

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

UNIVERSITÉ de BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE CHIMIQUE

Option : Génie catalytique.

Présenté par :

Melle. Ahlem DJELLALI et Melle. Maroua SLIMANI

**Simulation numérique d'un réacteur solaire de traitement
des eaux de rejet par le code de calcul Ansys Fluent**

Encadreurs:

Mm. Aicha SEBTI, UDES/CDER
Pr. Hussein KHALAF, Université de Blida 1

Juin 2015

REMERCIEMENT

Nous remercions "**Dieu**" le tout puissant de nous avoir donné la force et le courage pour accomplir ce travail.

Ce travail a été réalisé au niveau de l'Unité de Développement des Equipements Solaires UDES/EPST /CDER de Bousmaïl, Division "Froid et Traitement des eaux par Energies Renouvelables" au niveau du Laboratoire 'Epuraton et Valorisation des Eaux de Rejet".

Nous exprimons notre gratitude et reconnaissance a nos encadreurs Madame **A. SEBTI** Attachée de Recherche à l'UDES et Monsieur **H. KHALAF** pour leurs disponibilités, leurs aides, leurs conseils et leurs orientations.

Nous remercions infiniment notre chef de Département **Mr R.ISSADI**.

Nous tenons à témoigner notre reconnaissance à nos professeurs de Génie Chimique.

Que tout le personnel de l'UDES à leur tête Monsieur le Directeur **Dr.B.BOUZIDI** et Monsieur le Chef de Division FTEER **Dr. M. Abbes**, et les membres de l'équipe EVER, trouvent ici l'expression de nos vifs remerciements pour leur accueil et leur gentillesse.

Sans oublier nos **Familles** ainsi que tous ceux qui ont participé, de près ou de loin à la réalisation de ce travail

MERCI !

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail à :

Celle qui m'a appris les belles choses de la vie, Le symbole de la bonté et de la tendresse, l'exemple du dévouement ma chère grande mère je suis très reconnaissante d'avoir été toujours là pour moi.

A mes parents.

Ma sœur ; Souad.

Mes frère : Sif edin et ayoub.

A mon très cher binôme et amie Maroua.

A tous mes ami(e)s en plus particuliers à :

Hakima, Oumaima, Khalida, Asma, Hafsa, Nadia, Oumaima, Fella, Hizia, Lilia, Lina, Habiba, Imen, Asma, Meriem, Madjda, Mohcen, Karim, Zaki, Ilyes, Oussama, Hamza, Kaci, Nour edin.

Mes sincères gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail

A

Mes parents (Mama et Papa)

Mes sœurs

« Amina et Rayene »

A mon très cher binôme et amie Ahlem.

Mes chères amies

Malika BARKI

« Sonia ROUABAH et Siham DAHBI »

Ma chère enseignante

« Mm/ N. BOUCHELEGHÈME »

*Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement,
l'amour*

et l'affection que je porte pour vous.

ملخص

النمذجة الرياضية للسوائل هي وسيلة فعالة لتصميم وتحسين أداء العمليات الفيزيائية والكيميائية المعقدة لتعقيم المياه. التحلل الضوئي للماء هي تقنية آمنة واقتصادية للحد من التلوث الجرثومي. حيث يستخدم تأثير الأشعة فوق البنفسجية من الطاقة الشمسية أو الاصطناعي لتعطيل مسببات الأمراض. في هذا العمل، نقترح نماذج التشعيع، الحركية والهيدروديناميكية لمحاكاة مفاعل للطاقة الشمسية المستخدمة لتعقيم المياه ومثال على دراسة المحاكاة باستخدام برنامج Fluent.

في هذه الدراسة تم استخدام ثلاثة نماذج رياضية:

1. الهيدروديناميك

2. نماذج من توزيع الإشعاع

3. نماذج لحركية التعطيل

طريقة حجم محدود تستخدم لحل نايفير ستوكس التي تحكم تدفق المضطرب من طراز $K-\epsilon$ ، تم حل معادلة انتقال الإشعاعات بواسطة نموذج DO

أظهرت النتائج أن توزيع كثافة والجرعة التي تلقاها الكائنات الدقيقة يتأثر سرعة الإدخال، ونقل، وتوزيع الإشعاع. الاستفادة المثلى من هذه الأشكال أساس لتصميم وأداء نظام التطهير بالأشعة فوق البنفسجية.

Résumé

La modélisation mathématique des fluides numérique est une méthode efficace pour la conception et l'optimisation des performances des processus physiques et chimiques très complexes destinés à la désinfection de l'eau. Photolyse de l'eau est une technique sûre et économique pour réduire la contamination bactérienne. Il exploite l'effet germicide de la lumière UV solaires ou artificiels pour inactiver les micro-organismes pathogènes. Dans ce travail, nous proposons des modèles d'irradiation, cinétiques et hydrodynamiques utilisés pour simuler un photo réacteur solaire utilisé pour la désinfection des eaux et un exemple d'une étude de simulation effectuée par Fluent Software.

Dans cette étude, trois modèles mathématiques ont été considérés :

1. Modèles de l'hydrodynamique
2. Modèles de la distribution de rayonnement
3. Modèles pour la cinétique d'inactivation

La méthode des volumes finis par le code fluent a été utilisée pour résoudre les équations de Navier-Stokes régissant l'écoulement en régime turbulent par le modèle $K-\epsilon$, L'équation du transfert radiatif a été résolue par le modèle des ordonnées discrètes (OD) et

L'approche eulérienne du mouvement des particules dans l'eau a été choisie pour calculer la dose reçue par les microorganismes.

Les résultats obtenus montrent que, la distribution de l'intensité, ainsi que la dose reçue par les micro-organismes est influencée par la vitesse d'entrée, la transmission, la répartition du rayonnement. L'optimisation de ces derniers constitue la base pour la conception et la performance du système de désinfection par UV.

Abstract

Mathematical modeling computational fluid is an effective method for designing and optimizing the performance of complex physical and chemical processes for disinfection of water. Photolysis of water is a safe and economical technique to reduce bacterial contamination. It uses the germicidal effect of solar or artificial UV light to inactivate pathogens. In this work, we propose some models for irradiation, kinetic and hydrodynamic to simulate a solar reactor used to photograph water disinfection and an example of simulation study conducted by Fluent Software.

In this study three mathematical models were considered:

1. models of hydrodynamics
2. Models of the radiation distribution
3. Models for the inactivation kinetics

The finite volume method was used by fluent to solve the Navier-Stokes governing turbulent flow by the K- ϵ model, the radiative transfer equation was solved by the discrete ordinates model (OD) and the Eulerian approach motion of particles in water was chosen to calculate the dose to the microorganisms.

The results obtained show that the distribution of the intensity and the dose received by the micro-organisms is influenced by the velocity, the transmission, the distribution of radiation. The optimization of these forms are the basis for the design and performance of the UV disinfection system.

Sommaire

❖ INTRODUCTION GENERAL

CHAPITRE I : INTRODUCTION A LA DESINFECTION

❖ INTRODUCTION.....	01
I. PROCES DE DESINFECTION.....	03
I.1. CHLORATION	03
I.2. OZONATION	03
I.3. DESINFECTION PAR LE RAYONNEMENT UV.....	04
II. COMPARAISON DE DIFFERENTS PROCES DE DESINFECTION.....	04
III. PROCES DE DESINFECTION PAR RAYONNEMENT ULTRAVIOLET.....	06
III.1. PRINCIPE DE LA DESINFECTION PAR UV.....	07
IV. SOURCES D'EMISSION DES RAYONNEMENTS UV.....	09
IV.1. SOURCE NATURELLE.....	09
IV.1.1 SOLEIL.....	09
IV.2. SOURCE ARTIFICIELLE.....	09
IV.2.1. LAMPE A VAPEUR DE MERCURE.....	09
IV.2.1.1. LAMPES BASSE PRESSION.....	09
IV.2.1.2. LAMPES MOYENNE ET HAUTE PRESSION.....	10
V. MECANISME D'INACTIVATION DES MICROORGANISMES.....	11
VI. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE RAYONNEMENT UV	12
VII. PARAMETRES INFLUENCENT SUR L'EFFICACITE DE LA DESINFECTION.....	12
VII.1. TEMPS D'EXPOSITION	12
VII.2. INTENSITE EMISE PAR LES LAMPES.....	13
VII.3. PARAMETRES DES QUALITE D'EFFLUENT	13
VII.3.1. MATIERES EN SUSPENSIONS.....	13
VII.3.2. TRANSMISSION UV.....	14
VII.3.3. TURBIDITE	14

Sommaire

VII.4. RESISTANCE DES MICROORGANISMES AU RAYONNEMENTS UV ET LEURS TAILLES.....	14
--	----

VII. CONCLUSION.....	15
----------------------	----

CHAPITRE II : INTRODUCTION A LA CFD

I. SIMULATION NUMERIQUE	16
I.1. CFD APPLIQUEE AU PROCES DES TRAITEMENT DES EAUX.....	16
I.1.1. PRE-TRAITEMENT	
I.1.2. SOLVER	
I.1.3. POST TRAITEMENT	
II. MODELISATION ET SIMULATION NUMERIQUE DES REACTEURS SOLAIRES.....	18
II.1. MODELISATION DE LA CINETIQUE.....	19
II.1.1. MODELE DE CHICK-WATSON.....	19
II.1.2. MODELE DE HOM.....	21
II.2. MODELISATION DE L'HYDRODYNAMIQUE	21
II.3. MODELISATION DE LA DISTRIBUTION DE L'INTENSITE DE RAYONNEMENT ..	24
II.3.1. MODELE DES ORDONNEES DISCRETES	24
III. CONCLUSION.....	25

CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE

I. ETUDE NUMERIQUE DE LA PHOTO-REACTEUR TUBULAIRE.....	27
I.1. DESCRIPTION GENERAL DU REACTEUR.....	27
I.2. GENERATION DE LA GEOMETRIE ET MAILLAGE	27
I.2.1. SPECIFICATION DU PROBLEME	27
I.2.2. GENERATION DE LA GEOMETRIE	28
I.3. PRINCIPAUX ETAPES DE LA SIMULATION SOUS FLUENT	
I.3.1. ETAPES GENERALES	34
II. CONCLUSION.....	43

Sommaire

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

I. SIMULATION DU PHOTO-REACTEUR TUBULAIRE

I.1.	ETUDE DE L'HYDRODYNAMIQUE	44
I.1.1	VERIFICATION DE LA CONSERVATION DU DEBIT.....	47
I.1.2.	CHAMP DE LA TURBULENCE	48
1.2.	ETUDE CINETIQUE	48
1.2.1.	EAU CHARGEE DES MICROORGANISMES AVEC UNE TRANSMITTANCE DE 7.1 M ⁻¹	49
1.2.1.1	DISTRIBUTION DE LA DOSE	49
1.2.1.2.	TAUX D'INACTIVATION.....	53
1.2.2.	EAU CHARGEE DES MICROORGANISMES AVEC UNE TRANSMITTANCE DE 2.2 M ⁻¹	61
1.2.2.1.	TAUX D'INACTIVATION.....	61
1.3.	ETUDE SUR L'INFLUENCE DE LA VARIATION DU TEMPS DE SEJOUR	63
1.3.1.	TRANSMITTANCE DE 7.1 m ⁻¹ , VITESSE (0.07, 0.1 et 0.2) m/s, CONFIGURATION OPTIMALE DU PHOTO REACTEUR REACTEUR (incliné de 36°)	64
1.3.2.	TRANSMITTANCE DE 2.2 m ⁻¹ , VITESSE (0.07, 0.1 et 0.2) m/s, CONFIGURATION OPTIMALE DU PHOTO REACTEUR REACTEUR (incliné de 36°).....	65
II.	CONCLUSION	67

