



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**وزارة التعليم العالي والبحث العلمي**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE d'ORAN Mohamed Boudiaf**



**Faculté des Sciences**  
**Département de Physique**

**Spécialité : Physique**

**Option : Physique et ses Applications: Matière Molle**

**THESE**  
**Présenté par**

**Mr. LARBI M'hamed**

**Pour l'obtention du diplôme de Magister en Physique**

**Thème**

**LA CONCEPTION SOUS FLUENT D'UN SYSTÈME  
MIXTE FLUIDE LUMIÈRE**

**Soutenue le: 31/ 01/ 2013 devant la commission d'examen composée de :**

<b><u>Qualité</u></b>	<b><u>Nom et Prénoms</u></b>	<b><u>Grade</u></b>	<b><u>Etb d'origine</u></b>
Président	Mr KAMECHE Mostefa	Professeur	USTO-MB
Rapporteur	Mr RAHMANI Bouabdellah	Professeur	USTO-MB
Examineur	Mr LOUNIS Mourad	Professeur	U.KHEMIS-MILIANA
Examineur	Mr TCHOUAR Noureddine	M.Conf. A	USTO-MB

**Année universitaire : 2012/2013**



## *Remerciements*

C'est un plaisir et un moment très agréable de rendre hommage et de former des remerciements aux personnes, d'une manière ou d'une autre qui m'ont apporté leur soutien et contribué à finaliser ce travail.

J'aime bien remercier le professeur **Mr. RAHMANI Bouabdellah** proposant et dirigeant ce travail pour ses compétences scientifiques, sa disponibilité, ses qualités humaines et ses critiques constructives qui m'ont été d'un grand profit.

J'adresse également mes vifs remerciements au professeur **Mr. LOUNIS Mourad**, pour ses connaissances dans son soutien et ses conseils dans le domaine scientifique.

Merci à tous les enseignants qui m'ont prêté main forte dans mon étude de magister et pour les bons moments qu'on a passés ensemble.

J'adresse également ma gratitude et mon profond dévouement à **Mr. BOUDJELLA Abderrahmane** qui m'a soutenu dans la traduction de mon œuvre scientifique.

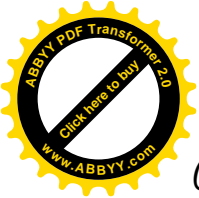
J'aime bien saisir cette occasion pour exprimer ma reconnaissance à tout ce qui m'a aidé de près ou de loin.

Enfin, je me suis redevable à mes proches, à qui les mots ne me suffisent guère de les remercier.



# Sommaire

Introduction générale et orientation du travail.....	1
 <i>Chapitre 1</i> : Introduction a la désinfection par rayonnement ultraviolet	
I. Introduction	4
II. Caractéristiques des ressources et de la demande en eau.....	4
III. Situation du traitement des eaux usées.....	5
IV. Les différents procédés de désinfection.....	5
V. Comparaison de différents procédés de désinfection.....	6
VI. Procède de désinfection par rayonnement ultraviolet.....	7
VI.1. Principe de fonctionnement.....	7
VI.2. Les réacteurs de désinfection par l'UV.....	9
VI.3. Production du rayonnement UV.....	9
VI.4. Action du rayonnement UV sur les micro-organismes.....	12
VI.4.1. Mécanisme de l'inactivation des micro-organismes par l'UV.....	12
VI.4.2. Inactivation des Virus et des bactéries.....	13
VI.4.3. Cinétique de réduction par rayonnement UV.....	13
VI.5. Paramètres influençant l'efficacité de la désinfection.....	16
VI.5.1. Le temps d'exposition.....	16
VI.5. 2. L'intensité UV émise par les lampes.....	16
VI.5. 3. Paramètres de qualité de l'effluent.....	16
VI.5. 4. Résistance des micro-organismes aux rayonnements UV.....	17
VI.5.5. L'effet de l'âge des lampes.....	19
VII. Problématique de la détermination de l'efficacité des réacteurs UV.....	20
VIII. Méthodes de mesure de la dose UV : Biodosimétrie et actinométrie.....	22
IX. Conclusion.....	24

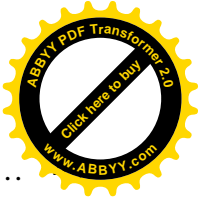


## Chapitre 2: Intensité Du Rayonnement Uv

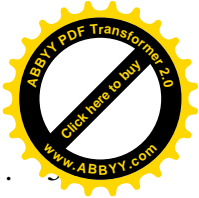
I. Introduction et définitions des termes relatifs au rayonnement UV et sa distribution.....	26
II. Méthodes de mesure de distribution de l'intensité UV.....	27
II.1. Action photochimique du rayonnement.....	27
II.2. Conditions d'absorption d'un photon.....	28
III. Modélisation de la distribution de l'intensité UV.....	30
III.1. Modèles de distribution de l'intensité UV.....	30
III.1. 1. Modèle de sommation des points sources : MPSS.....	30
III.1. 2. Modèle de sommation de segments sources : MSSS.....	34
III.1. 3. Modèle de Ligne source infinie : ILS (Infinite Line Source).....	34
IV. Estimation de la dose en réacteur avec approche systémique.....	34
V. Conclusion.....	36

## Chapitre 3: Simulations par CFD de la distribution de la dose dans le photo- réacteur

I. Introduction.....	39
II. L'étude de l'hydrodynamique dans le photo-réacteur.....	39
II.1 Introduction.....	39
III. Le modèle hydrodynamique.....	40
IV. Modélisation de la turbulence.....	41
IV.1. Modèle k-ε standard.....	42
IV.2. Modèle k-ε RNG.....	43
IV.3. Modèle k-ω standard.....	43
V. Simulation de la distribution des temps d'exposition en réacteur UV.....	44
VI. Préparation de la géométrie et maillage.....	44
VI.1. Spécifications du problème :.....	44
VI.2. Création de la géométrie.....	45



VI.2.1. Démarrage de Gambit.....	
VI.2.2. Création d'un tube circulaire.....	45
VI.2.2.1. Création d'une face circulaire.....	45
VI.2.2.2. Déplacement de la Face créée.....	45
VI.2.2.3. Création d'un volume à partir d'une face tournée .....	45
IV.2.2.4. Assemblages des volumes.....	47
VI.2.3. Création d'un cylindre.....	47
VI.3. Génération du Maillage.....	47
VI.3.1. Création du Maillage.....	48
VI.4. Création des types de conditions aux limites.....	48
VI.5. Enregistrer et exporter.....	49
VII. Principales étapes de simulation sous Fluent.....	49
VII.1. Importation de la géométrie.....	49
VII.2. Vérification du maillage importe.....	49
VII.3. Lissage du maillage (smooth and swap the grid).....	50
VII.4. Vérification de l'échelle.....	50
VII.5. Choix du solveur.....	51
VII.6. Affichage de la grille.....	51
VII.7. Choix du modèle visqueux.....	51
VII.8. Choix du modèle radiation.....	51
VII.9. Définition des caractéristiques du fluide et du solide.....	52
VII.10. Conditions de fonctionnement.....	52
VII.10.1. Conditions aux limites usuelles.....	52
VII.11. Choix des critères de convergence.....	54
VII.12. Initialisation des calculs.....	54
VII.13. Sauvegarde du fichier.....	55



VII.14. Lancement de la simulation.....	5
VIII. Affichage des contours des différentes grandeurs.....	55
VIII.1. Contour de la vitesse d'écoulement.....	55
VIII.2. Vérification de la conservation de débit.....	57
VIII.3. Contour de la pression.....	57
IX. Distribution de la dose.....	58
X. Distribution du taux d'inactivation des micro-organismes.....	60
XI. Conclusion.....	62
Conclusion générale et perspectives.....	63

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES



## Liste des figures

Figure 1.1.	Disponibilité en eau douce dans le monde.....	4
Figure 1.2.	Spectre des rayonnements UV.....	7
Figure 1.3.	Les différents composants d'un réacteur de désinfection des eaux par rayonnement UV.....	9
Figure 1.4	Spectres d'émission relatifs des lampes à basse pression et à moyenne Pression.....	10
Figure 1.5.	Réacteur fermé (a) et réacteur ouvert (b) pour le traitement des eaux par rayonnement UV.....	11
Figure.1.6.	La double hélice de l'ADN (a) et les deux paires de ses bases.....	12
Figure 1.7.	Spectres d'absorbance relatifs des bases de l'ADN et de l'ADN.....	12
Figure 1.8.	Dimérisation photochimique de deux bases de thymine.....	13
Figure 1.9.	Courbes de doses-réponses pour différents types de micro-organismes.....	18
Figure 1.10.	Doses UV nécessaires pour le rabattement de 4 logs (99.99%) pour les bactéries, spores, virus et protozoaires.....	19
Figure 1.11.	Diminution de la puissance UV émise en fonction du temps.....	20
Figure 1.12.	Diminution de l'intensité émise par une lampe moyenne pression dans la bande germicide en fonction du temps.....	20
Figure 1.13.	Exemple d'une courbe dose-réponse pour Coliphage MS2.....	22
Figure 1.14.	Spectres d'absorption pour différents micro-organismes.....	23
Figure 2.1.	L'angle solide $\Omega$ en coordonnées sphériques.....	26
Figure 2.2.	Les niveaux d'énergie des états d'excitation d'une molécule selon la théorie Quantique.....	29
Figure 2.3.	Présentation des termes utilisés dans le modèle MPSS.....	31

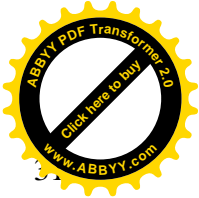


Figure 2.4. Angles de réflexion et de réfraction lors du passage entre deux milieux.....	31
Figure 2.5. Les interfaces air-quartz et quartz-eau.....	32
Figure 2.6. Composantes géométriques de la réfraction, la réflexion et le facteur focus...	33
Figure 2.7. L'intensité moyenne dans le réacteur en fonction de la transmittance....	33
Figure 2.8. Schéma d'un réacteur piston avec distribution de l'intensité et trajectoires Rectilignes.....	35
Figure 2.9. Distribution de l'intensité et des trajectoires pour différentes particules dans un photo-réacteur.....	36
Figure 3.1. Distribution de la dose pour différents modèles de turbulence avec une lampe UV à faible puissance (a) et à forte puissance (b).....	40
Figure 3.2. Géométrie du réacteur.....	44
Figure 3.3. panels généraux du logiciel Gambit.....	45
Figure 3.4.1. Création d'un volume à partir d'une face tournée .....	46
Figure 3.4.2. Création du deuxième volume à partir d'une face tournée .....	46
Figure 3.4.3. Création du troisième volume à partir d'une face tournée .....	46
Figure 3.5. Tube circulaire.....	47
Figure 3.6. Maillage total du réacteur.....	48
Figure 3.7. Importation de la géométrie générée sous Gambit.....	49
Figure 3.8. Vérification du maillage sous Fluent.....	50
Figure 3.9. Lissage du maillage sous fluent.....	50
Figure 3.10. Vérification des unités (mm).....	50
Figure 3.11. Choix du solveur sous Fluent.....	51
Figure 3.12. Modèle de radiation (DO).....	52



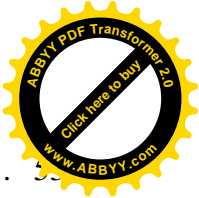


Figure 3.13. Conditions limites de Wall du tube circulaire..... 53

Figure 3.14. Conditions limites de Wall du cylindre..... 54

Figure 3.15 Allures de l'évolution des résidus de calcul (cas laminaire)..... 55

Figure 3.16. Contour de la vitesse moyenne dans le tube circulaire  
(cas laminaire,  $v=0.12\text{m/s}$ )..... 56

Figure 3.16.a. Contour de la vitesse moyenne à l'entrée du tube circulaire..... 56

Figure 3.16.b. Contour de la vitesse moyenne à la sortie du tube circulaire..... 56

Figure 3.16.c. Profils de la vitesse moyenne à l'entrée du tube circulaire suivant  
la ligne tracé..... 56

Figure 3.17. Vérification de la conservation de débit..... 57

Figure 3.18. Contour de la pression dans le tube circulaire (cas laminaire,  $v=0.12\text{m/s}$ )..... 58

Figure 3.18.a. Profils de la pression dans le tube circulaire..... 58

Figure 3.19. Distribution de la dose dans le tube circulaire (cas laminaire,  $v=0.12\text{m/s}$ )..... 59

Figure 3.19.a. Distribution de la dose à l'entrée du tube circulaire..... 59

Figure 3.19.b. Distribution de la dose à la sortie du tube circulaire..... 60

Figure 3.19.c. Profils de la dose dans le tube circulaire..... 60

Figure 3.20. Profils du taux d'inactivation du Coliphage MS2 pour une transmittance  
de 95% (coefficient d'absorption  $\alpha=2.2\text{m}^{-1}$ )..... 61



## Liste des tableaux

Tableau 1.1.	Comparaison entre les différents procédés.....	7
Tableau 1.2.	Caractéristiques des lampes à vapeur de mercure.....	11
Tableau 1.3.	Constante cinétique du 1er ordre.....	14
Tableau 3.1.	Qualité de l'eau brute et ces coefficients d'absorption.....	52



## Liste des notations

### Lettres romaines :

$a, b$  : constantes empiriques du modèle d'abattement avec matières en suspension.

$A_{bs}$  : L'absorbance du milieu ou la densité optique

$A_r$  : l'absorbance de la lame d'eau qui sépare le point du calcul de la gaine du quartz

$A_w$  : l'aire de la section correspondant à l'angle  $\Delta\theta$  avec réfraction [ $m^2$ ]

$A_{w0}$  : l'aire de la section correspondant à l'angle  $\Delta\theta$  sans réfraction [ $m^2$ ]

$C$  : concentration [mol/l]

$c$  : vitesse de la lumière dans le vide =  $2,9979 \cdot 10^8$  [m/s]

$C_{abs}$  : concentration initiale d'éléments absorbants dans la solution [mol/l]

$C_{cal}$  : concentrations calculées [mol/l]

$C_e(s)$  : la transformée de Laplace du signal d'entrée

$D$  : le diamètre d'agitateur [m]

$D$  : coefficient de diffusivité moléculaire ou laminaire [ $m^2/s$ ]

$D_{abs}(t)$  : dose absorbée à l'instant  $t$  [ $mW.s/cm^2$ ,  $mJ/cm^2$ ]

$dl$  : distance parcourue dans la maille suivant la direction de la vitesse [m]

$D_m$  : la dose minimale menaçant la viabilité des micro-organismes [ $mW.s/cm^2$ ,  $mJ/cm^2$ ]

Dose : dose du rayonnement reçue [ $mW.s/cm^2$ ,  $mJ/cm^2$ ]

$D_{ri}$  : dose cumulée sur la trajectoire  $i$  à la distance  $r$  de la gaine du quartz [ $mW.s/cm^2$ ,  $mJ/cm^2$ ]

$dS$  : section élémentaire du réacteur [ $m^2$ ]

$D_t$  : la diffusivité turbulente [ $m^2/s$ ]

$E(t)$  : fonction de distribution des temps de séjour [ $s^{-1}$ ]

$E(\theta)$  : fonction de distribution des temps de séjour en coordonnées réduites

$E_a$  : énergie d'activation [ $J.mol^{-1}$ ]

$E_r$  : l'erreur quadratique relative

$E_{RO}(t)$  : distribution des temps de séjour dans un réacteur ouvert

$E_\lambda$  : l'énergie associée à la longueur d'onde  $\lambda$ , [ $J/einstein$ .]

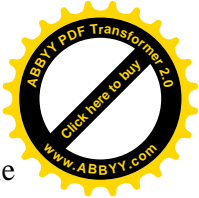
$F(t)$  : la fraction du fluide dont le temps de séjour est inférieur à  $t$

$G(s)$  : la fonction du transfert d'un système

$h$  : constante de Planck =  $6,6261 \cdot 10^{-34}$  [J.s]

$I$  : intensité du flux ou du rayonnement UV [ $mW/cm^2$ ,  $mJ.s^{-1}/cm^2$ , moles photons/ $cm^2.s$ ]

$I(r, z)$  : l'intensité totale émise par les points formant la lampe et reçue par un point récepteur situé à une distance radiale  $r$  de l'axe de la lampe et à une position longitudinale  $z$  [ $W/m^2$ ]



$I(r,z)_i$  : intensité émise par un point de la lampe reçue par un point récepteur situé à une distance radiale  $r$  de l'axe de la lampe et à une position longitudinale  $z$  [ $W/m^2$ ]

$I_0$  : intensité initiale de la lampe [ $W/m^2$ ]

$I_{abs}$  : intensité absorbée [ $mW/cm^2$ ,  $mJ.s^{-1}/cm^2$ ]

$I_c$  : l'intensité calculée par l'UDF intégrée dans Fluent® au centre de la maille en [ $mW/cm^2$ ]

$I_{ens}$  : Intensité énergétique émise par une source ponctuelle [ $W.sr^{-1}$ ]

$k_e$  : Coefficient d'encrassement [ $s^{-1}$ ]

$k$  : l'énergie cinétique turbulente [ $m^2/s^2$ ]

$k'$  : la constante cinétique d'abattement dans le modèle de Watson [ $s^{-1}$ ]

$k_0, a_{enc}$  : paramètres du modèle d'encrassement

$k_1$  : constante cinétique du modèle de réactivation de Sanz (2007) [ $s^{-1}$ ]

$k_2$  : constante cinétique du modèle de réactivation de Kashimada (1996) [ $s^{-1}$ ]

$k_c$  : la constante cinétique d'abattement dans le modèle de Chick [ $s^{-1}$ ]

$k_i$  : constante d'encrassement sur l'intervalle du temps  $\Delta t_i$  [ $s^{-1}$ ]

$k_{moy}$  : coefficient d'encrassement moyenné dans le temps [ $s^{-1}$ ]

$k_{uv}$  : la constante cinétique d'abattement avec rayonnement UV [ $cm^2/mW.s$ ]

$k_{uv0}$  : la constante cinétique d'abattement avec rayonnement UV du modèle de Collins et Selleck [ $s^{-1}$ ]

$l$  : longueur du trajet [cm]

$l$  : trajet optique de la cellule d'irradiation [cm]

$L_{ri}$  : la trajectoire  $i$  située à une distance  $r$  de la gaine du quartz

$M$  : terme de mortalité [ $s^{-1}$ ]

$N_v$  : le nombre d'organismes viables

$N$  : nombre de moles d'actinomètre réagissant

$N_0$  : Le nombre initial de micro-organismes

$N_0'$  : Le nombre des micro-organismes isolés

$N_a$  : Nombre d'Avogadro =  $6,02214.10^{23}$  [moles , photons/einstein]

$N_{ag}$  : la vitesse d'agitation [rad/s, tr/min]

$N_{act,\lambda}$  : le nombre des molécules d'actinomètre réagissant à la longueur d'onde  $\lambda$

$N_p$  : Le nombre des micro-organismes associés aux particules solides



$N_p$  : le nombre de pompage

$N_{ph}$  : nombre de photons absorbés

$P$  : puissance rayonnante de la lampe [ $J.s^{-1}$ , W]

$P_0$  : puissance rayonnante initiale de la lampe [ $J.s^{-1}$ , W]

$p$  : pression statique instantanée

$Q$  : débit de l'écoulement [ $m^3/s$ ]

$Q_a$  : le débit de pompage traversant l'agitateur [ $m^3/s$ ]

$R$  : constante des gaz parfaits  $8.31 J .mol^{-1}.K^{-1}$

$R$  : facteur de réflexion du rayonnement

$r_{||}$  : l'amplitude du rayonnement parallèle.

$r_{\perp}$  : l'amplitude du rayonnement perpendiculaire au plan d'incidence entre deux milieux

$R_1$  : facteur de réflexion de l'interface air/quartz

$R_2$  : facteur de réflexion de l'interface quartz/eau

$R_{ij}$  : tenseur de Reynolds

$s$  : la variable de Laplace.

$S$  : le ratio des survivants

$S(t)$  : surface de la gaine de quartz disponible [ $m^2$ ]

$S_{BF}(t)$  : cinétique de la réaction dans un réacteur batch

$Sc_t$  : le nombre de Schmidt turbulent

$S_m$  : la concentration maximale à atteindre par la photoréactivation.

$S_{RO}(t)$  : cinétique de la réaction dans un réacteur ouvert

$t_{exp}$  : temps d'exposition à l'intensité UV [s]

$T$  : température [K]

$T_0$  : temps de saturation pour le modèle d'encrassement [s]

$T_{10}$  : la transmittance à 10 mm

$T_m$  : le temps minimal de mélange [s]

$T_q$  : transmittances du quartz pour un trajet de 10 mm.

$Tr$  : La transmittance d'un milieu

$t_s$  : temps de séjour dans le réacteur [s]

$t_{sm}$  : temps de séjour moyen dans le réacteur [s]

$T_w$  : transmittances de l'eau pour un trajet de 10 mm.

$u(x,t)$  : la grandeur fluctuante de  $U(x,t)$

$\bar{U}(x,t)$  : la grandeur moyenne dans le temps de  $U(x,t)$   $U_i$



$v_i$  : composante de la vitesse dans la direction  $i$  [m/s]

$V$  : le volume du réacteur [ $m^3$ ]

$V_s$  : volume de solution irradiée [ $cm^3$ ]

$v$  : le volume de contrôle [ $m^3$ ]

$V(t)$  : norme de la vitesse instantanée d'une particule dans le réacteur ouvert [m/s]

$V_a$  : volume du réacteur accessible à l'écoulement [ $m^3$ ]

$v_{maille}$  : norme de la vitesse dans la maille [m/s]

$V_{ri}$  : la vitesse de l'écoulement à une distance  $r$  de la gaine du quartz [m/s]



## Lettres grecques

$\alpha$  : L'âge interne pour une particule [s]

$\mu$  : viscosité dynamique du fluide [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$\alpha_l$  : coefficient d'absorption du liquide [ $\text{cm}^{-1}$ ]

$\alpha_q$  : coefficient d'absorption du quartz [ $\text{cm}^{-1}$ ]

$\delta(t)$  : la fonction delta

$\delta_{ij}$  : tenseur identité

$\delta_q$  : épaisseur de la gaine du quartz [cm]

$\varepsilon$  : le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente [ $\text{m}^2/\text{s}^3$ ]

$\varepsilon_\lambda$  : coefficient d'absorption molaire [ $\text{mol}^{-1}\cdot\text{l}\cdot\text{cm}^{-1}$ ]

$\theta_1$  et  $\theta_2$  : les angles de réfraction

$\lambda$  : longueur d'onde d'irradiation [m, nm]

$\nu$  : viscosité cinématique du fluide [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$\nu$  : fréquence d'oscillation d'un photon [ $\text{s}^{-1}$ ]

$\nu_t$  : la viscosité turbulente [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$\rho$  : distance entre le point émetteur et le point récepteur [m]

$\sigma^2$  : la variance de la distribution des temps de séjour

$\sigma_r^2$  : la variance réduite de la distribution des temps de séjour

$\tau$  : le temps de passage [s]

$\varphi(t)$  : la distribution des fréquences de passage des molécules du traceur à travers la section S

$\omega$  : fréquence de la turbulence ou le taux de dissipation spécifique [ $\text{s}^{-1}$ ]

$\Phi$  : rendement quantique [moles/moles photons]

$\phi(t)$  : la distribution des fréquences de passage des molécules d'eau à travers la section S

$\Phi_{\text{act},\lambda}$  : rendement quantique de l'actinomètre à la longueur d'onde  $\lambda$  [moles/moles photons]



## Abbreviations

mm : millimeter

CC : court-circuit

DLT : la distribution des longueurs des trajectoires

DTS : la distribution des temps de séjour

ILS : infinite line source

MPSS : multiple point source summation

MSSS : multiple segment source summation

UV : ultra-violet





## Liste des notations

### Lettres romaines :

$a, b$  : constantes empiriques du modèle d'abattement avec matières en suspension.

Abs : L'absorbance du milieu ou la densité optique

$A_r$  : l'absorbance de la lame d'eau qui sépare le point du calcul de la gaine du quartz

$A_w$  : l'aire de la section correspondant à l'angle  $\Delta\theta$  avec réfraction [m<sup>2</sup>]

$A_{w0}$  : l'aire de la section correspondant à l'angle  $\Delta\theta$  sans réfraction [m<sup>2</sup>]

C : concentration [mol/l]

$c$  : vitesse de la lumière dans le vide =  $2,9979 \cdot 10^8$  [m/s]

$C_{abs}$  : concentration initiale d'éléments absorbants dans la solution [mol/l]

$C_{cal}$  : concentrations calculées [mol/l]

$C_e(s)$  : la transformée de Laplace du signal d'entrée

D : le diamètre d'agitateur [m]

D : coefficient de diffusivité moléculaire ou laminaire [m<sup>2</sup>/s]

$D_{abs}(t)$  : dose absorbée à l'instant t [mW.s/cm<sup>2</sup>, mJ/cm<sup>2</sup>]

dl : distance parcourue dans la maille suivant la direction de la vitesse [m]

$D_m$  : la dose minimale menaçant la viabilité des micro-organismes [mW.s/cm<sup>2</sup>, mJ/cm<sup>2</sup>]

Dose : dose du rayonnement reçue [mW.s/cm<sup>2</sup>, mJ/cm<sup>2</sup>]

$D_{ri}$  : dose cumulée sur la trajectoire i à la distance r de la gaine du quartz [mW.s/cm<sup>2</sup>, mJ/cm<sup>2</sup>]

dS : section élémentaire du réacteur [m<sup>2</sup>]

$D_t$  : la diffusivité turbulente [m<sup>2</sup>/s]

E(t) : fonction de distribution des temps de séjour [s<sup>-1</sup>]

E( $\theta$ ) : fonction de distribution des temps de séjour en coordonnées réduites

$E_a$  : énergie d'activation [J.mol<sup>-1</sup>]

$E_r$  : l'erreur quadratique relative

$E_{RO}(t)$  : distribution des temps de séjour dans un réacteur ouvert

$E_\lambda$  : l'énergie associée à la longueur d'onde  $\lambda$ , [J/einstein.]

