

RAPPORT DE STAGE DE FIN D'ETUDES

*Département des sciences de la terre
Licence en sciences et techniques
Eau et Environnement*

ETUDE DE LA DEGRADATION DU CHLORE DANS LE RESEAU D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE : CAS DE JNANAT CHRIFIA, MARRAKECH

Réalisé par :

- **El QADI Jihane**
- **AMENNOU Inas**

Encadré par :

- **Professeur. KCHIKACH Azzouz**

Soutenu, le : **29 Juin 2017**

Devant le jury composé de:

- Pr. **KCHIKACH Azzouz** : (FST- Marrakech), Encadrant
- Mr. **ABBID Abdessatar** : (RADEEMA), Encadrant
- Pr. **BOURGEOINI Yamina** : (FST- Marrakech), Examinatrice

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2016-2017

Remerciements

Nous remercions nos encadrants de la RADEEMA **Mr. Abdessatar ABID**, et de la FSTG **Mr. Azzouz KCHIKACH**, ainsi que **Mr. El Mohtadi El Houdaifi** qui nous ont permis de développer nos connaissances dans le domaine de l'eau potable grâce à leur disponibilité, leur grande pédagogie, leur méthodologie, leur motivation, leur sympathie et la passion dont ils ont fait part tout au long de notre stage.

Nous sommes aussi reconnaissants à **Mr. Youness LAHBABI**, Chef du Département Exploitation Eau pour nous avoir accueillis, et qui a bien voulu nous accorder une mise en position de stage à la RADEEMA.

Nous transmettons aussi nos vifs remerciements à l'ensemble du personnel pour leur encouragement et nous remercions spécialement **Mr. El KHOZZAMI** qui nous a accompagné sur le terrain et a su être patient et motivé jusqu'au bout afin que nous puissions obtenir toutes nos données.

Nous adressons notre gratitude à **Mme ELLIOUA Mouna** ainsi que toutes les personnes du laboratoire de Sidi Moussa qui nous ont initiés au travail de laboratoire et qui nous ont confiés le matériel nécessaire pour effectuer les prélèvements nécessaires sur le terrain, **Mr. El KHIMANI**, le chef de département qualité qui nous a apporté ses connaissances sur le réseau, les résidents pour leur hospitalité pour nous avoir permis d'accéder à leurs robinets.

Nous gardons un remerciement spécial pour notre responsable et enseignante **Mme. Yamina BOURGEOINI** pour son soutien et son suivi durant toute la période de stage.

Table des matières

Remerciements	2
Liste des figures	4
Liste des tableaux	5
Liste des abréviations	6
Introduction	7
Chapitre I : Présentation de la RADEEMA et de la zone d'étude.	8
I. Établissement d'accueil	9
1. Historique	9
2. Les principales activités de la Régie	9
3. Les principaux objectifs de la Régie	9
4. Organigramme de l'organisme	10
5. Cycle de l'eau dans le bassin versant alimentant la ville de Marrakech	10
6. L'alimentation de Marrakech en eau potable	11
II. La zone d'étude	11
Chapitre II : Dégradation du chlore dans les réseaux d'eau potable	13
I. Introduction à la problématique	14
II. Paramètres de qualité de l'eau potable	15
1. Température	15
2. pH.....	15
3. Matières organiques naturelles (MON).....	15
4. Conductivité électrique.....	16
III. Chlore résiduel libre	16
1. Définition	16
2. Utilisation	16
2. Dégradation.....	17
3. Modélisation des concentrations du chlore résiduel libre.....	19
Partie pratique : Mesure de la concentration du chlore résiduel libre.	21
I. Méthodologie	22
1. Campagnes d'échantillonnages	22
II. Etudes menées en laboratoire : Mesure de la concentration du chlore résiduel libre (méthode à l'orthotolidine).....	23
1. Domaine d'application et définition	23
2. Principe et appareillage	23
3. Prélèvement et conditionnement	24
4. Mode opératoire : Prélèvement au robinet.....	24
5. Résultats des analyses effectuées	24
Partie Théorique : Simulation de la distribution du chlore par le logiciel Epanet 2.0.	25
I. Présentation du logiciel utilisé	26
1. Notions mathématiques : "Pertes de charge"	27
II. Modélisation hydraulique du réseau sur le logiciel Epanet 2.0	28
1. Le processus de la modélisation	28
2. Les étapes de la modélisation.....	29
3. Résultat de la simulation du chlore sur le logiciel Epanet 2.0.....	39
Résultats et discussions	40
Conclusion	42
Bibliographie	43

Liste des figures

Figure 1: Organigramme de la RADEEMA	10
Figure 2 : Etapes de mise à disposition d'eau potable.....	10
Figure 3: Situation géographique de la zone d'étude	11
Figure 4: Plan du réseau hydraulique de la zone étudiée	12
Figure 5 : Mise en évidence du dosage optimal en chlore au réservoir	17
Figure 6: Facteurs de dégradation du chlore	17
Figure 7: Facteurs contrôlant l'effet eau et l'effet paroi (Panguluri et al, 2005)	18
Figure 8: Différence de diamètre entre une conduite âgée et une réhabilitée.....	20
Figure 9 : Image d'un comparateur de chlore.....	23
Figure 10 : résultat des analyses de la concentration en chlore résiduel.....	24
Figure 11 : Réseau de notre zone d'étude tracé sur Epanet.....	29
Figure 12 : Château du très haut service (réservoir étudié)	30
Figure 13 : Données du réservoir insérées sur Epanet 2.0.	31
Figure 14 :Exemple des Données insérées aux nœuds sur Epanet 2.0.....	34
Figure 15 : Données du temps insérées sur Epanet 2.0.....	36
Figure 16 : Résultat de la simulation du chlore en mg/L	39
Figure 17: Histogramme de comparaison entre les résultats pratiques et théoriques des concentrations	40

Liste des tableaux

Tableau 1 : Données du réservoir	31
Tableau 2 : Consommation d'Eau par les zones étudiées en mois de decembre.....	33
Tableau 3 : Altitude et demande de base calculée pour chaque nœud	33
Tableau 4 : Diamètres et longueurs des conduites du réseau étudié	35
Tableau 5: Coefficients multiplicateurs de demande pour un intervalle de temps de 24heures	37

Liste des abréviations

RADEEMA : régie autonome de distribution d'eau et d'électricité.

SMD : Société Marocaine de distribution.

AEP : Alimentation en eau potable

CCRL : concentration en chlore résiduel libre.

DT : durée totale de la simulation.

MON : matière organique naturelle.

SPD : sous-produits de la désinfection.

TDS : temps de séjour de l'eau.

THS : très haut service.

ONEE : office national de l'Electricité et de l'Eau potable

Introduction

Partout dans le monde, l'expansion des villes est à l'origine du développement des réseaux de distribution de l'eau potable. Le passage de l'eau conduit à la corrosion des conduites, ce qui constitue un des facteurs influençant la concentration des produits désinfectants comme le chlore.

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous avons effectué un stage au sein de la RADEEMA dont le but est la réalisation d'un modèle hydraulique pour le secteur "Jnanat Chrifia" à l'aide du logiciel EPANET. L'objectif est de simuler à la fois l'écoulement de l'eau et sa qualité, ce qui nous permettra de détecter la source du manque de chlore, voir son absence. Des propositions de solutions adéquates pour remédier au problème posé sont présentées à l'issu du travail réalisé.

Notre choix a porté sur ce secteur parce qu'il est de récente construction et qu'il est très susceptible de refléter les anomalies que nous recherchons. L'étude des lieux nous a menée à prélever des échantillons dans toutes les conduites acheminant l'eau vers "Jnanat Chrifia" afin de mesurer les niveaux de chlore et détecter la source du problème.

Ce travail se divise en deux parties, l'une théorique et l'autre pratique qui vont nous permettre de répondre à la problématique évoquée précédemment.

Chapitre I : Présentation de la RADEEMA et de la zone d'étude.

I. Établissement d'accueil

La régie autonome de distribution d'eau potable, d'électricité et gestion d'assainissement liquide (La RADEEMA), est un établissement semi-public autonome qui se caractérise par son action qui comporte à la fois le secteur industriel et le secteur commercial. Son objectif est d'accompagner et de soutenir le développement important que connaît la ville de Marrakech en se dotant de l'infrastructure nécessaire dans le but de répondre à la demande qui s'accroît de jour en jour. (*Charte des valeurs, 2016*)

1. Historique

La RADEEMA a vu le jour en janvier 1971 après la disparition de la SMD : Société Marocaine de distribution.

C'est un établissement public à vocation industrielle commerciale doté de la personnalité civile et de l'autonomie financière.

Elle assure la distribution d'eau et d'électricité au sein de la ville de Marrakech, et à qui s'ajoute la gestion du service d'assainissement liquide depuis 1998. (*radeema.ma/histoire*)

2. Les principales activités de la Régie

La RADEEMA assure la distribution d'eau et d'électricité et la gestion du service d'assainissement liquide au sein de la ville de Marrakech.

Les trois métiers couvrent une zone d'action de 24 000 ha et une population d'environ 1.350 000 habitants selon le dernier recensement.