LISTE DES FIGURES

- Figure 1.1.** Spectres d'absorbance relatifs des bases de l'ADN et de l'ARN.
- Figure 1.2.** Mécanisme d'inactivation des micro-organismes.
- Figure 2.1.** Taux d'inactivation des microorganismes pathogènes en fonction du temps.
- Figure 4.1.** Champ de vitesse selon X, Z en régime non stationnaire
- Figure 4.2.** Champ de vitesse selon X, Z en régime stationnaire
- Figure 4.3.** Distribution de la dose reçue par les microorganismes à 780 w/m² pour les deux configurations [0°,36°] respectivement
- Figure 4.4.** Distribution de la dose reçue par les microorganismes à 1480 w/m² pour les deux configurations [0°,36°] respectivement
- Figure 4.5.** Distribution du taux d'inactivation ($\log I_0/I$) à 780 w/m² pour les deux configurations [0°,36°] respectivement.
- Figure 4.6.** Distribution du taux d'inactivation ($\log I_0/I$) à 1480 w/m² pour les deux configurations [0°,36°] respectivement
- Figure 4.7.** Distribution du taux d'inactivation ($\log I_0/I$) en fonction de la dose (j/m²) reçue par les microorganismes à 780 w/m² pour les deux configurations [0°,36°] respectivement
- Figure 4.8.** Distribution du taux d'inactivation ($\log I_0/I$) en fonction de la dose (j/m²) reçue par les microorganismes à 1480 w/m² pour les deux configurations [0°,36°] respectivement
- Figure 4.9.** Distribution du taux d'inactivation ($\log I_0/I$) en fonction de la dose (j/m²) reçue par les microorganismes de 1480 w/m² pour les deux configurations [0°,36°]
- Figure 4.10.** Distribution du taux d'inactivation ($\log I_0/I$) en fonction de la dose (j/m²) reçue par les microorganismes à 780 w/m² pour les deux configurations [0°,36°] respectivement

Figure 4.11. Distribution du taux d'inactivation ($\log I_0/I$) en fonction de la dose (j/m^2) reçu par les microorganismes à 1480 w/m^2 pour les deux configurations $[0^\circ, 36^\circ]$ respectivement.

Figure 4.12. Distribution du temps de séjour en fonction de l'inactivation ($\log I_0/I$) des microorganismes à 1480 w/m^2 pour la configuration optimale.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. Comparaison entre les différents procédés.

Tableau 1.2. Récapitulatif des principales caractéristiques des lampes de basse et moyenne pression.

Tableau 1.3. Avantages et inconvénients de rayonnement UV.

Tableau 1.4. Résistance des micro-organismes aux rayonnements UV et leurs taille.

Tableau 2.1. Les modèles hydrodynamiques.

Tableau 2.2. Le modèle de distribution de l'intensité de rayonnement par la lampe.

Tableau 4.1. Distribution Du taux d'inactivation ($\log I_0/I$) en fonction de la dose (j/m^2) reçue par les microorganismes de $[780 \text{ à } 1480] \text{ w/m}^2$ respectivement. Pour la configuration optimale à 36° .

Tableau 4.2. Distribution Du taux d'inactivation ($\log I_0/I$) en fonction de la dose (j/m^2) reçue par les microorganismes de $[780 \text{ à } 1480] \text{ w/m}^2$ respectivement. Pour la configuration optimale à 36° .

LISTE DES NOTATIONS

LETTRES ROMAINES

- C :** Concentration de désinfectant chimique ou intensité du rayonnement.
- D :** Dose.
- d_1, d_2, d_3 : Longueurs de trajet de la lumière UV.
- I :** Intensité UV en mW/cm².
- I_b : L'intensité du rayonnement du corps noir.
- K :** Energie cinétique turbulente
- k_a, k_s : Coefficient d'absorption et de diffusion respectivement (l / m).
- k_{uv}** : Constante cinétique cm²/mW.s.
- m :** Cconstante qui contrôle la déviation du taux d'inactivation par rapport à la loi linéaire.
- n :** Constante de type de désinfectant.
- N₀** : Nombre de micro-organismes au temps t₀.
- N_t** : Nombre de microorganismes au temps t.
- N_v** : Le nombre des micro-organismes viables par unité de volume à l'instant t.
- P :** Pression.
- P :** Puissance de sortie émise par la lampe.
- R₁, R₂** : Facteurs de réflectance pour l'air / quartz et de quartz interfaces / air.
- t :** Temps.
- T_w, T_q** : Transmission de l'eau et de quartz.
- V :** Vitesse.

LETTRES GRECQUES

- λ : Longueur d'onde.

- Ω : Direction de propagation du rayonnement.
 Φ : Fonction de diffusion de phase.
 α : Coefficient d'absorption.
 ρ : Masse volumique Kg/m³.
 ϵ : Taux de dissipation turbulente.

ABREVIATIONS

- atm:** Atmosphère.
ADN Acide désoxyribonucléique.
ARN Acide ribonucléique.
CFD Computational fluid dynamic.
MES Matières en suspension.
MPSS Multiple point source sommation.
PET Polyéthylène téréphtalate.
PVC Polychlorure de vinyle.
Re Nombre de Reynolds.
RTE Equation de transfert radiatif.
SODIS Solair water disinfection.
STEP Station de traitement d'épuration.
US.EPA United states environmental protection agency.
UV Ultra-violet.

MOTS CLES : Traitement des eaux, Procédés biologiques, Désinfection, Rayonnement UV, Modélisation, simulation, fluent.

INTRODUCTION GENERAL

En raison de l'augmentation des besoins en eau et de la diminution des ressources naturelles, la réutilisation des eaux résiduaires s'avère indispensable. Cependant cette démarche se trouve heurter au respect de la réglementation concernant la qualité bactériologique des eaux destinées à la consommation humaine qui devienne de plus en plus stricte. En effet, l'eau usée véhicule des microorganismes pathogènes qui peuvent survivre après le traitement chimique, physique ou biologique. L'introduction d'un "traitement tertiaire" telle que la désinfection chimique (chloration, ozonation) ou physique (par rayonnement solaire) contribue à éliminer les microorganismes pathogènes et présente une solution avantageuse et efficace pour améliorer la qualité des eaux traitées.

La désinfection par rayonnement UV est une technologie qui est en pleine développement. En effet, comparée à la chloration et l'ozonation ce mode de traitement présente l'avantage d'être propre et ne génère pas de sous-produits indésirables. De plus, il n'altère pas les propriétés physico-chimiques des eaux traitées et exploite l'effet germicide d'une source de rayonnement inépuisable qui est le soleil.

Un réacteur solaire de désinfection est le siège de phénomènes physiques et chimiques très complexes. En effet, la destruction des microorganismes par rayonnement UV est influencée par :

1. l'écoulement de l'eau dans le réacteur
2. la distribution du rayonnement naturel ou artificiel
3. et la cinétique de désinfection

L'évaluation de l'efficacité d'un tel réacteur et l'optimisation de son fonctionnement nécessite le recours à des méthodes de simulation poussées qui peuvent coupler l'hydrodynamique, la cinétique et la distribution du rayonnement. C'est dans ce contexte que se situe notre travail : contribuer à simuler un réacteur solaire de désinfection des eaux résiduaires en utilisant l'interface de simulation ANSYS.FLUENT.

La désinfection a été étudiée en laboratoire soit sur des échantillons de kystes isolées (Campbell 2001) ou sur des bactéries en batch fermé en milieu nutritif et en eau claire (Labas, 2005- Labas, 2006). Le but de ces études est la modélisation de leurs cinétiques d'inactivation. Villarno en 2003 a étudié l'état des bactéries après exposition aux UV et la possibilité de leur reviviscence et Nebot Sanz en 2007 a proposé une modélisation de la cinétique de la photoréactivation et la réactivation à l'abri de la lumière.

Unluturck en 2004 a présenté une modélisation en approche lagrangienne par CFD de la distribution de la dose dans un réacteur UV pour le traitement du cidre. 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. Ducoste en 2005 a montré la faible différence entre la modélisation avec approche eulérienne ou lagrangienne malgré le temps considérable nécessaire pour la dernière. Liu D. et al. En 2006 ont réalisé une étude qui a permis l'examen de l'effet du choix d'un modèle de fermeture sur la distribution de la dose reçue mais sans validation par l'expérience. 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.

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- ϵ standard et k- ϵ 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.

Anis ben messaoud, en 2009 à aborder le sujet avec une approche intégrée où il a étudié la distribution de l'intensité, l'hydrodynamique des réacteurs ouverts et le transport réactif, dans le cadre d'une étude expérimentale et de modélisation. La mesure et la validation de l'effet de la dose reçue sont réalisées à travers le suivi de la réaction photochimique d'un actinomètre, un choix qui permet de surpasser les inconvénients de la bio-dosimétrie et qui met l'accent sur le phénomène de l'encrassement.

Hayet milous, en 2011 a montré l'efficacité et la fiabilité de la modélisation par la méthode CFD pour l'évaluation du processus de désinfection par rayonnement UV. Plusieurs configurations de réacteur ont été réalisées en considérant l'hydrodynamique, l'intensité des lampes UV-C et la distribution de la dose.

En fin, Mr. LARBI M'hamed en 2013 a réalisé l'étude de la simulation d'un réacteur de désinfection par rayonnement UV, l'intensité a été modélisée en utilisant les modèle 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.

Dans ce travail nous essayons de prendre en considération l'effet de la transmittance et de regrouper l'étude pour différents paramètres dans un photo réacteur solaire ouvert constituer de deux types différents des matériaux dont la géométrie est complexe, et l'écoulement est en régime turbulent, nous avons aussi pris en considération :

1. Effet de l'inclinaison.
2. Effet de la variation de l'intensité UV-a émis par le soleil.
3. Effet de la variation de temps de séjour.
4. Effet de la transmittance pour le solide et fluide.

Dans le premier chapitre nous présentons les différentes techniques de désinfection chimique et physique utilisées notamment la technique de désinfection par rayonnement UV.

Dans le deuxième chapitre nous avons exposé un aperçu sur le principe de la technique de simulation "CFD, Computational Fluid Dynamic" ainsi que les différents modèles mathématiques développés pour la simulation de l'hydrodynamique, de rayonnement et de la cinétique d'inactivation des microorganismes pathogènes.

Dans les chapitres trois et quatre nous nous sommes intéressés à l'application de la CFD pour la simulation d'un photoréacteur tubulaire réalisé au niveau de l'Unité de Développement des Equipements Solaires pour le traitement tertiaire des eaux issues des stations d'épuration.

Chapitre I

INTRODUCTION A LA DESINFECTION

CHAPITRE I : INTRODUCTION A LA DESINFECTION

I. LES PROCEDES DE DESINFECTION

La désinfection est l'étape tertiaire du traitement des eaux, elle permet d'éliminer les micro-organismes pathogènes à savoir les bactéries, les virus et les protozoaires. Nous distinguons deux types de désinfection :

- La désinfection chimique en utilisant le chlore et l'ozone
- La désinfection physique en utilisant les rayonnements UV

II.1. LA CHLORATION

La chloration est une technique qui existe depuis des siècles, elle est très répandue pour désinfecter l'eau pour la rendre potable. Elle consiste à introduire des agents oxydants chlorés dans l'eau tels que le chlore gazeux, l'hypochlorite de sodium (eau de Javel) ou le bioxyde de chlore pour détruire les microorganismes. Cependant aux doses habituelles 5 mg/l ce procédé demeure inefficace contre les kystes amibiens et les œufs de certains parasites.

