

**REPUBLIQUE ALGERIE POPULAIRE DEMOCRATIQUE MINISTERE
DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE
BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**



**Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en Energétique**

Titre

**Simulation numérique des écoulements dans une station de désinfection
de l'eau par ozonation**

Proposé et encadré par :

Dr. DANOUNI SAMIR

Dr. BENSDIRA Sid Ali

Réalisé par :

HARBOUCHE ADEL

Année universitaire 2021/2022

Dédicace :

Entouré de ceux qui m'aiment, entouré de tous ces êtres chers qui ne me quittent jamais.

Je suis parvenue à décrocher le prix de mes efforts.

De mes larmes et des mes sacrifices tout au long de mon cursus universitaire.

Remerciement :

On remercie avant tout Allah pour nous avoir donné la foi.

Je tiens à exprimer ma gratitude aux personnes qui ont aidé à la réalisation de cette thèse.

*En premier lieu, je remercie notre encadreur **Dr Danouni Samir** et **Dr bensdira sidali** d'avoir accepté de nous faire l'honneur de présider le jury **Dr ketfi omar** et **Dr gurgaje mohamed** de ce mémoire.*

*J'adresse également mes sincères remerciements à tous les enseignants du Département de génie mécanique du centre universitaire de **SAAD DAHLEB BLIDA** qui ont contribué à notre formation.*

À tous ceux et celles qui de près ou de loin ont apporté aide et encouragement, qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Abstract:

In the last two decades, Computational Fluid Dynamics (CFD) has shown great potential as a powerful and cost-efficient tool to troubleshoot existing disinfection contactors and improve future designs for the water and wastewater treatment utilities.

The disinfection process is a critical safety step in drinking water treatment that inactivates bacteria, viruses and other pathogens. The most common disinfection approaches for water treatment include chlorine disinfection, disinfection ozone, and ultraviolet.

Key word: CFD, écoulement , RANS.

Résumé :

Au cours des deux dernières décennies, la dynamique des fluides computationnelle (CFD) a montré un grand potentiel comme un outil puissant et économique pour dépanner les contacteurs de désinfection existants et améliorer conceptions futures pour les services d'eau et de traitement des eaux usées.

Le processus de désinfection est une étape de sécurité critique dans le traitement de l'eau potable qui inactive les bactéries, virus et autres agents pathogènes, Les approches de désinfection les plus courantes pour le traitement de l'eau comprennent la désinfection au chlore, désinfection à l'ozone, et ultraviolet.

Mot clé : CFD, écoulement, RANS.

ملخص:

على مدى العقدين الماضيين، أظهرت ديناميكيات المائع الحسابية (cfd) إمكانات كبيرة كأداة قوية وفعالة من حيث التكلفة لاستكشاف موصلات التطهير الحالية وتحسين التصاميم المستقبلية لمرافق المياه والصرف الصحي

تعد عملية التطهير خطوة أمان مهمة في معالجة مياه الشرب التي تعمل على تعطيل البكتيريا والفيروسات ومسببات الأمراض الأخرى. وتشمل أساليب التطهير الأكثر شيوعًا لمعالجة المياه التطهير بالكلور وتطهير الأوزون والأشعة فوق البنفسجية.

كلمات مفتاحيه: RANS ،écoulement ،CFD

Tableaux des matières

Dédicace :

Remerciement :

Résumé :

Liste des Figures

List des Tableaux

Nomenclature :

Introduction générale : 1

Chapitre 1 : Généralité sur la désinfections de Léau

1.1. Introduction :	5
1.2. Histoire de désinfection de Léau :	5
1.3. Traitement des eaux :	6
1.3.1. Définition de la pollution de l'eau :	6
1.3.2. Les eaux usées :	6
1.3.3. Types des eaux usées :	6
1.3.4. Risques et conséquences de la pollution de l'eau :	7
1.4. Les Procédés de désinfection de l'eau :	7
1.5. Technique de désinfection de l'eau :	7
1.5.1. Traitement de Léau par rayonnement ultraviolet :	8
1.5.2. Traitement de l'eau par microfiltration :	9
1.5.3. Traitement de l'eau par chlore :	11
1.5.4. Traitement de Léau par ozonation :	12
1.6. Choix la méthode de désinfection :	13
1.6.1. Grandeur de l'installation :	13
1.6.2. Micro-organismes à éliminer :	13
1.6.3. Intervalle de temps entre traitement et consommation :	13
1.7. L'ozonation :	14
1.7.1. L'ozone :	14
1.7.2. La molécule de l'ozone :	14
1.7.3. La production de l'ozone :	15
1.7.4. La réaction chimique de Léau et l'ozone :	16
1.8. Les domaines d'application de traitement de l'eau par l'ozone :	17
1.8.1. Eau potable :	17

1.8.2. Eaux usées :	18
1.8.3. Domaine agro-alimentaire :	18
1.9. Conclusion :	18

Chapitre 2 :Modélisation mathématique et numérique

2.1. Introduction :	20
2.2. Les Étapes de la CFD appliquée au processus de désinfection :	20
2.2.1. Simulation de flux :	21
2.2.2. Simulation de transport.....	22
2.2.3. Simulation de processus de réaction et simulation d'inactivation :	23
2.3. État des recherches actuelles sur la simulation de désinfection à l'aide de CFD :	24
2.3.1. Développement d'une méthode ou d'un cadre de simulation pour le processus de désinfection :	24
2.3.2. Modélisation du processus de désinfection :	25
2.3.3. Optimisation de la configuration des contacteurs :	26
2.4. Modèle physique :	26
2.4.1. Simulation aux grandes échelles (Large Eddy Simulation LES) :	26
2.4.. Reynolds-averaged Navier-Stokes Equations (RANS).....	27
2.5. Modèle turbulence :	28
2.6. Méthodologie RANS pour le processus d'ozonation :	29
2.7.Les modèles chimiques :	29
2.7.1. Modélisation des réactions chimiques.....	29
2.8. Équations régissant le processus d'inactivation :	30
2.8.1. Inactivation basée sur la cinétique	30
2.8.2. Inactivation basée sur CT	30
2.9. Conclusions :	30

Chapitre 3 :Présentation de logiciel Ansys

3.1. Introduction :	33
3.2. Présentation du logiciel :	33
3.2.1. Divers produit d'Ansys :	34
3. 3 Types de logiciel Ansys :	35
3.4. Structure du code ANSYS CFX :	36
3.4.1.CFX-Pre :	36
3.4.2.CFX-Solver :	36
3.4.3.CFX- Solver Manager :	36

3.4.4 CFX-Post :	37
<i>Chapitre 4 :Résultats de simulation numérique</i>	
4.1. Démarche d'une simulation numérique :	39
4.2. Création de la géométrie :	40
4.3. Choix d'un maillage et discrétisation :	41
4.4. Configuration du modèle :	41
4.5. Résultats et discussions.....	42
4.5.1 validation du modèle numérique.....	42
4.5.2. Simulation de l'écoulement du mélange gaz-liquide	45
4.6.conclusion.....	48
Conclusion générale :	49
Référence bibliographique :	50

Liste des Figures

Figure 1. 1: Schéma élémentaire d'une unité de traitement (UV).....	8
Figure 1. 2: Spectre d'absorption du rayonnement ultra-violet.....	8
Figure 1. 3: Portion d'efficacité en fonction de la longueur d'onde émise par la lampe UV.....	9
Figure 1. 4: Microfiltration à membrane.....	10
Figure 1. 5: Filtration a maison	10
Figure 1. 6: Fabrication de filtration	11
Figure 1. 7: Action du chlore dans l'eau.	11
Figure 1. 8: Evolution de chlore d'un l'eau.....	12
Figure 1. 9: Formules d'ozone.....	14
Figure 1. 10: Les Laissons de molécule d'ozone.....	15
Figure 1. 11: Production d'ozone par décharge a barrière diélectrique.	16
Figure 1. 12: Cycle de décomposition de l'ozone dans Léau.....	17
Figure 3. 1: Interface graphique de l'ANSYS	33
Figure 4. 1: Illustration de la station de désinfection d'eau (le modèle réel).	40
Figure 4. 2: Illustration de la station de désinfection d'eau (modèle utilisée dans cette simulation).....	40
Figure 4. 3: Représentation du maillage utilisée dans cette étude.....	41
Figure 4. 4: Illustrations de la configuration du domaine physique.	42
Figure 4.5: Représentation des trajectoires et les vitesses de fluide dans la station de désinfection (à gauche le présent modèle, à droite le modèle de Jie Zhang 2014).....	43
Figure 4. 6: Illustrations des lignes de courant dans la station.	43
Figure 4. 7: Représentation des champs de pression dans la station.	44
Figure 4. 8: Représentation des trajectoires et les vitesses de fluide dans la station de désinfection (Vinlet = 40 m/s à gauche, Vinlet = 50m/s à droite).....	45
Figure 4. 9: la valeur de la fraction d'ai au cours de la convergence et les processus de la convergence.....	45
Figure 4. 10: Représentation des trajectoires et les vitesses de fluide dans la station de désinfection (mélange liquide-gaz).....	46
Figure 4. 11: Illustration des contours de vitesses des particules d'air dans l'eau.	46
Figure 4. 12: Présentation des fractions d'air dans l'eau.	47
Figure 4. 13: Présentation des fractions d'eau dans la station.....	47

List des Tableaux

Tableau 1. 1: Les spectres de la lumière UV se divise en 3 bandes.	9
Tableau 1. 2: Comparaison entre différentes méthodes de désinfection de l'eau.	13
Tableau 1. 3: La structure chimique de l'ozone	14
Tableau 2. 1: Termes sources couramment utilisés des équations de transport pour la modélisation de la désinfection à l'ozone	23
Tableau 2. 2: Constantes signalées dans le modèle Hom-Haas pour l'inactivation de l'ozone	25
Tableau 3. 1: Les Types de logiciel Ansys.....	35
Tableau 4. 1: Système d'unités	40
Tableau 4. 2: Modèle de géométrie	40
Tableau 4. 3: Le Maillage utilise (statistique).	41
Tableau 4. 4: Les Frontières physiques de domaine par défaut fournie par CFX.....	42

Nomenclature :

u_i	Vitesse
x_i	Position
t	Temps
ρ	Densité du fluide
p	Pression
ν	viscosité cinématique
f_i	Force corporelle (la force par unité de masse)
Re	Le nombre de Reynolds
U	Vitesse de l'écoulement
L	Échelle de longueur caractéristique de l'écoulement
C	Concentration du traceur
D	Diffusivité moléculaire pour le scalaire
C_i	Concentration des espèces
D_i	Diffusivité moléculaire
S_i	Terme source volumétrique externe
K_d	Constante de désintégration
CT	Temps de concentration-contact
N_m	Concentration de micro-organisme
S_{Nm}	Terme source volumétrique externe pour le micro-organisme
G	Rayonnement incident
r	La distance radiale de la lampe
r_s	Rayon à la surface de la lampe
a	Coefficient d'absorption

UVT	Ultra-violet
σ_s	coefficient de diffusion
C_l	Coefficient de fonction
Z	Distance axiale
l_i	Distance entre l'emplacement actuel et la source ponctuelle
I_0	Sortie de la lampe UV
D_{min}	Le changement dans la distribution des doses
Λ	Facteur de répartition
N_0	Concentration initiale du micro-organisme
$k_{\mu,m}$	Constante de vitesse d'inactivation pour le micro-organisme
$k_{uv,m}$	Constante de vitesse intrinsèque du micro-organisme
T	Température
$\langle \rangle$	Opération de moyenne de Reynolds
$\langle Sc_i \rangle$	Terme source chimique moyen de Reynolds
$\langle C_l \rangle$	Moyenne de la concentration d'ozone dissous
C_l'	Fluctuation de la concentration d'ozone dissous
Ω	Domaine de flux entier
$G(r, x_i)$	Une fonction filtre
u_i''	Sous-grille ou vitesse résiduelle
\bar{u}_i	vitesse filtrée
p_i	Pression filtrée
S_{ij}	Le tenseur de vitesse de déformation filtré
τ_{ij}	Contrainte à l'échelle de la sous-grille (SGS)
ν_t	Viscosité turbulente

Δx	Les espacements locaux des mailles dans la x_1 direction
Δy	Les espacements locaux des mailles dans la x_2 direction
Δz	Les espacements locaux des mailles dans la x_3 direction
C_s	Coefficient de Smagorinsky
$\langle u_i \rangle$	Composante moyenne de la vitesse
u_i'	Composante fluctuante ou turbulente de la vitesse
$-\langle u_i u_j \rangle$	Tenseur des contraintes
$\langle p \rangle$	Pression moyenne
K	L'énergie cinétique turbulente
ε	Le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente
C'	Fluctuations de concentration
D_t'	Diffusivité SGS
T	Temps de séjour moyen théorique
V	Volume du contacteur
Q	Débit
θ	Temps normalise

Abréviation :

CFD : Computational Fluid Dynamics

RANS : Reynolds-averaged Navier-Stokes

DNS : Simulation numérique direct

SGS : simulation des grandes échelles

LES : Large Eddy Simulation

CT : temps de concentration-contact

UV : ultraviolette

Introduction générale :

L'importance de l'eau pour les êtres vivants est cruciale. L'eau est l'élément le plus abondant sur la terre, c'est bien l'or liquide de l'humanité. L'être humain a tendance à abuser de cet élément riche au détriment de sa propre espèce et au détriment de sa propre existence ainsi que celle du reste des habitants de la Terre. On dit que les êtres humains peuvent avoir besoin d'environ 500 litres d'eau potable par jour, ce qui est un gaspillage extrêmement excessif. Par conséquent, nous accordons tant d'importance à l'eau pour le développement de la vie sur la planète [1].

Plus de 70 % de l'eau contenue sur terre, seule une petite partie convient à la consommation humaine ou à l'agriculture (environ 0,5 % de toute l'eau dans le monde). Cependant, cette petite portion d'eau douce doit répondre à tous les besoins humains [2].

La qualité de l'eau est un enjeu environnemental majeur, néanmoins les rejets d'eaux usées domestiques et industrielles, ainsi que l'utilisation d'engrais et de pesticides en agriculture polluent les eaux de surface et souterraines et affectent nos cours d'eau et le milieu naturel, ce qui peut provoquer un risque d'épuisement de cette ressource [3].

La baisse de la qualité de l'eau brute due à l'augmentation des eaux usées municipales, industrielles et agricoles a incité les experts à recommander l'utilisation de l'ozone en raison de ses propriétés d'oxydation et de désinfection [4]. Pour cette raison, les eaux brutes et les eaux usées doivent être correctement traitées afin de répondre aux besoins de la population, l'industrie et spécialement l'agriculture.

Il existe différents types de procédés de traitement des eaux : physico-chimiques (primaires), biologiques (secondaires) et des traitements complémentaires au stade tertiaire qui contribuent à l'amélioration des performances du traitement. Les traitements tertiaires ont comme objectif principal la désinfection. L'eau brute qu'elle soit souterraine ou de surface est aussi concernée par la désinfection pour éliminer les micro-organismes (champignons, virus et bactéries) qui sont présents dans l'eau à l'état naturel ou par l'effet d'une contamination afin d'être consommable sans danger.

Plusieurs techniques de désinfection sont utilisées : le chlore considéré comme étant le désinfectant le plus courant, le rayonnement ultraviolet (UV) et la microfiltration.

