

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université SAAD DAHLAB de Blida  
Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Département des Sciences de l'Eau et l'Environnement



**Pour obtenir le diplôme de Master 2**  
**Filière : Génie des procédés**  
**Spécialité : Eau, environnement et développement durable**

**Thème**

**Utilisation d'outils de CFD comme aide à la  
conception du réservoir de contact de  
désinfection : cas de la station de Boudouaou**

**Par**

**Fariza AIT DJOUDI**

**Encadreur**

**Dr. Sofiane SOUKANE**

**Soutenance devant le jury**

Mr. W.NACEUR

Professeur, USDB

Président

Mr.A.OULARBI

M.C.B, USDB

Examineur

**2010-2011**

## **Remerciements**

*Je tiens à remercier Dieu pour le courage et la volonté sans lesquels mon travail n'aurait jamais vu le jour.*

*J'exprime mes profonds remerciements à mon encadreur Dr. SOUKANE Sofiane, pour l'aide compétente qu'il m'a apportée, pour sa patience et son encouragement à finir ce travail et pour m'avoir donné la possibilité de maîtriser plusieurs logiciels et m'avoir fait profiter des connaissances sur la modélisation numériques et pour sa contribution à mettre en forme mon manuscrit. Son œil critique m'a été très précieux pour structurer ce travail et pour améliorer la qualité des différents chapitres. Il s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de cette thèse.*

*Je tiens à remercier le Directeur du centre de traitement des eaux de Boudouaou où j'ai effectué le stage et Monsieur DELLALA Nabil mon responsable de stage.*

*Mes vifs remerciements s'adressent à la lumière de ma vie, le plus beau don de Dieu, avec eux je partage le plus sacré lien spirituel et affectif : mes parents ; que Dieu les protège, et à mes deux frères TAREK et GHILES et ma sœur OUIZA pour leurs soutien permanent.*

*Je remercie mon meilleur ami HANED Mounir pour sa présence à mes cotés et son aide pendant les deux dernières années.*

## *Dédicaces*

*Cette thèse est dédiée :*

*A mes chers parents pour leur affection, leurs souffrances et sacrifices, ainsi que pour leurs encouragements tout au long de mes études, que ce travail soit pour eux un témoignage de ma profonde reconnaissance et mon affection la plus chaleureuse.*

*A mes frères, ma sœur, et ma grande mère, mes tantes et mes oncles, mes cousins et mes cousines, à toute ma famille et mes amis, pour leur soutien.*

*A tous ceux et celles que j'aime et qui m'aiment.*

## Résumé

Les eaux de surface présentent une forte teneur en matière organique (MO). Le traitement de ces eaux par chloration afin d'inactiver les microorganismes pathogènes peut conduire, par réaction avec ces matières organiques, à la formation de sous-produits chlorés (SPC) toxiques pour l'homme. Ces produits chlorés sont principalement des trihalométhanes (THM) et des acides haloacétiques (AHA). Parmi les facteurs favorisant l'apparition de ces produits dans l'eau pendant sa désinfection est le temps de contact de l'eau avec les désinfectants en présence de la matière organique. Ce travail consiste à minimiser l'apparition des sous-produits de chloration (SPC) par ajustement du temps de contact au niveau des stations de traitement d'eau grâce à une analyse des écoulements. L'étude réalisée à l'aide d'un outil de dynamique de fluides computationnelle (CFD) se concentre sur la station de Boudouaou. Dans une première partie, l'analyse révèle la présence de boucles de recirculation. Ces boucles constituent des zones où le temps de contact est relativement élevé favorisant l'apparition de sous-produits nocifs pour la santé. En deuxième partie, une modification de la géométrie initiale permettant de minimiser les régions de recirculation est proposée. Une comparaison détaillée est effectuée avec la conception actuelle en relevant les améliorations apportées par les modifications.

## Abstract

Surface waters have a high organic content. The treatment of sewage by chlorination to inactivate pathogenic microorganisms may lead, by reaction with the organic compounds to the formation of chlorinated by-products (SPC) toxic to humans. These chlorinated compounds are mainly trihalomethanes (THMs) and haloacetic acids (HAAs). Among the factors favoring the emergence of these products during disinfection is the time of contact of water with chlorine in the presence of organic matter. This work aims to minimize the occurrence of by-products of chlorination (SPC) by adjusting the contact time through flow analysis. The study is carried out using a computational fluid dynamics (CFD) code and focuses on Boudouaou station. In the first part, the analysis reveals the presence recirculation loops. These loops represent dead zones where the contact time is relatively high, increasing the probability of the appearance of by-products harmful to health. In the second part, a modification of the initial geometry aiming to minimize the recirculation regions is proposed. A detailed comparison is made with the current design by raising the improvements brought by changes.

## ملخص

المياه السطحية لديها نسبة عالية من المواد العضوية (MO). يمكن معالجة هذه المياه بواسطة الكلور للتمكن من تعطيل عمل الكائنات الدقيقة، يؤدي تفاعل هذه المواد العضوية مع الكلور إلى تكوين بقايا ثانوية كلورية (SPC) مضرّة لصحة الإنسان هذه المركبات هي مكونة أساساً من (trihalomethanes THMs) والأحماض (AHA. haloacetic).

من بين العوامل التي تحبذ ظهور هذه المواد أثناء عملية معالجة في الخزانات، هي مدة تفاعل الماء مع المواد المطهرة في وجود المواد العضوية. هذه الدراسة تهتم بتخفيض ظهور كمية البقايا الكلورية عن طريق ضبط مدة الاتصال بين الكلور و المواد العضوية في محطات معالجة المياه عن طريق دراسة خزان التطهير الخاص بمركز معالجة المياه الصالحة للشرب ببودواو. الدراسة انجزت بواسطة استخدام أداة لديناميك الموائع الحسابية (CFD). في الجزء الأول من الدراسة، اظهرت التحاليل وجود مناطق ميتة (حلقات تدويرية). هذه الحلقات تمثل الأماكن التي تكون فيها مدة الاتصال كبيرو هو من العوامل التي تساعد على ظهور البقايا الكلورية المضرّة لصحة.

في الجزء الثاني، تم اقتراح تعديلاً للتمكن من إلغاء أماكن وجود حلقات تدويرية، وتم إجراء مقارنة تفصيلية مع التصميم الحالي من خلال رفع قيمة التحسينات التي أدخلتها هذه التغييرات.

## Table des matières

Introduction générale.....	7
CHAPITRE I Notions fondamentales sur la désinfection.....	9
I.1 Définition de la désinfection.....	10
I.2 L'eau, les germes pathogènes et la sante humaine .....	10
I.3 La place de la désinfection dans une filière de traitement.....	11
I.4 Les critères d'un désinfectant idéal .....	12
I.5 Conditions générales pour une bonne désinfection .....	12
I.6 Mode d'action des désinfectants.....	13
I.7 Pouvoir désinfectant .....	13
I.8 Facteurs influençant l'action du désinfectant .....	13
I.9 Comparaison entres les principaux agents désinfectants.....	13
CHAPITRE II La desinfection par le chlore.....	15
II.1 Introduction .....	16
II.2 Caractéristiques du chlore .....	16
II.3 Le chlore dans l'eau.....	17
II.4 Les sous-produits de chloration.....	18
II.4.1 Formation des sous-produits de chloration .....	18
II.4.2 L'effet sur la santé humaine .....	19
II.4.3 Normes OMS (Organisation Mondiale de la Santé) .....	19
II.4.4 Modèles de prédiction des sous produits de chloration.....	20
II.5 L'intérêt du critère Ct .....	21
II.6 Conclusion .....	22
CHAPITRE III Modélisation des reservoirs de contact.....	23
III.1 Introduction.....	24
III.2 Dimensionnement d'un réservoir de contact ( chloration) .....	24

III.2.1	Le rôle du réservoir de contact.....	24
III.2.2	La géométrie optimale.....	25
III.2.3	Exemple de dimensionnement .....	25
III.3	La modélisation numérique.....	27
III.3.1	Avantages et inconvénients .....	28
III.3.2	L’outil de CFD utilisé .....	28
III.3.3	Les équations constitutives.....	29
CHAPITRE IV	Modélisation du réservoir de contact de la station de Boudouaou .....	30
IV.1	Introduction.....	31
IV.2	la désinfection et la qualité de l’eau.....	31
IV.3	Description de la station de traitement des eaux de Boudouaou.....	31
IV.4	Les dimensions du réservoir de contact .....	31
IV.5	Analyse du réservoir de contact et les étapes de modélisation .....	33
IV.5.1	Création des géométries et génération du maillage.....	34
IV.5.2	Insertion des conditions aux limites .....	35
IV.5.3	La préparation et le lancement du calcul.....	37
IV.5.4	Résultats et discussions .....	37
IV.6	Conclusion .....	42
CHAPITRE V	Nouvelles géométries.....	43
V.1	Introduction .....	44
V.2	Modifications proposées sur la géométrie initiale.....	44
V.3	Résultats et discussions .....	45
V.4	Une géométrie idéale ? .....	49
V.5	Conclusion.....	52
Conclusion générale	.....	53
ANNEXES	.....	55

LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES.....	58
REFERENCES.....	61

# **INTRODUCTION GENERALE**



L'eau constitue un élément essentiel pour le développement de la vie. Le corps d'un être humain adulte est composé de 60 % d'eau. En raison de son caractère vital, l'eau liée aux activités humaines doit être de bonne qualité sanitaire afin d'éviter la survenue de pathologies hydriques. Les milieux aquatiques peuvent être altérés par la contamination microbienne des eaux. Cette dernière est susceptible de compromettre la pratique sécuritaire de nombreux usages de l'eau. Pour des raisons de santé publique, il s'avère donc nécessaire de réduire la contamination microbienne des eaux. La désinfection de l'eau destinée à la consommation s'est révélée d'une grande efficacité quant à la destruction ou l'inactivation des micro-organismes pathogènes, particulièrement ceux qui sont à l'origine de la fièvre typhoïde et du choléra.

Dès la découverte du chlore et son utilisation comme désinfectant, le nombre de maladies voire de décès liés à la consommation d'eau a été considérablement réduit. Le processus de désinfection par chloration a démontré son efficacité avec un prix raisonnable et une technologie simple. De surcroît, la chloration vise plusieurs cibles à la fois. En effet, en plus de son rôle destructeur de microorganismes néfastes à la santé, elle élimine les goûts, les odeurs, les couleurs et certains métaux. À ce jour, le chlore demeure le désinfectant le plus utilisé pour l'eau potable et celui pour lequel l'information scientifique est la plus abondante.

Toutefois, le chlore réagit également avec les matières organiques d'origine naturelle présentes dans l'eau, telles les feuilles en décomposition. Cette réaction chimique produit une famille de composés faisant partie des sous-produits de la chloration. Ceux qu'on rencontre le plus souvent sont les THM, notamment le chloroforme. La concentration en THM dans l'eau potable peut dépendre de plusieurs facteurs, à savoir, la matière organique, les ions bromure, le chlore libre, le pH, la température et le temps de contact, sachant que la majorité de ces sous-produits ne peut pas être éliminée par un traitement complémentaire, il convient donc de jouer sur ces facteurs pour diminuer le risque de leur formation. Comment alors peut-on assurer un temps de contact convenable dans le réservoir inactivant la majorité des micro-organismes sans risque de formation des sous produits de chloration ?

# **CHAPITRE I NOTIONS FONDAMENTALES SUR LA DESINFECTION**

## I.1 DEFINITION DE LA DESINFECTION

La désinfection est l'étape ultime du traitement de l'eau de consommation avant la distribution. Elle permet d'éliminer, ou du moins inactiver, les micro-organismes pathogènes afin d'éviter toute maladie d'origine hydrique[1]. C'est le moyen de fournir une eau bactériologiquement potable, tout en y maintenant un pouvoir désinfectant suffisamment élevé pour éviter les reviviscences bactériennes dans les réseaux de distribution[1]. Ce traitement n'inclut pas nécessairement la stérilisation, qui est la destruction de tous les organismes vivants dans un milieu donné. Cependant, suivant les normes, l'eau potable contient toujours quelques germes banals[1].

Il faut également faire la différence entre la désinfection « active » (effet bactéricide) qui assure l'élimination des germes dans un temps relativement court avant d'alimenter le réseau, et la désinfection « passive » ou de sécurité, qui consiste à maintenir une concentration minimale de désinfectant (résiduel) dans le réseau de distribution et jusqu'aux points de prélèvements (effet rémanent) [2].

## I.2 L'EAU, LES GERMES PATHOGENES ET LA SANTE HUMAINE

L'eau brute contient de nombreux macro/micro-organismes dont certains peuvent être pathogènes. Ces organismes sont capables de proliférer dans un corps humain en provoquant des troubles de santé plus au moins graves. L'eau n'est pour eux qu'un moyen de transport et donc un vecteur de contamination [2]. Les limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine sont regroupées dans le tableau I.1.

Germes	Concentration
Escherichia coli	Absent dans 100 ml
Entérocoques	Absent dans 100 ml
Bactéries sulfito-réductrices	Absent dans 100 ml
Bactéries coliformes	Absent dans 100 ml

Tableau I.1 - Limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine [3].

Les germes pathogènes, capables de provoquer des maladies, proviennent pour la plupart de déjections humaines. Les principales infections d'origine hydrique observées sont majoritairement des troubles digestifs (gastro-entérites). Les cas de typhoïdes, paratyphoïde, hépatite virale et dysenterie sont plus graves mais beaucoup plus rares [3]. Ces organismes sont classés dans les grands groupes suivants [2]:

- virus,
- bactéries,
- champignons,
- protozoaires,
- vers,
- insectes.

Les micro-organismes résistent différemment à la désinfection. L'ordre décroissant de résistance moyenne, illustré sur la figure I.1, montre que les bactéries présentent la plus faible résistance relativement aux virus et aux kystes de protozoaires.

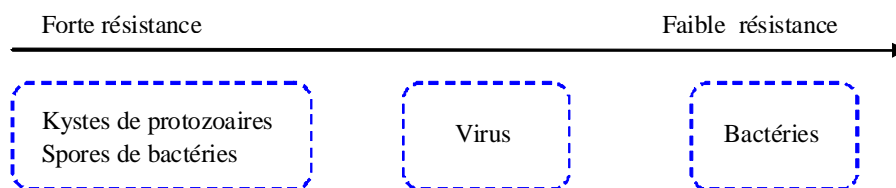


Figure I.1 - Classement des micro-organismes en fonction de leur résistance moyenne aux traitements de désinfection chimique [4].

### I.3 LA PLACE DE LA DESINFECTION DANS UNE FILIERE DE TRAITEMENT

Dans un traitement conventionnel, la désinfection est toujours l'étape ultime. Elle intervient après les étapes de clarification (décantation/filtration) qui éliminent les matières en suspension et diminuent le pourcentage des matières organiques dissoutes et après les étapes d'affinage (ozone/ charbon actif en grain (CAG)) qui participent également à la diminution des concentrations en carbone organique dissous (COD) [2].

#### **I.4 LES CRITERES D'UN DESINFECTANT IDEAL**

Les critères d'un désinfectant idéal sont les suivants [5] :

- doit être disponible en quantité importante et à un prix raisonnable,
- doit éliminer toute odeur,
- doit former avec l'eau une solution homogène,
- ne doit pas s'adsorber sur la matière organique autre que les parois des bactéries,
- ne doit pas endommager les métaux et tacher les vêtements,
- ne doit être toxique que pour les micro-organismes et non pas pour les êtres humains,
- doit avoir une capacité pénétrante,
- doit être sans danger lors de son stockage, de son transport et de sa manipulation,
- doit être soluble dans l'eau en proportions importantes,
- doit avoir une action germicide lente pour maintenir une certaine concentration résiduelle pendant la désinfection,
- doit permettre une mesure et plusieurs contrôles faciles de sa concentration,
- doit être efficace aux températures de l'eau de consommation.