F(t) : la fraction du fluide dont le temps de séjour est inférieur à t

G(s) : la fonction du transfert d'un système

h : constante de Planck =  $6,6261 \cdot 10^{-34}$  [J.s]

I : intensité du flux ou du rayonnement UV [mW/cm<sup>2</sup>, mJ.s<sup>-1</sup>/cm<sup>2</sup>, moles photons/cm<sup>2</sup>.s]

I(r,z) : l'intensité totale émise par les points formant la lampe et reçue par un point récepteur situé à une distance radiale r de l'axe de la lampe et à une position longitudinale z [W/m<sup>2</sup>]

I(r,z)<sub>i</sub> : intensité émise par un point de la lampe reçue par un point récepteur situé à une



distance radiale  $r$  de l'axe de la lampe et à une position longitudinale  $z$  [ $W/m^2$ ]

$I_0$  : intensité initiale de la lampe [ $W/m^2$ ]

$I_{abs}$  : intensité absorbée [ $mW/cm^2$ ,  $mJ.s^{-1}/cm^2$ ]

$I_c$  : l'intensité calculée par l'UDF intégrée dans Fluent® au centre de la maille en [ $mW/cm^2$ ]

$I_{en}$  : Intensité énergétique émise par une source ponctuelle [ $W.sr^{-1}$ ]

$k_e$  : Coefficient d'encrassement [ $s^{-1}$ ]

$k$  : l'énergie cinétique turbulente [ $m^2/s^2$ ]

$k'$  : la constante cinétique d'abattement dans le modèle de Watson [ $s^{-1}$ ]

$k_0, a_{enc}$  : paramètres du modèle d'encrassement

$k_1$  : constante cinétique du modèle de réactivation de Sanz (2007) [ $s^{-1}$ ]

$k_2$  : constante cinétique du modèle de réactivation de Kashimada (1996) [ $s^{-1}$ ]

$k_c$  : la constante cinétique d'abattement dans le modèle de Chick [ $s^{-1}$ ]

$k_i$  : constante d'encrassement sur l'intervalle du temps  $\Delta t_i$  [ $s^{-1}$ ]

$k_{moy}$  : coefficient d'encrassement moyenné dans le temps [ $s^{-1}$ ]

$k_{uv}$  : la constante cinétique d'abattement avec rayonnement UV [ $cm^2/mW.s$ ]

$k_{uv0}$  : la constante cinétique d'abattement avec rayonnement UV du modèle de Collins et Selleck [ $s^{-1}$ ]

$l$  : longueur du trajet [cm]

$l$  : trajet optique de la cellule d'irradiation [cm]

$L_{ri}$  : la trajectoire  $i$  située à une distance  $r$  de la gaine du quartz

$M$  : terme de mortalité [ $s^{-1}$ ]

$N_v$  : le nombre d'organismes viables

$N$  : nombre de moles d'actinomètre réagissant

$N_0$  : Le nombre initial de micro-organismes

$N_0'$  : Le nombre des micro-organismes isolés

$N_a$  : Nombre d'Avogadro =  $6,02214.10^{23}$  [moles, photons/einstein]

$N_{ag}$  : la vitesse d'agitation [rad/s, tr/min]

$N_{act,\lambda}$  : le nombre des molécules d'actinomètre réagissant à la longueur d'onde  $\lambda$

$N_p$  : Le nombre des micro-organismes associés aux particules solides

$N_p$  : le nombre de pompage



$N_{ph}$  : nombre de photons absorbés

$P$  : puissance rayonnante de la lampe [ $J.s^{-1}$ , W]

$P_0$  : puissance rayonnante initiale de la lampe [ $J.s^{-1}$ , W]

$p$  : pression statique instantanée

$Q$  : débit de l'écoulement [ $m^3/s$ ]

$Q_a$  : le débit de pompage traversant l'agitateur [ $m^3/s$ ]

$R$  : constante des gaz parfaits  $8.31 J .mol^{-1} .K^{-1}$

$R$  : facteur de réflexion du rayonnement

$r_{||}$  : l'amplitude du rayonnement parallèle.

$r_{\perp}$  : l'amplitude du rayonnement perpendiculaire au plan d'incidence entre deux milieux

$R_1$ : facteur de réflexion de l'interface air/quartz

$R_2$  : facteur de réflexion de l'interface quartz/eau

$R_{ij}$  : tenseur de Reynolds

$s$  : la variable de Laplace.

$S$  : le ratio des survivants

$S(t)$  : surface de la gaine de quartz disponible [ $m^2$ ]

$S_{BF}(t)$  : cinétique de la réaction dans un réacteur batch

$Sc_t$  : le nombre de Schmidt turbulent

$S_m$  : la concentration maximale à atteindre par la photoréactivation.

$S_{RO}(t)$  : cinétique de la réaction dans un réacteur ouvert

$t_{exp}$  : temps d'exposition à l'intensité UV [s]

$T$  : température [K]

$T_0$  : temps de saturation pour le modèle d'encrassement [s]

$T_{10}$  : la transmittance à 10 mm

$T_m$  : le temps minimal de mélange [s]

$T_q$  : transmittances du quartz pour un trajet de 10 mm.

$Tr$  : La transmittance d'un milieu



$t_s$  : temps de séjour dans le réacteur [s]

$t_{sm}$  : temps de séjour moyen dans le réacteur [s]

$T_w$  : transmittances de l'eau pour un trajet de 10 mm.

$u(x,t)$  : la grandeur fluctuante de  $U(x,t)$

$\bar{U}(x,t)$  : la grandeur moyenne dans le temps de  $U(x,t)$

$U_i$  : composante de la vitesse dans la direction  $i$  [m/s]

$V$  : le volume du réacteur [ $m^3$ ]

$V_s$  : volume de solution irradiée [ $cm^3$ ]

$v$  : le volume de contrôle [ $m^3$ ]

$V(t)$  : norme de la vitesse instantanée d'une particule dans le réacteur ouvert [m/s]

$V_a$  : volume du réacteur accessible à l'écoulement [ $m^3$ ]

$v_{maille}$  : norme de la vitesse dans la maille [m/s]

$V_{ri}$  : la vitesse de l'écoulement à une distance  $r$  de la gaine du quartz [m/s]

## Lettres grecques

$\alpha$  : L'âge interne pour une particule [s]

$\mu$  : viscosité dynamique du fluide [ $kg \cdot s^{-1}$ ]

$\alpha_l$  : coefficient d'absorption du liquide [ $cm^{-1}$ ]

$\alpha_q$  : coefficient d'absorption du quartz [cm]

$\delta(t)$  : la fonction delta

$\delta_{ij}$  : tenseur identité

$\delta_q$  : épaisseur de la gaine du quartz [cm]

$\varepsilon$  : le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente [ $m^2/s^3$ ]

$\varepsilon_\lambda$  : coefficient d'absorption molaire [ $mol^{-1} \cdot l \cdot cm^{-1}$ ]

$\theta_1$  et  $\theta_2$  : les angles de réfraction

$\lambda$  : longueur d'onde d'irradiation [m, nm]

$\nu$  : viscosité cinématique du fluide [ $m^2/s$ ]

$\nu$  : fréquence d'oscillation d'un photon [ $s^{-1}$ ]

$\nu_t$  : la viscosité turbulente [ $m^2/s$ ]



$\rho$  : distance entre le point émetteur et le point récepteur [m]

$\sigma^2$  : la variance de la distribution des temps de séjour

$\sigma_r^2$  : la variance réduite de la distribution des temps de séjour

$\tau$  : le temps de passage [s]

$\varphi(t)$  : la distribution des fréquences de passage des molécules du traceur à travers la section S

$\omega$  : fréquence de la turbulence ou le taux de dissipation spécifique [ $s^{-1}$ ]

$\Phi$  : rendement quantique [moles/moles photons]

$\phi(t)$  : la distribution des fréquences de passage des molécules d'eau à travers la section S

$\Phi_{act,\lambda}$  : rendement quantique de l'actinomètre à la longueur d'onde  $\lambda$  [moles/moles photons]

## Abbreviations

mm : millimeter

CC : court-circuit

DLT : la distribution des longueurs des trajectoires

DTS : la distribution des temps de séjour

ILS : infinite line source

MPSS : multiple point source summation

MSSS : multiple segment source summation

UV : ultra-violet



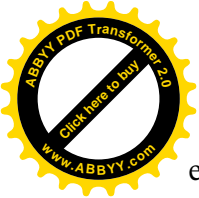
## Introduction générale et orientation du travail

La demande croissante en eau dans le monde exerce une pression importante sur les ressources naturelles menaçant de pénurie un bon nombre de pays. Les premiers concernés par ce problème sont les pays à climat semi-arides. Dans ce cas, la recherche de ressources non conventionnelles s'avère nécessaire. La réutilisation des eaux usées se présente parmi les solutions envisageables à condition d'un traitement poussé qui ramène ces eaux aux normes requises permettant leur utilisation dans l'irrigation des cultures, des boulevards et les espaces verts des agglomérations. Tout système de traitement des eaux en vue de leur réutilisation nécessite la désinfection de ces eaux par l'élimination des agents pathogènes existants.

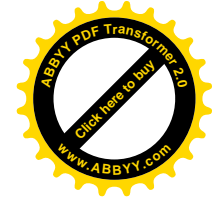
Le dispositif de traitement, bactéricide, a pour principe de générer des rayons ultra-violets au sein d'une chambre d'irradiation. Ces rayons que l'on explicitera plus loin, irradient les cellules vivantes contenues dans le liquide traversant l'appareil. Le principe de base, connu depuis le début du siècle, bénéficie aujourd'hui de matériaux nouveaux (lampes à haut pouvoir germicide, et chambre d'irradiation à haut coefficient de réflexion), et d'une maîtrise totale des paramètres annexes de fonctionnement (environnement, débit, application). La qualité de l'eau étant depuis quelques années pointée du doigt, le principe de décontamination par UV s'est alors beaucoup développé.

Dans le chapitre (1) nous rappelons les différentes techniques de désinfection en comparant leurs coûts et performances. Ces différents procédés présentent des avantages et des inconvénients, comme le risque de formation de composés toxiques lors du traitement par chloration, la complexité de l'utilisation de l'ozonation. Nous détaillons ensuite la technique de désinfection par rayonnement UV en présentant son principe de fonctionnement et les différents paramètres qui interviennent et peuvent influencer son rendement. On présente ainsi les techniques utilisées pour caractériser la dose reçue en réacteur continu et les avantages que présente l'actinométrie.

Dans le chapitre (2) nous rappelons l'étude expérimentale et la modélisation de la distribution de l'intensité dans le réacteur. En partant d'un protocole initialement conçu pour la mesure de la puissance des lampes UV, l'étude expérimentale permet le suivi de la réaction de l'actinomètre. Le but est la caractérisation des cinétiques de la réaction photochimique dans un milieu à transmittance variable et la détermination de l'intensité dans le réacteur avec une technique non intrusive. Les résultats de la partie expérimentale sont utilisés dans la caractérisation de la distribution spatiale de l'intensité dans le réacteur en utilisant deux modèles,



et la modélisation de la réaction photochimique dans un réacteur.



Dans le chapitre (3) nous rappelons la modélisation locale du réacteur UV en utilisant le code de CFD Fluent®. La modélisation se base sur la modélisation de l'hydrodynamique, la distribution de l'intensité et finalement le couplage de ces deux modèles pour calculer le transport avec réaction. La modélisation hydrodynamique a été réalisée en régime laminaire vu les conditions opératoires qui ont imposé un nombre de Reynolds égal à 247.2, toutefois des calculs en régime turbulent ont été réalisés également, pour étudier et examiner la sensibilité du modèle général du transport avec réaction photochimique au modèle de fermeture choisi et au paramètre de la diffusivité turbulente.

Dans ce travail notre démarche consiste à décomposer l'étude de la dose en ses composantes élémentaires, l'intensité et le temps d'exposition. Dans le réacteur c'est un système où l'intensité est contrôlée et homogène dans tout le domaine ainsi que le temps d'exposition qui est le même pour toutes les particules.



**CHAPITRE 1**

**INTRODUCTION A LA**

**DESINFECTION PAR**

**RAYONNEMENT ULTRAVIOLET**



## I. Introduction

Les eaux représentent plus de 70 % de la surface totale de la terre, toutefois la part mobilisable en eau douce ne dépasse pas 2,5 %. Cette ressource est bien rare et aussi inégalement répartie sur les différentes zones dans le monde. Les Nations Unies prévoient qu'avec l'accroissement de la demande en eau et sa disponibilité, la pénurie va toucher 2 à 7 milliards de personnes dans la deuxième moitié du 21ème siècle. La situation des pays et des régions du globe dont les ressources en eau disponibles sont entre 1700 et 1000 mètres cubes par an et par personne est qualifiée de stress hydrique, toutefois, les pays du Maghreb, selon une étude des Nations Unies et la FAO en 2007, est située dans une région où les ressources disponibles sont inférieures à ce seuil et elle souffre ainsi d'une pénurie d'eau (figure 1.1) [1].

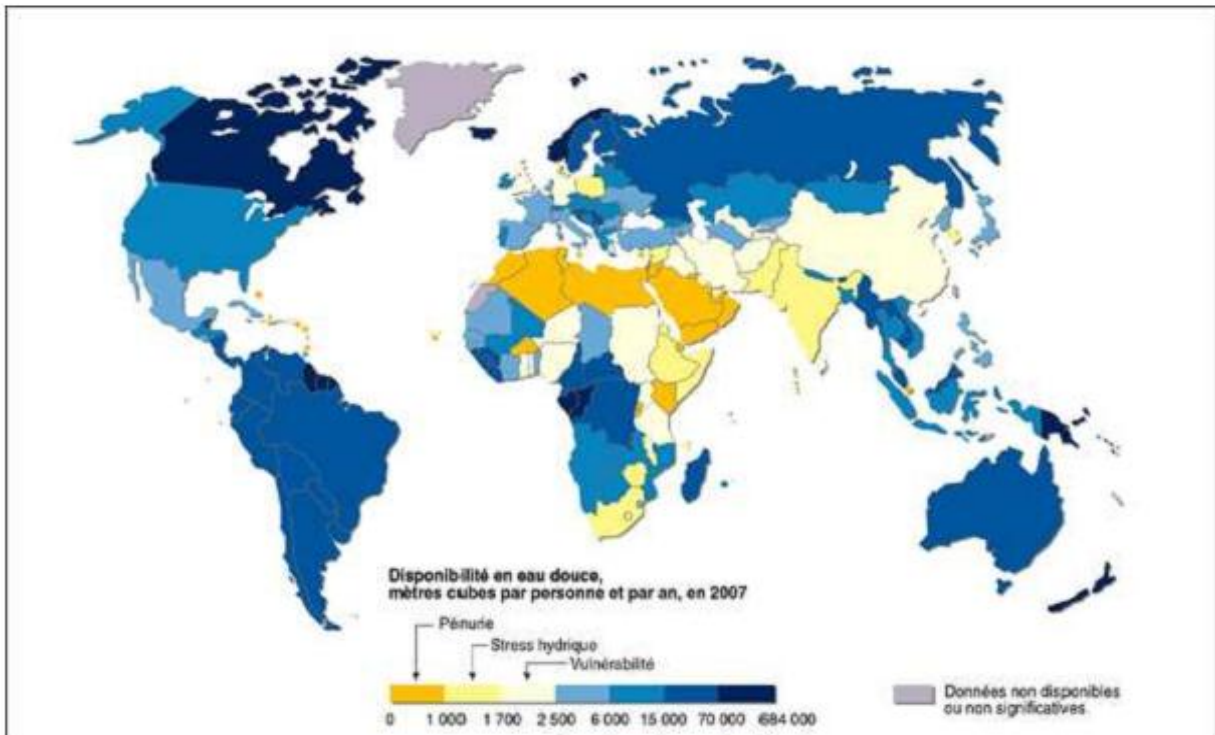


Figure 1.1 Disponibilité en eau douce dans le monde [2]

## II. Caractéristiques des ressources et de la demande en eau

La balance actuelle: demande en eau–ressources naturelles, enregistre un avantage considérable en faveur des ressources. Toutefois les taux de croissance de la demande en eau pour les différents secteurs d'une part et les limites des ressources en eau d'autre part, auront des incidences importantes sur l'état de cette balance. Le rôle important que joueront les eaux usées dans la stratégie nationale de mobilisation de ressources alternatives d'eau; dans ce cas, il est nécessaire dès à présent de caractériser les performances des systèmes de traitement des eaux usées afin de définir les mesures complémentaires qu'il faudra prendre pour permettre le développement de la pratique de réutilisation de ces eaux [3].



### III. Situation du traitement des eaux usées

L'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation de tous les types de cultures est autorisée mis à part les légumes consommés crus ou cuits. Cette réglementation largement inspirée des recommandations de l'organisation mondiale de la santé (OMS) ne permet pas l'allègement ou la levée des restrictions imposées à la réutilisation des eaux usées tout en assurant des conditions minimales de sécurité sanitaire des usagers et des consommateurs. La réutilisation sans restrictions et sans risques majeurs des eaux usées dans l'irrigation de tout type de cultures, dans l'irrigation d'espaces verts ou d'espaces récréatifs ouverts au public, nécessite avant tout une adéquation de la qualité des eaux par l'élimination efficace et fiable des agents pathogènes. Le développement de la réutilisation des eaux épurées, par la diversification des usages notamment, ne pourra se faire qu'en produisant une eau de meilleure qualité. Cet objectif ne pourra être atteint que par l'amélioration des performances des procédés de traitement secondaires et l'introduction de traitements complémentaires efficaces et fiables [3].

### IV. Les différents procédés de désinfection

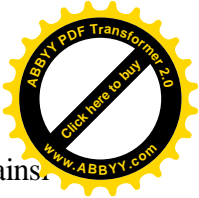
Le risque sanitaire majeur posé par la réutilisation des eaux usées est lié à la présence potentielle dans ces eaux de micro-organismes pathogènes (bactéries pathogènes, virus entériques, kystes protozoaires, parasites...). Les traitements complémentaires, au stade tertiaire du traitement, ont donc pour objectif principal la désinfection [2].

#### IV.1. La chloration

Le chlore est un agent oxydant fort qui réagit facilement avec plusieurs substances organiques et inorganiques trouvées dans les eaux. Il est particulièrement efficace pour détruire les bactéries, mais moins efficace contre les virus. Aux fins de traitement tertiaire, le chlore est utilisé sous les formes suivantes : chlore gazeux, hypochlorite de sodium (eau de javel) ou bioxyde de chlore. Au plan économique, il s'agit d'une technologie dont les coûts sont les plus faibles parmi toutes les techniques éprouvées. Au plan de la sécurité, la manipulation du chlore, notamment sous forme gazeuse, nécessite d'importantes mesures de protection pour le personnel de la station d'épuration et représente un risque pour la sécurité publique lors du transport [2].

#### IV.2. L'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 proportion 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 que la chloration. Les inconvénients de l'ozonation des eaux sont essentiellement d'ordre économique, le procédé entraîne des coûts élevés d'investissement et d'exploitation [2].

### **IV.3. Les ultraviolets**

Le dispositif de traitement a pour principe de générer des rayons ultraviolets au sein d'une chambre d'irradiation. Ces rayons irradient les cellules vivantes contenues dans le liquide traversant l'appareil. Le système de décontamination de l'eau par UV possède de nombreux avantages. Le plus intéressant est que la désinfection par UV ne s'accompagne pas de la formation d'un produit de réaction avec les matières organiques de l'eau. L'utilisation de l'appareil est simple, il est facilement adaptable sur les systèmes hydrauliques déjà en place, son entretien est réduit et son coût de fonctionnement est relativement bas. Toutefois le bon fonctionnement de l'appareil nécessite une eau de bonne transmittance [2].

## **V. Comparaison de différents procédés de désinfection**

Le choix de la technique de désinfection dépend de plusieurs facteurs. Les plus importants sont l'efficacité du procédé face aux bactéries et aux virus, sa faisabilité et les coûts additionnels dus à son intégration dans les stations d'épuration. En 1986, l'U.S EPA a réalisé une étude où elle a récapitulé les caractéristiques fonctionnelles des différents procédés de désinfection et dont nous avons tiré le tableau 1.1. Il ressort du tableau 1.1 les points suivants La chloration présente, malgré son coût de fonctionnement faible, de trop grands risques pour l'environnement. De plus, elle ne garantit pas une désinfection virale efficace.

- L'ozonation est le traitement qui présente le plus des inconvénients financiers et techniques, malgré ses performances très élevées.
- La désinfection par UV présente le plus d'avantages surtout si elle est associée à une filtration préalable qui optimisera ses performances. C'est la technique la plus utilisée actuellement en Amérique du nord et dans de nombreux pays méditerranéens [7].

Considérations	Chloration	Ozonation	Rayonnement UV
Inactivation bactérienne	Bonne	Bonne	Bonne
Inactivation virale	Faible	Bonne	Bonne
Toxicité pour la vie aquatique	Elevée	Faible	Non
Formation de produits secondaires nuisibles	Oui	Faible	Non
Corrosion	Oui	Oui	Non
Risque pour le personnel exploitant	Oui	Oui	Faible
Transport requis	Oui	Non	Non
Complexité relative de la technologie	Simple à Modérée	Elevée	Simple à Modérée
Contrôle du procédé	Développé	Assez bien développé	Assez bien développé
Fiabilité des équipements	Bonne	Moyenne à bonne	Moyenne à bonne
Taille de la STEP	Toutes les tailles	Moyennes et grandes	Petites et moyennes et de plus en plus pour les grandes
Niveau de prétraitement requis	Aucun	Secondaire	Secondaires
Exploitation et maintenance	Minime	Elevé	Moyen
Temps de contact requis	Long	Moyen	Court

Tableau 1.1. Comparaison entre les différents procédés [4]

## VI. Procédé de désinfection par rayonnement ultraviolet

La désinfection des eaux par rayonnement UV a été abordée dès 1910. Ce n'est qu'à partir des années 70 qu'elle s'est effectivement développée. Actuellement elle est répandue en Amérique du Nord, on y compte plus de 1000 installations, depuis des petites (30m<sup>3</sup>/j) jusqu'à de grandes stations (300000 m<sup>3</sup>/j). Elle est considérée comme la meilleure alternative à la chloration [2].

### VI.1. Principe de fonctionnement

Les rayonnements UV sont des ondes lumineuses de longueur d'onde comprise entre 100 et 400 nm (Figure 1.1). Leur effet germicide dépend de la longueur d'onde. Le spectre de la lumière UV se divise en 3 bandes :

- spectre UVA : de 315 à 400 nm
- spectre UVB : de 280 à 315 nm
- spectre UVC : de 180 à 280 nm

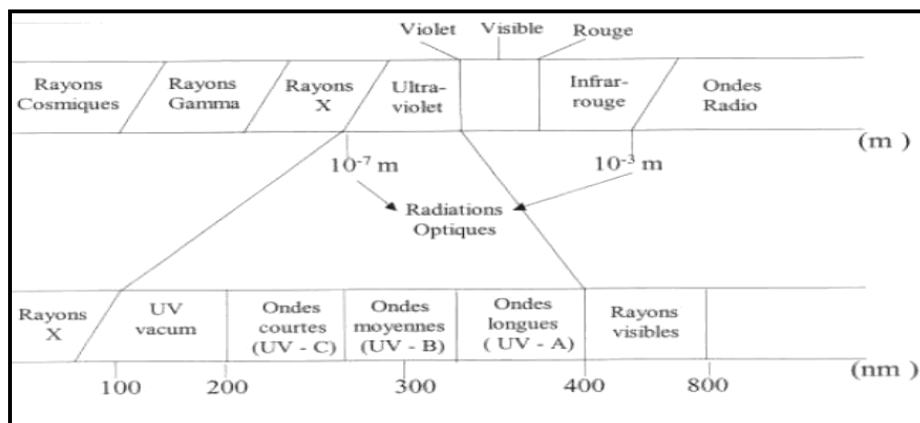
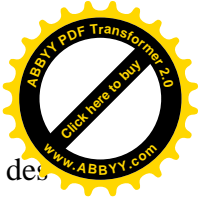
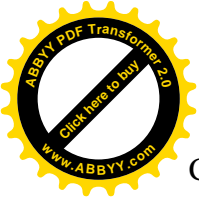


Figure 1.2. Spectre des rayonnements UV [5]



Ces rayons UV ont une action photochimique sur les corps, action qui se manifeste par des réactions très diverses telles que :

- pigmentation de la peau (UV-A),
- vitamiation des produits alimentaires (UV-B),
- destruction des micro-organismes (UV-C),
- formation d'ozone (pour des longueurs d'onde de l'ordre de 185 nm).

L'action stérilisante est due à la perturbation apportée par le rayonnement ultraviolet dans la structure chimique des constituants de la cellule vivante, et par suite, de leur fonctionnement.

La courbe d'adsorption de l'ADN (acide désoxyribonucléique), véritable support d'information génétique dans le noyau des cellules, pour des longueurs d'onde comprises entre 200 et 285 nm met en évidence un pic à la longueur d'onde de 253.7 nm. Le meilleur effet bactéricide est obtenu pour des longueurs d'onde entre 250 et 260 nm. Suivant la quantité d'énergie UV reçue, la cellule vivante sera soit stérilisée (effet bactériostatique) soit détruite (effet bactéricide). L'effet bactériostatique dans le cas d'une absorption modérée d'énergie UV, permet à la cellule de continuer à vivre, mais sans avoir la possibilité de se reproduire et de se muter. Cette cellule est donc condamnée à disparaître. L'effet bactéricide, dans le cas d'une absorption d'énergie supérieure à une certaine dose, permet la destruction de la cellule. Ce sont les UVc, compris entre 200 et 280 nm, qui sont les plus germicides. Gates (1930) a trouvé que l'effet maximal a été obtenu avec des ondes de 260 nm. L'efficacité des rayons UV est fonction de la dose absorbée par les micro-organismes. Cette dose est définie par le produit de l'intensité UV par le temps d'exposition des germes aux rayonnements.

Les expériences réalisées en utilisant des intensités différentes ont montré que l'effet sur les micro-organismes est indépendant de l'intensité utilisée et ne dépend que de la dose d'énergie reçue par les micro-organismes [5].

Pour des radiations de longueur d'onde  $\lambda$ , l'énergie associée est donnée par la formule de Planck :

$$E_{\lambda} = N_a \cdot h \cdot c / \lambda \quad (1.1)$$

Où,

$h$  : constante de Planck =  $6,6261 \cdot 10^{-34}$  J.s ,

$c$  : vitesse de la lumière dans le vide =  $2,9979 \cdot 10^8$  m/s

$N_a$  : Nombre d'Avogadro =  $6,02214 \cdot 10^{23}$  photons/einstein (1 einstein = 1 mole de photons)

$E_{\lambda}$  est exprimée en J/einstein.

En considérant que les réactions photochimiques procèdent toujours par interaction entre un photon et une molécule, l'énergie des radiations, en photons/einstein, est directement comparable à l'énergie de liaison/mole. En utilisant la formule de Planck, on peut constater que

l'énergie produite par les radiations de longueur d'ondes 253,7 nm est suffisante pour rompre des liaisons importantes dans le système microbien tel que les liaisons O-H, C-H, C-N, ou C-C [5].

## VI.2. Les réacteurs de désinfection par l'UV

Les réacteurs de désinfection des eaux par rayonnement UV sont constitués essentiellement d'un canal ou d'une conduite fermée, les lampes UV, les gaines de quartz, les modules d'alimentation électrique et les différents capteurs pour le contrôle de la transmittance de l'eau, sa température et de la mesure de l'intensité UV dans le réacteur (figure 1.4)

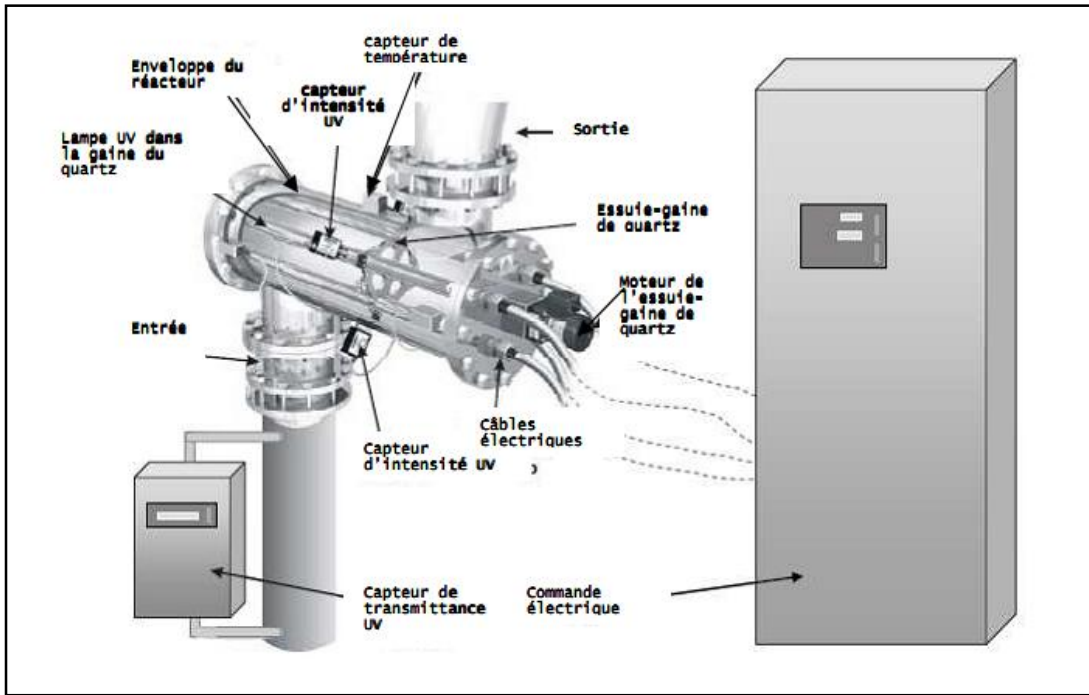


Figure 1.3. Les différents composants d'un réacteur de désinfection des eaux par rayonnement UV [6].