3. Les principaux objectifs de la Régie

Parmi les objectifs principaux de la RADEEMA nous pouvons citer :

- La sauvegarde des ressources en eau potable.
- L'amélioration du système de distribution d'eau potable dans la ville de Marrakech, par la lutte contre le gaspillage d'eau pour réduire les pertes d'eau.

4. Organigramme de l'organisme

Il existe quatre directions à la RADEEMA:

Direction ingénierie et investissements, direction clientèle, direction administrative et financière et **direction Exploitation** où nous avons effectué notre stage.

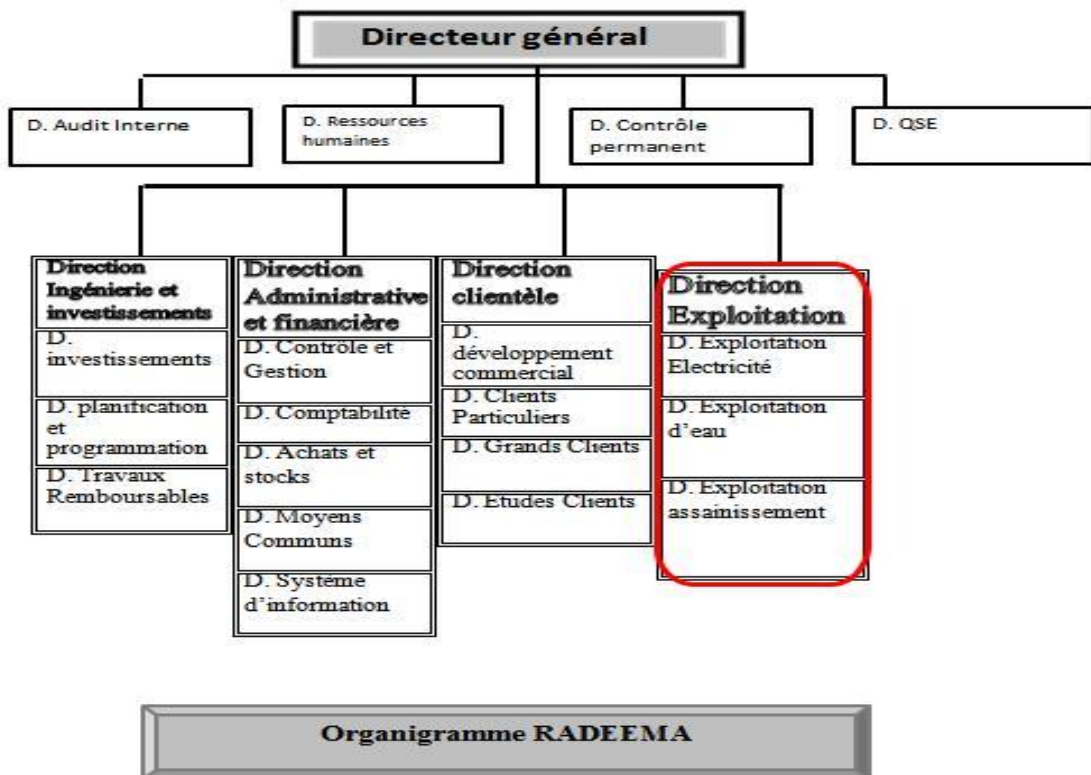


Figure 1: Organigramme de la RADEEMA

5. Cycle de l'eau dans le bassin versant alimentant la ville de Marrakech

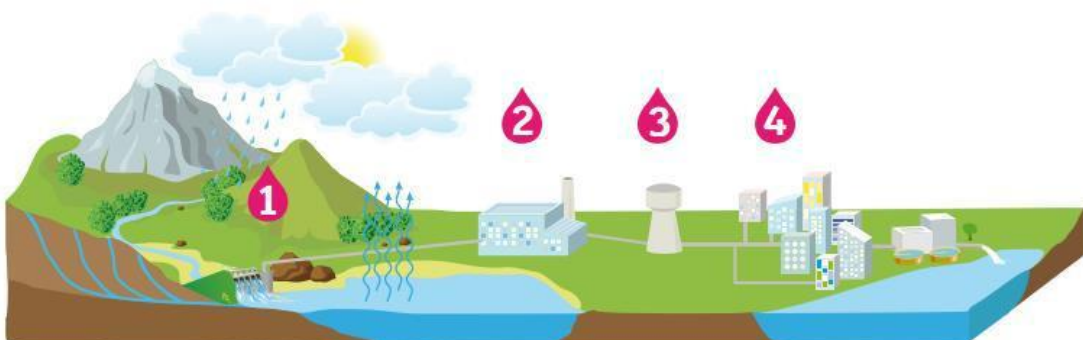


Figure 2 : Etapes de mise à disposition d'eau potable

- 1- Le producteur ONEE capte l'eau brute retenue dans les barrages (Sidi driss et Lalla takerkoust).
- 2- L'eau est traitée par le producteur pour la rendre potable et la mettre à disposition des agences de distribution.
- 3- L'eau potable est stockée dans les réservoirs de la RADEEMA, et contrôlée à nouveau avec rechloration.
- 4- L'eau potable est distribuée aux foyers.

6. L'alimentation de Marrakech en eau potable

L'alimentation de Marrakech est assurée par deux réservoirs :

Le réservoir Ourika est situé sur la route d'Ourika, avec une capacité de 55.000 m³ et une côte moyenne du terrain naturel: 492,45 NGM, ce réservoir alimente l'étage bas services de Marrakech (Gueliz, Daoudiate, Massira, Médina nord, Zone industriel).

Le Réservoir Sidi Moussa est situé dans le complexe hydraulique Sidi Moussa sur la route d'Ourika, avec une capacité de 50.000m³, il alimente l'étage haut service et l'étage très haut service. L'étage très haut service est représenté par un château d'eau surélevé avec une capacité de stockage de 500 m³ et d'une hauteur de 37 m.

II. La zone d'étude

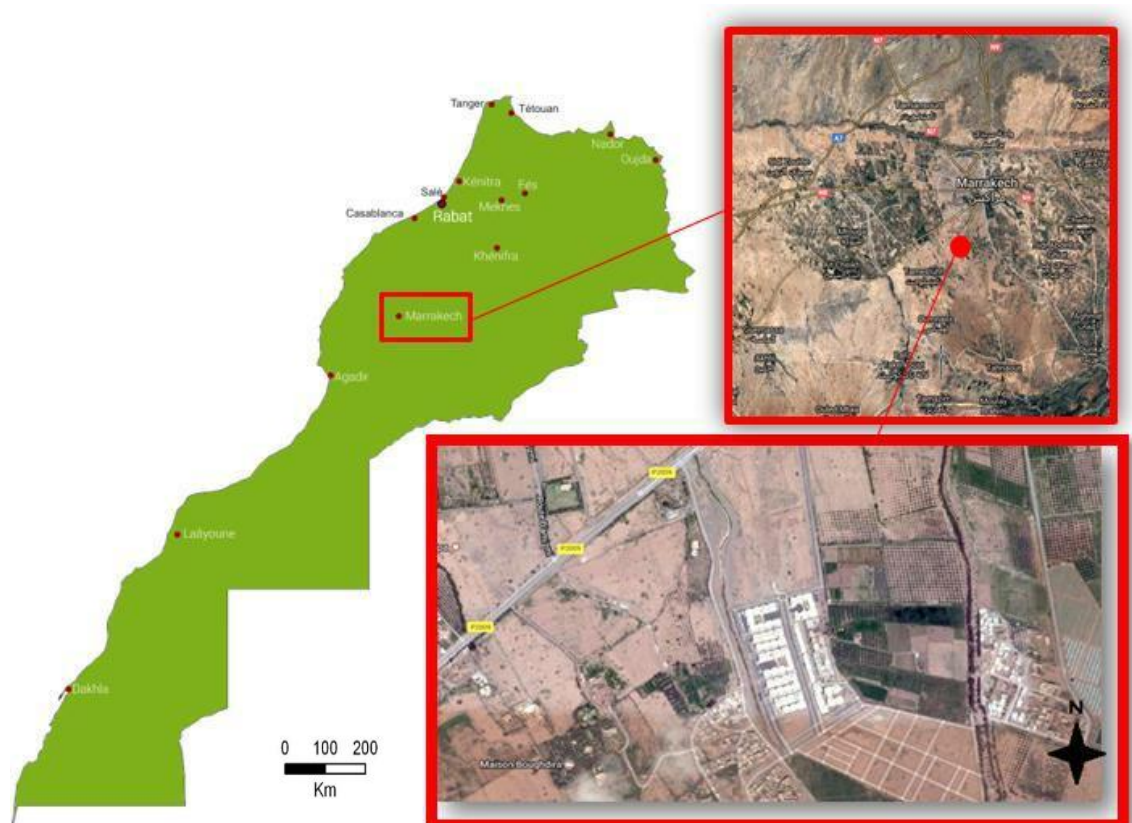


Figure 3: Situation de la zone d'étude dans la carte géographique du Maroc

Jnanat Chrifia se situe sur la route d'Amezmiz en provenance de Marrakech. Le lotissement sujet à l'étude appartient à une zone de logement économique (R+2) formée de bâtiments de différentes superficies comportant aussi un centre commercial, une crèche, des terrains de sport, une mosquée, un four traditionnel un bain maure...



