

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ de BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés

Laboratoire des Applications Énergétiques de l'Hydrogène



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE DES PROCEDES

Spécialité : Génie Chimique

Intitulé du mémoire

Prototypage d'un réacteur en spirale pour la désinfection de l'eau

Présenté par :
FARAI A T Manuel

Encadré par :
Dr. S Soukane
Pr. W Naceur

Année universitaire 2017/2018

REMERCIEMENTS

En préambule à ce mémoire je remercie Dieu qui m'a aidé et donné la patience et le courage durant ces années d'études universitaires.

Je remercie mes encadreurs, le Dr. Soukane Sofiane et Professeur Naceur Wahib pour leurs conseils scientifiques et pour avoir accepté la tâche de superviser et soutenir ce travail de recherche. Votre patience et vos connaissances m'ont énormément aidé et je vous en remercie.

Je remercie Ingénieur Rachid et également le département mécanique et Madame Karima au niveau des ateliers mécaniques qui m'ont permis de construire le prototype de réacteur. Je remercie en particulier mon compatriote Kudakwashe Kawanzaruwa pour son aide et son encouragement.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Je remercie ma famille pour son soutien.

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

I dedicate this modest work to:

To my Father Mr Farai and Mother Mrs. Farai in her absence. No tribute could live up to the love of which they never stop filling me. And to my Father, may God give him a good health and long life.

To whom I love my brothers (Tatenda Farai and Shingirai Farai)
and my sisters (Aminah Farai and Shungurudzai Farai)

To all my family, and my friends,

To the people who have always helped and encouraged me, who were always at my side, and who accompanied me during my path of graduate studies, my kind friends, study colleagues, and Brothers (Kudakwashe, Joka Talent, Kelvin Goso, Tatenda Zhou and Livingstone Gazana)

ملخص

لقد قادنا وجود المادة العضوية (OM) بكميات كبيرة في المياه السطحية إلى اقتراح مفاعل اتصال تعقيم مياه الشرب. هذا المفاعل ، من خلال هندسته اللولبية ، يزيل وجود حلقات إعادة تدوير وتشكيل مناطق ميتة.

قمنا بتصميم نموذج أولي مع ضمان التشابه بين المعامل والمقاييس الصناعية من خلال تطبيق نظرية تشابه Buckingham. أثناء معالجة المياه بالكور من أجل تعطيل الميكروبات ، فإن أي وجود للمناطق الميتة يفضل التفاعل مع OM ، مما يؤدي إلى تكوين منتجات ثانوية سامة (SPC) للبشر. ومن بين هذه المنتجات أساسا trihalomethanes (THM) والأحماض haloacetic (HAA).

يتضمن هذا العمل تصميم وتصنيع مفاعل تطهير المياه الحلزونية النموذجية. وقد ثبت هذا التصميم عددًا جدًا بالقرب من مفاعل المكبس. هذا سوف يظهر تجريبيًا في هذا العمل.

RESUME

L'existence des matières organique (MO) en quantités importantes dans les eaux de surface nous a conduit à proposer un réacteur de contact de désinfection d'eau potable. Ce réacteur, par sa géométrie en spirale, élimine la présence de boucles de recirculation et la formation de zones mortes.

Nous avons conçu un prototype tout en assurant une similitude entre les échelles laboratoire et industrielle par application du théorème de similitude de Buckingham. Au cours du traitement des eaux par chloration dans le but d'inactiver les microbes, toute présence de zones mortes favorise les réactions avec les MO, menant à la formation de sous-produits chlorés (SPC) toxiques pour l'êtres humains. Parmi ces produits on note principalement des trihalométhanes (THM) et des acides haloacétiques (HAA).

Ce travail consiste à concevoir et fabriquer un prototype de réacteur de désinfection de l'eau en spirale. Cette conception a été prouvée numériquement très proche de celle d'un réacteur piston. Ce qui sera démontré expérimentalement dans ce travail.

Mots clés : Désinfection, eau potable, similitude, conception, réacteur

ABSTRACT

The existence of significant amount of organic matter (OM) in surface water has led us to propose a contact reactor for the disinfection of drinking water. This has a geometry that does not favor stagnant fluid regions.

For an existing industrial scale reactor, a design of a prototype was carried out ensuring a similarity between the scales by application of the Buckingham theorem. During water treatment by chlorination, in order to inactivate the microbes, the existence of dead zones results in reactions with the organic materials, leading to the formation of chlorinated by-products (SPC) known as carcinogenic and toxic for human beings. Among these products are trihalomethanes (THM) and haloacetic acids (HAA).

This work consists of the designing and fabrication of a spiral reactor prototype for water disinfection, after which we proceed with a hydrodynamics analysis to identify the type of flow exhibited by the new geometry. This is done experimentally by analyzing the behavior of a tracer in the spiral design.

Key words: Disinfection, drinking water, similarity, design, reactor

TABLEAU DES MATIERES

REMERCIEMENTS

RESUME

LISTE DES SYMBOLES

LISTE DES ABRÉVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I EXIGENCES DE DÉSINFECTION : ANALYSE GÉOMÉTRIQUE ET SIMILITUDE 1

I.1	La désinfection de l'eau potable	2
I.2	Les techniques majeures	2
I.2.1	La chloramination	2
I.2.2	L'ozonation	3
I.2.3	La désinfection par le dioxyde de chlore	3
I.2.4	La désinfection à la lumière ultraviolette	3
I.2.5	La désinfection au chlore	4
I.3	Les réacteurs de désinfection au chlore	5
I.4	Base d'analyse de Géométrie et Similitude	7
I.5	Similitude	8
I.5.1	Similarité géométrique.....	8
I.5.2	Similarité cinématique	8
I.5.3	Similarité dynamique.....	9
I.5.4	Application de l'analyse dimensionnelle	9

I.5.5	Détermination des variables.....	10
I.5.6	Les variables	10
I.5.7	Détermination des termes P_i	10
CHAPITRE II	CINÉTIQUES DE LA RÉACTION DE DÉSINFECTION.....	11
II.1	La désinfection au chlore	12
II.1.1	La réaction de désinfection	12
II.2	Les modèles cinétiques	12
II.2.1	Le modèle de Chick–Watson.....	12
II.3	Cinétique de désinfection dans les réacteurs non idéaux avec circulation.....	13
II.4	Conception minimisant la dispersion dans les contacteurs de désinfection.....	14
II.5	Description et analyse d'écoulement	14
CHAPITRE III	ÉLÉMENTS DE CONCEPTION DU PROCÉDÉ DE CHLORATION ...	15
III.1	Notion de courbe de traceur pour les réacteurs idéaux : courbes E et F	17
III.2	Utilisation de traceurs pour les réacteurs idéaux :	18
III.2.1	L'injection pulsée	19
III.3	Le temps de séjour	20
III.3.1	La moyenne et la variance :	20
III.3.2	Temps de contact et efficacité hydraulique	21
CHAPITRE IV	CONCEPTION DU MODELE	22
IV.1	Hydrodynamique du réacteur de désinfection.....	23
IV.1.1	Les nombres adimensionnels	23
IV.1.2	Écoulement à surface libre.....	24
IV.2	Description du réacteur à l'échelle réelle.....	24
IV.3	Conception du réservoir en spirale d'Archimède	25

IV.4	Similitude Totale.....	26
IV.4.1	Similitude Géométrique.....	27
IV.4.2	Similarité cinématique et dynamique	28
IV.4.3	Minimisation de la section d'écoulement :	29
IV.4.4	Minimisation de la surface du réacteur :	31
IV.4.5	Sommaire des résultats d'optimisation.....	35
IV.4.6	La conception du réacteur en spirale :	35
IV.5	Mode Opérateur	36
IV.5.1	Injection Impulsion.....	36
IV.5.2	Injection échelon.....	37
IV.6	Résultats et discussion.....	37
IV.6.1	Injection impulsion (fonction Dirac)	37
IV.6.2	Injection échelon.....	43

CONCLUSION GÉNÉRALE

RÉFÉRENCES

APPENDICE

LISTE DES SYMBOLES

$b, \Delta r$	-	la largeur (Base)	(m)
d	-	Numéro de dispersion décrire la dispersion dans le réacteur. Pour un PFR idéal, $d = 0$. Pour un CMFR idéal, $d = \infty$	(Sans Unité)
D	-	Coefficient de diffusion	(m^2/s)
D_h	-	Diamètre Hydraulique	(m)
g	-	Accélération de la pesanteur	(m/s^2)
K	-	Facteur de conversion entre les unités SI et anglais	(-)
k	-	Constante de Vitesse	
N	-	Représente nombre de microbes à la fin d'opération :	
N°	-	Représente le nombre de microbes initial	
Q	-	Débit d'écoulement	(m^3/s)
R_h	-	Rayon Hydraulique	(m)
$S(\alpha)$	-	Distance parcouru par le liquide dans le réacteur.	(m)
t_h, τ	-	Temps de résidence hydraulique théorique ($\tau = t_h = V/Q$)	(s)
\bar{t}	-	Temps de séjour moyen	(s)
t_{10}, t_{50}, t_{90}	-	temps à laquelle 10, 50, et 90% de la traceur a traversé le réacteur ou lorsque 10, 50, et 90% du fluide a traversé le réacteur.	(s)
V	-	Vitesse d'écoulement	(m/s)
V_{acc}	-	Volume accessible de Réacteur, (m^3)	
$V_{reacteur}$	-	Volume de Réacteur	(m^3)
Vol	-	Volume	(m^3, L)
y	-	la hauteur de l'eau dans le canal	(m)
σ_θ^2	-	comme étant la variance, sous forme adimensionnelle	

Re	-	Nombre de Reynolds	(Adimensionnelle)
Pe	-	Nombre de Peclet	(Adimensionnelle)
Fr	-	Nombre de Froude	(Adimensionnelle)
θ	-	Temps de séjour normalisé ($t/\bar{t} \approx t/\tau$)	(Adimensionnelle)
$\theta_{10}, \theta_{50}, \theta_{90}$	-	Temps de séjour normalisé auquel 10, 50, et 90% de la traceur a traversé le réacteur ou lorsque 10, 50, et 90% du fluide a traversé le réacteur.	(Adimensionnelle)
θ_{90}/θ_{10}	-	Indice Morrill de dispersion	(Adimensionnelle)
ρ	-	masse volumique de l'eau	(kg/m^3)
μ	-	Viscosité dynamique de l'eau	($kg\ m/s^2$)

LISTE DES ABRÉVIATIONS

CT	-	concentration de désinfectant multipliée par le temps de contact
HAA	-	halo-acétiques acide
MED	-	Le modèle à écoulement dispersé
MES	-	le modèle à écoulement séparé
MO	-	matières organique
UV	-	La lumière ultraviolette
SPC	-	sous-produits chlorés
THM	-	tri-halo-méthanes

LISTE DES FIGURES

Figure 1- 1 Utilisation de désinfectants de l'eau potable municipale aux États Unis[1].....	4
Figure 1- 2[1] Réacteurs typiques utilisés dans les procédés de traitement de l'eau: a) réacteur discontinu; (b) un réacteur mélangé à flux continu; c) réacteurs mixtes à flux continu en série, également appelés réservoirs en série; (d) un réacteur à écoulement à bouchon à canal rectangulaire; e) un réacteur à écoulement tubulaire circulaire; (f) un réacteur à écoulement piston à configuration serpentine; g) Réacteur à flux descendant à lit tassé; h) le réacteur à flux ascendant à lit tassé; et (i) le réacteur à flux ascendant à lit expansé[1].....	6
Figure 1- 3 Les deux modèles d'écoulement les plus simples [9].....	7
Figure 1- 4 Illustration de la similitude complète[11]	10
Figure 2- 1 Écoulement tubulaire a des différents instants[1].	14
Figure 2- 2 Visualisations de écoulements à travers des réacteurs (a) Dans le réacteur en spirale [3] (b) Système général [9]	14
Figure 3- 1 Méthodes d'injection de traceur [9].....	16
Figure 3- 2 Courbe E(t). Présentation des résultats d'une expérience hypothétique évaluant le passage de molécules à la sortie du réacteur.....	17
Figure 3- 3 Courbe F(t). Présentation des résultats d'une expérience hypothétique évaluant le passage de molécules à la sortie du réacteur[13].....	18
Figure 3- 4 Types d'écoulement existant dans les réacteurs.....	19
Figure 3- 5 Sortie typique pour une entrée d'impulsion.....	19
Figure 4- 1 Réservoir de désinfection de l'usine de Boudouaou (Alger Est, Algérie) [3]	25
Figure 4- 2 Conception en spirale d'Archimède : (a) vue de dessus et (b) vue en trois dimensions	25
Figure 4- 3 Introduction de la fonction objectif et des contraintes sur Excel	32
Figure 4- 4 La fiche Excel avant appel du solveur non-linéaire	33
Figure 4- 5 Introduction des contraintes au logiciel Excel	33

