (Soulama, 2011). Ces dernières peuvent être la cause du phénomène de turbidité qui favorise le développement bactérien et diminue l'efficacité du procédé de désinfection (Manitoba, 2011).

La présence de ces MES constitue une protection pour les bactéries contre l'action biocide du chlore. Le pouvoir germicide du chlore diminue fortement quand la turbidité de l'eau est élevée. Ainsi, les bactéries pathogènes s'incrusteront dans les MES et peuvent échapper à la désinfection (Soulama, 2011). L'OMS recommande une turbidité moyenne de l'eau à 1 NTU avant la désinfection. Elle peut occasionnellement dépasser cette valeur sans jamais atteindre 5 NTU dans le réseau de distribution (OMS, 2004).

d. Ammonium

Le terme ammoniac inclut les formes non ionisées (NH_3) et ionisées (NH_4^+). La présence de l'ammonium dans l'eau traduit habituellement un processus de dégradation incomplet de la matière organique. C'est donc un excellent indicateur de la pollution de l'eau par des rejets organiques d'origine agricole, domestique ou industriel. L'ammonium présent dans l'eau de boisson n'a pas un impact direct sur le plan sanitaire. C'est pourquoi aucune valeur guide n'est proposée (OMS, 2004). Cependant, l'ammonium peut compromettre l'efficacité de la désinfection, entraîner la formation de nitrites dans les réseaux de distribution, provoquer la défaillance des filtres pour l'élimination du manganèse et induire des problèmes de goût et d'odeur. En effet, l'ammonium réagit avec le chlore pour réduire le chlore libre et former des chloramines (OMS, 2017). Ces dernières sont des composés organiques azotés possédant un groupe NCl qui après hydrolyse libèrent l'acide hypochloreux. Ils ont un pouvoir de désinfection, mais ils sont environ 25 fois moins efficaces que le chlore libre (Rodier, 2011). Ces produits présentent deux principaux inconvénients : le problème des odeurs et de goût de l'eau, et la toxicité. De plus, la présence d'azote ammoniacal contribue à la consommation rapide de chlore. La méthode utilisée pour éliminer les chloramines est la chloration dite au « Break Point » (Figure 3). Si le « break-point » est satisfaisant, l'influence initiale de l'azote ammoniacal comme tout autre composé inorganique consommateur de chlore sera négligeable. Pour ajuster la quantité de chlore nécessaire et éviter la formation de chloramines, il faut déterminer le point d'inversion ou point critique ou « break point » marquant la fin de la formation des chloramines (odorantes et peu désinfectantes) et leur destruction. A partir de ce point, le chlore que l'on ajoute se retrouve sous forme libre, on a alors une action désinfectante. Pour éviter de se trouver en deçà du point critique, il est indispensable de mesurer le pH, la température, le chlore libre et la chloramine. Pour avoir une bonne désinfection, il est recommandé d'avoir plus de 0,5 mg/l de chlore libre dans l'eau après 30 minutes.

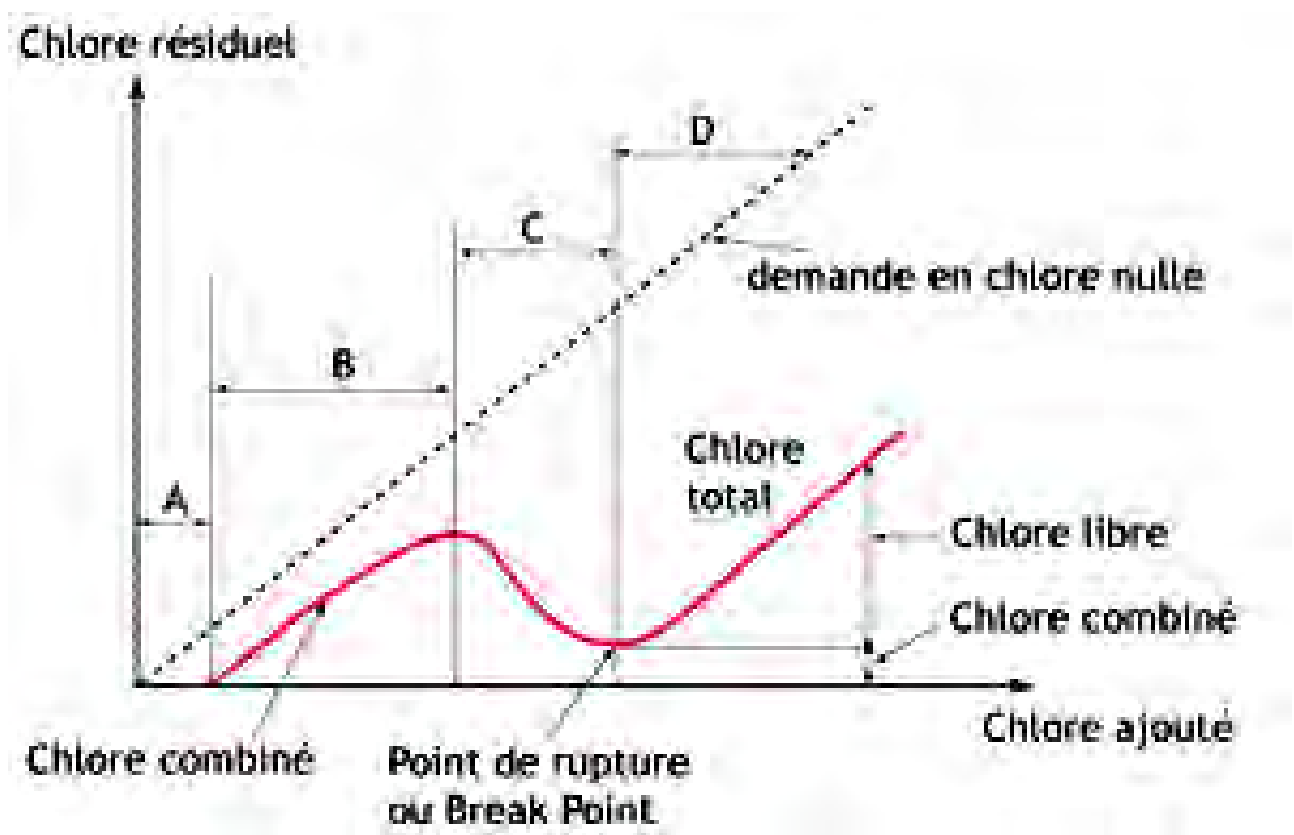


Figure 3. Courbe d'absorption du chlore

A : Destruction du chlore par les composés minéraux (fer, manganèse...) ;

B : Formation de composés chlorés organiques et de chloramines, réduction des monochloramines et des dichloramines, formation des trichloramines;

C : Destruction des chloramines par ajout de chlore supplémentaire correspondant au point de rupture (break-point) : les mono-, di et trichloramines ont pratiquement tous disparu ;

D : Production de chlore actif. Tout le chlore ajouté sera sous forme d'acide hypochloreux (HClO), mais il reste du chlore combiné (trichloramines et autres sous-produits de désinfection). Les trichloramines ont un très léger effet désinfectant, mais ils donnent un goût de chlore à l'eau.

Source : LMS World Water Treatment. Disponible sur: <http://www.lms-water.com/pratique/la-methode-du-break-point/> (Consulter le 10/10/2019 à 10h50mn)

e. Matière organique

La matière organique présente dans l'eau peut avoir une origine naturelle (activité biologique des milieux hydriques : décompositions des végétaux et des microorganismes, *etc.*) ou anthropique (pollution domestique, industrielle ou agricole) (Tfeila *et al*, 2016).