Figure 4: Plan du réseau hydraulique de la zone étudiée

Chapitre II : Dégradation du chlore dans les réseaux d'eau potable

I. Introduction à la problématique

Les usines de traitement de l'eau utilisent majoritairement le chlore comme désinfectant. Le chlore utilisé dans le traitement des eaux élimine pratiquement toutes les maladies car il peut tuer ou rendre inactifs la plupart des microorganismes communément présents dans l'eau. Toutes les sources d'approvisionnement en eau potable devraient être désinfectées.

Ces usines de traitement de l'eau potable utilisent une forme gazeuse de chlore soit pour traiter l'eau brute directement dans l'usine soit pour maintenir une concentration résiduelle de chlore dans le réseau de distribution afin de prévenir de la croissance bactérienne, soit les deux.

La désinfection est un volet essentiel du traitement de l'eau potable destinée à la consommation, les risques pour la santé associés aux sous-produits de désinfection sont mineurs comparés à une eau qui n'a jamais été traitée ou qui vient de subir un prétraitement.

La qualité d'une eau de consommation se base sur plusieurs critères bactériologiques et physico-chimiques tels que la quantité de matière organique, le pH, la température et la concentration en chlore résiduel total.

Le chlore est actuellement le désinfectant le plus employé à travers le monde, il est facile d'utilisation et conservable. Nous pouvons nous assurer que de faibles quantités puissent atteindre le robinet du consommateur.

L'introduction du chlore dans l'eau permet de réduire au maximum les contaminations bactériennes entre l'usine de traitement d'eau et l'utilisateur, cependant, la concentration de chlore résiduel diminue au fil du réseau et au fur et à mesure que le temps de séjour de l'eau augmente (influence spatio-temporelle).

En connaissant la concentration initiale du chlore au réservoir, il est possible de prédire les concentrations en chlore résiduel en tout point du réseau à l'aide d'une modélisation hydraulique et de la qualité de l'eau par le logiciel EPANET.

Le diamètre d'une canalisation ne demeure pas le même qu'à son installation. Avec le temps, une communauté de micro-organismes se fixe sur les parois, appelée biofilm, transformant la taille des nodules de corrosion la rendant de plus en plus grande, et par conséquent nous avons un ralentissement de l'écoulement au niveau des parois.

Le chlore est à la fois influencé par les parois de la conduite (effet paroi) et par le volume central d'eau circulant (effet eau). Ainsi, pour de faibles diamètres, les effets de la paroi se font ressentir fortement, alors que pour des conduites de diamètres plus importants, ils sont négligeables. L'âge des conduites influence fortement la dégradation du chlore libre dû à l'effet paroi.

II. Paramètres de qualité de l'eau potable

Appart les exigences organoleptiques d'une eau de consommation (l'odeur, la couleur, et le goût), d'autres paramètres physico-chimiques permettent de caractériser la qualité de l'eau potable. Leurs caractéristiques dans l'eau du réseau de distribution de la ville de Marrakech se présentent comme suit :

1. Température

C'est le catalyseur de toutes les réactions comme celle de l'oxydation de la matière organique présente dans l'eau par le chlore libre. A Marrakech, la température de l'eau brute varie de façon non négligeable d'hiver en été. Cette variation affecte les étapes du traitement de l'eau, ainsi que température des conduites du réseau de distribution d'eau potable.

2. pH

Le pH contrôle les réactions chimiques dans les différentes étapes du traitement de l'eau. Dans le système de traitement en question, il est important de garder un pH basique pour limiter la corrosion des conduites.

3. Matières organiques naturelles (MON)

Les caractéristiques de la MON de l'eau brute varie tout au long de l'année pour le réservoir. Ceci est dû aux fréquentes et intenses averses que subit son bassin versant favorisant ainsi le ruissellement de contaminants dans l'eau brute. La MON est souvent

caractérisée par la teneur en carbone organique total (COT) et en carbone organique dissous (COD).

4. Conductivité électrique

La conductivité d'une eau caractérise sa minéralisation qui est propre à sa source. Ainsi, on peut identifier s'il y a mélange des eaux entre les deux réseaux à l'aide des mesures de la conductivité.

III. Chlore résiduel libre

1. Définition

Le chlore résiduel total est le chlore sous toutes ses formes (combiné et libre) qui reste en extrémité de réseau. On dira qu'il y a une concentration « résiduelle » en chlore total au niveau de l'eau d'un robinet par exemple. La partie du chlore n'ayant pas encore réagi avec la MON, les micro-organismes ou la paroi des conduites correspond à la partie libre. Le résultat de la réaction avec notamment les composés azotés présents dans l'eau correspond à la partie combinée. La somme des concentrations en chlore libre et combiné donne la concentration en chlore total. Dans cette étude, nous avons mesuré le chlore résiduel libre.

2. Utilisation

Le chlore est injecté sous forme gazeuse et réagit avec l'eau pour former l'acide hypochloreux (HClO) selon la réaction ci-dessous, et qui s'avère être un oxydant puissant pour la matière organique et les microorganismes.



Ce qui nous pousse à utiliser le chlore comme désinfectant secondaire c'est qu'il permet de maintenir une CCRL tout au long du réseau et donc de garantir une eau saine même après le traitement. Malheureusement, cet effet n'est pas permanent car la CCRL diminue le long du réseau à cause des réactions avec des composés organiques et inorganiques présents dans l'eau et dans les parois des conduites. On parle alors de dégradation du chlore libre. D'autres inconvénients surviennent comme la génération de sous-produits de la désinfection (SPD) et la génération de goûts et odeurs désagréables causés par les chloramines. Ainsi, une dose trop

faible de chlore serait associée à des CCRL insuffisants dans les extrémités du réseau, tandis qu'une dose très élevée favoriserait la présence de SPD et de chloramines. Il est donc important de trouver la dose optimale en chlore lors de la désinfection secondaire.

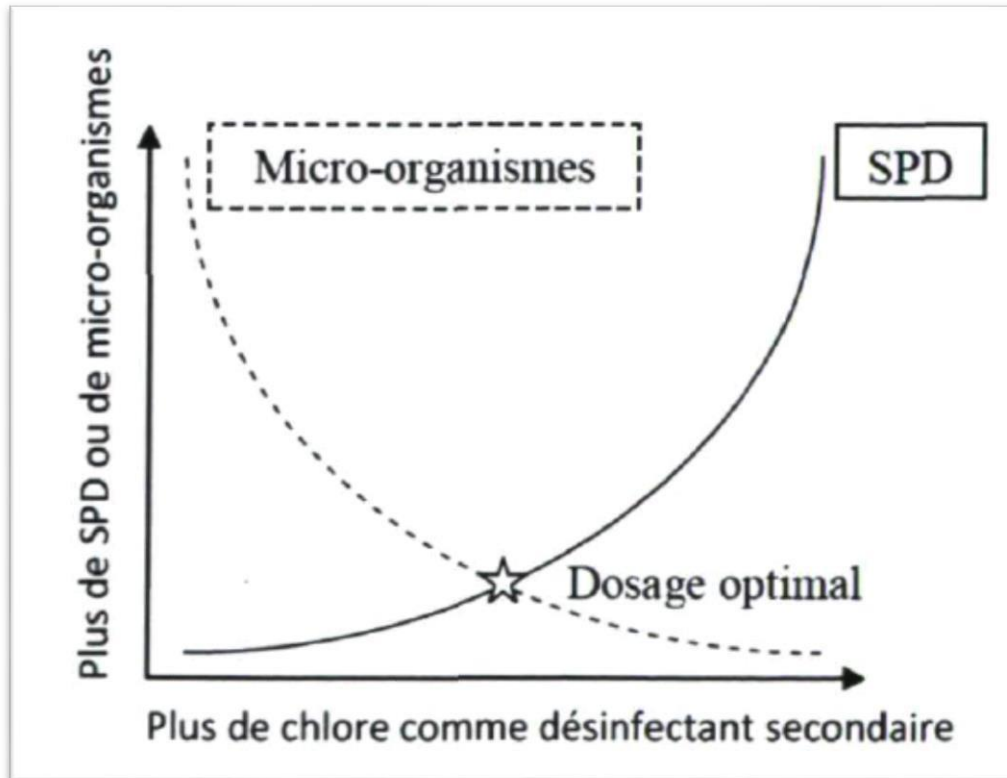


Figure 5 : Mise en évidence du dosage optimal en chlore au réservoir

2. Dégradation

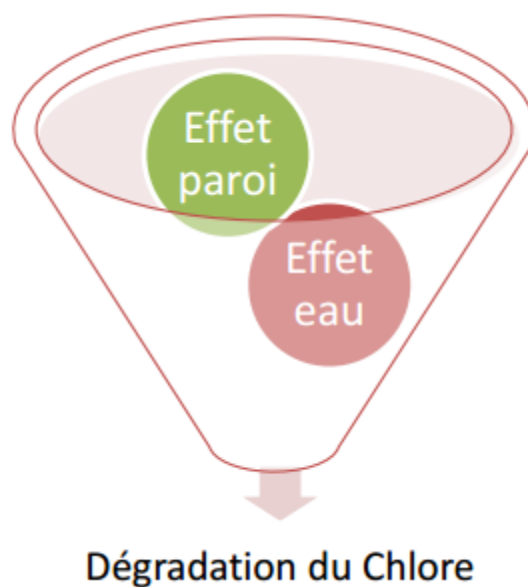


Figure 6: Facteurs de dégradation du chlore

Il y a deux principaux mécanismes de dégradation du chlore. D'une part, il se dégrade au niveau des parois où il peut y avoir la présence d'un biofilm ou bien de tubercules de corrosion qui subissent l'action oxydante du chlore (effet paroi). D'autre part, la dégradation intervient dans le volume principal d'eau de la conduite et est associée à la MON présente dans l'eau du réseau de distribution, des écailles de corrosion, le détachement du biofilm ou encore une possible contamination (effet eau)