#### **I.5 CONDITIONS GENERALES POUR UNE BONNE DESINFECTION**

Pour avoir une désinfection efficace, il est nécessaire d'avoir une eau de bonne qualité. La teneur en matière en suspension (MES) doit être aussi réduite que possible, et au maximum égale à  $1 \text{ mg.l}^{-1}$ . En effet, les bactéries et surtout les virus s'agglomèrent sur les MES, qui les protègent de l'effet des désinfectants [4]. La teneur en matière organique (MO), carbone organique total (COT), et surtout en carbone organique assimilable (COA) ou carbone organique dissout biodégradable (CODB), doit être également la plus faible possible, sinon l'eau va surconsommer du désinfectant, ce qui engendrera les effets suivants [4] :

- Surdosage du réactif.
- Difficulté à maintenir un résiduel dans le réseau sauf en différents points de celui-ci.
- Reviviscences bactériennes en cours de distribution.
- Apparition des sous produits nuisibles.

Il faut cependant que la recherche de la réduction de formation des THM ne se fasse pas au détriment de l'efficacité de la désinfection elle-même [4].

## **I.6 MODE D’ACTION DES DESINFECTANTS**

Le mode d’action de l’agent désinfectant dépend de la nature du micro-organisme et de sa structure chimique [4]. D’une façon générale :

- Dans le cas des bactéries, l’attaque de l’oxydant rend plus perméable la membrane cellulaire et porte sur les macromoléculaires d’acides nucléique (ADN et ARN) empêchant alors toute reproduction [4].
- Dans le cas des virus, l’oxydant pénètre la capsidie et altère les protéines des ADN ou ARN [4].

## **I.7 POUVOIR DESINFECTANT**

L’action germicide des désinfectants est basée sur des mécanismes d’oxydo-réduction. C’est ainsi que l’efficacité d’un désinfectant est liée à son pouvoir oxydant, lui même fonction de la température et du pH [4]. L’efficacité d’un oxydant est déterminée par la relation dose-temps de désinfectant (Ct) pour inactiver 99 % d’une souche référence. Le désinfectant est alors d’autant plus efficace que son Ct est faible[1]. Les bactéries sont référencées par rapport à Escherichia Coli, les virus par le Poliovirus et les Protozoaires par les kystes Giardia[1].

## **I.8 FACTEURS INFLUENÇANT L’ACTION DU DESINFECTANT**

Les principaux facteurs influençant l’action du désinfectant sont :

- Le temps de contact.
- La concentration en désinfectant.
- La température.
- Le type de micro-organisme.
- Le pH.
- Le rapport entre la concentration initiale de désinfectant et le nombre initial de microorganismes ( $Ci_0/N_0$ ) [6].

## **I.9 COMPARAISON ENTRE LES PRINCIPAUX AGENTS DESINFECTANTS**

Le tableau I.3 présente les avantages et les inconvénients des 4 principaux agents désinfectants à savoir, le chlore, le dioxyde de chlore, l’ozone et l’ultraviolet [4, 5, 7].

	Chlore	Dioxyde de chlore	Ozone	Ultraviolet
Capacité de désinfection	Moyenne	Elevée	La plus élevée	Moyenne - élevée
Capacité d'oxydation	Oui	Oui	Oui	Non
Action rémanente	Oui	Quelques jours	Quelques minutes	Aucune
Réaction avec l'ammoniaque	Oui	Non	Non	Non
Sous-produits	Oui	Oui	Oui	aucun
Le temps de contact	Moyen	Moyen	Court	Court
Dimension du matériel	Petit à moyen	Petit à moyen	Moyen à volumineux	Petit à moyen
Fiabilité de l'équipement	Bon	Bon	Bon	Bon
Technologie	moyenne	Moyenne	complexe	Simple à moyenne
Sécurité de l'entreprise	Oui	Oui	Modéré	Minimale
Dépendance du pH	Extrême	Aucune	Aucune	Aucune

Tableau I.2 - Comparaison entre les principaux agents désinfectants [4, 5, 7].

# **CHAPITRE II LA DESINFECTION PAR LE CHLORE**



## II.1 INTRODUCTION

Le chlore est le désinfectant le plus utilisé à travers le monde [2, 5, 8]. Depuis plus d'un siècle et demi, le chlore est utilisé pour désinfecter l'eau destinée à la consommation humaine. Le chlore en tant que désinfectant a les principaux avantages suivants [9] :

- une bonne efficacité pour tuer ou inactiver les bactéries, les virus et les kystes;
- un pouvoir rémanent;
- un effet bactériostatique;
- une grande facilité d'utilisation;
- un coût raisonnable.

## II.2 CARACTERISTIQUES DU CHLORE

C'est un élément de la famille des halogènes, dont l'électronégativité est très élevée. En plus, il est classé parmi les oxydants les plus puissants vu sa valeur élevée du potentiel redox, et son pouvoir désinfectant est par conséquent remarquable. Le chlore de formule chimique  $\text{Cl}_2$  est un gaz à la température et pression normales [2]. Ces propriétés sont regroupées dans le tableau II.1.

Masse molaire	70.906 g.mol <sup>-1</sup>
Etat physique 15°C	Gaz jaune-vert
Température de fusion	-101,00 °C
Température d'ébullition	-34.05 °C
Température critique	7710.83 °C
Densité de gaz par rapport à l'air	2.491
Masse volumique à 0°C	3.22 g.l <sup>-1</sup>
Solubilité dans l'eau à 20°C	7.3 g.l <sup>-1</sup>

Tableau II.1 - Les propriétés du chlore [4].

Le chlore a permis de franchir une grande étape technologique en atteignant à moindre frais et avec une efficacité redoutable un niveau d'hygiène et de qualité faisant reculer les grandes épidémies hydriques [2]. Les produits les plus utilisés pour obtenir une désinfection de l'eau par le chlore sont :

- le chlore gazeux ( $\text{Cl}_2$ ),
- l'hypochlorite de sodium ( $\text{NaOCl}$ ),
- l'hypochlorite de calcium  $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ,
- la monochloroamine ( $\text{NH}_2\text{Cl}$ ),
- le dioxyde de chlore.

Parmi ces produits, le chlore gazeux est le plus utilisé pour la désinfection de l'eau potable.

### II.3 LE CHLORE DANS L'EAU

Lors de son injection dans l'eau, le chlore gazeux subit plusieurs réactions qui conduisent à différentes formes représentées sur la figure II.1 [10].

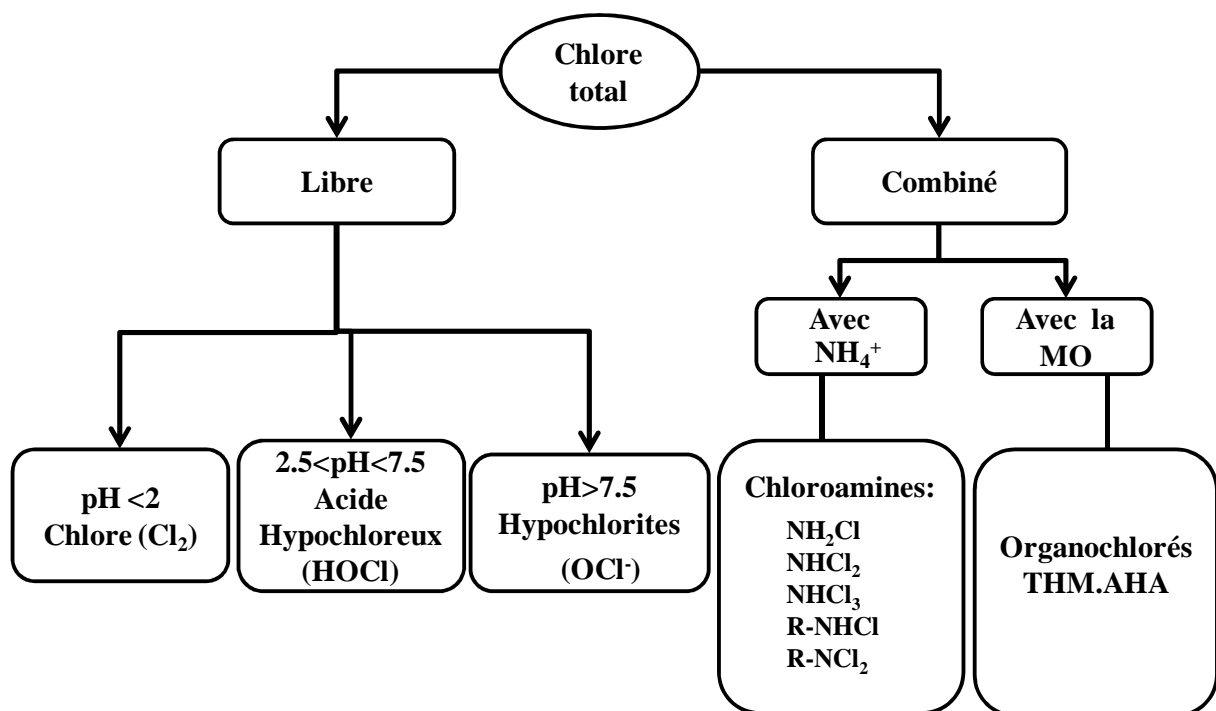


Figure II.1 - Les différentes formes de chlore dans l'eau

## II.4 LES SOUS-PRODUITS DE CHLORATION

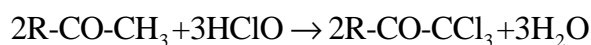
L'appellation générique sous-produits de désinfection désigne l'ensemble des sous-produits formés au niveau des usines de traitement d'eau quels que soient la nature et le point d'injection de l'oxydant. Les sous-produits de chloration sont très difficiles à analyser, et n'ont pas tous été identifiés. Il existe de nombreux groupes chimiques au sein des SPC [11] dont les plus connus sont les suivants :

- Les trihalométhanes (THM)<sup>1</sup>.
- Les haloacétates ou acides haloacétiques (AHA)<sup>2</sup>.
- Les haloacétonitriles.
- Les haloaldéhydes.
- Les haloacétones.
- Les halohydroxyfuranones.

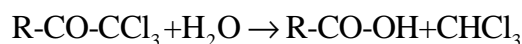
### II.4.1 Formation des sous-produits de chloration

Le chlore peut réagir avec la matière organique de l'eau, les ions bromure, les ions iodure, et former des sous-produits. La matière organique naturelle est source de nombreux précurseurs pour la formation de SPC. Les substances humiques<sup>3</sup>, caractérisées par une odeur importante (présence de cycles aromatiques), représentent la fraction la plus réactive et formatrice de SPC[12].

Les mécanismes réactionnels qui peuvent se produire entre la matière organique et le chlore libre sont de types addition, substitution et oxydation [13]. Le mécanisme de formation des THM peut être schématisé par une réaction de substitution (R désigne le radical organique) :



Suivie par une hydrolyse :




---

<sup>1</sup> Chloroforme (Cl<sub>3</sub>CH), bromodichlorométhane (BrCl<sub>2</sub>CH), dibromochlorométhane (ClBr<sub>2</sub>CH), bromoforme (Br<sub>3</sub>CH).

<sup>2</sup> Monochloroacétate CH<sub>2</sub>ClCOOH, dichloroacétate CHCl<sub>2</sub>COOH, trichloroacétate CCl<sub>3</sub>COOH, bromochloroacétate CHClBrCOOH, dibromoacétate (CHBr<sub>2</sub>COOH, bromodichloroacétate CCl<sub>2</sub>BrCOOH.

<sup>3</sup> Matière organique formée par la décomposition de plantes.

La formation de ces composés halogénés est d'autant plus importante que [14] :

- le carbone organique total (COT) et la teneur en bromures ( $\text{Br}^-$ ) de l'eau brute sont plus élevés,
- le taux de traitement (la dose en chlore (D)) est au-dessus du point critique,
- le temps de contact est plus long,
- la température (T) est plus élevée,
- le pH est plus alcalin.

### II.4.2 L'effet sur la santé humaine

La présence des SPC pose un problème de santé publique qui concerne la plupart des usines de traitement d'eau superficielle. Il existe trois voies d'exposition aux THM; l'inhalation, l'absorption cutanée et l'ingestion. Les indicateurs d'exposition les plus communément utilisés dans les études épidémiologiques publiées sont les concentrations en SPC dans le sang et dans l'air expiré. Les premières études toxicologiques chez l'animal datent du milieu des années 70 pour les THM, et du début des années 90 pour les AHA [11] [15]. La découverte des SPC dans les réseaux d'eau potable a entraîné la réalisation de nombreuses études pour caractériser les propriétés toxicologiques et épidémiologiques de ces composés [16] [17] [18]. Ces études ont montré une association entre les SPC et certains cancers chez l'homme (vessie et colorectal le plus souvent) [19] [20]. Les résultats des études concernant les effets des SPC sur la reproduction et le développement sont en revanche beaucoup plus controversés et peu significatifs [21] [22]. Près de 600 SPC sont identifiés à ce jour et les familles majoritaires ont été régulièrement étudiées dans les réseaux d'eau potable [17] [4].

### II.4.3 Normes OMS (Organisation Mondiale de la Santé)

L'OMS a établi les valeurs guides suivantes comme limites maximales des concentrations en THM admissible des eaux de boisson [23] [24] :

- Chloroforme  $\text{CHCl}_3$  200  $\mu\text{g/l}$ .
- Bromodichlorométhane  $\text{CHBrCl}_2$  :60  $\mu\text{g/l}$ .
- Dibromochlorométhane  $\text{CHBr}_2\text{Cl}$  :100  $\mu\text{g/l}$ .
- Bromoforme  $\text{CHBr}_3$  100  $\mu\text{g/l}$ .

De plus, et afin de tenir compte de l'effet possiblement additif de ces composés, il est spécifié que:

$$\frac{[\text{CHCl}]}{200} + \frac{[\text{CHBrCl}_2]}{60} + \frac{[\text{CHBr}_2\text{Cl}]}{100} + \frac{[\text{CHBr}_3]}{100} \leq 1 \quad (.1)$$

où les concentrations sont en µg/L. Il existe également des valeurs guides pour les deux AHA suivants :

- L'acide dichloroacétique  $\text{CHCl}_2\text{COOH}$  : 50 µg/l.
- L'acide trichloroacétique  $\text{CCl}_3\text{COOH}$  : 100 µg/l.

Ces dernières valeurs guides sont provisoires car l'OMS estime que la base de données toxicologiques est en devenir, et que les données sont actuellement insuffisantes pour déterminer si cette valeur est techniquement réalisable [24].

#### II.4.4 Modèles de prédiction des sous produits de chloration

Plusieurs études [25, 26], pour la plupart basées sur des approches empiriques, proposent des équations reliant les concentrations en THM aux paramètres de l'eau brute, à la teneur en matière organique (carbone organique total (COT), au carbone organique dissout (COD), à l'absorbance (UV254) ), aux bromures, aux paramètres du traitement (dose de chlore) ainsi qu'aux paramètres caractéristiques de l'eau distribuée (pH, température, chlore résiduel). Seuls Chowdhury et Amy [26] rapportent des modèles prédictifs concernant les AHA. Parmi tous les modèles proposés pour les THM, celui proposé par Amy et al. [25] est souvent cité [27] :

$$THM_{(mg/l)} = 10^{-1.385} (DOC)^{1.098} (Cl_2)^{0.152} (Br^-)^{0.068} (T)^{0.609} (pH)^{1.601} (t)^{1.263} \quad (.2)$$

Ces modèles sont utiles aux gestionnaires des réseaux d'eau potable, qui peuvent ainsi ajuster les doses de traitement afin d'offrir une eau de la meilleure qualité possible, ainsi qu'aux gouvernements qui peuvent ainsi tester l'applicabilité des limites réglementaires, et enfin aux professionnels de la santé publique [9]. Les modèles les plus courants sont listés en Annexe.