La désinfection au chlore se produit principalement par l'oxydation des parois cellulaires qui conduit à la lyse des cellules bactériennes ou à l'inactivation des sites fonctionnels sur la surface de ces cellules.

Du point de vue environnemental, le traitement tertiaire des eaux usées au chlore peut avoir un impact significatif sur la vie aquatique à cause de la toxicité, aiguë et chronique du chlore résiduel, de plus, il réagit avec certaines matières organiques contenues dans les eaux usées, même traitées, pour former des sous-produits organochlorés, dont certains sont cancérigènes. De plus la manipulation et le transport du chlore, notamment sous forme gazeuse, nécessite d'importantes mesures de protection et de sécurité [1].

II.2. L'OZONATION

De même que le chlore, l'ozone est un oxydant. L'efficacité et la rapidité de l'action de ce gaz en solution sur les bactéries et les virus, couplées avec une faible production de produits secondaires indésirables, lui donne une place très importante parmi les oxydants utilisés pour la désinfection.

De plus, l'ozonation est plus sûre d'emploi que la chloration et ne nécessite pas le transport de produits chimiques, puisque ce gaz est généré in situ à partir du dioxygène soumis à une décharge électrique.

CHAPITRE I : INTRODUCTION A LA DESINFECTION

=====

L'ozone est très toxique pour la vie aquatique, mais il est rare, après la désinfection, de trouver de l'ozone résiduel en quantité significative, car sa réaction avec les composés présents est très rapide et il est détruit rapidement en raison de son instabilité [1].

Par contre, les coûts élevés de l'investissement et l'exploitation de l'ozonation posent un problème économique rendant cette opération d'oxydation peu attrayante [2].

II.3. LA DESINFECTION PAR LE RAYONNEMENT UV

La désinfection des eaux usées par le rayonnement ultraviolet (UV) est un processus physique qui implique essentiellement le passage d'un film d'eaux usées dans un canal ouvert exposé au rayonnement solaire ou muni de lampes à rayons ultraviolets. L'efficacité de la désinfection UV dépend des caractéristiques physiques et chimiques des eaux usées avant la désinfection. Avec une meilleure qualité des eaux usées, le processus de désinfection UV est plus efficace.

Cette technologie de désinfection présente plusieurs avantages intéressants. Au niveau du traitement, elle est plus efficace que la chloration pour détruire les virus. De plus, aucun produit secondaire n'est formé.

Au niveau environnemental, cette méthode n'a pas d'influence négative car le rayonnement ultraviolet ne nécessite pas l'ajout de produit chimique. Par contre, l'efficacité de désinfection diminue avec l'augmentation de la concentration des matières en suspension.

D'un point de vue économique, les coûts sont comparables à ceux des systèmes de la chloration [1].

III. COMPARAISON DE DIFFERENTS PROCEDES DE DESINFECTION

Le choix d'un moyen de désinfection se fait en prenant en considération les contraintes techniques, économiques et environnementales. À cet effet, le mode de désinfection le plus approprié est celui qui regroupe les caractéristiques suivantes :

- efficacité pour la plupart des micro-organismes pathogènes sous différentes conditions.
- absence de sous-produits indésirables formés à la suite de son utilisation.
- produits non dangereux pour les humains et pour la vie aquatique.
- facilité d'utilisation.
- faibles coûts d'investissement et d'exploitation [3].

CHAPITRE I : INTRODUCTION A LA DESINFECTION

=====

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

***Tableau 1.1.** Comparaison entre les différents procédés [4]*

Considération	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 nuisible	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 a modérée	Elevé	Simple a modéré
Contrôle de procédé	Développé	Assez bien développé	Assez bien développé
Fiabilité des équipements	Bonne	Moyenne à bonne	Moyenne à bonne
Taille STEP	Toutes les tailles	Moyenne et grandes	Petites et moyennes et de plus en plus pour les grandes
Niveau de prétraitement requis	Aucun	Secondaire	Secondaire
Exploitation et maintenance	Minime	Elevé	Moyenne
Temps de contact requis	Long	Moyen	Court

D'après le tableau 1.1 nous constatons que :

- Le procédé par chloration présente, malgré son faible coût de fonctionnement, des risques pour l'environnement. De plus, elle ne garantit pas une désinfection efficace.

CHAPITRE I : INTRODUCTION A LA DESINFECTION

=====

- 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. C'est la technique la plus utilisée actuellement dans de nombreux pays.

IV. PROCEDE DE DESINFECTION PAR RAYONNEMENT ULTRAVIOLET

IV.1. Historique

La désinfection solaire a été largement étudiée pour la purification des eaux. Il s'agit d'un procédé propre à énergie renouvelable. En effet, le soleil est une source d'énergie propre, abondante, inépuisable et gratuite, dont le spectre (290 - 800 nm) est constitué de l'onde ultraviolet (UV), visibles et infra rouge.

L'action germicide des UV-C a été mise en évidence dès la fin du XIXe siècle par Downs and Blunt, qui ont découvert en 1878 les effets bactéricides des radiations solaires. La première tentative de désinfection de l'eau par les ultraviolets a été réussie dès 1906 à Marseille par Cernovedeau et Henri[5].

Ce processus de désinfection solaire qui est connue sous le nom de SODIS (Solar Water Disinfection), a été étudié pour la première fois en 1980 par Acra et al [6]. Où ils ont utilisé des sacs de polyéthylène et des récipients en verre transparents et en plastique remplis avec de l'eau contaminée et exposés directement au soleil. Les résultats confirment l'efficacité et la faisabilité de la décontamination solaire de l'eau. Ils ont signalé que l'action germicide peut être due au rayonnement UV solaire dans la gamme de longueur d'onde (300-400 nm). Plus tard, en 1990, Acra et al [7]. Ont démontré que l'eau peut être décontaminée par le rayonnement solaire sur une grande échelle à l'aide des systèmes à flux continu. Depuis lors, la désinfection de l'eau à l'aide de la lumière solaire naturelle et artificielle est largement étudiée pour l'inactivation d'une large gamme de bactéries (E. coli, streptococcus faecalis, Shigelladysenteriae, Cryptosporidium, Enterococcusfaecalis, salmonelle, pseudomonas et coliform) [7,8].

Cette simple procédure (SODIS) pour désinfecter l'eau à l'aide de bouteille-PET (polyéthylène téréphtalate) ou des récipients en verre a été testée dans différentes régions ensoleillées qui souffrent d'un manque d'eau potable. Actuellement, différentes familles en Afrique du Sud, au Cameroun, au Sénégal et en Inde utilisent cette méthode pour traiter leur eau potable [9].

CHAPITRE I : INTRODUCTION A LA DESINFECTION

=====

En 1996, Joyce et al [10]. Ont montré que, dans de l'eau turbide (200 UTN) l'effet du chauffage du soleil pourrait produire une inactivation complète d'E. Coli en 7 heures si la température de l'eau atteint au moins 55°C.

En 1998, McGuigan et al [11]. Ont étudié le rôle des mécanismes optiques et thermiques dans l'inactivation d'E. Coli sous lumière solaire. Ils ont constaté que l'inactivation thermique était importante seulement à des températures d'eau supérieures à 45°C et montré que les UV-A (320-400 nm) et la lumière visible étaient majoritairement responsables de l'inactivation d'E. Coli car les UVB (280-320 nm) sont filtrés par la bouteille PET.

Reed [12] a montré que l'action bactéricide de la lumière solaire dépend de la présence de l'oxygène dans l'eau, et suggère qu'une agitation de la solution traitée est nécessaire.

SODIS est une méthode efficace et peu coûteuse qui est plus appropriée pour l'application dans les pays en voie de développement pour améliorer la qualité de leur eau. Par conséquent, plusieurs facteurs peuvent inhiber et diminuer son efficacité comme :

1. La variation quotidienne et saisonnière de l'intensité du soleil qui augmente le temps d'exposition de l'eau à traiter [13].
2. Le risque de reviviscence des bactéries durant le stockage de l'eau traitée [14, 15].
3. L'existence de certaines bactéries fécales résistantes à la lumière solaire.
4. La turbidité de l'eau qui peut réduire la pénétration de la lumière [10, 16].

Pour augmenter l'efficacité de ce procédé (SODIS), quelques additifs sont additionnés comme : l'oxydant H_2O_2 , et/ou O_3 , ainsi que l'addition de catalyseur (TiO_2 , Fe_2O_3 , ZnO , ...etc.).

IV.2. PRINCIPE DE LA DESINFECTION PAR UV

Les radiations UV (ultraviolets) sont des radiations électromagnétiques dont le spectre est compris entre 10 et 400 nanomètres (nm). Nous distinguons quatre(04) zones :

- Production d'ozone ($\lambda = 185$ nm).
- UV-A ($315 < \lambda < 400$ nm) pigmentation de la peau.
- UV-B ($280 < \lambda < 315$ nm) induisant synthèse de vitamine D – antirachitique.
- UV-C ($200 < \lambda < 280$ nm) action germicide.

CHAPITRE I : INTRODUCTION A LA DESINFECTION

Les UV-C présentent un effet germicide maximum aux alentours de $\lambda = 260$ nm. Cette efficacité chute considérablement pour des longueurs d'ondes plus longues ou plus courtes. Cet effet germicide résulte d'une action sur les acides nucléiques. Le spectre d'absorption de l'ADN et de l'ARN hydrolysé montre un pic de $\lambda = 254$ nm.

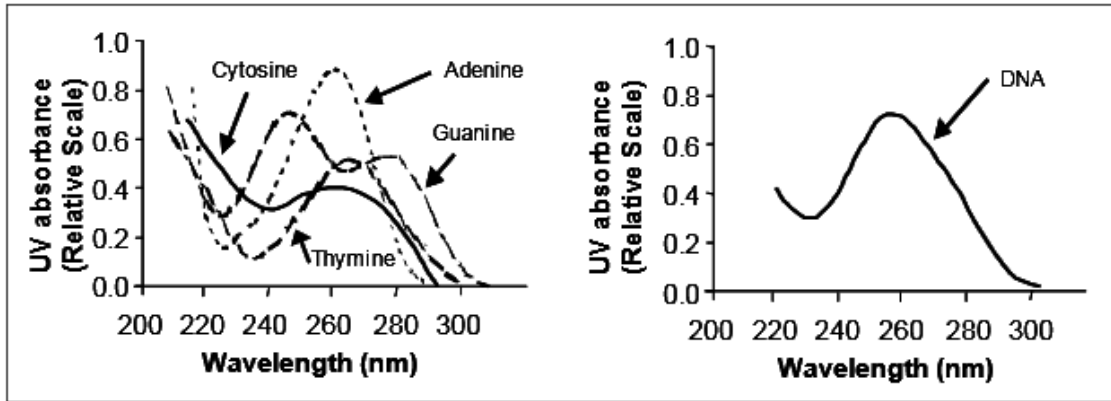


Figure 1.1. Spectres d'absorbance relatifs des bases de l'ADN et de l'ARN [17]

La dose reçue du rayonnement UV, permet de perturber la cellule vivante par modification de sa structure chimique. C'est ce que nous appelons une action stérilisante.

L'action stérilisante est due à la perturbation apporté par les radiations ultra-violettes dans la structure chimique des constituants de la cellule vivante et par suite de leur fonctionnement 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. 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.