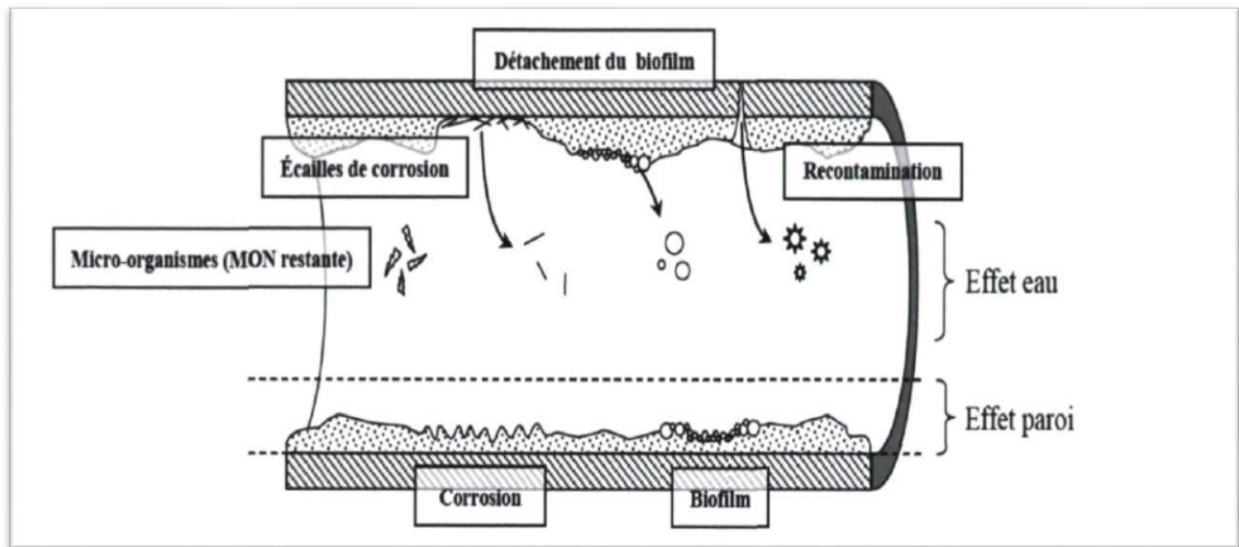


Figure 7: Facteurs contrôlant l'effet eau et l'effet paroi (Panguluri et al, 2005)

La dégradation est caractérisée à l'aide de deux coefficients propres à chacun des deux types de dégradation. Ainsi, on considérera un coefficient k_b pour la dégradation au sein du volume central représentant « l'effet eau » et un coefficient k_w représentant la dégradation au niveau des parois représentant « l'effet paroi ». Il est à noter que ces deux effets sont plus ou moins influents en fonction du diamètre des conduites. Pour des conduites de faibles diamètres (entre 150 et 200 mm), c'est l'effet paroi qui est prédominant, alors que pour des conduites de plus grand diamètre (entre 300 et 500 mm dans le cas du réseau à l'étude), c'est l'effet eau qui domine. Ainsi que d'autres paramètres qui interviennent dans la cinétique de dégradation et influencent les valeurs des coefficients de dégradation : la teneur en MON, la température de l'eau et la CCRL initiale.

Une façon simple de définir la dégradation globale du chlore consiste à déterminer un coefficient global k (Powell et al, 2000) tel que :

$$K = K_b + K_w$$

k_w : coefficient de la dégradation au niveau des parois représentant « l'effet paroi ».

k_b : coefficient de la dégradation au sein du volume central représentant « l'effet eau ».

K : coefficient global de la dégradation globale du chlore.

3. Modélisation des concentrations du chlore résiduel libre

La modélisation des réseaux de distribution d'eau potable est un outil de gestion pour l'hydraulique du réseau et un outil de gestion de la qualité de l'eau distribuée. En effet, un modèle hydraulique permet de réaliser les calculs d'hydraulique en fonction de la demande en eau d'une ville, d'un secteur ou d'un quartier. Il est devenu facile d'obtenir une bonne estimation des débits, des vitesses d'écoulement et des pertes de charge dans les conduites ainsi que des pressions en tout point du réseau. Pour cela, le modèle utilisé doit être calibré, c'est-à-dire qu'il doit représenter au mieux les caractéristiques physiques du réseau (longueurs, diamètres, coefficients de rugosité des conduites, ...etc.).

Un modèle de qualité de l'eau permet de simuler les phénomènes physico-chimiques qui se produisent dans l'eau. Dans notre étude, nous nous limitons à la dégradation du chlore libre et donc à l'évaluation des CCRL. Le logiciel EPANET permet de calculer les CCRL aux nœuds d'après la cinétique de dégradation choisie et des coefficients de dégradation locaux (propres à la conduite) ou globaux (propres à une zone ou à plusieurs conduites). À partir d'une source de chlore définie, le logiciel calcule les CCRL en fonction des vitesses d'écoulement, des pertes de charge dans les conduites (dues aux coefficients de rugosité), de la dispersion à travers le réseau et des modes de mélange aux nœuds. Les paramètres de simulation d'EPANET les plus influents sur les CCRL simulées sont la durée totale de la simulation (DT) (total duration), le pas de temps du calcul du balancement hydraulique et la méthode statistique utilisée. Cette dernière a pour effet de fournir les résultats sur les CCRL soit en totalité pour chacun des pas de temps hydraulique, soit en réalisant la moyenne des valeurs simulées sur la DT. Ces deux modes correspondent successivement à une étude dynamique (débits variables) et à une étude en régime permanent (débits constants).

Pour réaliser des prédictions des CCRL, on utilise un modèle hydraulique dont les TDS sont calibrés. Après les résultats de calibration, les diamètres des conduites ont subi une réduction moyenne de 25% afin de représenter au mieux les conditions hydrauliques du réseau.



Figure 8: Différence de diamètre entre une conduite âgée et une réhabilitée

De cette façon, le transport et la dégradation du chlore libre à travers le réseau modélisé sont les plus fidèles possible à la réalité et il devient plus simple de modéliser les CCRL. De plus, l'observation des CCRL sur les quartiers va permettre de déduire les cinétiques locales de dégradation et les informations obtenues seront utilisées pour réaliser l'ajustement des paramètres du modèle localement (échelle d'une conduite par exemple) ou par zone (délimitée par plusieurs conduites). Le couplage du modèle hydraulique avec les résultats des campagnes d'échantillonnage permettra une telle réalisation.

**Partie pratique :
Mesure de la
concentration du
chlore résiduel libre.**

I. Méthodologie

1. Campagnes d'échantillonnages

1.1. Choix des sites étudiés

De manière à obtenir des résultats intéressants sur l'ensemble du réseau, une attention particulière a été portée sur le choix des sites. En effet, dans cette étude il s'agit d'étudier l'influence que peut avoir le TDS sur les CCRL mais aussi certaines caractéristiques du réseau de distribution sur les CCRL qui peut dépendre de l'âge et/ou de la localisation des conduites. Il est donc d'intérêt de choisir des quartiers ayant des TDS et des âges de conduites assez différents dans le but d'observer des vitesses de dégradation différentes.

1.2. Précautions à prendre pour les campagnes d'échantillonnages

La qualité de l'eau varie en fonction des saisons, ainsi qu'avec les conditions météorologiques. La qualité de l'eau est donc sensible aux précipitations. De plus, la demande en eau potable par la population est variable selon la saison et s'il s'agit d'un jour de début, de milieu ou de fin de semaine. Afin de minimiser la variation des paramètres de qualité de la source, les jours d'échantillonnage ont été choisis de façon à respecter les points suivants :

- Choix d'un temps dit « de saison » par rapport aux années précédentes et aux moyennes historiques en termes de température et de précipitation. Le modèle développé pourra donc être utilisé avec d'autres données provenant des mêmes saisons.
- Choix d'un jour de semaine où la demande en eau n'est ni très faible ni très élevée soit un mardi, mercredi ou jeudi. Les autres jours étant à exclure afin d'avoir des patrons de consommation relativement identiques entre les différentes campagnes.

Avant de réaliser une campagne d'échantillonnage sur un nombre important de sites, il faut connaître l'évolution du chlore résiduel durant la journée. Ceci permettra de savoir à quelle fréquence seront prises les mesures de chlore sur un même site. Durant la précampagne il est important d'avoir un nombre maximal de mesures par site. Ainsi, le nombre de sites s'élève à 6 et de mesures journalières par site à 3 pour la précampagne. De cette façon, l'information spatiale sur les CCRL est plus importante

II. Etudes menées en laboratoire : Mesure de la concentration du chlore résiduel libre (méthode à l'orthotolidine)

1. Domaine d'application et définition

Le dosage du chlore résiduel total des eaux destinées à la consommation humaine.