La désinfection peut également s'effectuer avec l'ozone qui a un pouvoir désinfectant de 10 à 100 fois plus efficace que le chlore.

Le procédé d'ozonation est largement appliqué dans le traitement de l'eau et des eaux usées, l'ozone est un oxydant puissant utilisé pour la désinfection et la potabilisation des eaux de surface ou souterraines. Il élimine les micro-organismes et dégrade les polluants organiques et inorganiques toxiques. L'ozone permet aussi d'économiser les produits chimiques flocculant, le chlore et le charbon actif [5].

Ces dernières années, les méthodes numériques ont connu un grand développement et une évolution rapide grâce à la forte puissance des ordinateurs. Les concepteurs d'équipements se basent sur l'expérience pour assurer et atteindre l'objectif du procédé de désinfection. Par ailleurs, l'utilisation de la simulation numérique devient de plus en plus fréquente, car c'est un outil indispensable pour réduire les essais expérimentaux et limiter les coûts de la conception.

Parmi les outils de modélisation utilisés pour étudier la mécanique des fluides numérique : le CFD ou « Computational Fluid Dynamics » qui consiste à développer et optimiser le dimensionnement de différents procédés industriels par résolution numérique d'une série d'équations complexe. Cela permet l'accès à de multiples informations concernant les caractéristiques du fluide par exemple : sa pression, vitesse ainsi que sa concentration, dans un domaine de calcul précis. Généralement, les logiciels sont utilisés afin d'optimiser les procédés et réduire les coûts. Ils ont un prix très faible et incomparable par rapport aux études expérimentales.

Ce modeste travail s'organise donc autour de trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique générale sur l'eau, se référant à la potabilité, on abordera dans un premier temps, la définition et l'origine des eaux usées ainsi que le fonctionnement des stations d'épuration, ensuite les procédés de traitement sont présentés en détail sans oublier les caractéristiques de l'effluent entrant en station. Cette partie situe le contexte de l'étude. La désinfection de l'eau traitée occupera une place particulière, ainsi qu'une introduction des différentes méthodes de désinfection avec leurs avantages et inconvénients. On a présenté aussi dans ce chapitre les facteurs à prendre en compte lors du choix du désinfectant.

Le deuxième chapitre est consacré pour une étude approfondie qui a pour but l'optimisation du procédé de désinfection par ozonation. Comme il comporte les formulations mathématiques, on y trouve les équations de RANS, SGS, DNS.

Dans troisième chapitre On a présenté le logiciel utilisé (Ansys), qui est un outil de modélisation et simulation de mécanique des fluides numérique (CFD : Computational Fluid Dynamics), ainsi que ses divers produits.

Le quatrième et dernier chapitre est consacré pour la présentation du déroulement de l'analyse qui passe par la création de la géométrie, le maillage utilisé et la configuration du modèle. En dernier point de ce chapitre, une partie est dédiée au traitement des résultats obtenus lors de la simulation adapté et simulé, pour modéliser les propriétés du mélange eau-ozone (pression, vitesse d'écoulement et les lignes de courant du fluide), dans les différentes chambres d'ozonneur. Ce modèle a été fait pour l'optimisation du procédé d'ozonisation dans les stations d'épuration en temps réel, il a été validé et confirmé en se basant sur une thèse de doctorat de l'université de South Florida [6].

Chapitre 1

*Généralité sur la
désinfections de Léau*

1.1. Introduction :

L'utilisation de l'ozone est de plus en plus courante dans les processus de désinfection de l'eau et de traitement des eaux usées, en partie à cause de ses propriétés antiseptiques plus fortes et en partie parce qu'elle contrôle les composés en termes de goût et d'odeur.

Une approche courante de la désinfection à l'ozone consiste à faire passer de l'eau à travers un réservoir conducteur d'ozone composé d'une série de chambres.

L'ozone gazeux est libéré dans les chambres à partir du bas d'une ou plusieurs chambres via les diffuseurs à bulles indiqués, à la sortie l'ozone se dissout dans l'eau et commence le processus de désinfection. [7].

1.2. Histoire de désinfection de Léau :

Désinfection : Opération au résultat momentané, permettant d'éliminer ou de tuer les micro-organismes ou d'inactiver les virus indésirables portés par les milieux inertes contaminés.

Les hommes préhistoriques ont établi leurs campements près des rivières et des lacs, où l'eau leur était servie comme boisson, moyen de transport, source d'énergie et aussi comme moyen d'assainissement.

Pendant l'antiquité égyptienne, le sable était utilisé. Les Minoens de Crète disposaient déjà d'un système d'égouts alimenté par l'eau environ 1 600 ans avant notre ère.

Les Romains ont construit des tuyaux qui évacuent les déchets et les eaux de pluie et ont utilisé la ph tore médiation avec des plantes de tourbière pour la Cloacal Maxima. Ils utilisaient également les eaux usées comme engrais. Au moyen âge, le développement chaotique des villes rendait difficile la mise en place de systèmes d'égouts.

Le traitement des eaux usées qui sépare les solides et les liquides est historiquement moderne et est associé à la croissance démographique importante des villes après la révolution industrielle. La décomposition de la matière organique a été étudiée dans les années 1920, ce qui a permis de développer l'épuration biologique. Les fluides sont nettoyés et réutilisés, et les boues restantes sont soit brûlées soit enfouies. L'assainissement nécessite des infrastructures complexes et de grandes quantités d'eau. [8].

1.3. Traitement des eaux :

1.3.1. Définition de la pollution de l'eau :

La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaine, à travers d'effets directs ou indirects altérant les critères de répartition des flux d'énergie.

La pollution des eaux signifie se l'OMS, tout déifications des propriétés physiques, chimiques ou biologiques d'une étendue d'eau quelconque d'un pays considéré où tous rejets de substances liquides, gazeuses ou solides dans une eau sont provoqués par l'homme et se activités. [9].

1.3.2. Les eaux usées :

Les eaux usées sont toutes les eaux chargées de différentes substances telles que les détergents, les urines, les matières fécales, les huiles, les microorganismes (Bactéries, virus, parasites) les pesticides, les engrais...

Provenant de la population mais aussi des activités commerciales et industrielles du fait qu'elles ont été utilisées pour le lavage ou les toilettes, qui sont de nature à polluer les milieux dans lesquelles elles seront déversées. C'est pourquoi, dans un souci de respect de ces différents milieux, des traitements sont réalisés sur ces effluents par le réseau d'assainissement urbain. Ces traitements peuvent être réalisés de manière collective dans une station d'épuration ou de manière individuelle. La plupart des stations d'épuration fonctionnent selon les mêmes processus de base, mais des différences plus ou moins importantes peuvent exister dans la manière de mettre en place ces processus. Le traitement se divise généralement en plusieurs étapes.

1.3.3. Types des eaux usées :

En général, il existe plusieurs catégories d'eaux usées

- **Eaux usées domestiques :** sont issues des habitations. Elles sont principalement polluées par des matières organiques.
- **Eaux usées industrielles :** leurs caractéristiques sont extrêmement variables et sont directement liées au type d'industrie agroalimentaire, chimique, minière ou autre. Après des premiers traitements spécifiques, les eaux usées industrielles sont

assimilables à des eaux usées domestiques, ce qui permet leur rejet dans un réseau de collecte public.

- **Eaux usées agricoles :** issues des élevages. Elles sont polluées notamment par les déjections des animaux.

1.3.4. Risques et conséquences de la pollution de l'eau :

- **Effet sanitaires :**

La pollution de l'eau peut avoir des conséquences sur la santé de l'homme. L'eau polluée peut transmettre un certain nombre de maladies hydriques, maladies aquatiques et maladies des aux vecteurs de l'eau.

- **Effets l'agriculture :**

L'utilisation des eaux usées industrielles pour l'irrigation peut entraîner des risques graves pour l'agriculture : contamination des produits et détérioration de la fertilité des sols. Cette eau contient diverses impuretés telles que des produits chimiques hautement toxiques et mortels (métaux lourds, solvants organiques, hydrocarbures, éléments radioactifs). [10].

1.4. Les Procédés de désinfection de l'eau :

- **Physique :**

On a (Les rayons Ultra-violet(UV) et La méthode SODIS (méthode de désinfection solaire de l'eau).

- **Chimique :**

Pour le traitement chimique de l'eau, une variété de produits chimiques est utilisée (la chloration, L'ozonation).

- **Biologique :**

Le traitement biologique est la transformation de la pollution par des bactéries en gaz carbonique, eau traitée et boues. La clarification sépare les boues de l'eau qui, dépolluée à plus de 90 %, est ensuite rejetée dans le milieu naturel. [11].

1.5. Technique de désinfection de l'eau :

Il existe actuellement quatre méthodes courantes de désinfection de l'eau :

1.5.1. Traitement de Léau par rayonnement ultraviolet :

Le traitement et la désinfection de l'eau à l'aide de rayons(UV) riches en énergie est une méthode respectueuse de l'environnement qui existe depuis plus de 100 ans. Il se fait sans produits chimiques et sans ajout de chlore ou d'ozone. [12].

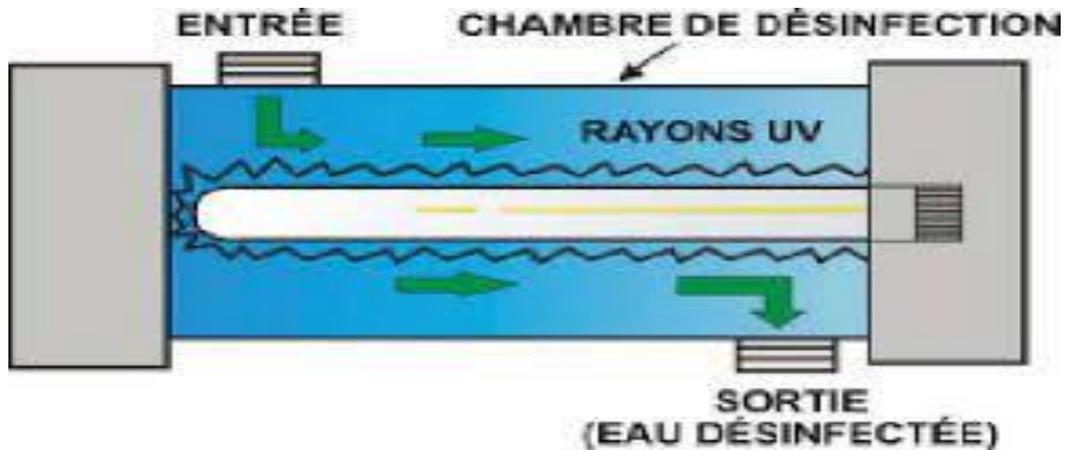


Figure 1. 1: Schéma élémentaire d'une unité de traitement (UV).

La lumière ultraviolette (UV) est un rayonnement électromagnétique qui se déplace par ondes dans toutes les directions à partir de la source émettrice (lampe), le spectre lumineux de rayonnement UV est situé entre celui de rayons X et la lumière visible ; sa longueur d'onde varie de 200 à 390 nanomètres (nm).

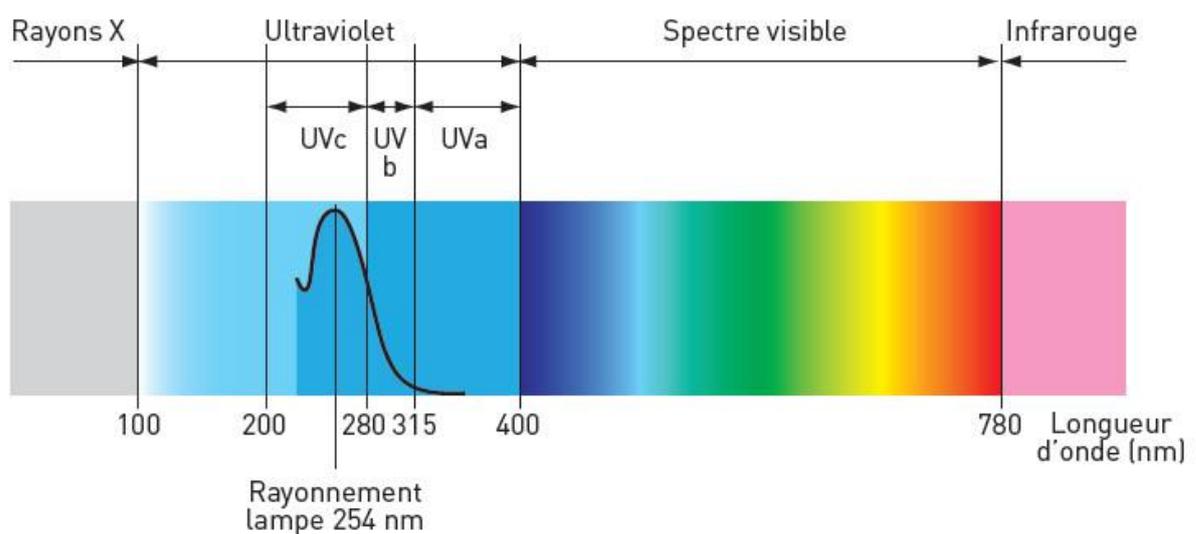


Figure 1. 2: Spectre d'absorption du rayonnement ultra-violet.

• le spectre	• type de la longueur d'onde
spectre UV-A	de 315 à 400 nm
spectre UV-B	de 280 à 315 nm
spectre UV-C	de 180 à 280 nm

Tableau 1. 1: Les spectres de la lumière UV se divise en 3 bandes.

Du point de vue de la désinfection microbienne, la longueur d'onde la plus efficace est 254 nm, car il s'agit de celle pour laquelle l'intensité énergétique est optimale, cette relation entre l'efficacité de désinfection microbiologique et la longueur d'onde de rayonnement UV est illustrée.



Figure 1. 3: Portion d'efficacité en fonction de la longueur d'onde émise par la lampe UV.

1.5.2. Traitement de l'eau par microfiltration :

Pour réaliser la microfiltration, on utilise des membranes dont la taille des pores est comprise entre 0,1 et 10 µm. Les membranes de microfiltration éliminent toutes les bactéries. Ils retiennent aussi indirectement une partie de la contamination virale. Bien qu'en moyenne plus petits que les pores, les virus peuvent tout de même être stoppés par la membrane, en se liant au bio film bactérien qui la recouvre. [13].