Le chlore réagit avec la matière organique présente dans les eaux naturelles, composée pour une large part de structures macromoléculaires complexes (substances humiques). Les divers mécanismes impliqués (addition, substitution, oxydation) conduisent à la formation de composés organochlorés, ou organo-bromés en présence simultanée d'ions bromure, et le plus souvent mixtes (chlorés et bromés), nommés organo-halogénés. Ces réactions procèdent suivant des vitesses réactionnelles variées, mais la formation des composés organo-halogénés peut se poursuivre pendant plusieurs dizaines d'heure. La concentration de ces composés varie en fonction des conditions de chloration (pH, température, dose de chlore introduite, temps de contact). Parmi les sous-produits de chloration formés, il faut noter principalement les trihalométhanes (THM) qui regroupent le chloroforme (CHCl_3), le dichlorobromométhane (CHCl_2Br), le chlorodibromométhane (CHClBr_2) et le bromoforme (CHBr_3). Ces quatre (4) composés ont un caractère volatil. La matière organique constitue une limite pour la qualité de l'eau désinfectée lorsque les THM sont inférieurs à 100 $\mu\text{g/L}$ (Rodier, 2011).

Les autres composés organo-halogénés formés ne sont pas tous identifiés, mais la fraction adsorbable sur du charbon actif fait l'objet d'une détermination. Il s'agit des acides chloroacétiques, chloroacétonitriles, chloraldéhydes, chlorocétones. Ces produits regroupés sous le terme AOX pour *Adsorbable Organic Halogen* ou Composés Organohalogénés Adsorbables, sont souvent confondus avec le terme TOX pour *Total Organohalogenated Compounds* ou Composés Organohalogénés Totaux, même si tous les organo-halogénés ne sont pas pris en compte, car ils peuvent être non adsorbables sur le charbon ou réduits (Rodier, 2011).

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

I. Zones d'étude

1. Présentation de la société de traitement des eaux brutes

1.1 Historique

Face aux difficultés rencontrées dans la distribution de l'eau dans les principales villes du Sénégal en particulier la ville de Dakar, les autorités sénégalaises, ont fini par adhérer à la proposition des bailleurs de fonds, à savoir la restructuration du secteur de l'eau dans ses principales composantes que sont :

- La distribution et la gestion technique et commerciale de l'eau ;
- La gestion du patrimoine et le contrôle de la qualité de l'exploitation et du service ;
- L'assainissement : exploitation et traitement des eaux usées.

Au Sénégal, en 1995, la réforme du secteur de l'hydraulique urbaine et de l'assainissement a donné naissance à trois structures :

- Une société nationale chargée de la gestion de l'ensemble du patrimoine hydraulique de l'Etat en zone urbaine et périurbaine ainsi que du contrôle de la qualité de l'exploitation du service public de production et de distribution ;
- Un Office national de l'Assainissement qui s'occupe des travaux d'assainissement ainsi que de l'exploitation et de la maintenance des ouvrages ;
- Une société chargée de l'exploitation, de la distribution et de la gestion commerciale des eaux de consommation sur la base d'un contrat d'affermage. Cette société a été mon lieu de stage.

1.2 Organisation administrative de la structure d'accueil

Elle compte plusieurs directions (Figure 5). L'animation, la coordination et la supervision au sein de l'entreprise sont assurées par la Direction Générale.

Le stage qui a permis de réaliser ce document a été effectué à la direction de traitement des eaux rattaché à la direction technique et du contrôle.

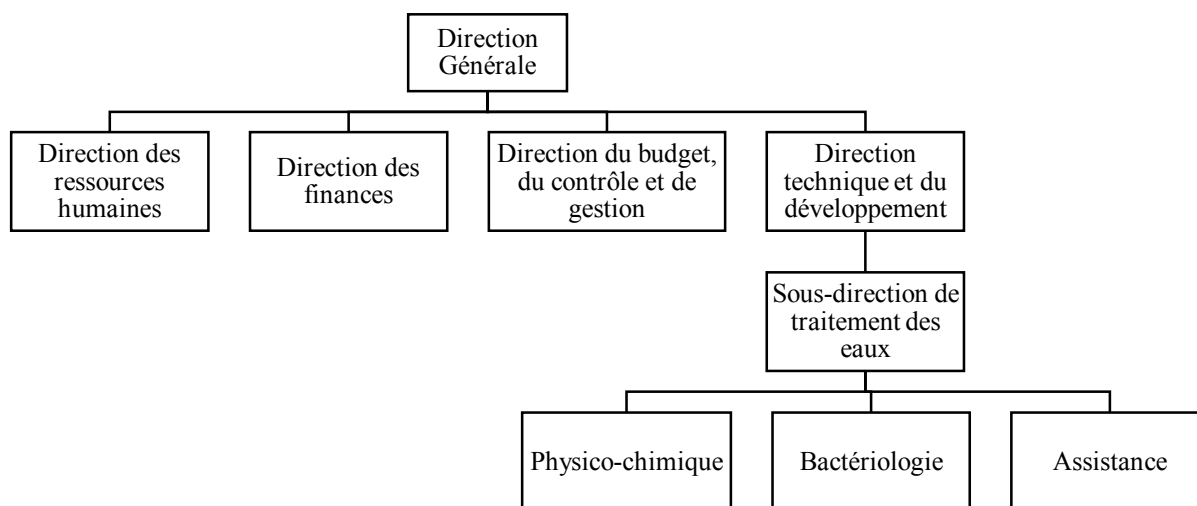


Figure 4. Organigramme de la structure d'accueil

1.3 Sous-direction de Traitement des Eaux

La mission de la sous-direction est d'appliquer la stratégie de la société en matière de surveillance de la qualité des eaux et de l'optimisation des filières de traitement des eaux. Cette stratégie repose sur l'organisation de cette sous-direction composée de :

- la section microbiologique chargée du contrôle de la qualité microbiologique ;
- la section physico-chimique chargée du contrôle physico-chimique des eaux ;
- la section assistance chargée d'assister les exploitations en matière de traitement.

Son objectif est d'assurer la surveillance de la qualité des eaux conformément aux recommandations qui définissent le nombre de contrôle en fonction de la population desservie.

1.3.1 Section microbiologie

Elle est chargée de la surveillance de la qualité microbiologique des eaux en effectuant des analyses quotidiennes suivant un planning qui définit les points et les fréquences de prélèvements partout au Sénégal. Le contrôle microbiologique consiste à la recherche et au dénombrement de quatre (4) principaux types de micro-organismes : les germes totaux (GT), les coliformes totaux (CT), les coliformes fécaux (CF) et les streptocoques fécaux (SF).

Les objectifs assignés à cette section sont :

- La vérification des appareils de mesure ;
- L'analyse de 10 000 échantillons par année.

Ces contrôles s'effectuent selon deux techniques : la filtration sur membrane pour les CT, CF et SF, et l'incorporation en gélose pour les GT.

1.3.2 Section chimie

Elle est chargée de l'analyse physico-chimique des eaux selon un planning annuel à respecter strictement. Le contrôle de la qualité physico-chimique de l'eau consiste à déterminer les éléments physiques (température, pH, turbidité, conductivité) ; les ions majeurs (Cl^- , Na^+ , ...) ; les indices de pollution (matières organiques, nitrates, nitrites...) et les éléments indésirables (fer, manganèse, ...).