Le chlore résiduel total humaine NM.03.c'est la somme du chlore résiduel libre et du chlore résiduel sous forme de chloramines. Les analyses ont été effectuées selon les normes marocaines relatives aux eaux d'alimentation 7.007

2. Principe et appareillage

L'orthotolidine donne en présence de chlore résiduel libre ou combiné une coloration jaune susceptible d'un dosage photométrique. L'appareil utilisé comprend :

- Un comparateur
- Un disque colorimétrique comportant des étalons de couleurs en verre coloré dans la masse.
- Un tube destiné à contenir l'échantillon à analyser.

Le réactif utilisé est une solution d'orthotolidine à 0.1 %



Figure 9 : Image d'un comparateur de chlore

3. Prélèvement et conditionnement

Le dosage du chlore résiduel doit être effectué sur place au moment du prélèvement afin d'éviter toute modification de la composition chimique de l'échantillon.

4. Mode opératoire : Prélèvement au robinet

- Laisser couler l'eau pendant quelques minutes.
- Introduire dans le tube une quantité d'eau à analyser à laquelle on ajoute quelque goutte d'orthotolidine.
- Agiter
- Placer le tube contenant l'échantillon et le réactif dans le compartiment de droite du comparateur, dont on a déjà placé le disque colorimétrique.
- Tenir verticalement le comparateur à une distance de 30cm des yeux face à une surface blanche uniformément éclairée.

5. Résultats des analyses effectuées

Nous avons appliqué le dosage pendant 3 jours successifs est dans des différentes heures (12AM ,3PM et 5H PM).

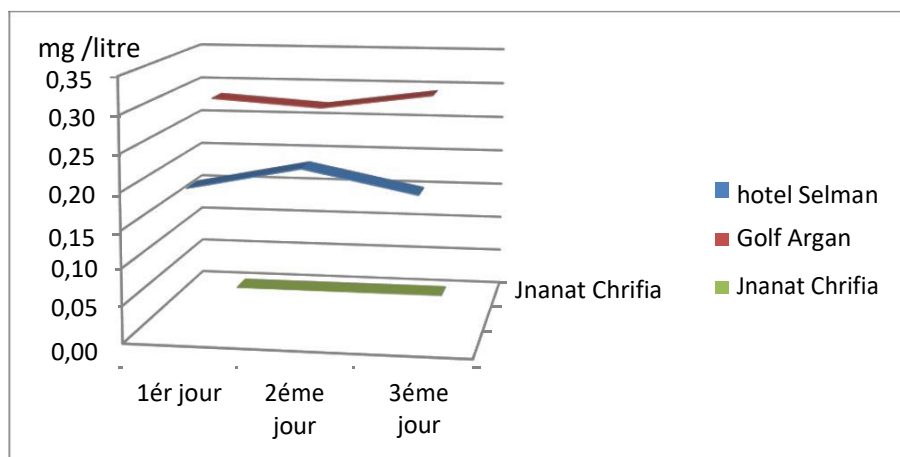


Figure 10 : résultat des analyses de la concentration en chlore résiduel

après les prélèvements que nous avons fait on constate que la concentration du chlore résiduel libre au niveau de Jnanat chrifia est nulle cela confirme que y'avait une dégradation du chlore au niveau des conduites .

Partie Théorique :
Simulation de la distribution
du chlore par le logiciel
Epanet 2.0.

1. Présentation du logiciel utilisé

EPANET est un logiciel qui permet d'analyser le comportement hydraulique et la qualité de l'eau sur de longues durées dans les réseaux de distribution d'eau potable sous pression (régime permanent et non permanent). Il a pour objectif une meilleure compréhension de l'écoulement et de l'usage de l'eau dans les systèmes de distribution.

Ce logiciel calcule le débit dans chaque tuyau, la pression à chaque nœud, le niveau de l'eau dans les réservoirs et la concentration en substances chimiques dans les différentes parties du réseau au cours d'une durée de simulation divisée en plusieurs étapes. IL est également capable de calculer les temps de séjour et de suivre l'origine de l'eau.

Il fournit un environnement intégré pour l'édition de données de réseau, l'exécution de simulations hydrauliques et de qualité et pour l'affichage des résultats sous plusieurs formats (cartes avec codes couleurs, tableaux et graphes).

EPANET contient un moteur de calcul hydraulique moderne ayant les caractéristiques suivantes:

- La taille du réseau étudié est illimitée.
- Pour calculer les pertes de charge dues à la friction, il dispose des formules de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach, et Chezy Manning. Ces formules sont laissées au choix de l'utilisateur;
- Il inclut les pertes de charge singulières aux coudes, aux tés, etc.
- Il peut modéliser des pompes à vitesse fixe ou variable.
- Il peut calculer l'énergie consommée par une pompe et son coût.
- Il peut modéliser différents types de vannes, comme des clapets anti-retour, des vannes de contrôle de pression ou débit, des vannes d'arrêt, etc.
- Les réservoirs peuvent avoir des formes variées (le diamètre peut varier avec la hauteur).
- Il peut y avoir différentes catégories de demandes aux noeuds, chacune avec une caractéristique propre.
- Il peut modéliser des consommations dépendantes de la pression (buses par exemple).

- Le fonctionnement de station de pompage peut être piloté par des commandes simples, (heures de marche/arrêt en fonction du niveau d'un réservoir) ou des commandes élaborées plus complexes.

En plus des simulations hydrauliques, EPANET permet de modéliser la qualité de l'eau.

1. Notions mathématiques : "Pertes de charge"

Les pertes de charge, sont généralement le résultat de deux mécanismes :

1.1. Frottement le long des parois de la conduite ou les pertes de frottement

Quand un liquide traverse une canalisation, les efforts de cisaillement se développent entre le liquide et les parois de la conduite. Cet effort de cisaillement est un résultat de frottement, et sa grandeur est dépendante des propriétés du fluide qui traverse la canalisation, la vitesse auquel il se déplace, la rugosité interne de la conduite, et la longueur et le diamètre de la conduite.

1.2. Formule de Darcy-Weisbach :

La plupart des modèles hydrauliques ont des dispositifs qui permettent à l'utilisateur de choisir entre les formules de Darcy- Weisbach, Hazen-Williams, ou Manning pour le calcul des pertes de charge, cela dépend de la nature du problème et des préférences de l'utilisateur

La formule de Darcy-Weisbach est une équation physique à la base, dérivée de la seconde loi de Newton. Avec des viscosités et des densités appropriées, elle peut être employée pour trouver la perte de charge dans une conduite pour n'importe quel fluide newtonien dans n'importe quel régime d'écoulement.

Cette formule est une équation qui permet de déterminer la résistance, les pertes de charge, la vitesse et le débit dans les conduites d'eau potable.

$$h_L = f \frac{LV^2}{D2g} = \frac{8fL Q^2}{g D^5 \pi^2}$$

Avec :

f : coefficient de frottement ou coefficient de résistance à l'écoulement

g: l'accélération de la pesanteur (m/s²)

Q: Débit volume écoulé par la conduite de diamètre D (m³ /s)

1.3. Turbulence due aux changements des lignes profilées par des équipements et des accessoires ou les pertes singulières

A la perte de charge linéaire, due au frottement et répartie tout au long de la conduite, s'ajoutent des pertes de charges singulières, localisées dans des sections particulières de la conduite et dues à un changement de direction ou d'intensité de la vit Il s'agit de singularités qui, dans les écoulements en charge correspondent aux raccords et aux pièces spéciales (coudes, tés, cônes, joints, vannes, clapets, ...etc.)

Les pertes de charge correspondantes sont évaluées comme une fraction ou un multiple de l'énergie cinétique, ce qui conduit à la forme générale de la loi de comportement des singularités :

$$h_m = K_L \frac{V^2}{2g} = K_L \frac{Q^2}{2gA^2}$$

Avec :

hm : perte de charge singulière (m)à

KL: coefficient de perte de charge singulière

V: vitesse (m/s)

g : constante de l'accélération gravitationnelle (m/s)

A: section de la conduite (m²)

Q: débit (m³ /s)

Pour notre système d'alimentation en eau, les pertes de charge singulières sont généralement plus petites que les pertes de charge linéaires dues au frottement. Pour cette raison, nous avons choisi de négliger les pertes singulières.

II. Modélisation hydraulique du réseau sur le logiciel Epanet 2.0

La modélisation des réseaux d'alimentation en eau potable se fait en donnant une vue d'ensemble des composants de système de base de distribution, définissant la nature et les buts de la simulation de système de distribution, et donner les étapes de base dans le processus de modélisation.

1. Le processus de la modélisation

La modélisation est un processus itératif, la première étape en entreprenant n'importe quel projet de modélisation est de fixer les objectifs et les besoins pour lesquels le modèle sera employé à court et à long terme.

La deuxième étape est le calibrage du modèle en précisant son exactitude.

La modélisation concerne une série d'abstraction :

D'abord les conduites et les pompes réelles dans le réseau sont représentées sur des cartes , puis les cartes sont converties en modèle qui représentent les équipements du système comme des arcs et des nœuds, une autre couche d'abstraction est introduite, c'est la présentation mathématique des arcs et des nœuds ; les équations du modèle sont alors résolues, et les solutions sont affichées sous forme de cartes et de graphes ou sous forme de tableaux.