Figure 4- 6 Paramètres de Solveur Excel.....	34
Figure 4- 7 Les résultats de l'optimisation par le solveur non-linéaire	34
Figure 4- 8 La réacteur spiralé : vue de dessus	36
Figure 4- 9 Injection impulsion au centre de réacteur alimenté par une débit fixe choisir.....	36
Figure 4- 10 Injection échelon au centre de réacteur alimenté par une débit fixe choisir	37
Figure 4- 11 Courbe fonction Dirac pour un injection impulsion manipulation	39
Figure 4- 12 Courbe de réponse de traceur pour une injection impulsion à débit élevé.....	43
Figure 4- 13 Courbe de réponse de traceur pour une injection échelon	44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1- 1 Caractéristiques des cinq désinfectants les plus courants[1].....	5
Tableau 4- 1 Les paramètres physiques utilisés et leurs dimensions.....	27
Tableau 4- 2 Résultats de Manipulation impulsion à $Q = 3.60 \times 10^{-04} m^3/s$ (360mLs)	38
Tableau 4- 3 Résultats de l'injection impulsion à $Q = 3.60 \times 10^{-04} m^3/s$ (étude de la dispersion).....	39
Tableau 4- 4 Représentation des temps adimensionnels pour $Q = 4.74 \times 10^{-04} m^3/s$	40
Tableau 4- 5 Représentation des temps adimensionnel pour $Q = 3.60 \times 10^{-04} m^3/s$	40
Tableau 4- 6 Paramètre Mathématique (Indice de Morril).....	40
Tableau 4- 7 Résultats de manipulation pour une injection impulsion à débit élevé	41
Tableau 4- 8 Résultats de Manipulation impulsion à $Q = 4.74 \times 10^{-04} m^3/s$ (étude dispersion).....	42
Tableau 4- 9 Résultats de Manipulation Échelon à $Q = 3.60 \times 10^{-04} m^3/s$ (360mLs)...	43

Introduction Générale

Le processus de désinfection de l'eau joue le rôle de désactivant des agents pathogènes contagieux présents dans l'eau potable, dans le but de protéger le consommateur contre les maladies hydriques. Durant le processus de désinfection, des agents chimiques et/ou des agents physiques sont utilisés[1]. Parmi les agents chimiques existants on compte le chlore et ses dérivés, le brome, l'iode et l'ozone. Les agents physiques comprennent la chaleur, la lumière ou la séparation par microfiltration. Le temps de contact et la concentration de l'agent désinfectant sont les deux principaux paramètres influençant l'efficacité de l'inactivation durant le processus de désinfection, même si la température et le pH sont également connus pour jouer un rôle.

Le chlore avec son dérivé, acide hypochloreux (HOCl), sont communément utilisés pour la désinfection des eaux et le traitement des eaux usées. Dans le cas de la désinfection par le chlore, le processus de désinfection est favorisé par le maintien d'un pH bas. Cependant, la dégradation de HOCl pour former de l'oxygène et de l'acide chlorhydrique (HCl) se produit de façon inappropriée à de faibles valeurs de pH (inférieures à 6)[2].

Le temps requis pour une désinfection efficace est de 30 minutes ou plus, ce qui est connu sous le nom de temps de contact. Étant donné que la dégradation inadaptée du chlore est plus importante au fur et à mesure que le temps de contact progresse, un compromis existe pour maintenir une désinfection efficace tout en évitant la décomposition du chlore[2].

Quel que soit le moyen de chloration utilisé, par exemple le chlore gazeux, il est introduit à l'entrée du réservoir de contact. Les réservoirs de contact sont conçus pour donner un écoulement piston avec un temps de résidence de 20 à 60 minutes [2]. Il a été montré numériquement que la conception en spirale était d'une efficacité supérieure grâce à l'élimination des court-circuit lors de l'écoulement et une nette amélioration de la dispersion, surpassant ainsi les réservoirs à géométrie conventionnelle[3].

L'inactivation dépend des propriétés de chaque micro-organisme, du désinfectant et de l'eau. Il a été remarqué que les cinétiques des réactions peuvent changer d'un organisme à l'autre, même pour un même désinfectant. Alors la désinfection pourrait être modélisée être modélise par la loi de Chick (Chick 1908).

L'utilisation de l'analyse dimensionnelle est basée sur l'idée d'avoir les mêmes dimensions pour les termes d'une équation physique [4]. Le théorème de Buckingham Pi publié en 1914 [5] est largement associé à l'analyse dimensionnelle. Cette dernière, en conjonction avec le théorème de Pi aidera à déterminer le nombre et la forme des groupes sans dimension qui décrivent le système fluide en question [4]. Grâce l'analyse dimensionnelle on peut avoir une similitude des différentes échelles définit.

L'évaluation des conditions d'écoulement dans un réacteur s'effectue par l'introduction d'une espèce chimique conventionnelle appelée traceur. Pour comparer la performance hydraulique d'un réacteur continu au modèle piston, un traceur est introduit dans le réacteur et sa concentration est ensuite observée et interprétée à la sortie.

Ce travail s'inscrit dans la suite des travaux numériques sur la conception en spirale, par un essai de calcul et de conception d'un modèle réduit, afin de vérifier expérimentalement le comportement du fluide dans ce type de géométrie[3].

CHAPITRE I EXIGENCES DE
DÉSINFECTION : ANALYSE
GÉOMÉTRIQUE ET SIMILITUDE

I.1 La désinfection de l'eau potable

La désinfection est l'opération de désactivation de pathogènes. De nos jours, l'exigence est faite sur le traitement efficace de l'eau pour réduire les contaminants microbiologiques. La protection et le traitement des sources sont de plus en plus utilisés pour assurer la production et l'approvisionnement en eau potable en améliorant l'intégrité du système de distribution afin d'éliminer les contaminations pendant le transport jusqu'au consommateur [1].

I.2 Les techniques majeures

Plusieurs techniques de désinfection existent. Celles-ci se différencient par l'élément désinfectant. Les plus communes étant [1] :

1. La chloramination.
2. L'ozone.
3. La désinfection au dioxyde de chlore.
4. La désinfection par lumière ultraviolette.
5. La désinfection au chlore.

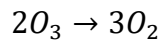
Les composés chlorés, les chloramines où l'ozone, sont définis comme des oxydants chimiques. L'application de ces composés sert à la désinfection contre les organismes pathogènes grâce à leur aptitude à inactiver les cellules microbiennes par diverses voies chimiques. Toutefois, leur utilisation intervient aussi dans le contrôle des odeurs et du goût [2]. Lors de l'application de désinfectants, il est important de prendre en compte les données sur le CT (concentration de désinfectant multipliée par le temps de contact) pour chaque désinfectant spécifique[6].

I.2.1 La chloramination

L'odeur et la saveur de l'eau ont été améliorés avec l'introduction de la chloramination, une technique qui utilise des chloramines, des composés formés par la réaction du chlore Cl_2 avec l'ammoniac NH_3 . Comparée à la chloration, elle présente une progression lente de la désinfection, ce qui ne permet pas toujours d'obtenir des traitements de qualité. L'utilisation de la chloramination pour les eaux polluées et comprenant des eaux contenant des matières colorantes organiques naturelles, peut entraîner la production de traces de chloroforme et de trihalométhanes connus pour être cancérigènes [7].

I.2.2 L'ozonation

Cette technique, au-delà de ces performances de désinfection, peut être utilisée pour éliminer les odeurs et améliorer le goût de l'eau. Elle peut aussi contrôler le fer, l'oxydation du manganèse tout en éliminant les produits organiques[8]. La forte action désinfectante et oxydante de l'ozone est due à la libération du troisième atome d'oxygène très réactif avec retour à l'oxygène O₂ par :

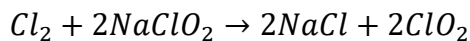


R 1- 1

L'ozone peut être produit sur site à partir de l'oxygène. Dans le cas de production commerciale à grande échelle, il est produit à partir de l'air. L'ozone disparaît très rapidement de l'eau et il n'est donc pas possible de maintenir un résidu actif comme c'est le cas avec la chloration.

I.2.3 La désinfection par le dioxyde de chlore

Cette technique est souvent utilisée comme désinfectant pour les eaux de surface avec des problèmes d'odeur et de goût. Cette technique est différente de la chloration par sa chimie. Le dioxyde de chlore est produit par un mélange d'une solution de chlore et une solution de chlorite de sodium par la réaction suivante :



R 1- 2

Grâce à sa capacité de dissociation partielle, le dioxyde de chlore se réduit au chlorite (ClO₂⁻), ce qui résulte en une capacité d'oxydation incomplète où un cinquième du chlore reste disponible. C'est pour cette raison que le chlore reste préféré par rapport au dioxyde de chlore à l'exception des cas de phénols où le dioxyde de chlore est plus performant.

I.2.4 La désinfection à la lumière ultraviolette

La lumière ultraviolette (UV) inactive les micro-organismes par des réactions avec les acides nucléiques microbiens. Comparée au chlore, elle est particulièrement efficace pour lutter contre le Cryptosporidium [1]. Le court-circuit reste une préoccupation majeure pour les réacteurs UV, et la désinfection par la lumière ultraviolette est généralement utilisée dans les réacteurs pistons brevetés, avec des temps de contact courts [1]. Toutefois, il reste à noter que la désinfection par UV ne fournit pas de désinfectant actif résiduel dans l'eau.

I.2.5 La désinfection au chlore

La désinfection au chlore est devenue le processus de traitement de l'eau le plus important. Ceci est dû à la garantie de sécurité microbiologique par les autorités de santé tant qu'il y a présence de chlore résiduel libre dans l'eau du robinet [1]. Cela a conduit le chlore à être l'oxydant le plus utilisé pour le traitement de l'eau. Il est fourni sous pression sous forme de gaz liquéfié (Cl_2) ou d'hypochlorite de sodium (eau de Javel) contenant environ 13% de Cl_2 disponible ou sous forme d'hypochlorite de calcium solide (eau de javel ou poudre décolorante) contenant 30% de chlore actif [1]. Les désinfectants au chlore mentionnés sont privilégiés car ils éliminent la contamination bactérienne au niveau du consommateur en raison de leur capacité à former des résidus qui restent dans l'eau pendant des durées prolongées, assurant ainsi la qualité de l'eau. Toutefois, le chlore n'est pas efficace contre le *Cryptosporidium*.

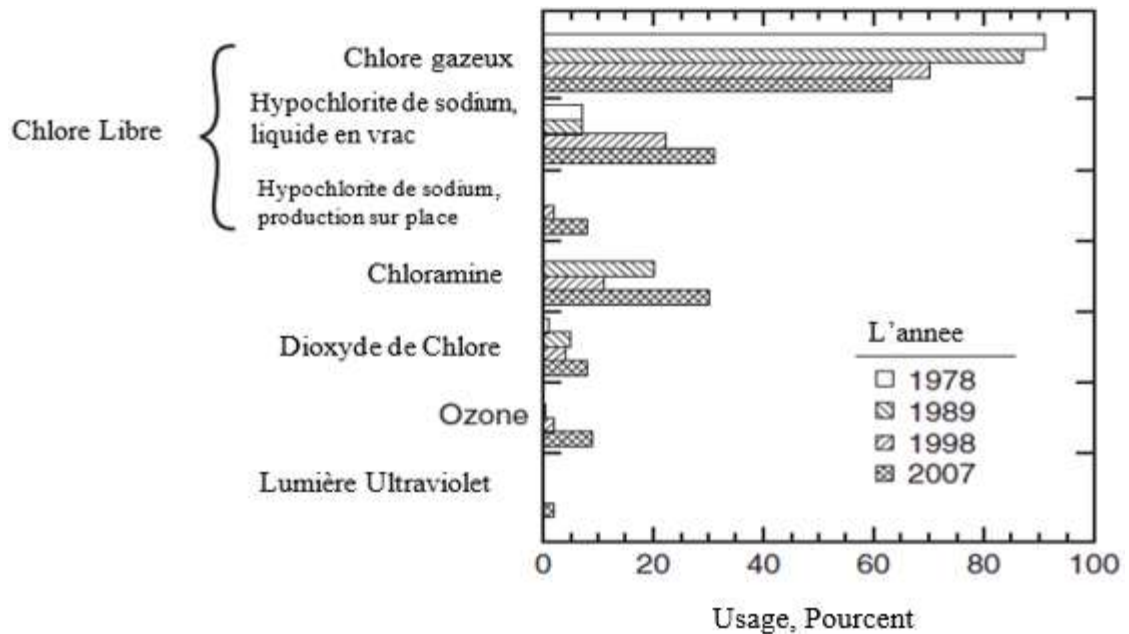


Figure 1- 1 Utilisation de désinfectants de l'eau potable municipale aux États Unis[1]

Tableau 1- 1 Caractéristiques des cinq désinfectants les plus courants[1]

Désinfectant Utilisé					
	Chlore	Chlore Combiné	Dioxyde de Chlore	Ozone	Ultraviolet
Efficacité dans la désinfection des :					
Bactéries	Excellent	Bien	Excellent	Excellent	Bien
Virus	Excellent	Juste	Excellent	Excellent	Juste
Protozoaires	Juste à Mauvaise				Excellent
Endospores	Bien à Juste				Juste
Limite réglementaire sur les résidus	4mg/L	4mg/L	0.8mg/L	-	-
Formation de sous-produits chimiques :					
Sous-produits contrôlé	Formulaires 4 trihalométhanes (THM) et 5 Acides haloacétiques (HAA)	Traces de THM et HAA	Chlorite	Bromate	Aucun
Sous-produits pouvant être réglementés à l'avenir	Nombreuses	Halogénures de cyanogène N-nitrosodiméthylamine (NDMA)	Chlorate	Carbone organique biodégradable	Aucun connu

I.3 Les réacteurs de désinfection au chlore

Les procédés de traitement des eaux sont effectués dans une variété de réacteurs de différentes géométries. Ces dernières ne sont pas limitées aux grands bassins carrés, rectangulaires où aux réservoirs cylindriques et longs canaux, mais peuvent être améliorés pour obtenir un rendement

hydraulique supérieur. Une conception optimale n'est atteinte qu'avec une connaissance de la cinétique chimique des réactions ayant lieu et des modèles d'écoulement pratiques. Les catégories de réacteurs peuvent être basées sur le modèle de fonctionnement, les caractéristiques hydrauliques, et les conditions d'entrée et de sortie.