Les objectifs fixés à cette section sont :

- L'analyse de 2500 échantillons par année ;
- La réalisation des opérations d'étalonnage et la vérification des appareils de mesure ;
- Le contrôle de la qualité physico-chimique de l'eau.

Ces contrôles s'effectuent principalement selon deux principes : la colorimétrie et la volumétrie.

1.3.3 Section Assistance à l'exploitation

Elle assure la liaison entre le laboratoire et l'exploitation. Cette section possède le matériel de jar test pour la coagulation, la floculation et la désinfection. Elle s'occupe de la désinfection, du suivi des consignes de traitement et de la formation des agents de la production.

Ses objectifs sont :

- La réalisation de 116435 contrôles de chlore résiduel par année ;
- Le respect des délais de réponse (24 h) suite aux réclamations des clients ;
- La planification des visites de la Direction Régionale (DR) ;
- La formation de tous les agents de traitement.

2. Système Qualité Sécurité Environnement (QSE)

La structure d'accueil est certifiée selon la norme internationale ISO 9001 version 2000 depuis juillet 2002. La certification décernée par l'AFAQ, l'un des tous premiers certificateurs mondiaux, concerne les activités de l'entreprise dans l'exploitation, le traitement, la distribution d'eau potable et la gestion de la clientèle.

Cette consécration fait de la structure d'accueil la première société sénégalaise assurant un service public à être certifiée dans une norme ISO. Elle est également la première société d'eau du continent africain à obtenir une certification dans la norme ISO 9001 version 2000 basée sur le management des processus et la satisfaction des clients.

3. Site de prélèvement des eaux brutes

Les eaux brutes ont été prélevées au lac de Guiers situé dans le haut Delta du fleuve Sénégal. De ce plan d'eau d'une superficie de 170 km², provient la ressource d'eau brute traitée par la station de traitement et de pompage d'eau potable de Keur Momar Sarr pour l'approvisionnement de l'agglomération dakaroise. Keur Momar Sarr (15°55'N, 15°57'W) est devenue une commune en 2014. Elle est située au Nord-Ouest du Sénégal, à 52 kilomètres de la région de Louga (Figure 4). Elle est limitée au Nord par la commune de Ross Béthio, au Sud par celle de Nger Malal, à l'Est par celle de Syer et à l'Ouest par celle de Sakal. Keur Momar Sarr couvre une superficie d'environ 760 kilomètres carrés, pour 84 villages. Cette commune appartient à la région écologique sahélienne caractérisée par une alternance de deux saisons annuellement contrastées (hivernage et saison sèche) (CR, PAER Louga, 2007).

Les températures moyennes annuelles sont très élevées avec des variations interannuelles très importantes (CR, PAER Louga, 2007). Par ailleurs, le climat est fortement influencé par le microclimat relativement doux du complexe lac de Guiers-Bas Ferlo. La végétation est dominée par un tapis herbacé bien fourni après les années de bonne pluviométrie et une strate arbustive, arborée peu dense (CR, PAER, Louga, 2007).



Figure 5. Carte du Sénégal affichant le site de prélèvement des eaux brutes

Source : Sambou, 2012

II. Matériel et méthodes

1. Préparation des échantillons

Les prélèvements d'eau ont été effectués au lac de Guiers à Keur Momar Sarr (KMS). Ils ont été prélevés dans des bouteilles de 10 L puis acheminés au laboratoire de traitement des eaux à Dakar afin de mesurer les paramètres physico-chimiques : le potentiel d'Hydrogène (pH), la température (exprimée en °C), la conductivité, la turbidité (exprimée en NTU), les teneurs en ammonium et en matières organiques. Ensuite, l'eau a été répartie dans des flacons de 500 ml pour réaliser la chloration. Les niveaux de concentration de chlore utilisés sont 2 ; 2,5 ; 3 ; 3,5 ; 4 ; 4,5 ; 5. Pour chaque niveau nous disposons de 3 flacons c'est à dire une répétition de 3 a été effectuée. Les teneurs en ammonium et en matières organiques ont été mesurées séparément dans l'eau brute. Concernant l'analyse bactériologique, une autre série de prélèvements a été effectuée à partir de l'eau déjà chlorée à l'aide de flacons stériles de 500 ml contenant du thiosulfate.

2. Analyse physico-chimique--

2.1 Eaux brutes non chlorées

2.1.1 Mesure de la Turbidité

La turbidité de l'eau brute a été appréciée par la méthode de la néphélométrie. Elle consiste à mesurer l'intensité de la lumière diffractée par les particules sphériques de substances non absorbantes. Pour cela, des cuvettes ont été remplies avec de l'eau brute jusqu'au trait de jauge. Elles ont été introduites dans un turbidimètre (Figure 6). La lecture a été réalisée suivant les instructions du fournisseur.



Figure 6. Turbidimètre 2100Q et des accessoires

2.1.2 Mesure du pH

Le pH de l'eau brute a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre type « PHC101 » (Figure 7) fourni par HACH, selon la méthode de la potentiométrie. Elle consiste à rincer l'électrode avec de l'eau distillée et à l'introduire dans un bécher contenant 500 ml de l'échantillon d'eau brute. La lecture a été réalisée suivant les instructions du fournisseur.



Figure 7. pH-mètre type “PHC101” et des accessoires

2.1.3 Mesure de la Température et conductimétrie

La température et la conductivité de l'eau brute ont été mesurées à l'aide d'un multimètre « HQ40D » (Figure 8) fourni par HACH. Pour mesurer ces paramètres, l'électrode a été rincée à l'eau distillée puis plongée dans un bécher contenant de l'eau brute. Les valeurs de température et de conductivité ont été lues sur l'écran.



Figure 8. Multimètre HQ40D

2.2 Chloration des eaux brutes

2.2.1 Préparation de la solution initiale

La solution initiale (S_0) de chlore a été préparée en dissolvant 1,065 g de l'hypochlorite de calcium (HTH) dans un litre d'eau distillée. Elle a été ensuite analysée avec la méthode iodométrique qui consiste à doser l'iode libre par emploi d'une liqueur titrée de thiosulfate de sodium.

2.2.2 Chloration de l'échantillon

Suite à la préparation de la solution initiale de chlore de concentration (C_0), les eaux brutes ont été chlorées en prélevant un volume V_0 (en mL) de S_0 afin d'obtenir une gamme de concentrations croissantes (C_x) de 2 ; 2,5 ; 3 ; 3,5 ; 4 ; 4,5 et 5 mg/L de chlore dans un volume (V_x) d'un litre d'eau brute, suivant la formule $C_0V_0 = C_xV_x$.

2.3 Eaux brutes chlorées

2.3.1 Détermination du taux de matière organique

Le taux de MO a été apprécié par la méthode de l'oxydabilité au permanganate. Elle consiste à mesurer la quantité de dioxygène nécessaire à l'oxydation totale de la matière organique. Pour cela, 100 ml d'eau brute non chlorée et chlorée ont été séparément déposés dans des erlenmeyers puis 2,5 ml d'acide sulfurique au 1/2 ont été ajoutés. Les mélanges ont été portés à ébullition sur une plaque chauffante. 10 ml de permanganate de potassium ($KMnO_4$) N/80 ont été ensuite ajoutés à l'aide d'une pipette graduée. Les mélanges ont été maintenus sur la plaque chauffante pendant 10 mn puis refroidis sous le robinet. 10 ml de sel de MOHR ont été ajoutés aux mélanges refroidis afin de les décolorer. Le permanganate a été versé par goutte à goutte dans les solutions finales jusqu'à l'obtention d'une légère teinte rose. Un essai à blanc (sans permanganate) a été réalisé avec 100 ml d'eau distillée.