## VI.3. Production du rayonnement UV

La source d'émission UV utilisée en désinfection est la lampe à vapeur de mercure. Il s'agit de lampes à arc électrique qui provoquent l'excitation des atomes de mercure, puis l'émission de radiations par retour à leur état fondamental. Le spectre d'émission des lampes dépend de la pression de mercure dans les lampes [6].

### a . Lampes basse pression

Les lampes à vapeur de mercure basse pression émettent une lumière quasi-monochromatique à 254 nm, qui correspond à la bande optimale de l'effet germicide. Elles se présentent sous la forme de longs tubes de 1,5 à 2 cm de diamètre. Les longueurs standard sont de 91,4 et 162,6 cm pour des longueurs d'arc respectives de 76,2 et 147,3 cm. Les lampes sont généralement insérées à l'intérieur d'une gaine de quartz ce qui permet de les immerger directement dans l'eau à traiter

et empêcher le dépôt des particules transportées par l'eau directement sur la lampe, ce qui peut altérer considérablement le rendement et complique les opérations d'entretien et de maintenance. Le quartz transmet jusqu'à 90% de la radiation provenant de la lampe.

L'intensité transmise est également dépendante du voltage, de la température autour de la lampe, de son âge et de son degré d'encrassement. Les lampes à vapeur de mercure sont très sensibles aux variations de température ; l'optimal se situerait autour de 50°C. La température influence la pression qui peut être maintenue au niveau de la lampe. Une trop basse température provoque une chute de pression, les atomes de mercure s'en trouvent moins comprimés et donc plus difficilement excitables, d'où diminution de la quantité électrique transformée. En cas d'augmentation de la température, la pression augmente ; le cas des lampes moyenne pression, l'excitation des électrons des atomes de mercure sera très grande mais l'énergie lumineuse sera libérée dans un spectre beaucoup plus étendu que 254 nm (Figure 1.2) [6].

**b. Lampes moyenne et haute pression**

Quand la pression augmente, l'intensité lumineuse est augmentée mais le spectre de dispersion de la lumière générée n'est pas limité à la zone germicide : il s'étend jusque dans le visible. L'énergie perdue par la production de chaleur est beaucoup plus grande pour les lampes moyenne pression que pour les lampes basse pression mais moins de lampes sont requises pour fournir une dose donnée, vu la très haute intensité de la décharge. Les lampes à moyenne pression sont utilisées pour des stations à gros débit et coûtent beaucoup plus cher que celles à basse pression [7].

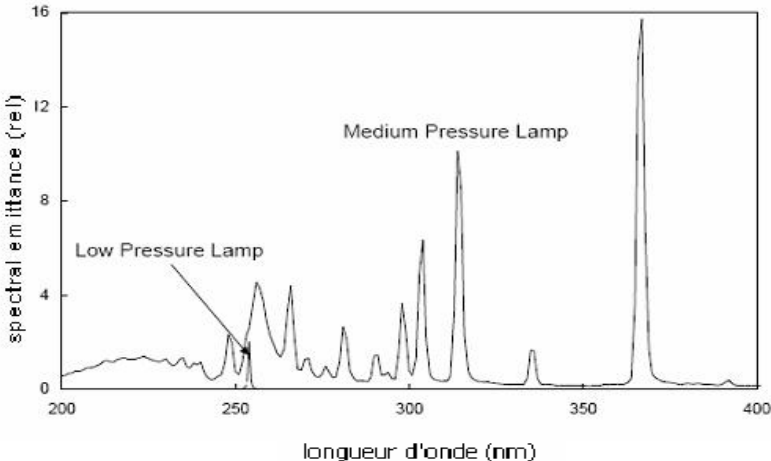


Figure 1 .4. Spectres d'émission relatifs des lampes à basse pression et à moyenne pression [7].

**VI.3.1. Les modules d'alimentation**

Ils fournissent la tension électrique nécessaire à l'allumage et maintiennent la stabilité du courant électrique, le taux de conversion de la puissance électrique en

puissance germicide varie de 10 à 38 % en fonction du type des lampes utilisées (tableau 1.3). Les intensités à mettre en œuvre pour assurer la désinfection des eaux résiduaires sont de l'ordre de  $100 \text{ mW par cm}^2$  pour un temps de contact de 10 à 20 secondes. Pour assurer une désinfection satisfaisante en permanence, l'appareil doit fournir une dose de rayonnement UV minimale de  $16 \text{ mW.s/cm}^2$  au point le plus éloigné de la chambre de contact quel que soit le débit entrant et la qualité de l'eau à désinfecter [4].

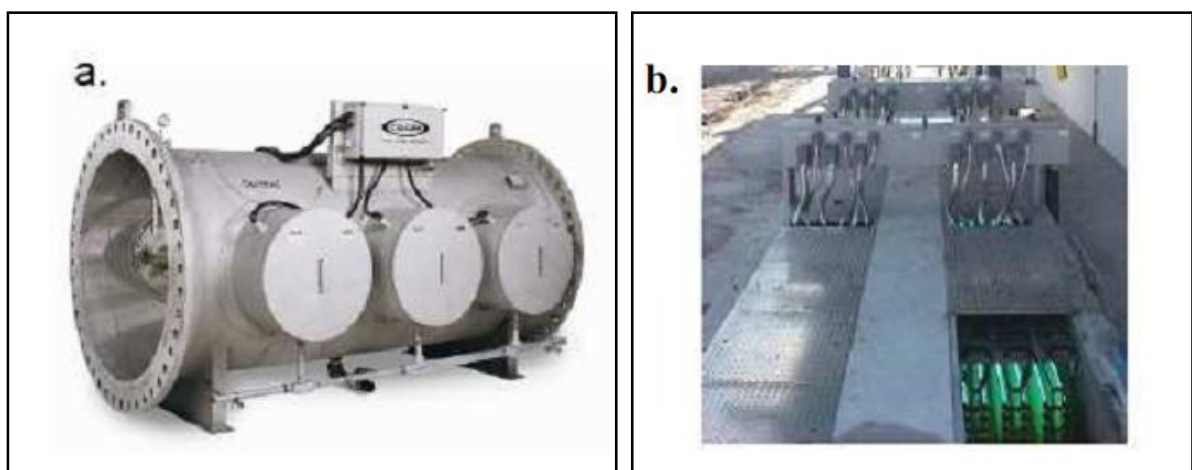
Caractéristiques des lampes	Lampe à vapeur de mercure à basse pression	Lampe à vapeur de mercure moyenne pression
Longueur d'onde d'émission	Monochromatique à 254 nm	Polychromatique
Durée de vie	8000 à 10000 h	4000 à 8000 h
Puissance disponible	15 à 200 W	0,4 à 7 KW
Température de fonctionnement	40 °C	600 à 900 °C
Taux de conversion ( $P_{\text{germicide}}/P_{\text{électrique}}$ )	35 à 38 %	10 à 20 %

**Tableau 1.2. Caractéristiques des lampes à vapeur de mercure [6]**

### VI.3.2. Les réacteurs

On peut rencontrer deux types de réacteurs :

- les réacteurs fermés sous pression, ils sont utilisés essentiellement pour la potabilisation des eaux, (figure 1.3.a)
- les réacteurs ouverts appelés aussi canaux ouverts, ils sont utilisés pour la désinfection des eaux usées : les lampes y sont regroupées par modules avec un alignement vertical. Dans toutes ces configurations, les lampes sont immergées et un dispositif de maintien du niveau d'eau au-dessus des lampes est nécessaire. (figure1.3.b) [6].



**Figure 1.5. Réacteur fermé (a) et réacteur ouvert (b) pour le traitement des eaux par rayonnement UV [6].**



## VI.4. Action du rayonnement UV sur les micro-organismes

### VI.4.1. Mécanisme de l'inactivation des micro-organismes par l'UV

Pour qu'il y ait désinfection, les lampes doivent fournir une radiation lumineuse dont le spectre d'émission se situe dans la région de l'UVc laquelle est la plus efficace à produire un effet germicide. On observe ce dernier, lorsque l'énergie de la radiation est absorbée au niveau du matériel génétique (A.R.N et A.D.N). Ce dernier contient l'information qui est transmise d'une génération à l'autre et qui permet de perpétuer les caractères propres à l'espèce. Plus particulièrement, ce sont les nucléotides, éléments constitutifs des acides nucléiques qui absorbent le rayonnement, soit les bases puriques (adénosine (A) et guanine (G)) et les bases pyrimidiques (thymine (T) et cytosine (C)) (figure 1.4) [8].

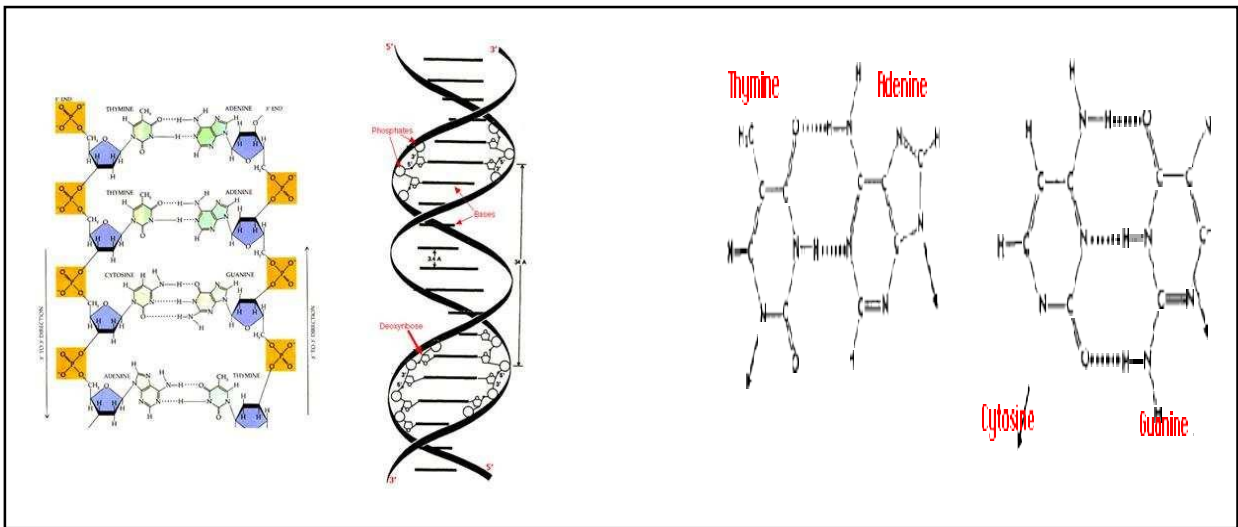


Figure.1.6. La double hélice de l'ADN (a) et les deux paires de ses bases [11].

Le spectre d'absorption des acides nucléiques se situe dans une longueur d'onde entre 210 et 310 nm avec un maximum à 260 nm (figure 1.5).

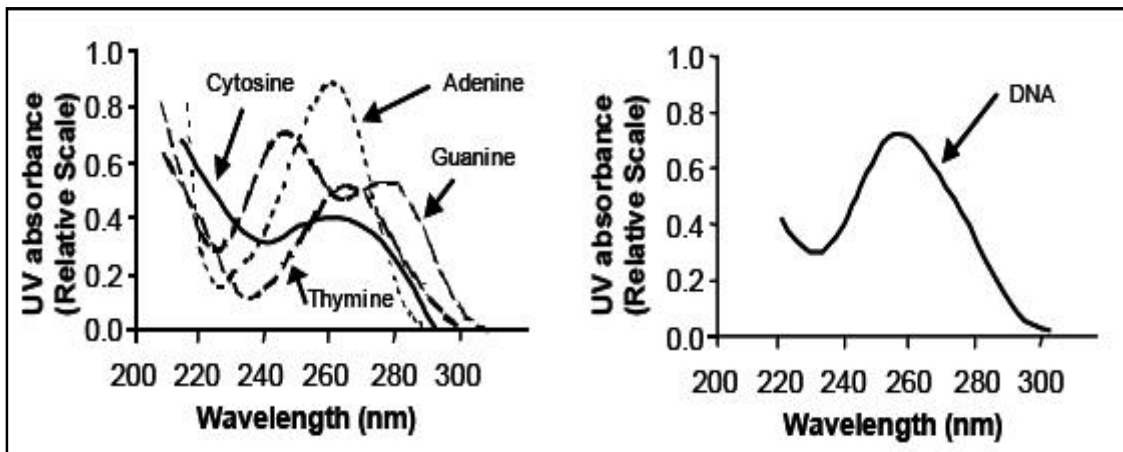
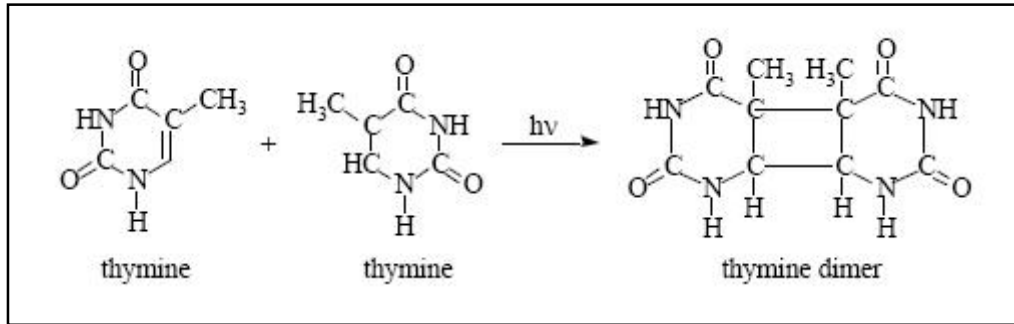


Figure 1.7. Spectres d'absorbance relatifs des bases de l'ADN et de l'ADN [12].

suivant l'exposition aux UV, il y a une variété de photoproduits formés au niveau de l'A.D.N. dont le plus important est le dimère de pyrimidines adjacentes sur un des brins d'A.D.N. et dont les 3 types répertoriés sont : T-T (appelé le dimère de thymine et le plus fréquent), T-C et C-C (figure 1.6). Le dimère crée une distorsion au niveau de l'A.D.N., rendant inefficace voire impossible la réplication du micro-organisme ; il en résulte la mort cellulaire ou l'apparition d'une génération de mutants non viables ou incapables de se reproduire [7].



**Figure 1.8. Dimérisation photochimique de deux bases de thymine [7].**

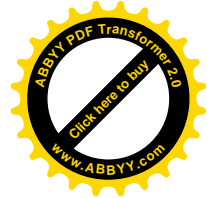
Quelques micro-organismes (en particulier bactéries) ont un mécanisme de réparation qui dissocie les dimères de thymine, ce processus est déclenché par l'absorption de la lumière UVA, elle est visible et s'appelle ainsi la photoreactivation. Le mécanisme de réparation peut être empêché, mais ceci exige une dose UV plus élevée.

#### **VI.4.2. Inactivation des Virus et des bactéries**

Les bases pyrimidiques de l'A.R.N. des virus sont constituées de cytosine et d'uracile, au lieu de thymine et de cytosine pour l'A.D.N. des bactéries. La dimérisation de la thymine est plus facilement induite par les UV que celle de l'uracile. Ceci peut expliquer la plus grande résistance des virus. Les réovirus ont un double brin d'A.R.N. sur lequel davantage de dommages seraient nécessaires à l'inactivation ou qui permettrait la redondance des informations, ce qui est impossible sur un A.R.N. monobrin tel que celui du poliovirus. Les réovirus sont 3 fois plus grands que les poliovirus et possèdent une double membrane protéinique, qui absorberait mieux les UV [7].

#### **VI.4.3. Cinétique de réduction par rayonnement UV**

La cinétique de désinfection par rayonnement UV est contrôlée essentiellement par les caractéristiques de l'intensité UV, du temps d'exposition et de la qualité de l'eau. Les modèles développés sont tirés des modèles classiques de cinétique de réduction des micro-organismes en fonction de la concentration d'un désinfectant C et qui est remplacée dans le cas des UV par l'intensité du rayonnement I [10].



**a. Modèle de Chick-Watson :**

Chick (1908) a été la première à noter l'analogie entre une réaction chimique et la désinfection. Elle a décrit la cinétique de désinfection par une loi semblable à celle d'une réaction chimique du premier ordre, soit :

$$\frac{dN}{dt} = -k_c \cdot N_v \tag{1.2}$$

Où  $k_c$ : la constante cinétique d'abattement, et  $N_v$ : le nombre d'organismes viables à l'instant  $t$ .

Watson a proposé en 1908, un modèle qui prend en compte la concentration du désinfectant et l'intègre dans le modèle cinétique :

$$\frac{dN_v}{dt} = -k' \cdot C^n \cdot N_v \tag{1.3}$$

Où  $C$ : concentration du désinfectant,  $n$ : constante de dilution,

$k'$ : la constante cinétique indépendante de la concentration  $C$ .

C'est le deuxième modèle qui est la base des modèles simples de cinétique de désinfection par rayonnement UV. Ainsi, la cinétique de premier ordre s'écrit :

$$\frac{dN_v}{dt} = -k_{uv} \cdot I \cdot N_v \tag{1.4}$$

Où  $N_v$ : le nombre des micro-organismes viables par unité de volume à l'instant  $t$ ,

$I$  : intensité UV en  $mW/cm^2$

$k_{uv}$  : constante cinétique  $cm^2/mW.s$ .

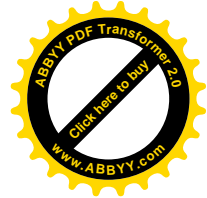
L'intégration de l'équation donne le nombre d'organismes viables après un temps  $t$  par l'expression :

$$N_v(t) = N_0 \cdot e^{-k_{uv} \cdot I \cdot t} \tag{1.5}$$

Groupe	Micro-organisme	Dose requise pour 90% d'inactivation en $mW.s/cm^2$	Constante de cinétique du 1 <sup>er</sup> ordre $k_{uv}$ en $cm^2/mW.s$
<b>Bactéries</b>	Bacillus anthracis	4,5	0,51
	Spores de Bacillus anthracis	54,5	0,0422
	Escherichia coli	1,33 – 3 – 3,2 *	1,73 – 0,77 – 0,72 *
	Legionelle pneumophila	0,38 – 1 – 2,49 *	6,1 – 2,3 – 0,925 *
	Pseudomonas aeruginosa	5,5	0,42
	Salmonella enteritidis	4	0,58
	Salmonella typhi	2,1 – 2,26 – 2,5 *	1,1 – 1,02 – 0,92 *
	Shigella dysenteriae	0,885 – 2,2 *	2,6 – 1,05 *
	Staphylococcus aureus	4,5 – 5 *	0,51 – 0,46 *
	Streptococcus faecalis	4,4	0,52
<b>Virus</b>	Coliphage	3,6	0,64
	Coliphage MS-2	18,6	0,124
	Virus de l'hépatite A	7,3 – 3,7 *	0,32 – 0,62 *
	Virus de l'influenza	3,6	0,64
	Poliovirus	7,5	0,31
	Rotavirus	11,3	0,204
<b>Protozoaires</b>	Giardia muris	82	0,028
	Acanthamoeba castellanii	35	0,066

**Tableau 1.3. Constante cinétique du 1<sup>er</sup> ordre [10].**

\* Les doses et les constantes cinétiques pour ces micro-organismes sont différentes selon les références et les auteurs.



**b. Modèle de Scheible :**

Des expériences ont montré que la cinétique d'abattement des virus suit une loi de premier jusqu'à l'abattement de 5U-Log et 3U-Log pour les bactéries. Au-delà de ces limites les courbes s'écartent d'une cinétique de premier ordre. Pour expliquer cet écart Scheible (1985) propose de subdiviser la population microbiologique en deux catégories :

- les micro-organismes isolés, de concentration  $N_0'$ , qui sont vulnérables aux rayonnements UV
- les micro-organismes associés aux particules solides, de concentration  $N_p$ , qui les protègent des rayonnements UV, et sont donc moins vulnérables.
- Le nombre initial de micro-organismes  $N_0$  est égal à la somme de  $N_0'$  et de  $N_p$ . Scheible propose alors l'expression suivante de la cinétique d'inactivation :

$$N_v(t) = N_0'.e^{-k_{uv}.I.t} + N_p \tag{1.6}$$

D'après ses travaux il retrouve une corrélation entre  $N_p$  et la teneur en matière en suspension selon une fonction puissance :

$$N_p = a.C_{MES}^b \tag{1.7}$$

$C_{MES}$  : concentration des matières en suspension dans l'eau

a,b : constantes à déterminer expérimentalement.

Ainsi le modèle s'écrit :

$$N(t) = N_0'.e^{-k_{uv}.I.t} + a.C_{MES}^b \tag{1.8}$$

**c. Modèle de Collins et Selleck :**

Une autre approche est utilisée pour décrire la cinétique de désinfection par UV qui admet un temps de latence initial et un ralentissement de la vitesse d'inactivation avec l'augmentation de la dose. Cette approche se base sur le modèle de Collins et Selleck. L'équation du modèle est la suivante :

$$\frac{dN_v}{d(I.t)} = -k_{uv}.N_v \tag{1.9}$$

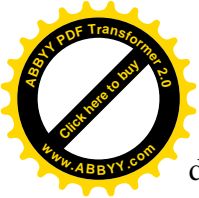
Le produit  $I.t$ , la dose UV, est considéré comme une variable indépendante.  $k_{uv}$ , est variable avec la dose de rayonnement :

$$I.t \leq D_m \quad k_{uv}=0 \tag{1.10}$$

Si

$$I.t > D_m \quad k_{uv} = -\frac{k_{uv0}}{I.t} \tag{1.11}$$

Où  $k_{uv0}$  = constante et  $D_m$  la dose minimale à partir de laquelle l'effet du rayonnement



deviant sensible sur la viabilité des micro-organismes.

L'expression de  $N_v(t)$  est déduite après intégration du modèle de Collins et Selleck :

$$I.t \leq D_m \qquad N_v(t) = N_0 \qquad (1.12)$$

Si

$$I.t > D_m \qquad N_v(t) = N_0 \cdot \left(\frac{I.t}{D_m}\right)^{-k_{uv0}} \qquad (1.13)$$

**VI.5. Paramètres influençant l'efficacité de la désinfection**

L'efficacité de la désinfection sur une installation UV dépend des paramètres de fonctionnement qui sont essentiellement le débit de l'écoulement, le temps d'exposition et l'intensité du rayonnement UV émis par les lampes, ainsi que les paramètres de la qualité de l'effluent.

**VI.5.1. Le temps d'exposition**

Il est fonction du débit et donc de la vitesse de passage de l'effluent dans l'installation. Il faut considérer le temps d'exposition moyen aux rayonnements UV qui est fonction de la conception hydraulique du réacteur. Celle-ci doit remplir 3 conditions fondamentales:

- le volume du réacteur doit être utilisé au maximum, et ce en évitant les courts-circuits hydrauliques et les zones mortes pour profiter au mieux de l'énergie UV fournie par les lampes et d'éviter que l'effluent ne passe sans avoir reçu la dose suffisante.
- le flux doit être le plus proche possible du flux piston, sans dispersion axiale pour assurer une distribution uniforme des temps de séjour dans le réacteur.
- le flux doit permettre une dispersion radiale afin que chaque élément de volume se déplace dans des champs d'intensité lumineuse non uniforme [10].

**VI.5.2. L'intensité UV émise par les lampes**

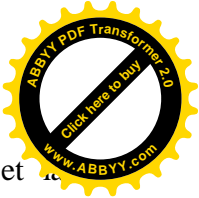
L'intensité UV nominale est fonction du nombre de lampes allumées. L'intensité reçue par l'effluent diminue avec la distance par rapport à la lampe, notamment par dissipation de l'énergie dans un volume plus grand. Ainsi, l'épaisseur de la lame d'eau entre deux lampes est un paramètre de dimensionnement [7].

**VI.5. 3. Paramètres de qualité de l'effluent**

**a. Les matières en suspension**

Les M.E.S contenues dans l'effluent peuvent fournir une protection aux micro-organismes pour les raisons suivantes :

- une particule protège la bactérie libre, et dans ce cas le rayon ne l'atteint pas ou partiellement
- la bactérie est adsorbée à une particule et dans ce cas, la pénétration sera également



incomplète ou nulle. La protection sera favorisée par le nombre de particules et la présence de particules de grande taille, soit de tailles égales ou supérieures à celles des bactéries.

Les courbes de l'abattement bactérien en fonction de la dose appliquée traduisent cette protection par une asymptote horizontale pour les doses élevées : une augmentation de la dose n'a plus d'effets sur les germes car ils sont protégés par les M.E.S. Une importante teneur en M.E.S limite les performances de la désinfection par UV. Par contre, la filtration de l'effluent les améliore. D'autre part, des travaux récents [10] ont confirmé ces constats et ont montré que pour des floccs de même taille, les floccs d'acide humique organique protègent les virus plus que les floccs d'argile ou les particules de boues des réacteurs biologiques. En plus de la taille des particules, la capacité d'absorbance des rayonnements UV des éléments qui les constituent joue un rôle important [11].

#### **b. Transmission UV**

L'effluent à traiter peut contenir des constituants qui absorbent le rayon UV dirigé contre les bactéries. Plusieurs composés chimiques tels que les composés phénoliques, les acides humiques, les sulfonates, le fer ainsi que les agents de coloration interfèrent avec la transmission du rayon à 254 nm. La méthode utilisée pour quantifier cette interférence est la mesure de la transmittance qui représente la quantité de lumière disponible pour irradier un micro-organisme à une distance donnée. En général, avant de choisir un procédé UV, on doit considérer une transmittance de l'effluent pour le dimensionnement et déterminer la dose nécessaire.

#### **c. La turbidité**

Elle représente la diffusion de la lumière par les M.E.S et les matières dissoutes dans les eaux à traiter. Son effet est réduit tant que le traitement d'épuration en amont de la désinfection est efficace [11].

### **VI.5. 4. Résistance des micro-organismes aux rayonnements UV**

#### **a. Les bactéries**

Les bactéries non sporulées sont les germes les moins résistants aux rayonnements UV, leur résistance est comparable à celle d'*Escherichia coli*. (figure 1.10).

#### **b. Les virus**

Linden et Mofidi (1999) et d'autres auteurs ont démontré dans leurs travaux que les virus sont moins sensibles aux rayonnements UV que les bactéries. On note également une différence de sensibilité entre virus, les rotavirus étant plus résistants que les poliovirus. Les bactériophages fécaux spécifiques des bactéries entériques peuvent servir comme indicateurs des risques de contamination virale.

### c. Spores et kystes de protozoaires

Ce sont les formes qui présentent la plus grande résistance aux rayonnements UV, et certains micro-organismes parasites ne seraient pas affectés (comme les œufs d'helminthe).

Des travaux ont comparé la sensibilité des spores aux UV et aux autres désinfectants, et ils ont constaté que les UV sont les plus efficaces, même si quelques formes résistantes nécessitent d'importantes doses UV pour les réduire aux normes requises [8].

### d. Les différences de sensibilité des micro-organismes

D'après Rauth en 1965 et Chang et al en 1985 la réponse à l'UV est variable selon le type de micro-organisme ciblé (figure 1.7). En se limitant aux trois groupes principaux visés par la désinfection, la conclusion de la majorité des auteurs va dans le sens de celle de Chang et al.,(1985) . Les essais en laboratoire ont permis de déterminer le degré de résistance de différents micro-organismes par rapport à celle d'*Escherichia coli*. Les bactéries végétatives nécessitent à peu près les mêmes doses qu'*Escherichia coli*. Les virus testés (rotavirus et poliovirus) sont trois à quatre fois plus résistants, les bactéries sporulées (*Bacillus subtilis*) sont environ 10 fois plus résistantes alors que les kystes de protozoaires (*Acanthamoeba castellanii*) requièrent des doses environ 15 fois supérieures .