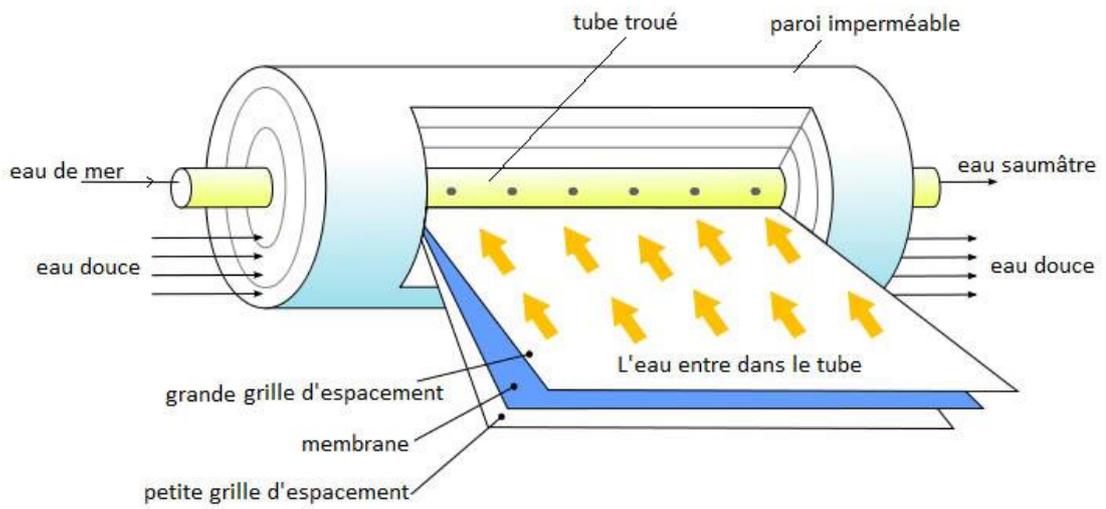
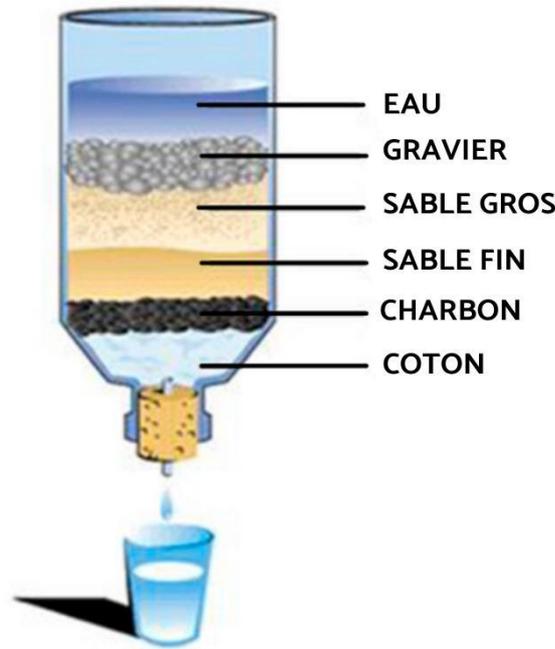


Figure 1. 4: Microfiltration à membrane.



Figure 1. 5: Filtration a maison



ProjetEcolo

Figure 1. 6: Fabrication de filtration

Ce procédé représente la meilleure technologie de filtration de l'eau en ce qu'il ne consiste pas simplement en un obstacle physique, déterminé par la taille des pores, au passage des molécules, ainsi qu'il ya d'autres techniques de séparation utilisant des membranes telles que la microfiltration, nano filtration, pour dessaler l'eau et éliminer les traces de phosphates, de calcium, de métaux lourds.

1.5.3. Traitement de l'eau par chlore :

Le chlore est un désinfectant puissant, traditionnellement utilisé pour traiter l'eau potable, Le système est très simple, il suffit d'utiliser une pompe à seringue ou un injecteur venturi pour mélanger le chlore avec de l'eau.

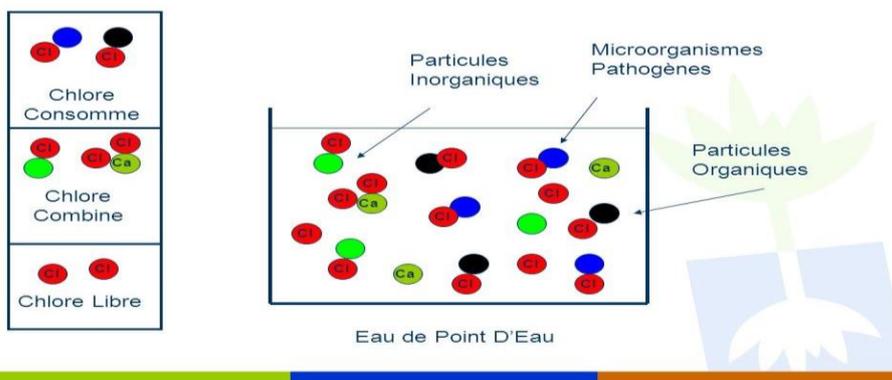


Figure 1. 7: Action du chlore dans l'eau. [14].

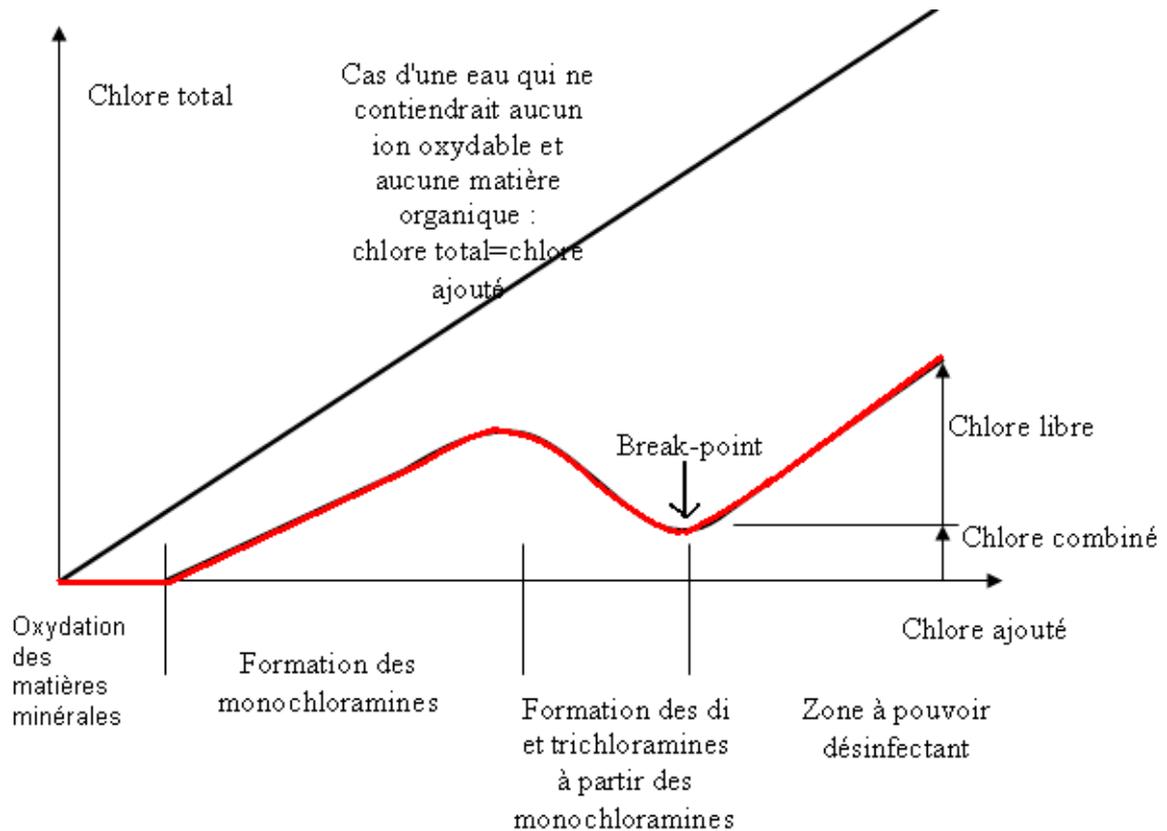


Figure 1. 8: Evolution de chlore d'un l'eau.

- Mais il y a quelques inconvénients où le chlore nous donne un autre goût de l'eau.

1.5.4. Traitement de Léau par ozonation :

L'ozone est un gaz instable que l'on doit générer sur place, dans les stations d'épuration au moyen d'une décharge électrique produite dans de l'air ou de l'oxygène, l'opération consiste à transformer l'oxygène sous forme O_2 en oxygène sous forme O_3 .

Parmi les avantages de l'ozone, citons son action très rapide et efficace sur les bactéries et les virus, ainsi que sa faible propension à générer des produits secondaires indésirables.

L'ozonation ne nécessite aucun transport de produits chimiques et est plus sécuritaire pour le personnel de la station d'épuration, ces inconvénients sont essentiellement d'ordre économique, le procédé entraîne des coûts élevés d'investissement et d'exploitation, l'ozonation est donc une solution de traitement tertiaire des eaux usées intéressante, mais ses coûts la rendent généralement peu attrayante. [15].

1.6. Choix la méthode de désinfection :

1.6.1. Grandeur de l'installation :

Pour les petites installations, l'investissement requis pour la chloration ou le traitement à l'ozone rend ces méthodes non rentables. De plus, la chloration et le traitement à l'ozone nécessitent des connaissances techniques car nous travaillons avec des produits dangereux. On choisira donc, pour les petites installations, la stérilisation aux UV, simple à mettre en œuvre et économique. La microfiltration est économique pour les très petits débits. Il convient à une utilisation irrégulière.

1.6.2. Micro-organismes à éliminer :

L'ozone est un oxydant puissant avec une large gamme d'applications. Il a une forte activité antiviral. De plus, il est également efficace contre les protozoaires, contrairement aux composés chlorés. Les rayons UV sont très efficaces, mais certaines algues et moisissures nécessitent des doses d'exposition très élevées. La microfiltration est inefficace contre les virus car sa taille est plus petite que les pores du filtre.

1.6.3. Intervalle de temps entre traitement et consommation :

Lorsque l'eau est traitée au niveau du consommateur, toutes les méthodes sont applicables.

Si l'eau doit par contre attendre avant d'être consommée (réseau de distribution ou réservoir), il faut que l'eau reste potable durant un certain temps. Dans ce cas, il faut éviter d'utiliser les (U.V.) car les Bactéries peuvent redevenir actives dans certaines conditions, même sans contamination Extérieure.

L'ozone et la microfiltration sont utilisables, pour autant qu'il n'y ait pas de contamination après Traitement. Le chlore possède un effet rémanent qui garantit une désinfection dans le réseau, Jusqu'au point de consommation.

Critères	Ozone	chlore	U.V	Microfiltration
Grandeur de l'installation	Grande	Grande	Petite /grande	Très petite
Goût/odeur	Nul	caractéristique	caractéristique	Nul
Efficacité germicide	Très bonne	Bonne	Bonne	Bonne
Utilisation	complexe	simple	Simple	Simple
Réparation	faible	faible	moyenne	Moyenne

Tableau 1. 2: Comparaison entre différentes méthodes de désinfection de l'eau. [16].

1.7. L'ozonation :

1.7.1. L'ozone :

L'ozone est un traitement chimique par oxydation. L'utilisation de réactifs chimiques oxydants pour le traitement de l'eau était initialement destinée à stériliser l'eau, ou plus précisément, à détruire les germes pathogènes.

L'ozone a l'avantage de permettre des actions complémentaires en détruisant un grand nombre de polluants fins, en améliorant les goûts et les odeurs, et en détruisant les couleurs.

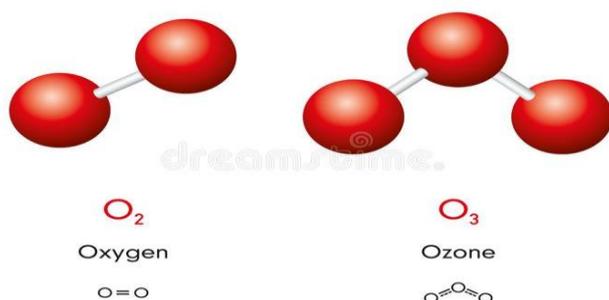


Figure 1. 9: Formules d'ozone

Formule	O_3
Masse volumique	2.14kg/m^3
Masse molaire	48 g/mol
Point de fusion	$-192,2\text{ }^\circ\text{C}$
Point d'ébullition	$-112\text{ }^\circ\text{C}$

Tableau 1. 3: La structure chimique de l'ozone [17].

1.7.2. La molécule de l'ozone :

L'ozone est une forme allotropique de l'oxygène. C'est une molécule formée de trois atomes d'oxygène dont le symbole est O_3 . Dans les conditions usuelles d'utilisation, il est à l'état gazeux et soluble dans l'eau. C'est un oxydant puissant et donc chimiquement instable dans les mélanges gazeux et liquides. Ainsi de nombreux corps provoquent sa dissociation en oxygène.

Dans les gaz sa dissociation est catalysée par les éléments métalliques (platine, argent, ...) et par les halogènes (chlore, brome...). En solution aqueuse, la vitesse d'autodestruction de l'ozone dépend du pH, de la nature et de la concentration de sels dissous. Elle est très favorisée par la présence d'OHen solution.

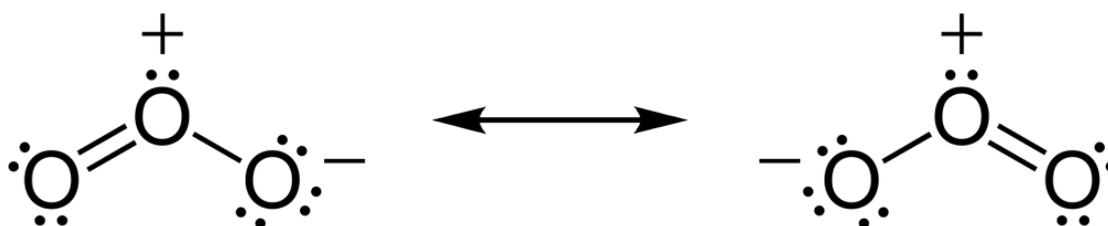


Figure 1. 10: Les Laissons de molécule d'ozone

- Il détruit des composés toxiques tels que les cyanures et les phénols
- Il attaque les colorants organiques naturels (acides humiques, tanins, lignines...) et artificiels responsables de la coloration des eaux
- Il réagit de manière sélective avec les composés organiques contenus dans l'eau, et il les transforme en matières plus faciles à décomposer par traitement biologiques ultérieurs. [18].

1.7.3. La production de l'ozone :

L'ozone étant instable, il est produit sur le lieu de consommation, à l'échelle industrielle, l'ozone est produit par décharges électriques dans des générateurs tubulaires.

Cette production est due à un générateur d'ozone, qui est essentiellement composé de deux électrodes conductrices maintenues en regard l'une de l'autre.

L'air ou l'oxygène est comprimé, puis séché, et passe entre ces deux électrodes où il est soumis à un effluve électrique dans un champ de courant alternatif à haute tension, Une partie de l'oxygène se transforme en ozone.

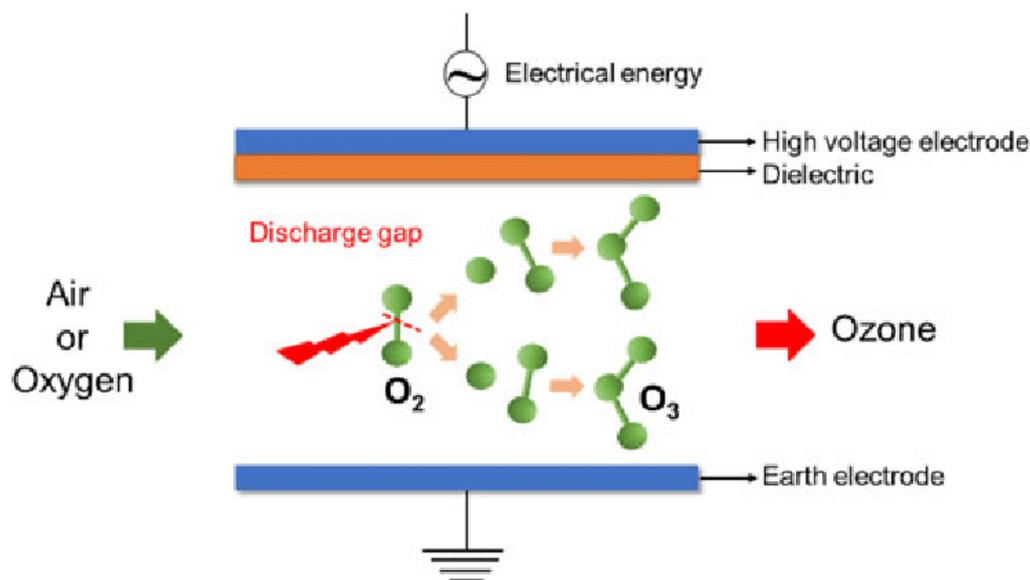


Figure 1. 11: Production d’ozone par décharge a barrière diélectrique.