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 [18].

V. SOURCES D'EMISSION DES RAYONNEMENTS UV

Les sources d'émission U.V utilisées dans la désinfection, sont :

CHAPITRE I : INTRODUCTION A LA DESINFECTION

=====

V.1. SOURCE NATURELLE

➤ LE SOLEIL

La lumière du soleil constitue la principale source naturelle de rayonnement ultraviolet près de 5% de l'énergie de soleil est émise sous forme de rayonnement UV. Toutefois, en raison de l'absorption des UV par la couche d'ozone de l'atmosphère, 99% de la lumière UV qui atteint la surface de la terre appartient à la gamme des UV-a.

V.2. SOURCE ARTIFICIELLE

➤ LAMPE A VAPEUR DE MERCURE

Est constituées d'ampoule de silice ou de quartz rempli avec un gaz inerte (argon) et une quantité de mercure [19].

C'est une lampe à arc électrique qui provoque 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.

Les rayonnements UV émis par les lampes à vapeur de mercure, sont de deux types :

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 [19]. Elles se présentent sous la forme de longs tubes de 1,5 à 2 cm de diamètre. Les longueurs standards 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'un manchon de quartz, ce qui permet de les immerger directement dans l'eau à traiter. 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 (les lampes basse pression ont une durée de vie d'environ 3500 heures), et de son degré d'encrassement. Les lampes à vapeur de mercure sont très sensibles aux variations de température ; l'optimum se situerait autour de 50°C.

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 jusqu'à la zone visible.

CHAPITRE I : INTRODUCTION A LA DESINFECTION

=====

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 [20].

Tableau 1.2. Récapitulatif des principales caractéristiques des lampes de basse et moyenne pression [17]

Basse pression	moyenne Pression	
Emission	Monochromatique	Polychromatique
Pression de gaz en fonctionnement	<1mbar	~ 1bar
Spectre d'émission (nm)	254 nm	Gamme plus étendue
Efficacité (200-300 nm)	30-35 %	15-25 %
Input électrique	Faible (<200 watt)	Moyen (jusqu'à 5 KW)
Température en fonctionnement	40-110 °C	600-1000 °C
Durée de vie	8000-10000 heures	2000-5000 heures

VI. MECANISME D'INACTIVATION DES MICRO-ORGANISMES

Les UV agissent efficacement sur la plupart des micro-organismes, mais avec des doses UV différentes selon leur sensibilité vis à vis ces rayonnements.

Le spectre d'absorption des acides nucléiques ADN et ARN se situe dans une longueur d'onde entre 210 et 310 nm. Gates (1930) a trouvé que l'effet maximal a été obtenu avec des ondes de 260 nm de La lumière UV.

Cette lumière inactive les microorganismes par l'absorption de l'acide nucléique a des hauts niveaux d'énergie associés aux ondes courtes, principalement à 254 nm.

Les UV agissent sur l'ADN ou l'ARN des micro-organismes, en modifiant le nucléotide appelé thymine, l'une des quatre bases azotées (adénosine (A) et guanine (G)) et

CHAPITRE I : INTRODUCTION A LA DESINFECTION

les bases pyrimidiques (thymine (T) et cytosine (C)) des micro-organismes. Une fois cette modification effectuée avec la production d'un dimère de pyrimidines adjacentes, le micro-organisme continue à vivre mais il ne peut plus se reproduire [21].

Le photo-produit le plus important formé au niveau de l'ADN lors de l'exposition au rayonnement UV est le dimère de pyrimidines adjacentes (T-T), ce dernier crée une distorsion de l'ADN, rendant les micro-organismes inefficace et incapable de se reproduire. Cette opération permet de modifier le caractère structural de cette espèce vivante.

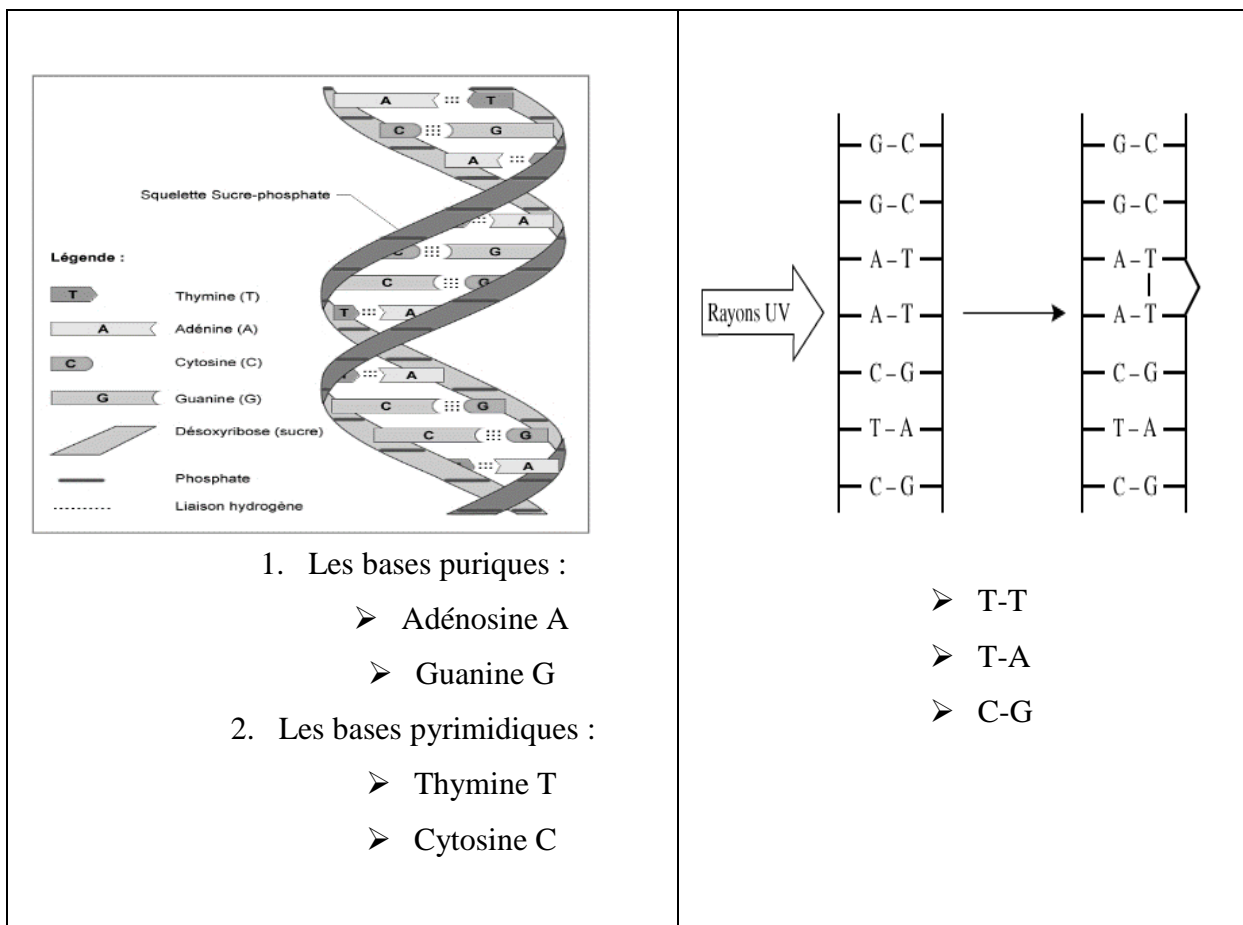


Figure 1.2. Mécanisme d'inactivation des micro-organismes

CHAPITRE I : INTRODUCTION A LA DESINFECTION

=====

VII. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE RAYONNEMENT UV

TABLEAU 1.3. *Avantages et inconvénients de rayonnement UV*

AVANTAGE	INCONVENIENTS
-Traitement continu et efficacité immédiate de la désinfection : l'abattement bactériologique est réalisé dans le réacteur. Il n'y a donc pas besoin de prévoir des temps de contact après le poste de désinfection	- Il n'y a pas de possibilité d'apprécier de façon immédiate l'efficacité du traitement par la mesure d'un résiduel comme dans le cas d'un oxydant chimique.
- Pas de création de sous-produits de désinfection qui peuvent polluer l'environnement ou limiter la réutilisation de l'eau (cas du chlore ou de l'ozone)	
- Technologie simple et économique en investissement et exploitation	

VIII. PARAMETRES INFLUENCENT SUR L'EFFICACITE DE LA DESINFECTION

VIII.1. LE TEMPS D'EXPOSITION

Il est en 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 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.
- Le volume du réacteur doit être utilisé au maximum, et ce en évitant le court-circuit 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 [22].

CHAPITRE I : INTRODUCTION A LA DESINFECTION

VIII.2. L'INTENSITE EMISE DES LAMPES

L'intensité UV nominale est fonction du nombre de lampes allumées. L'intensité reçue par l'effluent diminue avec l'éloignement 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 2 lampes est un paramètre de dimensionnement. Il faut également tenir compte de la durée de vie des lampes dont l'intensité diminue de 65% en fin de vie [22,23].

VIII.3. PARAMETRES DES QUALITE D'EFFLUENT

A. LES MATIERES EN SUSPENSIONS

Les M.E.S contenues dans l'effluent peuvent fournir une protection aux micro-organismes pour les raisons suivantes [2]:

- 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.

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.

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 sulfonâtes, le fer ainsi que les agents de coloration interfèrent avec la transmission du rayon à 254 nm [24].

CHAPITRE I : INTRODUCTION A LA DESINFECTION

C. LA TURBIDITE

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 [24].

VIII.4. RESISTANCE DES MICRO-ORGANISMES AUX RAYONNEMENTS UV ET LEURS TAILLE

Tableau 1.4 Résistance des micro-organismes aux rayonnements UV et leurs taille

MICRO-ORGANISME	DESCRIPTION
Bactérie	Micro-organisme vivant, simples et moins résistants aux rayonnements UV [25], elles sont caractérisées par une structure cellulaire particulière, Taille : 0.5-5 μm .
Virus	Agent infectieux vivant (mais non cellulaire), qui se réplique seulement à l'intérieur des cellules vivantes (morceau d'ADN ou ARN) ; taille 20-300 nm. D'après Linden et Mofidi [26] et d'autres auteurs en 1999 ils ont démontré dans leurs travaux que les virus sont moins sensibles aux rayonnements UV que les bactéries.
Spores et kystes de protozoaires	Ce sont les formes qui présentent la plus grande résistance aux rayonnements UV ; taille proche de la bactérie (0.5-5 μm).

X. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes techniques de désinfection chimique et physique, leurs avantages et inconvénients. Dans la suite de notre travail nous nous sommes intéressé uniquement à la désinfection physique par rayonnement UV.

Chapitre II

INTRODUCTION A LA CFD

CHAPITRE II : INTRODUCTION A LA CFD

=====

I. SIMULATION NUMERIQUE

La simulation numérique consiste à reproduire par le calcul le fonctionnement d'un système, préalablement décrit par un ensemble de modèles. Elle s'appuie sur des méthodes mathématiques et informatiques spécifiques. Les principales étapes de la réalisation d'une étude par simulation numérique sont communes à de nombreux secteurs de la recherche et de l'industrie.

I.1. LA CFD APPLIQUEE AUX PROCEDES DE TRAITEMENT DES EAUX

Les phénomènes physiques et chimiques qui se développent au sein des photo-réacteurs sont complexes. En effet, les grandeurs physiques (vitesse, cinétique d'inactivation, radiation,...) qui décrivent l'état et l'évolution d'un tel système sont dépendantes et régies par des équations, généralement aux dérivées partielles.