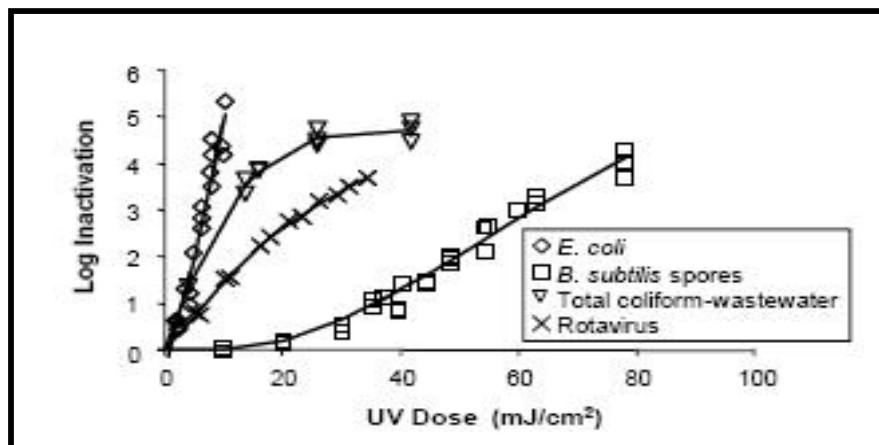


Figure 1.9. Courbes de doses-réponses pour différents types de micro-organismes [13]

La variation de sensibilité observée est difficilement dissociable de son état morphologique. Puisque le rayon doit pénétrer la cellule pour l'endommager, les organismes possédant une paroi plus épaisse ou des structures externes particulières seront en principe plus résistants aux rayons.

### e. La taille du génome

Vu la nature de l'action du rayonnement UV, la taille du génome et l'épaisseur des couches externes jouent un rôle important [7], montre qu'à l'intérieur du même genre bactérien, la réponse peut être variable selon l'espèce, en raison de la taille ou de la composition du génome (figure 1.8). Pour assurer leur inactivation, les micro-organismes doivent subir de

multiples attaques du rayonnement au niveau du génome. Les acides nucléiques requièrent des dizaines et même des centaines de transformations photochimiques pour que la réplication soit rendue non fonctionnelle. De ce fait, les plus gros organismes présentent généralement la plus importante résistance. D'autre part, on remarque que les génomes qui contiennent des thymines sont les plus sensibles [9], impute cette sensibilité au fait que les dimères de thymine sont plus facilement formés que les autres types.

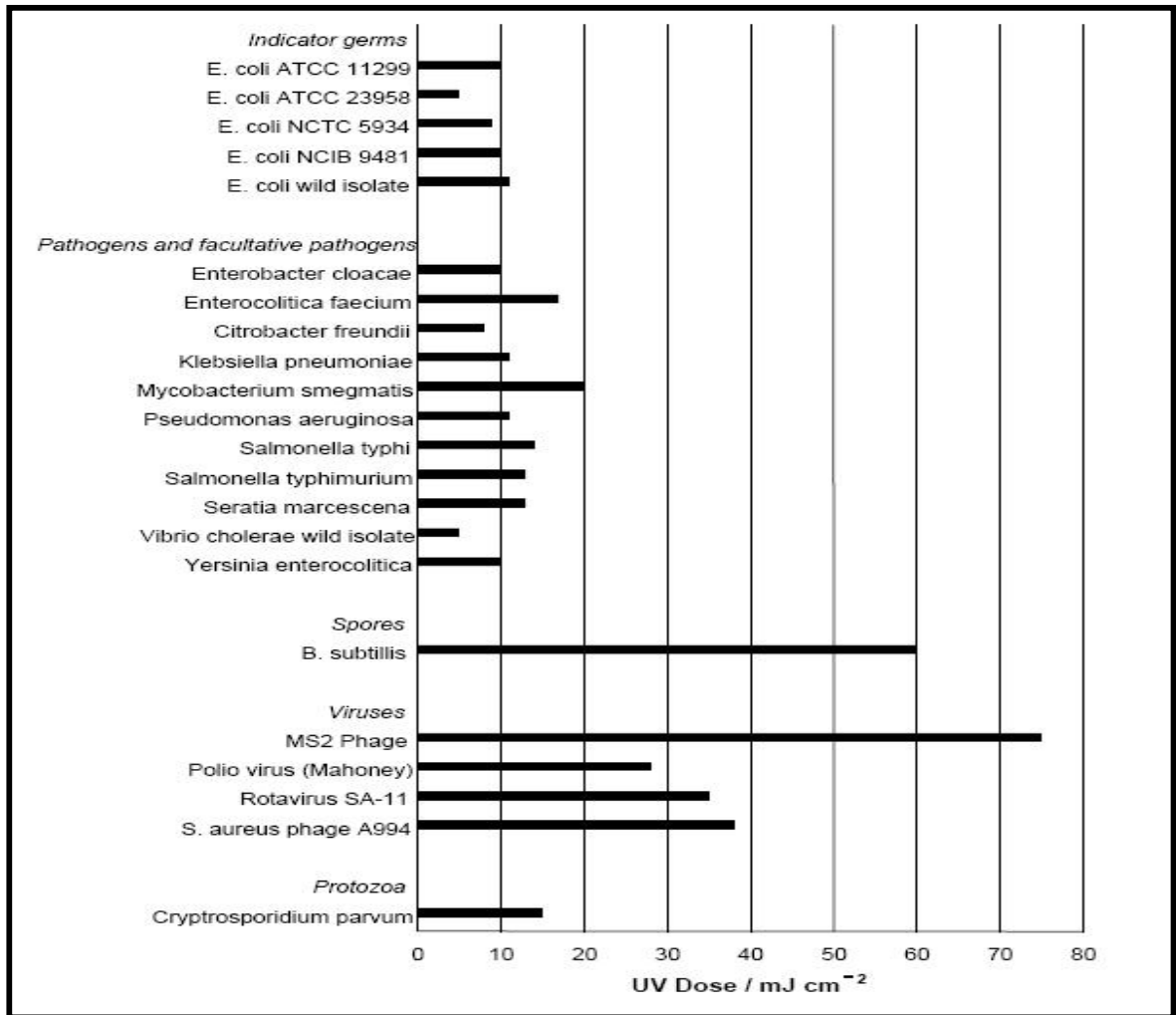
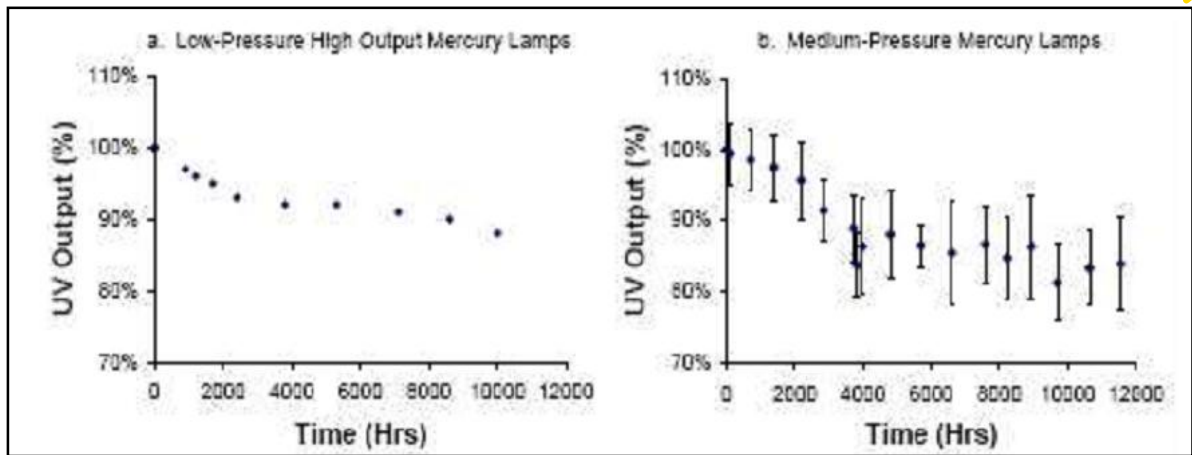


Figure 1.10. Doses UV nécessaires pour le rabattement de 4 logs (99.99%) pour les bactéries, spores, virus et protozoaires [7].

### VI.5. 5. L'effet de l'âge des lampes

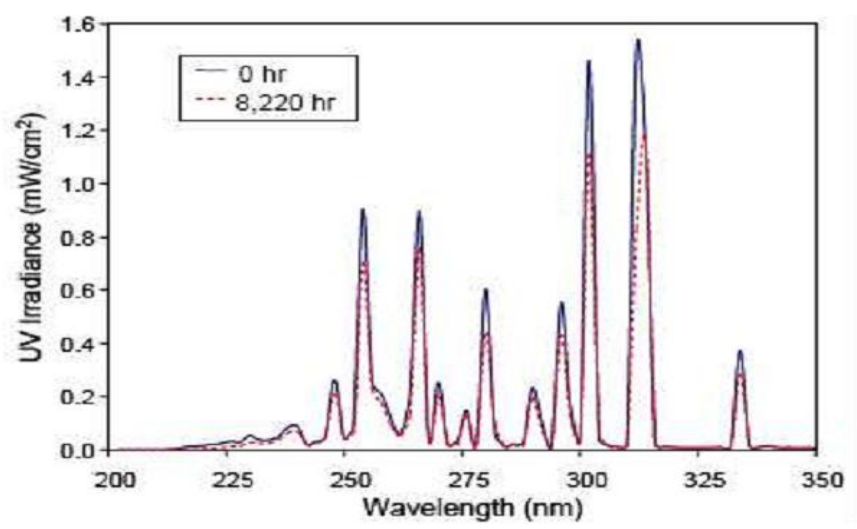
Comme tout équipement, l'âge agit sur les lampes UV en résultant en une diminution du rendement qui se reflète par une diminution de la puissance émise et donc de la dose délivrée. La diminution de la puissance de la lampe se produit pour les deux types de lampes soit à basse pression ou à moyenne pression (figure 1.9).





**Figure 1.11. Diminution de la puissance UV émise en fonction du temps [6].**

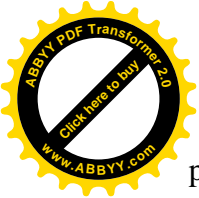
La dégradation de l'intensité émise est fonction du nombre des heures de fonctionnement, du nombre des cycles marche/arrêt, de la qualité de l'eau... [6]. Le taux de décroissance de la puissance émise diminue avec l'âge de la lampe, cette décroissance intéresse toutes les longueurs d'ondes de la bande germicide (figure 1.10).



**Figure 1.12. Diminution de l'intensité émise par une lampe moyenne pression dans la bande germicide en fonction du temps [6]**

### VII. Problématique de la détermination de l'efficacité des réacteurs UV

La détermination de la dose reçue suite à un procédé de désinfection est nécessaire pour juger son rendement et son efficacité. Pour la désinfection par chloration, la dose minimale reçue est estimée par la mesure de la quantité résiduelle de chlore libre. La norme de l'Organisation Mondiale de la Santé stipule que, pour une désinfection efficace, la quantité résiduelle de chlore doit excéder 0,5 mg/l après au moins 30 minutes de temps de contact pour une valeur de pH inférieure ou égale à 8. Pour la désinfection par rayonnement UV, l'absence d'une dose résiduelle pose un sérieux problème pour la détermination de la dose délivrée par le



procédé et donc pour sa fiabilité.

Des expériences réalisées en utilisant des intensités différentes ont montré que l'effet sur les micro-organismes est indépendant de l'intensité et ne dépend que de la dose d'énergie reçue par les micro-organismes [14].

La dose du rayonnement UV reçue et par définition le produit de l'intensité UV par le temps d'exposition:

$$\text{Dose} = I \cdot t_{\text{exp}} \quad (1.14)$$

I : intensité du rayonnement UV,  $\text{W/m}^2$  ,  $t_{\text{exp}}$  : temps d'exposition à l'intensité I, en secondes

Pour déterminer la dose, on doit déterminer la distribution de l'intensité et le temps d'exposition au rayonnement UV. L'intensité du rayonnement UV est décrite par une distribution dans l'espace qui dépend de la position (x,y,z) du point et des caractéristiques de propagation de l'onde dans le milieu étudié. Le temps d'exposition dans les réacteurs UV dépend des conditions hydrodynamiques de l'écoulement et dans la pratique il est décrit par une distribution. Le calcul de la dose dans ces conditions est compliqué vu qu'il s'agit du produit de deux distributions, ce qui amène les études à simplifier l'expression de la dose à une valeur moyenne. La détermination de la dose moyenne se base sur le calcul de l'intensité moyenne dans le réacteur et le temps de séjour moyen. Pour le calcul de l'intensité moyenne, on assimile la lampe à un ensemble de points sources alignés sur son axe. Le rayonnement émis de chaque point est supposé égal dans toutes les directions. L'intensité du rayonnement dans un volume élémentaire du réacteur est égale à la somme de tous les rayonnements émis par ces points sources. Evidemment, il faut prendre en compte la réflexion, la réfraction et l'absorption du rayonnement par les composants, les particules et les micro-organismes présents dans le réacteur. D'autre part, si le réacteur contient plus qu'une lampe, les intensités seront additionnées, ce qui complique davantage cette méthode. Le temps de séjour moyen est le rapport entre le volume du réacteur et le débit de l'écoulement. Cette notion de dose moyenne simplifie l'étude et offre une valeur peu significative de la vraie dose ou les vraies doses qui sont reçues lors du passage dans le réacteur. La différence entre ces valeurs et la valeur moyenne est un facteur qui altère considérablement la certitude sur la valeur des doses prévues et donc sur l'efficacité attendue du procédé et sa fiabilité. L'intérêt porté à la détermination de cette dose et sa description se traduit par le nombre important des travaux de recherche sur le sujet et la pluridisciplinarité des approches adoptées. Pour récapituler ces études nous avons réalisé une recherche bibliographique pour les récents travaux qui ont traité ce sujet et les résultats auxquels ils ont abouti. Le but de cette synthèse est de dégager les principaux problèmes rencontrés et les différents aspects inexplorés pour raffiner les objectifs de cette étude et en définir l'orientation.

## VIII. Méthodes de mesure de la dose UV

### VIII.1. La bio-dosimétrie

Il s'agit d'utiliser des micro-organismes pour lesquels la courbe d'abattement en fonction de la dose UV est déterminée préalablement (figure 1.11). Ces courbes sont réalisées par des séries d'expériences où on expose une population fixe de micro-organismes à une intensité UV bien déterminée. La variation du temps d'exposition induit des doses variables. Pour le réacteur, on introduit une concentration de ces micro-organismes dans le réacteur à son entrée et on prélève des échantillons à la sortie. Le taux d'inactivation observé et la courbe déjà tracée nous renseignent sur la dose UV moyenne reçue par les micro-organismes lors de leur passage dans le réacteur [6].

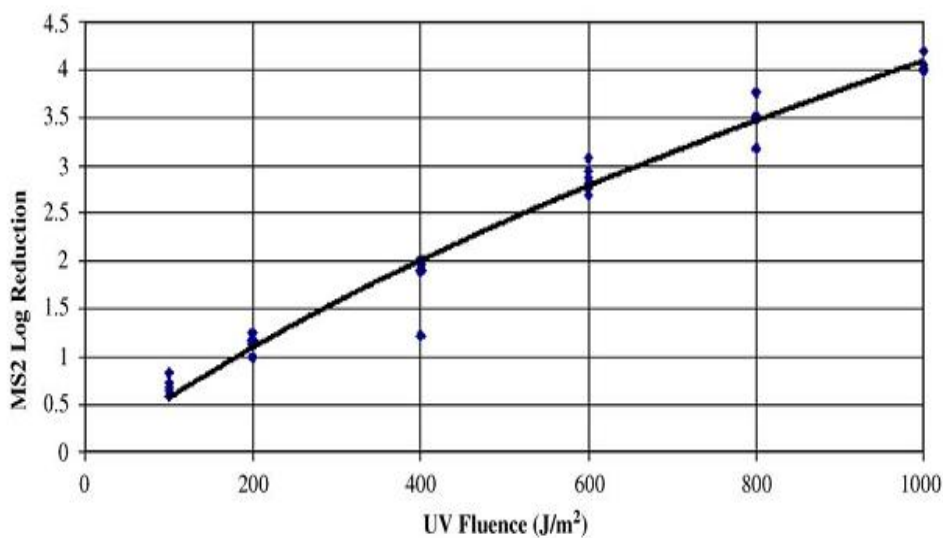


Figure 1.13. Exemple d'une courbe dose-réponse pour Coliphage MS2[21].

### VIII.2. L'actinométrie

Il s'agit d'une technique qui se base sur une réaction photochimique pour laquelle le rendement quantique (nombre de moles formées par nombre de photons absorbés) est connu. On introduit une cellule de quartz contenant une solution sensible au rayonnement UV dans le réacteur pour une période de temps  $t$ . Une réaction photochimique est induite et forme un produit. Le taux de formation du produit et le rendement quantique de l'actinomètre donnent le nombre de photons reçus à la position de la cellule. Cette méthode est utilisée surtout pour le calibrage des radiomètres [16].

### VIII.3. Billes fluorescentes

Une technique de dosimétrie basée sur la réaction chimique de bulles injectées dans l'écoulement suite à l'absorption de la dose (Bohrerova Z et al., 2005). Le degré de fluorescence d'une bulle reflète la dose cumulée reçue. Cette méthode n'est pas encore très

répandue vu la complexité technique et matérielle qu'elle présente pour le comptage des bulles et la mesure de leur degré de fluorescence. Toutefois ses perspectives apparaissent intéressantes dans la validation des traçages lagrangiens et la potentialité de mesure instantanée et spatiale de l'évolution de la dose reçue.

#### VIII.4. Comparaison des différentes méthodes de dosimétrie

D'après les travaux existants, il est clair que la mesure de la dose UV dans les réacteurs en continu est d'une importance majeure pour caractériser son rendement, et en même temps elle représente une problématique vu l'absence de dose résiduelle dans les eaux traitées. Les mesures de rendement des photoréacteurs, ainsi que les méthodes de dimensionnement dictées par les guides techniques officiels se basent jusqu'à maintenant sur la bio-dosimétrie pour déduire la dose reçue [6]. Cette méthode est limitée par le seuil de létalité de la biomasse, l'absorbance des cellules vivantes à différentes longueurs d'ondes (figure 1.12) et donc la confusion en cas de lampe monochromatique. De même, les différences notées dans les valeurs des constantes d'inactivation pour les mêmes micro-organismes par différents auteurs induit des imprécisions sur les doses reçues déduites. Enfin, le recours à la mesure ou le calcul de la dose par une moyenne dans le temps réduit considérablement la précision de l'information sur la fiabilité du procédé.

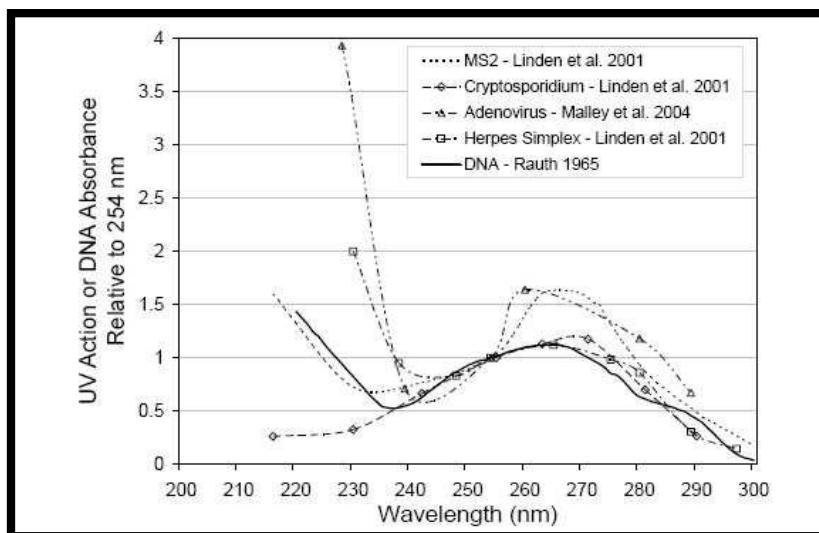


Figure 1.14. Spectres d'absorption pour différents micro-organismes [9]

A travers la présentation des différentes méthodes de mesure de dose UV, il nous a paru que l'actinométrie, même en étant utilisé jusqu'à maintenant pour la mesure de l'intensité des lampes UV et le calibrage des appareils de mesure, présente des potentiels intéressants vu les considérations suivantes :

- la solution d'actinomètre peut être transportée par l'écoulement et ainsi on peut mesurer



la dose sans méthode intrusive qui risque de perturber l'écoulement et fausser les valeurs réelles,

- comparée à la bio-dosimétrie, l'actinométrie ne présente pas des doses limites, pour des concentrations assez suffisantes en réactif. En effet, puisque la bio-dosimétrie se base sur la réponse des micro-organismes à la dose UV, elle ne peut pas mesurer les doses qui dépassent les doses létales.
- la reproductibilité des résultats pour l'actinométrie est plus assurée que pour la bio-dosimétrie puisqu'il s'agit de réaction photochimique tandis que la deuxième se base sur des réactions biologiques. Les travaux réalisés pour déterminer les constantes cinétiques pour les micro-organismes et les différences notées entre les résultats des différents auteurs (tableau 1.4) pour les mêmes micro-organismes témoignent de la complexité de ces mesures.

## IX. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la situation de la technique de désinfection par rayonnement UV et ses avantages de point de vue coût et efficacité qui se confrontent à un problème de fiabilité en l'absence de résiduel dans les eaux désinfectées assurant la réception de la dose suffisante. Le développement d'un outil expérimental pour la mesure de la dose reçue a fait l'objet de plusieurs études qui se sont basées sur la bio-dosimétrie. Cette technique reste une méthode très délicate et la déduction de la dose à partir du taux d'abattement des micro-organismes est très incertaine. L'actinométrie représente un moyen assez simple, rapide et fiable mais son utilisation a été réservée surtout à la mesure de l'intensité ponctuelle et de la puissance des lampes UV.



# **CHAPITRE 2**

## **INTENSITE DU RAYONNEMENT UV**

## I. Introduction et définitions des termes relatifs au rayonnement UV et sa distribution

Pendant l'étude du rayonnement et sa distribution spatiale nous avons rencontré dans les différents ouvrages des terminologies diverses relatives parfois aux mêmes grandeurs. Nous commençons cette partie par la définition des termes qu'on va utiliser dans notre étude, à partir des ouvrages de référence [12]:

- Flux énergétique ou puissance rayonnante (flux lumineux) : est la quantité d'énergie traversant une surface limitée par une courbe fermée pendant l'unité de temps, elle est équivalente au flux total traversant une surface sphérique entourant la source :

$$P = \frac{dQ}{dt} \quad [\text{W ou watt}] \quad (2.1)$$

- Eclairement énergétique : cette grandeur exprime la densité du flux reçu par une surface, elle est couramment appelée intensité lumineuse, elle sera appelée dans cet ouvrage simplement « intensité » et désignée par I :

$$I = \frac{dP}{dA} \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (2.2)$$

- Intensité énergétique  $I_{en}$  : cette grandeur s'applique seulement aux sources ponctuelles et représente le flux émis par unité d'angle solide (figure 2.1) dans une direction donnée :

$$I_{en} = \frac{dP}{d\Omega} \quad [\text{W.sr}^{-1}] \quad (2.3)$$

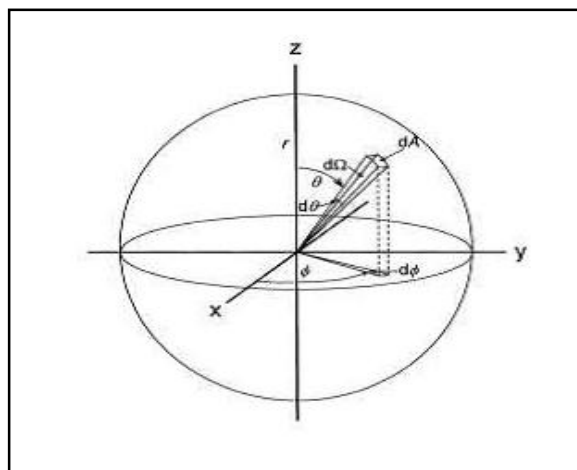


Figure 2.1. L'angle solide  $\Omega$  en coordonnées sphériques.

L'angle solide est le rapport entre l'aire  $dA$  et le carré du rayon (relation 2.3.1).

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} \quad (2.3.1) \quad \text{avec} \quad dA = r^2 d\theta d\phi \quad (2.3.2)$$

Dans le cas d'une sphère complète,

$$A = 4\pi.r^2 \quad (2.3.3) \quad \text{et} \quad \Omega = 4\pi \quad (2.3.4)$$



- La dose d'irradiation : c'est le produit de l'éclairement énergétique  $I$ , par la durée de cet éclairement en secondes si l'éclairement est uniforme. Dans le cas général la dose s'écrit :

$$\text{Dose} = \int_{t_1}^{t_2} I \cdot dt \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \text{ ou } \text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.4)$$

- La transmittance d'un milieu est définie par le rapport entre l'intensité lumineuse transmise et l'intensité initiale :

$$\text{Tr} = I / I_0 \quad (2.5)$$

- et en termes d'absorbance:

$$\text{Tr} = 10^{-\text{Abs}} \quad (2.6)$$

Une autre caractéristique,  $T_{10}$ , définie par la transmittance à 10 mm est aussi utilisée. Elle représente le taux d'abattement de l'intensité après le parcours d'un 1 cm dans le milieu.

- L'absorbance du milieu ou la densité optique est définie comme :

$$\text{Abs} = \log (I_0/I) \quad (2.7)$$

avec  $I_0$  et  $I$  sont les intensités incidente et transmise à travers le milieu.

## II. Méthodes de mesure de distribution de l'intensité UV

Le principe de base de toutes les mesures de l'intensité UV est l'interaction entre le rayonnement UV et la matière par des phénomènes reposants sur la physique quantique.

### II.1. Action photochimique du rayonnement

Quand la lumière réagit avec la matière, elle peut être reflétée, dispersée, transmise ou absorbée. L'absorption de la lumière par la matière est la première étape en photochimie ;seulement la lumière absorbée peut induire un changement photochimique, mais l'absorption de la lumière n'a pas nécessairement comme conséquence un événement photochimique. La lumière peut être décrite en termes de particules, appelées photons. L'énergie d'un photon est déterminée par la fréquence de l'oscillation du champ électromagnétique duquel il est produit (relation 2.8). L'énergie du photon peut également être exprimée en terme de sa longueur d'onde  $\lambda$  en exprimant  $\nu$  en fonction de cette longueur d'onde (relation 2.9) et par la suite  $E_\lambda$  en fonction de  $\lambda$  (Relation 2.10).





$$E_{\lambda} = h \cdot \nu \quad [J] \quad (2.8)$$

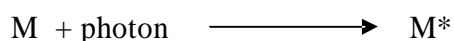
$h$  : constante de Planck =  $6,6261 \cdot 10^{-34}$  J.s

$$\nu \cdot \lambda = c \quad (2.9)$$

où  $c$  : vitesse de la lumière dans le vide =  $2,9979 \cdot 10^8$  m/s

$$E_{\lambda} = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.10)$$

Quand la matière absorbe la lumière, elle absorbe en réalité de l'énergie. A l'instant où une molécule absorbe un photon, elle augmente sa propre énergie par la valeur de l'énergie du photon  $E_p$ . Ayant soudainement ce surplus d'énergie, la molécule passe à un état électroniquement excité  $M^*$  :



Avec cette énergie supplémentaire, la molécule peut faire l'une des trois possibilités suivantes:

- retourner de nouveau à l'état initial, état fondamental, et perdre l'énergie qu'elle a absorbée en libérant de la chaleur
- retourner de nouveau à l'état initial et perdre l'énergie en libérant de la lumière
- employer l'énergie pour réaliser une réaction chimique.

Typiquement une molécule excitée reste dans l'état  $S_1$  pendant 1 à 100 nanosecondes [17].