Un circuit de refroidissement absorbe l'excès de chaleur produite par la décharge (71 Kcal). Dans la mesure du possible, cette chaleur est récupérée et valorisée dans l'usine.

Pour homogénéiser la décharge, l'une des électrodes ou parfois les deux, sont recouvertes d'un diélectrique à permittivité élevée, d'épaisseur uniforme réalisant une surface équipotentielle.

Généralement, les diélectriques mis en œuvre sont des verres dont la permittivité varie, selon la composition chimique.

L'ozone est donc produit en faisant circuler lentement dans l'espace restant un fluide oxygéné et en créant dans l'espace gazeux une tension alternative sinusoïdale d'amplitude suffisamment élevée.

Un générateur d'ozone industriel comporte plusieurs générateurs élémentaires en batterie. Les appareils se distinguent selon le gaz d'origine et la capacité de production d'ozone. [19].

1.7.4. La réaction chimique de Léau et l’ozone :

Il y a deux types de réactions :

- Directes, avec la molécule d' O_3 (très sélective),
- Indirectes, du fait de l'action d'espèces secondaires comme les radicaux libres OH- formés par la décomposition de l'ozone au contact de l'eau.

De plus, contrairement au chlore ou au dioxyde de chlore, l'ozone n'entraîne aucune formation d'halo formes. Il à une action efficace et rapide mais il a peu d'action rémanente.

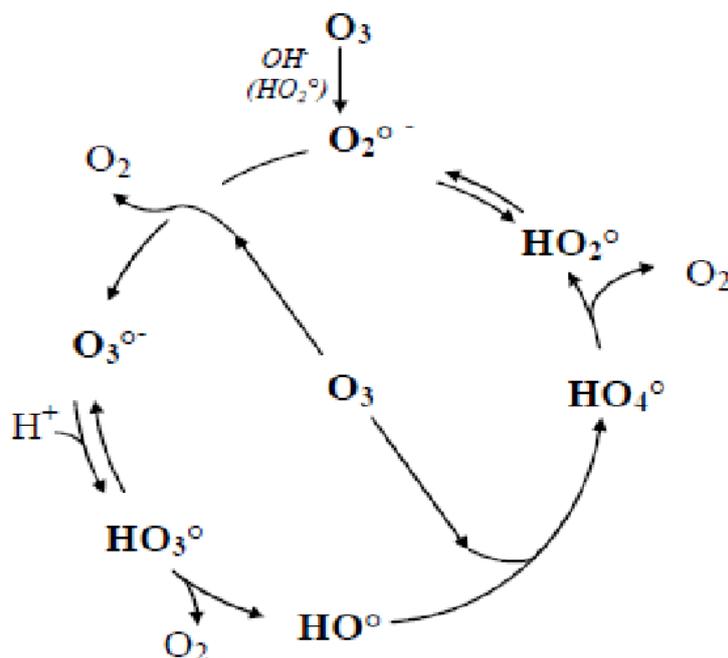


Figure 1. 12: Cycle de décomposition de l'ozone dans Léau.

1.8. Les domaines d'application de traitement de l'eau par l'ozone :

Puisque l'ozone sert essentiellement au traitement des eaux, il est appliqué dans tous les domaines d'utilisations des eaux (la désinfection, Eaux usées, domaines agro-alimentaires...)

1.8.1. Eau potable :

Il est désormais admis qu'une eau destinée à la consommation humaine est désinfectée vis-à-vis des virus et bactéries lorsqu'elle est traitée, l'ozone n'assure pas seulement une bonne désinfection. Son introduction dans la chaîne d'eau potable agit sur d'autres paramètres :

- Ozonation améliore la clarification, l'élimination de certaines matières organiques et favorise l'élimination de nombreux micro-organismes, comme les algues.
- En ozonation, il s'attaque aux matières organiques résiduelles et favorise la biodégradabilité de certaines substances organiques qui seront, par la suite, éliminées lors de l'étape de filtration biologique.

- Les couplages ozone-charbon actif ou ozone-peroxyde représentent aujourd'hui les procédés les plus puissants dont dispose le traiteur d'eau pour l'élimination de certains polluants et constituent une garantie vitale vis-à-vis des pollutions accidentelles.

1.8.2. Eaux usées :

L'utilisation de l'ozone pour le traitement des eaux usées est en pleine expansion et inclue déjà la destruction et l'élimination de :

- Molécules organiques complexes en vue d'une meilleure dégradation dans les traitements ultérieurs.
- Odeurs des condensats issus de l'évaporation des eaux de lavages, en vue de leur recyclage.

1.8.3. Domaine agro-alimentaire :

L'Ozone est utilisé de plus en plus dans les domaines agro-alimentaires notamment lavage des fruits et productions de glace ozoné. [20].

1.9. Conclusion :

La désinfection est une technique essentielle pour la santé humaine, et il existe de nombreuses techniques spécialisées de désinfection, Et il y a ozonation C'est un moyen essentiel de désinfection Son action rapide et très efficace sur les bactéries et les virus, ainsi que sa faible tendance à générer des produits indésirables.

Chapitre 2

Modélisation mathématique et numérique

2.1. Introduction :

Le processus de désinfection est une étape de sécurité critique dans le traitement de l'eau potable qui inactive les bactéries, virus et autres agents pathogènes, Les approches de désinfection les plus courantes pour le traitement de l'eau comprennent la désinfection au chlore, désinfection à l'ozone, et ultraviolet.

Avec les progrès rapides de la technologie informatique (CFD), a été utilisé par un nombre croissant de chercheurs en traitement de l'eau et des eaux usées pour le dépannage ou améliorer la conception du réacteur et le processus, Les premiers travaux ont prouvé l'applicabilité de (CFD) aux processus de désinfection.

Ce chapitre présente les équations déterminantes de la quantité de mouvement et de la diffusion de l'advection scalaire comprenant le cadre de calcul développé pour la désinfection de l'eau à l'ozone.

Ces les équations sont présentées dans le cadre de la méthodologie de calcul des écoulements turbulents d'intérêt (RANS et LES).

2.2. Les Étapes de la CFD appliquée au processus de désinfection :

La technologie CFD est utilisée pour modéliser les flux dans le traitement de l'eau depuis la fin des années 1990(Do-Quang et al. 1997 ; Janex et al. 1998), dont infrastructures de prise d'eau, floculation réservoirs, bassins de décantation et réacteur de désinfection, Le succès précoce de La CFD dans la simulation des flux de traitement de l'eau a conduit à un intérêt accru pour l'application de la CFD.

Les principaux objectifs de la modélisation de processus de désinfection sont d'augmenter l'efficacité de la désinfection et de réduire les coûts,

Ou d'optimiser conception du réacteur pour se conformer à la réglementation ou les deux.

La modélisation du processus de désinfection peut être divisée en quatre étapes :

- Simulation de flux.
- Traceur simulation de transport.
- Simulation de processus de réaction et simulation d'inactivation. [21].

2.2.1. Simulation de flux :

Les équations gouvernantes les plus fondamentales de l'écoulement de fluide incompressible sont la continuité (conservation de la masse).

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

Où u_i et sont la vitesse et x_i la position dans la (i) direction

Les équations de quantité de mouvement sont dérivées de la deuxième loi de Newton comme

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + u \frac{\partial u_i}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + f_i \quad (2.2)$$

Où ρ le ν densité du fluide, et la ν viscosité cinématique, f_i être présente une Force du corps.

Une question importante dans la simulation d'écoulement est de savoir comment traiter la turbulence Flux turbulents contiennent une large gamme d'échelles spatiales, des plus petits tourbillons turbulents de l'ordre de millimètres, à des caractéristiques d'écoulement en vrac comparables à la taille de la géométrie, La gamme des mouvements dans un flux turbulent croissent avec le nombre de Reynolds (Re).

Nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

Il ya deux stratégies principales pour le traitement de la turbulence sont bien connues Simulation des équations de Reynolds-Avered Navier-Stokes (RANS), simulation aux grandes échelles (LES Large Eddy Simulation) .

Reynolds-Avered Navier-Stokes (RANS):

RANS est une approche statistique pour la simulation d'écoulement turbulent. RANS implique l'application de la moyenne de Reynolds pour décomposer les variables de la solution de l'équation de Navier-Stokes en leurs moyennes et les fluctuations turbulentes autour de ces moyennes, Le principal avantage de RANS est le besoin relativement faible en ressources informatiques.

Simulation aux grandes échelles (LES) :

LES vise également à réduire les exigences de résolution de maillage imposées par le DNS, L'idée de LES est d'utiliser un filtre spatial pour séparer le champ d'écoulement turbulent en deux composantes.

La des structures à plus grande échelle et plus énergétiques qui peuvent être résolues par la méthode numérique sur un maillage sont appelés les échelles résolues, Les plus petites structures qui ne peuvent pas être capturées par le les mailles sont appelées échelle de sous-grille.

L'influence des échelles de sous-main sur les échelles résolues doit être modélisée par un terme de contrainte ajouté à l'équation de quantité de mouvement, Le principe du LES repose sur le fait que les petites échelles de la turbulence sont homogènes et isotropes et donc plus facile à modéliser par rapport aux grandes échelles.

2.2.2. Simulation de transport

Le transport de traceurs non réactifs est souvent intégré dans une simulation d'écoulement afin d'étudier l'efficacité hydraulique du système de traitement de l'eau, par exemple, en termes de temps de séjour et autres grandeurs d'intérêt dérivées de la distribution du temps de séjour.

Dans la simulation CFD, le traceur est généralement traité comme un scalaire passif sans impact sur les caractéristiques hydrauliques, La technique de base pour mener une étude de traceur consiste à introduire le traceur à l'entrée du réacteur et à mesurer la réponse en point de vente afin d'obtenir des statistiques de temps de séjour.

Il ya Deux approches principales pour la simulation du transport de traceurs sont basées sur le lagrangien modélisation, mouvement des particules et résoudre une équation de transport pour le traceur concentration.

Pour la simulation du transport du traceur dans un écoulement de fluide, une équation d'advection-diffusion est utilisée.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) = 0 \quad (2.3)$$

Où est u la vitesse d'écoulement, est la C concentration du traceur et le D la diffusivité moléculaire pour le scalaire.

Pour résoudre l'équation d'advection-diffusion ci-dessus, il faut entrer le champ de vitesse d'écoulement, Il existe deux stratégies pour saisir le champ de vitesse, à savoir flux figé et flux dynamique.

2.2.3. Simulation de processus de réaction et simulation d'inactivation :

Simulation de processus de réaction

L'objectif principal de la simulation du processus de réaction est de prédire la distribution de la dose de désinfectant, nécessitant des solutions d'une série de réactions chimiques.

Par exemple, dans la désinfection à l'ozone, les réactions chimiques couramment considérées comprennent : la réaction entre l'ozone et les composés organiques naturels (NOM) ou carbone organique total (TOC).

Modéliser le transport d'espèces chimiques dans un écoulement fluide, une advection-diffusion générale équation similaire à l'équation :

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + j \frac{\partial C_i}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_i \frac{\partial C_i}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (2.4)$$

Espèces	Termes sources pour le transport équations
Dissous ozone,	$S_{cl} = -k_d cl$
NOM	$S[NOM] = -K_{nom} [NOM]cl$
Bromate	$S_{cB} = k_B cl$
Trace	$S_{cT=0}$

Tableau 2. 1: Termes sources couramment utilisés des équations de transport pour la modélisation de la désinfection à l'ozone

Dans la désinfection UV, le désinfectant n'est pas un produit chimique mais plutôt l'énergie de l'incident UV radiation, Ainsi l'objectif premier de cette étape de la désinfection UV est de prédire l'incident rayonnement dans l'espace.

De plus, la modélisation du rayonnement dans la désinfection UV est indépendante du flux .

Simulation d'inactivation :

Des réactions supplémentaires entre les micro-organismes et le désinfectant sont incluses dans l'étape d'inactivation.

Les méthodes de suivi des particules sont relativement difficiles à maîtriser implémenté dans les codes CFD traditionnels car ces derniers sont généralement écrits dans un langage eulérien système, Ainsi seule l'inactivation eulérienne sera décrite dans cette revue.

Dans l'inactivation eulérienne, une équation de transport pour la concentration de micro-organismes est communément considérée comme l'équation déterminante de l'inactivation des micro-organismes.

$$\frac{\partial N_m}{\partial t} + u \frac{\partial N_m}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (D_i \frac{\partial N_m}{\partial x_j}) = S_m \quad (2.5)$$

Où N_m est la concentration de micro-organismes m et S_m est la source volumétrique et désignant un micro-organisme.

2.3.État des recherches actuelles sur la simulation de désinfection à l'aide de CFD :

Les principaux intérêts des études rapportées sur la modélisation du processus de désinfection peuvent être classés dans les trois groupes suivants :

1. Développement d'une méthode ou d'un cadre de simulation pour le processus de désinfection.
2. Les impacts des paramètres sur l'efficacité de la désinfection.
3. Optimisation de la configuration des contacteurs.

2.3.1. Développement d'une méthode ou d'un cadre de simulation pour le processus de désinfection :

Equations régissant les solutions d'écoulement et de transport des traceurs (hors modèle de turbulence) sont générales aux cadres de simulation de désinfection.

Des différences apparaissent lors de la modélisation réactions.

Pour modéliser la désinfection au chlore, le système de réaction couramment utilisé consiste en désintégration du chlore uniquement.

Pour la modélisation de la désinfection à l'ozone, les réactions couramment considérées comprennent la décomposition de l'ozone, la réaction entre l'ozone et demande instantanée en ozone (IOD) ou matière organique naturelle (NOM) ou carbone organique total(COT) et la formation de bromate.

L'expression du terme source donnée par le modèle Hom-Haas est :

$$S_{Nm} = \frac{\partial N_m}{\partial t} \tag{2.6}$$

La concentration de désinfectant (c'est-à-dire l'ozone ou le chlore), x et y sont des constantes.

Pour le cas où $x = y = 1$

$$S_{Nm} = \frac{\partial N_m}{\partial t} = -k_{u,m} C_l N_m \tag{2.7}$$

Les modèles d'inactivation utilisés dans la désinfection UV sont similaires à ceux utilisés dans l'ozone et désinfections au chlore sauf que la concentration de désinfectant dans les équations (2.6) et (2.7) doit être remplacé par un rayonnement incident G .