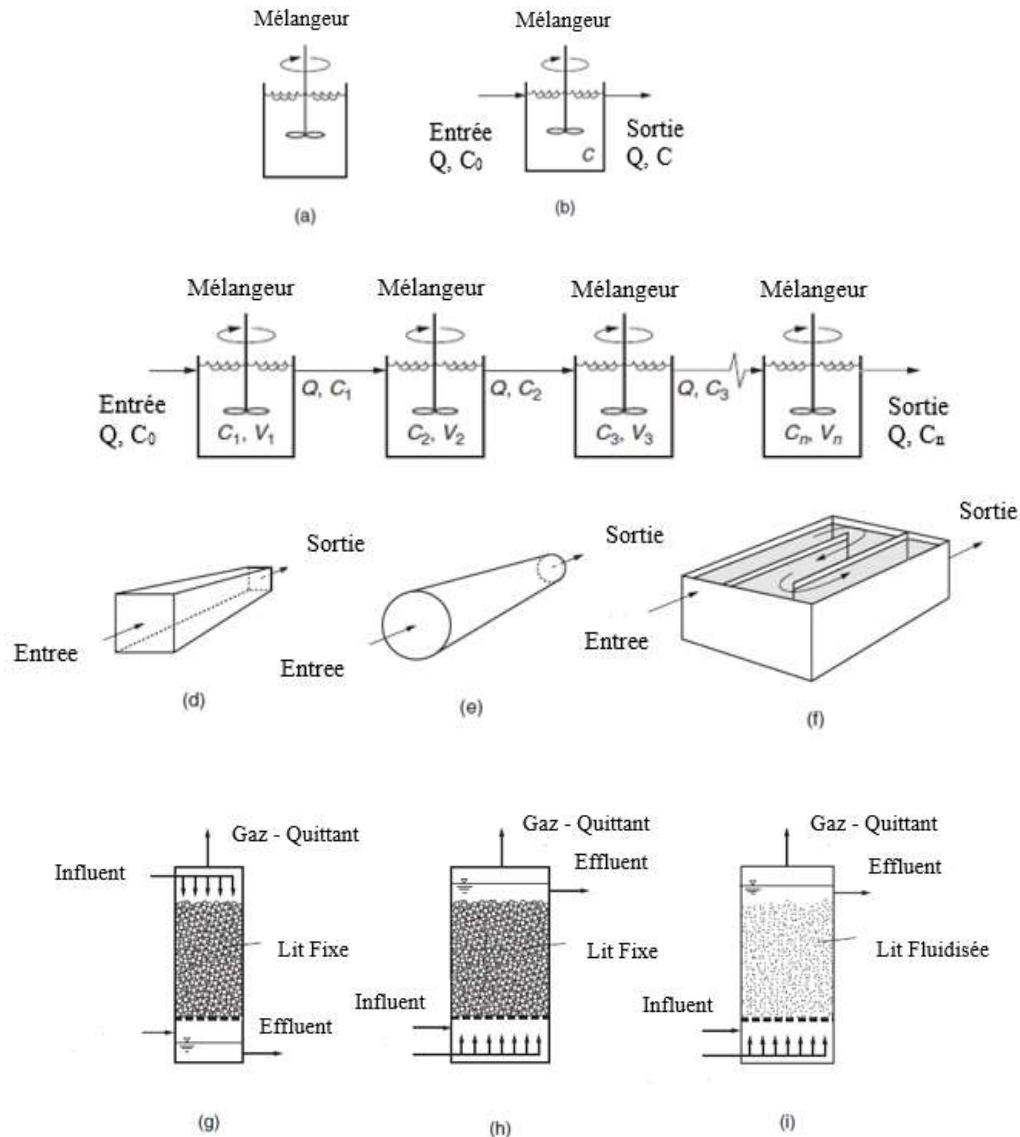


Figure 1- 2[1] Réacteurs typiques utilisés dans les procédés de traitement de l'eau: a) réacteur discontinu; (b) un réacteur mélangé à flux continu; c) réacteurs mixtes à flux continu en série, également appelés réservoirs en série; (d) un réacteur à écoulement à bouchon à canal rectangulaire; e) un réacteur à écoulement tubulaire circulaire; (f) un réacteur à écoulement piston à configuration serpentine; g) Réacteur à flux descendant à lit tassé; h) le réacteur à flux ascendant à lit tassé; et (i) le réacteur à flux ascendant à lit expansé[1].

Au début de la pratique de l'ingénierie, le concepteur supposait soit un écoulement piston, soit une agitation parfaite du fluide (*Figure 1- 3*). Ces hypothèses idéalisées peuvent s'écarter de la réalité, ce qui a cédé la place à d'autres méthodes telles que l'utilisation de traceurs qui mène à de meilleures prédictions [9].

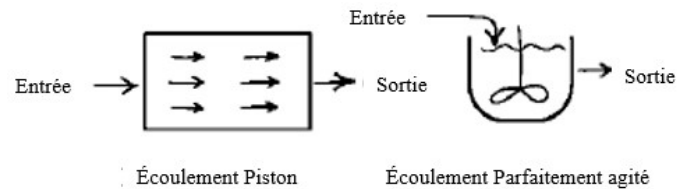


Figure 1- 3 Les deux modèles d'écoulement les plus simples [9]

L'utilisation de réacteurs discontinus en grands volumes pour le traitement de l'eau n'est pas viable. Ils sont souvent exploités dans d'autres industries de traitement chimique, par exemple les produits cosmétiques pour la production en petit volume. En raison des volumes importants requis en continu, l'utilisation des réacteurs à flux continu est la solution dans les usines de traitement d'eau à grande échelle.

I.4 Base d'analyse de Géométrie et Similitude

Un objectif souhaitable de toute expérience est de produire des résultats aussi largement applicables et extrapolables que possible. La performance d'un dispositif ou d'un système à l'échelle réelle peut être prédite dans une certaine mesure par la conception d'expériences sur des modèles réduits.

L'utilisation de l'analyse dimensionnelle est basée sur l'idée d'avoir les mêmes dimensions pour les termes d'une équation physique [4]. Le théorème de Buckingham Pi publié en 1914 [5] est largement associé à l'analyse dimensionnelle. Cette dernière, en conjonction avec le théorème de Pi aidera à déterminer le nombre et la forme des groupes sans dimension qui décrivent le système fluide en question [4]. De nombreux groupes peuvent résulter de l'analyse dimensionnelle. Un système de fluide donné peut avoir de un à cinq groupes adimensionnels ou plus, en fonction de sa complexité [4].

I.5 Similitude

I.5.1 Similarité géométrique

La condition de similarité géométrique est dite satisfaite si le modèle à échelle réduite possède la forme nette du système à grande échelle. Un rapport fixe relie alors les dimensions physiques du modèle au système à grande échelle [4].

Deux modèles de taille différente sont alors géométriquement similaires, si pour tout point dans le modèle réduit, ayant pour coordonnées x_M , y_M et z_M , il existe un point similaire appartenant au modèle le plus grand que nous identifions comme système complet, avec les coordonnées x_P , y_P et z_P , de telle sorte que [4] :

$$\frac{x_P}{x_M} = \frac{y_P}{y_M} = \frac{z_P}{z_M} = L \quad \mathbf{1-1}$$

Si le modèle réduit n'est pas parfaitement similaire, Il appartient à l'ingénieur de décider si cette perte de similitude géométrique est importante[10]. Si l'absence de la caractéristique affecte de manière significative le champ d'écoulement, l'ingénieur doit trouver un moyen de rendre compte de l'effet de la fonction manquante [4].

I.5.2 Similarité cinématique

La similarité des intervalles de temps et des distances parcourues, ou cinématique, est essentielle. Le succès d'avoir une similarité géométrique signifiant une similarité de longueur n'implique pas une similarité cinématique. Si les longueurs correspondantes dans les deux systèmes sont dans un rapport fixe, les vitesses des particules correspondantes doivent être dans un rapport fixe d'amplitude des intervalles de temps correspondants [11].

Lorsque les mouvements de fluide sont cinématiquement similaires, les motifs formés par les lignes de courant sont géométriquement similaires aux instants correspondants. Il s'en suit que des écoulements cinématiquement similaires ne sont possibles que par des frontières géométriquement similaires. Par conséquent, la similarité géométrique est une condition nécessaire pour que la similarité cinématique soit atteinte, mais pas suffisante [11].

I.5.3 Similarité dynamique

La similarité dynamique existe s'il existe un rapport fixe dans les amplitudes des forces existant dans le système aux points correspondants géométriquement. Il est à noter que la similarité géométrique est facilement réalisable, contrairement des similitudes cinématiques et dynamiques qui restent très difficiles et parfois impossibles à atteindre.

I.5.4 Application de l'analyse dimensionnelle

L'application de l'analyse dimensionnelle nécessite la connaissance du théorème de **Buckingham Pi** :

Pour un problème qui contient n variables, exprimés en m dimension fonctionnel, il est possible de construire $(n-m)$ nombres adimensionnels reliant les différentes échelles de similitude [5].

L'analyse dimensionnelle des écoulements débute alors par la formulation d'une liste des paramètres d'intérêt. Pour déterminer les différents groupes Pi, nous appliquons une autre règle qui stipule que pour chaque groupe Pi, il faut choisir une « variable de base ». Le paramètre qui apparaît dans un seul groupe Pi est désigné comme la variable fondamentale. Notre groupe sans dimension est construit autour de cette variable fondamentale. Notre objectif étant de formuler une fonction en termes de groupes sans dimension [10] sous la forme :

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n) \quad 1-2$$

Dans le but d'obtenir une similarité à tous les niveaux (Figure 1-4), il est généralement difficile de satisfaire toutes les exigences connues et de ce fait les nombres adimensionnels choisis ne sont pas tous identiques et on parle alors de modèles distordus.

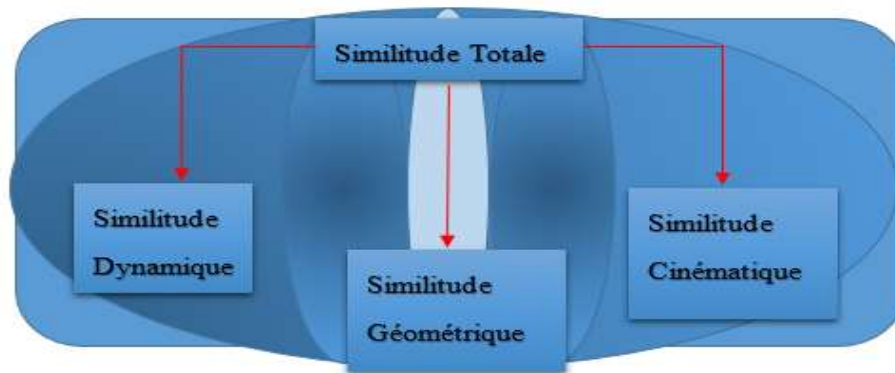


Figure 1- 4 Illustration de la similitude complète[11]

I.5.5 Détermination des variables

Avec l'intérêt de maintenir le nombre de variables au minimum, il est impératif que toutes les variables soient indépendantes [12]. La prise en compte des lois fondamentales qui régissent le phénomène et la définition des aspects essentiels du système restent très importantes. Dans ce processus d'analyse dimensionnelle, les dimensions des quantités demeurent le point le plus importantes, sans se soucier de leurs valeurs spécifiques.

I.5.6 Les variables

Il est plus pratique dans n'importe quel problème de travailler avec le nombre minimum de termes P_i possibles. Ceci est faisable en éliminant les variables qui influent peu sur les phénomènes considérés [12].

I.5.7 Détermination des termes P_i

Il est à noter que l'analyse dimensionnelle ne résulte pas d'un ensemble unique de termes P_i . Néanmoins, un nombre fixe de termes P_i est requis. Quand un ensemble correct est déterminé, le développement de différents ensembles possibles peut être réalisé par le résultat de combinaisons de produits de l'ensemble original [12].

CHAPITRE II CINÉTIQUES DE LA
RÉACTION DE DÉSINFECTION

II.1 La désinfection au chlore

II.1.1 La réaction de désinfection

Le chlore gazeux se dissout dans l'eau pour former de l'acide hypochloreux ($HOCl$) qui se dissocie ensuite pour former des ions hypochlorites . En outre, la dissociation de $HOCl$ pour produire l'ion hypochlorite OCl^- , l'ion hydrogène H^+ fait partie du processus. Les réactions réversibles sont alors dépendantes du pH, et le $HOCl$ est le produit principal dans les plages de pH de 3,5 à 5,5. La production d' OCl^- est favorisée par un pH supérieur à 8. Les ions OCl^- et les molécules $HOCl$ sont décrits comme du chlore libre, ce chlore libre réagit avec la matière organique naturelle dans l'eau pour produire des composés organiques chlorés [9].