Soient A et B les volumes respectifs de l'essai à blanc et de l'échantillon traité (eau brute non chlorée et eau brute chlorée). La dose de matière oxydable par le permanganate, exprimée en mg/L d'oxygène, est égale à la différence des volumes de A et de B.

2.3.2 Détermination du taux d'ammonium

Le taux d'ammonium a été mesuré par la méthode colorimétrique. Elle nécessite au préalable une réaction colorée spécifique de l'élément recherché. Pour cela, des éprouvettes graduées de 25 ml ont été séparément remplies jusqu'à leur trait de jauge avec l'eau brute non chlorée, chlorée et eau distillée (blanc). Trois gouttes de stabilisateur minéral ont été ajoutées dans chaque éprouvette.

Les mélanges ont été homogénéisés puis 3 gouttes de l'agent dispersant à l'alcool polyvinylique ont été ajoutées, séparément, dans chaque éprouvette. Les mélanges ont été à nouveau homogénéisés. Un millilitre du réactif de Nesle a été ajouté dans chaque éprouvette puis les mélanges ont été homogénéisés à nouveau. 10 ml de chaque solution finale ont été transférés dans des cuves carrées distinctes. Ces dernières ont été placées séparément dans un colorimètre (Figure 9) de type HACH. La lecture a été faite suivant les instructions du fournisseur. Les résultats sont exprimés en mg/L de NH_4^+ .



Figure 9. Colorimètre HACH

2.3.3 Mesure du chlore résiduel

Le chlore libre a été mesuré par le colorimètre de poche (Figure 10) de type HACH. Une cuvette a été remplie avec 10 ml d'eau brute chlorée après 30 minutes ou 2 heures, puis le contenu d'un sachet DPD (Figure 10) a été ajouté. Le mélange a été homogénéisé pour dissoudre la poudre. En présence de chlore, une coloration rose apparaît. La cuvette a été essuyée pour éliminer l'excès d'eau ou toute trace de doigt. Ensuite, elle a été placée dans le puits de mesure du colorimètre en disposant le losange vers l'avant de l'appareil. La lecture a été réalisée suivant les instructions du fournisseur. Le résultat est exprimé en mg/L de chlore libre (Cl_2).



Figure 10. Colorimètre de poche et des sachets DPD

3. Analyse bactériologique

L'analyse bactériologique a porté sur 4 types de bactéries :

- Les germes totaux ;
- Les coliformes totaux ;
- Les coliformes fécaux ;
- Les entérocoques.

Ces microorganismes sont des indicateurs de l'efficacité du traitement de l'eau. Ils permettent de déterminer le degré de pollution produite par les matières fécales (CEAEQ, 2000) dans l'eau.

L'analyse bactériologique a été réalisée sur les eaux brutes non/et chlorées en fonction du type de bactérie suivant deux techniques :

- La filtration sur membrane, pour dénombrer les coliformes totaux et fécaux, et les entérocoques ;
- L'incorporation en gélose, pour compter les germes totaux.

3.1 Technique de filtration sur membrane

Cette méthode utilise des membranes de filtration dont les pores sont de 0,45µm de diamètre. Le dispositif comprend une rampe de filtration munie de deux entonnoirs reliés à une pompe sous vide (Figure 11). Le protocole de filtration sous vide comprend les étapes suivantes :

- La stérilisation des pinces, des entonnoirs et des mailles du filtre à rampe ;
- La fermeture du robinet du support et la mise en marche de la pompe sous vide ;
- Le prélèvement d'une membrane stérile en la saisissant par son bord extérieur à l'aide d'une pince stérile ;
- Le dépôt de la membrane sur la plaque poreuse ;
- L'installation de l'entonnoir-réservoir sur la membrane et du dispositif de fixation ;

- L'homogénéisation du flacon d'eau et le versement de son contenu dans le réservoir jusqu'au repère 50 ou 100 ml ;
- L'ouverture du robinet du support jusqu'à dessèchement de la membrane ;
- La fermeture du robinet et le retrait du dispositif de fixation ;
- Le prélèvement de la membrane de la plaque poreuse à l'aide d'une pince stérile et son introduction dans une boîte de Pétri contenant un bouillon gélosé.

Cette technique permet le dénombrement des coliformes totaux, des coliformes fécaux et des entérocoques.

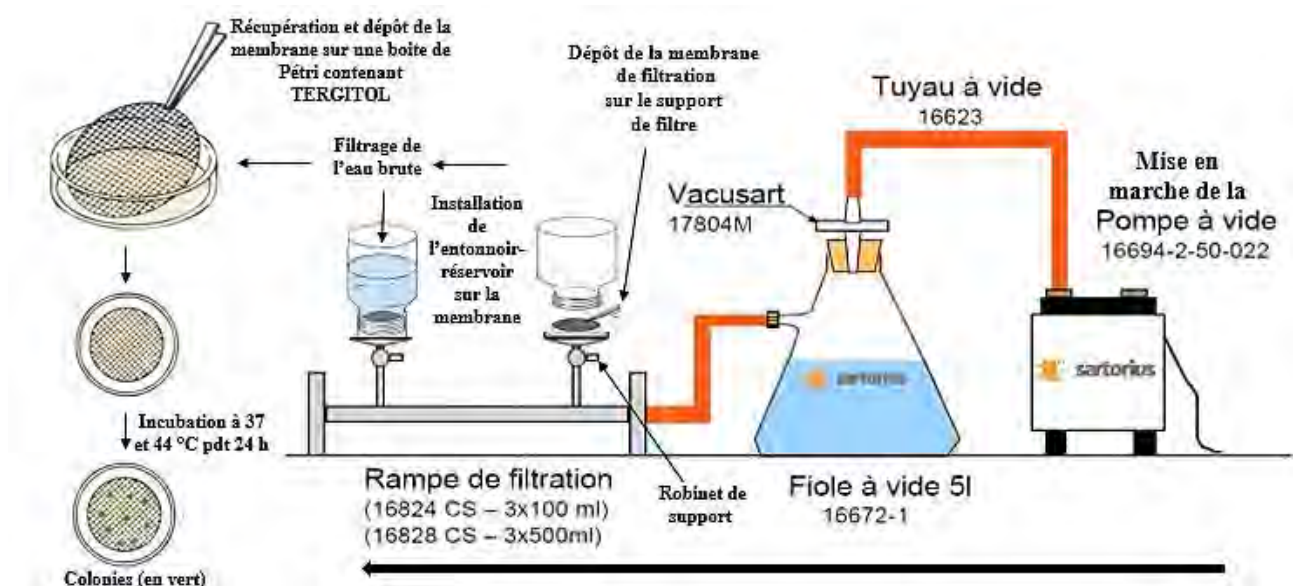


Figure 11. Dispositif d'une rampe de filtration

Source : Modifié à partir de www.google.com/search?q=rampe+de+filtration (consulté le 07/10/2019 à 10h50mn)

3.2 Technique de l'incorporation en gélose

La méthode fréquemment utilisée pour les bactéries aérobies revivifiables (Figure 12), consiste à ensemer 1 ml d'eau brute dans une boîte de Pétri de 90 à 100 mm de diamètre, puis ajouter le milieu gélosé, fondu et ramené à une température de 45 °C environ, enfin incuber les boîtes de Pétri à 37 °C pendant 24 heures. Le milieu de culture est le PCA (Plate Count Agar). Ce milieu est constitué de tryptone (5,0 g), extrait de levure (2,5 g), glucose (1,0 g), agar (15,0 g) par litre. Le pH est de 7,0.