## II.5 L'INTERET DU CRITERE Ct

Le dimensionnement d'un réservoir de chloration est effectué sur la base du critère Ct (produit de la concentration résiduelle en désinfectant C en  $\text{mg.l}^{-1}$  par le temps de contact t en min). Ce dernier est établi pour chaque germe pathogène à inactiver en fonction de la température et du pH. Pour situer les ordres de grandeur, si un Ct de  $1 \text{ mg.min.l}^{-1}$  est suffisant pour éliminer 99 % des bactéries par le chlore dans des conditions données, le même degré d'inactivation réclamera un Ct de 10 pour les virus et de 100 pour les kystes de *Cryptosporidium*. D'après les dernières compilations, les valeurs moyennes de Ct (en  $\text{mg.min.l}^{-1}$ ) nécessaires pour obtenir 99 % d'inactivation des principaux micro-organismes entre 5 et 25 °C peuvent être estimées suivant le tableau II.2 [2].

La dispersion des valeurs provient des différences de conditions opératoires notamment la température. Ce critère doit prendre en compte la possibilité de formation des sous produits de chloration. Le maintien d'une concentration en chlore libre de  $0.5 \text{ mg.l}^{-1}$  pendant 30 min à pH inférieur à 8 permet d'éliminer à la fois les bactéries pathogènes et les virus de la poliomyélite. Les kystes de protozoaires requièrent en revanche des valeurs de Ct rédhibitoires pour l'application du fait des tailles d'ouvrage correspondantes et des risques de formation de sous produits tels que THM et HAA par la réaction compétitive avec les matières organiques [4].

Microorganismes	Ct ( $\text{mg.min.l}^{-1}$ )
E. Coli	0,03 à 0,05
Poliovirus	1,1 à 2,5
Poliovirus	0,01 à 0,05
Kyste de Giardia lamblia	15 à 150
kyste de Giardia muris	30 à 630
Kyste de Cryptosporidium	7200

Tableau II.2 -Valeurs de Ct pour l'inactivation de différents micro-organismes par le chlore à pH 6 et 7 entre 5 à 25°C.

Le tableau II.3 est une illustration des effets de la température et du pH sur le Ct à appliquer pour inactiver 2, 3 et 4 lg de virus par le chlore.

Température (°C)	2 lg d'inactivation		3 lg d'inactivation		4 lg d'inactivation	
	pH		pH		pH	
	6 à 9	10	6 à 9	10	6 à 9	10
<b>0.5</b>	6	45	9	66	12	90
<b>5</b>	4	30	6	44	8	60
<b>10</b>	3	22	4	33	6	45
<b>15</b>	2	15	3	22	4	30
<b>20</b>	1	11	2	16	3	22
<b>25</b>	1	7	1	11	2	15

Tableau II.3 - Valeurs de Ct en mg.min.l<sup>-1</sup> pour l'inactivation des virus par le chlore [2].

## II.6 CONCLUSION

Malgré les avantages d'utilisation du chlore pour la désinfection de l'eau, il génère des sous-produits de chloration qui peuvent engendrer des effets graves sur la santé humaine. La majorité de ces sous-produits ne pouvant être éliminée par un traitement complémentaire, il convient donc de jouer sur les facteurs qui favorisent leur formation pour diminuer les quantités générées lors du traitement.

# **CHAPITRE III    MODELISATION DES RESERVOIRS DE CONTACT**



### **III.1 INTRODUCTION**

Le rendement des réservoirs de chloration de l'eau peut être amélioré par de simples modifications de la géométrie initiale de ces réservoirs par insertion de murs de guidage. Malheureusement ces modifications ne sont pas toujours suffisantes et d'autres changements doivent être apportés pour rapprocher le plus possible le comportement du réservoir de contact de celui d'un réacteur piston [28].

Dans la majorité des cas, la conception d'un modèle de réservoir de contact se base sur un écoulement idéal. L'étude hydrodynamique (analyse des vitesses d'écoulement et des zones mortes) ne peut être obtenue ni analytiquement ni par des procédures expérimentales. C'est une tâche difficile, coûteuse et longue, qui, dans la majorité des cas pratiques, n'est pas effectuée [28]. Toute modification apportée pour améliorer l'efficacité hydraulique de ces réservoirs peut être réalisée à l'aide d'outils de dynamique de fluide computationnelle (CFD), capables de prédire les écoulements et les conditions optimales de fonctionnement [28].

Les objectifs à atteindre par cette analyse sont :

- La distribution homogène du chlore dans l'eau.
- L'absence de zones mortes.
- L'inactivation de 99.99% des micro-organismes.
- La non-formation des sous produits de chloration.

### **III.2 DIMENSIONNEMENT D'UN RESERVOIR DE CONTACT ( CHLORATION)**

#### **III.2.1 Le rôle du réservoir de contact**

Les réservoirs de contact sont conçus de telle sorte à se rapprocher du réacteur idéal qui assure à l'eau un temps de séjour strictement équivalent au temps de contact hydraulique [4]. Ce réservoir doit être aménagé pour assurer un bon mélange du réactif avec l'eau à traiter et permettre un temps de contact conforme au Ct fixé pour satisfaire le degré de désinfection souhaité.

### III.2.2 La géométrie optimale

Pour la désinfection, le réacteur piston est le plus efficace car le temps de résidence du fluide correspond exactement au temps théorique obtenu en divisant le volume par le débit [2]. L'optimisation des Ct est un impératif : on sait en effet que le contact entre un oxydant et l'eau à traiter est susceptible de conduire à la formation de sous-produits indésirables et cela d'autant plus que le Ct est élevé [4]. Au lieu d'augmenter le taux de traitement C pour obtenir un Ct plus efficace, il est préférable de jouer sur le temps de contact réel. Cette optimisation se fait en pratique au moyen de traceurs, mais elle est rendue plus facile par l'utilisation de codes de CFD [2].

Pour la désinfection, le réacteur piston est le plus efficace car le temps de séjour du fluide correspond exactement au temps théorique obtenu en divisant le volume par le débit [2]. En pratique, on s'intéresse au temps de passage noté  $t_{10}$  mesuré sur sortie de 10% du flux de traceur. Le rapport  $t_{10}$ /temps de séjour hydraulique (débit sur volume) permet alors de refléter l'écart dans la distribution des temps de séjour par rapport au réservoir idéal. Il varie entre 0,1 et 0,7 en fonction de la géométrie du bassin. Il peut, toutefois, être augmenté grâce à l'aménagement de chicanes [4]. On note que, généralement, ce rapport se situe entre 0,1 et 0,2 pour un réservoir sans chicanes et entre 0,5 et 0,7 pour des réservoirs optimisés [2].

### III.2.3 Exemple de dimensionnement

Un réservoir de contact est généralement dimensionné de telle sorte que son comportement soit le plus proche possible de celui d'un réacteur piston. Ceci permettra une élimination homogène des micro-organismes sans risque de formation des sous produits de chloration. En guise d'exemple de vérification d'un fonctionnement, on considère un réservoir ayant une longueur  $B=128\text{m}$ , une largeur  $A=88\text{m}$  et une hauteur  $H=5\text{m}$ . On s'intéresse au traitement d'une eau avec un débit de  $180 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$  afin d'inactiver 99.99% des kystes de Giardia, moyennant les paramètres suivants :

- $Ct = 122 \text{ mg}.\text{min}.\text{l}^{-1}$
- Température :  $15^\circ\text{C}$
- pH : 8
- Concentration en chlore résiduel :  $C = 0,5 \text{ mg/l}$

Pour le calcul de  $\tau$ , on a le temps de contact  $t_{10}$  qu'il faut réaliser,

$$t_{10} = Ct/C \quad (.3)$$

Ce qui donne  $t_{10}=122/0.5=244$  min.

Si l'on souhaite réaliser un rapport  $t_{10}/\tau = 0,78$  par exemple, il sera nécessaire d'assurer un temps hydraulique  $\tau = 244/0,78$  donc  $\tau = 312,82$  min et par conséquent un volume de réservoir  $V=\text{débit}*\tau = 312,82*180$  donc  $V=56307,69\text{m}^3$ .

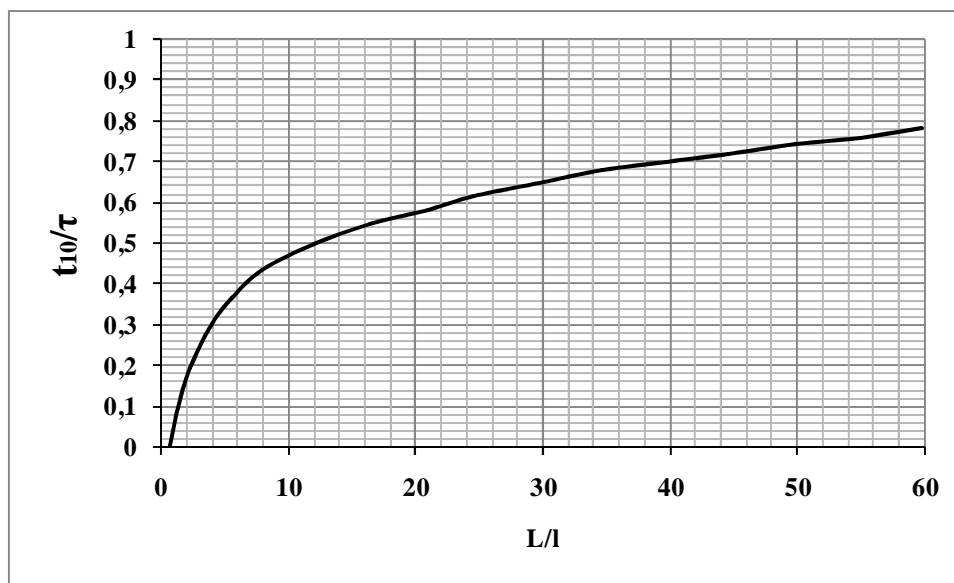


Figure III.1 - Évolution de  $t_{10}/\tau$  en fonction du rapport  $L/l$  dans un réacteur de chloration [2].

Si l'on veut insérer  $n$  chicanes et avoir un  $t_{10}/\tau$  de 0,78, le rapport entre le trajet total parcouru  $L$  et la distance entre chicanes  $l$  doit être de 60 selon la figure III.1. Afin de vérifier que le rapport  $t/\tau$  est réalisable, le rapport  $L/l$  est calculé de telle sorte que :

$$\begin{cases} L = (n+1) A \\ \frac{L}{l} = A(n+1)^2 / B \\ l = B / (n+1) \end{cases} \quad (.4)$$

Où,

$n$  est le nombre des chicanes,  $B$  la longueur de réservoir et  $A$  la largeur de réservoir.

Si l'on souhaite insérer 8 chicanes ( $n=8$ ), avec  $B=128\text{m}$  et  $A=88\text{m}$  : le rapport  $L/l$  sera  $L/l = 88*(8+1)^2/128 \Rightarrow L/l = 55,68$  ce qui est satisfaisant selon figure III.1.

### III.3 LA MODELISATION NUMERIQUE

Le principe du calcul numérique, schématisé sur la figure III.2 consiste à résoudre numériquement des équations différentielles aux dérivées partielles (EDP) ou des systèmes d'EDP, qui régissent des problèmes physiques complexes. Grâce à une méthode de discrétisation, ces équations sont transformées en un système d'équations algébriques résolu par des techniques d'analyse numérique.

Différentes méthodes numériques permettent le passage du domaine continu vers un domaine discret. On peut citer, la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis, et la méthode des volumes finis. La principale différence entre ces quatre méthodes numériques consiste dans le type d'approximation de la variable inconnue et dans le processus de discrétisation. Sur la base de cette philosophie un certain nombre de codes commerciaux sont apparus, pour répondre aux besoins de l'ingénierie [29].

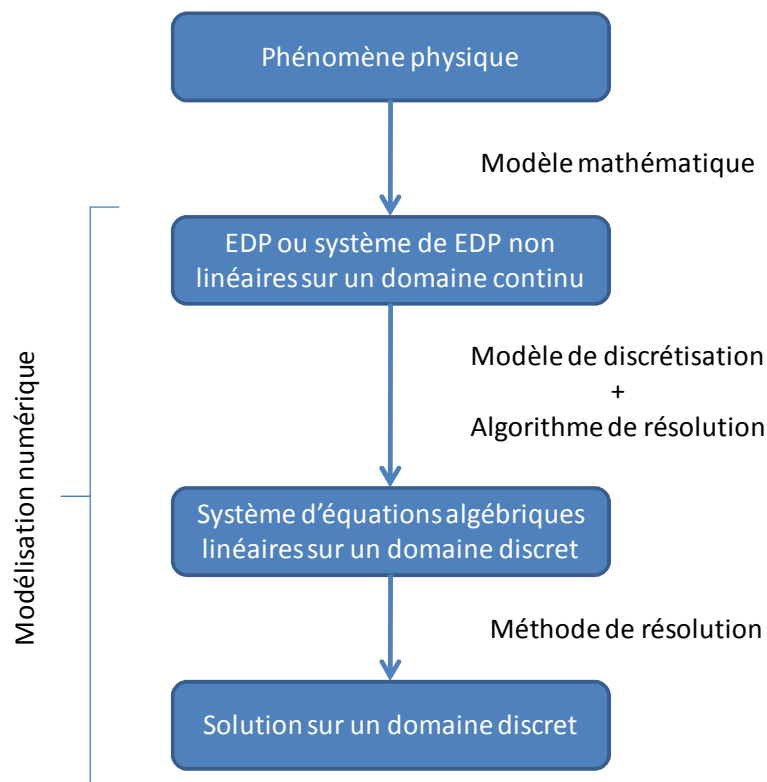


Figure III.2 - Le principe du calcul numérique [29].

### III.3.1 Avantages et inconvénients

Parmi les avantages on peut noter que le calcul numérique :

- Permet le calcul d'une solution numérique pour la majorité des problèmes pratiques ayant un modèle mathématique.
- Présente de nos jours des coûts de calcul faibles car praticables sur ordinateur personnel.
- Offre, avec la technologie actuelle, une rapidité notable permettant de tester plusieurs géométries, conditions aux limites...
- Fournit, à l'aide d'interpolations appropriées, une information complète sur tous les champs, en tout point.
- Offre la possibilité de simuler des conditions réelles exceptionnelles.
- Offre la possibilité de simuler des conditions idéales.

Parmi les inconvénients majeurs, on note souvent la non-disponibilité de certains paramètres physiques.

### III.3.2 L'outil de CFD utilisé

*Gambit* et *fluent* sont des logiciels, sous licence commerciale, permettant de réaliser des simulations 2D ou 3D en mécanique des fluides allant de la construction du maillage avec *Gambit* jusqu'à la résolution des équations de Navier Stokes et au post-traitement avec *fluent*. *fluent* est un logiciel qui résout par la méthode des volumes finis des problèmes de mécanique des fluides, de transferts thermiques et de matière avec réactions chimiques [29]. Largement répandus dans l'industrie (automobile, aéronautique...) en raison de leurs interface graphique puissante et de l'abondance de leurs options, ils permettent de réaliser des simulations avec des modèles physiques variés (diphasique, turbulent...).