Lorsque le chlore est injecté dans l'eau, il se dissout selon la loi de Henry, puis réagit pour produire de l'acide chlorhydrique et l'acide hypochloreux par les réactions suivantes :



A des niveaux de pH inférieurs à 5, presque tout l'acide hypochloreux est non dissocié tandis qu'à des niveaux de pH supérieurs à 9, la dissociation est presque complète. L'acide hypochloreux désinfecte en pénétrant dans les parois cellulaires bactériennes et en attaquant la couche cytoplasmique. Sous la forme indiquée, il diffuse plus facilement à travers la paroi cellulaire que l'anion hypochlorite OCl^- et est donc un biocide plus efficace, de sorte que le procédé bénéficie du maintien d'un pH bas. Il est aussi à noter que la chloration inactive efficacement les virus si la turbidité de l'eau est inférieure ou égale à 1,0 (NTU) [9].

Il est aussi important que le chlore ajouté dépasse le point de rupture après réaction avec toutes les substances oxydables dans l'eau, de telle sorte que si du chlore supplémentaire est ajouté, il restera sous forme de chlore libre.

II.2 Les modèles cinétiques

II.2.1 Le modèle de Chick–Watson

Pour les désinfectants chimiques, les mécanismes spécifiques d'inactivation des micro-organismes ne sont pas bien compris. L'inactivation dépend des propriétés de chaque micro-

organisme, du désinfectant et de l'eau. Il a été remarqué que les cinétiques des réactions peuvent changer d'un organisme à l'autre, même pour un même désinfectant.

Néanmoins, il existe un modèle cinétique simple qui est largement utilisé, et il y a suffisamment de points communs dans le comportement de toutes ces réactions pour permettre le développement de lois phénoménologiques utiles à la modélisation de toutes ces réactions. « La désinfection pourrait être modélisée comme une réaction de premier ordre en ce qui concerne la concentration des organismes. » (Chick 1908) [1]. Chick en 1908 caractérise la cinétique de réaction du processus de désinfection comme une cinétique de premier ordre :

$$dN/dt = -kN \quad 2-1$$

Le nombre d'organismes survivants est noté N et k est la constante de vitesse de réaction en fonction du désinfectant, et du type de micro-organisme. La constante de vitesse k se rapporte à la concentration du désinfectant, C Par :

$$k = k' C^n \quad 2-2$$

Avec n étant le coefficient de dilution indépendant de la concentration du désinfectant et k' : coefficient représentant la pouvoir d'un désinfectant.

La loi Chick-Watson est alors exprimée : $\ln\left(\frac{N}{N^0}\right) = -k' C^n t \quad 2-3$

Où N : représente nombre de microbes à la fin d'opération, N^0 : représente le nombre de microbes initial.

Alors que la loi de Chick a une large applicabilité, un effet important non abordé dans le modèle est l'effet de la concentration du désinfectant. Fréquemment, différentes concentrations de désinfectant conduisent à des taux différents de diminution des organismes viables.

II.3 Cinétique de désinfection dans les réacteurs non idéaux avec circulation

Les cinétiques de désinfection expliquées ci-dessus sont basées sur des études conduites dans des réacteurs discontinus parfaitement agités. Bien que l'information obtenue à partir des réacteurs discontinus soit utile, les systèmes à flux continu présentent un comportement non-idéal plus complexe. L'impact de la dispersion sur la progression de la réaction est particulièrement important. Le modèle à écoulement dispersé (MED) et le modèle à écoulement séparé (MES) sont exploités pour modéliser la performance des réacteurs réels (non-idéaux) [1].

II.4 Conception minimisant la dispersion dans les contacteurs de désinfection

Différents réacteurs de traitements de l'eau exploitable peuvent être catégorisés en fonction des caractéristiques hydrauliques. Un fluide s'écoule dans un réacteur à écoulement piston idéal uniformément sans se mélanger avec le fluide devant ou derrière celle-ci dans le réacteur. Une série de bouchons ayant le même diamètre que le diamètre intérieur du réacteur explique mieux le concept de cet écoulement par « écoulement diphasique » [9]. Pour un bouchon qui est introduit à une extrémité du réacteur, un autre bouchon de la même taille doit sortir de l'autre extrémité. Chaque bouchon est dans le réacteur pendant la même durée puisque les bouchons sont introduits à débit constant.

La conception des réacteurs qui peuvent fonctionner comme des réacteurs piston proches de l'idéal est l'objectif final. Dans les cas où l'hypothèse piston n'est pas vérifiée, il est impératif de comprendre ce qui doit être fait pour s'en rapprocher (Figure 2-1) [9].

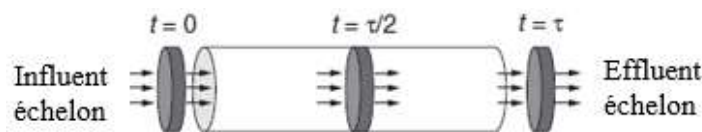


Figure 2- 1 Écoulement tubulaire a des différents instants[1].

II.5 Description et analyse d'écoulement

Les caractéristiques hydrauliques d'un réacteur qui est défini comme la cinématique de l'écoulement. Cette cinématique est liée à la vitesse dont les valeurs locales sont difficiles à déterminer (Figure 2-2). Ceci peut être résolu par l'utilisation d'un traceur dont l'analyse en sortie renseignera sur le type d'écoulement [9].

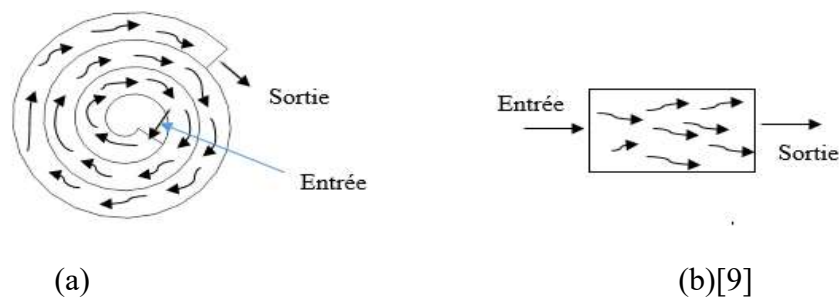


Figure 2- 2 Visualisations de écoulements à travers des réacteurs (a) Dans le réacteur en spirale [3] (b) Système général [9]

CHAPITRE III ÉLÉMENTS DE
CONCEPTION DU PROCÉDÉ DE
CHLORATION

Introduction

Les activités de traitement des eaux étendent la notion de désinfection pour se référer à deux activités :

1. La désinfection principale : - qui consiste en la désactivation de micro-organismes dans l'eau.
2. La désinfection secondaire : qui consiste à maintenir un résidu désinfectant dans le réseau de distribution d'eau.

La désinfection secondaire nécessite la persistance du désinfectant résiduel qui n'est possible qu'avec l'utilisation du chlore grâce à sa capacité de rester dans la solution pendant des périodes prolongées.

Dans la conception de réacteurs de désinfection, plusieurs questions relatives à la qualité de l'écoulement se posent, en l'occurrence :

- Y a-t-il des régions mortes, stagnantes ou inutilisées dans le réacteur ?
- Y a-t-il des canalisations ou des contournements de fluide dans le réacteur ?

Des procédures expérimentales existent pour analyser le type d'écoulement dans un réacteur de désinfection. Le traceur est injecté selon une procédure bien déterminée et son analyse à la sortie permet d'identifier l'existence de régions mortes ou de boucles de recirculation. Le traceur peut être injecté de différentes manières (Figure 3-1), à savoir :

- Comme une impulsion (fonction Dirac).
- Comme une fonction échelon.
- Comme une fonction périodique.
- Comme une fonction aléatoire [9].

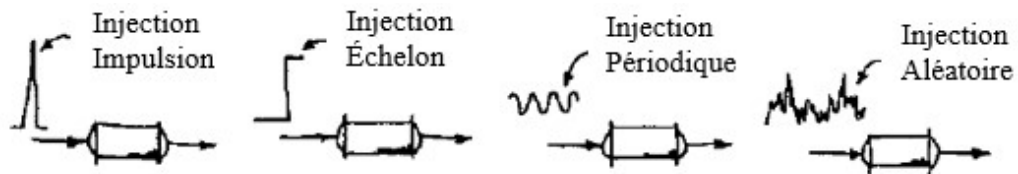


Figure 3- 1 Méthodes d'injection de traceur [9]

Il est à noter que les résultats des expériences d'impulsion et d'étape sont plus simples à analyser et à interpréter, comparées aux impulsions périodiques ou aléatoires.

III.1 Notion de courbe de traceur pour les réacteurs idéaux : courbes E et F

Les courbes E et F sont définies respectivement comme les répartitions en fonction de l'âge de sortie et fonction de l'âge cumulatif des espèces fluides à la sortie du réacteur.

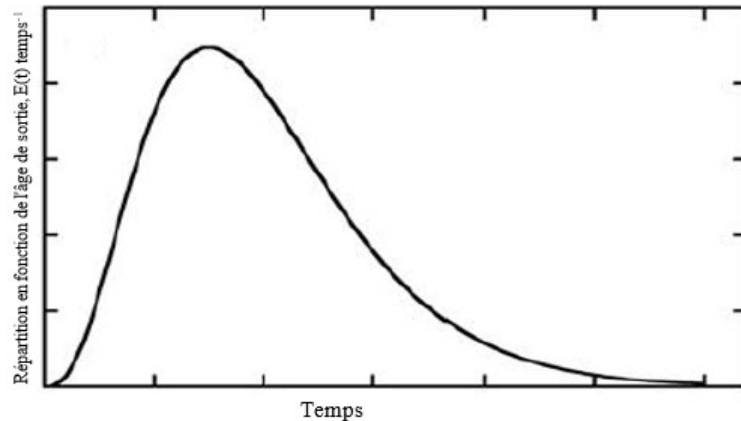


Figure 3- 2 Courbe E(t). Présentation des résultats d'une expérience hypothétique évaluant le passage de molécules à la sortie du réacteur

On définit :

$$E(t)dt = \frac{C(t)}{C_0} \quad 3- 1$$

$C(t)$ est la concentration à l'instant t de traceur quittant le réacteur,

C_0 : est concentration initiale de traceur

$$C_0 = \frac{\text{nombre de mole de traceur}}{\text{Volume total de réacteur}} \quad 3- 2$$

et dt représente le pas de temps,

$E(t) dt$ est identifié comme la fraction du liquide ayant un temps de séjour entre t et $t + dt$. Il s'en suit que l'intégration de la fonction $E(t) dt$ donne une fraction de fluide possédant un temps de séjour correspondant aux bornes d'intégration. Une fraction de liquide dans le système avec temps de séjour compris entre t_1 et t_2 s'écrit alors :

Fraction de fluide dans le système avec le temps de séjour entre t_1 et $t_2 = \int_{t_1}^{t_2} E(t) dt$ 3- 3

Notez que l'intégrale de zéro à un temps très grand doit être égale à 1, soit :

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = 1 \quad 3- 4$$

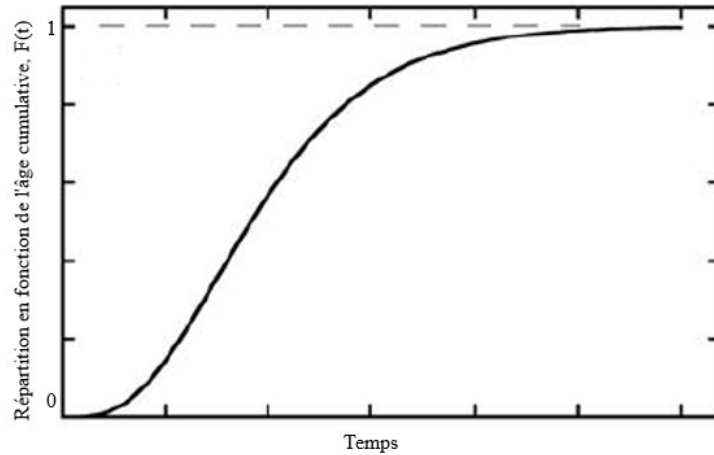


Figure 3- 3 Courbe $F(t)$. Présentation des résultats d'une expérience hypothétique évaluant le passage de molécules à la sortie du réacteur[13]

La répartition cumulative de l'âge (Figure 3-3), généralement notée $F(t)$ est la fraction de fluide (sans dimension) qui a un temps de résidence inférieur ou égal à une valeur donnée. Elle est évaluée par :

$$F(t) = \int_0^t E(t) dt \quad 3- 5$$

Dans des termes statistiques, $E(t)$ est une fonction de densité de probabilité standard et $F(t)$ une fonction de probabilité cumulative. Ses deux fonctions serviront à décrire les phénomènes d'écoulement avec les notions des probabilités.

III.2 Utilisation de traceurs pour les réacteurs idéaux :

L'évaluation des conditions d'écoulement dans un réacteur s'effectue par l'introduction d'une espèce chimique conventionnelle appelée traceur. Pour comparer la performance hydraulique d'un réacteur continu au modèle piston, un traceur est introduit dans le réacteur et sa concentration est ensuite observée et interprétée à la sortie. La figure 3-4 montre les différents phénomènes pouvant avoir lieu lors des écoulements, écartant le réacteur du modèle idéal[9].