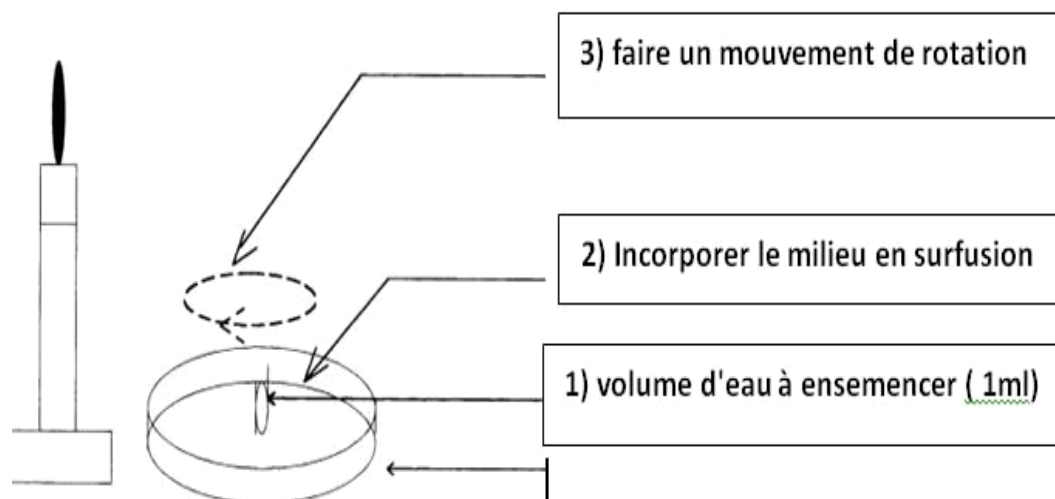


Figure 12. Etapes d'une incorporation en gélose

Source : <http://m.20-bal.com/pravo/638/index.html>. (Consulté le 06/01/2020 à 13h51mn)

3.3 Culture bactérienne

Les germes totaux et les entérocoques ont été cultivés respectivement dans les milieux PCA (Plate Count Agar) et BEA (Bile Esculine Azide Agar) puis incubés à 37 °C pendant 24 heures. Les coliformes totaux et fécaux ont été ensemencés dans le milieu TERGITOL puis incubés à 37 °C et 44 °C respectivement pendant 24 heures. Les milieux de culture gélosés (PCA, BEA et TERGITOL) sont soit prêt à l'emploi ou sous forme déshydratée.

4. Dénombrement des bactéries

4.1 Dénombrement des coliformes

La lecture des boîtes de Pétri reposait sur la reconnaissance des bactéries à travers la couleur. Les coliformes présentent une coloration jaune ou orange de leurs colonies, résultant de l'absence de réduction du TTC par ceux-ci. En général, les bactéries *Escherichia coli* présentent une coloration nettement orangée.

4.2 Dénombrement des entérocoques

Après filtration, la membrane de cellulose a été appliquée à la surface du milieu nutritif (BEA) contenant des substances inhibitrices qui permettent le développement préférentiel des colonies de streptocoques fécaux. La lecture des boîtes a permis de reconnaître les entérocoques par une coloration rouge, violette ou rose visible.

4.3 Expression des résultats

Les résultats ont été exprimés en unité formant des colonies (UFC) par 100 ml (UFC/100 ml) et en nombre de microorganismes revivifiables par millilitre. Le tableau ci-dessous interprète les valeurs guide de l'OMS en fonction des microorganismes.

Tableau 4. Normes de l'Organisation mondiale de la santé

Microorganismes	Valeur guide OMS
Coliformes totaux	Non détectable dans un échantillon de 100 ml (0 UFC/100 ml).
Coliformes thermotolérants ou <i>Escherichia coli</i>	Non détectable dans un échantillon de 100 ml (0 UFC/100 ml).
Streptocoques fécaux	Non détectables dans un échantillon de 100 ml (0 UFC/100 ml).
Flore aérobie mésophile totale à 37 °C	Inférieur à 2000 UFC dans un échantillon de 1 ml

5. Traitement des données

Les données ont été collectées puis analysées à l'aide du logiciel Excel 2013. Les tests statistiques ont été effectués grâce au logiciel Sigma Plot version 2011. Une analyse de Variance (ANOVA) a été effectuée pour déterminer l'effet du chlore sur les bactéries. Un test de comparaison multiple (test-T de student) a été ensuite réalisé pour comparer les effets deux à deux. Une différence est considérée significative si la probabilité *p-value* est inférieure à 0,05 ($p\text{-value} \leq 0,05$).

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

I. Résultats

Des prélèvements d'eau brute ont été effectués au niveau de la prise d'eau à l'usine de Keur Momar Sarr dans le but d'analyser la qualité de l'eau. Le traitement des eaux a été effectué par la chloration (utilisation du chlore) selon le procédé décrit dans la partie matériel et méthodes. Le chlore inhibe l'activité microbienne dans l'eau et maintient sa potabilité dans les réseaux de distribution. Cependant, son action est parfois limitée par des paramètres physico-chimiques et biologiques. Mon stage de Master 2 a porté sur l'analyse des facteurs physico-chimique et biologique qui limitent l'efficacité du chlore. Cette approche a donné certains résultats.

1. Analyse physico-chimique

1.1 Eaux brutes non chlorées

La caractérisation physico-chimique de l'eau brute non chlorée montre que les échantillons prélevés ont un pH moyen de 7,60 qui est inclus dans la plage de normalité de l'OMS ($6,5 < \text{pH} < 8$). Ce pH est favorable à la formation de chlore actif (acide hypochloreux). L'eau brute est faiblement minéralisée (conductivité moyenne est égale à 218,06). La température est environ égale à 25°C.

Tableau 5. Paramètres physico-chimiques des eaux brutes non chlorées

Paramètres Echantillon	Turbidité (NTU)	pH	Température (°C)	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Matière Organique (mgO_2/l)	Ammonium (mg/l NH_4^+)
P1	15,4	7,92	25,7	305	9,8	0,66
P2	10,7	7,5	25,3	243	6,5	0,39
P3	4,39	7,4	25	106,2	5	
Normes OMS	< 1 - 5	6 - 9	25	50 - 1500	< 5	0

P = Prélèvement

1.2 Eaux brutes chlorées

1.2.1 Relation entre le chlore et la matière organique en fonction de la turbidité

Le tableau de distribution des covariances montre qu'il y a un effet hautement significatif de l'interaction chlore et turbidité ($pV < 0,0001$). Donc l'effet du chlore sur la matière organique est fonction de la turbidité.

Tableau 6: Distribution de la covariance

Paramètres	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Significativité
Chlore	1	42.6	42.64	180.29	$< 2^{e-16}$	***
Turbidité	2	549.2	274.58	1160.90	$< 2^{e-16}$	***
Chlore:Turbidité	2	10.0	5.00	21.12	8.13^{e-08}	***
Residuals	66	15.6	0.24			

La figure 13 montre que l'augmentation des concentrations de chlore se traduit par une diminution significative de la matière organique selon le niveau de turbidité ($pV < 0,0001$, Tableau 1). Cette relation chlore/matière organique est beaucoup plus importante pour les niveaux de turbidité 10,7 et 4,39 comparé au niveau de turbidité 15,4.