Le terme source peut être écrit comme :

$$S_{Nm} = -k_{uv,m} G N_m \tag{2.8}$$

Où $k_{uv,m}$ (unité : $m^2/(Ws)$) est la constante de vitesse du micro-organisme m .

Notez que, T l'utilisé dans les expressions de calcul signifie k_{um} la température de l'eau

Micro-organisme	K_{um}	X	Y
Cryptosporidium Oocystes	$0.68e^{-t/22}$	0.71	0.73
Giardia	$2.35e^{0.0723t}$	1	1
Virus	$4.9e^{0.07t}$	1	1

Tableau 2. 2: Constantes signalées dans le modèle Hom-Haas pour l'inactivation de l'ozone

2.3.2. Modélisation du processus de désinfection :

Plusieurs paramètres liés à l'efficacité de la désinfection ont été étudiés via CFD.

Ces les paramètres peuvent être divisés en trois catégories :

- Paramètres de fonctionnement

- Paramètres de configuration
- Paramètres dans la modélisation

2.3.3. Optimisation de la configuration des contacteurs :

Optimisation de la configuration du contacteur qui vise à obtenir le maximum de désinfection. L'efficacité est une direction de recherche importante dans l'industrie du traitement de l'eau et des eaux usées.

L'augmentation du nombre de déflecteurs est une approche couramment utilisée pour réduire les zones mortes et diminuer les courts-circuits. Plusieurs études ont conclu qu'une augmentation du nombre de chicanes conduit généralement l'écoulement de fluide à se rapprocher des conditions d'écoulement piston caractéristique d'un réacteur piston.

2.4. Modèle physique :

2.4.1. Simulation numérique directe (DNS) :

Le DNS n'est utilisé que pour simuler écoulement turbulent du canal à un nombre de Reynolds modeste afin de valider la fiabilité et précision de la méthode numérique utilisée par comparaison avec les résultats DNS existants disponibles.

2.4.2. Simulation aux grandes échelles (Large Eddy Simulation LES) :

Dans LES, les champs variables sont filtrés par un filtrage passe-bas opération afin d'être correctement résolu sur une grille relativement grossière, L'opération de filtrage est généralement définie comme :

$$\bar{u}_i(x_i, t) = \int_{\Omega} G(r, x_i) u_i(x_i - rt) dr \quad (2.9)$$

Où Ω est le domaine d'écoulement entier, et $G(r, x_i)$ est une fonction de filtre de compact.

G : est différent de zéro uniquement dans un petit voisinage autour du point.

$$\int G(r, x_i) dr = 1 \quad (2.10)$$

L'opération de filtrage en (2.9) réalisée avec une fonction de filtrage de petit support compact

Est essentiellement une moyenne locale de la variable d'origine.

$$u_i''(x_i, t) = u_i(x_i, t) + \bar{u}_i(x_i, t) \quad (2.11)$$

Le champ de vitesse d'origine peut être décomposé en résolu et non résolu.

$$u_i(x_i, t) = \bar{u}_i(x_i, t) + u_i''(x_i, t) \quad (2.12)$$

Application de l'opération de filtrage spatial de (2.10) aux équations de flux gouvernantes de (2.11) et (2.12) conduisent à l'équation de continuité filtrée et aux équations de Navier-Stokes, exprimées par :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx_i} + 2\nu \frac{ds_i}{dx} - \frac{1}{\rho} \frac{d\tau_i}{dx} \quad (2.14)$$

Régissant les composants résolus plus grands du flux.

Dans ces équations un over line désigne le filtrage spatial LES, le vecteur est la vitesse filtrée, le vecteur est la position, est le temps, est la pression filtrée, ρ est la densité et est la viscosité cinématique.

Est la vitesse de déformation filtrée tenseur calculé comme :

$$\mathfrak{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.15)$$

Ici, la contrainte SGS est décomposée en dévia torique et composants isotropes, ce dernier composant étant absorbé par la pression et le premier composant modélisé.

2.4.3. Reynolds-averaged Navier-Stokes Equations (RANS)

RANS implique l'application de la technique de moyenne de Reynolds pour décomposer les variables dans leurs moyens et les fluctuations autour de ces moyens. La moyenne de Reynolds est une opération qui fait la moyenne d'une variable ou d'une équation dans le temps.

Reynolds averaging est une opération qui fait la moyenne d'une variable ou d'une équation dans le temps.

$$\langle u_i \rangle = \frac{1}{t} \int u_i dt \quad (2.16)$$

$$u_i' = u_i - \langle u_i \rangle \quad (2.17)$$

Où, u_i pour les flux statistiquement stables considérés ici, t est un temps suffisamment long pour assurer satisfaction de l'état

$$\langle u_i' \rangle = 0 \quad (2.18)$$

En appliquant la décomposition de Reynolds, les équations gouvernantes (2.16) et (2.17) deviennent l'équation de continuité moyenne de Reynolds et les équations de Navier-Stokes, respectivement :

$$\frac{d\langle u_i \rangle}{dx_i} = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} + \langle u_i \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle u_i u_j \rangle}{\partial x_j} \quad (2.20)$$

La contrainte de Reynolds est modélisée ou fermée à l'aide d'un modèle de viscosité turbulente comme :

$$\langle u_i u_j \rangle = \nu_t \frac{d\langle u_i \rangle}{dx_j} \quad (2.21)$$

Le principal avantage du RANS est le faible besoin relatif en ressources informatiques par rapport à DNS et LES étant donné que RANS ne résout que la composante moyenne du flux.

Par conséquent, RANS a été appliqué avec succès à la simulation de flux à nombre de Reynolds élevé, comme l'écoulement autour d'un avion grandeur nature.

2.5. Modèle turbulence :

En 1877 (Joseph Boussinesq) a proposé d'écrire ce tenseur comme le tenseur des contraintes dans le cas d'un fluide newtonien en faisant intervenir une viscosité de turbulence.

- **Les modèles à deux équations :**

Prendre la trace de l'équation de contrainte de Reynolds ci-dessus donne une équation de transport pour k

$$\rho \frac{dk}{dt} + \rho u \frac{dk}{dx} = \tau_{ij} \frac{du_i}{dx} + \rho \varepsilon \frac{d}{dx} \left(u \frac{dk}{dx} \right) - \frac{d}{dx} (u_i) - \frac{d}{dx} (\rho_i u_i) \quad (2.22)$$

Où ε est la dissipation,

Ce type de modèle dit modèle k - ω a été introduit par Andreï Kolmogorov en 1942 à une époque où il n'était pas possible de le résoudre.

- **Modèle à une équation de transport :**

Ce type de modèle a été introduit dans les années 60 On part de la viscosité turbulente ci-dessus avec $C_\mu = 1$ et l'on dérive

$$\frac{D\nu_t}{Dt} = \frac{1}{w} \frac{Dk}{Dt} - \frac{k}{w^2} \frac{Dw}{Dt} \quad (2.23)$$

ν_t La viscosité turbulente est déduite de l'analyse dimensionnelle.

2.6. Méthodologie RANS pour le processus d'ozonation :

La stratégie de simulation du processus d'ozonation et du processus d'inactivation considérée dans ce travail est basée uniquement sur RANS et non sur LES.

Équations régissant le processus d'ozonation

Les équations régissant le transport et la réaction des espèces chimiques dans l'ozonation sont les équations de transport d'espèces moyennées de Reynolds.

2.7. Les modèles chimiques :

2.7.1. Modélisation des réactions chimiques

La formation de bromate, un sous-produit du processus d'ozonation, peut impliquer de nombreuses réactions.

Cependant, certaines réactions ne sont pas susceptibles de se produire en raison d'une cinétique relativement faible ou d'une faible possibilité de formation de réactifs.

2.8. Équations régissant le processus d'inactivation :

Les équations déterminantes pour l'inactivation sont décrites ici dans le contexte de RANS, pour la même raison expliquée précédemment dans le cas du procédé d'ozonation.

2.8.1. Inactivation basée sur la cinétique

Dans l'inactivation basée sur la cinétique, l'équation déterminante pour l'inactivation de micro-organismes est une équation de transport pour la concentration de micro-organismes exprimé comme :

$$\frac{dNm}{dt} + u \frac{dNm}{dx} - \frac{d}{dx} \left(D_i \frac{dNm}{dx} \right) = SNm \quad (2.25)$$

Où Nm est la concentration de micro-organismes et SNm est une source volumétrique externe terme désignant un micro-organisme.

2.8.2. Inactivation basée sur CT

Le concept concentration-temps de contact (CT) a été couramment utilisé pour évaluer l'efficacité de la désinfection.

Le concept CT est exprimé comme un produit de la concentration moyenne de désinfectant.

Le CT moyen peut être obtenu en résolvant la moyenne de Reynolds suivante équation des transports :

$$\frac{d\langle CT \rangle}{dt} + \langle u \rangle \frac{d\langle CT \rangle}{dx} - Dt \frac{d}{dx} \left(\frac{d\langle CT \rangle}{dx} \right) = \langle SCT \rangle \quad (2.26)$$

Le terme source de CT est défini comme :

$$\langle SCT \rangle = \langle Cl \rangle$$

Où $\langle Cl \rangle$ est la concentration moyenne de Reynolds d'ozone.

2.9. Conclusions :

Dans ce chapitre, des stratégies et des modèles pour chaque sous-processus, d'ozone désinfection sont présentés.

Un cadre de modélisation pour la désinfection à l'ozone combinant CFD avec un modèle de réaction basé sur la cinétique pour la formation de bromate a été développé pour la première fois.

Chapitre 3

Présentation de logiciel

Ansys

3.1. Introduction :

La CFD (Computational Fluid Dynamics) est simplement le calcul numérique appliqué à la mécanique de fluides, Cela consiste à résoudre dans une géométrie donnée les équations fondamentales de la mécanique des fluides, que l'on peut éventuellement coupler aux équations de transfert thermique ou de réaction chimique.

3.2. Présentation du logiciel :

ANSYS est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis. Ses produits majeurs sont des logiciels qui utilise la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles préalablement discrétisés. La société possède de nombreuses filiales¹ à travers le monde, notamment en Europe et en Asie.

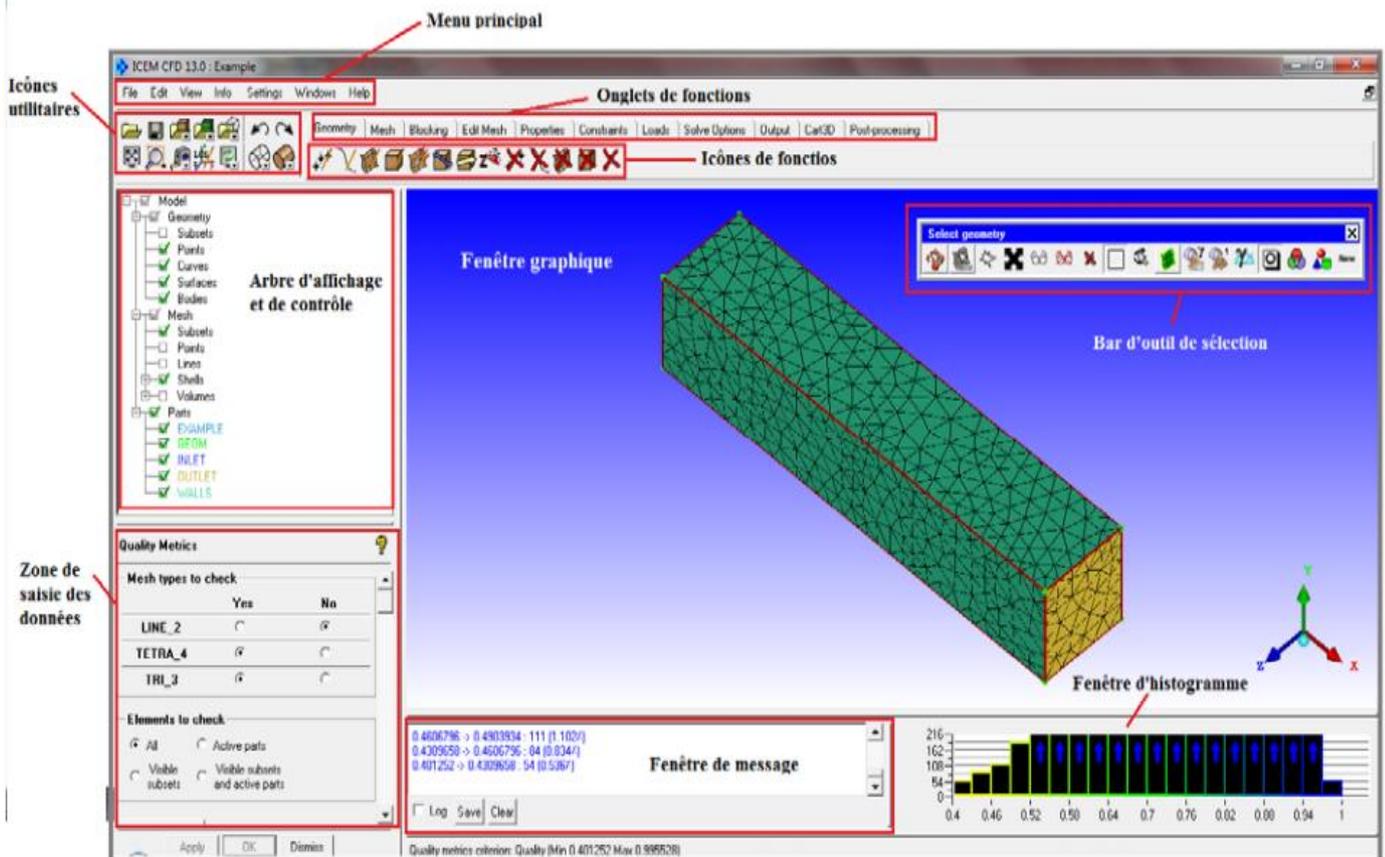


Figure 3. 1: Interface graphique de l'ANSYS

3.2.1. Divers produit d'Ansys :

1. ANSYS Structural : ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures. Ses principales capacités sont :

- L'analyse statique
- L'analyse modale
- L'analyse harmonique (réponse forcée)
- L'analyse temporelle
- La gestion de différentes situations non-linéaires (contacts, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).

2. ANSYS Mechanical : ce produit dispose des mêmes capacités qu'ANSYS structural, en y ajoutant notamment un solveur thermique, avec modélisation du rayonnement.

3. ANSYS CFX et Fluent : ces deux logiciels permettent d'effectuer des simulations en Mécanique de fluide. Ils portent le nom des compagnies qui les ont développés, rachetés par Ansys.

Fluent est un solveur : il ne comporte pas de meilleur (le maillage doit être réalisé avec Logiciel de maillage, Gambit par exemple, qui est également édité par ANSYS).

Fluent : est un solveur très utilisé dans l'industrie à travers le monde.

Il est souvent considéré Comme une référence dans le domaine de la modélisation fluide.

Le paramétrage du modèle se Fait par une interface graphique. Il dispose d'une interface de scripts pour automatiser les Processus de calcul. L'un des intérêts de ce logiciel de simulation généraliste, est qu'il dispose D'un nombre relativement important de modèles, pouvant faire face à divers aspects de la Mécanique des fluides : écoulements diphasiques (miscible, non miscible, cavitation, solidification), turbulence (LES, KE, KW, SA, Reynolds stress) combustion, (pré-mélangé et non pré-mélangé), transport de particules, écoulements en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage, entre autres.