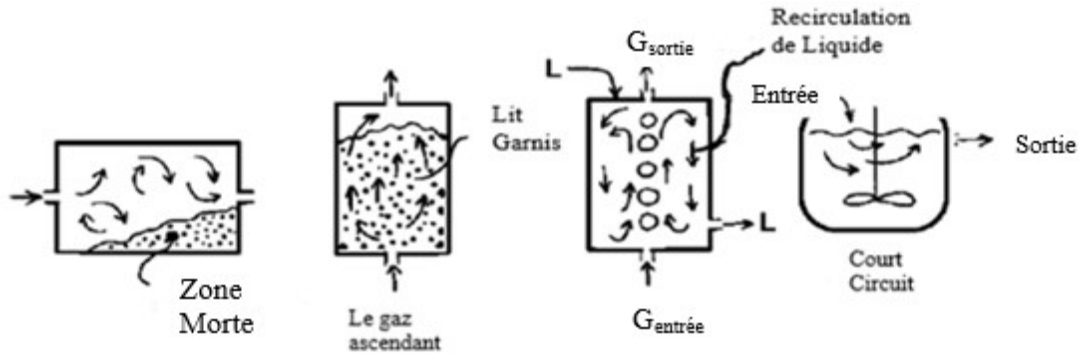


Figure 3- 4 Types d'écoulement existant dans les réacteurs

III.2.1 L'injection pulsée

L'injection pulsée consiste en l'ajout instantané d'une impulsion de traceur dans le réacteur suivi de l'observation de la même impulsion à la sortie du réacteur (Figure 3-5).

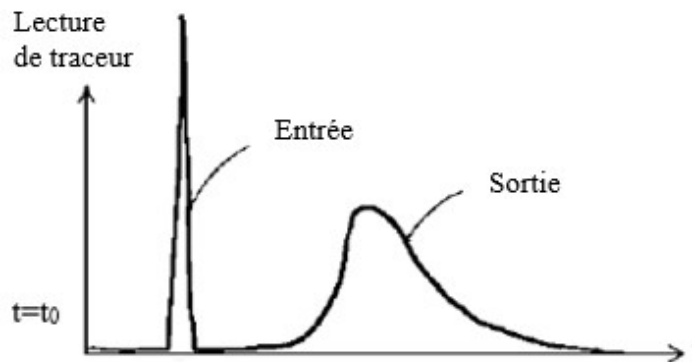


Figure 3- 5 Sortie typique pour une entrée d'impulsion

Plusieurs indicateurs sont utilisés pour l'analyse et l'interprétation des résultats, en l'occurrence le temps d'écoulement théorique, la moyenne \bar{t} et la variance σ^2 de la courbe de réponse du traceur. Celles-ci seront utilisées pour caractériser l'écoulement et fournir des éléments clés pour analyser un modèle[13].

III.3 Le temps de séjour

Pour un réacteur ayant un volume **Vol** [m^3], et opérant sous un débit de fluide **Q** [m^3/s], le temps d'écoulement théorique est défini par :

$$\tau = \frac{Vol}{Q} = \left[\frac{m^3}{m^3/s} \right] = [s] \quad 3-6$$

III.3.1 La moyenne et la variance :

La réponse à une impulsion nous permet de déterminer le temps de séjours moyen :

$$\text{Temps de séjour moyenne :} \quad \bar{t} = \mu = \frac{\int_0^{\infty} Ct \, dt}{\int_0^{\infty} C \, dt} = \frac{\sum ti.Ci.\Delta ti}{\sum Ci.\Delta ti} \quad 3-7$$

$$\text{la variance de la courbe:} \quad \sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} Ct^2 \, dt}{\int_0^{\infty} C \, dt} - \bar{t}^2 \quad 3-8$$

On définit aussi σ^2_{θ} comme étant la variance, sous forme adimensionnelle[13]

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2} \quad 3-9$$

III.3.1.1 Dispersion de Traceur dans le réacteur

La dispersion dans le réacteur à écoulement piston est égale à zéro, $d = 0$. Une valeur élevée de d signifie une répartition rapide de la courbe du traceur, par contre si d est faible, cela signifie une répartition lente. L'idéal c'est d'avoir $d = 0$ ce qui signifie absence de répartition. La dispersion peut être évalué grâce à la valeur de σ^2_{θ} , et par la valeur du nombre de Peclet Pe :

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{2}{Pe} = 2 \left(\frac{D}{V.S(\alpha)} \right) \quad 3-10$$

$$\text{sachant que } Pe = \frac{1}{d} \quad 3-11$$

D'où $S(\alpha)$: **Distance parcourus par le liquide dans le réacteur** (m)

V : **Vitesse d'écoulement** (m/s)

D : **coefficient de diffusion** (m^2/s)

d : **la dispersion** (*sans unité*)

III.3.2 Temps de contact et efficacité hydraulique

Dans les cas des réacteurs de désinfection, l'efficacité est aussi déterminée par l'utilisation du CT, où C, est la concentration de désinfectant dans le réacteur et t la valeur t₁₀. t₁₀ est définie comme le temps nécessaire pour que 10% de liquide sortent du réacteur. D'une manière similaire, c'est le temps pendant lequel 90% du liquide dans le réacteur a été en contact avec la désinfectant avec un niveau concentration C. Par l'utilisation des courbes de distribution des temps de séjours nous pouvons prévoir le niveau d'inactivation des microbes ainsi que la quantité de sous-produits de la désinfection.

Le court-circuit est analysé en suivant les variations des valeurs de $(\theta_0 - \theta_{10})$. Le mélange et la dispersion peuvent aussi être représentés par la largeur de la courbe de réponse du traceur $E(t)$. Les temps adimensionnel suivants $(\theta_{75} - \theta_{25})$, $(\theta_{90} - \theta_{10})$, $(\theta_{90}/\theta_{10})$, sont appelés les indices de Morrill (Mo). L'indice de Morrill est égale à 1 dans le cas d'un écoulement piston. De surplus, θ_{50} est aussi un temps adimensionnel souvent utilisé pour vérifier l'efficacité du réacteur de désinfection[9].

Le temps adimensionnelle est représenter comme suit $\theta = \frac{t}{\bar{t}} = \frac{t}{\tau}$

3- 12

CHAPITRE IV CONCEPTION DU
MODELE

Introduction

Une distribution plate des vitesses perpendiculairement à la section d'écoulement avec une absence de variation radiale, n'est possible que dans le cas d'écoulements turbulents. Cependant, des conditions de forte turbulence avec un nombre de Reynolds (Re) très élevé sont souvent difficiles à reproduire en laboratoire. Ceci signifie que les conditions opératoires de débit, vitesse et volume de réservoir doivent être adaptées à cet environnement à petite échelle tout en gardant une taille de modèle capable de fournir les informations nécessaires à la conception réelle. Quant à l'interprétation des résultats elle se fera systématiquement à l'aide de nombres adimensionnels [12].

IV.1 Hydrodynamique du réacteur de désinfection

IV.1.1 Les nombres adimensionnels

Les nombres adimensionnels nous aident à relier deux systèmes différents facilement et assurer une similitude. Le nombre de Reynolds est un nombre adimensionnel représentant le rapport des forces d'inertie sur les forces visqueuses. Il identifie l'écoulement comme laminaire pour un Re inférieure à 2500 et un écoulement turbulente pour un Re supérieur à 3000. Entre ces deux valeurs existe généralement une zone de transition. C'est un nombre très important pour les applications d'écoulements de fluide dans un canal. Il s'écrit :

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad 4-1$$

D'où : ρ : masse volumique de l'eau (kg/m^3)

V : Vitesse d'écoulement (m/s)

D_h : Diamètre Hydraulique (m)

μ : Viscosité dynamique de l'eau ($kg\ m/s^2$)

Le nombre de Froude est un nombre adimensionnel qui représente le mouvement d'un fluide en contact avec un autre fluide. Dans le cas où ce fluide est de l'air, l'écoulement est dit à surface libre [12].

Les écoulements à canal ouvert sont influencés par une similitude du nombre de Froude. Dans le modèle, ce nombre doit représenter les mêmes effets que ceux à l'échelle réelle. Le nombre de Froude s'écrit :

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gy}} \quad 4-2$$

V : Vitesse d'écoulement (m/s)

g : Accélération de la pesanteur (m/s^2)

y : la hauteur de l'eau dans le canal (m)

Peclet(Pe) un nombre adimensionnel qui quantifie la dispersion dans un écoulement piston[12].

$$Pe = \frac{1}{d}$$

d : La dispersion (sans unité)

IV.1.2 Écoulement à surface libre

Il est important de noter que les réacteurs de désinfection pour le traitement d'eau destinée à la consommation publique sont des réacteurs à surface libre. Par conséquent, les nombres adimensionnels relatifs à ce type d'écoulement doivent être considérés.

Les écoulements à surface libre présentent une interface air-liquide où l'effet de la tension superficielle peut être important particulièrement pour les modèles à profondeur réduite[14]. Afin d'éliminer les forces relatives à la tension superficielle, différents rapports de dimensions horizontales et verticales peuvent être donnés au modèle. Le résultat sera un modèle nécessairement distordu qui doit être expliqué empiriquement[9]. Il est essentiel dans certains cas d'assurer un nombre de Re élevé, car à ces niveaux les effets de la distorsion seront minimaux. Le nombre Re ne doit pas nécessairement être identique dans le modèle et dans le prototype[11].

IV.2 Description du réacteur à l'échelle réelle

La conception de départ est basée sur le réservoir de désinfection de l'usine de traitement de Boudouaou située à 30 km à l'est d'Alger, en Algérie. L'usine a été construite en 1987 pour

traiter l'eau des barrages de Be'ni Amrane ($36^{\circ}40'12.97''N-3^{\circ}36'27.67''E$) et de Keddara ($36^{\circ}39'9.19''N-3^{\circ}25'22.38''E$). La technologie utilise du chlore gazeux comme désinfectant. Le réservoir a une forme rectangulaire avec une longueur de 128 m long, une largeur de 88 m et une hauteur de 6 m[3].

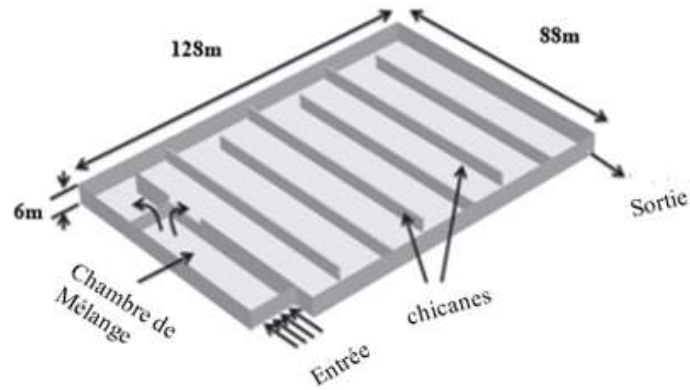


Figure 4- 1 Réservoir de désinfection de l'usine de Boudouaou (Alger Est, Algérie) [3]

Le volume utile du réservoir est de $50\,000\text{ m}^3$, ce qui correspond à une hauteur d'eau d'environ 5 m. Le réservoir a 6 chicanes constituant 7 canaux guidés, ce qui donne plus de 600 m de longueur totale de traitement.

IV.3 Conception du réservoir en spirale d'Archimède

Il a été montré numériquement que le réacteur en forme de spirale dépassait sur tous les critères de performances la forme classique du réservoir de contact de Boudouaou. Ceci grâce à l'élimination des changements soudains dans la direction de l'écoulement causant l'apparition de zones mortes[3].

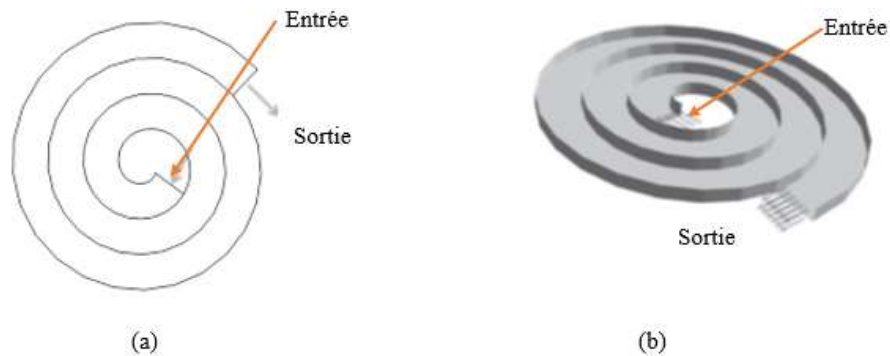


Figure 4- 2 Conception en spirale d'Archimède : (a) vue de dessus et (b) vue en trois dimensions

Le but est alors de concevoir un prototype (Figure 4-2) de cette configuration et d'effectuer des expériences d'injection de traceur dont les résultats permettront de prédire l'écoulement à l'échelle réelle. Les caractéristiques géométriques principales du réacteur en spirale peuvent être résumées comme suit :

IV.3.1.1 Le rayon de la spirale

Le rayon de la spirale d'Archimède en coordonnées polaires [3]:

$$r = a\alpha \quad 4- 3$$

Où r est le rayon de spirale, α l'angle de tour, et a est une constante définissant la distance entre les bras de la spirale.