Le logiciel *Gambit* est un préprocesseur qui permet de mailler des domaines 2D/3D de géométrie complexe pour des problèmes de CFD. Il regroupe quatre fonctions principales :

- Définition de la géométrie du problème (construction si la géométrie est simple ou bien import de la géométrie à partir d'un outil de CAO).
- Génération du maillage et sa vérification.
- La définition des frontières (types de conditions aux limites) et définition des domaines de calcul.
- L'export vers *fluent* par la génération des fichiers appropriés.

### III.3.3 Les équations constitutives

Dans cette étude, nous nous intéressons principalement à un écoulement d'eau en régime stationnaire (traitement permanent d'eau potable) dans le réservoir de contact. Les équations qui régissent l'écoulement permanent incompressible de fluide dans le réservoir de contact en régime turbulent en absence de forces extérieures sont données sous forme différentielle par [30] :

Equation de continuité,

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (.5)$$

Equation de bilan de quantité de mouvement en coordonnées cartésiennes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{\partial}{\partial x} \rho \bar{u} \bar{u} + \frac{\partial}{\partial y} \rho \bar{v} \bar{u} + \frac{\partial}{\partial z} \rho \bar{w} \bar{u} \right) + \left( \frac{\partial}{\partial x} \rho \bar{u}' \bar{u}' + \frac{\partial}{\partial y} \rho \bar{v}' \bar{u}' + \frac{\partial}{\partial z} \rho \bar{w}' \bar{u}' \right) , \\ \qquad \qquad \qquad = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) \\ \left( \frac{\partial}{\partial x} \rho \bar{u} \bar{v} + \frac{\partial}{\partial y} \rho \bar{v} \bar{v} + \frac{\partial}{\partial z} \rho \bar{w} \bar{v} \right) + \left( \frac{\partial}{\partial x} \rho \bar{u}' \bar{v}' + \frac{\partial}{\partial y} \rho \bar{v}' \bar{v}' + \frac{\partial}{\partial z} \rho \bar{w}' \bar{v}' \right) , \\ \qquad \qquad \qquad = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) \\ \left( \frac{\partial}{\partial x} \rho \bar{u} \bar{w} + \frac{\partial}{\partial y} \rho \bar{v} \bar{w} + \frac{\partial}{\partial z} \rho \bar{w} \bar{w} \right) + \left( \frac{\partial}{\partial x} \rho \bar{u}' \bar{w}' + \frac{\partial}{\partial y} \rho \bar{v}' \bar{w}' + \frac{\partial}{\partial z} \rho \bar{w}' \bar{w}' \right) , \\ \qquad \qquad \qquad = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) \end{array} \right. \quad (.6)$$

Où les composantes de la vitesse  $u$ ,  $v$ , et  $w$  sont données par la décomposition de Reynolds à savoir :

$$\begin{cases} u = \bar{u} + u' \\ v = \bar{v} + v' \\ w = \bar{w} + w' \end{cases} \quad (.7)$$

avec  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$  et  $\bar{w}$  les vitesses lissées dans le temps i.e. moyennée dans un intervalle de temps assez long pour être indépendantes du temps et  $u'$ ,  $v'$  et  $w'$  les fluctuations de la vitesse dues à la turbulence.

**CHAPITRE IV    MODELISATION DU  
RESERVOIR DE CONTACT DE LA  
STATION DE BOUDOUAOU**

## **IV.1 INTRODUCTION**

La station de traitement d'eau potable de Boudouaou a été mise en œuvre en 1987. Elle traite les eaux des barrages de Béni-Amrane, Keddara et El-Hamiz. Dans cette partie on s'intéresse à l'analyse du réservoir de chloration de cette station pour essayer d'y minimiser le risque de formation des sous produits de chloration cancérigènes.

## **IV.2 LA DESINFECTION ET LA QUALITE DE L'EAU**

La station de traitement des eaux potables de Boudouaou utilise le chlore pour la désinfection. Les analyses de l'eau alimentant cette station montrent une situation dégradée par la présence de matières organiques, avec des concentrations élevées en carbone organique dissous. Le croisement de ces résultats avec ceux d'absorbance UV disponibles sur ces mêmes eaux démontre que les matières organiques dissoutes véhiculées par les eaux sont riches en noyaux aromatiques et donc propices à la formation de SPC. En notant que d'après les données de cette année, le pH de l'eau a souvent été supérieur à 7,6. La dose en chlore utilisée est élevée et les concentrations du chlore résiduel ( $Cl_R$ ) sont aussi très élevées, variant entre 0,78 et 1,32 ( $Cl_{Rmoy}=0.9 \text{ mg.l}^{-1}$ ). Ceci est principalement dû au fait que le centre de Boudouaou est un centre de production et est éloigné des centres de distribution où la concentration de chlore résiduel est ajustée selon les normes imposées pour l'eau potable.

## **IV.3 DESCRIPTION DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EAUX DE BOUDOUAOU**

La station, d'une superficie de 17 hectares, possède une capacité de traitement de 540 000 m<sup>3</sup>/j et une capacité de stockage de 100 000 m<sup>3</sup>. Elle est munie d'un ouvrage d'arrivée et de mélange, 6 décanteurs, 16 filtres et 2 réservoirs de contact d'une capacité de 50 000 m<sup>3</sup> chacun (voir Figure IV.1).

## **IV.4 LES DIMENSIONS DU RESERVOIR DE CONTACT**

Le réservoir de contact (voir images réelles sur la Figure IV.2) a une longueur de 128 m, une largeur de 88 m et est fermé à une hauteur de 6 m (Figure IV.3). Son volume utile est 50 000m<sup>3</sup>, ce qui correspondant à une hauteur d'eau de 5 m. Il est muni de 7 chicanes hautes de 6m et d'une chambre de contact également haute de 6m sauf au niveau des deux



entrées où la hauteur est de 5m. A ce niveau, l'eau se déverse dans le réservoir sur une longueur totale de 30,5m.

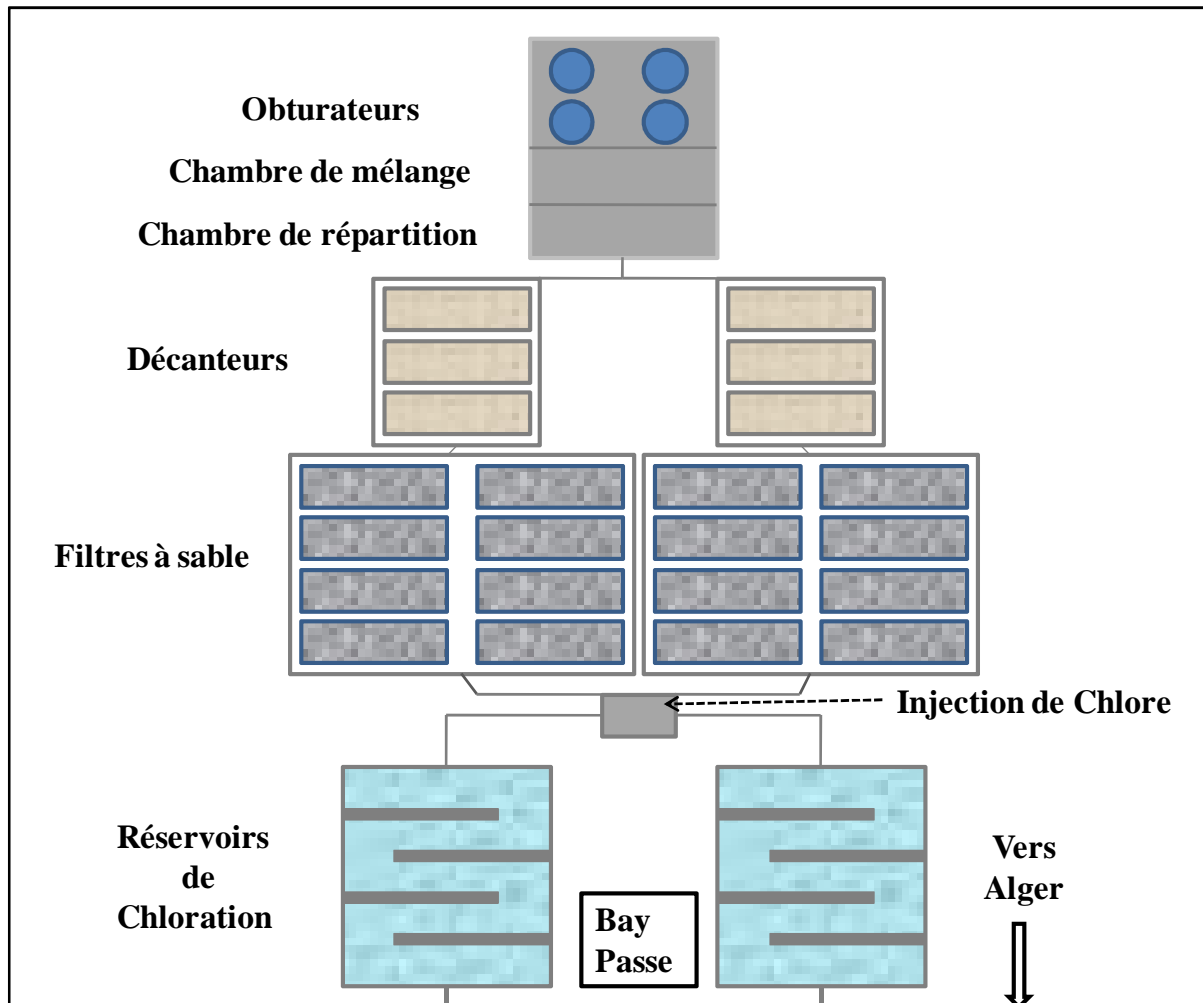


Figure IV.1 - Schéma simplifié de la station de traitement.



Figure IV.2 - Images réelles du réservoir.

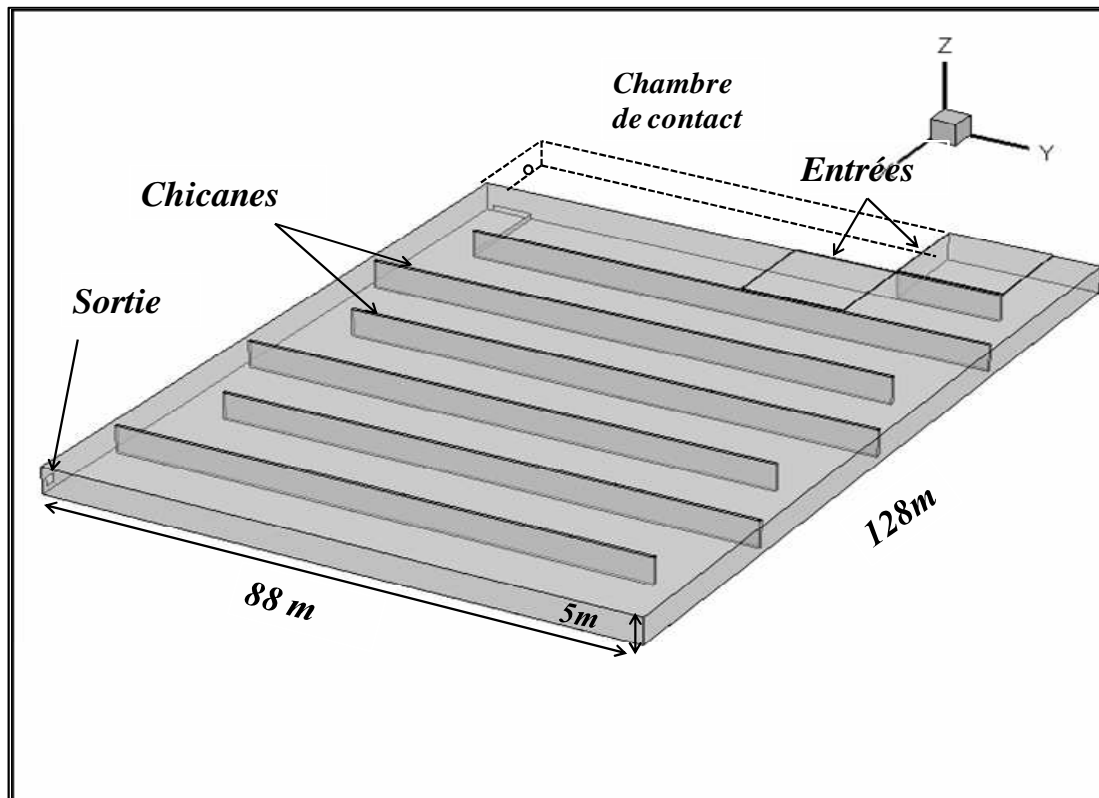


Figure IV.3 - Les dimensions du réservoir de contact.

#### IV.5 ANALYSE DU RESERVOIR DE CONTACT ET LES ETAPES DE MODELISATION

La station a été réalisée pour traiter un débit de  $6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , donc environ  $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  pour chaque réservoir de contact, mais le débit n'est pas constant et actuellement elle ne traite qu'environ la moitié de ce débit, donc  $1.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  pour chaque réservoir. La répartition du débit entre les deux réservoirs se fait au niveau de chambre de répartition et n'est pas exactement équitable. Afin d'alléger le plus possible les temps de calcul, la chambre de contact peut être éliminée. En effet, en régime stationnaire celle-ci est totalement remplie et le temps de séjour de l'eau dans cette chambre est faible en comparaison avec le temps de séjour dans le canal de contact. La modélisation du réservoir passe par plusieurs étapes allant de la création de la géométrie jusqu'à la récupération des résultats de calcul.

### IV.5.1 Création des géométries et génération du maillage

La première étape dans un processus de simulation consiste à générer le maillage de la géométrie à analyser. La génération d'un maillage tridimensionnel s'effectue à l'aide de *Gambit* en plusieurs étapes, à savoir :

- Construction de la géométrie destinée à supporter le maillage.
- Insertion des caractéristiques des volumes générés.
- Insertion des types de conditions aux limites.
- Génération du maillage.
- Export du maillage vers le solveur *fluent*.

La construction de la géométrie ne passe pas par une méthodologie fixe et dépend de la créativité de l'utilisateur. L'outil *Gambit* se base surtout sur une approche « bottom-up » où toutes les entités topologiques de différentes classes sont disponibles (points, lignes, splines, surfaces, volumes). Dans notre cas, la géométrie du système est le réservoir de contact dont la construction a été effectuée comme suit (voir Figure IV.4) :

1. Création de la base du réservoir subdivisée en plusieurs surfaces.
2. Trois extrusions consécutives suivant la hauteur de réservoir de contact, pour la prise en compte de la surface de sortie.
3. Extrusion de la zone d'entrée.