Ces équations constituent la traduction mathématique des lois de la physique qui modélisent le comportement des phases et des espèces présentes dans le réacteur. Simuler l'état de ce dernier, c'est déterminer idéalement en tout point les valeurs numériques de ses paramètres. Comme il y a un nombre infini de points, donc une infinité de valeurs à calculer, cet objectif est inaccessible sauf dans des cas bien particuliers où l'on peut résoudre les équations de départ à l'aide de formules analytiques.

Une approximation naturelle consiste donc à ne considérer qu'un nombre fini de points. Les valeurs des paramètres à calculer sont ainsi en nombre fini et les opérations nécessaires deviennent abordables grâce aux stations de calcul existantes. Le nombre effectif de points traités dépendra bien sûr de la puissance de ces machines : plus il sera élevé, meilleure sera finalement la description du réacteur. À la base du calcul des paramètres comme à la base de la simulation numérique, il y a donc la réduction de l'infini au fini, c'est la discrétisation.

La discrétisation par la méthode des volumes finis consiste à subdiviser le réacteur à des petits volumes élémentaire. Ainsi le réacteur sera vu comme un ensemble ou un réseau de volumes continus qui, par analogie avec la trame d'un tissu, sera dénommé **maillage**. Les paramètres de l'état du réacteur sont maintenant définis dans chaque maille du maillage. Pour chacune d'elles, en reformulant les équations mathématiques du modèle par des moyennes volumiques, il sera alors possible de construire des relations algébriques entre les paramètres de la maille et ceux de ses voisines. Au total, il y aura autant de relations que de paramètres inconnus et ce sera à la machine de résoudre le système de relations obtenu. Il

CHAPITRE II : INTRODUCTION A LA CFD

=====

faudra pour cela recourir aux techniques de l'analyse numérique et programmer des algorithmes spécifiques. C'est le principe de la CFD " Computational Fluid Dynamic" ou la "Mécanique des Fluides Numérique".

Parmi les logiciels de simulation existants nous nous sommes intéressés au package "Ansys. Fluent 6.3.26 " qui prédit l'écoulement du fluide, le transfert de chaleur, le transfert de masse, les réactions chimiques, et les phénomènes y afférents en résolvant l'ensemble des équations mathématique :

- Conservation de la masse
- Conservation du mouvement
- Conservation de l'énergie
- Conservation des espèces

Fluent est un logiciel utile pour :

- La conception et l'étude du nouveau processus,
- L'amélioration d'un processus existant,

La CFD est basé sur la résolution des équations d'état par la méthode des volumes finis et comprend trois (03) étapes essentielles :

- Pré-traitement.
- Solver.
- Post-traitement.

➤ **Pré-traitement** : la définition du problème à résoudre s'effectue à l'aide du préprocesseur Gambit. C'est la première étape dans la construction et l'analyse d'un modèle de flux qui implique :

- Définition du domaine de calcul ou la géométrie du réacteur,
- Maillage ou la génération de grille : discrétisation du réacteur dans un ensemble fini (cellules).
- Définition des propriétés des fluides,
- Spécification des conditions aux limites.

➤ **Solver** : permet de définir numériquement les données de simulation et les conditions aux limites. Le solveur peut être utilisé pour résoudre :

CHAPITRE II : INTRODUCTION A LA CFD

- Les écoulements dans les géométries bidimensionnelles et tridimensionnelles.
 - Les écoulements des fluides compressibles et incompressibles.
 - Les cas stationnaires et non stationnaires.
 - Les écoulements laminaires et turbulents.
 - Les fluides newtoniens et non newtoniens
 - Le transfert de chaleur et rayonnement.
- **Post-traitement** : la sortie des résultats des calculs et leur exploitation. Ce module est un outil graphique qui permet de visualiser la géométrie et le maillage du domaine, mais surtout d'afficher les résultats obtenus. Il est ainsi possible de visualiser les champs de vitesse, les champs de pression, de turbulence ainsi que toutes les autres grandeurs calculées sur un segment, une section du domaine ou sur tout le volume. Il offre aussi la possibilité de tracer des courbes et de visualiser les lignes de courant ou la trajectoire de particules.

II. MODELISATION ET SIMULATION NUMERIQUE DES REACTEURS SOLAIRES

La désinfection de l'eau par rayonnement solaire est un procédé propre qui vise la destruction des micro-organismes pathogènes. En effet, comparativement aux traitements traditionnels qui utilisent les désinfectants chimiques tels que le chlore et l'ozone, la désinfection par rayonnement solaire réduit la pollution de l'eau sans qu'il y ait formation de sous-produits indésirables.

Les réacteurs solaires sont des systèmes qui permettent d'exposer une eau polluée à une source de rayonnement UV artificiel ou naturel. Afin d'assurer que les réacteurs UV fournissent des taux de rayonnement suffisants pour atteindre un rendement de décontamination donné, leur conception et leur régime de fonctionnement doivent être correctement optimisés au moyen de modèles expérimentaux ou numériques.

La simulation des systèmes de désinfection UV nécessite le développement :

- de modèles qui décrivent le comportement hydrodynamique de l'eau dans le réacteur
- de modèle qui décrivent la distribution du rayonnement UV dans le réacteur
- et de modèles cinétiques propres au mécanisme d'inactivation observé.

CHAPITRE II : INTRODUCTION A LA CFD

=====

II.1. MODELISATION DE LA CINETIQUE

Les modèles de désinfection servent à déterminer le nombre de microorganismes qui seront inactivés suite à une exposition à une source de rayonnement naturelle ou artificielle. Le taux d'inactivation peut varier en fonction de plusieurs paramètres tels que la puissance du rayonnement, le temps de contact, le pH, la température, ainsi que le nombre et le type de microorganismes présents dans l'eau (qui auront une résistance plus ou moins grande face au désinfectant utilisé). Les relations entre ces différents paramètres sont évaluées soit expérimentalement au moyen de mesures analytiques soit mathématiquement en établissant des lois gouvernant ce phénomène de désinfection.

II.1.1 MODELE DE CHICK-WATSON

Le premier concept de cinétique de désinfection date de 1907. Il est attribué à Chick qui assimila l'inactivation à une réaction où les réactifs sont d'une part, les organismes et, d'autre part, le désinfectant qui peut être chimique ou physique.

La loi ainsi proposée décrit un taux d'inactivation de micro-organismes proportionnel au nombre de micro-organismes dans l'eau :

$$\frac{dN_t}{dt} = -KC^n N_0$$

N_0 : nombre de micro-organismes au temps t_0 .

N_t : nombre de microorganismes au temps t .

K : constante de réduction (donc d'élimination des micro-organismes).

C : concentration de désinfectant chimique ou intensité du rayonnement.

n : constante de type de désinfectant.

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

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

CHAPITRE II : INTRODUCTION A LA CFD

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 :

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

Dans certains cas, les résultats obtenus en laboratoire ont montré que la loi de désinfection proposée par le modèle de Chick-Watson simulait difficilement les données expérimentales (figure 2.1). Une déviation survient sur le taux d'inactivation, qui n'est pas tout à fait linéaire mais, qui peut décroître ou augmenter. Le modèle de Hom décrit mieux cette déviation.

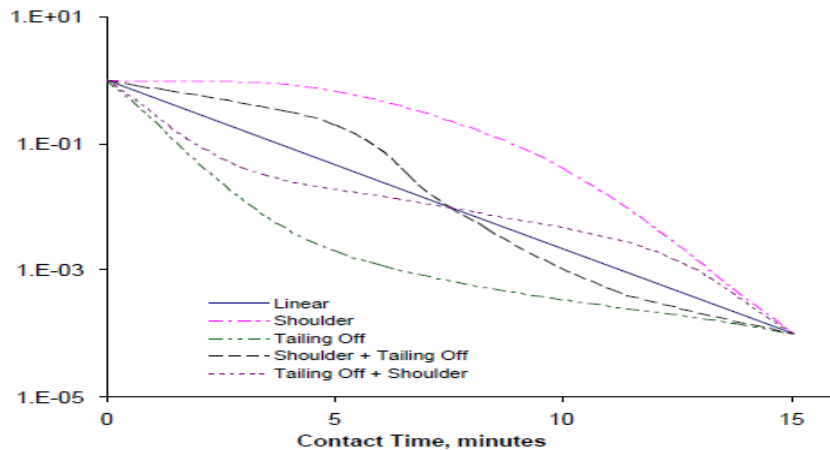


Figure 2.1. Taux d'inactivation des microorganismes pathogènes en fonction du temps

II.1.2 MODELE DE HOM

Afin de résoudre la problématique de déviation du taux d'inactivation, Hom a modifié, en 1972 la loi de Chick et y a ajouté un terme supplémentaire.

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -KC^n t^m$$

CHAPITRE II : INTRODUCTION A LA CFD

Où :

m : est une constante qui contrôle la déviation du taux d'inactivation par rapport à la loi linéaire.

Dans le modèle de Hom, si le paramètre m est égal à unité, le modèle de Chick s'applique. Si m est supérieur à un, il y a augmentation du taux d'inactivation tandis que si m est inférieur à un, il y a diminution du taux.

II.2.MODELISATION DE L'HYDRODYNAMIQUE

Selon que les microorganismes véhiculés par l'eau sont considérés comme phase continu ou phase dispersée, nous distinguons deux approches pour l'étude de l'hydrodynamique des réacteurs solaires :

Approche " **Euler-Euler** ", les microorganismes sont considérés comme une phase continue

Approche " **Euler-Lagrange** ", les microorganismes sont considérés comme phase dispersée.

Les modèles hydrodynamiques qui existent dans la littérature sont basés sur la résolution des équations de conservation de masse et les équations de mouvement (Navier Stocks Moyennées). Pour un fluide newtonien incompressible et en négligeant l'effet de la pesanteur, ces équations sont exprimées par les relations suivantes :

- Equation de la continuité (conservation de la masse) :

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0 \dots (1)$$

- Ecoulement Tridimensionnel :

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0$$

- Equation de NAVIER-STOCKS (conservation de la quantité de mouvement) :

$$\rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + \frac{\partial u_x}{\partial x} u_x + \frac{\partial u_x}{\partial y} u_y + \frac{\partial u_x}{\partial z} u_z \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_t \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) \dots (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} + \frac{\partial u_y}{\partial x} u_x + \frac{\partial u_y}{\partial y} u_y + \frac{\partial u_y}{\partial z} u_z \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu_t \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) \dots (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + \frac{\partial u_z}{\partial x} u_x + \frac{\partial u_z}{\partial y} u_y + \frac{\partial u_z}{\partial z} u_z \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu_t \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \dots (4)$$

CHAPITRE II : INTRODUCTION A LA CFD

Où :

$u_t = \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon}$ Est la viscosité turbulente, k est l'énergie cinétique turbulente et ε est le taux de dissipation turbulente.