IV.3.1.2 Longueur de l'arc de la spirale

La longueur d'arc S de la spirale en fonction de l'angle α est donnée par [3] :

$$S(\alpha) = \frac{1}{2} a \{ \alpha \sqrt{1 + \alpha^2} + \ln(\alpha + \sqrt{1 + \alpha^2}) \} \quad 4- 4$$

Afin de déterminer un angle de spirale approprié, la longueur totale de l'arc en spirale est choisie égale à la longueur d'écoulement totale de la conception rectangulaire de Boudouaou. Ce dernier possédant une longueur totale de 704 m. En notant que la largeur des canaux du réservoir de Boudouaou est de $128/8=16$ m, le rayon de la spirale devra, après chaque rotation de 2π , augmenter de 16 m.

Pour la distance de spirale $S(\alpha) = 704$ donne un angle $\alpha = 23.6$ radian. Le réacteur est opéré à une hauteur d'eau de 5 m et le volume résultant est alors égal à $49\ 800\ \text{m}^3$. Ce réservoir est alimenté par un débit de 3 à $6\ \text{m}^3/\text{s}$ et maintient une vitesse moyenne d'environ $0,5\ \text{m/s}$

Donc pour une spirale de diamètre hydraulique, $D_h = 12.31$ m, le nombre de Reynolds $Re = 10^6 \times 0.5 \times 12.31$ soit $Re = 6.15 \times 10^6$. Dans ces conditions la distribution de vitesse est plate (ce qui est vrai pour des écoulements turbulents).

IV.4 Similitude Totale

Il est à rappeler qu'une similitude totale est réalisée en assurant les similitudes géométrique, cinématique, et dynamique. Par application du théorème de Buckingham-Pi, on pose :

Les Nombre de groupes sans dimension = Nombre de paramètres - Nombre de dimensions.

IV.4.1 Similitude Géométrique

Les paramètres existant sont définis comme ;

1. $S(\alpha)$, Distance parcouru par le liquide dans le réacteur (m).
2. Δr Aussi appeler b ; la largeur entre les murs de réacteur (m).
3. t_h ; temps d'écoulement théorique (s).
4. Q ; débit d'écoulement (m^3/s)
5. d ; la dispersion (sans unité)
6. ρ ; la densité du fluide (kg/m^3)
7. μ ; la viscosité dynamique du fluide ($kg\ m/s^2$)
8. V ; la vitesse du fluide (m/s)

Étant donné que le même fluide sera utilisé dans le prototype, la masse volumique et la viscosité seront écartées de la similitude. On définit alors les nombres adimensionnels qui restent dans ce cas :

- Nombre de Reynolds ; Re
- Peclet ; Pe
- Nombre de Froude ; Fr

Tableau 4- 1 Les paramètres physiques utilisés et leurs dimensions

Paramètre	t_h	Q	d	Δr	$S(\alpha)$	V	ρ	μ
Unité	Seconde (s)	$\frac{m^3}{s}$	Sans unité	m	m	$\frac{m}{s}$	$\frac{kg}{m^3}$	$\frac{kg}{m.s}$
Dimensions	T	$\frac{L^3}{T}$	adimensionnel	L	L	$\frac{L}{T}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{M}{L.T}$

Dimensions totale (T, L, M) : 3

Nombre des paramètres totaux existant : 8

Étant donné que 2 paramètres représentent les caractéristiques du fluide et que le même fluide est utilisé dans le prototype, il reste 6 paramètres dans la similitude. D'après le théorème de Buckingham on a 3 nombres adimensionnels.

En ce qui concerne la dispersion d ; cette dernière est un paramètre sans dimension. En sachant que le nombre de Peclet Pe est inversement proportionnel à d (ce qui sera vérifié expérimentalement), nous écrivons finalement les formes des nombres retenus :

- $Re = \frac{\rho V D_h}{\mu}$
- $Fr = \frac{V}{\sqrt{gl}}$
- $Pe = \frac{1}{d}$
- $\frac{x_P}{x_M} = \frac{y_P}{y_M} = \frac{z_P}{z_M} = L$

Nous définissons une première échelle de longueur comme étant la distance parcourues dans la spirale. La seconde échelle représente l'épaisseur ou la distance entre les bras de la spirale. Afin d'assurer une similitude géométrique, ces deux échelles doivent être maintenues dans des ordres des grandeurs similaires.

IV.4.2 Similarité cinématique et dynamique

Afin de garder la similarité cinématique dans le réservoir de contact, nous devons nous assurer que l'écoulement reste turbulent. On doit alors travailler à des nombres de Reynolds au-delà de la zone de transition. Quant au nombre de Froude qui définit le rapport des forces d'inertie à la force de pesanteur, Nous assurerons une valeur inférieure ou égale à 1.

La minimisation de la taille du prototype revient à minimiser la section d'écoulement ainsi que la surface totale occupée.

La surface d'écoulement du réacteur peut être définie par :

$$A = by \tag{4-5}$$

Avec y la hauteur de l'eau dans le canal et $b = \Delta r$, la largeur (Base) où,

$$\Delta r = 2\pi a \tag{4-6}$$

La vitesse de l'écoulement dans un canal est donnée par l'équation de Chezy et Manning, à savoir [4, 12, 14] :

$$V = \frac{K}{n} R_h^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad 4- 7$$

Où n représente le coefficient de résistance de Manning. et R_h représente le rayon hydraulique égal à la moitié du diamètre hydraulique D_h . S_0 représente la pente du fond du canal,

La multiplication par la section d'écoulement donne alors le débit Q

$$Q = \frac{K}{n} A R_h^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad 4- 8$$

Dans le système international $K=1$

Par définition le diamètre hydraulique D_h est égal au rapport de la section d'écoulement par le périmètre mouillé, soit :

$$D_h = \frac{4yb}{2y+b} \quad 4- 9$$

Le rayon hydraulique s'écrit donc :

$$R_h = \frac{2yb}{2y+b}$$

$$\text{D'après Équation 4-5, Pour avoir } R_h = \frac{2Ay}{2y^2+A} \quad 4- 10$$

$$\text{Sachant que, } R_h = \frac{A}{P} \quad 4- 11$$

Où A représente la section d'écoulement et P le périmètre mouillé.

IV.4.3 Minimisation de la section d'écoulement :

La fonction objectif est donc la section d'écoulement A qui doit être minimisée afin que la hauteur maximale du réacteur soit le plus faible possible tout en assurant un débit donné. Ce qui revient à assurer :

$$\frac{dA}{dy} = 0 \quad 4- 12$$

Cependant, la section d'écoulement est directement liée au calcul du rayon hydraulique et du débit. En utilisant l'expression du débit donnée par **Equation 4-8** et en y injectant l'expression du rayon hydraulique R_h donnée par ; **Equation 4-10** on obtient :

$$Q = \frac{K}{n} A \left(\frac{2Ay}{2y^2 + A} \right)^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad 4-13$$

Cela peut être réarrangé pour donner

$$A^{\frac{5}{2}} y = B (2y^2 + A) \quad 4-14$$

Avec le terme constant :

$$B = \left(\frac{Q}{2 \cdot \left(\frac{K}{n} \right) \cdot S_0^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad 4-15$$

On dérive **Equation 4-14** par rapport à la hauteur y

$$\frac{5}{2} A^{\frac{3}{2}} \frac{dA}{dy} y + A^{\frac{5}{2}} = B \left(4y + \frac{dA}{dy} \right) \quad 4-16$$

En imposant $\frac{dA}{dy} = 0$ **Equation 4-16** se réduit à,

$$A^{\frac{5}{2}} = 4By \quad 4-17$$

En remplaçant B par son expression dans **Equation 4-17** on obtient :

$$A^{\frac{5}{2}} = 4 \frac{A^{\frac{5}{2}} y^2}{(2y^2 + A)} \quad 4-18$$

$$\text{soit } 4y^2 = 2y^2 + A \quad 4-19$$

$$\text{et } 2y^2 = A \quad 4-20$$

Or la surface mouillée est donné par $A = b \cdot y$ et l'équation 4-20 se réduit à

$$2y^2 = b \cdot y \quad 4-21$$

Finalement

$$b = 2y \quad 4-22$$

IV.4.4 Minimisation de la surface du réacteur :

Afin de minimiser la surface occupée par le réacteur, il faudra chercher le rayon tout en vérifiant les contraintes appropriées. La contrainte la plus importante consiste à assurer le régime turbulent pendant l'écoulement afin de préserver la nature de la distribution des vitesses.

La fonction objectif est donnée alors par l'équation 4-3 soit :

$$r = a\alpha$$

Sujette à la contrainte :

$$Re > 3000$$

Quant à la largeur du canal d'écoulement Δr une valeur arbitraire minimale est fixée à $\Delta r = 0.18$.

La cinétique de désinfection est prise implicitement en compte dans le temps de séjour. Dans le modèle réel, une désinfection complète est assurée pour des séjours entre 20 et 30min [1]. Toutefois, les limitations de la taille du prototype par les matériaux à utiliser et l'espace disponible au laboratoire, nous a conduit à dimensionner le réacteur pour un temps de séjour de 10 min, ce qui permettra de préserver la nature turbulente de l'écoulement pour un même débit.

On minimise la fonction objectif (**Equation 4- 3**) qui dépend des variables a et α .

Pour un temps de séjour de $t= 10$ min on peut estimer la vitesse d'écoulement, V :

$$\text{Vitesse, } V = \frac{S(\alpha)}{t} \quad 4- 23$$

D'après (**Equation 4-22**) on a $b = 2y \rightarrow y = \frac{b}{2}$ définissant la hauteur du canal. Il s'en suit qu'avec $b_{min} = 0.18m$ et on obtient $y_{min} = \frac{0.18}{2} = 0.09m$.

Plusieurs calculs ont été effectués pour maximiser le temps de séjour avec des valeurs de y croissants jusqu'à atteindre $y=0,15$. Ceci afin d'augmenter le volume du réacteur et le temps de séjour tout en minimisant sa surface occupée. Finalement les valeurs retenues sont $y=0.15m$ et $b=0.18m$.

La diamètre hydraulique est calculé par **Equation 4- 9**, $D_h = \frac{4yb}{2y+b}$ et le calcul du nombre de Reynolds pour vérification de régime d'écoulement par $Re = \frac{\rho V D_h}{\mu}$ avec $\frac{\rho}{\mu} = \frac{10^3}{10^{-3}} = 10^6$, ce qui nous amène à $Re = 10^6 \cdot V \cdot D_h$

On résout le problème d'optimisation par le solveur non-linéaire d'Excel qui utilise la méthode du gradient réduit généralisé. Les étapes entreprises sont alors les suivantes :

1. Introduction des variables.
2. Introduction de la fonction objectif.
3. Introduction des contraintes.
4. Recherche de la solution.

	A	B	C
1	Constante de Spirale, a		
2	Angle ou Tours (radians)		
3	Fonction Objet (m), r		
4	Longueur de Spirale(m), S(alpha)		
5	Vitesse d'écoulement (m/s), V		
6	largeur (m), Δr=b		
7	Hauteur (m), y		
8	Diamètre Hydraulique (m), Dh		
9	Nombre de Reynolds		
10			
11			

Figure 4- 3 Introduction de la fonction objectif et des contraintes sur Excel

Toutes les valeurs sont initialisées à zéro sauf les valeurs de b et y qui sont déjà déterminées par calcul



	A	B	C	D
1	Constante de Spirale, a			
2	Angle ou Tours (radians)			
3	Fonction Objet (m), r	0		
4	Longueur de Spirale(m), $S(\alpha)$	0		
5	Vitesse d'écoulement (m/s), V	0		
6	largeur (m), $\Delta r=b$	0	0.18	
7	Hauteur (m), y	0.15		
8	Diamètre Hydraulique (m), D_h	0		
9	Nombre de Reynolds	0	3000	
10				

Figure 4- 4 La fiche Excel avant appel du solveur non-linéaire

Add Constraint

Cell Reference: Constraint:

Figure 4- 5 Introduction des contraintes au logiciel Excel

The screenshot shows the 'Solver Parameters' dialog box in Excel. The 'Set Objective' field contains '\$B\$3'. The 'To' section has 'Min' selected. The 'By Changing Variable Cells' field contains '\$B\$1:\$B\$2'. The 'Subject to the Constraints' list contains '\$B\$6 >= \$C\$6' and '\$B\$9 >= \$C\$9'. The 'Make Unconstrained Variables Non-Negative' checkbox is checked. The 'Solving Method' is set to 'GRG Nonlinear'. The 'Solve' button is highlighted. Annotations with arrows point to these elements from text boxes on the right:

- 'La cellule de la fonction objectif' points to '\$B\$3'.
- 'Minimisation de la fonction objectif' points to the 'Min' radio button.
- 'Les cellules des variables' points to '\$B\$1:\$B\$2'.
- 'Les contraintes du problème' points to the constraints list.