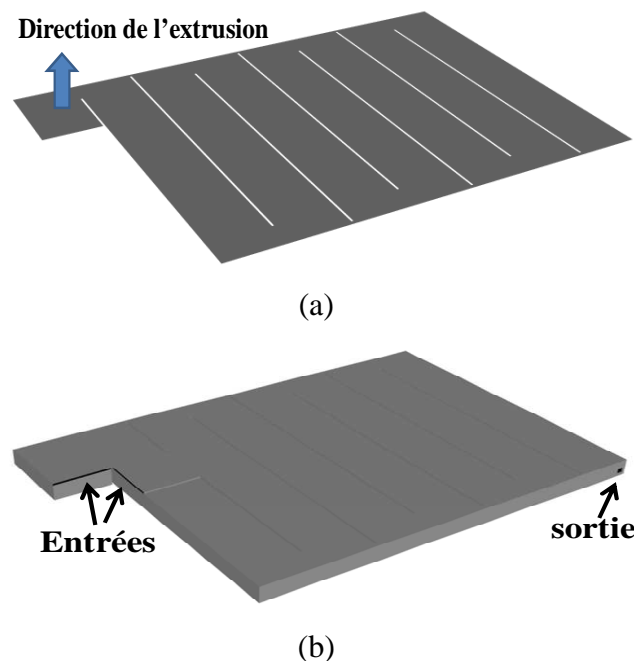


Figure IV.4 - Les différentes étapes de génération de la géométrie/maillage. (a) géométrie plane. (b) volume obtenu par extrusion.

La géométrie du réservoir offre la possibilité de générer un maillage constitué d'éléments hexaédriques (Figure IV.5). Ce type de maillage, dit structuré, contient beaucoup moins d'éléments qu'un maillage non structuré constitué de tétraèdres, sauvegardant ainsi un précieux temps de calcul. Plusieurs tests numériques ont été effectués avec différentes résolutions de maillage. Le nombre total d'éléments générés est de l'ordre de 340 000, à partir duquel les résultats de simulation sont identiques. Le maillage obtenu est ainsi exporté vers le solveur *fluent*.

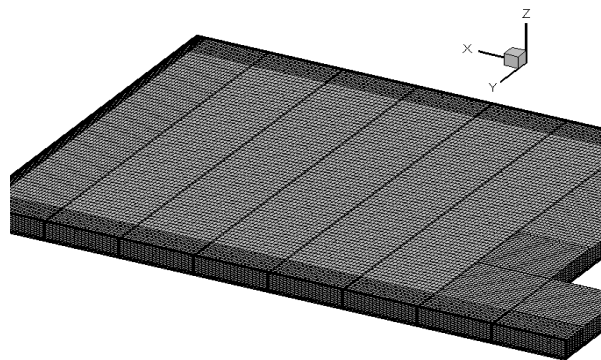


Figure IV.5 – Vue tridimensionnelle du maillage du réservoir de contact.

#### IV.5.2 Insertion des conditions aux limites

L'imposition des conditions aux limites est une étape importante dans la préparation du calcul avant le transfert vers le solveur. La figure IV.6 montre les types de conditions utilisées.

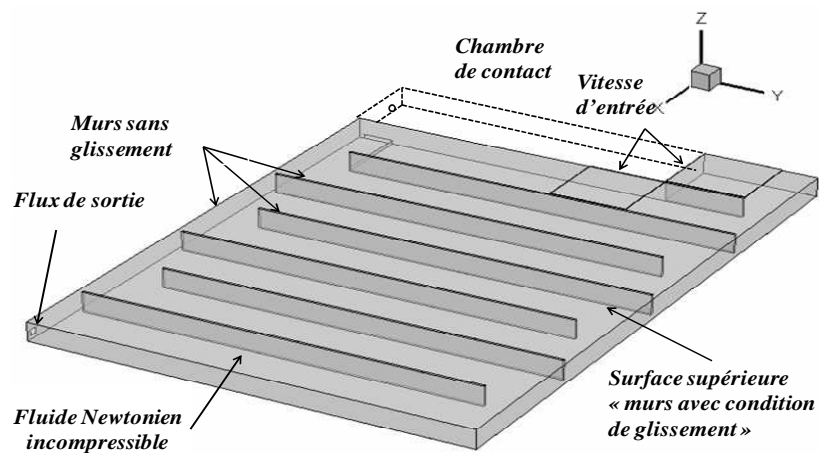


Figure IV.6 - Les conditions aux limites.

Ces conditions aux limites sont relevées des conditions de fonctionnement du procédé. On opte pour :

- Imposition de la vitesse de fluide à l'entrée.
- Les murs et les chicanes présentent des conditions de non glissement.
- La surface supérieure est sujette à une condition de glissement car l'écoulement est à surface libre<sup>4</sup>.
- La sortie n'a pas de condition particulière ni en vitesse ni en pression.

#### IV.5.2.1 Le calcul de la vitesse d'entrée

Connaissant le débit d'eau entrant  $\Phi$ , et afin de pouvoir estimer la vitesse d'entrée dans le réservoir, il est nécessaire de connaître la section d'écoulement. Pour cette raison, la hauteur de déversement de l'eau de la chambre de contact vers le reste du réservoir est estimée à l'aide des deux équations suivantes [31] :

$$\Phi = \frac{2}{3} m L H \sqrt{2 g H} \quad (.8)$$

$$m = \left( 0.405 + \frac{0.003}{H} \right) \left[ 1 + 0.55 \left( \frac{H}{H + Z} \right) \right] \quad (.9)$$

avec,

$L$  : la longueur totale d'entrée,

$H$  : la hauteur de déversement,

$Z$  : la hauteur de réservoir de contact.

En injectant l'équation (.9) dans l'équation (.8) on obtient :

$$\Phi = \frac{2}{3} \left( 0.405 + \frac{0.003}{H} \right) \left[ 1 + 0.55 \left( \frac{H}{H + Z} \right) \right] L H \sqrt{2 g H} \quad (.10)$$

L'équation (.10) est résolue par la méthode de Newton-Raphson en utilisant le solveur GRG2 d'Excel, avec une hauteur  $Z=5\text{m}$  et une longueur d'entrée  $L=15+15.5=30.5\text{m}$ .

Pour un débit de  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ , une hauteur de déversement de 18 cm est obtenue, résultant en une section d'entrée de  $5,5\text{m}^2$ , alors que pour un débit d'entrée de  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  la hauteur de déversement est de 11 cm résultant en une section d'entrée de  $3,3 \text{ m}^2$ .

---

<sup>4</sup> En régime permanent, il est supposé que la surface du fluide est stable et plane.

En utilisant la relation de Stokes (Débit = Section d'écoulement \* vitesse d'entrée), les vitesses d'entrée du fluide correspondant aux débits de 3 et de 1,5 m<sup>3</sup>/s sont respectivement 0,55 et 0.45m/s.

### IV.5.3 La préparation et le lancement du calcul

On rappelle que les calculs sont réalisés grâce au logiciel *fluent*, qui résout les équations de Navier-Stokes couplées au transport de chaleur et de matière par la méthode des volumes finis. *fluent* offre deux modes de calcul : le mode double précision et le mode simple précision. Le revers de cette précision est que le premier mode requiert beaucoup plus de mémoire. C'est pour cette raison que le mode simple précision est utilisé. L'utilisation de *fluent* passe par des étapes importantes, à savoir :

- Choix du solveur, qui dans notre cas est le solveur implicite stationnaire.
- Choix du modèle visqueux. Dans cette analyse l'écoulement est turbulent et le modèle de turbulence choisi est le modèle  $k-\varepsilon$  standard.
- Choix du fluide à transporter. L'étude étant exclusivement hydrodynamique, le fluide choisit sera de l'eau.
- Imposition des conditions aux limites. La vitesse d'entrée est imposée selon le débit utilisé.
- Initialisation des champs de calcul. Généralement les vitesses sont initialisées à zéro.
- Choix des critères d'arrêt. Une précision est choisie pour la satisfaction de l'équation de continuité et pour la convergence sur les composantes de la vitesse.

### IV.5.4 Résultats et discussions

Les résultats de simulation des écoulements dans le réservoir de désinfection montrent de larges régions de recirculation à l'entrée de chaque canal formé par deux chicanes successives (voir Figure IV.7).

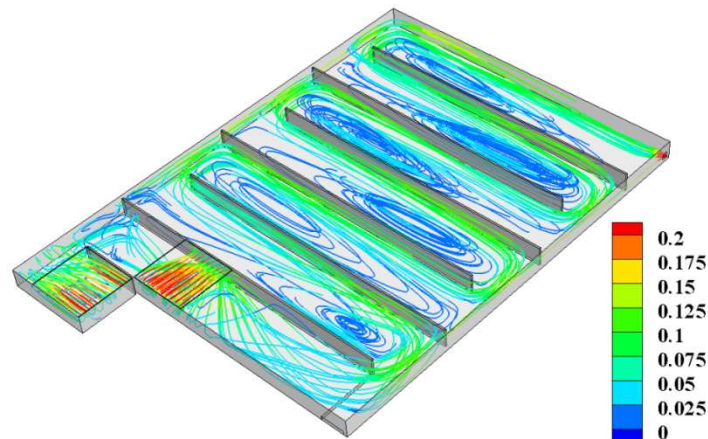


Figure IV.7 - Lignes de courant (couleur par module de vitesse m/s).

Le module de vitesse de l'eau est relativement très faible dans ces zones suggérant que le fluide y réside plus longtemps augmentant ainsi le risque de formation de sous produits de chloration. Cependant il est intéressant de noter que les passages étroits de part et d'autre des murs extérieurs du réservoir empêchent l'apparition de zones mortes au contournement des chicanes.

Un zoom à l'intérieur d'un passage défini par deux chicanes successives montre que la taille des zones de recirculation est très grande (voir figure IV.8). Chacune de celles-ci occupe en effet presque toute la longueur du canal et pratiquement le tiers de la section d'écoulement. Le fluide passant par le tiers restant possède alors une vitesse beaucoup plus élevée et par conséquent un temps de séjour beaucoup plus court et possiblement une désinfection incomplète.

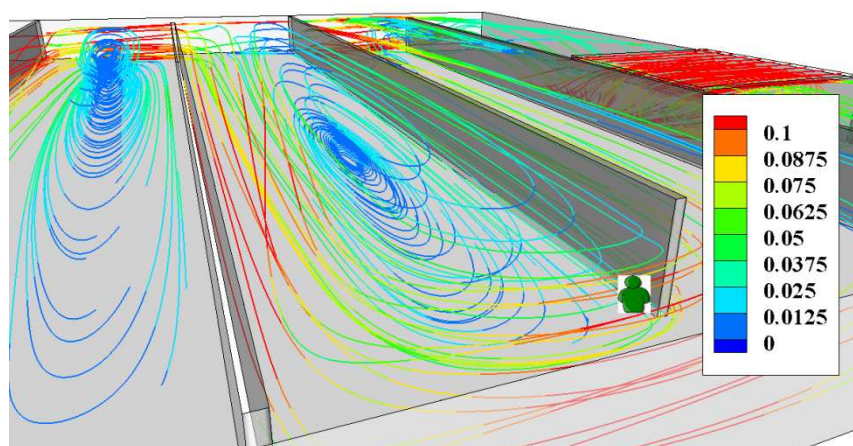


Figure IV.8 - Lignes de courant (couleur par module de vitesse m/s) au voisinage d'une zone morte.

La figure IV.9 montre la distribution du nombre de Reynolds suivant les trajectoires d'écoulement. Mis à part au voisinage des zones de recirculation, le nombre de Reynolds est très élevé, voire dépassant 500000 à l'entrée et au contournement des chicanes dû à un rétrécissement de la section d'écoulement confirmant un écoulement hautement turbulent.

Un zoom au niveau de l'entrée (figure IV.10) montre les fortes turbulences lors du déversement de l'eau, mais la vitesse d'écoulement s'estompe rapidement jusqu'à l'ordre du cm/s dû aux larges dimensions du réservoir (voir la taille approximative d'une personne dans le réservoir sur les figures IV.8 et IV.10).

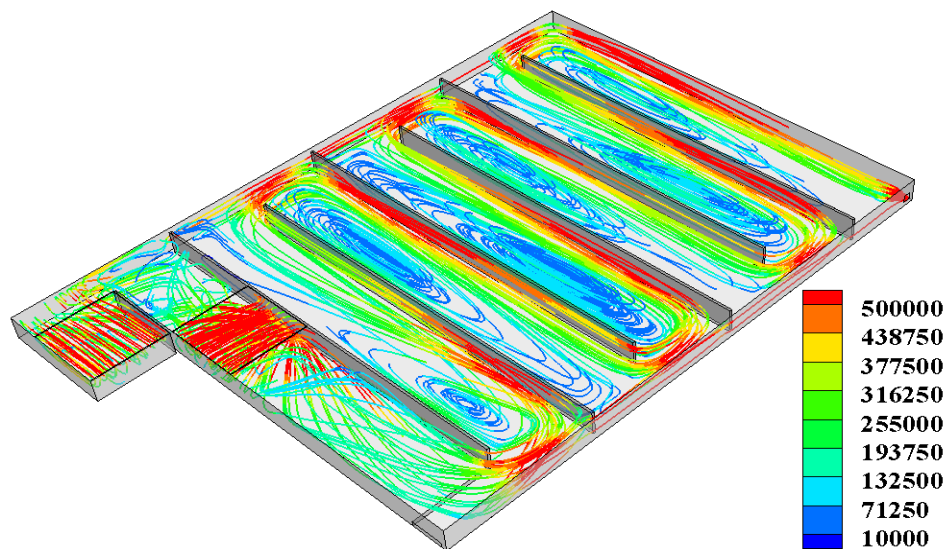


Figure IV.9 - Lignes de courant (couleur par nombre de Reynolds).

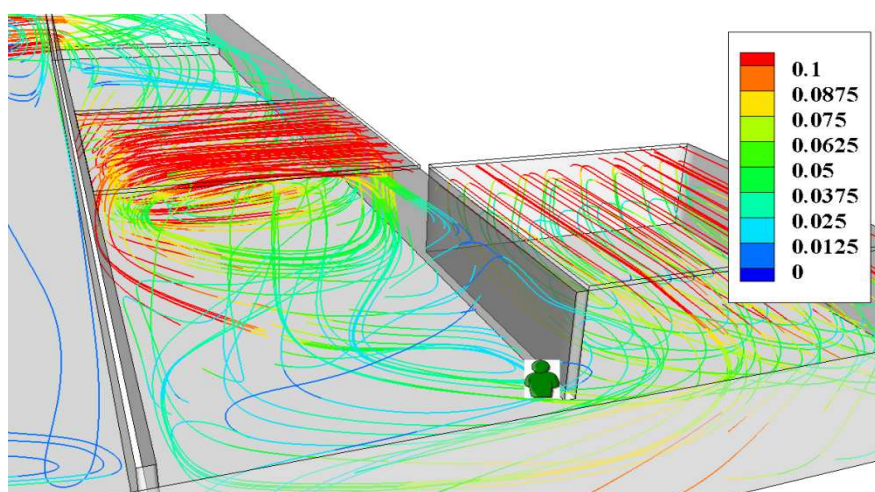


Figure IV.10 - Lignes de courant (couleur par module de vitesse m/s) au voisinage des entrées d'eau.



Il est évident que les éléments de fluide prenant différentes routes dans le réservoir ont des temps de séjour différents. Afin de savoir si l'écoulement dans la conception actuelle du réservoir se rapproche d'un écoulement piston il est nécessaire de déterminer la distribution des temps de séjour. A l'aide du logiciel *fluent* la distribution du temps de séjour est obtenue en trois étapes successives par la technique du pulse (analogue à la procédure expérimentale), à savoir :

1. Débuter en mode permanent : obtention d'une solution de l'écoulement en régime stationnaire.
2. Passer en mode transitoire : injection d'un traceur (pulse) et calcul de son transport sur un seul pas de temps à partir de la solution obtenue en 1.
3. Toujours en mode transitoire : arrêt du traceur et complétion du calcul tout en enregistrant la fraction massique du traceur en sortie du réservoir.

Au cours de l'étape 3, la fraction massique «  $w$  » du traceur est enregistrée au niveau de la sortie du réservoir de désinfection.