Les schémas numériques temporels et spatiaux peuvent être modifiés pour améliorer la convergence. Fluent est Parallélisé et permet de tirer parti de systèmes multiprocesseurs aussi bien au sein d'une seule Machine qu'en réseau (cluster, dual coré, plateforme multi-CPU).

- Gambit : Un logiciel de maillage édité par la société ANSYS depuis 2006 (l'éditeur historique du logiciel était la société Fluent).
- Ce mailleur permet de créer géométries et maillages avec un grand degré de liberté et une grande précision. Le domaine géométrique peut aussi être importé depuis un fichier CAO. Il assure également le maillage automatique de surfaces et de volumes en parallèle de l'introduction de conditions aux limites. Gambit est souvent considéré comme un mailleur de référence par les modélisateurs utilisant Fluent.

4. ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA : ces logiciels possèdent des solveurs utilisant les formulations explicites des équations à résoudre, contrairement aux produits précédemment cités. Leur domaine d'application est réservé aux modélisations mettant en jeu des situations mécaniques aux très larges déformations.

5. ANSYS Electromagnétiques et An soft : ce produit permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électromagnétiques.

6. ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA : ces logiciels possèdent des solveurs utilisant les formulations explicites des équations à résoudre, contrairement aux produits précédemment cités. Leur domaine d'application est réservé aux modélisations mettant en jeu des situations mécaniques aux très larges déformations.

7. ANSYS Electromagnétiques et An soft : ce produit permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électromagnétiques.

8. ANSYS Multiphasiques : ce produit rassemble l'ensemble des capacités d'ANSYS en matière de simulation numérique implicite.

3. 3 Types de logiciel Ansys :

Deux environnements logiciels permettent de mettre en œuvre le code ANSYS :

.Types de logiciel Ansys
1. ANSYS Structural
2. ANSYS Mechanical
3. ANSYS CFX et Fluent
4. ANSYS classique
5. ANSYS Workbench

Tableau 3. 1: Les Types de logiciel Ansys

3.4. Structure du code ANSYS CFX :

Dans cette partie on va représenter les différentes étapes à suivre pour réaliser une simulation sur Ansys cfx.

3.4.1.CFX-Pre :

CFX-Pre offre une interface moderne, cohérente et intuitive pour la définition des problèmes complexes de CFD. CFX-Pre peut lire plusieurs maillages d'une variété de sources. L'utilisateur est guidé dans la définition physique en se déplaçant le long de la barre d'outils 'Define', qui présente les étapes principales dans la définition du problème. La création et la modification des objets physiques sont présentées par une interface utilisateur avec les panneaux tabulés fournissant l'accès facile aux détails des modèles. La définition en évolution des problèmes est montrée dans le 'Object selector', qui montre les objets principaux qui peuvent être choisis pour accéder à n'importe quelle étape de la définition du problème. Les erreurs qui se produisent pendant la définition ou la modification du problème sont montrées à l'aide d'un codage de couleur dans le 'object selector', ou par l'intermédiaire des messages descriptifs dans le panneau de message physique. Une fois que la définition de problème est complète, il faut exporter un fichier de définition (*.def) vers le module CFX-Solver pour avoir la solution du problème.

3.4.2.CFX-Solver :

Il permet de résoudre les équations de l'hydrodynamique modélisant le problème physique étudié. Toutes les spécifications du problème produites dans le module CFX-Pre sont résolues par CFX Solver pour une erreur bien définie ou un nombre d'itération maximale. Tous les résultats sont stockés dans un fichier (*.res).

3.4.3.CFX- Solver Manager :

Il fournit une interface graphique au CFX-Solver afin de fournir des informations sur l'évolution de la solution et une manière facile de le commander :

- Lancer ou arrêter la simulation avec le solver.
- Modifier certains paramètres dans le fichier de définition.
- Surveiller la progression de la solution avec le solver.
- Lancer une autre simulation en parallèle.

3.4.4 CFX-Post :

Il est conçu pour permettre la visualisation facile et le traitement quantitatif des résultats de simulations. Il dispose d'outils graphiques très puissants permettant la présentation et l'analyse Des résultats en forme :

- Lignes de courant, Champ de vitesse...
- Visualiser différents paramètres définis par l'utilisateur
- Définir et calculer des nouvelles variables
- Exporter les résultats en différent format, pour tracer l'évolution des variables avec d'autres logiciels graphiques.

Chapitre 4

Résultats de simulation numérique

4.1. Démarche d'une simulation numérique :

Une simulation numérique passe par trois étapes principales, à savoir : la préparation, la solution et le traitement des résultats.

1. La Préparation :

Préparation des données du problème (géométrie du domaine de calcul, génération du maillage de discrétisation, définition des phénomènes physiques et chimique du processus, détermination des propriétés du fluide, spécification des conditions aux limites).

La première tâche est de borner le domaine de la simulation, Lorsque le système est fermé (ex: réacteur batch), cela ne pose pas de problème, et L'étape du maillage est une étape clé pour s'assurer de la validité des simulations. C'est l'étape de découpage du volume étudié en petits volumes élémentaires. Le maillage en général n'est pas régulier : les mailles doivent être plus petites (maillage fin) dans les zones où les gradients de vitesse, de température ou de concentration vont être les plus importants.

2. La résolution :

C'est la solution du problème par une méthode numérique, Au niveau des frontières du domaine simulé, certaines variables doivent être fixées, Par exemple s'il y a une entrée de fluide, on fixera sur le plan d'entrée le profil des vitesses, le niveau de turbulence, éventuellement la concentration en espèces et la température. Sur le plan de sortie, on pourra se contenter de fixer la valeur de la pression. Au niveau des parois, on spécifie les conditions de glissement ou d'adhérence du fluide et, éventuellement, la température de paroi ou le flux de chaleur.

3. traitement des résultats :

Visualisation du domaine de calcul et du maillage, tracé des vecteurs de vitesse et des lignes de courant, contours, extractions de surfaces bien définis, manipulation des graphes (Translation, rotation, et redimensionnement), exportation des figures sous format Windows Meta Files(wmf) et pst script (ps).

4.2. Création de la géométrie :

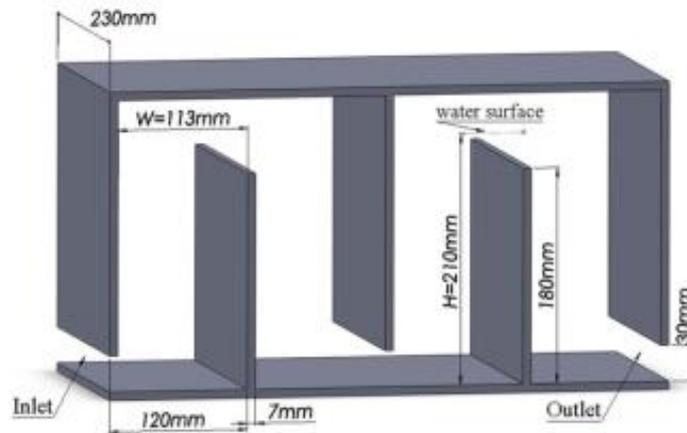


Figure 4. 1: Illustration de la station de désinfection d'eau (le modèle réel).

Système d'unités	Métrique (m, kg, N, s, V, A) Degrés rad/s Celsius
Angle	Degrés
Vitesse de rotation	rad/s
Température	Celsius

Tableau 4. 1: Système d'unités

Boîte englobant (mètre)	
Longueur suivant X	0,487 m
Longueur suivant Y	0,21 m
Longueur suivant Z	0,1 m

Tableau 4. 2: Modèle de géométrie

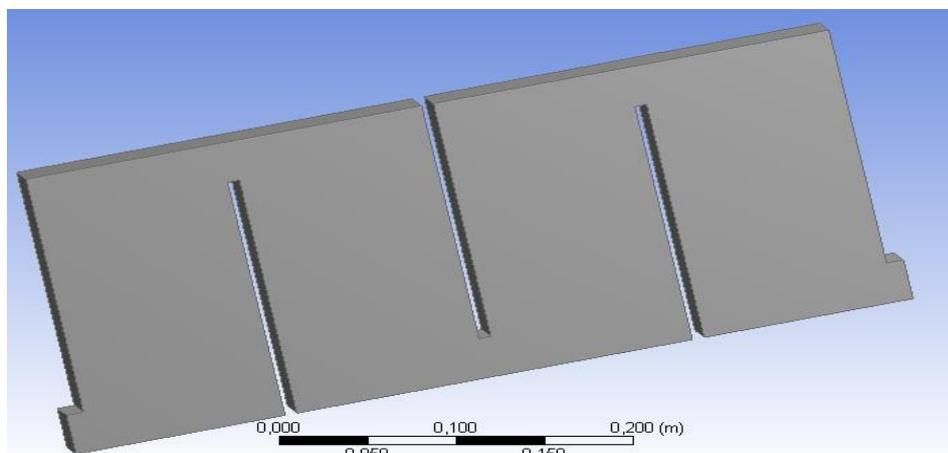


Figure 4. 2: Illustration de la station de désinfection d'eau (modèle utilisée dans cette simulation).

Nous avons créé la géométrie d'une station de désinfection dont la troisième dimension est négligeable afin d'éviter une analyse lourde qui nécessite des ordinateurs puissants.

La figure (4.1) représente le schéma réel et la figure (4.2) représente la géométrie utilisée dans cette étude.

4.3. Choix d'un maillage et discrétisation :

Nous avons utilisé un maillage bien structuré et fortement raffiné pour assurer une meilleure précision de calcul afin d'obtenir des bons résultats.

Statistique	
Volume	9,597e-003 m ³
Nœuds	130786
Eléments	64531

Tableau 4. 3: Le Maillage utilise (statistique).

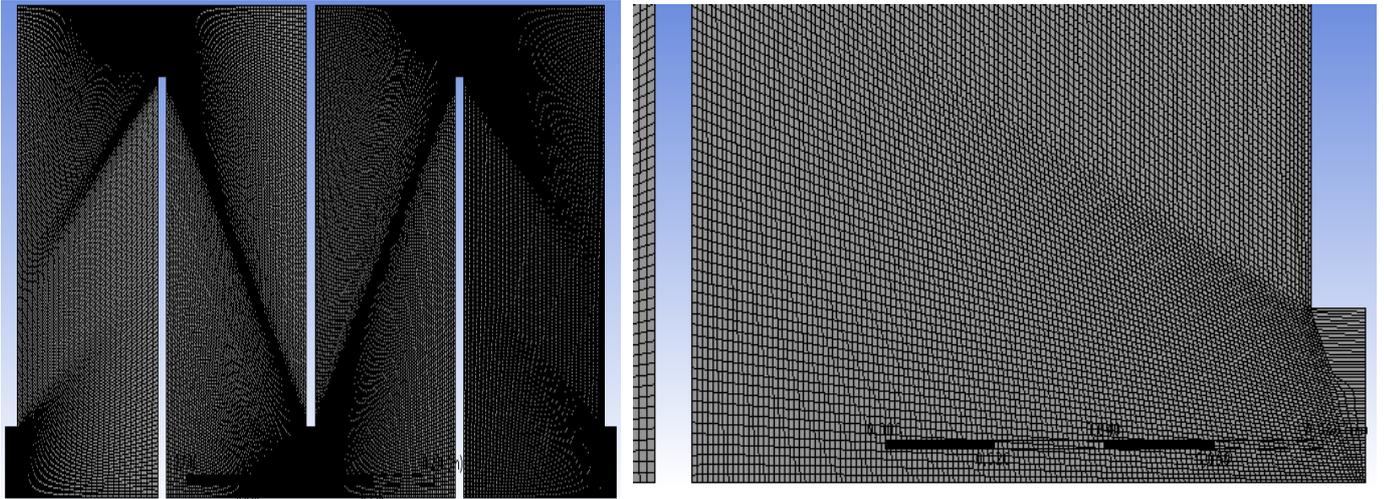


Figure 4. 3: Représentation du maillage utilisée dans cette étude.

4.4. Configuration du modèle :

Nous avons utilisé une analyse stationnaire avec un nombre d'itérations entre deux valeurs minimale et maximale (1-100), l'eau à 20c° a été défini comme domaine de fluide.

L'entrée de fluide est nommée inlet avec une vitesse d'entrée de 30 m/s, la sortie du fluide est nommée outlet dont la pression relative de sortie est égale à (0 Pa).

Les deux plans parallèles (x,y) sont sélectionnés comme des face de symétrie.

Les autres surfaces ceux sont des parois.

les conditions aux limites	Domaine par défaut
Type	Inlet
Pression relative	0 Pa
Régime de flux	Subsonique
Vitesse à l'entrée	30 m/s 40 m/s 50 m/s
Régime d'écoulement	Stationnaire
Modèle d'écoulement	Turbulent

Tableau 4. 4: Les Frontières physiques de domaine par défaut fournée par CFX.

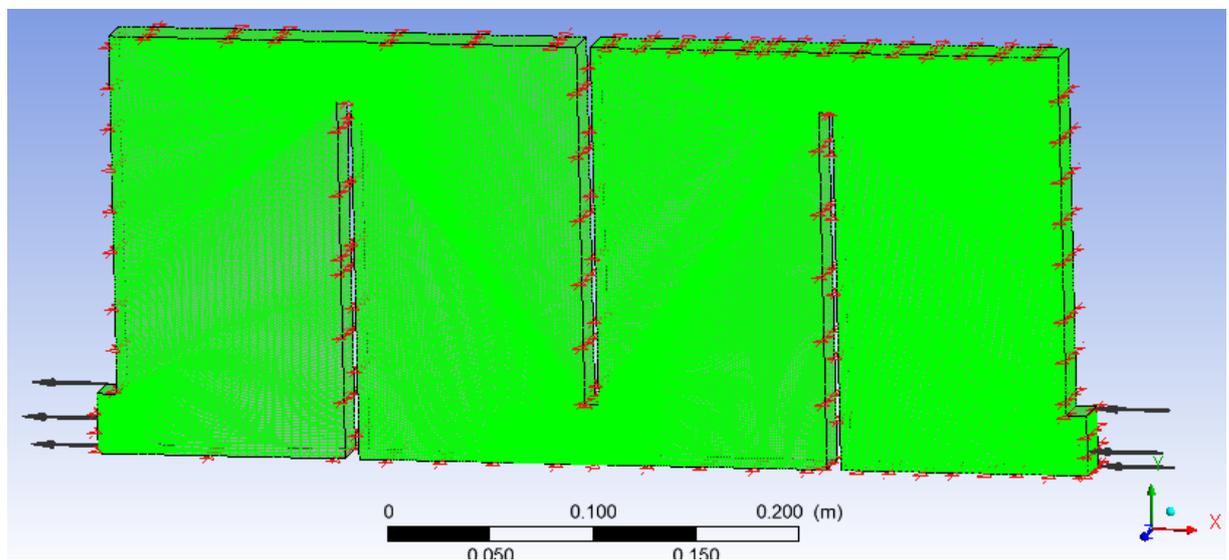


Figure 4. 4: Illustrations de la configuration du domaine physique.

4.5. Résultats et discussions

4.5.1 Validation du modèle numérique

Dans la première étape on essayer de valider notre modèle numérique en comparant ses résultats avec ceux obtenues par (Zhang 2014), dans nous avons étudié les écoulements de l'eau dans la station de purification de l'eau afin de déterminer le débit optimal et ligne de courants au sein de cette station.