## II.2. Conditions d'absorption d'un photon

L'absorption d'un photon nécessite deux conditions évidentes mais nécessaires :

- le photon doit rencontrer la molécule,
- la molécule peut absorber le photon si les sauts quantiques sont de l'ordre de la longueur d'onde du photon.

Donc plus qu'il y aura de molécules sur le trajet d'un photon, plus la probabilité de rencontre molécule-photon est importante, par conséquent, la rencontre dépend de la concentration en molécules ( $C$ ) et de la longueur de trajet ( $l$ ). Même si la molécule rencontre le photon elle n'est pas toujours en mesure de l'absorber. En fait, un certain nombre de conditions sont nécessaires. En premier lieu, et d'après la chimie quantique, la molécule ne peut absorber que des quanta d'énergie qui correspondent à des niveaux d'énergie bien définis (Figure 2.2).

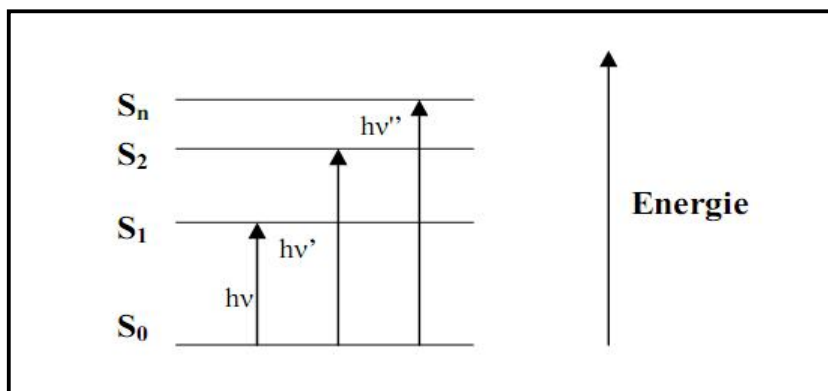


Figure 2.2 Les niveaux d'énergie des états d'excitation d'une molécule selon la théorie quantique.

Si la molécule rencontre un photon d'une énergie qui ne correspond pas à un niveau  $S_n$  de la molécule, l'absorption n'aura pas lieu. La condition suivante doit être satisfaite :

***Energie du photon = Energie d'un état excité – Energie de l'état fondamental d'une molécule***

Bien que cette condition sur la valeur de l'énergie soit nécessaire pour l'absorption de la lumière, elle n'est pas toujours suffisante. Il existe également un certain nombre d'autres règles de chimie quantique qui doivent être satisfaites. Elles sont liées aux changements dans la symétrie ou à la conservation de spin d'électron de la molécule que l'absorption de la lumière pourrait induire [17]. Ainsi, la probabilité qu'une molécule puisse absorber un photon, après la rencontre, dépend principalement de ses propriétés internes. Cette probabilité est généralement symbolisée par  $\epsilon_\lambda$ .

Plus la valeur de  $\epsilon_\lambda$  est importante plus il est probable qu'un photon sera absorbé quand il rencontre une molécule.  $\epsilon_\lambda$  est évidemment fonction de l'énergie des photons, ou de la longueur d'onde de la lumière  $\lambda$ . En résumé, l'absorption de la lumière d'une longueur d'onde passant par une solution dépend de :

- la concentration des molécules  $C$ ,
- la probabilité  $\epsilon_\lambda$  de l'absorption par la molécule à la longueur d'onde  $\lambda$ ,
- la longueur du trajet  $l$ , parcouru par la lumière dans la solution.

Ces trois conditions sont traduites par l'expression de l'absorbance  $A$  qu'on rencontre dans la loi de Beer-Lambert ; Pour une lumière de longueur d'onde  $\lambda$  et d'intensité  $I_0$ , qui traverse un parcours de longueur  $l$  dans une solution de concentration  $C$  en molécules, l'intensité  $I$  à la sortie (ou intensité transmise) :

$$\text{Avec} \quad I = I_0 \cdot 10^{-\epsilon_\lambda \cdot c \cdot l} \quad (2.11)$$

$c$  : en moles/l

$\epsilon_\lambda$ : coefficient d'absorption molaire,  $\text{mol}^{-1} \cdot \text{l} \cdot \text{cm}^{-1}$

$l$  : longueur du trajet en cm.



Ainsi, l'absorbance du milieu peut être définie aussi comme :

$$A = \log (I_0/I) = \epsilon_{\lambda}.c.l \quad (2.12)$$

Le coefficient d'absorption de chaque molécule dépend de la longueur d'onde, d'où il est nécessaire d'analyser l'absorbance d'une molécule en fonction de la longueur d'onde pour une concentration C et une longueur de trajet optique l fixées. Cette courbe d'absorbance en fonction de  $\lambda$  est le spectre d'absorption de la molécule et représente la variation de  $\epsilon\lambda$ . Le coefficient  $\epsilon\lambda$  reflète les caractéristiques internes de la molécule, et chaque molécule a son propre spectre d'absorption caractéristique de sa structure quantique unique. Ces caractéristiques photochimiques représentent les bases de la technique spectrophotométrique qui mesure la concentration en une substance donnée à partir de l'absorbance de la solution. D'autre part cette caractéristique est utilisée pour mesurer l'intensité ou l'éclairement énergétique en un point donné moyennant le taux de conversion et le rendement quantique d'une réaction. Cette technique basée sur l'actinométrie est l'une des techniques utilisées pour la mesure de l'intensité UV.

### III. Modélisation de la distribution de l'intensité UV

#### III.1. Modèles de distribution de l'intensité UV

##### III.1. 1. Modèle de sommation des points sources : MPSS

Le principe de la modélisation mathématique de l'intensité par un modèle MPSS ou ILS repose sur le fait d'approcher la lampe à un ensemble fini de points sources dans le premier modèle et à une ligne composée d'une infinité de points sources dans le cas du modèle ILS. Le premier qui a introduit le principe du modèle MPSS, (multiple point source summation) était Jacob et Dranoff en 1970, ensuite Suidan et Severin en 1986 ont développé ce modèle.

Dans ce modèle l'émission d'une lampe est prise égale à celle de n points sources équidistants sur l'axe de la lampe. L'énergie émise par chacun de ces points est égale à P/n où P est la puissance UV totale émise par la lampe dans la bande de longueur d'onde d'intérêt, 254 nm dans le cas d'ondes germicides.

Pour un point récepteur R situé à une distance radiale r de l'axe de la lampe et à une position longitudinale z (figure 2.3), la valeur de l'intensité reçue par R et émise par un point S de la lampe est égale à  $I(r,z)_i$  :

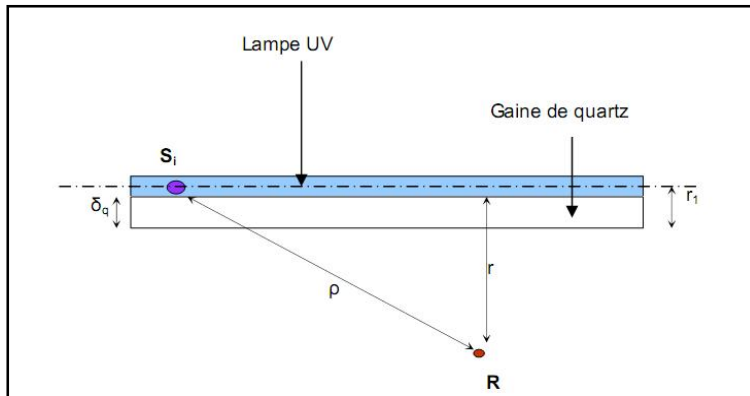
$$I(r,z)_i = \underbrace{\frac{P/n}{4\pi\rho^2}}_{\text{Intensité émise dans le vide}} \exp \left\{ - \underbrace{[\alpha_q \delta_q]}_{\text{Absorbance du quartz}} + \underbrace{\alpha_1(r-r_1)}_{\text{Absorbance du milieu}} \right] \frac{P}{r} \quad [\text{mW/cm}^2] \quad (2.13)$$

$\rho$  : distance entre le point émetteur et le point récepteur (cm)

$\delta_q$  : épaisseur de la gaine du quartz.(cm)

$\alpha_q$  : coefficient d'absorption du quartz ( $\text{cm}^{-1}$ )

$\alpha_l$  : coefficient d'absorption du liquide ( $\text{cm}^{-1}$ )



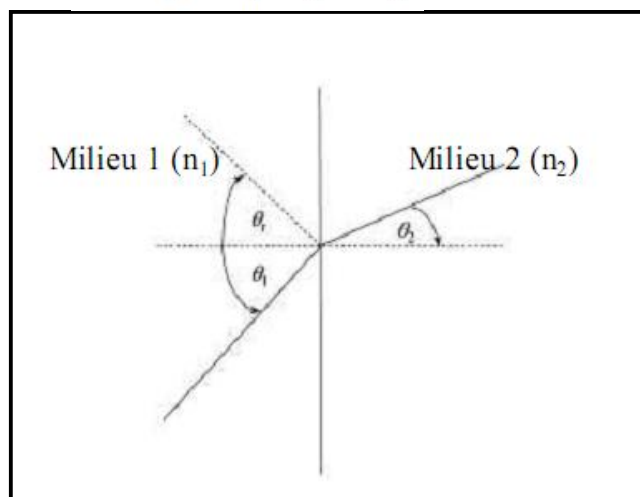
**Figure 2.3 Présentation des termes utilisés dans le modèle MPSS**

L'intensité totale reçue par un point R dans le réacteur,  $I(r,z)$  est égale à la somme des intensités émises par chacun des points formant la lampe.

$$I(r,z) = \sum_{i=1}^n I(r,z)_i \quad [\text{mW}/\text{cm}^2] \quad (2.14)$$

Afin d'approcher la lampe le nombre des points doit être le plus important possible. En effet, pour  $n=1001$ , l'approximation donne des résultats satisfaisants, et pour un nombre de points supérieur la différence est non significative [13]. Le modèle MPSS a été amélioré par l'intégration de l'effet de la réfraction et la réflexion du rayonnement en traversant les interfaces entre la lampe et la gaine de quartz et entre la gaine et le milieu (air ou eau) [18]. La loi de Fresnel définit l'amplitude du rayonnement perpendiculaire au plan d'incidence entre deux milieux (figure 2.4),  $r_{\perp}$ , par la relation 2.15.

$$r_{\perp} = \frac{n_1 \cdot \cos \theta_1 - n_2 \cdot \cos \theta_2}{n_1 \cdot \cos \theta_1 + n_2 \cdot \cos \theta_2} \quad (2.15)$$



**Figure 2.4 Angles de réflexion et de réfraction lors du passage entre deux milieux**

Et l'amplitude du rayonnement parallèle  $r_{\parallel}$  par la relation 2.16.

$$r_{\parallel} = \frac{n_2 \cdot \cos \theta_1 - n_1 \cdot \cos \theta_2}{n_2 \cdot \cos \theta_1 + n_1 \cdot \cos \theta_2} \quad (2.16)$$

Avec  $\theta_1$  et  $\theta_2$  les angles de réfraction qui vérifient la loi de Descartes :

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \quad (2.17)$$

La réflexion est donnée par l'expression de R :

$$R = \frac{1}{2} \cdot (r_{\perp}^2 + r_{\parallel}^2) \quad (2.18)$$

D'où la partie transmise du rayonnement :

$$Tr = 1 - R \quad (2.19)$$

Ainsi un faisceau du rayonnement est réparti en deux parties, la première est transmise et la deuxième est réfléchie (figure 2.5). La modélisation de la distribution de l'intensité doit prendre en compte cette diminution en utilisant le facteur  $1 - R$ .

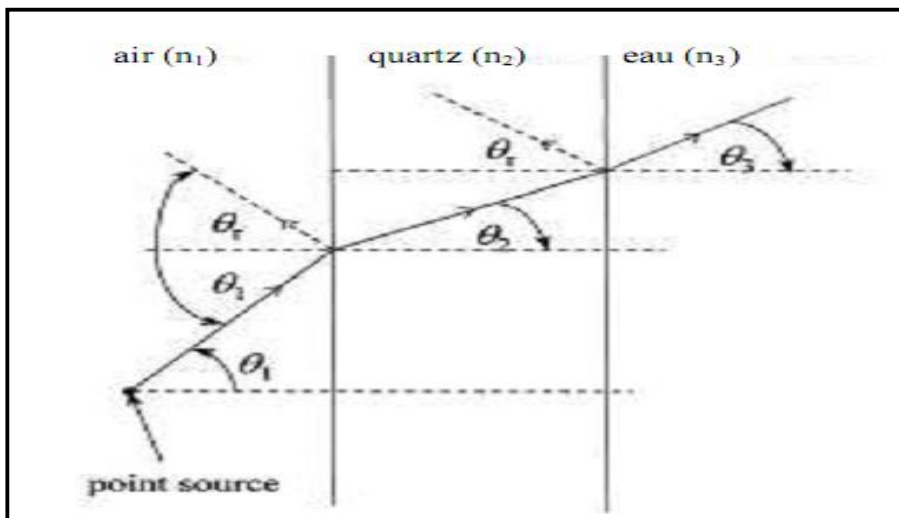


Figure 2.5 Les interfaces air-quartz et quartz-eau.

Le modèle MPSS amélioré prend en compte cette diminution due à la réfraction suite aux passages entre les trois milieux (air, quartz et eau, ou air) et le facteur de concentration focus (figure 2.6). L'expression de l'intensité émise par un point source A et reçue par un point B du réacteur est donnée par la relation 2.19.

$$I_A = (1 - R_1)(1 - R_2) \frac{P/n}{4\pi(d_1 + d_2 + d_3)^2} T_w^{d_3/0,01} T_q^{d_2/0,01} Focus. \quad [W/m^2] \quad (2.20)$$

Où

$R_1, R_2$  : facteurs de réflexion respectifs des interfaces air/quartz et quartz/eau  
 $T_w, T_q$  : transmittances respectives de l'eau et du quartz pour un trajet de 10 mm.  
 Focus : c'est le rapport entre l'aire de la section correspondant à l'angle  $\Delta\theta$  sans réfraction  $A_{w0}$  et la section avec réfraction  $A_w$  avec :

$$A_{w0} = 2\pi(d_1 + d_2 + d_3)^2 \Delta\theta \cos\theta_1 \quad [m^2] \quad (2.21)$$

$$A_w = 2\pi(h'' - h') \cos\theta_3 \quad [m^2] \quad (2.22)$$

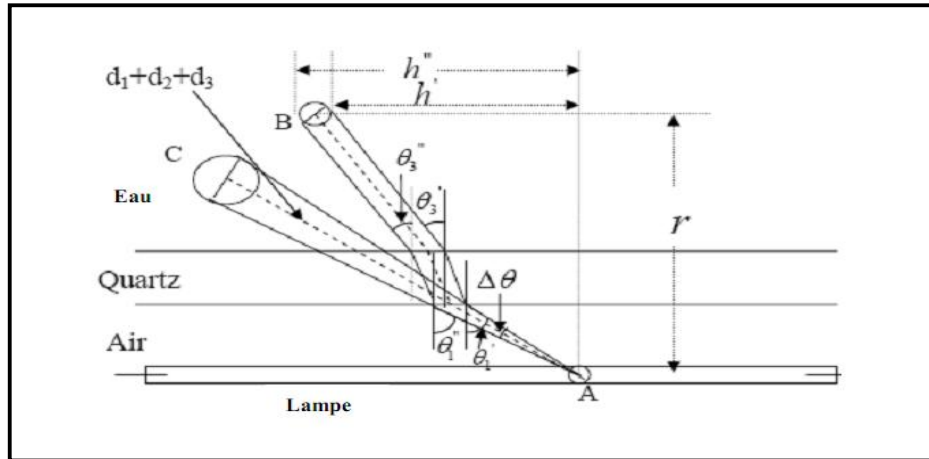


Figure 2.6 Composantes géométriques de la réfraction, la réflexion et le facteur *focus* [18]

Pour le cas pratique de désinfection, Bolton en 2000, a montré que le fait de négliger la réflexion et la réfraction dans le calcul de la distribution de l'intensité dans un réacteur de désinfection d'eau usée où la transmittance  $T'_{10}$  est normalement inférieure à 70%, induit une erreur mineure qui peut être corrigée par l'ajout de 6,5% de la valeur pour compenser l'effet de la réflexion (figure 2.7).

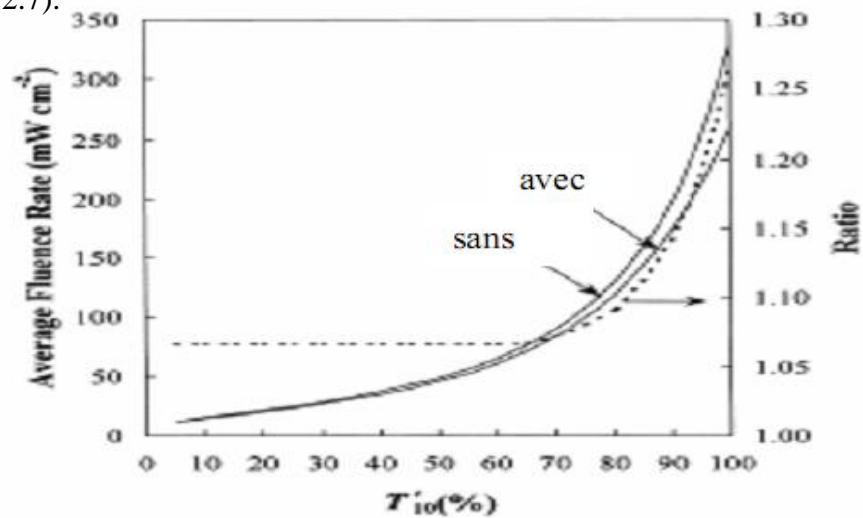


Figure 2.7 L'intensité moyenne dans le réacteur en fonction de la transmittance.

La courbe «avec» tient compte des effets de la réfraction et de la réflexion, la courbe « sans » n'en tient pas compte. La courbe en trait interrompu représente le rapport des deux courbes [9].



### III.1. 2. Modèle de sommation de segments sources : MSSS

Dans ce modèle, Multiple Segment Source Summation, développé par Bolton en 2002, la lampe est assimilée à un ensemble fini de segments cylindriques. L'expression de l'intensité émise par un segment A en un point B du réacteur est :

$$I_A = (1 - R_1)(1 - R_2) \frac{P/n}{4\pi(d_1 + d_2 + d_3)^2} T_w^{d_3/0,01} T_q^{d_2/0,01} Focus \cdot \cos \theta_1 \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.23)$$

Dans cette approche, la lumière est émise perpendiculairement à la surface du cylindre et diminue en fonction du cosinus de l'angle entre la normale à la surface et la direction du rayonnement.

### III.1. 3. Modèle de Ligne source infinie : ILS (Infinite Line Source)

Le troisième modèle considéré est le modèle ILS, infinite-line source, développé par Blatchley en 1997. Il représente une intégration du modèle MPSS en négligeant toute absorption avant et pendant le passage dans la gaine du quartz. Ce modèle a une forme cylindrique. Pour un point à une distance x de la lampe et à une hauteur H de son centre l'intensité reçue a l'expression de la relation (2.23).

$$I(x, H) = \frac{P}{4\pi L x} \left[ \arctan\left(\frac{L/2 + H}{x}\right) + \arctan\left(\frac{L/2 - H}{x}\right) \right] \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.24)$$

Sachant que ce modèle ne prend pas en compte les effets de l'absorption, de la réfraction et de la réflexion, une amélioration a été proposée par l'introduction d'un facteur d'atténuation de l'intensité. Ce facteur est le rapport de l'intensité calculée par un modèle qui tient compte de ces effets (MPSS ou MSSS) par celle calculé par le modèle ILS original (relation 2.24).

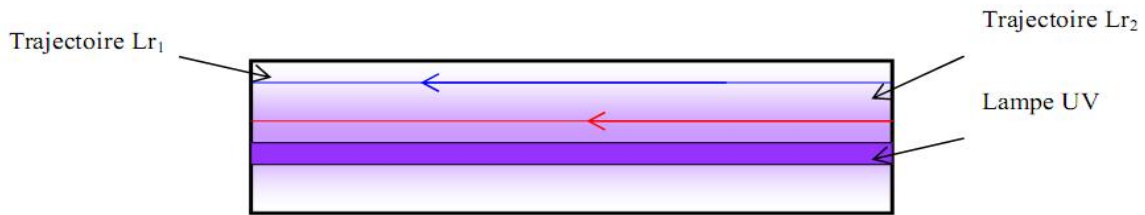
$$attenuation = \frac{\sum_{k=1}^n (1 - R_{1,k})(1 - R_{2,k}) \frac{P/n}{4\pi(d_{1,k} + d_{2,k} + d_{3,k})^2} T_w^{d_{3,k}/0,01} T_q^{d_{2,k}/0,01} Focus_k}{\sum_{k=1}^n \frac{P/n}{4\pi(r_k^2 + h_k^2)}} \quad (2.25)$$

## IV. Estimation de la dose en réacteur avec approche systémique

La mesure de la dose UV dans un réacteur est la mesure du produit de deux variables indépendantes, l'intensité du rayonnement et le temps d'exposition. Pour le cas d'un point récepteur fixe, la dose est déduite du produit simple des deux variables. Pour un écoulement dans un réacteur, plusieurs configurations sont possibles et différentes

approches d'étude peuvent être adoptées. Le calcul du transport réactif avec l'approche systémique est plus adapté, comme pour le transport passif, aux écoulements idéaux que les écoulements quelconques.

Dans le cas d'un écoulement piston, le produit des deux variables peut être direct (figure 2.8), le mouvement des particules suit des trajectoires rectilignes ( $Lr_i$ ) et la distribution de l'intensité est correctement décrite par la loi de Beer-Lambert.



**Figure 2.8 Schéma d'un réacteur piston avec distribution de l'intensité et trajectoires rectilignes.**

La distribution de la dose,  $D_{ri}$ , sera la distribution des différentes intégrales de l'intensité dans le temps sur les différentes trajectoires  $Lr_i$  (éq. 2.25).

$$D_{ri} = \int_{L_{ri}} I(r).dt \quad (2.26)$$

Avec

$$dt = \frac{dl}{V_{ri}} \quad (2.27)$$

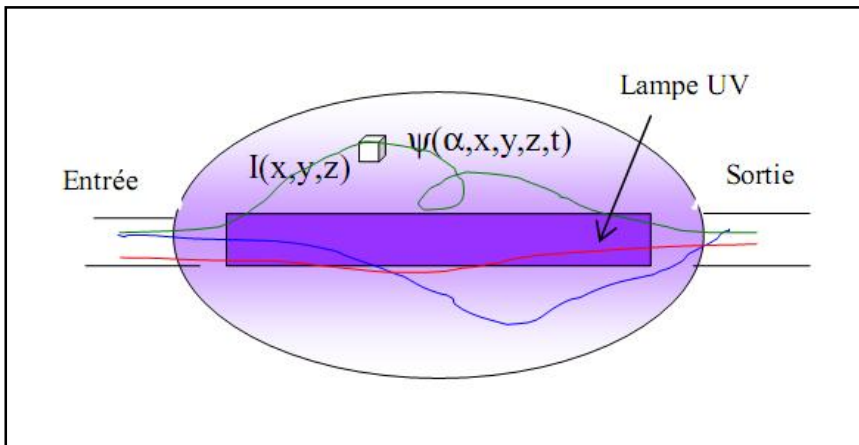
Où  $dl$  = distance parcourue et  $V_{ri}$  = la vitesse de l'écoulement à une distance  $r$  de la gaine. Pour un réacteur cylindrique  $V_{ri}$  est constante pour chaque rayon et sur toute la longueur du cylindre ainsi que  $I(r)$ , d'où :

$$D_{ri} = L \cdot \frac{I(r)}{V(r)} \quad (2.28)$$

Avec  $L$  : la longueur du cylindre.

Pour un écoulement non piston, le mouvement des particules transportées par l'écoulement engendre des trajectoires différentes qui passent par différentes valeurs d'intensité et avec des temps d'exposition très variables ce qui induit des doses variables même pour le même temps de passage ou âge interne dans le réacteur (figure 2.9)





**Figure 2.9** Distribution de l'intensité et des trajectoires pour différentes particules dans un photo-réacteur

Pour une particule  $P$  occupant la position  $(x, y, z)$  à l'instant  $t$ , la dose reçue est le cumul des doses reçues sur sa trajectoire qui, pour un écoulement quelconque, ne dépend pas de son âge interne  $\alpha$  (équ.2.28).

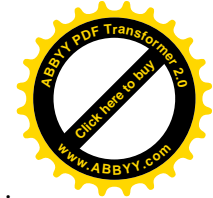
$$Dose(P(\alpha, x, y, z)) = \int_{\text{entrée}}^P I \cdot dt \quad (2.29)$$

Pour une population de particules quittant le réacteur en ayant le même temps de séjour  $T$ , la dose reçue dépend des trajectoires parcourues et donc des champs d'intensité traversés et des durées d'exposition à chaque intensité, ce qui implique une sous-distribution de dose pour chaque temps de séjour. Ce qu'on cherche pour les réacteurs UV est la détermination de la dose reçue en fonction du temps de séjour dans le réacteur, ce qui se ramène à déterminer une moyenne des doses reçues sur la population de particules ayant un même temps de séjour. Cette hypothèse peut être justifiée dans les mêmes conditions de mesure de concentration, où on assure à la sortie du réacteur, un mélange parfait ou une section finale très réduite par rapport aux dimensions du réacteur.

## V. Conclusion

Au terme de ce chapitre il est possible de tirer les conclusions suivantes :

- Le champ d'intensité UV dans un réacteur est complexe et gouverné par des lois de rayonnement en milieu absorbant. La loi de Beer-Lambert permettant de décrire l'intensité reçue à partir de l'intensité émise par la lampe a été utilisée pour calculer la distribution de l'intensité dans l'espace en se basant sur la méthode de la sommation des points sources.
- La mesure de l'intensité UV peut se faire par voie photochimique avec des mécanismes réactionnels connus et identifiés.

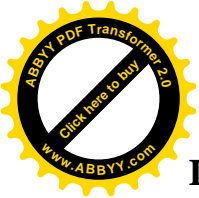


- c. Enfin, l'étude de l'évolution de la réaction photochimique dans le réacteur nous a permis le développement du modèle de l'évolution de l'absorbance de la solution en fonction de l'avancement de la réaction. Ce modèle permet non seulement le calcul de la dose absorbée mais aussi les concentrations du produit de la réaction induite. La comparaison des résultats du modèle aux résultats expérimentaux ont permis sa validation.



## **CHAPITRE 3**

# **SIMULATIONS PAR CFD DE LA DISTRIBUTION DE LA DOSE DANS LE PHOTO- REACTEUR**



## I. Introduction

Dans ce chapitre, notre objectif consiste à utiliser le code Fluent pour déterminer la distribution de la dose où la modélisation globale reste limitée vu que le comportement du réacteur est loin d'un réacteur idéal d'une part, et la capacité de cet outil de calcul pour le cas d'un produit de deux fonctions de distribution (l'intensité et le temps) d'autre part.

Les conditions expérimentales imposées par le volume du réacteur, la puissance de la lampe et la cinétique de la réaction ont produit un régime d'écoulement dans le réacteur caractérisé par un jet à l'entrée où  $Re = 247.2$ , qui reste dans la limite de l'écoulement laminaire.