Figure 4- 6 Paramètres de Solveur Excel

	A	B	C
1	Constante de Spirale, a	0.02865	
2	Angle ou Tours (radians)	23.5864	
3	Fonction Objet (m), r	0.67572	
4	Louneur de Spirale(m), S(α)	8	
5	Vitesse d'écoulement (m/s), V	0.01333	
6	largeur (m), $\Delta r=b$	0.18	0.18
7	Hauteur (m), y	0.15	
8	Diamètre Hydraulique (m), Dh	0.225	
9	Nombre de Reynolds	3000	3000
10	Surface mouillé (m ²), A	0.027	
11	Q, debit(m ³ /s)(L/S)	0.00036	0.36
12	Volume (m ³)(litres)	0.216	216

Figure 4- 7 Les résultats de l'optimisation par le solveur non-linéaire

IV.4.5 Sommaire des résultats d'optimisation

Nous réécrivons le rapport définissant la similitude géométrique :

$$\frac{S(\alpha)_P}{S(\alpha)_M} = \frac{\Delta r_P}{\Delta r_M} = L : \text{d'où } L, \text{ est une constante de similitude entre les échelles}$$

P : représente l'échelle réelle

M : représente le modèle à l'échelle laboratoire

$$\text{Avec } S(\alpha)_P = 704m \text{ et } S(\alpha)_M = 8m \rightarrow \frac{S(\alpha)_P}{S(\alpha)_M} = 88$$

Il en ressort aussi $\Delta r_P = 16m$ et $\Delta r_M = 0.18m$ soit $\frac{\Delta r_P}{\Delta r_M} = 88.8$

On a $\frac{S(\alpha)_P}{S(\alpha)_M} \approx \frac{\Delta r_P}{\Delta r_M} \approx 88$: D'après la théorie de Buckingham on peut dire que nous avons bien une similitude géométrique entre les échelles réelle et laboratoire.

La surface d'écoulement du réacteur : $A = by$ d'Equation 3-3 avec b et y calculés ci-dessus on obtient $A=0.027$.

Le débit d'écoulement, $Q = A.Vol = 0.00036 m^3/s = 0.36L/s$

Le volume de Réacteur, $Vol = A.S(\alpha) = 0.216m^3 = 216Litres$

$$\text{Nombre de Froude, } Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} = \frac{0.01333}{\sqrt{9.81*0.15}} = 0.010988$$

Une similitude totale est obtenue puisque on a assuré la similitude géométrique, ensuite la similitude cinématique en opérant le réacteur en régime turbulent et la similitude dynamique en vérifiant un nombre de Froude inférieur à 1.

IV.4.6 La conception du réacteur en spirale :

Le matériel utilisé consiste en de la tôle d'acier de 2mm d'épaisseur avec une surface de $1m^2$. Afin d'atteindre la surface désirée, deux morceaux de $1m^2$ et un autre de $0.40m^2$ ont été soudés pour obtenir une tôle de $1.40m^2$. Les murs du réacteur ont ensuite été découpés dans le même matériau pour obtenir une longueur totale de 8m et soudés grâce à un poste à souder à résistance.

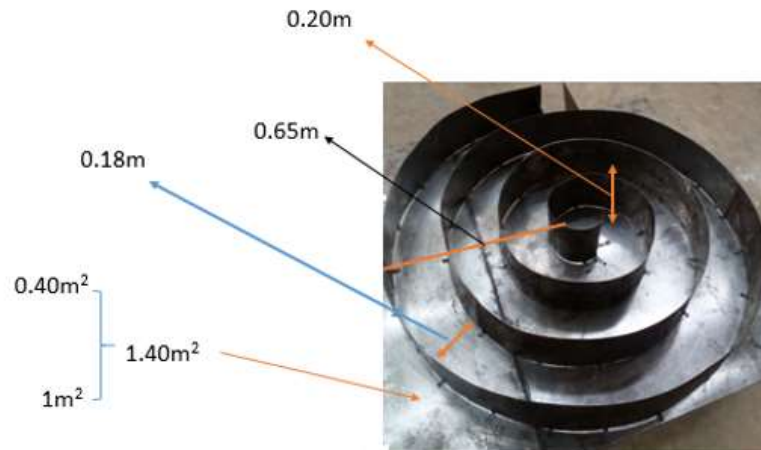


Figure 4- 8 La réacteur spiralé : vue de dessus

IV.5 Mode Opérateur

IV.5.1 Injection Impulsion

À t_0 on a le réacteur remplie avec l'eau qui contient pas de traceur. On note que le débit d'eau doit être fixé à une valeur choisie pour chaque expérience. Puis on commence de charger le réacteur (Au centre de réacteur) (Figure 4-9) et on injecte un traceur de concentration et volume connu en même temps on déclenche le chronomètre. Chaque minute on prend des échantillons jusqu'à le moment on a des solutions non colorées.

Puis on analyse les échantillons par l'Ultra violette pour détermine ses absorbances. L'exploitation des courbes d'étalonnage nous donne les concentrations des échantillons.



Figure 4- 9 Injection impulsion au centre de réacteur alimenté par une débit fixe choisie

IV.5.2 Injection échelon

À t_0 on a le réacteur remplie avec une solution de concentration C_0 (une mélange parfait d'eau et le traceur)(Figure 4-10). Puis on charge le réacteur par l'eau de débit fixe (dilution de solution initial) en même temps on déclenche le chronomètre. Chaque minute on prend des échantillons jusqu'à le moment on a des solutions non colorées.



Figure 4- 10 Injection échelon au centre de réacteur alimenté par une débit fixe choisir
Puis on analyse les échantillons par l'Ultra violette pour détermine ses absorbances. L'exploitation des courbes d'étalonnage nous donne les concentrations des échantillons.

IV.6 Résultats et discussion

Trois expériences avec des débits différents sont effectuées afin d'analyser le comportement du réacteur en spirale. Deux des trois expériences avec une injection impulsion et la troisième avec une injection échelon.

IV.6.1 Injection impulsion (fonction Dirac)

Une injection impulsion de 150mL de traceur (l'encre magenta) de concentration $C_0 = 5g/l$ est effectuée à $t_0 = 0$ à l'entrée au centre de réacteur. Ce dernier opérant avec un débit fixe de

$3.60 \times 10^{-4} m^3/s$ (360 mL/s). Chaque minute des prélèvements sont opérés à la sortie du réacteur.

Tableau 4- 2 Résultats de Manipulation impulsion à $Q = 3.60 \times 10^{-4} m^3/s$ (360 mL/s)

t(min)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
λ (nm)	0.066	0.068	0.071	0.114	0.129	0.181	0.245	0.372	0.897
$C(t)$ (mg/L)	0.180	0.189	0.203	0.392	0.458	0.688	0.970	1.531	3.848
$C(t).t$	0.180	0.379	0.609	1.571	2.294	4.130	6.796	12.250	34.633
t(min)	10	11	12	13	14	15	16	17	18
λ (nm)	1.04	0.945	0.713	0.501	0.26	0.23	0.071	0.069	0.067
$C(t)$ (mg/L)	4.479	4.060	3.036	2.100	1.037	0.904	0.203	0.194	0.185
$C(t).t$	44.792	44.660	36.434	27.308	14.518	13.570	3.248	3.300	3.336

D'après **Equation 3-7** nous avons $\bar{t} = \frac{\sum ti.Ci.\Delta ti}{\sum Ci.\Delta ti}$ soit :

$$\bar{t} = \frac{0.180 * 1 + 0.189 * 2 + \dots + 0.176 * 19}{0.180 + 0.189 + \dots + 0.176} = \frac{257.369}{24.841} = 10.360min$$

$$\bar{t} = 621.6 s$$

Le volume accessible:

$$(V_{acc}) = \bar{t} \times Q = 621.6 \times 3.60 \times 10^{-01} = 223Litres$$

Étant donné que $V_{acc} \geq V_{reacteur}$ et que dans notre cas les valeurs sont pratiquement égales, nous pouvons déjà conclure qu'il n'y a pas de zones mortes et que le réacteur est proche d'un comportement piston.

La dispersion est estimée grâce à l'**Equation 3- 8** $\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} ct^2 dt}{\int_0^{\infty} c dt} - \bar{t}^2 = \frac{\sum ti^2.Ci.\Delta ti}{\sum Ci.\Delta ti} - \bar{t}^2$

Tableau 4- 3 Résultats de l'injection impulsion à $Q = 3.60 \times 10^{-04} m^3/s$ (étude de la dispersion)

Ct^2	651	2732	6577	22623	41306	89221	171262	352819	112213
t^2	3600	14400	32400	57600	90000	129600	176400	230400	291600
Ct^2	1612533	1768544	1573959	1278016	731756	187085	202019	216190	229408
t^2	360000	435600	518400	608400	705600	921600	1040400	1166400	1299600

$$\sigma^2 = \frac{9608838.482}{24.841} - (621.6)^2 = 425.44$$

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2} = \frac{425.44}{(621.6)^2} = 0.0011$$

La valeur de $\sigma^2_{\theta} < 0.02$ prouve aussi que cette conception présente une très faible déviation de l'écoulement piston.

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{2}{Pe} = 2 \left(\frac{D}{v.S(\alpha)} \right) \text{ ce qui donne } \frac{2}{Pe} = 2 \left(\frac{D}{v.S(\alpha)} \right) = 0.0011$$

Ceci implique que $Pe = \frac{2}{0.0011} = 1818$, nous vérifions donc $Pe > 100$ caractéristique d'un écoulement piston.

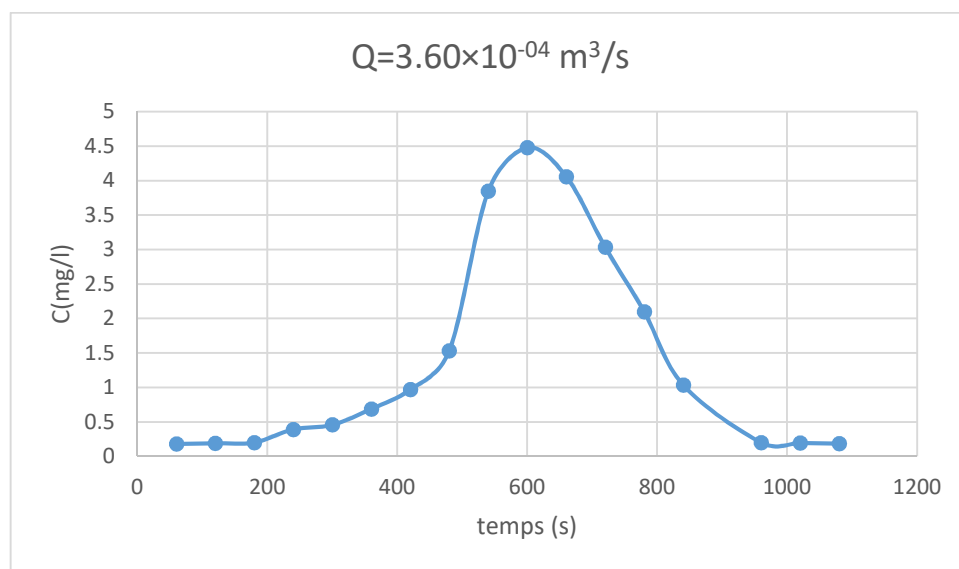


Figure 4- 11 Courbe fonction Dirac pour un injection impulsion manipulation

IV.6.1.1 Vérification par l'indice de Morril

Tableau 4- 4 Représentation des temps adimensionnels pour $Q = 4.74 \times 10^{-04} m^3/s$

t(s)	60	120	180	240	300	360	420	480	540
θ_i	0.130	0.261	0.391	0.522	0.652	0.783	0.914	1.044	1.175
t(s)	600	660	720	780	840	900	960	1020	
θ_i	1.305	1.436	1.566	1.697	1.828	1.958	2.089	2.219	

Tableau 4- 5 Représentation des temps adimensionnel pour $Q = 3.60 \times 10^{-04} m^3/s$

t(s)	60	120	180	240	300	360	420	480	540
θ_i	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
t(s)	600	660	720	780	840	960	1020	1080	1140
θ_i	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.6	1.7	1.8	1.9

Tableau 4- 6 Paramètre Mathématique (Indice de Morril)

Critère	Spirale à $3.60 \times 10^{-04} m^3/s$	Spirale à $4.74 \times 10^{-04} m^3/s$	Écoulement Piston
$(\theta_{75} - \theta_{25})$	0.386	0.261	0
$(\theta_{90} - \theta_{10})$	0.772	0.647	0
$(\theta_{90}/\theta_{10})$	2	1.677	1
θ_{50}	0.965	1.044	1
Variance	0.0011	0.0173	0

Les temps adimensionnelle $(\theta_{75} - \theta_{25})$ et $(\theta_{90} - \theta_{10})$ définie l'ordre de la dispersion dans le réacteur, donc on remarque que avec l'augmentation de débit le temps adimensionnelle tends vers zéro pour qui est l'idéal pour une écoulement piston. Cela veut dit qu'une augmentation de débit conduit à une diminution de la dispersion. Pour la temps adimensionnelle $(\theta_{90}/\theta_{10})$ on remarque que on se rapproche à une écoulement piston par une augmentation de débit également.

Dans une seconde expérience, la même injection impulsion est effectuée avec un débit plus élevé (474mL/s). Les résultats sont regroupés dans le tableau 4-7.