2. Les étapes de la modélisation

Les étapes classiques de l'utilisation d'EPANET pour modéliser un système de distribution d'eau sont les suivantes:

- Dessiner un réseau représentant le système de distribution
- Saisir les propriétés des éléments du réseau
- Décrire le fonctionnement système
- Sélectionner un ensemble d'options de simulation
- Lancer une simulation hydraulique
- Visualiser les résultats d'une simulation Cette partie expose les principes de base du travail du logiciel Epanet, au niveau des objets physiques constituant le réseau et les méthodes de calcul utilisés.

2.1. Les composants physiques

EPANET modélise un système de distribution d'eau comme un ensemble d'arcs reliés à des nœuds. Les arcs représentent des conduites, des pompes, et des vannes de contrôle. Les nœuds représentent des nœuds de demande, des réservoirs et des bâches.

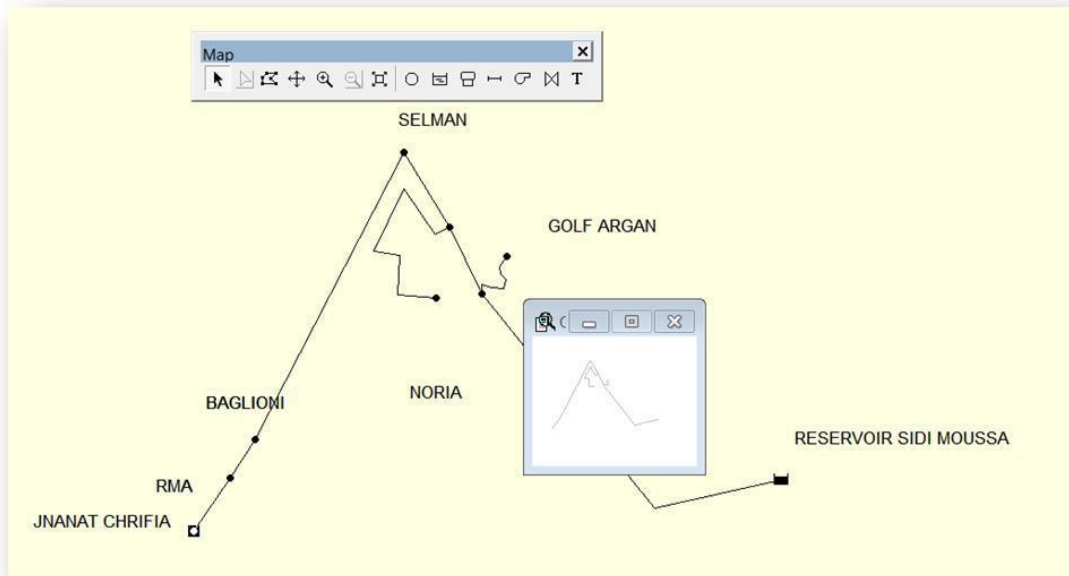


Figure 11 : Réseau de notre zone d'étude tracé sur Epanet

2.1.1. Le Réservoir



Figure 12 : Château du très haut service (réservoir étudié)

Les Réservoirs sont des nœuds avec une capacité de stockage, dont le volume d'eau stocké peut varier au cours du temps. Les données de base pour des réservoirs sont les suivantes:

- l'altitude du radier (où le niveau d'eau est zéro)
- le diamètre (ou sa forme s'il n'est pas cylindrique)
- les niveaux initial, minimal et maximal de l'eau

Les principaux éléments calculés dans la simulation sont les suivants:

- la charge (altitude de l'eau)
- la pression (niveau de l'eau)

Le niveau dans les réservoirs doit rester entre les niveaux minimal et maximal.

	élévation	Niveau initial	Niveau minimal	Niveau maximal	Diamètre	Qualité initial
Réservoir	581.4	3.6	0	6	10.3	1.2

Tableau 1 : Données du réservoir

Property	Value
*Tank ID	Chateau
X-Coordinate	254586.22
Y-Coordinate	108271.80
Description	
Tag	
*Elevation	581.4
*Initial Level	3.61
*Minimum Level	0
*Maximum Level	6
*Diameter	10.3
Minimum Volume	
Volume Curve	
Mixing Model	Mixed
Mixing Fraction	
Reaction Coeff.	
Initial Quality	1.2

Figure 13 : Données du réservoir insérées sur Epanet 2.0.

EPANET arrête la sortie d'eau si un réservoir est à son niveau minimal et arrête l'arrivée s'il est à son niveau maximal.

2.1.2. Nœud de demande

Les nœuds de Demande sont les points du réseau où les arcs se rejoignent. Ce sont des points d'entrée ou de sortie d'eau et peuvent également ne pas avoir de débit.

Le très haut service se compose de deux conduites de sortie, une qui aboutit à la zone étudiée et l'autre qui a une consommation considérée nulle.

Les résultats calculés aux nœuds de demande, à chacun des intervalles de temps d'une simulation sont:

- La charge hydraulique (ou hauteur piézométrique): énergie interne par poids spécifique de fluide ou bien somme de l'altitude avec la hauteur de pression.
- la pression.

Les données introduites pour chaque nœud sont l'altitude et la demande de base (Consommation).

- Les altitudes ont été récupérées du site toutimages.com d'une erreur de ± 2 m.
- Après avoir récupéré les consommations mensuelles en m³/mois de chaque zone géologique, nous les avons converti au L/s, par les calculs suivants :

Nous avons choisi comme mois d'étude le mois de décembre 2016, vu que c'est le mois qui représente la consommation la plus faible durant l'année, alors la pression la plus forte au niveau des conduites, ce qui entraîne une stagnation d'eau (probabilité de dégradation du désinfectant Cl).

Consommation journalière (m³/j) = Consommation mensuelle (m³/mois) /31

Consommation horaire (m³/h) = Consommation journalière / 24

Consommation horaire (L/s) = consommation horaire (m³/h) /3,6

Zone géologique	Consommation mensuelle (m3/M)	Consommation journalière (m3/J)	Consommation horaire (m3/H)	Consommation horaire (L/S)
GOLF ARGAN	2860	92.26	3.84	1.06
NORIA	452	14.58	0.61	0.16
HOTEL SELMAN	6393	206.23	8.59	2.39
BAGLIONI	60	1.94	0.08	0.02
RMA NATIONALE	0	0	0	0
JNANAT CHRIFIA	535	17.26	0.72	0.2

Tableau 2 : Consommation d'Eau par les zones étudiées en mois de decembre

Zone géologique	Nœud	Altitude	Demande de base
GOLF ARGAN	8	505	0.53
	7	511	0.53
NORIA	6	512	0.058
	5	520	0.058
HOTEL SELMAN	4	505	2.39
BAGLIONI	3	523	0.02
RMA NATIONALE	2	525	0
JNANAT CHRIFIA	1	527	0.2

Tableau 3 : Altitude et demande de base calculée pour chaque nœud

Junction 1	
Property	Value
*Junction ID	1
X-Coordinate	137.68
Y-Coordinate	2898.55
Description	
Tag	
*Elevation	527
Base Demand	0.2
Demand Pattern	
Demand Categories	1
Emitter Coeff.	

Figure 14 :Exemple des Données insérées aux nœuds sur Epanet 2.0

2.1.3. Conduites

Les conduites sont des arcs qui transportent l'eau d'un point du réseau à l'autre.

EPANET suppose que tous les tuyaux sont pleins à tout instant. L'eau s'écoule de l'extrémité qui a la charge hydraulique la plus élevée (altitude + pression, ou énergie interne par poids d'eau) à celle qui a la charge hydraulique la plus faible. Les données de base pour les tuyaux sont:

- les nœuds initial et final;
- le diamètre (mm) : diamètre intérieur.
- la longueur (m) : peut être majorée de 10 % pour tenir compte des pertes de charge singulières, récupéré d'après l'application Google map, avec une erreur de 4.06 mi.
- le coefficient de rugosité (pour déterminer la perte de charge) : 0,5 pour les PVC.
- l'état (ouvert, fermé, ou avec un clapet anti-retour)

Conduite	Diamètres	Longueur
1	352	5089
2	198	1506
3	352	2227
4	198	1200
5	352	9
6	440	2300
7	277	538
8	277	301

Tableau 4 : Diamètres et longueurs des conduites du réseau étudié

Le paramètre d'état permet à des tuyaux de contenir implicitement des vannes de sectionnement et de contrôler les clapets anti-retour (qui permettent l'écoulement dans une direction unique).

Les valeurs calculées pour les tuyaux incluent :

- Le débit
- La vitesse d'écoulement
- La perte de charge
- Le facteur de friction de Darcy-Weisbach
- la vitesse moyenne de réaction (le long du tuyau)

La perte de charge ou charge hydraulique perdue à cause du frottement de l'eau avec les parois du tuyau peut être calculée en utilisant :

- Formule de Darcy-Weisbach (sélectionnée par défaut).

2.2. Composants non-physiques

En plus des composants physiques, EPANET utilise trois types d'objets non physiques: des courbes, des courbes de modulation et des commandes de contrôle. Ils décrivent le comportement et les aspects fonctionnels d'un système de distribution.