La résolution des équations (1) et (2,3,4) nécessite l'introduction d'équations additives ou modèles de fermeture pour la modélisation des contraintes de Reynolds et de prédire ainsi les phénomènes de turbulence. C'est pourquoi les écoulements turbulents peuvent être modélisés dans une variété de façons. Les modèles les plus courants sont regroupés dans le tableau suivant :

CHAPITRE II : INTRODUCTION A LA CFD

Tableau 2.1. Les modèles hydrodynamiques

Modèle	Équation y afférentes
Modèle k-ε Standard	<p>Viscosité cinématique turbulente</p> $u_t = \rho \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon}$ <p>Energie cinématique turbulente</p> $\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\rho_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \varepsilon$ <p>taux de dissipation :</p> $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} u_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{K} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\rho_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]$ <p>Les constantes empiriques utilisées dans ce modèle sont : $C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, C_\mu = 1.92, \rho_k = 1.0, \rho_k = 1.3$</p>
Modèle k-ε RNG	<p>Dans ce modèle, la viscosité de Foucault, k et ε sont toujours donnés par les équations. Cependant, le coefficient est modifié et défini par :</p> $C_{\varepsilon 2} = C_{\varepsilon 2} + \frac{C_\mu \lambda^3 \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_0} \right)}{1 + \beta \lambda^3}$ <p>Où,</p> $\lambda = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{2 S_{ij} S_{ji}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ <p>Les constantes empiriques utilisées dans ce modèle sont : $C_{\varepsilon 1} = 1.42, C_{\varepsilon 2} = 1.68, C_\mu = 0.085, \rho_k = 0.72, \beta = 0.012, \lambda_0 = 4.38$</p>
Modèle $k\omega$	<p>Viscosité cinématique turbulente</p> $u_t = \frac{k}{\omega}$ <p>Energie cinématique turbulente</p> $\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \rho^* \nu_t \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \beta^* k \omega$ <p>Taux de dissipation</p> $\frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} u_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \rho \nu_t \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] - \beta \omega^2$ <p>Les constantes empiriques et les relations auxiliaires sont définies comme suit : $\beta = 0.09, \rho = 0.5, \rho^* = 0.5, \alpha = 5/9, \beta = 3/40$</p>

CHAPITRE II : INTRODUCTION A LA CFD

II.3. MODELISATION DE LA DISTRIBUTION DE L'INTENSITE DE RAYONNEMENT

Lors de la désinfection par rayonnement UV, l'abattement des micro-organismes est fonction de la distribution du rayonnement au sein du réacteur. Nous regroupons ci-après les modèles les plus utilisés pour la modélisation des rayonnements dans un photo-réacteur

II.3.1. MODELE DES ORDONNEES DISCRETES

La méthode des ordonnées discrètes est l'une des approches numériques pour résoudre l'équation de transfert radiatif (RTE). En fait, la distribution du rayonnement dans un milieu absorbant et diffusant est régie par l'équation suivant :

$$(\Omega \cdot \nabla) I(r, \Omega) = -(k_a + k_s) I(r, \Omega) + k_a I_b(r) + \frac{k_s}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} I(r, \Omega') \Phi(\Omega' \rightarrow \Omega) d\Omega'$$

Où :

Ω : Direction de propagation du rayonnement.

k_a, k_s : Coefficient d'absorption et de diffusion respectivement (1 / m).

I_b : L'intensité du rayonnement du corps noir.

Φ : Fonction de diffusion de phase.

$(\Omega \cdot \nabla) I(r, \Omega)$: Gradient d'intensité selon la direction de propagation.

$(k_a + k_s) I(r, \Omega)$: Perte due à l'absorption et la diffusion respectivement.

$k_a I_b(r)$: Gain dû à l'émission du corps noir.

$\frac{k_s}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} I(r, \Omega') \Phi(\Omega' \rightarrow \Omega) d\Omega'$
Gain dû à la diffusion.

D'autres modèles existent pour simuler la distribution du rayonnement émis par les lampes UV dans les réacteurs solaires. Nous pouvons citer à titre d'exemple le modèle **MPSS** :

CHAPITRE II : INTRODUCTION A LA CFD

Tableau 2.2. Les modèles de la distribution du rayonnement

Modèle	Approche	Equations
Multi Point Source Summation (MPSS)	<p>Sur la base de l'hypothèse que l'émission d'une lampe linéaire est équivalente à celle de n sources de la lampe de points.</p> <p>Model prend en compte l'effet des phénomènes de réflexion, d'absorption et de réfraction</p>	$I_A = (1 - R_1)(1 - R_2) \frac{P/n}{4\pi(d_1 + d_2 + d_3)^2} T_w^{d_3/0.01} T_q^{d_2/0.01} Focus$ <p>Où ;</p> <p>P : Puissance de sortie émise par la lampe.</p> <p>n : le nombre de sources ponctuelles.</p> <p>R_1, R_2 : facteurs de réflectance pour l'air / quartz et de quartz interfaces / air.</p> <p>T_w, T_q : Transmission de l'eau et de quartz.</p> <p>d_1, d_2, d_3 : Longueurs de trajet de la lumière UV.</p> <p>Focus: effect de refraction.</p>

III. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents modèles mathématiques utilisés dans la CFD, afin d'étudier l'hydrodynamique, la cinétique de désinfection et la distribution du rayonnement au sein du réacteur. Le couplage de ces trois modèles nous permettra d'évaluer le rendement de désinfection du réacteur. En effet, l'inactivation des microorganismes est une combinaison de ces trois sous modèles.

Chapitre III

SIMULATION NUMERIQUE

CHAPITRE III : SIMILATION NUMERIQUE

I. ETUDE NUMERIQUE DE LA PHOTO-REACTEUR TUBULAIRE

I.1. DESCRIPTION GENERAL DU REACTEUR

Les expériences de la désinfection solaire de l'eau ont été réalisées à l'Unité de développement des équipements solaires situés à 30 kilomètres à l'ouest d'Alger le mois de mars 2015 en utilisant un photo-réacteur tubulaire composé de cinq (05) tubes de verre Pyrex assemblé en parallèle et des coudes en PVC, inclinée à 36 °par rapport à l'horizontal.

Ce photo-réacteur tubulaire est réalisée pour décontaminer 30 litres d'eaux infecte par les micro-organismes soumis au rayonnement solaire pendant 06 heures (9 heures-15 heures), la puissance émis par le soleil varie de 780 à 1480 W/m².



Figure.3.1. Photo-réacteur tubulaire

I.2 GENERATION DE LA GEOMETRIE ET MAILLAGE

I.2.1 SPECIFICATION DU PROBLEME

Nous considérons un écoulement de l'eau à désinfecté à travers un photo-réacteur tubulaire constitué de tubes en verre pyrex de section constante. Les conditions initial utiliser dans la simulation son représenté dans le tableau 3.1 ci-après :

CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE

=====

Tableau 3.1. Conditions initial pour la simulation

GEOMETRIE	MODELES CHOISIS	PROPRIETES DE L'EAU A DESINFECTE	LES CONDITIONS INITIALES	INTENSITE W/m ² (*)
TYPE DE MAILLAGE : TUBE : Hexa/ cooper COUDE : Tétra/hex core TAILLES DE MAILLAGES : 8 mm NOMBRE DE MAILLES : TUBES : 187926 COUDES : 42956 ANGLE D'INCLINAISON : 0°,36°.	HYDRODYNAMIQUE MODELE <i>k-ε</i> RAYONNEMENT ORDONNEES DISCRETES	$\rho = 1\,030\text{ kg/m}^3$ (*) $\mu = 1.003 \times 10^{-3}\text{ kg/m.s.}$ $T^{\circ}\text{ initial} = 273\text{ K.}$ $\alpha = 7.1\text{ m}^{-1}, 2.2\text{ m}^{-1}.$	$V_{\text{initiale}} = 0.3, 0.2,$ $0.1, 0.07\text{ m/s}$ $Re = 40170, 26000$ 13000, 9100 <u>Régime turbulent</u> $P_{\text{sortie}} = 1\text{ atm}$ $T^{\circ}\text{ extérieur} = 300\text{ K.}$	780 896 1012 1128 1244 1480
(*): Cette valeur correspond d'après les travaux effectués par SIAMAK et al. à une eau chargée de microorganismes de type MS2.				
(°): Développé et implanté dans de fluent.				
(♦): Les valeurs de l'intensité sont donnée à partir d'une station de mesure au niveau de centre de recherche UDES				

I.2.2 GENERATION DE LA GEOMETRIE

En utilisant le logiciel Gambit, une géométrie tridimensionnelle du photo-réacteur tubulaire a été générée.

1. Démarrage de Gambit

Au démarrage de logiciel, gambit affiche le menu suivant :

CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE

Affichage :

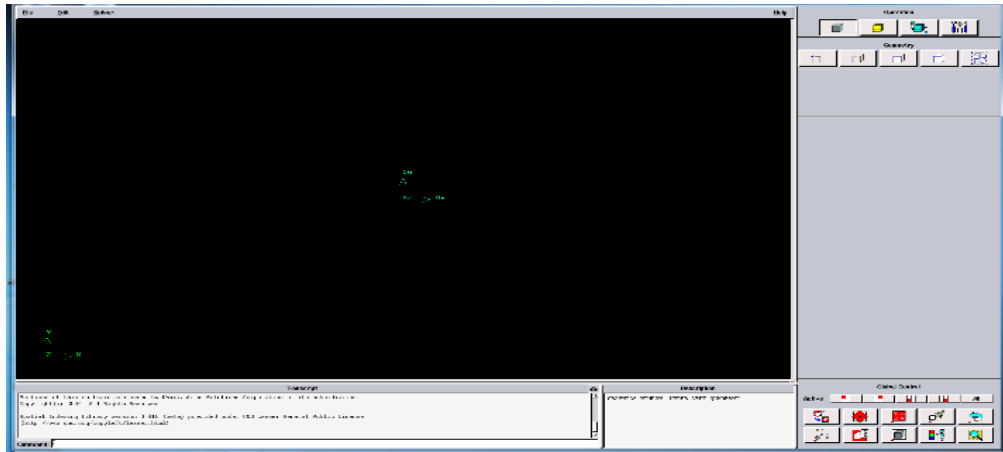





Figure 3.1. Barre de menu principale

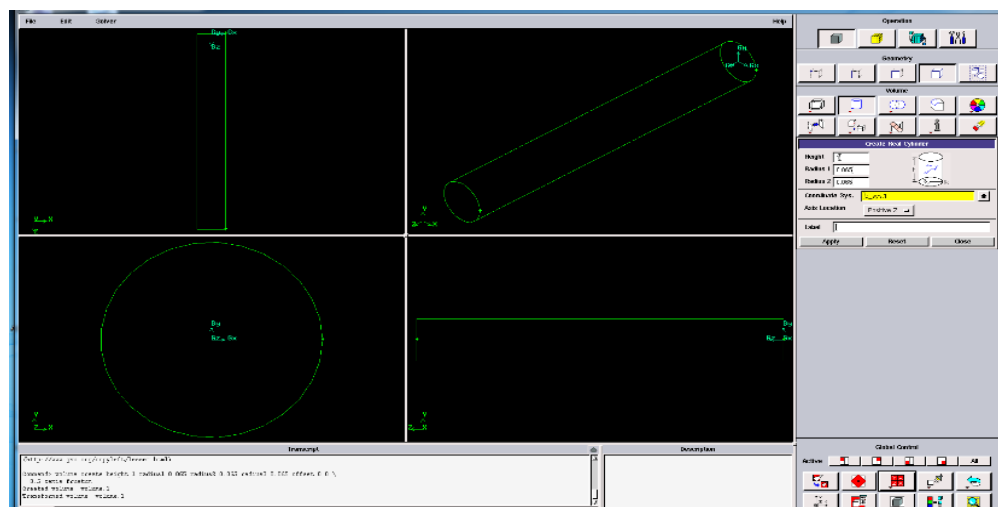
2. Création d'un Volume tubulaire

- [Geometry Command Button]  → [Volume Command Button]  → [Create real cylinder] 

La hauteur H	Rayon R ₁	Rayon R ₂
1 m	0.067m	0.065 m




- [Positive Z] → [Apply].