## II. L'étude de l'hydrodynamique dans le photo-réacteur

### II.1. Introduction

L'étude de la simulation d'un réacteur de désinfection par rayonnement UV, l'intensité a été modélisée en utilisant les modèles ILS et MPSS. Les résultats ont été validés par rapport à des essais de biodosimétrie et ont montré que les doses calculées ont été inférieures aux doses délivrées par le constructeur du réacteur. Une étude réalisée par Taghipour et Sozzi (2005), s'est intéressée à l'effet des courts-circuits sur le rendement des photoréacteurs moyennant un modèle réalisé par un code de CFD. Ce modèle a été exploité pour étudier l'effet de la variation du débit et de la puissance de lampe. Les résultats ont confirmé que la conception idéale pour un photoréacteur correspond aux plus faibles vitesses et les plus importantes puissances de lampes, un résultat qui vient confirmer les précédents constats. Elyasi et Taghipour (2006) ont réalisé un modèle couplé qui utilise une approche eulérienne pour l'étude de l'inactivation des bactéries dans un photoréacteur. Ils ont exploré les performances et les avantages de l'approche eulérienne par rapport à l'approche lagrangienne qui a été la plus utilisée dans les précédents travaux. L'approche utilisée dans l'étude a prouvé la capacité de l'approche eulérienne à présenter les profils de la dose dans le réacteur ainsi que le taux d'inactivation volumétrique local, tout en assurant une économie dans le temps de calcul et l'espace mémoire exigés. Dans toutes ces études la composante hydrodynamique n'était pas très détaillée, et sa modélisation s'est limitée à des cas où l'écoulement est laminaire. La distribution de l'intensité a été modélisée avec le modèle MPSS sans prise de compte de l'encrassement et en adoptant une intensité constante dans le temps. Liu et al (2007) ont réalisé une étude pour la simulation avec le code de CFD d'un photoréacteur en couplant un modèle de rayonnement à un modèle d'écoulement turbulent en utilisant différents modèles de fermeture pour le tenseur de Reynolds. Hors la zone du jet les modèles  $k-\epsilon$  standard et  $k-\epsilon$  RNG prévoient raisonnablement les champs de l'écoulement. Toutefois les résultats sont loin des mesures pour la zone du jet et près de la

lampe. Dans cette étude, les simulations ont été réalisées en stationnaire, ce qui a laissé soupçonner cette hypothèse simplificatrice de la déviation des calculs par rapport aux mesures. La distribution de la dose reçue est calculée par une approche lagrangienne par le transport des micro-organismes et en intégrant trois modèles de cinétique de désinfection. Les résultats ont montré que cette distribution dépend du modèle de turbulence choisi. Les différences enregistrées consistent en la présence de pics, leurs nombres, leurs emplacements, et l'étalement de la courbe de distribution de la dose (figure 3.1). Cette sensibilité au modèle de turbulence choisi est affectée par les conditions opératoires et elle est amplifiée avec la cinétique de la réponse du micro-organisme au rayonnement UV [3].

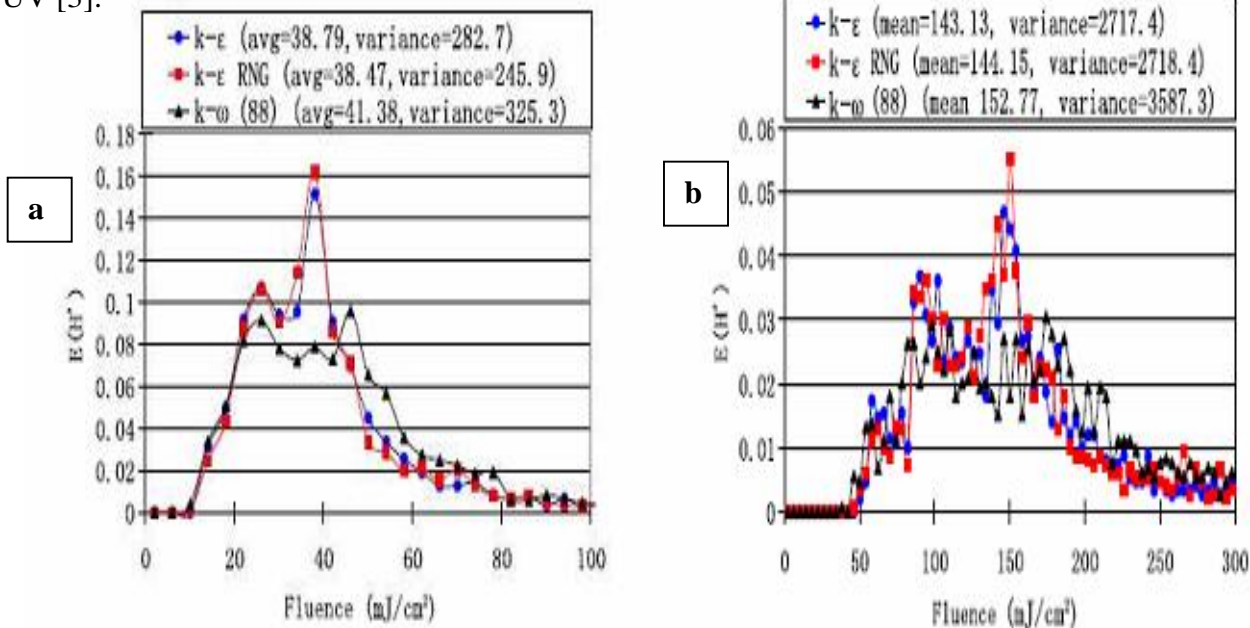


Figure 3.1. Distribution de la dose pour différents modèles de turbulence avec une lampe UV à faible puissance (a) et à forte puissance (b) [19].

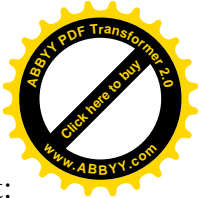
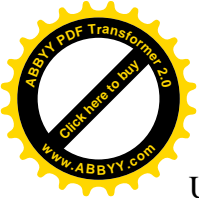
Dans ces travaux, il ressort que le modèle k-ε standard donne de bons résultats soit pour le calcul des champs de vitesse, de pression ou de turbulence, ou pour la prévision des résultats des modèles de désinfection. Ces modèles ont été validés par rapport à des écoulements turbulents.

### III. Le modèle hydrodynamique

Le système à résoudre est présenté par les équations de Navier-Stokes, composées de l'équation de conservation de la masse et l'équation de la quantité de mouvement. Pour un fluide newtonien, incompressible et en négligeant l'effet de la pesanteur, le système s'écrit :

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0, \tag{3.1}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial (U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} \tag{3.2}$$



Un écoulement peut être turbulent ou laminaire selon le nombre de Reynolds qui décrit:

$$Re = \frac{U.L}{\nu} \tag{3.3}$$

Avec 
$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{3.3.1}$$

U : vitesse caractéristique de l'écoulement

L : longueur caractéristique (dans le cas d'un tube c'est le diamètre)

$\nu$  : viscosité cinématique du fluide.  $\mu$  : viscosité dynamique du fluide.

$\rho$  : masse volumique du fluide.

Pratiquement il n'y a pas une classification finale du régime en fonction du nombre de Reynolds vu qu'il dépend aussi de la géométrie de l'écoulement, la rugosité de la surface et le niveau de fluctuations à l'entrée. On donne ici quelques niveaux représentatifs :

- Si  $0 < Re < 1000$ , l'écoulement est dit laminaire, les effets de la viscosité sont plus importants que les effets inertiels
- Si  $10000 < Re$ , l'écoulement est turbulent, l'inertie l'emporte par rapport à la viscosité. Le transfert d'énergie cinétique turbulente se fait entre les tourbillons de l'échelle des plus gros à l'échelle des micro-tourbillons et jusqu'à l'échelle de Kolmogorov où la dissipation de l'énergie se fait sous forme de chaleur.

Entre les deux valeurs du nombre de Reynolds, le régime est transitoire. Pour ce cas de turbulence à faible nombre de Reynolds, l'étude est assez compliquée vu le caractère aléatoire du mouvement, toutefois ce régime est très fréquent dans les stations de traitement et les réacteurs pilotes [20].

#### IV. Modélisation de la turbulence

Pour le cas turbulent, le modèle mathématique à résoudre est composé des équations moyennées de Reynolds obtenues en appliquant la décomposition de Reynolds qui décrit chaque grandeur instantanée  $U(x,t)$  en une grandeur moyenne (dans le temps)  $\bar{U}(x,t)$  et une grandeur fluctuante  $u(x,t)$  :

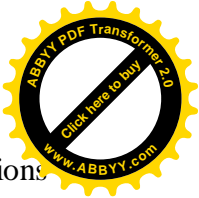
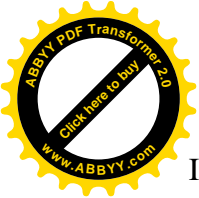
$$U(x,t) = \bar{U}(x,t) + u(x,t) \tag{3.4}$$

Avec 
$$\bar{u}(x,t) = 0.$$

Les équations obtenues sont appelées les équations de Reynolds:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0, \tag{3.5.a}$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{U}_i \bar{U}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right] \tag{3.5.b}$$



Il apparaît dans ce système des termes qui proviennent des corrélations entre les fluctuations turbulentes, ils représentent les contraintes dues à la turbulence et forment le tenseur de Reynolds,  $R_{ij} = \overline{u_i u_j}$ .

La fermeture des équations de Reynolds passe par la modélisation de ce terme. La notion de viscosité turbulente est ainsi introduite par Boussinesq et sur laquelle se base le modèle de la fermeture au premier ordre de ces équations :

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left( \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3.6)$$

Avec :  $\nu_t$  : la viscosité turbulente;  $k$ : l'énergie cinétique turbulente [19].

#### IV.1. Modèle k-ε standard

Ce modèle a été proposé par Launder et Spalding et depuis, il est très utilisé pour les applications d'ingénierie et de mécanique de fluides. Il se base sur la relation de Prandtl et

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (3.7)$$

Kolmogorov qui lie la viscosité turbulente à l'énergie cinétique turbulente  $k$ , et à son taux de dissipation  $\epsilon$  :

$C_\mu$  : est une constante à déterminer.

Les valeurs de  $k$  et  $\epsilon$  sont déterminées par la résolution des équations de transport des deux grandeurs, Launder et Spalding ont proposé cette formulation qui a été bien testée avec succès pour différents problèmes de turbulence:

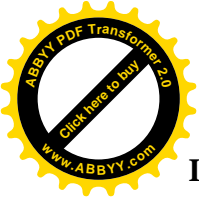
$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{U_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} = \nu_t \left( \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \epsilon \quad (3.8.a)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \overline{U_j} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \nu_t \left( \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right], \quad (3.8.b)$$

Les valeurs des constantes empiriques du modèle sont :

$$C_{\epsilon 1} = 1,44, \quad C_{\epsilon 2} = 1,92, \quad C_\mu = 0,09, \quad \sigma_k = 1, \quad \sigma_\epsilon = 1,3$$

Le modèle k-ε standard est adapté aux champs de turbulence isotropes, avec un régime complètement turbulent et où l'effet de la viscosité moléculaire est négligeable. Les calculs avec ce modèle nécessitent un temps moins important que les autres modèles, et sa convergence est assez facile [20].



## IV.2. Modèle k-ε RNG

Ce modèle se base sur les mêmes équations de transport des grandeurs k et ε, toutefois ses auteurs Yakhot et Orszag ont utilisé la théorie de normalisation des groupes et ont proposé une modélisation du coefficient  $C_{\epsilon 2}$  :

$$C_{\epsilon 2} = C_{\epsilon 2,0} + \frac{C_{\mu} \lambda^3 (1 - \lambda / \lambda_0)}{1 + \beta \lambda^3} \quad (3.9)$$

Avec 
$$\lambda = \frac{k}{\epsilon} \sqrt{2 S_{ij} S_{ji}} \quad (3.10)$$

Et 
$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.11)$$

Les valeurs des constantes empiriques de ce modèle sont :

$$C_{\epsilon 1} = 1,42, \quad C_{\epsilon 2,0} = 1,68, \quad C_{\mu} = 0,085, \quad \sigma_k = 0,72, \quad \sigma_{\epsilon} = 0,72, \quad \beta = 0,012, \quad \lambda_0 = 4,38$$

## IV.3. Modèle k-ω standard

C'est un modèle à deux équations où on résout les équations de transport de k et ω. ω représente la fréquence de la turbulence ou le taux de dissipation spécifique:

$$\omega = \frac{\epsilon}{k} \quad (3.12)$$

Les équations du modèle sont les suivantes :

$$v_t = \frac{k}{\omega}, \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = v_t \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma^* v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \beta^* k \omega \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} v_t \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] - \beta \omega^2, \quad (3.15)$$

Les valeurs des constantes empiriques du modèle sont :

$$\beta^* = 0,09, \quad \sigma = 0,5, \quad \sigma^* = 0,5, \quad \alpha = 5/9, \quad \beta = 3/40$$

Le modèle k-oméga permet de prendre en compte les écoulements à faible nombre de Reynolds en ajoutant dans l'expression de la viscosité turbulente un coefficient  $\alpha^*$  [19]:

$$v_t = \alpha^* \frac{k}{\omega}, \quad (3.16)$$

Où le coefficient  $\alpha^*$  s'écrit : 
$$\alpha^* = \alpha^*_{\infty} \left( \frac{\alpha^*_0 + Re_t / R_k}{1 + Re_t / R_k} \right) \quad (3.17)$$

Avec :

$$Re_t = \rho \cdot k / \mu \cdot \omega \quad (3.18)$$

$$R_k = 6$$



$$\alpha_0^* = \beta_i/3 \tag{3.19}$$

$$\beta_i = 0,072$$

Pour les grands nombres de Reynolds on retrouve  $\alpha^* = \alpha_\infty^* = 1$  .

## V. Simulation de la distribution des temps d'exposition en réacteur UV

Pour la Simulation de la distribution des temps d'exposition en réacteur UV, des simulations de l'hydrodynamique ont été réalisées en régime laminaire à faible nombre de Reynolds par le code de CFD Fluent.

La procédure de modélisation consiste en trois étapes :

- ✓ Préprocesseur : la création de la géométrie et le maillage du domaine,
- ✓ Processeur : l'entrée des données des simulations et les conditions aux limites
- ✓ Post-processeur : la sortie des résultats des calculs et leur exploitation.

La création de la géométrie et le maillage du domaine seront réalisés avec le module Gambit. Dans cette partie on doit préciser aussi les zones où seront définies les conditions aux limites, le type de la condition à préciser et la nature des zones (fluide ou solide). La résolution par le processeur se fait en chaque point du maillage, le code de calcul utilisé dans le cadre de ce travail est le code commercial Fluent®. Il est basé sur la méthode des volumes finis qui consiste à résoudre le bilan local des flux dans un petit volume de contrôle.

## VI. Préparation de la géométrie et maillage

### VI.1. Spécifications du problème

On considère un écoulement de fluide à travers un tube circulaire en quartz de section constante. Le diamètre du tube est  $d= 0.002$  m, sa longueur est  $L= 0.100$  m et  $0.003$ m entre deux spires. Les conditions sont choisies de telle sorte que la vitesse d'entrée soit constante par rapport au long de la section,  $V_{inlet} =0.12$  m/s, et que la pression à la sortie soit égale à la pression atmosphérique,  $P_{outlet} =0$  pascal. On choisit un fluide (eau infecte) de densité  $\rho=1030$  kg.m<sup>-3</sup> et un rayonnement qui se produit par une lampe cylindrique en quartz de rayon  $R=0.01125$ m et sa hauteur  $H=0.100$ m, la puissance de cette lampe 39Watt ( une lampe de basse pression ).

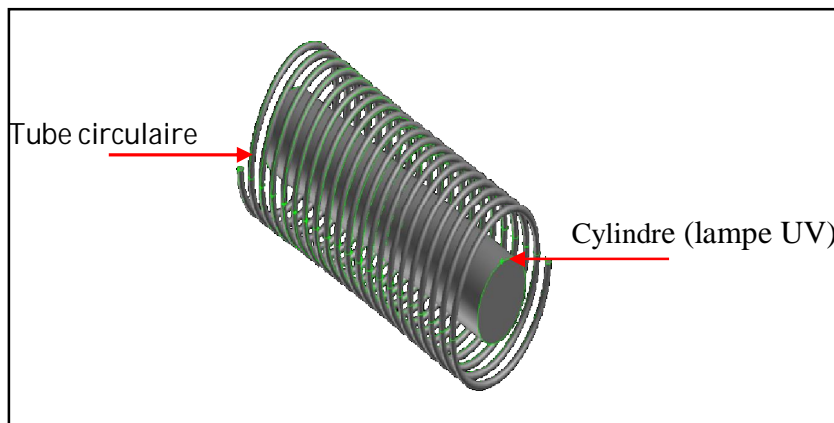


Figure 3.2. Géométrie du réacteur



## VI.2. Création de la géométrie

### VI.2.1. Démarrage de Gambit

- Barre de menu principale :

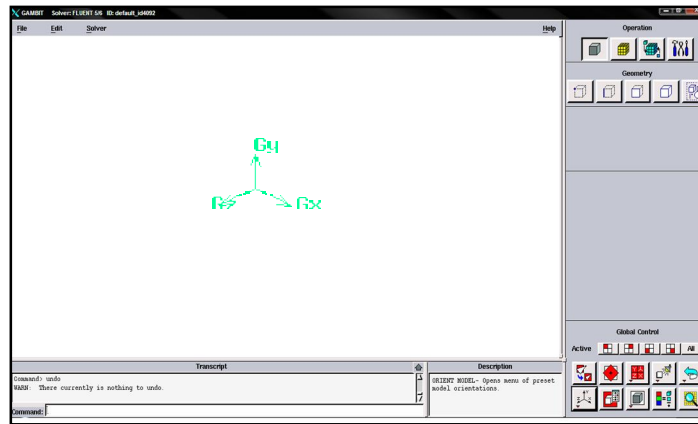


Figure 3.3. Panels généraux du logiciel Gambit

### VI.2.2. Création d'un tube circulaire

#### VI.2.2.1. Création d'une face circulaire

Pour créer une face circulaire, il faut suivre les étapes suivantes:

Geometry Command Button  > Face Command Button  > Create Real Circular Face Command 

- Entrer le rayon  $R=1$ , en suite choisir le plan : ZX , puis [Apply].

#### VI.2.2.2. Déplacement de la face créée

Pour déplacer la face créée, il faut suivre les étapes suivantes :

Geometry Command Button  > Face Command Button  > Move/Copy Faces Command Button 

- Sélectionner la face.1 créée , ensuite, cocher la case Move, choisir l'axe de translation Z et le point  $z = 22.5$ , puis [Apply].

#### VI.2.2.3. Création d'un volume à partir d'une face tournée

Pour créer un volume à partir d'une face tournée , il faut suivre les étapes suivantes :

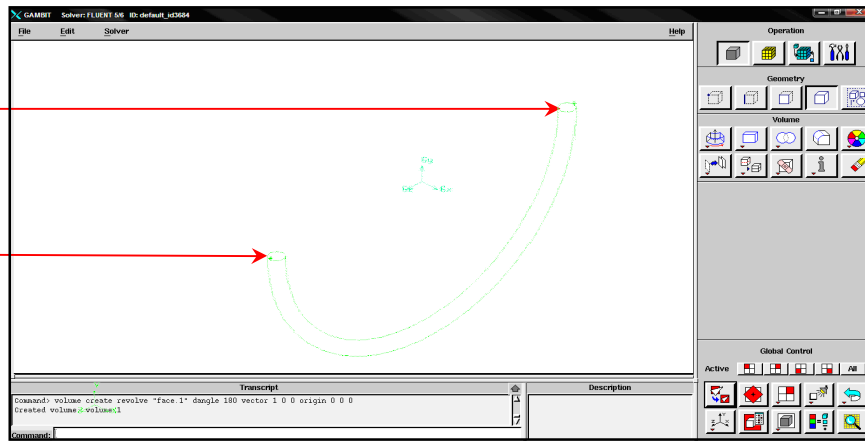
Geometry Command Button  > Volume Command Button  > Revolve Face Command Button 

a – Sélectionner la face.1 créée, entrer l'angle de rotation  $180^\circ$ , définir l'axe de rotation en cliquant sur [Define], choisir la direction suivant x positive, puis [Apply] ensuite [Apply] une seconde fois.

- Gambit affiche la figure ci-dessous.

Face.2

Face.1

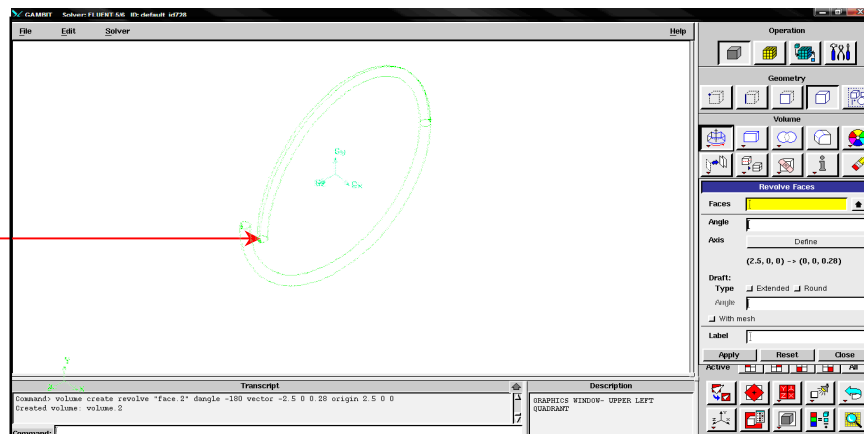


**Figure 3.4.1. Création d'un volume à partir d'une face tournée**

b - Sélectionner la face.2 créée , entrer l'angle de rotation ( $-180^\circ$ ) , définir l'axe de rotation en cliquant sur **[Define]**, choisir la direction suivant x positive, on prendra le mode 2 points et on entre les coordonnées: point 1 : (x=2.5 ; y=0 ; z=0 ) ; point 2 : (x=0 ; y=0 ; z=0.28) , puis **[Apply]** ensuite **[Apply]** une seconde fois.

- Gambit affiche la figure ci-dessous.

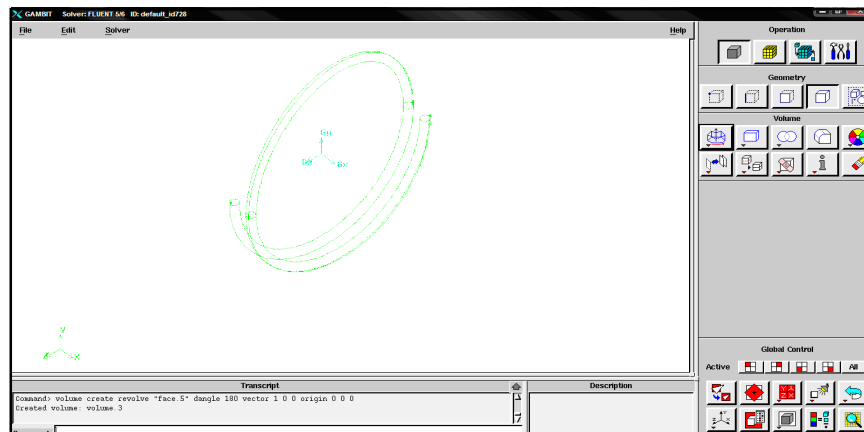
Face.5



**Figure 3.4.2. Création du deuxième volume à partir d'une face tournée**

c - Sélectionner la face.5, entrer l'angle de rotation  $180^\circ$ , définir l'axe de rotation en cliquant sur **[Define]**, choisir la direction suivant x positive, puis **[Apply]** ensuite **[Apply]** une seconde fois.

- Gambit affiche la figure ci-dessous.



**Figure 3.4.3. Création du troisième volume à partir d'une face tournée**

d- avec la même démarche de travail faite auparavant avec a, b et c, mais seulement, il y 'a un changement dans les coordonnées.

- Gambit affiche la figure ci-dessous.

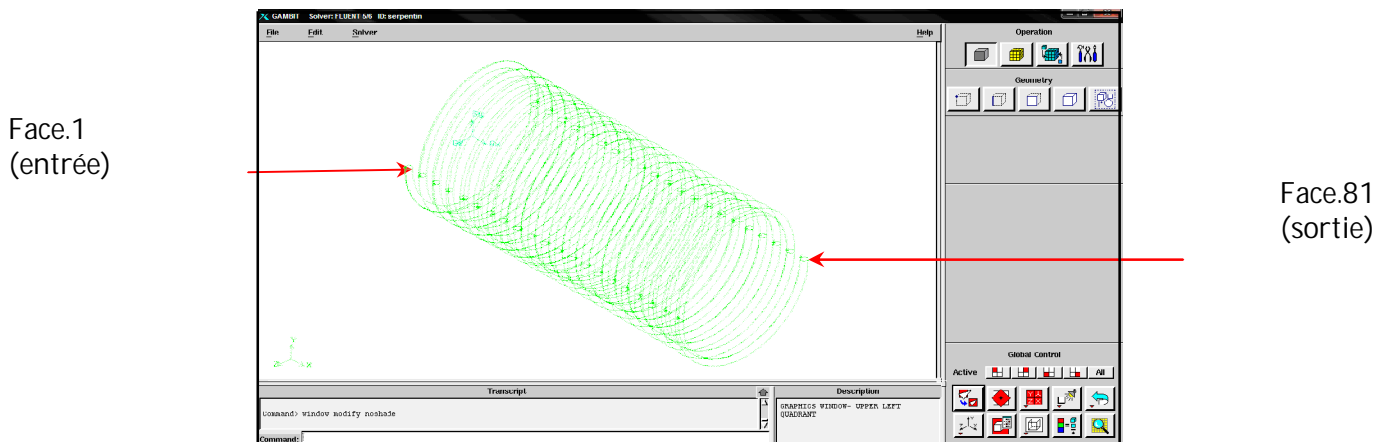



Figure 3.5. Tube circulaire

#### VI.2.2.4. Assemblages des volumes

Il faut maintenant assembler les volumes créés en respectant les étapes suivantes:

Geometry Command Button  > Volume Command Button  > Unite Real Volumes 

- Sélectionner tous les volumes on utilisant  ensuite en cliquant sur [**C**lose], puis [**A**pply].
- Gambit va créer un seul volume.

#### VI.2.3. Création d'un cylindre

Pour créer un cylindre, il faut suivre les étapes suivantes:

Command Button  > Volume Command Button  > Create Real Cylinder 

- Entrer la hauteur ( $H=100$ ), le rayon ( $R_1=11.25$ ).
- Choisir l'axe d'extrusion (Positive X), puis [**A**pply].

#### VI.3. Génération du Maillage

Gambit permet de mailler automatiquement suivant plusieurs types de maillage (Tet,Hex,ou mixte), et suivant différents algorithmes. Un maillage en Tet sera plus facile à générer, mais les calculs de simulation seront moins rapides que Hex. On choisira pour cette géométrie un maillage en Tet.

### VI.3.1. Création du Maillage

Pour procéder au maillage il faut suivre les étapes suivantes :

Mesh Command Button  > Volume Command Button  > Mesh Volumes 

- Sélectionner le volume (tube circulaire et le cylindre) .
- Le type d'éléments: Tet/Hybrid et le type de mailleur : Tgrid et entrer la taille de maillage (0.8) puis [**Apply**]

- Gambit affiche la figure ci-dessous.