La figure IV.11 montre la forme normalisée de cette évolution dans le temps pour le débit actuellement injecté ( $\sim 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) et le débit pour lequel le réservoir a été conçu ( $\sim 3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Après juste quelques minutes, le traceur apparait à la sortie dans les deux cas. Cette partie du traceur a probablement longé les murs du réservoir par les ouvertures conçues pour minimiser les zones mortes. La fraction massique continue à évoluer pour passer par un maximum puis décroître et disparaître au delà de 800 mn pour le débit de réalisation et au-delà de 2000 min pour le débit actuel.

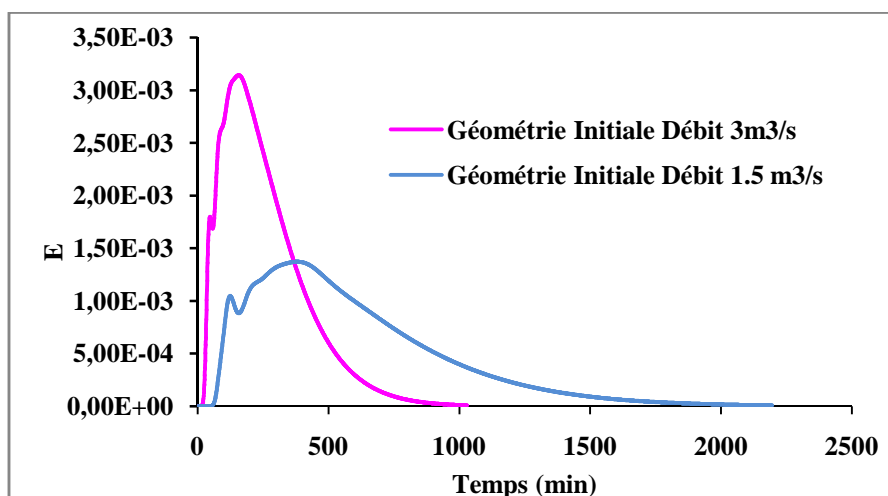


Figure IV.11 - Réponse à un pulse de traceur dans la géométrie initiale : Comparaison entre le débit d'utilisation prévu et le débit actuel ( $3 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

La réponse au pulse introduit dans l'étape 2 de l'expérience numérique est finalement une courbe évasée dû au fait que le parcours du fluide n'est pas idéal notamment à cause de la présence de boucles de recirculation. Il serait intéressant d'estimer le temps de séjour moyen ainsi que les temps de résidence  $t_{10}$  et  $t'_{10}$  correspondant respectivement aux 10 premiers % de quantité de traceur sortant du réservoir et les 10 derniers % de quantité de traceur sortant du réservoir. Le temps de séjour moyen  $\bar{t}$ , qui servira à l'estimation du facteur Ct (en utilisant la valeur de  $C=0,9$  mg/l de chlore résiduel reportée cette année) peut être déterminé par l'équation suivante en utilisant directement les données de la figure IV.11 :

$$\bar{t} = \frac{\sum w_i t_i}{\sum w_i} \quad (.11)$$

Les temps de résidences  $t_{10}$  et  $t'_{10}$  sont déduits de la courbe de réponse du traceur (figure IV.11) en considérant 10% de l'aire en dessous de la courbe, en début de réponse pour  $t_{10}$  et en fin de réponse pour  $t'_{10}$ . Les différentes valeurs des temps prédéfinis sont regroupées dans le tableau IV.1.

Débit	$t_{10}$ (min) $C t_{10}$ (mg.min.l <sup>-1</sup> )	$\bar{t}$ (min) $C \bar{t}$ (mg.min.l <sup>-1</sup> )	$t'_{10}$ (min) $C t'_{10}$ (mg.min.l <sup>-1</sup> )	$t_{10} / \tau$
<b>3m<sup>3</sup>/s</b>	60.5 ( $C t_{10}=54.45$ )	255 ( $C \bar{t}=229.5$ )	594 ( $C t'_{10}=534.6$ )	0.11
<b>1.5m<sup>3</sup>/s</b>	140 ( $C t_{10}=126$ )	585 ( $C \bar{t}=526.5$ )	1366.66 ( $C t'_{10}=1229.9$ )	0.27

Tableau IV.1 – Valeurs de  $\bar{t}$ ,  $t_{10}$  et  $t'_{10}$  pour le débit à la conception et le débit d'utilisation actuel.

Le calcul du  $t_{10}$  suggère l'élimination des bactéries, des virus et des kystes cryptosporidium sans l'élimination des microorganismes les plus résistants, alors que les valeurs de  $t_{10} / \tau$  reflètent un comportement non idéal s'écartant de celui d'un réacteur piston. D'autant plus, si on s'intéresse au 10 derniers pourcents de quantité de traceur sortant du réservoir, son temps de résidence est très élevé, donc propice à une formation de sous-produits de chloration pour les deux débits.

Le facteur  $t_{10} / \tau$  seul ne peut donc refléter proprement la qualité de traitement du réservoir. En effet, la principale caractéristique de l'écoulement présent est la formation de régions de recirculation entre chicanes successives. Ces boucles occupent la plus grande partie des canaux du réservoir et un volume d'eau important sort alors du réservoir après une longue période, conduisant à un risque élevé de formation des sous produits de désinfection. Ce dernier risque étant augmenté par d'autres facteurs incluant la présence de la matière organique (malgré les étapes de traitement qui précèdent la désinfection), la dose élevée de chlore, les concentrations de chlore résiduel ( $Cl_R > 0.75 \text{ mg/l}$ ) et les valeurs de pH ( $\text{pH} > 7.6$ ).

#### **IV.6 CONCLUSION**

Le réservoir de contact de Boudouaou s'écarte du modèle de réacteur piston à cause de la présence des courts circuits et des boucles de recirculation engendrant un temps de contact élevé. Ces résultats indiquent un risque de formation des sous produits de désinfection. Il serait par conséquent intéressant de tester des modifications géométriques sur la conception initiale pour essayer de se rapprocher le plus possible de l'écoulement idéal.

# **CHAPITRE V NOUVELLES GEOMETRIES**

## V.1 INTRODUCTION

La géométrie actuelle du réservoir présente un temps de contact élevé dans certaines régions dû à la présence de boucles de recirculation. Il serait possible de réduire le volume de ces boucles par de simples modifications géométriques ce qui est le but de cette partie du travail.

## V.2 MODIFICATIONS PROPOSEES SUR LA GEOMETRIE INITIALE

Afin d'éliminer les zones mortes, on propose le retrait de volumes à base triangulaire entre les chicanes. La figure V.1 montre une vue de dessus de la géométrie actuelle. Au canal d'entrée, on retranche au niveau des boucles 1 et 2 des volumes de  $317 \text{ m}^3$ ,  $237 \text{ m}^3$ ,  $189 \text{ m}^3$  et  $486 \text{ m}^3$ , au niveau de la boucle 3 un volume de  $828 \text{ m}^3$ , et  $60 \text{ m}^3$  au niveau de la boucle 4. Pour l'élimination des larges zones mortes au contournement des chicanes, on retranche  $1496 \text{ m}^3$  de la zone 5, et un volume identique de  $485 \text{ m}^3$  des boucles 6, 7, 8, 9 et 10. Une vue tridimensionnelle de la géométrie obtenue est représentée sur la figure V.2.

Le volume total du réservoir a donc été diminué de  $6038 \text{ m}^3$ . Afin de garder un volume utile de  $50\,000 \text{ m}^3$  on a remplacé le volume précédent par une augmentation de la hauteur des deux entrées jusqu'à  $0.40 \text{ m}$ .

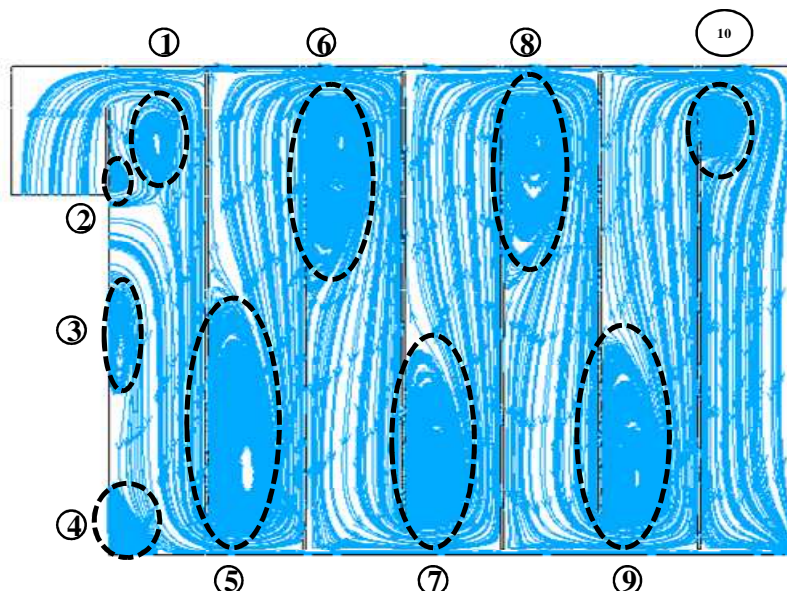


Figure V.1 - Zones de modifications géométriques.

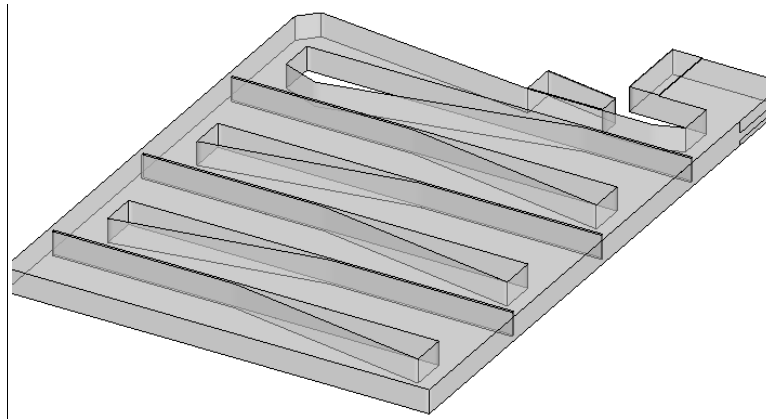


Figure V.2 - Vue tridimensionnelle du réservoir modifié.

### V.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'analyse des écoulements dans la nouvelle géométrie révèle une forte atténuation des larges boucles de recirculation (Figure V.3) au contournement des chicanes. Un zoom au niveau de cette zone montre, en effet, la taille réduite des zones mortes (figure V.4). A noter aussi que de petites zones de recirculation apparaissent après l'élimination des passages étroits.

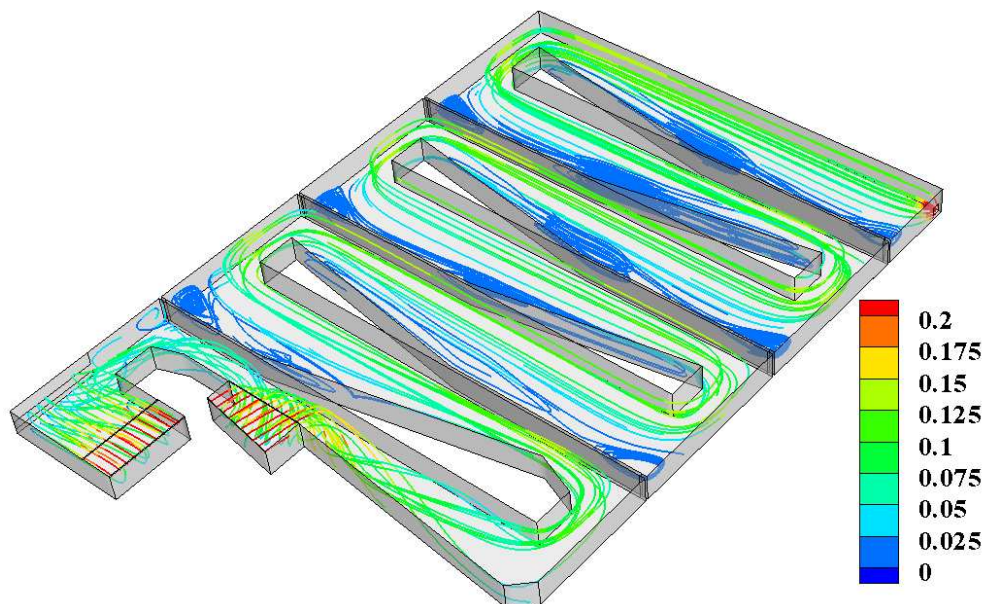


Figure V.3 - Lignes de courant (couleur par module de vitesse m/s)

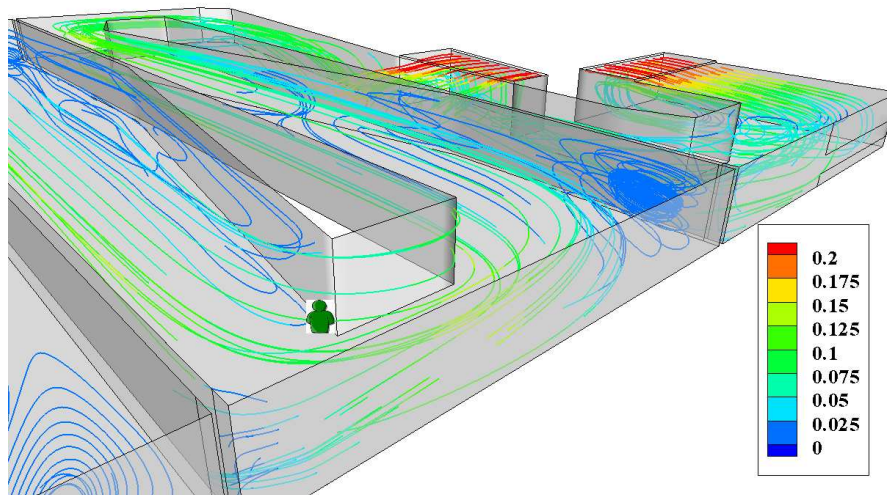


Figure V.4 - Lignes de courant (couleur par module de vitesse m/s) au voisinage d'une zone morte.

La nouvelle géométrie résulte en une redistribution du module de vitesse avec un écart moins important suivant la section de l'écoulement (Figure V.5).

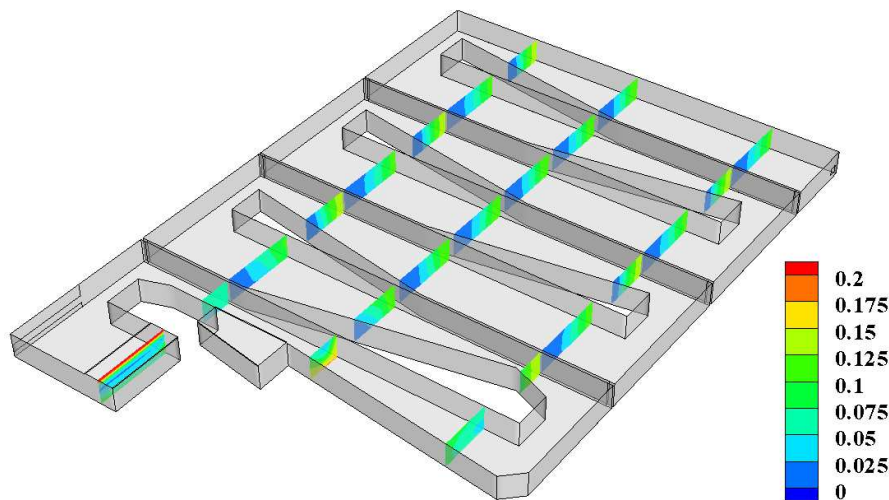


Figure V.5 - Distribution de la vitesse dans le réservoir de chloration (m/s)

Une diminution du nombre de Reynolds est aussi observée sur la figure V.6, mais il est à noter que l'écoulement reste toujours fortement turbulent avec des valeurs excédant 500000 à l'entrée et au contournement des chicanes. Un zoom au niveau de la zone d'entrée, illustré dans la figure V.7, montre la recirculation importante engendrée par le déversement de l'eau dans le réservoir, mais les fortes vitesses à l'entrée diminuent rapidement à cause de l'augmentation de la section d'écoulement.