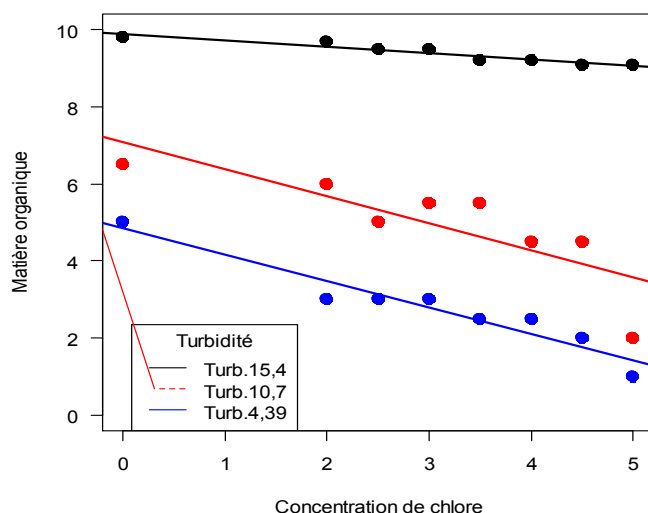


Figure 13: relation entre les concentration de chlore et la matière organique à chaque niveau de turbidité.

1.2.2 Relation entre le chlore et l'ammonium en fonction de la turbidité

Le tableau de distribution des covariances montre qu'il y a un effet hautement significatif de l'interaction chlore et turbidité ($pV < 0,0001$). Donc, l'effet du chlore sur l'ammonium est fonction de la turbidité

Tableau 7: Distribution de la covariance

Paramètres	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Significativité
Chlore	1	0.3323	0.3323	226.17	< 2e-16	***
Turbidité	1	0.3888	0.3888	264.62	< 2e-16	***
Chlore:Turbidité	1	0.0686	0.0686	46.67	2.02e-08	***
Residuals	44	0.0646	0.0015			

La figure 14 montre que l'augmentation des concentrations de chlore se traduit par une diminution significative de l'ammonium selon le niveau de turbidité ($pV < 0,0001$, Tableau 7). Cette relation chlore/ammonium est beaucoup plus importante pour le niveau de turbidité 15,4 comparé au niveau de turbidité 10,7.

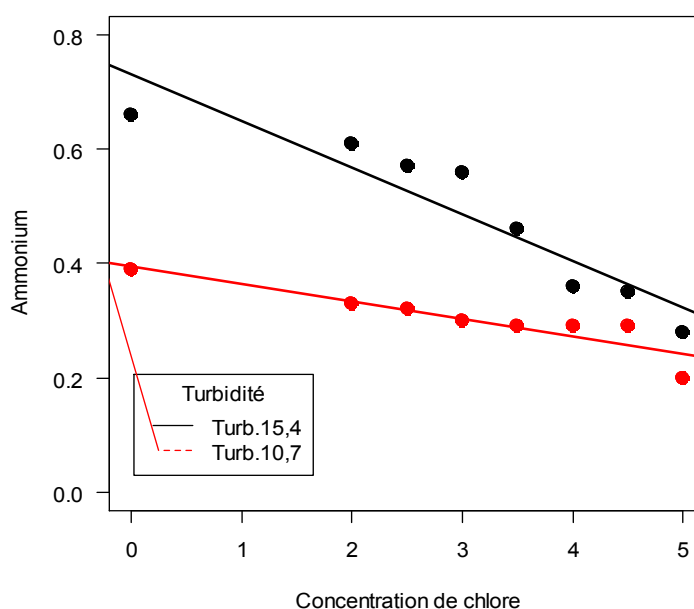


Figure 14: Relation entre les concentrations de chlore et l'ammonium à chaque niveau de turbidité

2. Analyse bactériologique

2.1 Eaux brutes non chlorées

L'analyse bactériologique montre que l'eau brute est constituée d'un bouillon de microorganismes dont la présence de germes totaux, de coliformes et d'entérocoques est excessive (tableau 8).

Tableau 8: Paramètres bactériologiques des eaux brutes non chlorées

Microorganismes Echantillon	Germes totaux (UFC)	Coliformes totaux (UFC)	Coliformes fécaux (UFC)	Entérocoques (UFC)
P1	2000	100	100	100
P2	2000	100	100	100
P3	2000	100	100	100
Normes OMS (UFC)				
Pour 100 mL d'eau brute	< 2000	0	0	0

2.2 Effet sur les germes totaux

Le tableau 9 présente la matrice de corrélation entre les paramètres étudiés. Une corrélation positive est observée entre la turbidité et la matière organique ($r=0,93$) et entre la turbidité et l'ammonium ($r=0,69$). Egalement une corrélation positive est observée entre la matière organique et l'ammonium ($r=0,76$) et entre la matière organique et les germes totaux ($r=0,53$). Par contre, une corrélation négative (inverse) est observée entre le chlore et l'ammonium ($r=0,61$) et entre le chlore et les germes totaux ($r=0,83$).

Tableau 9: Matrice de corrélation des paramètres étudiés.

Paramètres	Turbidité	Matière organique	Chlore	NH ₄ ⁺	Germes totaux
Turbidité	1.00				
Matière organique	0.93	1.00			
Chlore	0.00	-0.24	1.00		
NH ₄ ⁺	0.69	0.76	-0.61	1.00	
Germes totaux	0.34	0.53	-0.83	0.66	1.00

La régression des autres paramètres étudiés sur les germes totaux est présentée sur dans le tableau 10 et la figure 14. Ils agissent significativement sur les germes totaux. La turbidité et la matière organique agissent positivement sur les germes totaux avec des coefficients de régression respectifs de 0,05 et 0,17. Par contre, le chlore et l'ammonium agissent négativement sur les germes totaux avec les coefficients de régression respectifs de -0,63 et -3,13.

Tableau 10: Régression des germes totaux par la turbidité, la matière organique, le chlore et l'ammonium

Paramètres	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	Significativité
(Intercept)	8.51445	0.04236	201.015	< 2e-16	***
Chlore	-0.62823	0.01236	-50.821	< 2e-16	***
Turbidité	0.05456	0.01302	4.189	2.81e-05	***
M.O.	0.17338	0.01133	15.306	< 2e-16	***
NH ₄ ⁺	-3.12981	0.10501	-29.804	< 2e-16	***

L'effet des paramètres susmentionnés sur les germes totaux est traduit sur la figure 14 suivant les coefficients de régression.