Les deux images sur la figure 4.5 représentent les résultats obtenus par notre modèle et ceux obtenus par (Ji [20]), dans cette figure on a constaté que les lignes de courant dans le plan (x,y) sont adéquats, donc on peut dire que notre modèle est validé et confirmé.

Nous avons remarqué que le fluide suit une trajectoire qui est proche aux parois (en rouge). Les centres des chambres ceux sont des zones mortes dont le fluide à des vitesses faibles et les lignes de courants forment des tourbillons circulaires (figure 4.6) ce qui abaisse le rendement de la station de désinfection.

Dans cette figure on a constaté que les lignes de courant dans le plan (x,y) sont adéquats, donc on peut dire que notre modèle est validé et confirmé.

Nous avons remarqué que le fluide suit une trajectoire qui proche aux parois (en rouge).

Les centres des chambres ceux sont des zones mortes dont les fluides à des vitesses faibles et les lignes de courants forment des tourbillons circulaires ce qui abaisse le rendement de la station de désinfection.

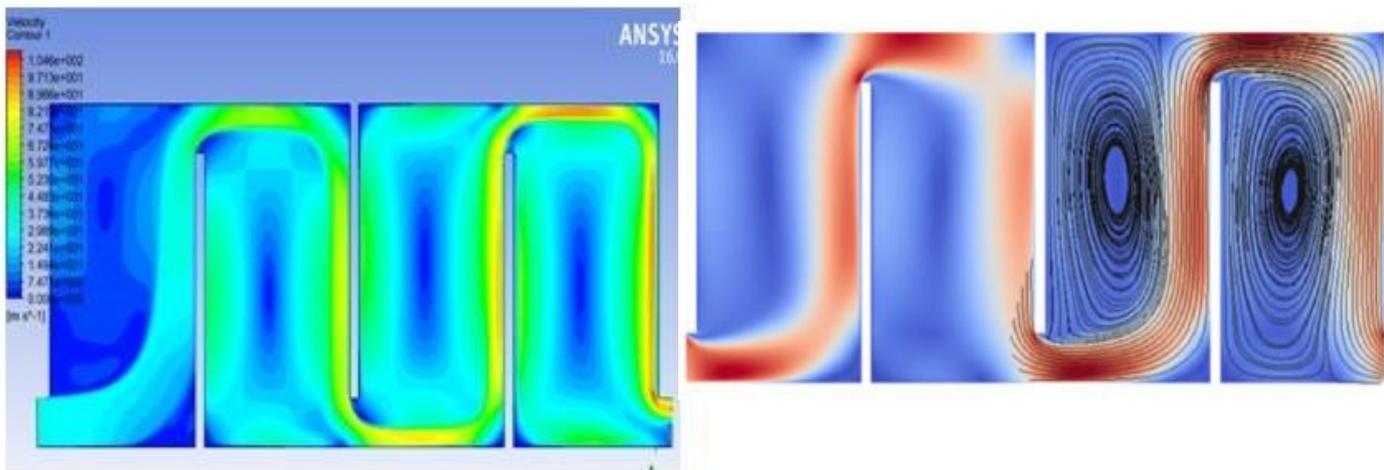


Figure 4.5: Représentation des trajectoires et les vitesses de fluide dans la station de désinfection(à gauche le présent modèle, à droite le modèle de Jie Zhang 2014)

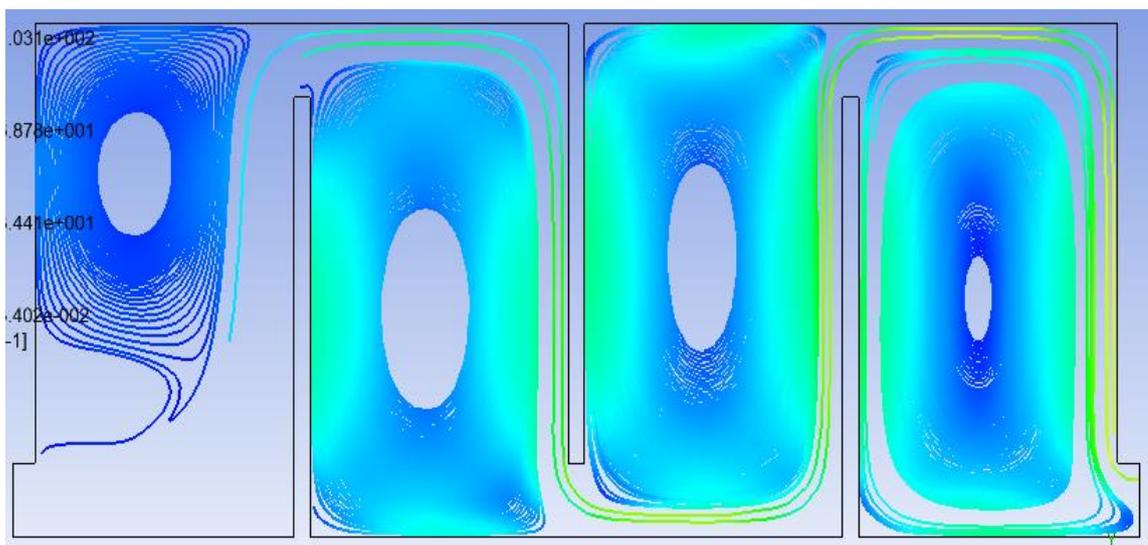


Figure 4. 6: Illustrations des lignes de courant dans la station.

La figure (4.7) représente l'attribution de la pression dans toutes les chambres de la station de désinfection d'eau, dont nous avons constaté que la pression est maximale dans la dernière chambre (6.10^6 Pa) et elle est minimale dans la chambre d'entrée d'eau, ainsi que les valeurs de pression minimales ayant un signe négatif parce que ceux sont des pressions relatives (la pression relative à la sortie est nulle).

On peut signaler aussi que la pression au niveau des centres des chambres est inférieure par rapport à celle au bord des parois et cela contrairement aux valeurs des vitesses.

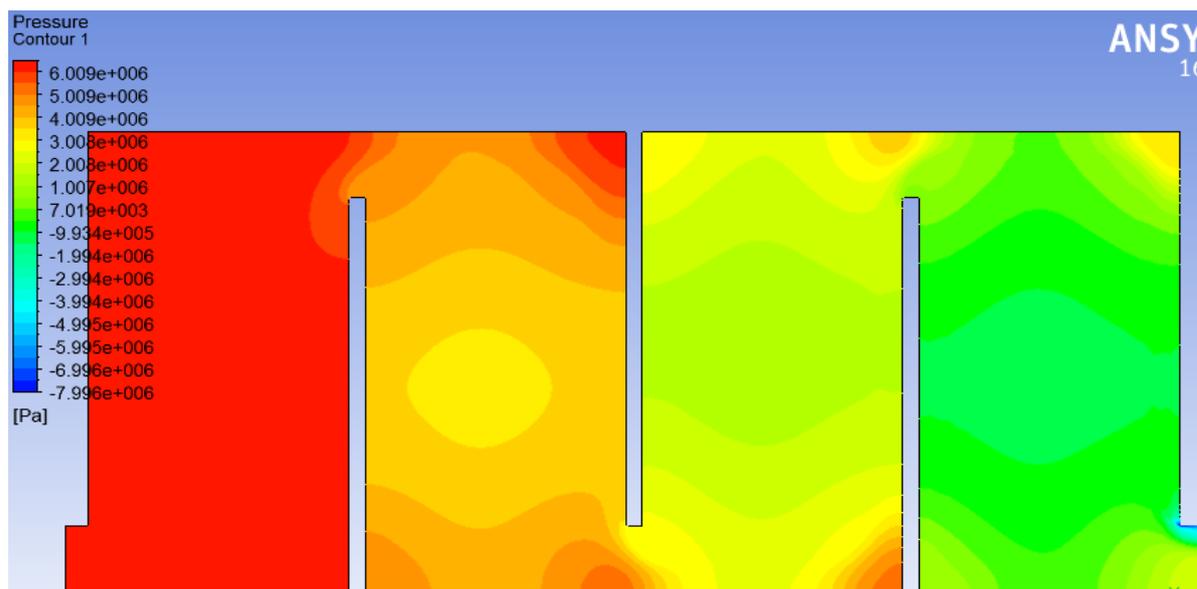


Figure 4. 7: Représentation des champs de pression dans la station.

Dans la deuxième étape on a varié la vitesse d'entrée de l'eau (V_{inlet}), dont nous avons introduire deux vitesse (40 et 50m/s), pour comparer les contours de vitesses entre les trois cas ($v=30, 40$ et 50 m/s) (voir figure 4.8), ces résultat nous a montré que le comportement de l'écoulement entre les trois scénarios est identique, où on peut constaté au centre des chambres la vitesse est minimale, par contre elles élevée dans des zone qui suit un chemin bien définit comme il est indiqué dans ces images.

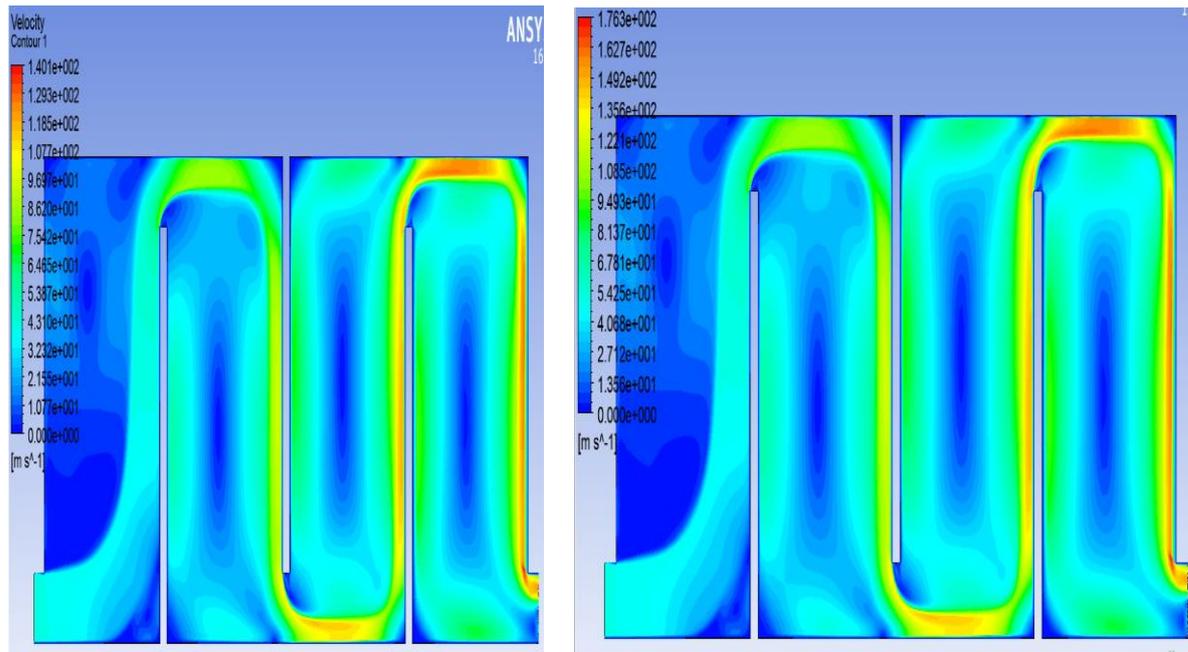


Figure 4. 8: Représentation des trajectoires et les vitesses de fluide dans la station de désinfection (Vinlet = 40 m/s à gauche, Vinlet = 50m/s à droite)

4.5.2. Simulation de l'écoulement du mélange gaz-liquide

Dans cette partie on a crée un modèle numérique pour trouver le comportement de l'écoulement gaz-liquide (eau-air), dans le but de calculer les concentrations de l'air dans chaque zone.

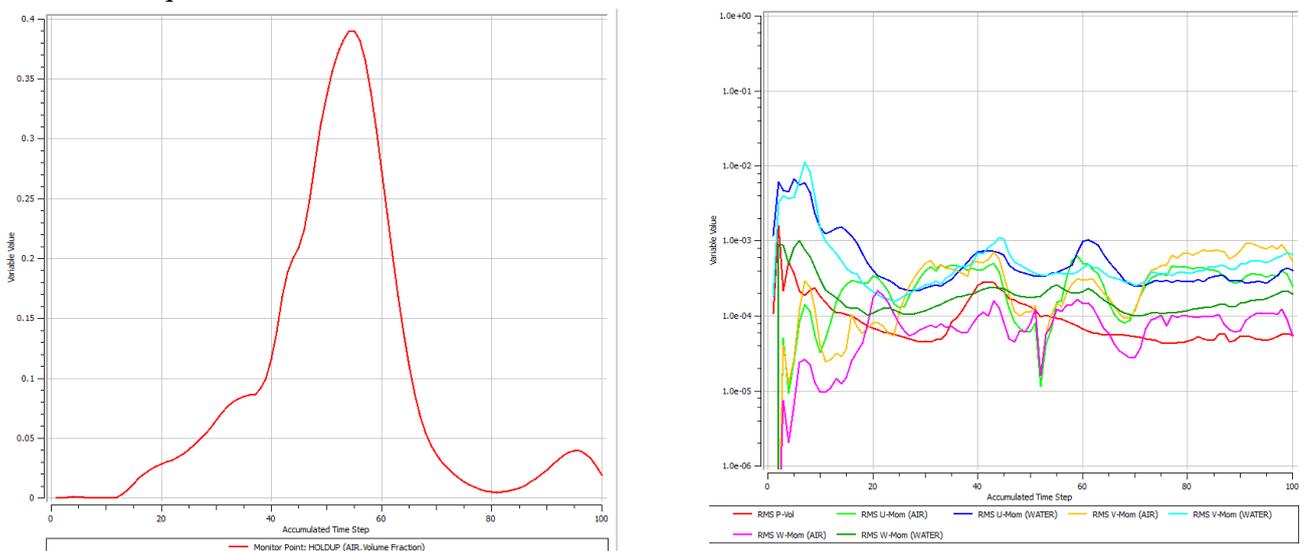


Figure 4. 9: la valeur de la fraction d'ai au cours de la convergence et les processus de la convergence.

La figure ci-dessous (fig.4.10) illustre les contours de vitesse de l'eau dans la station avec une vitesse d'entrée ($V_{inlet}=30m/s$), on peut constater que les trajectoires des particules

d'eau dans la première chambre sont fortement différentes par rapport aux celles des écoulements de l'eau seul, et cela est justifié par la présence du jet d'air, par contre on peut signaler que ces deux trajectoires ayant la même forme dans la dernière chambre de l'eau.