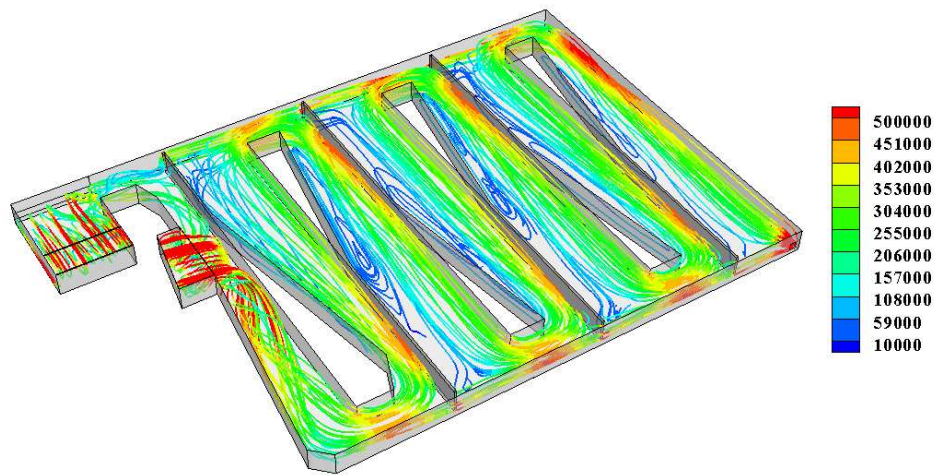


Figure V.6 - Lignes de courant (couleur par nombre de Reynolds)

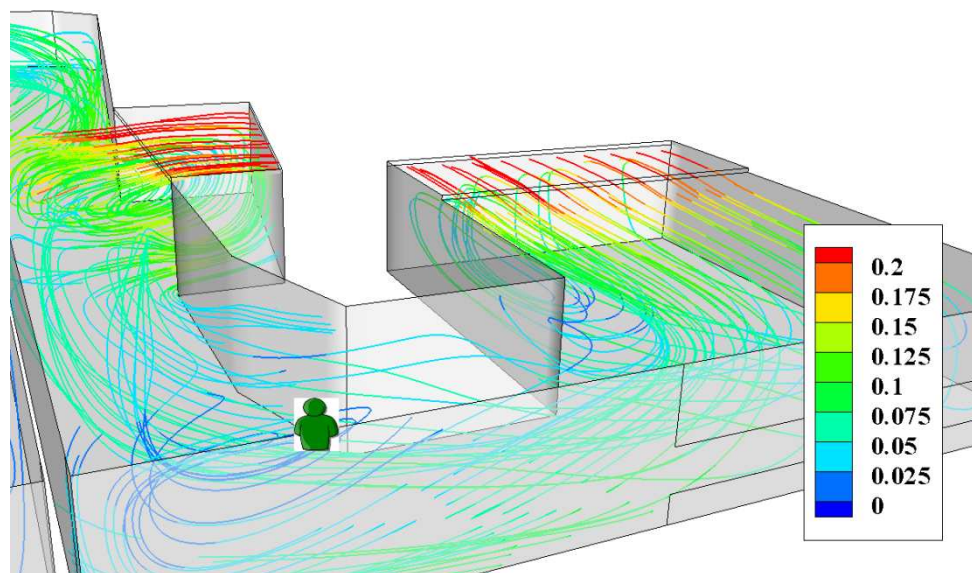


Figure V.7 - Lignes de courant (couleur par module de vitesse m/s) au voisinage des entrées d'eau

On s'intéresse encore une fois à l'expérience numérique du pulse pour vérifier si des changements apparaissent dans la réponse du traceur. La figure V.8 montre une comparaison de la réponse en sortie de réservoir pour les deux géométries. Il est clair que la géométrie modifiée se rapproche encore plus du comportement piston avec un pic plus prononcé. Il est intéressant de noter que le temps de sortie des premières quantités de traceur change. Ceci est dû au fait que les courts-circuits conçus au contournement des chicanes ont été éliminés. Par conséquent, les particules à très court temps de séjour n'existent plus. En fin de réponse, la géométrie actuelle montre un temps de séjour plus court pour les particules les plus lentes.



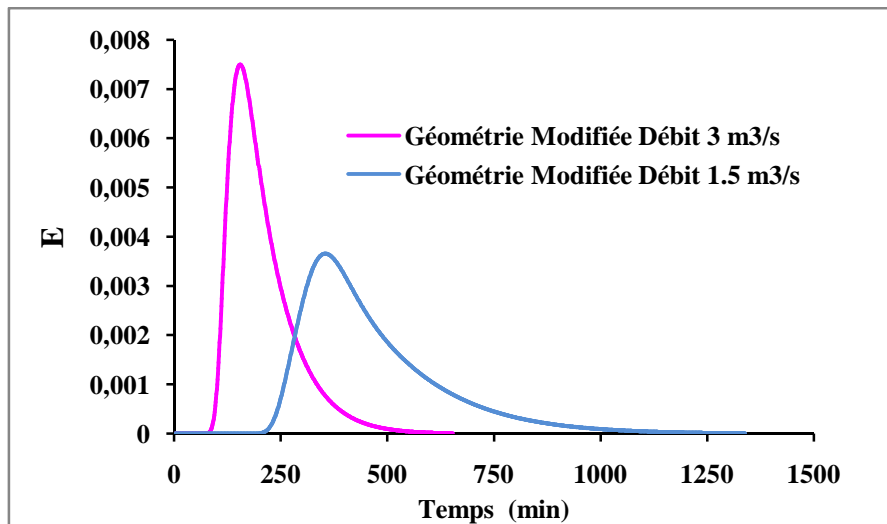


Figure V.8 - Réponse à un pulse de traceur dans la géométrie modifiée : Comparaison entre le débit d'utilisation prévu et le débit actuel ( $3 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

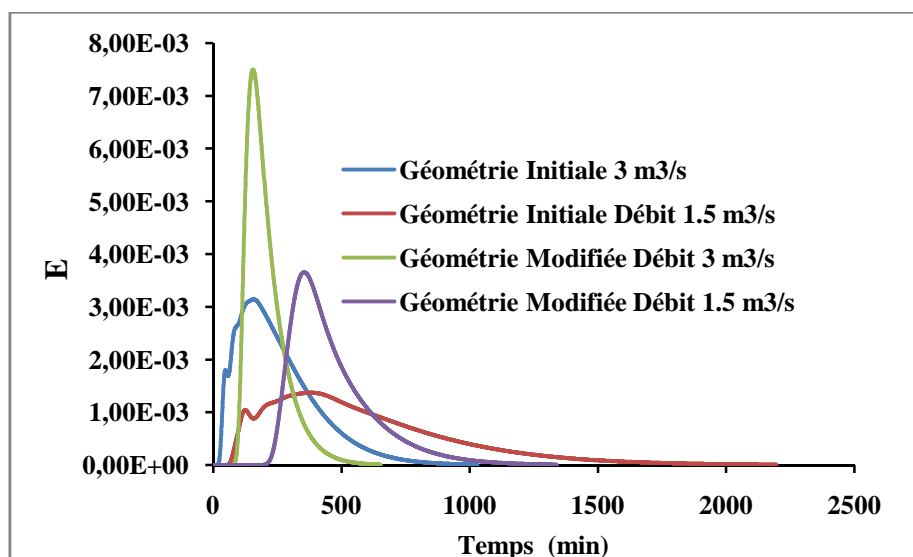


Figure V.9 - Réponse à un pulse de traceur à la sortie du réservoir : Comparaison entre la géométrie actuelle et la géométrie modifiée.

Les temps  $t_{10}$ ,  $\bar{t}$  et  $t'_{10}$  sont calculés pour la géométrie modifiée et regroupés dans le tableau V.1 pour le débit d'utilisation prévu et le débit actuel. Le calcul du  $t_{10}$  montre encore une fois une probabilité d'élimination des bactéries, des virus et des kystes cryptosporidium sans l'élimination des microorganismes les plus résistants, alors que le calcul du rapport  $t_{10} / \tau$  suggère un comportement peu proche de celui d'un réacteur piston pour le débit de  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Néanmoins, la réponse du traceur s'aplatit pour se rapprocher d'un pulse lorsque le débit prévu de  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  est simulé (voir la comparaison sur la figure V.9).

Les valeurs des temps moyens pour les deux géométries sont très proches pour les deux débits simulés, par contre le temps  $t_{10}$  pour le débit de  $3\text{m}^3/\text{s}$  est plus long dans la nouvelle géométrie à cause de l'élimination des courts-circuits. L'analyse des 10 derniers pourcents sortants de la nouvelle géométrie révèle un temps de résidence  $t'_{10}$  plus court que celui de la géométrie réelle. La différence entre  $t'_{10}$  de la géométrie actuelle et celui de la géométrie modifiée est de 3 hr 36min pour un débit de  $3\text{m}^3/\text{s}$  et 8 hr 46 min pour le débit de  $1.5\text{m}^3/\text{s}$ . La nouvelle géométrie est moins sujette au risque d'apparition de sous-produits de désinfection.

Débit	$t_{10}$ (min) $C t_{10}$ (mg.min.l <sup>-1</sup> )	$\bar{t}$ (min) $C \bar{t}$ (mg.min.l <sup>-1</sup> )	$t'_{10}$ (min) $C t'_{10}$ (mg.min.l <sup>-1</sup> )	$t_{10} / \tau$
$3\text{m}^3/\text{s}$	116.83 ( $C t_{10}=105.14$ )	205.77 ( $C \bar{t} =185.193$ )	377.46 ( $C t'_{10}=339.71$ )	0.47
$1.5\text{m}^3/\text{s}$	138.06 ( $C t_{10}=124.25$ )	565.87 ( $C \bar{t} =509.28$ )	839.56 ( $C t'_{10}=755.60$ )	0.25

Tableau V.1 - Valeurs de  $\bar{t}$ ,  $t_{10}$  et  $t'_{10}$  pour le débit à la conception et le débit d'utilisation actuel dans la géométrie modifiée.

#### V.4 UNE GEOMETRIE IDEALE ?

Les géométries précédentes représentent toujours un écart considérable par rapport au comportement idéal du réacteur piston. S'appuyant sur le principe d'élimination de zones mortes, on propose ici une géométrie de même volume que les géométries précédentes et offrant un écoulement idéal.

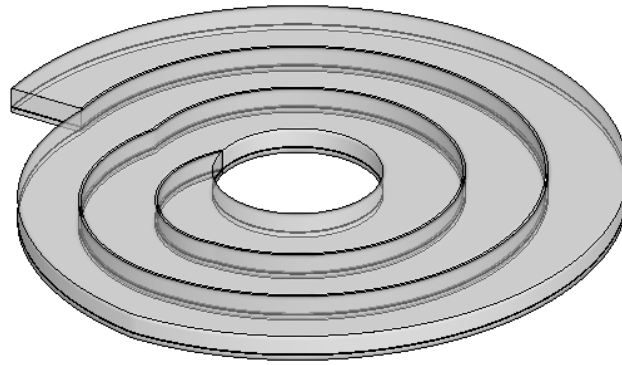


Figure V.10 - la nouvelle géométrie

Cette géométrie se veut spirale avec, à priori sans embuche particulière quant à la réalisation pratique. La figure V.10 montre une vue tridimensionnelle de cette conception. Les trajectoires d'écoulement apparaissent parallèles avec une absence totale de boucles de recirculation (Figure V.11).

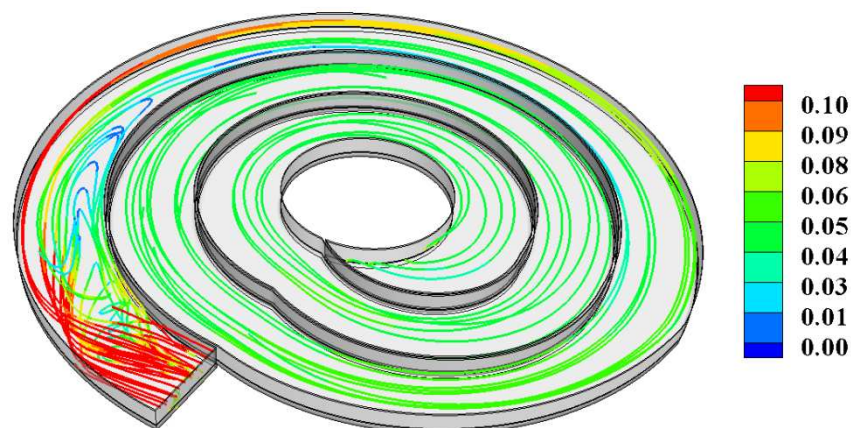


Figure V.11 – Trajectoires d'écoulement dans la géométrie spirale (couleur par module de vitesse m/s).

L'analyse de la réponse du pulse de traceur montre cette fois un changement drastique avec un pic très proche du cas idéal (voir Figure V.12) pour le débit de  $3\text{m}^3/\text{s}$ . D'une façon similaire aux deux géométries déjà analysées, les temps  $t_{10}$ ,  $\bar{t}$  et  $t'_{10}$  sont calculés et regroupés dans le tableau V.2. La comparaison des trois géométries est illustrée sur la figure V.12. L'analyse des 10 premiers pourcents sortants révèle un temps de résidence proche du temps hydraulique ce qui donne un rapport  $t_{10}/\tau$  de 0,96 pour le débit  $3\text{m}^3/\text{s}$  et 0,79 pour le débit de  $1,5\text{m}^3/\text{s}$ , rapprochant le comportement de cette géométrie à celui d'un réacteur idéal.

L'analyse des 10 derniers pourcents sortants montre un temps de résidence court par rapport à la géométrie modifiée. En effet, une différence entre  $\bar{t}'_{10}$  de la géométrie modifiée et  $\bar{t}'_{10}$  de la géométrie spirale est de 26min pour un débit de  $3\text{m}^3/\text{s}$  et de 3hr 42 min pour le débit de  $1.5\text{m}^3/\text{s}$ , diminuant ainsi la probabilité d'apparition des sous-produits de désinfection.