Tableau 4- 7 Résultats de manipulation pour une injection impulsion à débit élevé

t(s)	60	120	180	240	300	360	420	480	540
C(t) mg/L	0	0	0	0	0	1.523	6.070	8.869	7.423
t(s)	600	660	720	780	840	900	960	1020	
C(t) mg/L	3.084	0	0	0	0	0	0	0	

D'une manière analogue, le calcul du temps moyen (**Equation 3-7**) $\bar{t} = \frac{\sum ti.Ci.\Delta ti}{\sum Ci.\Delta ti}$ donne :

$$\bar{t} = \frac{1.523 * 360 + 6.070 * 420 + \dots + 3.084 * 600}{1.523 + 6.070 + \dots + 3.084} = \frac{13214.984}{26.971} = 490 \text{ s}$$

$$\bar{t} = 8.2 \text{ min}$$

Le débit d'écoulement :

$$Q = A.V = 0.000474 \text{ m}^3/\text{s} = 4.74 \times 10^{-01} \text{ L/s}$$

Le volume de réacteur :

$$Vol = A.S(\alpha) = 0.216 \text{ m}^3 = 216 \text{ Litres}$$

et le nombre de Froude, $Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} = \frac{0.01755}{\sqrt{9.81 * 0.15}} = 0.037$

Lorsqu'on augmente le débit, on remarque une augmentation négligeable du nombre de Froude.

Le volume accessible,

$$(Vol_{acc}) = \bar{t} \times Q = 489.953 \times 4.74 \times 10^{-01} = 232 \text{ Litres}$$

Encore une fois $Vol_{acc} > Vol_{reacteur}$ concluant l'absence de zones mortes et le rapprochement de l'écoulement piston.

Tableau 4- 8 Résultats de Manipulation impulsion à $Q = 4.74 \times 10^{-04} \text{m}^3/\text{s}$ (étude dispersion)

Ct^2	0	0	0	0	0	197434.3	1070882	2043631	2164698
t^2	3600	14400	32400	57600	90000	129600	176400	230400	291600
Ct^2	1110343	0	0	0	0	0	0	0	
t^2	360000	435600	518400	608400	705600	810000	921600	1040400	

$$\sigma^2 = \frac{6586988.5}{27.0} - (490)^2 = 4162.7$$

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2} = \frac{4162.75}{(489.953)^2} = 0.0173$$

On obtient la valeur de $\sigma^2_{\theta} < 0.02$ montrant une faible déviation de l'écoulement piston.

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{2}{Pe} = 2 \left(\frac{D}{V.S(\alpha)} \right) \text{ ce qui donne } \frac{2}{Pe} = 2 \left(\frac{D}{V.S(\alpha)} \right) = 0.0173$$

Ceci implique que $Pe = \frac{2}{0.0173} = 115.33$ qui reste supérieur à 100 et se rapprochant donc de l'écoulement piston.

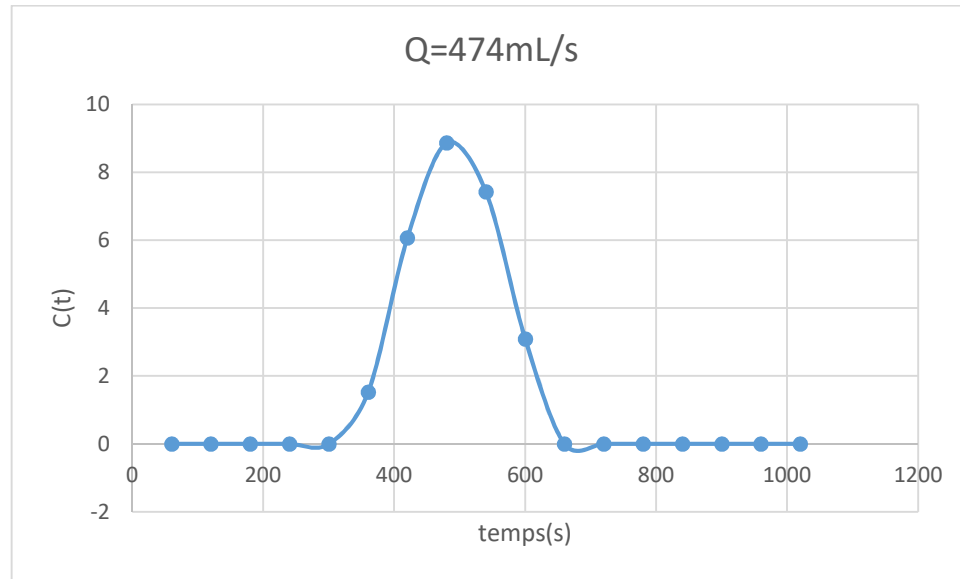


Figure 4- 12 Courbe de réponse de traceur pour une injection impulsion à débit élevé

IV.6.2 Injection échelon

La concentration du traceur à la sortie du réacteur reste constante à C_0 puis brusquement passe de C_0 à 0. Pour cette expérience on charge le réacteur avec l'eau qui ont une concentration C_0 de traceur. À t_0 on alimente le réacteur avec un débit fixe de 360 mL/s et on prend des échantillons chaque minute à la sortie. La concentration du traceur en sortie du réacteur mesurée peut d'être divisée par la concentration initiale C_0 pour obtenir la courbe adimensionnelle $F(t)$ bornée entre 0 et 1. Les résultats sont regroupés dans le **Tableau 4-9**.

Tableau 4- 9 Résultats de Manipulation Échelon à $Q = 3.60 \times 10^{-04} \text{ m}^3/\text{s}$ (360 mL/s)

t(s)	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600
C(t) mg/L	9.733	9.744	9.733	9.712	9.723	9.723	9.712	9.702	6.861	5.67
$\frac{C(t)}{C_0}$	0.856	0.856	0.856	0.854	0.855	0.855	0.854	0.853	0.603	0.499
t(s)	720	780	840	900	960	1020	1080	1140	1200	1260
C(t) mg/L	2.137	1.055	0.170	0	0	0	0	0	0	0
$\frac{C(t)}{C_0}$	0.187	0.092	0.015	0	0	0	0	0	0	0

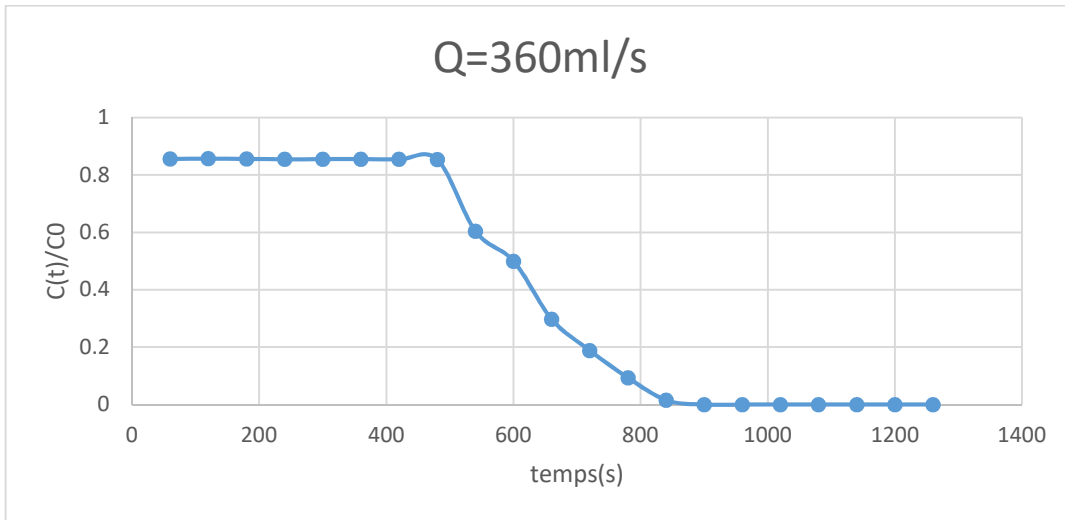


Figure 4- 13 Courbe de réponse de traceur pour une injection échelon

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail a porté sur la mise en œuvre d'un réacteur de désinfection à l'échelle du laboratoire afin de prouver les performances de la conception en spirale. Cette dernière a été imaginée puis testée numériquement dans le but d'éliminer les zones stagnantes et ainsi minimiser les réactions entre le désinfectant qui est le chlore et les matières organiques, favorisées par des temps de contact élevés. Sur la base des principes de similitude, un prototype a été construit au laboratoire et tester sur trois expériences distinctes incluant deux types d'injection de traceur, impulsion et échelon. Par l'utilisation d'indices appropriés et la construction des courbes E et F , il a été montré que la conception se rapproche bien du comportement d'un réacteur piston. Cette conception en spirale est donc viable pour une extrapolation à l'échelle industrielle, assurant ainsi une qualité d'eau désinfectée supérieure.

RÉFÉRENCES

- [1] John C. Crittenden RRT, David W. Hand, Kerry J. Howe and George Tchobanoglous. Water Treatment: Principles and Design: John Wiley & Sons, Inc; 2012.
- [2] Jefferson SAPAB. Introduction to Potable Water Treatment Processes. 9600 Garsington Road, Oxford OX4 2DQ, UK: Blackwell Publishing Ltd; 2006.
- [3] Soukane S, Ait-Djoudi F, Naceur WM, Ghaffour N. Spiral-shaped reactor for water disinfection. Desalination and Water Treatment. 2016;57:23443-58.
- [4] Edward J. Shaughnessy JIMKJPS. Introduction to Fluid Mechanics. 198 Madison Avenue, New York, New York 10016: Oxford University Press, Inc.; 2005.
- [5] Worstell J. Dimensional Analysis Practical Guides in Chemical Engineering. 225 Wyman Street, Waltham, MA 02451, USA: Butterworth-Heinemann publications; 2014.
- [6] Xie Y. Disinfection byproducts in drinking water : formation, analysis, and control: Taylor & Francis e-Library; 2005.
- [7] Lewis.W.M. DEVELOPMENTS IN WATER TREATMENT—2: APPLIED SCIENCE PUBLISHERS LTD; 2005.
- [8] Au MWLAK-K. Water Treatment and Pathogen Control: Process Efficiency in Achieving Safe Drinking Water. London, UK: IWA Publishing; 2004.
- [9] Levenspiel O. Tracer Technology Modeling the Flow of Fluids. Springer New York Dordrecht Heidelberg London: Springer 2012.
- [10] Reimer TMDAJA. Chemical Engineering Design and Analysis. 32 Avenue of the Americas, New York, ny 10013-2473, usa: Cambridge University Press; 2011.
- [11] Zohuri B. Dimensional Analysis and Self-Similarity Methods for Engineers and Scientists Springer International Publishing Switzerland. 2015.
- [12] Munson BR. Fundamentals of Fluid Mechanics. 7th edition ed. 111 River Street, Hoboken, NJ United States of America: John Wiley & Sons, Inc.; 2013.
- [13] Lawler MMBDF. WATER QUALITY ENGINEERING Physical/Chemical Treatment Processes. 111 River Street, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey; 2013.
- [14] Pritchard PJ. Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics eighth edition. United States of America: John Wiley & Sons, Inc; 2011

APPENDICE

Tableau A - 1 Valeurs de Courbe d'étalonnage de Méthylorange

C(mg/L)	5.5	3.6	2.7	1.1	0.73	0.55	0.366	0.183	0.11
λ (nm)	0.591	0.411	0.292	0.177	0.13	0.111	0.089	0.072	0.072

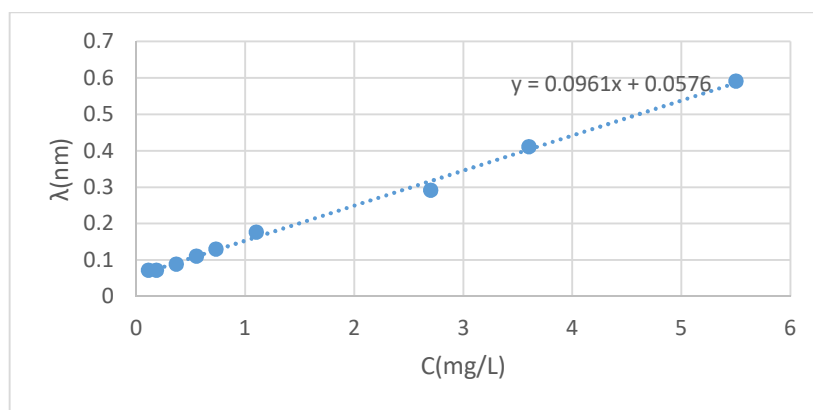


Figure A - 1 Courbe d'étalonnage du traceur de Méthylorange

Tableau A - 2 Valeurs de Courbe d'étalonnage de l'encre magenta

C(mg/L)	3.75	1.875	0.937	0.468	0.234	0.117
λ (nm)	0.877	0.449	0.237	0.112	0.083	0.065

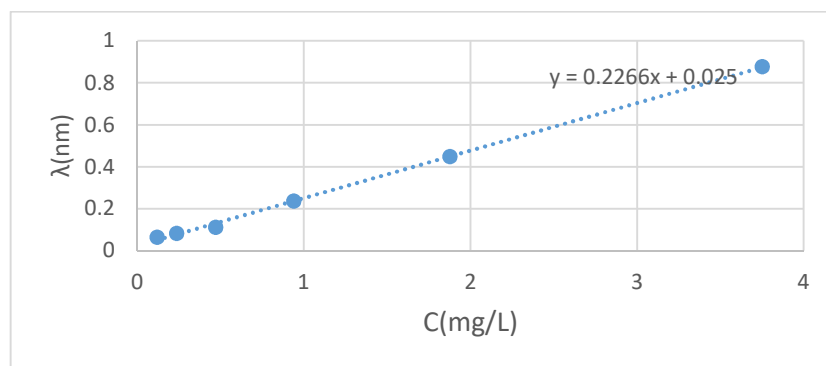


Figure A - 2 Courbe d'étalonnage du traceur de L'encre magenta