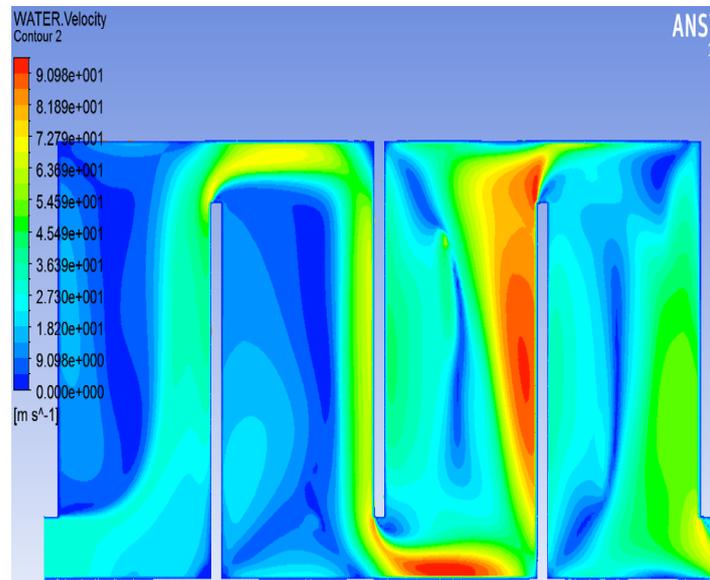


Figure 4. 10: Représentation des trajectoires et les vitesses de fluide dans la station de désinfection (mélange liquide-gaz).

La figure 4.11, représente les contours de vitesses de l'air (l'air est mélangé avec l'eau), on constat que la trajectoire des particules de l'air n'est pas bien définit et la distribution des particules d'air n'est pas homogène, et cela expliquer par l'intervention des particules d'eau. À la sortie de l'air à la dernière chambre on peut constater que les particules d'air ont prend une trajectoire bien définit.

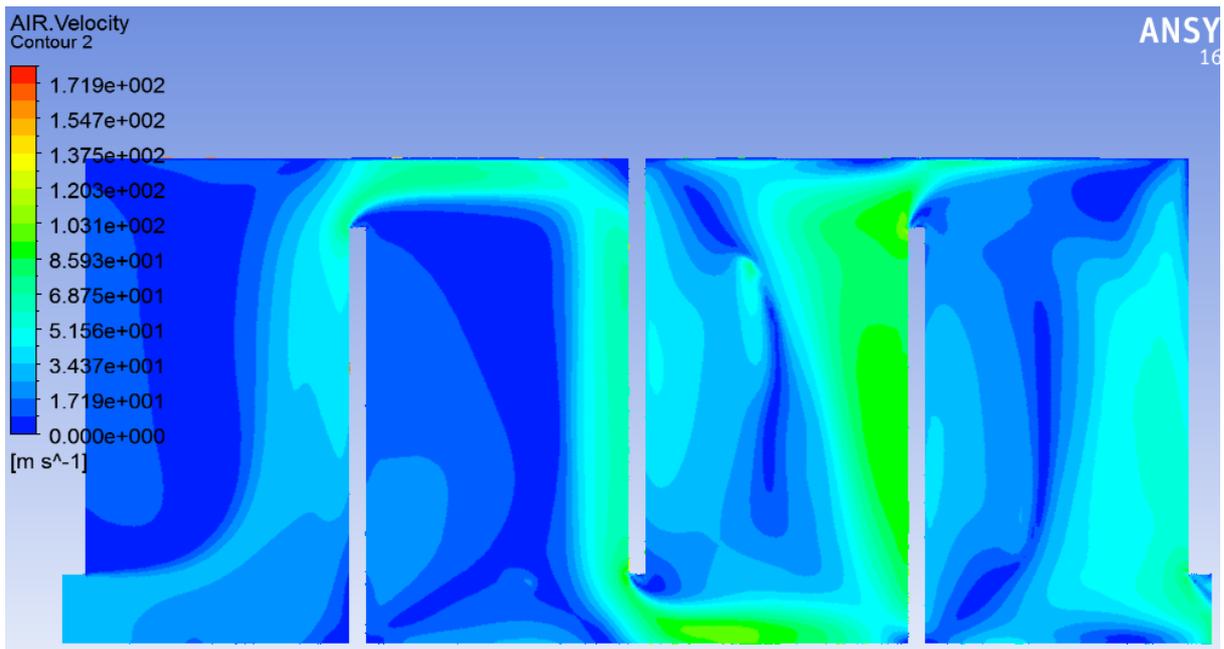


Figure 4. 11: Illustration des contours de vitesses des particules d'air dans l'eau.

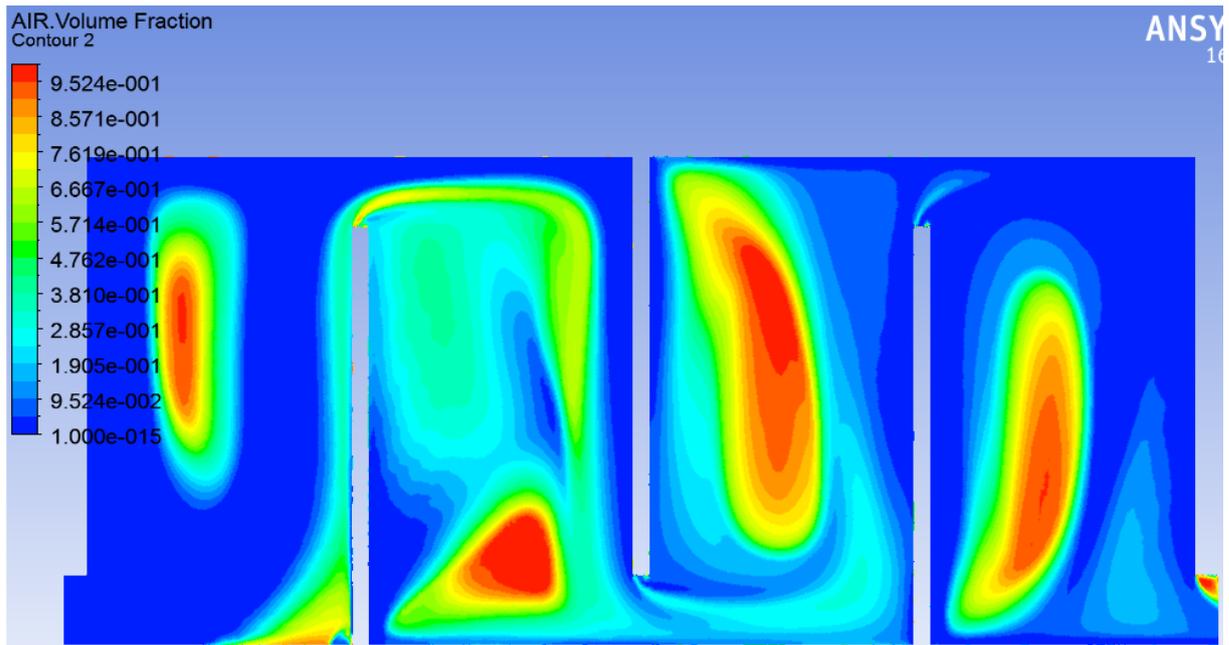


Figure 4. 12: Présentation des fractions d'air dans l'eau.

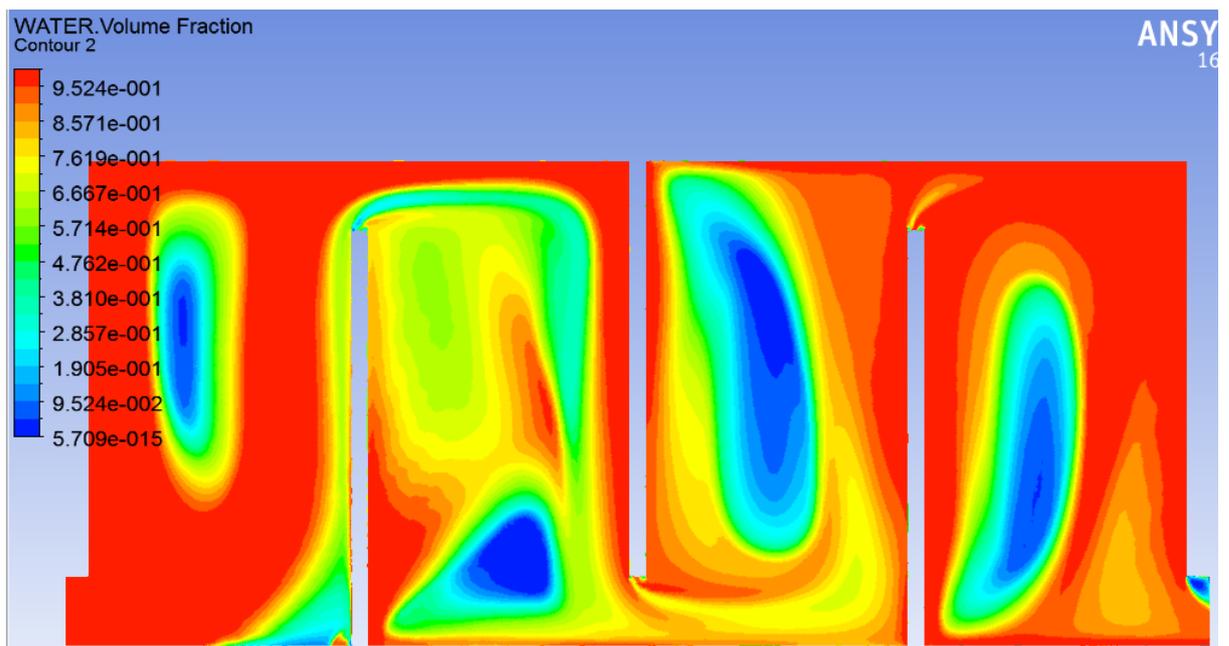


Figure 4. 13: Présentation des fractions d'eau dans la station.

Les figures 4.12 et 4.13, représentent les fractions de l'air dans chaque chambre de la station d'eau et la fraction des particules d'eau respectivement. La distribution des bulles d'air n'est pas homogène dans toutes les zones, dont on peut constater que la concentration des bulles d'air est maximale dans les centres des deux premières chambres, et cela provoque un mélange qui ne répond pas à notre objectif, parce que la trajectoire des particules d'eau ne traverse pas ces zones, donc le procédé de désinfection (dans le cas d'ozone) n'est pas satisfait.

4.6 Conclusion

En résumé on peut conclure que pour le procédé de désinfection soit optimal dans le cas où les particules du gaz désinfectant se trouvent dans la trajectoire des particules d'eau.

Conclusion générale :

Des approches de modélisation ont été utilisées pour prédire l'élimination des agents pathogènes lors de la désinfection réservoirs pendant des décennies, La capacité de prédire l'efficacité hydraulique et de désinfection de l'ozone contacteurs de désinfection est essentiel pour évaluer les contacteurs existants et améliorer les futures conceptions.

Le cadre de modélisation développé dans cette thèse a été appliqué avec succès pour étudier l'efficacité hydraulique et la perte d'énergie dans les configurations de contacteur d'ozone à chicanes et les performances hydrauliques d'un bassin de stabilisation des eaux usées avec des boues.

Il est donc recommandé aux constructeurs/concepteurs d'étangs devraient étudier l'accumulation de boues dans leurs bassins afin de prévoir avec précision les futures performances des bassins via la CFD et ainsi fournir un meilleur guide aux gestionnaires de bassins. Cette approche pourrait être rendue pratique si des études étaient faites pour des configurations d'étang normalisées. CFD peut être étendu à l'étude d'un certain nombre de questions importantes pour la désinfection de l'eau et des eaux usées.

Dans les recherches futures, les sujets suivants sont recommandés :

1. Augmentez l'efficacité de l'utilisation des désinfectants en modifiant les configurations des réacteurs et réorganiser les diffuseurs. Estimez le coût opérationnel pour différents scénarios et trouvez le coût minime.
2. Études sur les coûts/économies d'énergie induite par les approches de désinfection. Désinfection est une technologie énergivore. Par exemple, la désinfection aux ultraviolets (UV) a un forte consommation d'électricité pour l'éclairage UV ; la désinfection à l'ozone à un niveau élevé de consommation d'électricité pour la production d'ozone.
3. Applications aux technologies émergentes de désinfection : désinfection par arc pulsé décharge électro hydraulique.

Référence bibliographique :

- [1] La technologie swimtonic, 2018, L'importance de l'eau pour la vie.
- [2] Zahir BAKIRI, 2007, TRAITEMENT DES EAUX USEES PAR DES PROCEDES BIOLOGIQUES CLASSIQUES : EXPERIMENTATION ET MODELISATION, Magister Génie Chimique, Université Ferhat Abbas Setif.
- [3] Dekhil Soror Wahiba & Zaibet Manel, 2012, Traitement des eaux usées urbaines par boues activées au niveau de la ville de Bordj Bou Arreridj en Algérie effectué par la station d'épuration des eaux usées ONA, Université Mohamed El Bachir Elibrahimi-Bordj BouArreridj.
- [4] Raymond Desjardins, Le traitement des eaux ,1997, Presses inter Polytechnique.
- [5] lenntech (2020). Désinfection ozone.
- [6] Jie Zhang, 2014, Numerical Simulation of Flow in Ozonation Process, thèse de doctorat (page 143), Université de South Florida.
- [7] BOUZLAM, M. Optimisation d'un procédé de traitement des eaux par ozonation catalytique. Sciences et Ingénierie pour l'Information, Mathématiques, Université de Poitiers, LIAS Co-encadrant : Régis OUVRARD Université de Poitiers, LIAS, 2014, 167p
- [8] lenntech.fr/procedes/desinfection/histoire/desinfection/histoire-desinfection-eau.htm
- [9] OMS, 2012, « Utilisation des eaux usées en agriculture », OMS, 254p
- [10] Samuel BAUMONT (2005) : Réutilisation des eaux usées épurées risque sanitaires et faisabilité en Ile-de-France. Rapport d'étude de l'Observation Régionale de Santé de Paris
- [11] <http://www.lms-water.com/solutions/desinfection-de-l-eau/>
- [12] W. H. Glaze, J.-W. Kang et D. H. Chapin : The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation. Ozone Science & Engineering, 9:335–352, 1987.

[13]<https://blog.sofise-filtration.com/industries/toutes-industries/microfiltration-ultrafiltration-et-filtration-sterilisante-quelles-differences>

[14] ANAÏS, P. Action du chlore dans l'eau. (2020).[Photo] In: Méthodologie Chloration directe des points d'eau.

[15] SADOU, D. Application des techniques d'oxydation avancée pour la dépollution des effluents organiques dans les eaux de rejets industriels : cas des savonneries. Chimie minérale. Mécanique des fluides, Energétique et Procédés. Français : Université de Grenoble, 2014, 202p.1.Readmore.

[16]<https://www.suezwaterhandbook.fr/procedes-et-technologies/traitement-des-eaux-potables/filieres-de-traitement-des-eaux-de-surface/la-desinfection>

[17] <https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone>

[18] Ministère de la Santé et des Soins de longue durée du Canada (2008). Procédure de désinfection de L'eau potable en Ontario. Ministère de la Santé et des Soins de longue durée. Disponible à, <http://www.ontla.on.ca/library/repository/mon/23005/292233.pdf>.

[19] BRAVO, A et al. Some aspects of the photocatalytic oxidation of ammonium ion by titanium dioxide. J.Chem. Res, 1993, vol. 9, p.376-377

[20]Chen, C.M. (1998). Modélisation de la désinfection de l'eau potable dans un diffuseur à bulles d'ozone contacteurs (Thèse de doctorat). Disponible auprès de Pro Quest Dissertations & Theses base de données. (numéro UMI 9914465).

[21] Do-Quang, Z., Cockx, A., Line, A., and Roustan, M. (1999). Computational fluid dynamics applied to water and wastewater treatment facility modeling, Environ. Eng. Poll.