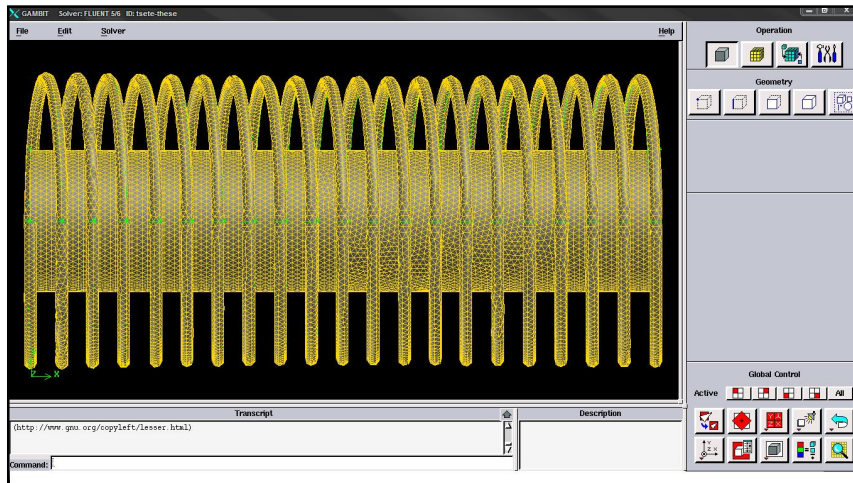


Figure 3.6. Maillage total du réacteur

### VI.4. Création des types de conditions aux limites

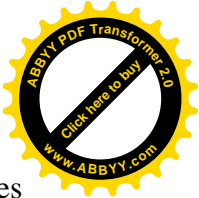
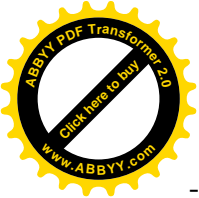
Pour procéder à la création des types de conditions aux limites, il faut suivre les étapes suivantes:

Zones Command Button  > Specify Continuum Types Command Button 

- Sélectionner le volume (tube circulaire) et choisir le type (fluid) et entrer un nom de la zone (eau) puis [**Apply**]
- Sélectionner le volume (cylindre) et choisir le type (solide) et entrer un nom de la zone (quartz) puis [**Apply**] Il faut définir les entités qui seront des murs, des entrées ou des sorties, des volumes fluides ou solides; appliquer la procédure suivante:

Zones Command Button  > Specify Boundary Types Command Button 

- Sélectionner la face.1, choisir le type (Velocity\_inlet), entrer un nom de la zone (entrée) puis [**Apply**].
- Sélectionner la face.81, choisir le type (Pressure\_outlet), entrer un nom de la zone (sortie) puis [**Apply**].



- Sélectionner toutes les faces du tube circulaire à l'exception de la face.1, la face.81 et les faces du cylindre; choisir le type (wall) ,entrer un nom de la zone (mur\_serpt) puis [**Apply**].
- Sélectionner les faces du cylindre , choisir le type (Wall) , entrer un nom de la zone (mur\_lampe\_uv) puis [**Apply**].
- A la fin de toutes les opérations, cliquer sur [**Close**].

## VI.5. Enregistrer et exporter

Pour enregistrer notre travail il faut suivre les étapes suivantes :

Cliquer sur [**File**], puis sur [**Export**], ensuite [**Mesh**].

Tapez un nom de fichier ensuite choisissez Export 2d Mesh puisque c'est une maille bidimensionnelle; cliquer [**Accept**].

## VII. Principales étapes de simulation sous Fluent

Ce manuel fournit une introduction à Fluent, une explication de ses aptitudes, et des instructions pour paramétrer le solveur. Il explicite les étapes nécessaires pour réussir une simulation d'un problème en mécanique des fluides.

### VII.1. Importation de la géométrie

Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (\*.msh) généré sous Gambit.

Cliquer sur [**File**], puis sur [**Read**], ensuite sur [**Case**].

```
FLUENT [3d, pbns, lam]
File Grid Define Solve Adapt Surface Display Plot Report Parallel Help

Welcome to Fluent 6.3.26

Copyright 2006 Fluent Inc.
All Rights Reserved

Loading "C:\Fluent.Inc\Fluent6.3.26\lib\fl_s1119.dmp"
Done.

Building...
grid,
Note: Separating interior zone 9 into zones 9 and 1.
default-interior -> default-interior (9) and default-interior:001 (1)
materials,
interface,
domains,
zones.
default-interior:001
default-interior
sortie
entree
mur-lampe_uv
mur-serpt
eau
quartz
shell conduction zones,
Done.
```

Figure 3.7. Importation de la géométrie générée sous Gambit

### VII.2. Vérification du maillage importe

Cliquer sur [**Grid**], puis sur [**Check**].

Ceci permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs ou de volumes négatifs, il faut que mot **Done** s'affiche à la fin.

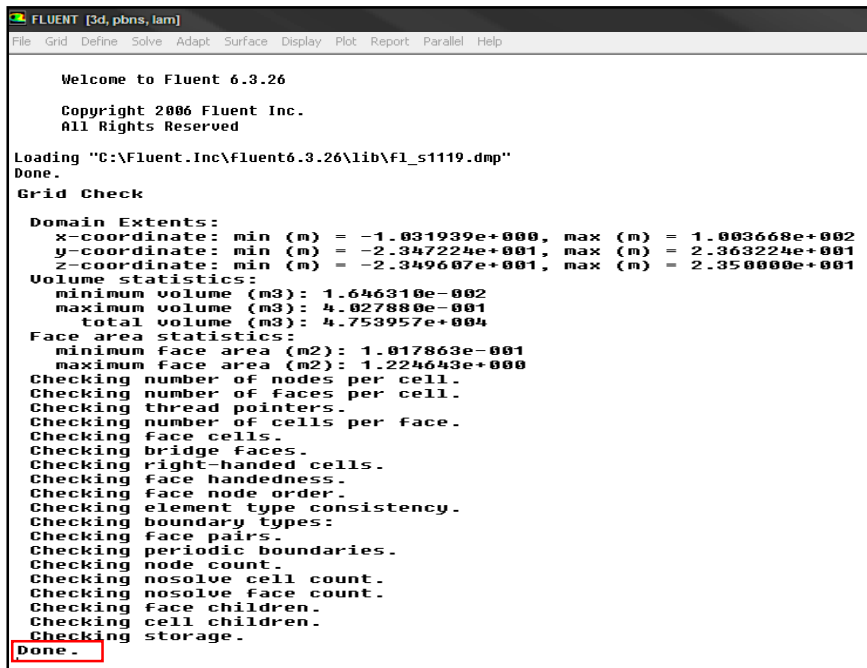


Figure 3.8. Vérification du maillage sous Fluent

### VII.3. Lissage du maillage (smooth and swap the grid)

Cliquer sur [Grid], puis sur [Smooth/Swap].

Pour s'assurer de la qualité du maillage, il est pratique de lisser le maillage, cliquez sur le bouton Smooth puis sur le bouton Swap. Répétez jusqu'à ce que Fluent affiche que zéro faces sont swapped.

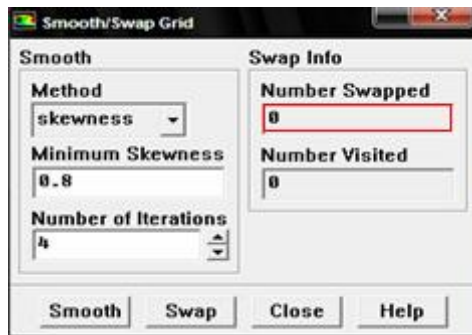


Figure 3.9. Lissage du maillage sous Fluent

### VII.4. Vérification de l'échelle

Cliquer sur [Grid], puis sur [Scale].

Il faut toujours vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème.

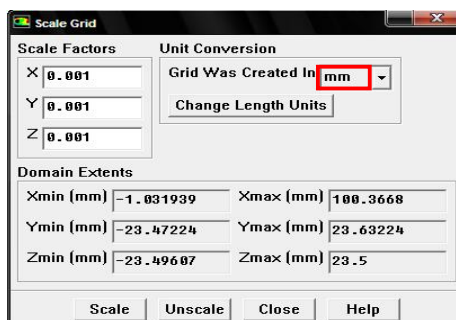


Figure 3.10. Vérification des unités (mm)



## VII.5. Choix du solveur

Cliquer sur [**D**efine], puis sur [**M**odels], ensuite sur [**S**olver].

On doit utiliser les défauts de résolveur isolé, la formulation implicite, le flux stable et la formulation absolue de vitesse, c'est là aussi qu'on choisit le régime d'écoulement ; permanent ou instationnaire.

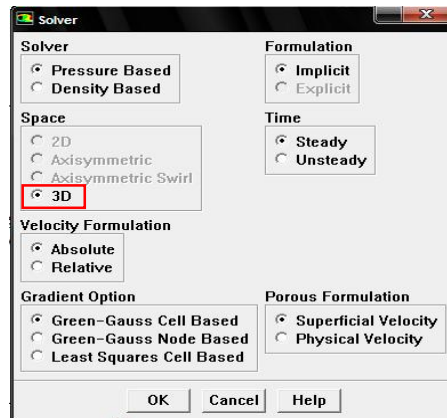


Figure 3.11. Choix du solveur sous Fluent

## VII.6. Affichage de la grille

Cliquer sur [**D**isplay], puis sur [**G**rid].

Il est possible d'afficher le maillage et il est très judicieux de vérifier les conditions aux limites définies au préalable dans Gambit.

## VII.7. Choix du modèle visqueux

Cliquer sur [**D**efine], puis sur [**M**odels], ensuite sur [**V**iscous].

Fluent propose différentes modélisations de l'écoulement turbulent. Parmi lesquels les écoulements non visqueux, laminaires, turbulents ... etc. Un écoulement peut être turbulent ou laminaire selon le nombre de Reynolds ( $Re=247.2$ ). Les calculs seront réalisés en régime laminaire.

## VII.8. Choix du modèle radiation

Cliquer sur [**D**efine], puis sur [**M**odels], ensuite sur [**R**adiation].

Fluent propose différents modèles de radiation; dans notre projet on choisit le modèle DO (Discrete Ordinates) c'est un modèle qui permet d'entrer l'intensité initiale de rayonnement  $I_0$ , ( $I_0 = \text{puissance da la lampe (39Watt)} / \text{la section de la lampe (0.007m}^2\text{)}$ ). Équation de l'énergie sera automatiquement activée. La discrétisation angulaire contrôle le raffinement du modèle DO. La valeur par défaut pour le  $\theta$  et  $\phi$  divisions est de  $2 \times 2$ , qui est grossier ( $5 \times 5$ , c'est mieux). Par défaut pour  $\theta$  et  $\phi$  pixels est de  $1 \times 1$  ( $3 \times 3$  est recommandé pour les frontières spéculaires ou semi-transparentes) [21].



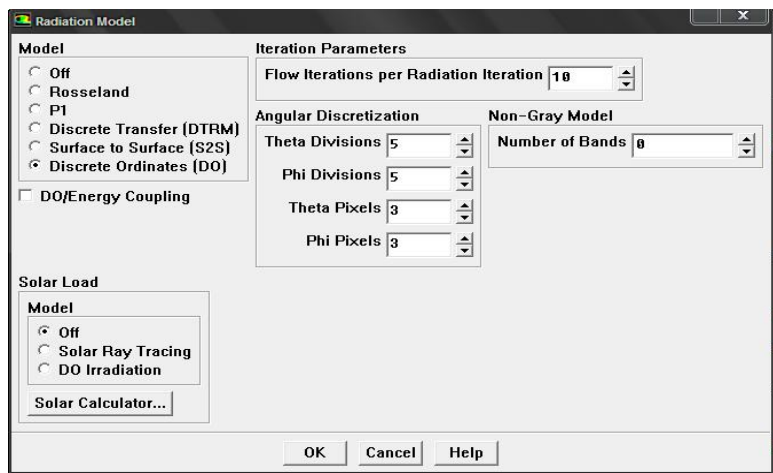


Figure 3.12. Modèle de radiation (DO)

### VII.9. Définition des caractéristiques du fluide et du solide

Cliquer sur [Define], puis sur [Materials].

- Les caractéristiques du fluide (eau) sont chargées à partir de la bibliothèque de données de Fluent.
- Les caractéristiques du solide (quartz) sont chargées à partir d'un site web qui sera inséré dans la bibliothèque de données de Fluent .

### VII.10. Conditions de fonctionnement

Cliquer sur [Define], puis sur [Operating conditions].

Fluent prend par défaut la valeur de la pression atmosphérique comme operating pressure.

Ensuite, il faut choisir les conditions aux limites :

#### VII.10.1. Conditions aux limites usuelles

Cliquer sur [Define], puis sur [Conditions].

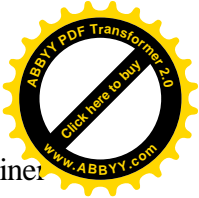
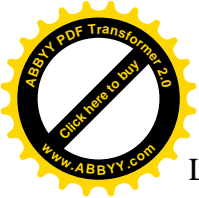
Il faut fixer les valeurs des conditions aux limites pour chaque zone, donner le type qui correspond:

- Eau (Fluid)

On choisit la densité  $\rho=1030 \text{ kg.m}^{-3}$  de l'eau infectée par bactériophages MS2 [21] et le coefficient de viscosité est  $\mu=1 \times 10^{-3} \text{ kg/ms}$ . Ceux-ci sont les valeurs que nous avons spécifiées sous la Spécification de Problème. Nous prendrons tous les deux comme constante. Changer le coefficient d'absorption pour refléter la transmission des UV où La qualité générale de l'eau peut être déterminée par son absorbance ou sa transmittance UV à 254 nm.

Qualité de l'eau brute	Absorbance (unités d'absorbance/cm)	Pourcentage de transmittance
Excellente	0,022	95 %
Bonne	0,071	85 %
Passable	0,125	75 %

Tableau 3.1. Qualité de l'eau brute et ses coefficients d'absorption



Le pourcentage de transmittance UV est utilisé plus particulièrement afin de déterminer si le rayonnement ultraviolet (UV) convient comme méthode de désinfection de l'eau. Il doit préférablement être mesuré sur un échantillon sans traitement de filtration. Le « Guide de conception des installations de production d'eau potable » indique que l'eau qui a un pourcentage de transmittance UV inférieur à 75 % ne doit pas être désinfectée à l'aide d'un procédé aux ultraviolets. Quant à la mesure de l'absorbance UV, elle constitue un indice général de la quantité de rayonnement UV nécessaire à la décontamination de l'eau et fournit de l'information quant au type et à la concentration de matières organiques présentes dans l'eau [21].

- **Quartz (Solide)** [22]

Les caractéristiques du quartz sont définies par:

- ✓ La densité =  $2600 \text{ kg.m}^{-3}$
- ✓ La capacité calorifique =  $790 \text{ j/kg-k}$
- ✓ Conductivité thermique =  $6.8 \text{ w/m-k}$ .
- ✓ Coefficient d' absorption =  $1.8 \text{ m}^{-1}$

- **Entrée (Velocity inlet)**

La condition à l'entrée est fixée à la vitesse d'entrée qui est constante et égale à  $0.12 \text{ m/s}$ , les composantes de la vitesse sont nulles sauf suivant l'axe des Y.

- **Sortie (Pressure Outlet)**

L'utilisation de Pressure Outlet sert à définir la pression statique à la sortie. L'utilisation de la condition Pressure Outlets comme conséquence une meilleure convergence ( $P_{\text{outlet}} = 0$  pascal).

- **Mur\_serpt (Wall)**

L'utilisation de Wall pour (mur\_serpt) sert à définir l'épaisseur de tube circulaire ( $2\text{mm}$ ) et le matériel utilisé (quartz), l'autre condition soit par défaut.

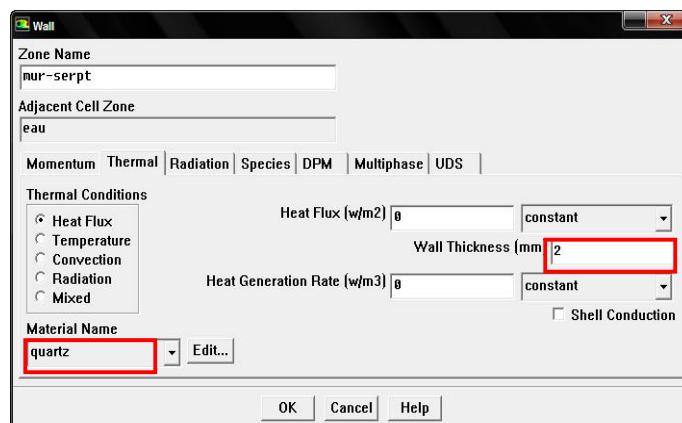
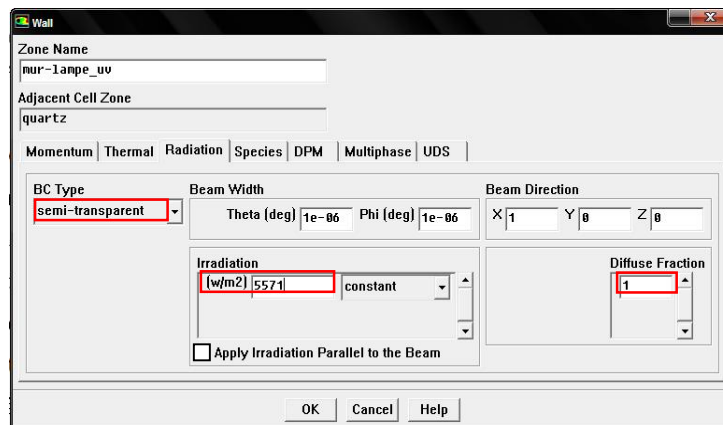


Figure 3.13. Conditions limites de Wall du tube circulaire



- **Mur\_lampe\_uv (Wall)**

L'utilisation de Wall pour (mur\_lampe\_uv) sert à définir, le matériel utilisé (quartz). Sous l'onglet radiations, définissez le type de la BC à "semi-transparent". Réglez la Fraction diffusée à une valeur comprise entre 0 et 1. Pour une valeur de 1, la totalité du rayonnement émis sera diffusée dans toutes les directions. Pour une valeur de zéro, le rayonnement émis suivra la direction du faisceau (surfaces réfléchissantes est spéculaire). Pour les lampes circulaires, la fraction diffusée doit être mise à 1 pour appliquer l'irradiation uniforme autour de la lampe (la circonférence). Définissez l'irradiation qui est l'intensité ( $I_0$ ) souhaitée de la lampe ( $I_0 = 5571 \text{ W/m}^2$ ) ; décochez la case "Appliquer irradiation parallèle à la poutre"



**Figure 3.14. Conditions limites de Wall du cylindre**

### VII.11. Choix des critères de convergence

Cliquer sur [**Solve**], puis sur [**Monitors**], ensuite sur [**Residual**].

Il s'agit ici de choisir les critères qui doivent être vérifiés pour que les calculs de la simulation s'arrêtent. Pour afficher la convergence à l'écran pendant les calculs sous forme d'un graphique, il faut activer l'option Plot. Il est possible de désactiver certains critères d'arrêt de la simulation en décochant la case de convergence.

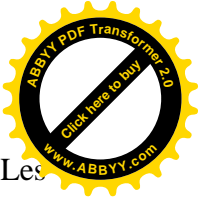
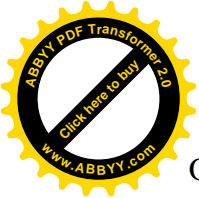
#### **Remarque importante :**

Les résidus sont calculés à partir des corrections dans les variables ; pression, vitesse, température... du problème entre la présente itération et l'itération précédente. Dans la plupart des cas, le critère de convergence par défaut dans Fluent (residual) est suffisant. La solution converge quand les résidus atteignent  $10^{-3}$ . Toutefois, dans certains cas il faut pousser les calculs à  $10^{-4}$  voir  $10^{-6}$ . Il n'y a pas de règle universelle [23].

### VII.12. Initialisation des calculs

Cliquer sur [**Solve**], puis sur [**Inisialize**], ensuite sur [**Inisialize**].

Il est conseillé dans de nombreux cas d'initialiser les calculs aux conditions de l'entrée.



On doit initialiser le calcul des vitesses d'entrée imposées dans les conditions initiales. Les composantes de la vitesse sont nulles sauf suivant l'axe des Y.

### VII.13. Sauvegarde du fichier

Cliquer sur [File], puis sur [Write], ensuite sur [Case].

Il est conseillé qu'une fois le paramétrage est effectué, de sauvegarder le fichier en format \*.cas. S'il y a un bug durant les calculs, il suffit de charger le fichier \*.msh, on n'aura pas à refaire le paramétrage.

### VII.14. Lancement de la simulation

Cliquer sur [Solve], puis sur [Iterate].

Choisir le nombre d'itérations que Fluent devra réaliser (par exemple 1000 ), plus la géométrie est complexe , plus il y a des cellules et plus le nombre d'itérations nécessaires avant que le calcul converge sera grand.

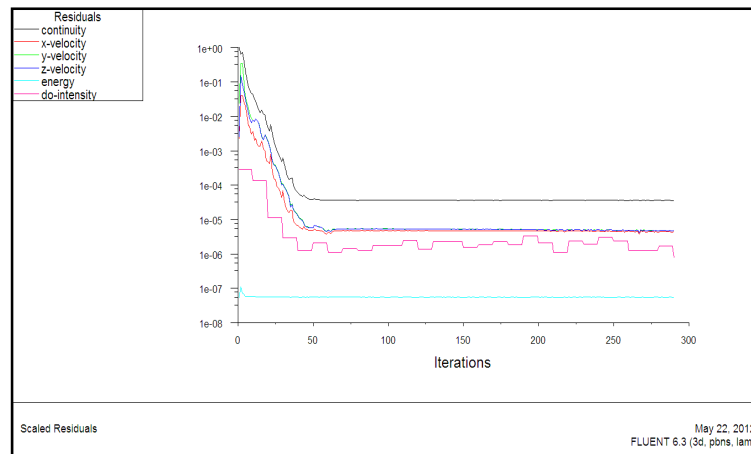


Figure 3.15 Allures de l'évolution des résidus de calcul (cas laminaire)

Le calcul converge au bout de 290 itérations pour le cas laminaire.

## VIII. Affichage des contours des différentes grandeurs

### VIII.1. Contour de la vitesse d'écoulement

Cliquer sur [Display], puis sur [Contours].

- Pour afficher le contour de la vitesse d'écoulement de l'eau dans le tube circulaire, il faut sélectionner le contour et le type de la vitesse (par exemple vitesse moyenne).
- Pour afficher le graphe de la vitesse il faut tracer une ligne droite suivant l'axe d'écoulement, pour cela il faut suivre les étapes suivantes:

Cliquer sur [Surface], puis sur [Line/Rake].

Les coordonnées suivantes: ( $x_0=-1, y_0=0, z_0=22$ ) et ( $x_1=1, y_0=0, z_0=22$ ) pour tracer une ligne droite à l'entrée du tube circulaire.

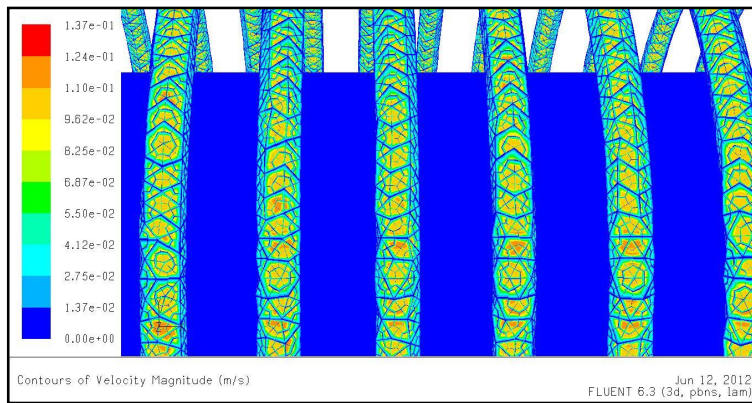


Figure 3.16. Contour de la vitesse moyenne dans le tube circulaire (cas laminaire,  $v=0.12\text{m/s}$ ).

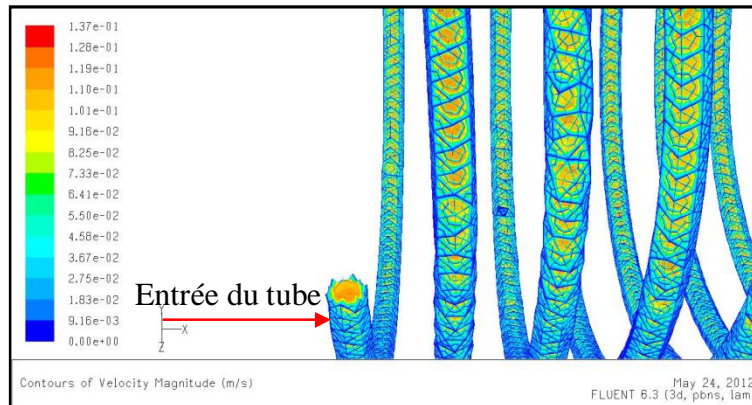


Figure 3.16.a. Contour de la vitesse moyenne à l'entrée du tube circulaire.

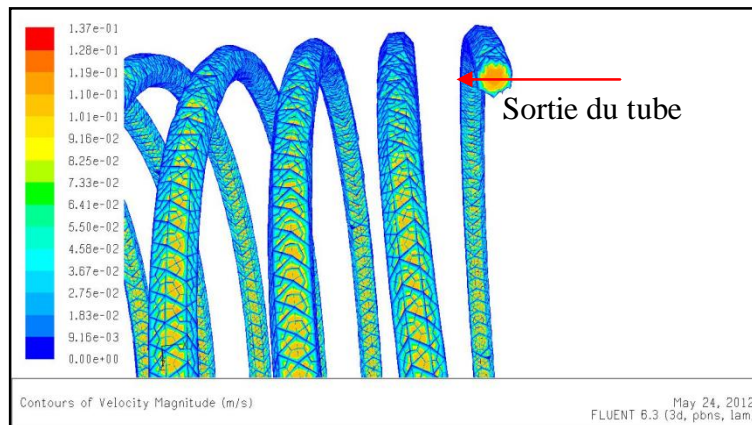


Figure 3.16.b. Contour de la vitesse moyenne à la sortie du tube circulaire.

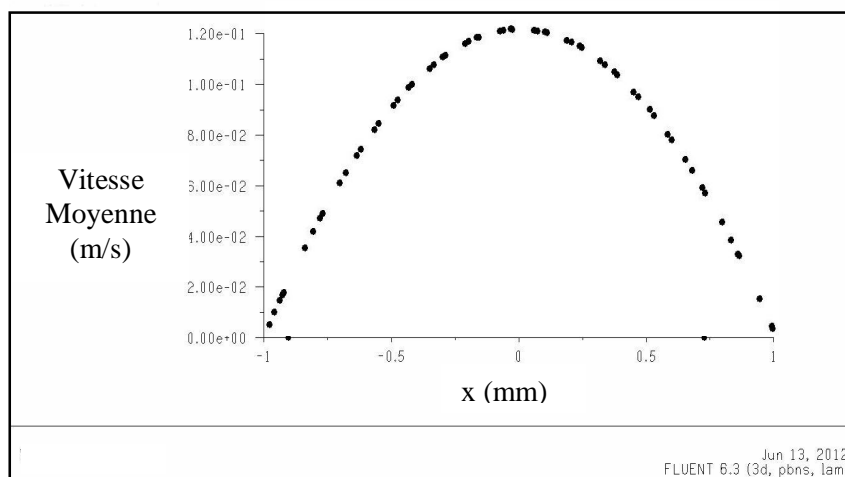
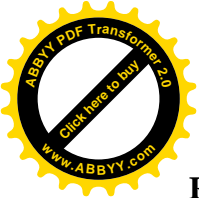


Figure 3.16.c. Profils de la vitesse moyenne à l'entrée du tube circulaire suivant la ligne tracé.



## Résultats et discussions

Les profils de la vitesse après établissement de l'écoulement dans le réacteur présentent pour le cas laminaire un cheminement préférentiel caractérisé par des vitesses importantes dans le sens de l'écoulement. D'après la figure (3.16) on peut dire que la variation de la vitesse est la même dans tout les spires du tube circulaire, la vitesse d'écoulement presque nulle au voisinage des parois du tube, ensuite elle est presque constantes dans les autres zones.

### VIII.2. Vérification de la conservation de débit

Cliquer sur [**Report**], puis sur [**Fluxes**].

Le débit est le quotient de la quantité de fluide qui traverse une section de la conduite par la durée de cet écoulement. Le débit-volume est la quantité de liquide occupant un volume cylindrique de base S et de la vitesse égale à v, correspondant à la longueur du trajet effectué pendant l'unité de temps, par une particule de fluide traversant S. Pour vérifier la conservation du débit, il faut que la condition suivante soit satisfaite, c'est-à-dire que le débit à l'entrée du tube soit égal au débit à la sortie du tube.