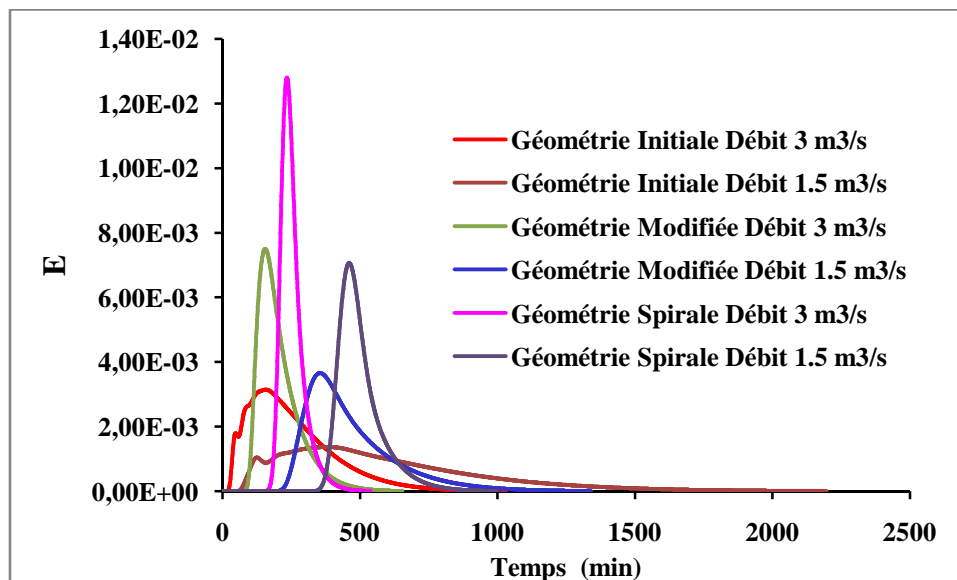


Figure V.12 - Comparaison de la réponse des trois géométries analysées.

Débit	$t_{10}$ (min)	$\bar{t}$ (min)	$t'_{10}$ (min)	$t_{10} / \tau$
<b><math>3\text{m}^3/\text{s}</math></b>	240.19	$\bar{t} = 254$	351	0.96
	( $C t_{10} = 216.17$ )	$C \bar{t} = 228.6$	( $C t'_{10} = 315.9$ )	
<b><math>1.5\text{m}^3/\text{s}</math></b>	399.26	501.33	685	0.79
	( $C t_{10} = 359.334$ )	( $C \bar{t} = 451.19$ )	( $C t'_{10} = 616.5$ )	

Tableau V.2 - Valeurs de  $\bar{t}$ ,  $t_{10}$  et  $t'_{10}$  pour le débit à la conception et le débit d'utilisation actuel dans un réservoir en spirale.

## V.5 CONCLUSION

Les modifications proposées sur la géométrie initiale rapprochent l'écoulement dans le réservoir d'un écoulement piston grâce à la diminution du volume des boucles de recirculation diminuant ainsi le risque de formation des sous produits de chloration. Une géométrie très proche du cas idéal serait une forme spirale, démontrant ainsi que la présence de zones mortes et de courts-circuits fait partie des causes principales de la dégradation de la qualité de traitement.

## **CONCLUSION GENERALE**

La modélisation du réservoir de désinfection de la station de traitement des eaux de Boudouaou montre que le comportement de ce dernier s'écarte de celui d'un réacteur piston. En effet, la présence de larges boucles de recirculation occupant près du tiers du volume total du réservoir augmente le temps de contact avec le désinfectant allant au-delà de 8hr de traitement. Par conséquent, la formation de sous produits cancérigènes (THM, AHA,...) est plus importante augmentant ainsi les risques sur la santé humaine.

Les modifications proposées sur la géométrie initiale minimisent le volume des boucles de recirculation et rapprochent le réservoir d'un réacteur piston mais le risque sur la santé humaine est toujours présent à cause du débit de traitement trop faible relativement à la conception initiale du réservoir. Dans une philosophie d'intensification de procédés, une nouvelle géométrie sous forme spirale, présente un réacteur idéal éliminant le risque de formation des sous produit de chloration.

Parmi les perspectives de travail, s'impose une étude hydrodynamique avec réactions chimiques par inclusion des cinétiques de formation des sous-produits de désinfection afin d'estimer les quantités présentes de contaminants.

# **ANNEXES**



## Les modèles de prédiction des sous produits de chloration

Amy et al. [32].

$$THMs_{(\mu mol/l)} = 0.0031(UV_{254} \cdot TOC)^{0.440} (D)^{0.409} (t)^{0.265} (T)^{1.06} (pH - 2.6)^{0.715} (Br^- + 1)^{0.0358} \quad (.12)$$

Rathbun et al. [33]

$$CHCl_3_{(\mu g/l)} = 0.442(pH)^2 (D)^{0.229} (DOC)^{0.912} (Br^-)^{-0.116} \quad (.13)$$

Rathbun et al. [34]

$$THMs_{(\mu g/l)} = 14.6(pH - 3.8)^{1.01} (D)^{0.206} (UV_{254})^{0.849} (t)^{0.306} \quad (.14)$$

Chang et al. [35]

$$THMs_{(\mu g/l)} = 12.72(TOC)^{0.291} (t)^{0.271} (D)^{-0.072} \quad (.15)$$

$$THMs_{(\mu g/l)} = 108.8(TOC)^{0.2466} (t)^{0.2956} (UV_{254})^{0.9919} (D)^{0.126} \quad (.16)$$

$$THMs_{(\mu g/l)} = 131.75(t)^{0.2931} (UV_{254})^{1.075} (D)^{0.1064} \quad (.17)$$

Rodriguez et al. (2000) [36]

$$THMs_{(\mu g/l)} = 0.044(DOC)^{1.030} (t)^{0.262} (pH)^{1.149} (T)^{0.968} \quad (.18)$$

$$THMs_{(\mu g/l)} = 1.392(DOC)^{1.092} (pH)^{0.531} (T)^{0.255} \quad (.19)$$

Serodes et al. [37]

$$\log(HAAs)_{(\mu g/l)} = 2.72 + 0.653(TOC) + 0.458(D) + 0.295(t) \quad (.20)$$

$$\log(HAAs)_{(\mu g/l)} = 1.33 + 2.612(TOC) + 0.102(D) + 0.255(T) + 0.102(t) \quad (.21)$$

$$HAAs_{(\mu g/l)} = -8.202 + 4.869(TOC) + 1.053(D) + 0.364(t) \quad (.22)$$

$$THMs_{(\mu g/l)} = 16.9 + 16.0(TOC) + 3.319(D) - 1.135(T) + 1.139(t) \quad (.23)$$

$$THMs_{(\mu g/l)} = 21.2 + 2.447(D) + 0.499(t) \quad (.24)$$

$$\log THMs_{(\mu g/l)} = -0.44pH + 7.53 \log pH - 1.10D + 0.2(D)^2 \quad (.25)$$

Lekkas *et al.* [38]

$$\log THMs_{(\mu g/l)} = 1.546 + 0.631(pH)^2 + 0.569 \log(t) + 0.385 \log(D) \quad (.26)$$

$$\begin{aligned} \log HAAs_{(\mu g/l)} = & -0.00189 - 1.7(pH)^2 + 1.5L \log(pH) - 0.9(Br^-) \\ & + 0.875(pH)(Br^-) + 0.710 \log(t) - 0.28(pH)(t) + 0.215l \log(D) \end{aligned} \quad (.27)$$

Uyak *et al.* [39]

$$\log THMs_{(\mu g/l)} = 1.078 + 0.398 \log(TOC) + 0.158 \log(T) + 0.702 \log(D) \quad (.28)$$

Semerjian *et al.* [40]

$$THMs^2_{(\mu g/l)} = 42.1 + 29.23(D^2) + 353375(UV_{254})^2 \quad (.29)$$

$$THMs^2_{(\mu g/l)} = 471.11 + 0.48(t)^2 + 1856.07(Br^-)^2 + 404.38(D)^2 \quad (.30)$$

# **LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES**

Liste des tableaux

Tableau 0.1 - Limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine

Tableau 0.2 - Comparaison entre les principaux agents désinfectants

Tableau 0.3 - Les propriétés du chlore

Tableau 0.4 - Valeurs de Ct pour l'inactivation de différents micro-organismes par le chlore à pH 6 et 7 entre 5 à 25°C.

Tableau 0.5 - Valeurs de Ct en mg.min.l<sup>-1</sup> pour l'inactivation des virus par le chlore

Tableau 0.6 – Valeurs de  $\bar{t}$ ,  $t_{10}$  et  $t'_{10}$  pour le débit à la conception et le débit d'utilisation actuel

Tableau 0.7 - Valeurs de  $\bar{t}$ ,  $t_{10}$  et  $t'_{10}$  pour le débit à la conception et le débit d'utilisation actuel dans la géométrie modifiée

Tableau 0.8 - Valeurs de  $\bar{t}$ ,  $t_{10}$  et  $t'_{10}$  pour le débit à la conception et le débit d'utilisation actuel dans un réservoir en spirale.

Liste de figures

Figure 0.1 - Classement des micro-organismes en fonction de leur résistance moyenne aux traitements de désinfection chimique

Figure 0.2 - Les différentes formes de chlore dans l'eau

Figure 0.3 - Évolution de  $t_{10}/\tau$  en fonction du rapport  $L/l$  dans un réacteur de chloration

Figure 0.4 - Le principe du calcul numérique

Figure 0.5 - Schéma simplifié de la station de traitement

Figure 0.6 - Images réelles du réservoir

Figure 0.7 - Les dimensions du réservoir de contact.

Figure 0.8 - Les différentes étapes de génération de la géométrie/maillage. (a) géométrie plane. (b) volume obtenu par extrusion.

Figure 0.9 – Vue tridimensionnelle du maillage du réservoir de contact.

Figure 0.10 - Les conditions aux limites.

Figure 0.11 - Lignes de courant (couleur par module de vitesse m/s).

Figure 0.12 - Lignes de courant (couleur par module de vitesse m/s) au voisinage d'une zone morte.

Figure 0.13 - Lignes de courant (couleur par nombre de Reynolds).

Figure 0.14 - Lignes de courant (couleur par module de vitesse m/s) au voisinage des entrées d'eau

Figure 0.15 - Réponse à un pulse de traceur dans la géométrie initiale : Comparaison entre le débit d'utilisation prévu et le débit actuel ( $3 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Figure 0.16 - Zones de modifications géométriques.

Figure 0.17 - Vue tridimensionnelle du réservoir modifié.

Figure 0.18 - Lignes de courant (couleur par module de vitesse m/s)

Figure 0.19 - Lignes de courant (couleur par module de vitesse m/s) au voisinage d'une zone morte.

Figure 0.20 - Distribution de la vitesse dans le réservoir de chloration (m/s)

Figure 0.21 - Lignes de courant (couleur par nombre de Reynolds)

Figure 0.22 - Lignes de courant (couleur par module de vitesse m/s) au voisinage des entrées

Figure 0.23 - Réponse à un pulse de traceur dans la géométrie modifiée : Comparaison entre le débit d'utilisation prévu et le débit actuel ( $3 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ).d'eau

Figure 0.24 - Réponse à un pulse de traceur à la sortie du réservoir : Comparaison entre la géométrie actuelle et la géométrie modifiée

Figure 0.25 - la nouvelle géométrie

Figure 0.26 – Trajectoires d'écoulement dans la géométrie spirale (couleur par module de vitesse m/s)

Figure 0.27 - Comparaison de la réponse des trois géométries analysées.

## **REFERENCES**

- [1] C. Cardot, Les traitements de l'eau. Procédés physico-chimiques et biologiques 2002.
- [2] J. Moles, Eaux de distribution. Désinfection, Techniques de l'Ingénieur ed., 2007.
- [3] M. Maux, T. Simonart, Surveillance microbiologique de l'eau, Techniques de l'Ingénieur ed., 2010.
- [4] Degrémont, Mémento technique de l'eau-Tomes 1 et 2. , Rueil-Malmaison 2005.
- [5] G. Tchobanoglous , F.L. Burton, H.D. Stensel, Wastewater engineering, treatment and reuse, McGraw-Hill New York, 2002.
- [6] N.R. Ward, R.L. Wolfe, B.H. Olson, Applied and environmental. Microbiology, 48 (1984) 508-514.
- [7] F.W. Pontius, Water quality and treatment – A handbook of community water supplies 4th ed., New York, 1990.
- [8] S. Chowdhury, P. Champagne, P.J. McLellan Science of the Total Environment, 407 (2009) 4189–4206.
- [9] G. Gruau, in, 2004.
- [10] G. Zhang, B. Lin, R.A. Falconer, Journal of Hydroinformatics, 02 (2000) 123-132.
- [11] C.J. Mills, R.J. Bull, K.P. Cantor, in, Santé Canada, 1998.
- [12] B. Oliver, J. Lawrence, American Water Works Association, 71 (1979) 161-163.
- [13] A.J. Montiel, Les halométhanes dans l'eau – Formation et élimination, Paris, 1980.
- [14] S. Baig, P. Mouchet, Oxydation et réduction appliquées au traitement d'eau :Oxygène, chlore et dérivés, Techniques de l'Ingénieur ed., 2008.
- [15] G.A. Boorman, V. Dellarco, J.K. Dunnick, Environmental Health Perspectives, 107 (1999) 207-217.
- [16] T.A. Bellar, J.J. Lichtenberg, R.C. Kroner, Journal of the American Water Work Association, 66 (1974) 703.
- [17] S.W. Krasner, H.S. Weinberg, S.D. Richardson, S.J. Pastor, R. Chinn, M.J. Scrimanti, Environmental Science and Technology, 40 (2006) 7175-7185.
- [18] S.D. Richardson, M.J. Plewa, E.D. Wagner, R. Schoeny, D.M. Demarini, Mutation Research, 636 (2007) 178-242.
- [19] C.K. Villanueva CM, Cordier S, Jaakkola JJ, King WD, Lynch CF, Epidemiology, 15(3) (2004) 357-367.
- [20] C.K. Villanueva CM, Grimalt JO, Malats N, Silverman D, Tardon A Am J Epidemiol, (2007).
- [21] F. Bove, Y. Shim, P. Zeitz, Environ Health Perspect, (2002) 61-74.
- [22] C. Lewis, I.H. Suffet, B. Ritz, American Journal of Epidemiology 163 (2006) 38-47.
- [23] OMS, 2 (1994) 913-949.
- [24] OMS, 1 (1994) 117-126.

- [25] G. Amy, P. Chadik, Z. Chowdhury, *American Water Works Association* 79 (1998) 89-97.
- [26] Z.K. Chowdhury, G.L. Amy, *American Water Works Association*, (1999) 53-64.
- [27] J. Yoon, Y. Choi, S. Cho, D. Lee, *Science of the Total Environment* 302 (2003) 157 -156.
- [28] I.S. Anastasios, *Chemical Engineering and Processing* 47 (2008) 1179–1189.
- [29] I.C. Popa, *Modélisation numérique du transfert thermique (méthode des volumes Finis)*, 2002.
- [30] B.R. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, *Transport phenomena*, second ed., John Wiley & Sons, 2006.
- [31] M. Carlier, *Hydraulique générale et appliquée*, EYROLLES ed., 1980.
- [32] G. Amy, P.A. Chadik, Z.K. Chowdhury, *American Water Works Association*, 79 (1987) 89–97.
- [33] R.E. Rathbun, *Science of the Total Environment*, 180 (1996) 125–135.
- [34] R.E. Rathbun, *Science of the Total Environment*, 191 (1996) 235–244.
- [35] E.E. Chang, S. Chao, P. Chiang, J. Lee, *Toxicological Environmental Chemistry*, 56 (1996) 211–225.
- [36] M.J. Rodriguez, J. Serodes, M. Morin, *Journal of Water Supply: Research and Technology*, 49 (2000) 57–73.
- [37] J.B. Serodes, M.J. Rodriguez, H. Li, C. Bouchard, *Chemosphere*, 51 (2003) 253–263.
- [38] T.D. Lekkas, A.D. Nikolaou, *Water Quality Research Journal of Canada* 39 (2004) 149–159.
- [39] V. Uyak, I. Toroz, *Desalination*, 176 (2005) 127–141.
- [40] L. Semerjian, J. Dennis, G. Ayoub, *Environmental Monitoring and Assessment*, 149 (2008) 429-436.