Affichage :



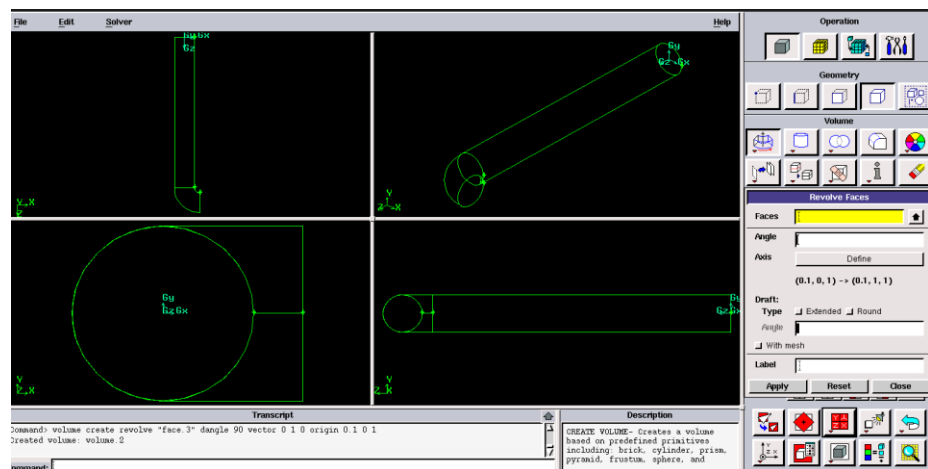
CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE

3. Création Du coude à partir d'une face

- [Geometry Command Button]  → [Volume Command Button] 
→ [Revolve Face Command Button] 

1. [Sélectionner la face.3] → [Angle de rotation 90°] → [Define] → [Z positive],
[X=0.1, Y=0, Z=1] et [X=0.1, Y=1, Z=1] → [Apply] → [Apply].

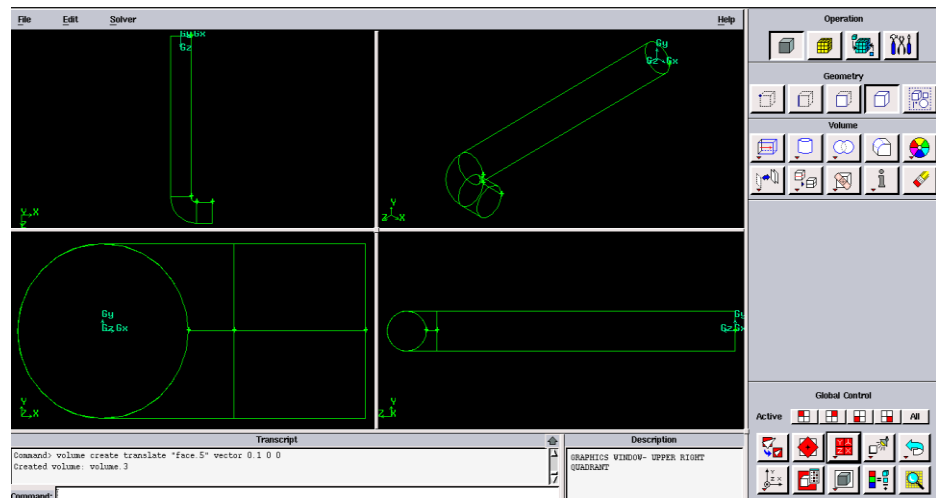
Affichage :




Pour créer un deuxième volume cylindrique on suit les étapes suivantes :

2. [Sweep face] → [Vecteur] → [x=0 ; y=0 ; z=0] et [x=0.1 ; y=0 ; z=0]

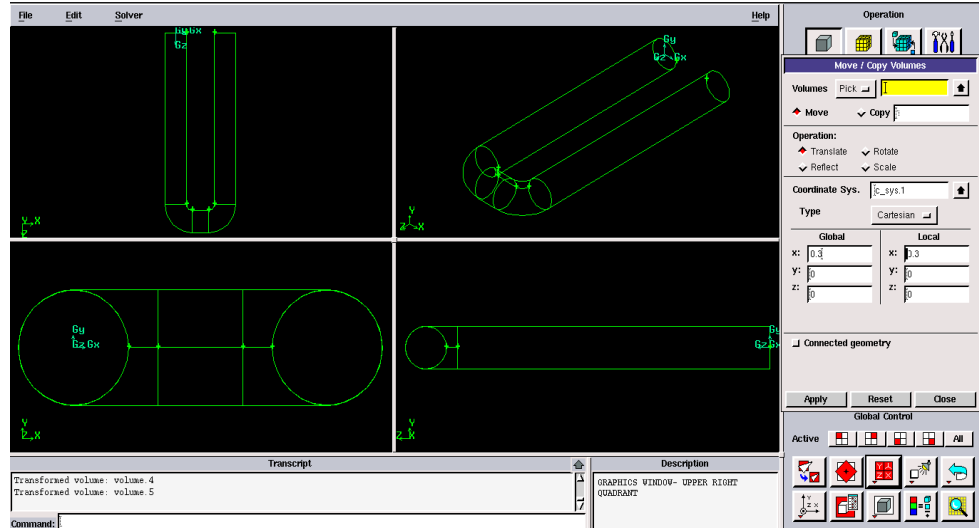
Affichage :




CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE

3. [Move/copie]  → [Angle 180] → sélectionné les volumes 1 et 2
4. [Move] → [Translate] → [x=0.3, y=0, z=0].

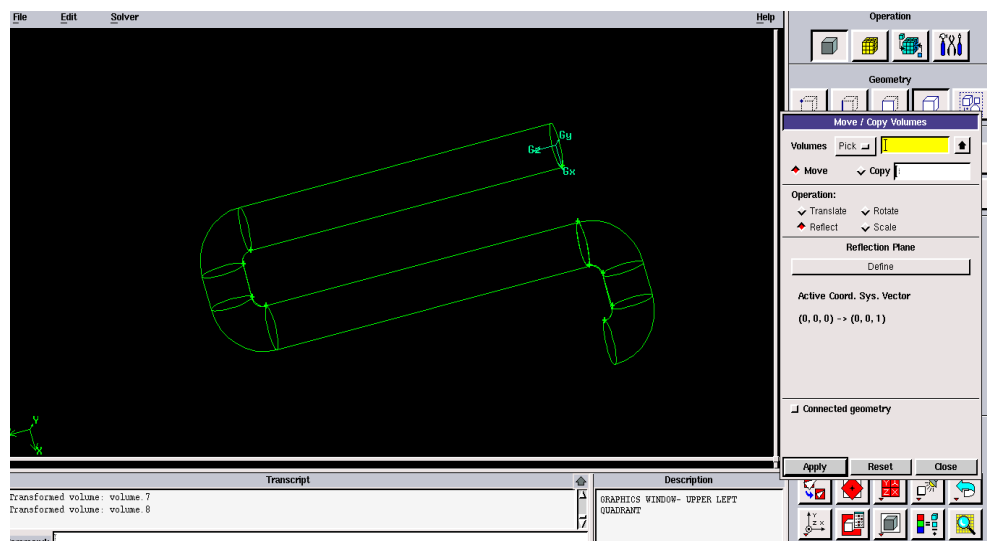
Affichage :



5. [Move/copie]  → [Copie] → [Translate] → [x=0.3 ; y=0, z=0] → Sélectionné les volumes 2, 3 et 5
6. [Move] → [Translate] → Sélectionné volume 6,7, 8 → [x=0, y=0, z=-1]

Affichage :

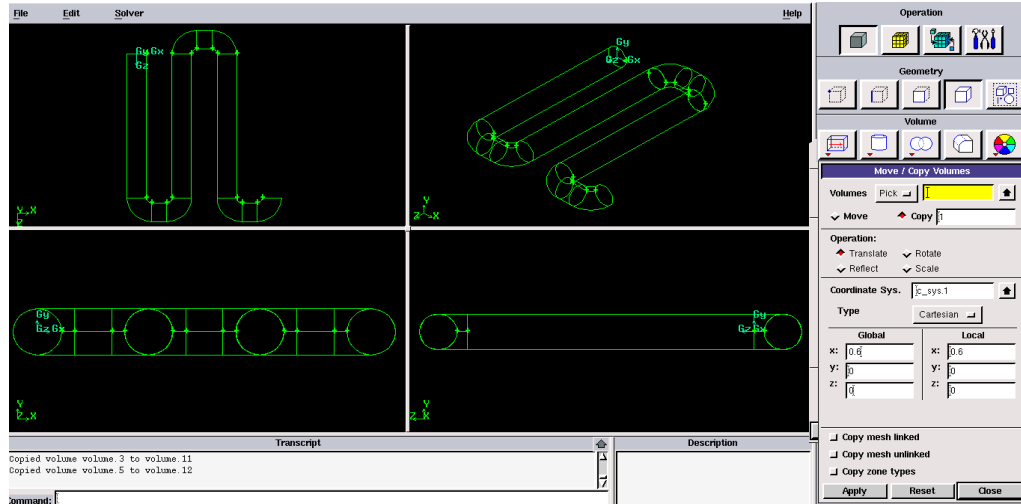
7. [Reflect] → [x=0, y=0, z=0] et [x=0, y=0, z=1]



CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE

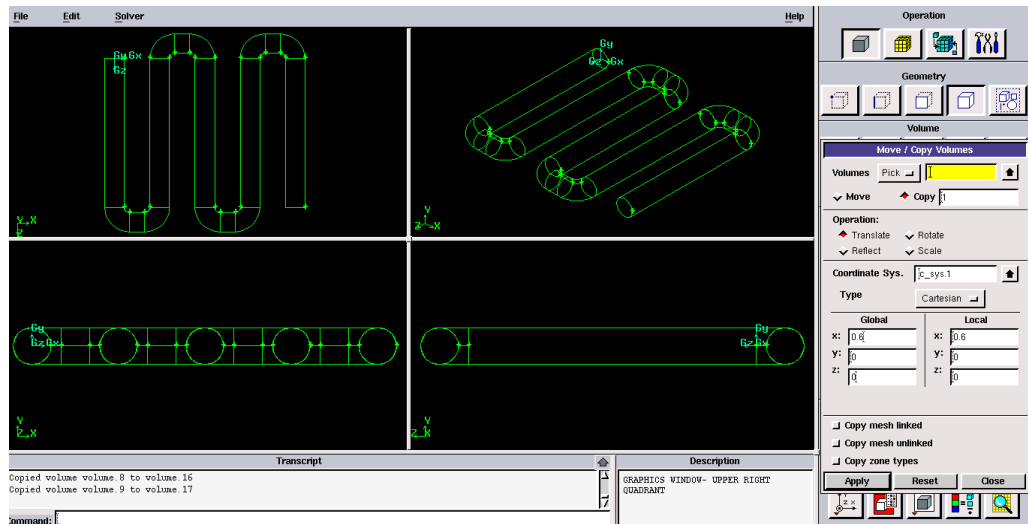
8. [Move/copie]  → [Translate] → [Copie] → Sélectionné les volumes 1, 2, 3 et 5 → [x=0.6, y=0, z=0]

Affichage :



9. [Move/copie] → [Copie] → [Translate] → sélectionné les volumes 4, 6, 7, 8 et 9 → [x=0.6, y=0, z=0]