2.2.1. Courbes

Les courbes en général sont des objets qui contiennent des couples de données ayant une relation entre elles. Deux objets ou plus peuvent partager la même courbe. Dans EPANET, on peut appliquer les types de courbes suivants:

- Courbe caractéristique
- Courbe de rendement
- Courbe de volume
- Courbe de perte de charge.
- Courbes de modulation

La courbe de modulation est la courbe la plus nécessaire pour simuler le Chlore .C'est un ensemble de multiplicateurs qui peuvent être appliqués à une valeur de base pour lui permettre d'évoluer au cours du temps. On peut assigner des courbes de modulation à la demande d'un nœud, au niveau d'une bêche, à la qualité de l'eau. L'intervalle de temps utilisé pour chacune des courbes de modulation a la même valeur fixe (toutes les périodes ont la même durée), qui est spécifié dans les Options de Temps du projet (voir fig.15). Durant cette période la valeur du paramètre ne change pas; elle reste égale au produit de sa valeur nominale et du multiplicateur de la courbe de modulation pour cette période de temps. Bien que toutes les courbes de modulation doivent utiliser le même intervalle de temps, chacune peut avoir un nombre différent de périodes. Quand la durée de la simulation excède la durée définie par le nombre de périodes d'une courbe de modulation, le programme retourne au début de la première période pour poursuivre la simulation.

Times Options	
Property	Hrs:Min
Total Duration	24
Hydraulic Time Step	1:00
Quality Time Step	0:05
Pattern Time Step	1:00
Pattern Start Time	0:00
Reporting Time Step	1:00
Report Start Time	0:00
Clock Start Time	12 am
Statistic	None

Pour un intervalle de temps de 24 heures, les coefficients multiplicateurs de demande sont les suivants :

Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Multiplicateur	0.73	0.61	0.73	0.69	0.92	1	0.61	0.81	0.61	0.85	0.85	1.62

13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1.31	0.92	1.12	0.92	1.2	2.05	1.43	1.08	0.92	1.12	0.85	0.81

Tableau 5: Coefficients multiplicateurs de demande pour un intervalle de temps de 24heures

2.3. La simulation du réseau de distribution

Le terme simulation se rapporte généralement au processus d'imitation du comportement d'un système, dans notre travail en considère la simulation comme le processus de l'utilisation d'une représentation mathématique du système réel, cette représentation est appelé "modèle".

La simulation d'un réseau de transfert ou de distribution qui reproduit le comportement dynamique d'un système existant ou projeté, est généralement appliquée, surtout dans les cas où on ne peut pas soumettre directement le système réel à l'expérimentation, ou afin d'évaluer un projet de système de distribution avant de le réaliser réellement.

La simulation peut être utilisée dans un état statique ou dynamique, la simulation à l'état statique est utilisée pour déterminer le comportement d'opération du système à cet état ; ce type d'analyse peut aider à déterminer l'effet à court terme du débit d'incendie ou de la demande moyenne sur le système.

La simulation à l'état dynamique est utilisée pour évaluer les performances du système avec le temps, ce type d'analyse permet à l'utilisateur de modeler le remplissage et le vidange des réservoirs, régulariser l'ouverture et la fermeture des vannes, variation des débits à travers le système en fonction de la variation des conditions de la demande et mettre en place une stratégie de contrôle automatique.

Des simulations de réseau d'AEP sont employées pour différents objectifs comme :

- Analyse de la qualité de l'eau
- Gestion de l'énergie
- Conception du réseau
- Efficacités opérationnelles quotidiennes dû à la formation d'opérateurs, la réaction aux situations d'urgences, et la maintenance.

3. Résultat de la simulation du chlore sur le logiciel Epanet 2.0

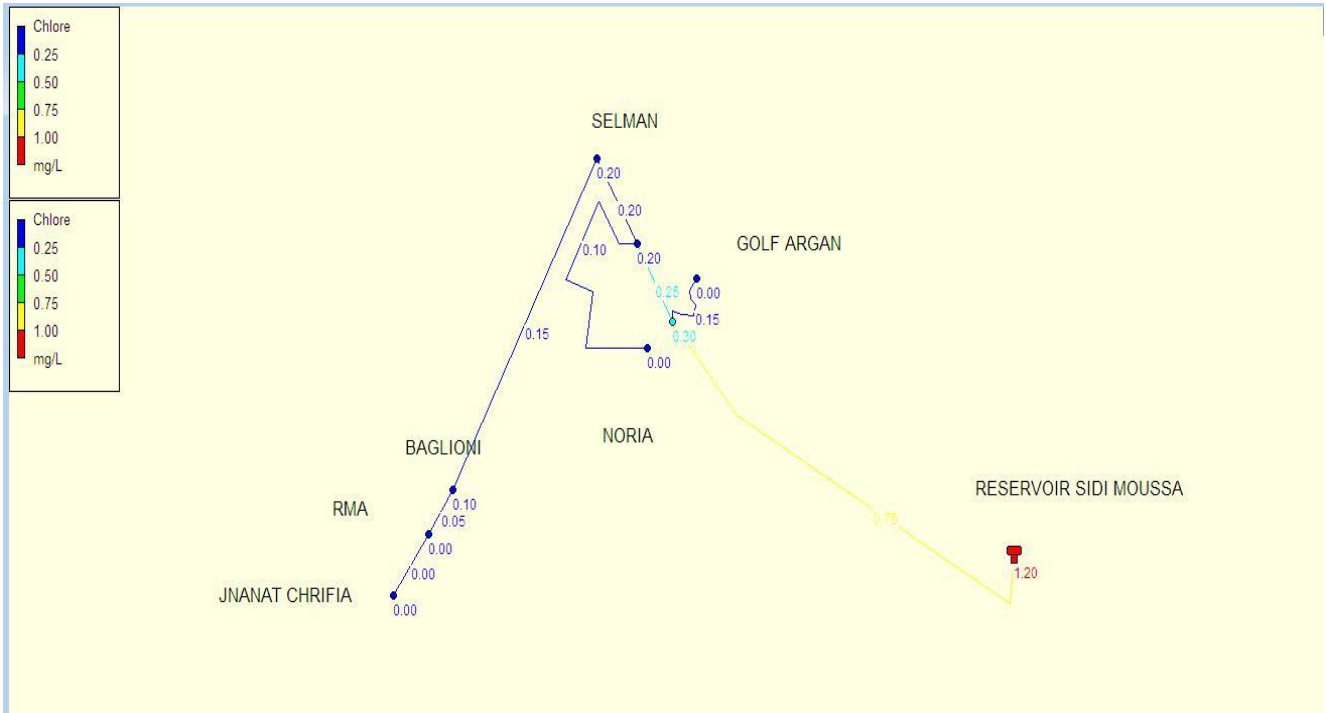


Figure 16 : Résultat de la simulation du chlore en mg/L

Résultats et discussions

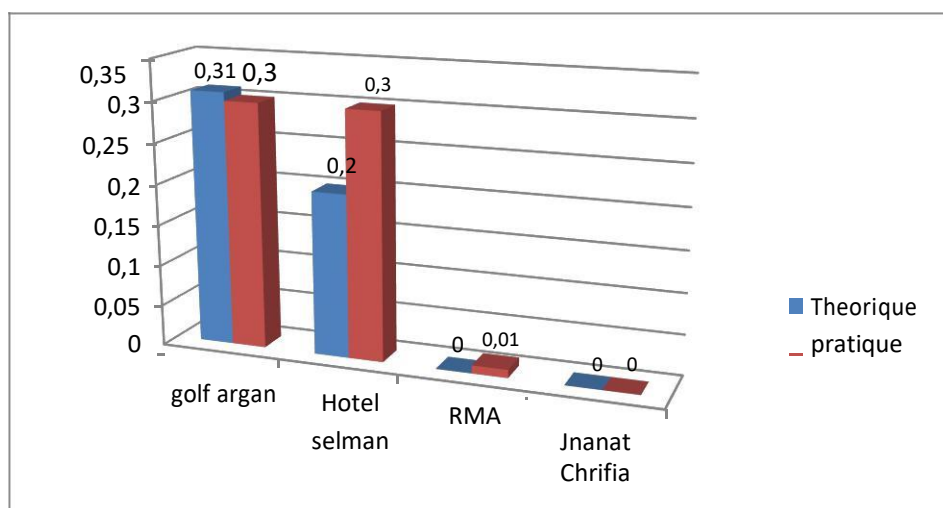


Figure 17: Histogramme de comparaison entre les résultats pratiques et théoriques des concentrations

Les résultats sont presque callés cela montre que la modélisation est fiable.

Alors les conduites de distribution d'eau potable aboutissant à Jnanat Chrifia diminuent la concentration en chlore de l'eau potable, chose qui nécessite une intervention par la RADEEMA pour chercher une solution à la cause du problème, en particulier en cas de Corrosion.

Parmi les solutions proposées :

- NETTOYAGE PAR RACLEURS

Enlèvements des dépôts boueux et élimination des pustules de corrosion $80 \text{ m} < D < 1500 \text{ mm}$

En introduisant dans la conduite d'un racleur rigide qui se déplace grâce à la pression de l'eau. Nécessité de mettre en place un équipement de réception et d'introduction du racleur.