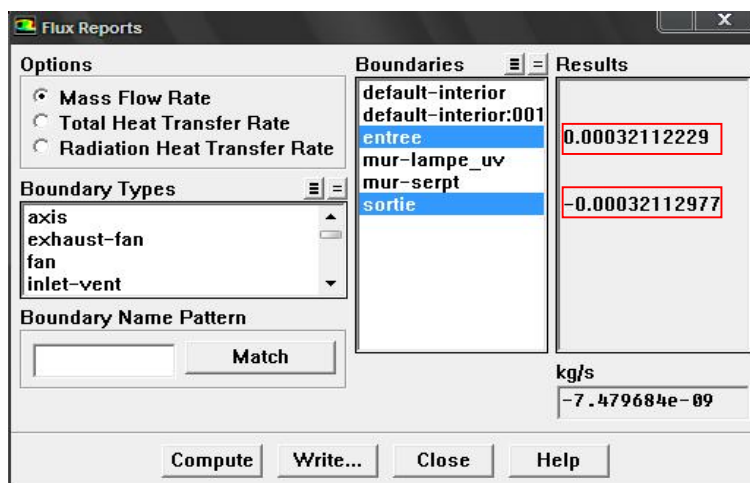


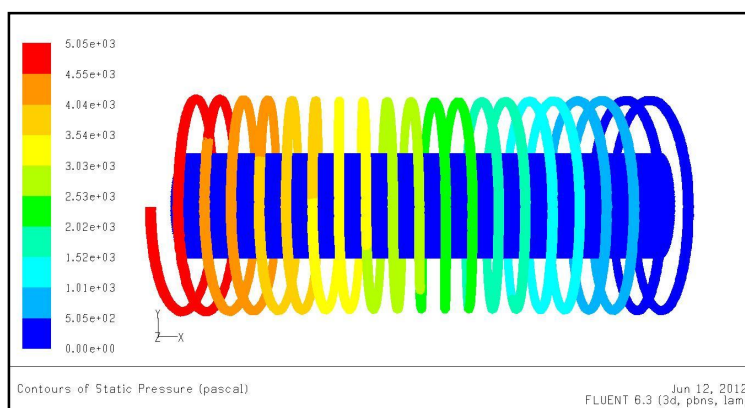
Figure 3.17. Vérification de la conservation de débit.

la condition de la conservation est satisfaite, le débit à l'entrée est presque égal au débit à la sortie en valeur absolue (figure 3.17).

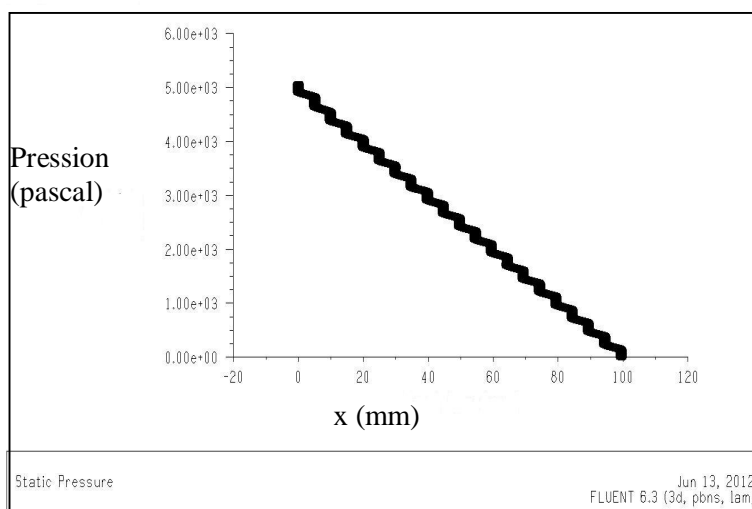
### VIII.3. Contour de la pression

Cliquer sur [**Display**], puis sur [**Contours**].

Pour afficher le contour de la pression dans le tube circulaire, il faut sélectionner son contour et son type .



**Figure 3.18. Contour de la pression dans le tube circulaire (cas laminaire,  $v=0.12\text{m/s}$ ).**



**Figure 3.18.a. Profils de la pression dans le tube circulaire.**

Il y'a une variation de la pression ; cette pression est grande à l'entrée du tube circulaire et s'affaiblit à sa sortie (figure 3.18 et la figure 3.18.a). .

## IX. Distribution de la dose

Pour afficher la distribution de la dose, il faut insérer son équation dans la bibliothèque de données de Fluent.

$$\text{Dose} = I \cdot dt \quad (\text{j/m}^2) \quad (3.20)$$

Avec

$$I = I_0 \times e^{-\alpha \times L} \quad (3.21)$$

- $I$  : Intensité donnée par la loi de Lambert-Beer en ( $\text{W/m}^2$ ).
- $I_0$  (intensité initiale) =  $5571 \text{ W/m}^2$  est déjà insérer dans les conditions limites de Wall du cylindre (lampe UV)
- $\alpha$  : le coefficient d'adsorption des rayons UV dans le liquide à traiter en ( $\text{m}^{-1}$ ) est exprimé

à partir de la qualité de l'eau (tableau 3.1).

- L : l'épaisseur de la lame d'eau en (m).
- dt : fraction du temps pour parcourir la maille en (s). Cette valeur est fixée pour chaque maille vu que les calculs de transport et de la réaction sont réalisés après que le régime permanent soit établi, d'où la direction et la norme de la vitesse en chaque maille soient fixes :

$$dt = \frac{dl}{v_{maille}} \quad (3.22)$$

Avec

- dl : distance parcourue dans la maille suivant la direction de la vitesse en (m).
- $v_{maille}$  : norme de la vitesse dans la maille en m/s

Pour cela, il faut cliquer sur [**Define**], puis sur [**Custom Field Functions**], ensuite pour afficher le contour de la dose dans le tube circulaire cliquer sur [**Display**], puis sur [**contours**].

- Sélectionner le contour de la dose et la surface du tube circulaire.

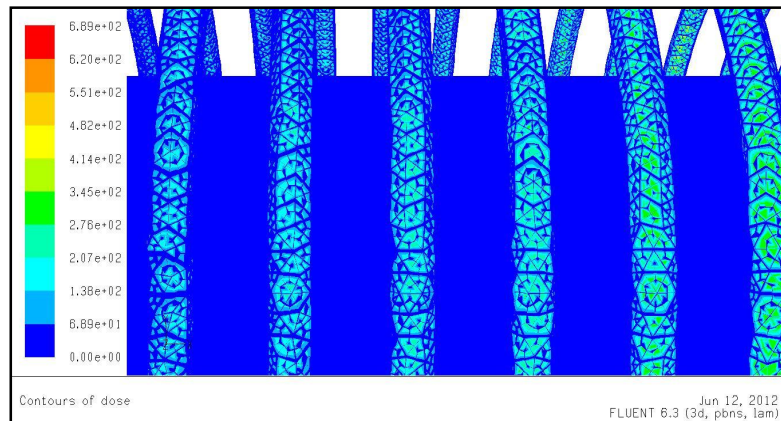
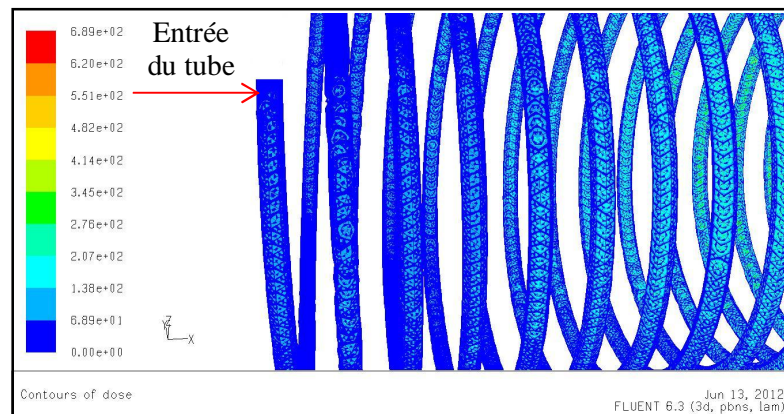
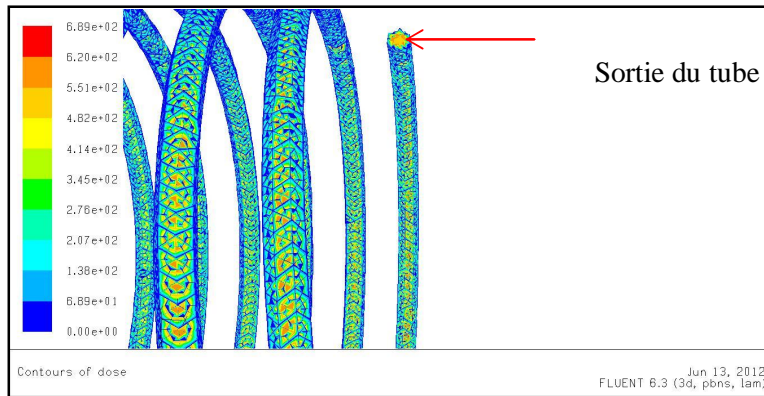


Figure 3.19. Distribution de la dose dans le tube circulaire (cas laminaire,  $v=0.12\text{m/s}$ ).

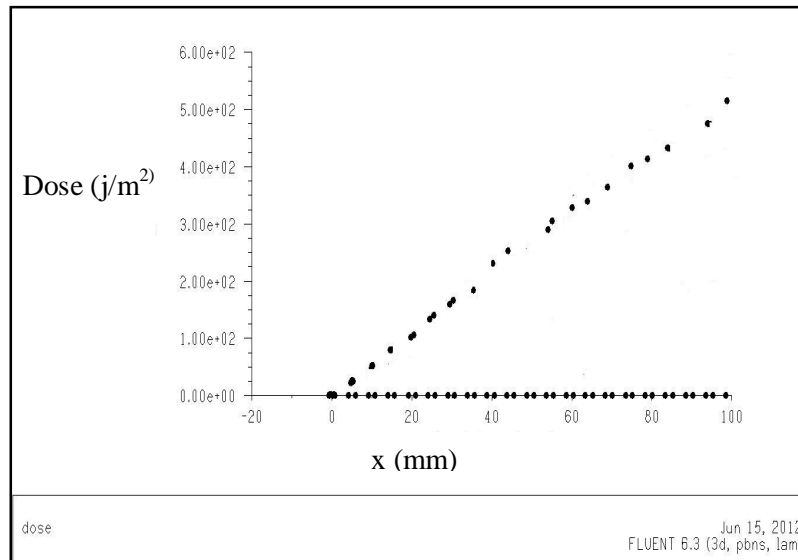




**Figure 3.19.a. Distribution de la dose à l'entrée du tube circulaire.**



**Figure 3.19.b. Distribution de la dose à la sortie du tube circulaire.**



**Figure 3.19.c. Profils de la dose dans le tube circulaire.**

Cette distribution varie dans le tube circulaire, à l'entrée du tube, la dose elle est presque nulle ainsi qu'au voisinage des parois, mais à la sortie, elle est grande ; c'est-à-dire à  $t=0s$ , la dose est nulle mais quand le temps passe, elle augmente suivant l'axe d'écoulement. Les doses les plus importantes sont localisées dans les mêmes zones (figure 3.19). Cette distribution montre que les fortes valeurs sont essentiellement localisées à la sortie du tube circulaire, et les vitesses plus faibles comparativement à la zone du jet. Ce résultat est prévisible par combinaison des profils de distribution de l'intensité et ceux de la vitesse.

## X. Distribution du taux d'inactivation des micro-organismes

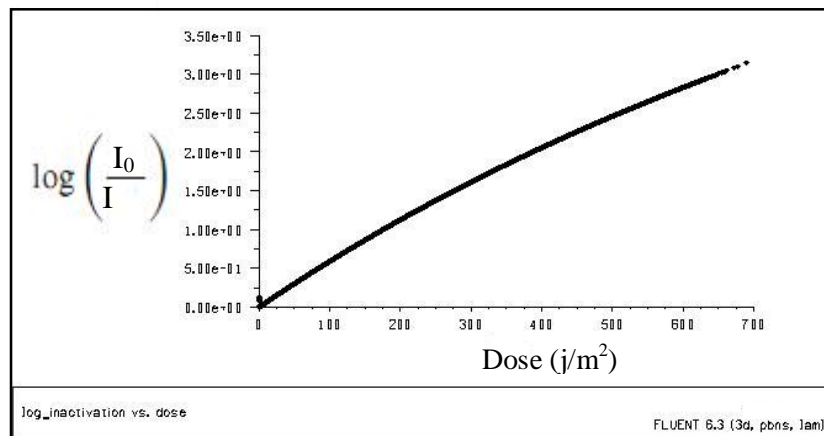
Pour afficher la distribution du taux d'inactivation des micro-organismes MS2 par irradiation UV, il faut insérer son équation en fonction de la dose dans la bibliothèque de données de Fluent.



$$\log\left(\frac{I_0}{I}\right) = 9 \times 10^{-10} \times \text{Dose}^3 - 3 \times 10^{-6} \times \text{Dose}^2 + 0.0062 \times \text{Dose} \quad (3.23)$$

- $\log\left(\frac{I_0}{I}\right)$  : Taux d'inactivation des micro-organismes.
- Dose: la fonction de la dose est exprimée dans l'équation (3.20).

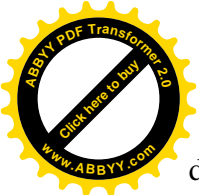
Pour cela, il faut cliquer sur [**Define**], puis sur [**Custom Field Functions**], ensuite pour afficher la distribution du taux d'inactivation en fonction de la dose cliquer sur [**Plot**], puis sur [**XY Plot**].  
- Sélectionner l'équation du taux d'inactivation suivant l'axe Y et l'équation de la dose suivant l'axe X, ensuite la surface du tube circulaire.



**Figure 3.20. Profils du taux d'inactivation du Coliphage MS2 pour une transmittance de 95%.  
(coefficient d'absorption  $\alpha=2.2\text{m}^{-1}$ )**

La transmittance UV étant une mesure du pourcentage de transmission de la lumière UV, elle est par conséquent un indicateur d'efficacité que peut avoir la lampe UV. En ce qui concerne la possibilité de désinfection par rayonnement UV, l'eau est classée de la façon suivante : TUV > 95 %, excellente; TUV > 85 %, bonne et TUV > 75 %, passable. La plupart des fabricants de systèmes de traitement UV suggèrent que la TUV soit > 75 % .

Dans cette partie, on a fixé le coefficient d'absorption  $\alpha=2.2\text{m}^{-1}$  pour que la transmittance soit 95%, c'est-à-dire que la possibilité de désinfection par rayonnement UV de l'eau est excellente. L'intensité du rayonnement dans un volume élémentaire du réacteur est égale à la somme de tous les rayonnements émise par ces points sources. Evidemment, il faut prendre en compte l'absorption du rayonnement par les composants, les particules et les micro-organismes présents dans le réacteur. La variation du temps d'exposition induit des doses variables, La courbe du taux d'inactivation déjà tracée nous renseignent sur la dose UV reçue par les micro-organismes lors de leur passage dans le réacteur. Cela nous explique, quand il y'a une augmentation de la



dose, automatiquement le taux d'inactivation augmente au même temps; c'est-à-dire, les micro-organismes diminuent dans l'eau infectée.

Les résultats trouvés sont en adéquation avec une recherche citée dans le chapitre 1 (figure 1.13)

## **XI. Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre les modèles de régimes d'écoulement laminaire et turbulent ainsi que la création d'une géométrie d'un réacteur ultra-violet par Gambit. Cette géométrie se compose d'un tube circulaire de 21 spires où il y'a un écoulement de l'eau infectée par un bactériophage MS2 de densité  $\rho=1030 \text{ kg.m}^{-3}$  et un cylindre qui se produit un rayonnement UV. Le code Fluent a été utilisé pour les simulations numériques régime instationnaire. Notre étude est basée sur un écoulement laminaire ( $Re= 247.2$ ) pour cela, on a utilisé une vitesse moyenne de  $0.12\text{m/s}$ . Le modèle de rayonnement qu' on a utilisé c'est DO (Discrete Ordinates) c'est le meilleur par référence qui permet d'entrer l'intensité initiale de rayonnement qui se produit par la lampe UV ( $I_0=5571\text{W/m}^2$ ), ensuite on a pris une condition sur la coefficient d'absorption  $\alpha= 2.2\text{m}^{-1}$  pour que la transmittance soit 95%; ces conditions nous permet de trouver une meilleure solution pour le taux d'inactivation des micro-organismes.



## Conclusion générale et perspectives

Dans ce travail nous avons abordé l'étude d'un réacteur de désinfection par rayonnement UV par une étude de simulation d'un réacteur ultra-violet qui se compose d'un tube circulaire canalisant l'eau infectée par des bactériophages MS2 et un cylindre représentant une lampe d'UV. La modélisation a été traitée avec deux approches systémique et locale dans le but de comparer leurs potentiels, leurs avantages et limites dans l'étude des systèmes industriels avec réaction qui dépend de la distribution temporelle et spatiale des paramètres ; l'intensité du rayonnement et l'hydrodynamique.

Pour les conditions de simulation, on a imposé un régime d'écoulement laminaire ( $Re=247.2$ ). Il est possible d'ajouter des calculs en régime turbulent dans le but d'examiner la sensibilité du modèle, non pas essentiellement pour retrouver les mesures.

Dans l'étude de l'intensité, la partie de simulation nous a permis :

- la détermination de la puissance nominale de basse ou de haute pression de la lampe UV suivant sa section.
- le développement du modèle de l'évolution de l'absorbance de la solution en fonction de L'avancement de la réaction.

La modélisation de l'intensité a été utilisée comme une fonction qui a été intégrée dans le code de CFD Flunet permettant de calculer la distribution spatiale de l'intensité dans tout le volume de réacteur.

Cette intensité dépend du coefficient d'absorption de l'eau pour avoir une transmittance faible. La transmittance UV étant une mesure du pourcentage de transmission de la lumière UV, elle est par conséquent un indicateur d'efficacité que peut avoir la lampe UV. En ce qui concerne la possibilité de désinfection par rayonnement UV, l'eau est classée de la façon suivante :

TUV > 95 %, excellente pour un coefficient d'absorption  $\alpha=2.2\text{m}^{-1}$  ; TUV > 85 %, bonne pour un coefficient d'absorption  $\alpha=7.1\text{ m}^{-1}$  et TUV > 75 %, passable pour un coefficient d'absorption  $\alpha=12.5\text{m}^{-1}$ . La plupart des fabricants de systèmes de traitement UV suggèrent que la TUV soit > 75 % .

Pour déterminer la distribution de la dose UV reçue dans un photo-réacteur , nous avons inséré sa fonction qui dépend de l'intensité émise et du temps d'exposition dans le code CFD Fluent pour permettre de la calculer.



Pour avoir le taux d'inactivation des micro-organisme dans le photo-réacteur par simulation, il faut insérer son équation en fonction de la dose de rayonnement UV.

Quand il y'a une augmentation de la dose , automatiquement le taux d'inactivation augmente; c'est-à-dire les micro-organismes diminuent dans l'eau infecte.

Pour conclure, on peut dire que les conditions réunies choisies à la simulation de notre réacteur est fiable pour avoir de meilleurs résultats.



## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Rekacewicz Philippe, <http://www.monde-diplomatique.fr/cartes/disponibiliteeau> (octobre 2008).
- [2] Water Environment Federation, "Wastewater disinfection", Manual of practice FD-10,1996.
- [3] Anis Ben Messaoud, thèse présentée pour l'obtention des diplômes de Docteur, " Etude expérimentale et modélisation d'un procédé de désinfection par rayonnement uv, " l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse", 17 octobre 2009.
- [4] USEPA. "Design Manual: Municipal Wastewater Disinfection", Cincinnati, Ohio, 1986.
- [5] AWWA, « Alternative disinfection technologies for small drinking water systems »,1990.
- [6] USEPA, "Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule", 2006.
- [7] Bolton James R., "calculation of ultraviolet fluence rate distributions in an annular reactor: significance of refraction and reflection" Water Research, Vol. 34, No. 13,2000, 3315-3324.
- [8] Masselot M., <http://www.edu.up.mc.fr> .
- [9] Jagger, J. (1967) "Introduction to Research in Ultraviolet Photobiology. Prentice-Hall, Englewood Cliffs," NJ, USA. Cité par Blatchley 1997.
- [10] Shayeb Hedi, Thèse de doctorat ès-sciences « Etude expérimentale et modélisation de la désinfection d'eaux naturelles, d'eaux potables et d'eaux usées épurées », 2000.
- [11] USEPA "Wastewater Technology Fact Sheet Ultraviolet Disinfection", septembre 1999.
- [12] Hijnen W.A.M., Beerendonk, E.F., Medema, G.J., 2006. "Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: a review." Water Res.40, 3-22.
- [13] Severin B.F., Roessler P.F., Dey J. « Resolving UV Bioactinometric Results with Intensity », Quantitative Microbiology 1, 1999, 111-136.
- [14] Braun A.M., Maurette, M.T., Oliveros, E., « Technologie photochimique », Presses Polytechniques. Romandes, 1ère édition, 1986.
- [15] Severin B.F., Roessler P.F., Dey J. « Resolving UV Bioactinometric Results with Intensity », Quantitative Microbiology 1, 1999, 111-136.
- [16] Braun A.M., Maurette, M.T., Oliveros, E., « Technologie photochimique », Presses Polytechniques Romandes, 1ère édition, 1986.
- [17] Ebbesen T. W., "IUPAC Technical Report", Pure and Applied Chemistry, Vol. 64No. 9, 1992pp. 1343-1382.
- [18] Ducoste J., Linden K., "Hydrodynamic characterization of UV reactors", AwwaReF Web Report,2006.



- [19] Launder B.E., Spalding D.B. "The numerical computation of turbulent flows", Comput. Math.Appl. Mech. Eng. 3,1974, 269, cité par Liu et al. 2007.
- [20] Rauen W.B., Lin B., Falconer R.A., Teixeira E.C. "CFD and experimental model studies for water disinfection tanks with low Reynolds number flows", Chemical Engineering Journal, 137, 2008, 550- 560.
- [21] Siamak Elyasi□, Fariborz Taghipour , "Simulation of UV photor-reactor forwater disinfection in Eulerian framework" ,Chemical Engineering Science 61 (2006) 4741 – 4749) .
- [22] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Quartz>
- [23] Djafer fedala, "Simulation numérique des écoulements internes dans les rbomachines", Laboratoire d'Energétique et de Mécanique des Fluides Interne ENSAM, CER de Paris, OCTOBRE 2007



# ANNEXES

**Annexe 1** : Les coordonnées cartésiennes pour tracer le tube circulaire.

**Annexe 2** : Tableau récapitulatif des plus importants travaux récents réalisés sur la technique UV

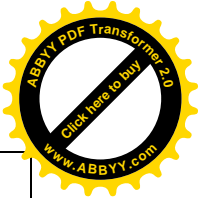
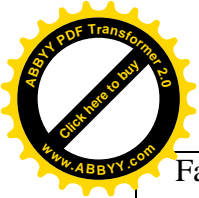




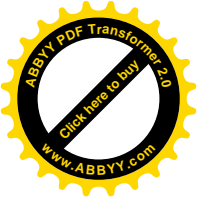
## Annexe 1

Les coordonnées cartésiennes pour tracer le tube circulaire suivant la direction x positive.

Face	Angle de rotation	Point 1 (début)			Point 2 (fin)		
		x <sub>0</sub>	y <sub>0</sub>	z <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	z <sub>1</sub>
Face 1	180°	0	0	0	1	0	0
Face 2	-180°	2.5	0	0	0	0	0.28
Face 5	180	0	0	0	1	0	0
Face 6	-180°	7	0	0	0	0	0.76
Face 9	180°	0	0	0	1	0	0
Face 10	-180°	12	0	0	0	0	1.31
Face 13	180°	0	0	0	1	0	0
Face 14	-180°	17	0	0	0	0	1.96
Face 17	180°	0	0	0	1	0	0
Face 18	-180°	22	0	0	0	0	2.45
Face 21	180°	0	0	0	1	0	0
Face 22	-180°	27	0	0	0	0	3
Face 25	180°	0	0	0	1	0	0
Face 26	-180°	32	0	0	0	0	3.55
Face 29	180°	0	0	0	1	0	0
Face 30	-180°	37	0	0	0	0	4.2
Face 33	180°	0	0	0	1	0	0
Face 34	-180°	42	0	0	0	0	4.75
Face 37	180°	0	0	0	1	0	0
Face 38	-180°	47	0	0	0	0	5.3
Face 41	180°	0	0	0	1	0	0
Face 42	-180°	52	0	0	0	0	5.85
Face 45	180°	0	0	0	1	0	0
Face 46	-180°	57	0	0	0	0	6.4
Face 49	180°	0	0	0	1	0	0
Face 50	-180°	62	0	0	0	0	6.95
Face 53	180°	0	0	0	1	0	0
Face 54	-180°	67	0	0	0	0	8.2



Face 57	180°	0	0	0	1	0	0
Face 58	-180°	77	0	0	0	0	8.75
Face 61	180°	0	0	0	1	0	0
Face 62	-180°	82	0	0	0	0	9.3
Face 65	180°	0	0	0	1	0	0
Face 66	-180°	87	0	0	0	0	9.85
Face 69	180°	0	0	0	1	0	0
Face 70	-180°	92	0	0	0	0	10.4
Face 73	180°	0	0	0	1	0	0
Face 74	-180°	97	0	0	0	0	10.95
Face 77	180°	0	0	0	1	0	0
Face 78	-180°	102	0	0	0	0	11.5
Face 81	180°	0	0	0	1	0	0



### Annexe 3

Tableau récapitulatif des plus importants travaux récents réalisés sur la technique UV

	Diffey juin 2002				Zhang 1999	Bolton nov. 1999	Blatchley 1997	Auteur Année	
	Définition du vocabulaire lié aux sources UV et les techniques de mesure				Utilisation de l'actinométrie pour mesurer l'intensité UV sur un échantillon fixe	Effets de la réflexion et de la réfraction dans les modèles d'intensité UV	Modélisation numérique de la distribution de l'intensité UV dans un réacteur	Etude	
Demesie 2003								Auteur Année	
Optimisation de la DTS dans un réacteur UV pour optimiser son rendement								Etude	
Peldsaus Sept. 2003		Campbell Juin 2001	Craik Août 2000	Craik Mars 2000				Auteur Année	
Utilisation des UV pour l'élimination du brome des eaux usées		Effets des UV sur des kystes humains de Giardia Lamblia	Comparaison du rendement des lampes moyenne et basse pression : seul diff d'ordre économique	Utilisation des lampes moyenne pression pour l'inactivation des kystes de Giardia Miris				Etude	

			Yang. Fév. 2005					Auteur Année	
			Effets de nouvelles prop. Physiques et optiques de quelques substances sur la distribution de l'intensité UV.					Etude	
			Qiangyi. fév. 2005		Kutchma jan.2004		Unluturck jan. 2004	Auteur Année	
			Modélisation du rendement désinfectant d'un réacteur UV annulaire en fonction de la vitesse de l'écoulement.		Effets des propriétés physiques des jus de fruits et de la turbulence sur le rendement		Modélisation de la distribution de la dose dans un réacteur UV pour le traitement de cidre ( app. Lagrang)	Etude	
Nebot Sanz, 2007	Labas, 2006.	Labas, 2005		Sharrer Déc. 2004		Villarno 2003	Qan Octobre 2003	Auteur Année	
Modélisation de la cinétique de la photo-réactivation et réactivation à l'obscurité.	Cinétique de désinfection des bactéries par rayonnement UV dans une eau claire ; Modélisation de la cinétique et expériences.	Cinétique de désinfection des bactéries par rayonnement UV dans un milieu absorbant et nutritif ; Modélisation de la cinétique et expériences.		Rendement d'un système UV avec recirculation sur l'inactivation des bactéries.		Caractérisation de l'état biologique des cellules après leur exposition aux UV	Etude probabiliste ; une méta-analyse bayésienne sur l'inactivation des protozoaires par l'UV	Etude	