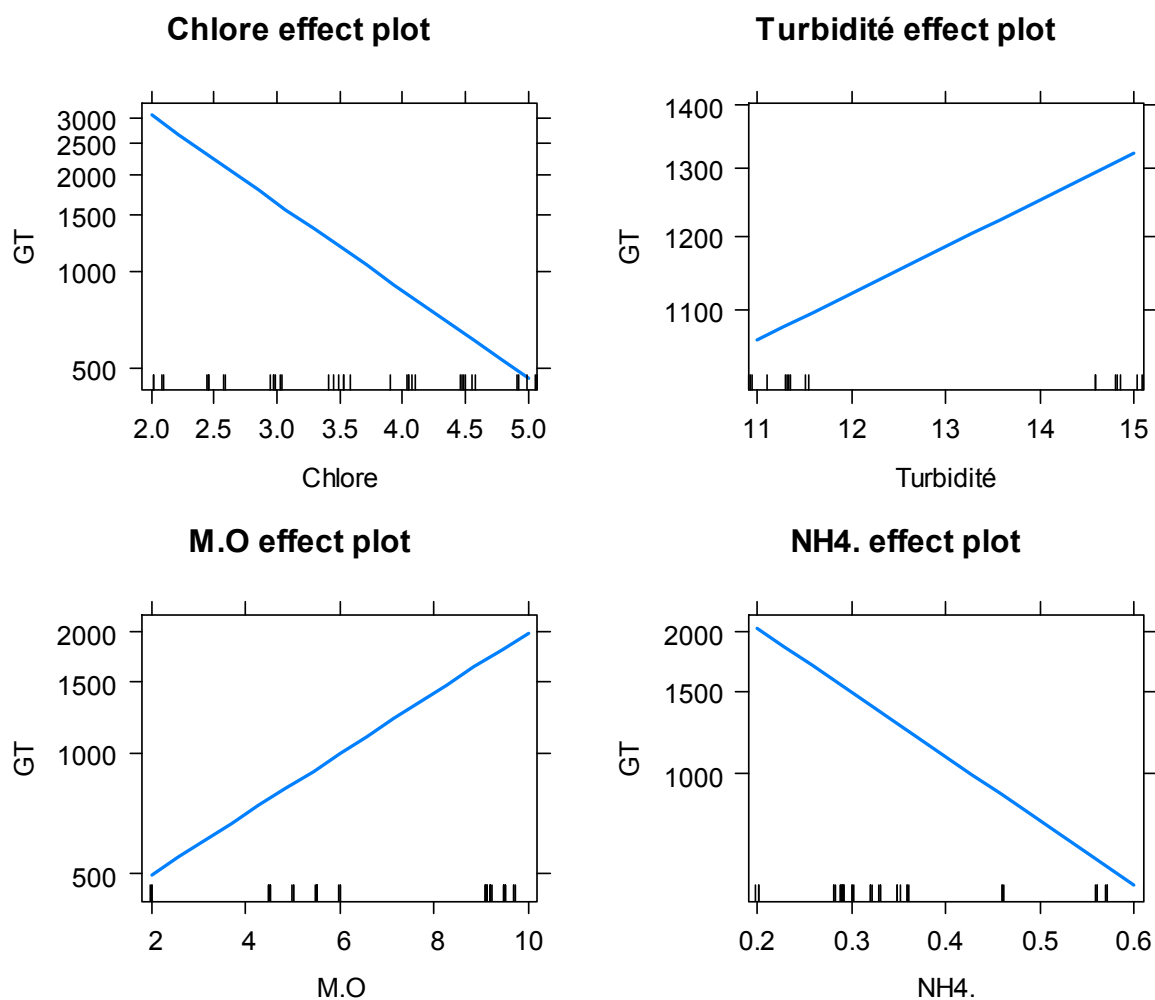


Figure 15: Effet du chlore, de la turbidité, de la matière organique (M.O) et de l'ammonium (NH₄⁺) sur les germes totaux (GT)

II. Discussion

1. Désinfection par le chlore

Nos résultats indiquent que le chlore agit de manière différente sur les germes totaux, les coliformes et les entérocoques en fonction de sa concentration (2 à 5µg/ml) et du temps de contact (30 min et 2 heures).

Le chlore élimine les micro-organismes en dénaturant la membrane de la cellule. Cet affaiblissement entraîne l'entrée du chlore dans la cellule. Cette entrée empêche la respiration cellulaire (blocage de l'activité enzymatique) et la dégradation de l'ADN. Or, ces deux éléments sont nécessaires pour la survie de la cellule. Nos résultats sont similaires à ceux de Tempo *et al* (2014) qui ont montré l'action bactéricide complète du chlore sur les coliformes totaux. Achour et Guergazi, (2002) ont montré que le chlore est capable de désinfecter les eaux en les rendant potables du point de vue bactériologique et de fournir un résiduel de désinfection dans l'eau pour prémunir contre les contaminations occasionnelles.

Cependant, les entérocoques étaient présents dans certains échantillons après chloration. En effet, les entérocoques sont plus résistants à la désinfection comme l'a indiqué le rapport de l'OMS en 2004.

L'action du chlore sur les germes totaux pourrait être influencée par la turbidité de l'eau, les taux de matière organique (MO) et d'ammonium dans l'eau.

2. Influence de la turbidité de l'eau sur la désinfection par le chlore

Nos analyses ont montré que le nombre de germes présents dans l'eau brute est proportionnel au niveau de turbidité de l'eau. En effet, plus la turbidité est élevée, plus le nombre de germes présents dans l'eau est important. Ces résultats obtenus confirment bien l'effet protecteur de la turbidité sur les germes dans l'eau brute. Ainsi, l'effet le plus important lié à la turbidité est probablement sa capacité à protéger les micro-organismes contre la désinfection (Thayer, 2007). Un résultat similaire a été obtenu par Ghazali et Zaid, (2013) qui ont montré qu'une forte turbidité pourrait permettre la fixation des micro-organismes sur les particules en suspension dans l'eau. En effet, ces matières en suspension servent de nourriture aux bactéries permettant à celles-ci de se reproduire continuellement dans l'eau brute. Ainsi, la présence de MES dans l'eau peut induire à la formation de certains produits lors de la désinfection qu'on appelle les

sous produits de la désinfection. Par exemple, la présence de MO peut entraîner la formation de Tri Halo Méthane (THM).

La turbidité réduit l'efficacité du chlore en abritant les bactéries. Donc, en présence de forte turbidité la dose de chlore doit être ajustée en tenant compte de la demande.

3. Influence de la matière organique et de l'ammonium sur la désinfection par le chlore

Le taux de MO est proportionnel à la concentration de chlore résiduel de l'eau brute. Nos résultats indiquent que la MO affecte l'efficacité du chlore selon le niveau de turbidité des eaux brutes. En effet, le chlore est consommé par la matière organique. La cinétique de consommation du chlore dépend de la nature de la matière organique. En présence d'acide gallique et de substance humique, 70 % et 55 % de chlore sont consommés respectivement dans les eaux naturelles et distillées (Achour, 2016 ; 2017).

En outre, en présence de MO et d'ammonium, il y a une réaction de compétition lors de la désinfection (Achour, 2012). L'ammonium réagit en premier avec le chlore (OMS, 2017). Cette forte consommation de chlore par l'ammonium entraîne une production de composés organochlorés tels que les chloramines minérales ou organiques.

La présence de matières organiques et de l'ammonium dans l'eau rend donc difficile la désinfection et favorise la prolifération bactérienne (OMS, 2017).

4. Temps de contact

Nous avons observé une action bactéricide du chlore qui est différente en fonction du temps de contact avec les microorganismes, de la concentration de chlore et de la turbidité de l'eau. Lorsque les taux de chlore sont faibles, la réduction des microorganismes n'est significative qu'après 2 heures de contact. Par contre, pour les taux élevés de chlore, 30 minutes suffisent pour réduire significativement les bactéries. Cette variation du temps de contact met en évidence l'importance du concept *Ct* puisqu'elle détermine la dose requise de chlore à injecter dans une eau trouble. Comme l'a suggéré Soulama, (2011), le temps de contact doit être inversement proportionnel au taux de chlore à injecter.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'influence de plusieurs facteurs sur la désinfection par le chlore a été analysée en utilisant des prélèvements d'eau brute du lac de Guiers comme échantillon.