- NETTOYAGE MECANIQUE

Domaine d'application

Tous types de dépôts et d'incrustations

L'opération se fait par Tringlage à l'aide d'un outil en acier entraîné en rotation et poussé par une tringle en acier. Toute opération de nettoyage doit être précédée d'un avis auprès des consommateurs les informant de l'intervention sur le réseau et les invitant de s'abstenir de tout soutirage.

Il faut en effet signaler qu'un nettoyage de conduite (racleurs rigides ou curage mécanique) peut engendrer la réapparition du phénomène de coloration de l'eau après un court délai sous une forme encore plus prononcée.

Il convient alors soit de mettre en oeuvre à l'amont un traitement de l'eau adapté (reminéralisation par exemple) soit de protéger la canalisation par un revêtement interne ou Une autre technique de réhabilitation.

- NETTOYAGE ET RINÇAGE DU TRONÇON

Cette opération est indispensable afin de réaliser l'étape de désinfection dans les meilleures conditions : on ne désinfecte que ce qui est propre.

Le nettoyage hydraulique à fort débit est la méthode la plus simple à mettre en oeuvre et elle est en général suffisante pour éliminer les matières solides susceptibles d'être présentes

Dans le réseau.

- DESINFECTION

La méthode la plus couramment utilisée est l'injection sous pression, d'une solution désinfectante à une extrémité de la portion de réseau à traiter. Tous les appareils de robinetterie, fontainerie doivent être ouverts afin d'être mis en contact avec le désinfectant.

La liste des produits désinfectants autorisés est donnée dans le Guide Technique, le plus fréquemment utilisé actuellement est le chlore sous forme d'hypochlorite de calcium (eau de Javel). Il est impératif de respecter un temps de contact minimum entre le désinfectant et la conduite ; ce temps dépend du produit utilisé et de la dose introduite.

- LA RECHLORATION

La rechloration serait a priori la solution évidente à appliquer dans le cas de zones à très faibles CCRL. Cette solution peut néanmoins être envisagée seulement si les impacts négatifs sur la qualité organoleptique de l'eau (goûts et odeurs très marqués) et sur les concentrations en SPD sont minimisés. Cette étude ne recommande donc pas l'ajout de chlore abusif pour avoir des CCRL minimales importantes en tout point du réseau. Elle permet justement de pouvoir simuler les CCRL avec de nouvelles conditions hydrauliques du réseau sans pour autant changer la dose de chlore à l'UTE, la circulation continue d'eau étant la meilleure stratégie à adopter.

Conclusion

Ce mémoire porte sur l'élaboration d'un modèle de prédiction des concentrations en chlore résiduel libre en vue d'enrichir la précision des informations sur la qualité de l'eau à l'échelle d'une zone donnée.

Plusieurs démarches ont été nécessaires pour mener cette étude. Tout d'abord, des prélèvements ont permis de connaître les CCRL et en déduire la qualité de l'eau distribuée au niveau de Jnanat Chrifia.

Une simulation de la cinétique de dégradation du chlore libre a été établie par le logiciel Epanet. Elle a permis de confirmer l'hypothèse de l'influence de l'eau et des parois sur la dégradation du chlore

Il a été observé que le facteur principal influençant la concentration de Chlore dans le réseau d'eau potable est le Biofilm et la corrosion (effet paroi). Des études effectuées (Guillaume Binet, 2010) montrent que ce facteur représente environ 90% de la valeur du coefficient global k qui détermine la CCRL dans l'eau. A ce facteur s'ajoute la teneur en MON, la température et le pH. Ces trois derniers facteurs jouent pour un pourcentage de 10% de la valeur k (Guillaume Binet, 2010).

Les conduites du secteur étudié étant de différents diamètres et longueurs, et sachant que l'effet paroi est prédominant dans les réactions de dégradation du chlore, une caractérisation des paramètres dimensionnels est intéressante à réaliser. Elle pourrait mieux cerner l'effet paroi évoqué ci-dessus.

Notre étude montre une parfaite superposition entre la concentration en chlore révélée par les analyses effectuées et celles déduites de la modélisation par le logiciel Epanet 2.0. Il en ressort que pour limiter l'effet de la dégradation du chlore dans le réseau d'alimentation en eau potable, il serait utile d'appliquer une rechloration ou bien une des solutions proposées au-dessus.

Bibliographie

Guillaume Binet, 2010 MIEUX PREDIRE LA DEGRADATION DU CHLORE EN RÉSEAU DE DISTRIBUTION. CAS D'ÉTUDE : LA VILLE DE QUÉBEC . Mémoire présenté

à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en génie civil pour l'obtention du grade de maître es sciences (M.Sc.)

Chlorine decay in drinking-water transmission and distribution systems : pipe service age effect. *Water Research*, 41(2): 387-396.

Booth, R.L. 1983. Methods for chemical analysis of water and wastes. Environmental Monitoring and Support Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, USA

Bove, F.J., M.C. Fulcomer, J.B. Klotz, J. Esrnart, EM. Dufficy et J.E. Savrin 1995. Public drinking water contamination and birth outcomes *American Journal of Epidemiology* 141(9): 850-862

Brière, F.G. 2006. Distribution et collecte des eaux, 2ème édition revue et corrigée, Presses Internationales Polytechnique, Canada

Cantor, K.P., CF. Lynch, M.E. Hildesheim, M. Dosemeci, J. Lubin, M. Alavanja et G. Craun 1998. Drinking water source and chlorination byproducts. I. Risk of bladder cancer. *Epidemiology* 9(1): 21-28.

Clark, R.M. et RC. Haught 2005. Characterizing pipe wall demand: Implications for water quality modeling. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(3): 208-217.

Crittenden, J.C, R.R. Trussell, D.W. Hand, K.J. Howe et G. Tchobanoglous 2005. *Water treatment: principles and design / MWH*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ,

Delisle, F.-J. 2009. Estimation des temps de séjour en réseau de distribution en vue de l'amélioration de la qualité de l'eau potable (Mémoire de maîtrise). Université Laval, Québec, <http://www.theses.ulaval.ca/2009/26381/26381.pdf>.

Zhang et A. Travaglia 2005. Calculation of the mean residence time in distribution systems from tracer studies and models. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 54(1): 1-14.

Eliades, D.G. 2009. EPANET MATLAB Toolkit.

Disponible sur <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25100-epanet-matlab>.

Ghebreniichael, K., A. Gebremeskel, N. Trifiinovic et G. Amy 2008. Modeling disinfection by-products: coupling hydraulic and chemical models. *Water Science & Technology: Water Supply (WSTWS)*, 8(3): 289-295.

Gouvernement du Québec 2001. Règlement sur la qualité de l'eau potable. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Québec.

Hallam, N.B., J.R. West, C.F. Forster, J.C.

Powell et I. Spencer 2002. The decay of chlorine associated with the pipe wall in water distribution systems. *Water Research*, 36(14): 3479-3488.

Hildesheim, M.E., K.P. Cantor, C.F. Lynch, M. Doseineci, J. Lubin, M. Alavanja et G. Craun 1998. Drinking water source and chlorination byproducts II. Risk of colon and rectal cancers. *Epidemiology*, 9(1): 29-35.

Hua, F., J.R. West, R.A. Barker et C.F. Forster 1999. Modeling of chlorine decay in municipal water supplies. *Water Research*, 33(12): 2735-2746.

Kennedy, K, A. Ameli et A. Tyagi 2006. Water a shared responsibility, the United Nations World Water Development Report 2. Chapter 4: The state of the resource. UNESCO, Paris, Franc.

Panguluri, S., W.M. Grayman et R.M. Clark 2005. Water distribution system analysis: field studies, modeling and management. U. S. Environmental Protection Agency (USEPA), Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory, Water Supply and Water Resources Division, Cincinnati, OH, USA

Rossman, L.A., R.M. Clark et W.M. Grayman 1994. Modeling Chlorine Residuals in Drinking-Water Distribution Systems. Journal of Environmental Engineering, 120(4): 803-820.

Santé Canada. 2002. Chloration de l'eau potable. Disponible sur <http://www.hc-sc.gc.ca/hl-vs/ivh-vsv/environ/chlor-fra.php> [visité en mai 2009]

Santé Canada 2006a. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada: document de consultation publique - Les acides haloacétiques. Santé Canada, Ottawa, ON, Canada

Santé Canada 2006b. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada, document de consultation publique - Les trihalométhanes. Santé Canada, Ottawa, ON, Canada

Santé Canada 2007. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada: document de consultation publique - Le chlore dans l'eau potable. Santé Canada, Ottawa, ON, Canada

Simard, A. 2008. Stratégies hydrauliques pour améliorer la qualité de l'eau potable en réseau de distribution (Mémoire de maîtrise). Université Laval, Québec. <http://www.theses.ulaval.ca/2008/25698/25698.html>.

Vasconcelos, J.J., W.M. Grayman, L. Kiene, O.

Wable, P. Biswas, A. Bhari, L.A. Rossman et R.M. Clark 1996.
Characterization and modeling of chlorine decay in distributions systems.
American Water Works Association Research Foundation (AWWARF),
Denver, CO, USA

EPANET 2.0, Simulation Hydraulique et Qualité, pour les Réseaux d'Eau sous
Pression

J. RODIER et al, l'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de
mer, 8^{ème} édition

Canada.Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada :
document technique – le chlore .Disponible sur www.canada.ca

Présentation de la Radeema disponible sur :www.radeema.ma