Nous avons étudié l'influence de la turbidité de l'eau sur la désinfection par le chlore. L'étude a révélé que le nombre de germes totaux est corrélé au niveau de turbidité de l'eau. De plus, l'action bactéricide du chlore est efficace à des concentrations élevées de chlore pendant un temps relativement long (2 heures).

Par ailleurs, d'autres analyses ayant porté, sur l'influence des matières organiques et de l'ammonium sur la désinfection par le chlore, ont montré ces paramètres affectent l'efficacité du chlore en fonction du niveau de turbidité des eaux prélevées.

Ces résultats indiquent que l'efficacité du chlore dépend d'une concentration relativement élevée et nécessite un temps de contact assez long.

Cependant, en présence de matières organiques, la désinfection avec le chlore peut induire à la formation de Tri-Halo-Méthane(THM) et d'autres sous produits. Les risques liés à la consommation de ces sous produits sont l'avortement spontané et les cancers de la vessie et probablement du colon chez les sujets ayant consommés de l'eau chlorée pendant trente cinq ans ou plus. C'est pourquoi, d'autres procédés ou désinfectants approuvés pourraient être utilisés pour traiter les eaux brutes. Il s'agit par exemples de l'utilisation des chloramines, de l'ozone, du rayonnement ultraviolet et de la rétention physique par ultrafiltration membranaire. Par ailleurs, au Sénégal, la raréfaction des sources d'eau douce et la forte demande en eau pourraient rendre difficile le traitement des eaux brutes par le chlore. Il serait donc intéressant d'envisager des procédés tels que la désalinisation de l'eau de mer et le recyclage des eaux usées pour répondre aux besoins en eau potable des populations.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Achour, S., Benalia, M.C., Hellal, A. (2018). Chloration de la matière humique aquatique et impact de la présence des ions ammonium. *Journal Larhyss*, 1112-3680 : 33, 141-153pp
- Achour, S., Bentahar, H.D., Khelil, H. (2016). Action de l'hypochlorite de sodium sur la consommation en chlore de l'acide gallique dans les eaux naturelles. *Larhyss Journal*, 1112-3680 : 25, 309-322 pp
- Achour, S., Guergazi, S. (2012). Incidence de la minéralisation des eaux algériennes sur la réactivité de composés organiques vis-à-vis du chlore. *Revue des sciences de l'eau*, 15(3), 641–660. doi :10.7202/705473ar
- Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie. (2015). Situation économique et sociales du Sénégal en 2012.
- Aubry, P., Gauzère, A.B. (2011). Les maladies liées à l'eau. Centre René Labusquière, Institut de Médecine Tropicale, Université de Bordeaux, France. 1-7p
- Aubry, P., Gauzère, A.B. (2018). Diarrhées infectieuses. Centre René Labusquière, Institut de Médecine Tropicale, Université de Bordeaux, France.
- CEAEQ. (2000). Recherche et dénombrement des coliformes fécaux; méthode par filtration sur membrane. Centre d'expertise en analyse environnementale, Gouvernement du Québec, 24 p.
- Conseil Régional de Louga. (2007). Plan d'Action Environnemental Régional de la Région de Louga. Disponible sur : https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/fulltext.pdf. Consulté le 02/10/2019 à 12h53min.
- Ghazali, D., Zaid, A. (2013). Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de la source de Ain Salama-Jerri (Région de Meknes-Maroc). *Larhyss Journal*, 1112-3680 : 12, 25-36 pp.
- Kabako, S. (2011). Influence du pH sur la chloration de l'eau à la station ONEA de Nasso. Mémoire de licence professionnelle Génie Biologique, option agro-alimentaire. Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso. 44p
- Lagnika, M., Ibikounle, M., Montcho, J.P.C, Wotto, V.D., Sakiti, N.G (2014). Caractéristiques physico-chimiques de l'eau des puits dans la commune de Pobè (Bénin, Afrique de l'ouest). *Journal of Applied Biosciences*, 79:6887 – 6897.
- Mathieu-Hermet, A., Blineau, A., Magne, S., Bidet, G. (2016). La distribution et qualité de l'eau du robinet. *Bulletin de Veille Sanitaire – Numéro 1 : Les risques infectieux*

- d'origine hydrique en Auvergne. Auvergne – Rhone Alpes : Cellule de l'Institut de Veille Sanitaire en Région Auvergne – Rhone Alpes. 5p.
- Morel, J. (2007). Les ressources en eau sur Terre Origine, utilisation et perspectives dans le contexte du changement climatique. Grenoble: CRNS, Cahier de recherche, N°2, 29p.
- Organisation Mondiale de la Santé (OMS), & Fond des Nations Unies pour l'Enfance (UNICEF). (2017). Progrès en matière d'eau d'assainissement et d'hygiène. [Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2017 update and SDG baselines]. Genève. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Disponible à l'adresse <http://apps.who.int/iris>. Consulté le 22/10/2019 à 17h50 min
- Organisation Mondiale de la Santé. (2004). Directives de qualité pour l'eau de boisson. Bibliothèque de l'OMS. 1 : 3^{ème} édition Genève.
- Organisation Mondiale de la Santé. (2017). Directives de qualité pour l'eau de boisson : 4e éd. intégrant le premier additif [Guidelines for drinking-water quality: 4^{ème} ed. incorporating first addendum]. Genève. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- Poenaru, DV., Motoc, A. (2019). Bactériologie. Victor Barbe, 85p
- Riboni, E., Robert, M. (2001). Les méthodes de désinfection de l'eau : Avantages et inconvénients respectifs entre chlore - U.V. - ozone - microfiltration. Quelle méthode choisir en fonction des objectifs ? Quelques exemples d'applications. Ozone.
- Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., *et al.* (2011). L'analyse de l'eau. 9ème édition, Dunod, Paris, 1579 p
- Sambou, M. (2012). Identification de rickettsies pathogènes chez les tiques ixodides de la zone de Keur Momar Sarr (Louga), Sénégal. Mémoire de Master. Faculté des Sciences et Techniques. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal. 42 p.
- Samira, O., Aicha, B. A., Lobna, B. (2011). Chloration des eaux de consommation de la ville d'Ouargla: nécessité et incidence. 1^{er} Séminaire International sur la Ressource en eau au sahara : Evaluation, Economie et Protection, le 19 et 20 janvier 2011 (Ouargla). 168-174p.
- Tampo, L., Ayah, M., Kodom, T., Tchakala, I., Boguido, P., Bawa, L., Djaneye, B. (2014). Impact de la demande en chlore et de la chloration sur la désinfection des eaux de puits des quartiers de Lomé : cas des quartiers de Démakpoé et d'Agbalépédogan (Togo). Journal of Applied Biosciences. 75: 6272-6281p.
- Tfeila, M.M., Kankou, M.O., Souabi, S., Aboulhassan, M., Taleb, A., Bouezmarni, M. (2016). Suivi de la qualité physicochimique de l'eau du fleuve Sénégal: Cas du captage du Beni

Nadji alimentant en eau potable les wilayas de Nouakchott. Journal of Materials and Environmental Science. 7 : (1) 148-160pp.

World Health Organization. (2008). Guidelines for Drinking-water Quality. GENEVE.