Affichage :



4. création du Maillage

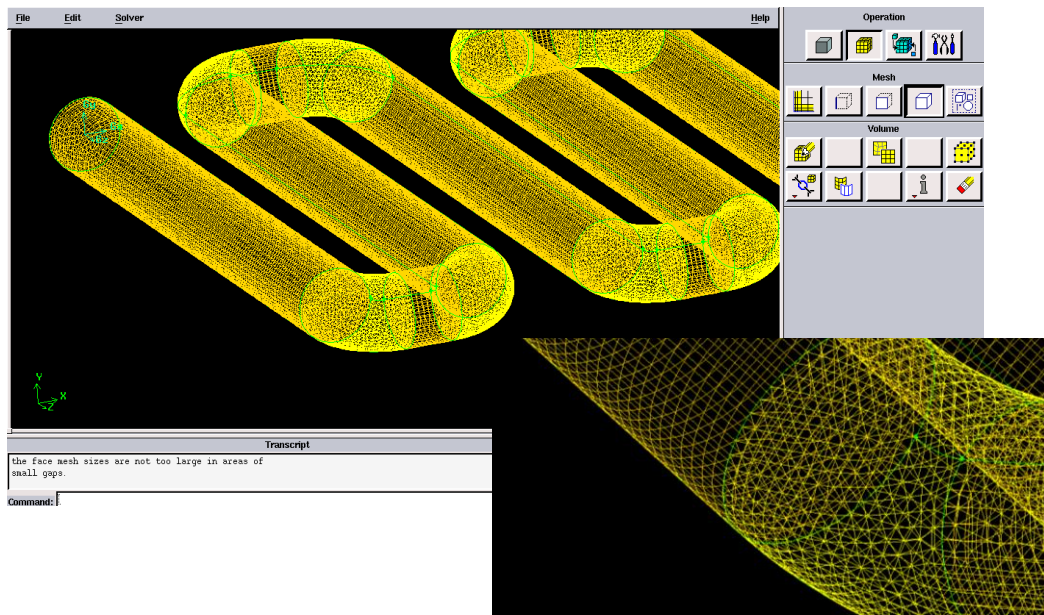
Pour faire le maillage il faut suivre les étapes suivantes :

CHAPITRE III : SIMILATION NUMERIQUE

- [Mesh Command Button]  → [Volume Command Button]  → [Mesh Volumes] 



1. [Sélectionner les volumes des tubes] → [Hexa/Cooper] → [8] → [Apply].
2. [Sélectionner les volumes des coudes] → [Tetra/Hex core] → [8] → [Apply].

Affichage :



5. 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] 
 1. [Sélectionner le volume total] → [fluid] → [Zone (Eau)] → [Apply].
 2. [Sélectionner le volume total] → [Solide] → [Zone (pyrex)] → [Apply].

Il faut définir les conditions a entrées et sorties des volumes fluides ou solides ;
Appliquer la procédure suivante :

- [Zones Command Button]  → [Specify Boundary Types Command Button] 

CHAPITRE III : SIMILATION NUMERIQUE

1. [Sélectionner la face.1] → [Type (Velocity_inlet)] → [Zone (entrée)] → [Apply].
2. [Sélectionner la face.26] → [Type (Pressure_outlet)] → [Zone (sortie)] → [Apply].
3. [Sélectionner toutes les faces du tube à l'exception de la face.1, la face.26] → [Type (wall)] → [Zone (mur)] → [Apply] → [Close].

6. Enregistrer et exporter

Pour enregistrer la géométrie générée il faut suivre les étapes suivantes :

- a. [File] → [Export] → [Mesh].
- b. Tapez un nom de fichier ensuite choisissez [Export 2d Mesh] puisque c'est une maille bidimensionnelle → [Accept].

I.3. PRINCIPAUX ETAPES DE LA SIMULATION SOUS FLUENT

Ci-après nous présentons les étapes suivies dans le solveur Fluent afin de lancer les calculs nécessaires à la simulation de l'hydrodynamique, du rayonnement et de la cinétique d'inactivation.

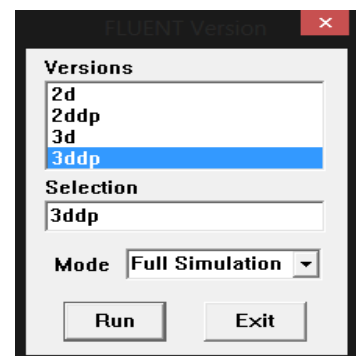
I.3.1. ETAPES GENERAL

1. Ouverture la version de Fluent :

Le choix du 3D double précision (3ddp) semble le plus approprié à notre simulation car :

1. la géométrie est en 3D.
2. la géométrie est d'une longueur importante
3. L'épaisseur des tubes est petite

Il est donc choisi comme suit :



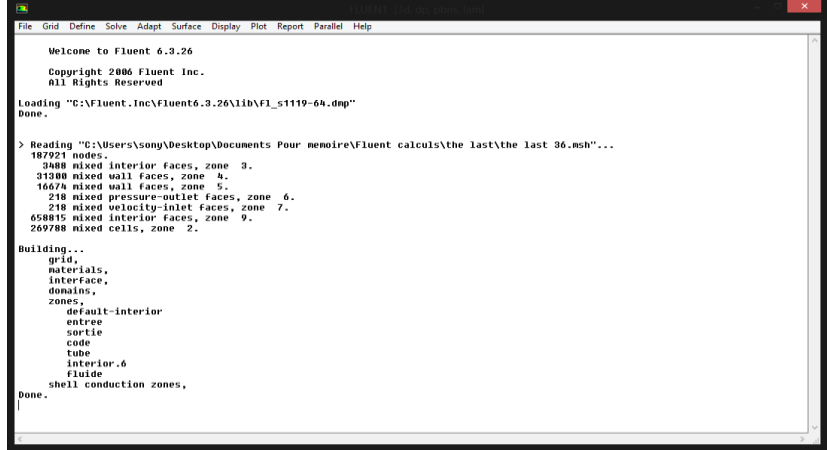
2. Importation de la géométrie (*.msh) :

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

[File] → [Read] → [Case].

CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE

Affichage :



```
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_s1119-64.dmp"
Done.

> Reading "C:\Users\Sony\Desktop\Documents Pour memoire\Fluent calculs\the last\the last 36.msh"...
187921 nodes.
3988 mixed interior faces, zone 3.
31300 mixed wall faces, zone 4.
16678 mixed wall faces, zone 5.
218 mixed pressure-outlet faces, zone 6.
218 mixed velocity-inlet faces, zone 7.
65895 mixed interior faces, zone 9.
269788 mixed cells, zone 2.

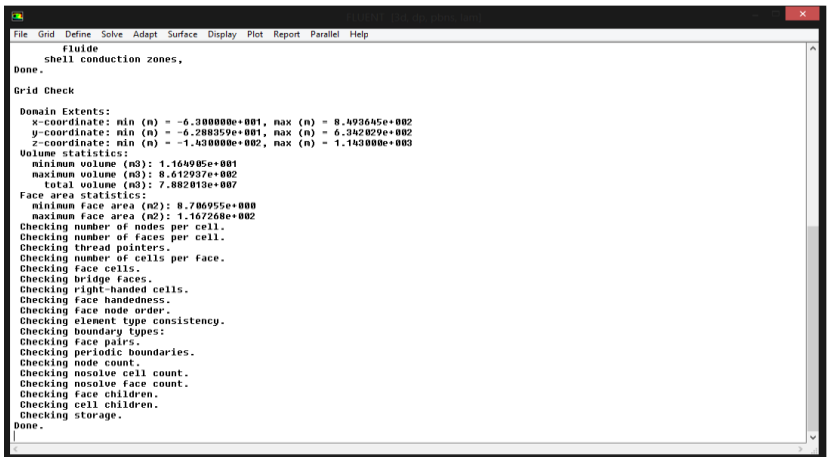
Building...
grid,
materials,
interface,
domains,
zones,
default-interior
entree
sortie
code
tube
interior.6
fluide
shell conduction zones,
Done.
```

3. Vérification du maillage importé :

Ceci permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs ou de volumes négatifs.

[Grid] → [Check].

Affichage :



```
Fluide
shell conduction zones,
Done.

Grid Check

Domain Extents:
x-coordinate: min (n) = -6.388000e+001, max (n) = 8.493605e+002
y-coordinate: min (n) = -6.298355e+001, max (n) = 6.342679e+002
z-coordinate: min (n) = -1.438000e+002, max (n) = 1.143800e+003

Volume statistics:
minimum volume (n3): 1.164905e+001
maximum volume (n3): 8.612937e+002
total volume (n3): 7.882013e+007

Face area statistics:
minimum face area (n2): 8.706955e+000
maximum face area (n2): 1.167268e+002

Checking number of nodes per cell.
Checking number of faces per cell.
Checking thread pointers.
Checking number of cells per face.
Checking face cells.
Checking bridge faces.
Checking right-handed cells.
Checking face handedness.
Checking face node order.
Checking element type consistency.
Checking boundary types:
Checking face pairs.
Checking periodic boundaries.
Checking node count.
Checking nosolve cell count.
Checking nosolve face count.
Checking face children.
Checking cell children.
Checking storage.
Done.
```

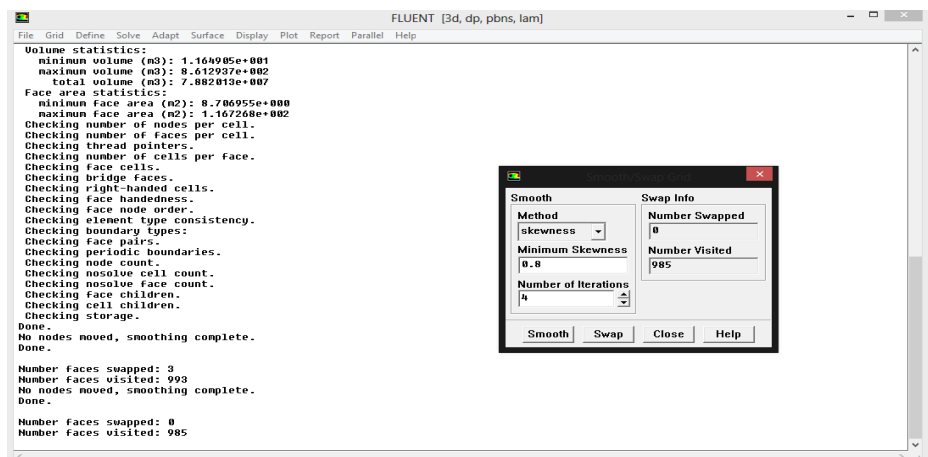
NB : Il faut que mot [Done] s'affiche à la fin.

4. Lissage du maillage (smooth and swap the grid)

Pour s'assurer de la qualité du maillage, il est pratique de lisser le maillage

[Grid] → [Smooth/Swap].

Affichage :



```
FLUENT [3d, dp, pbns, lam]

Volume statistics:
minimum volume (n3): 1.164905e+001
maximum volume (n3): 8.612937e+002
total volume (n3): 7.882013e+007

Face area statistics:
minimum face area (n2): 8.706955e+000
maximum face area (n2): 1.167268e+002

Checking number of nodes per cell.
Checking number of faces per cell.
Checking thread pointers.
Checking number of cells per face.
Checking face cells.
Checking bridge faces.
Checking right-handed cells.
Checking face handedness.
Checking face node order.
Checking element type consistency.
Checking boundary types:
Checking face pairs.
Checking periodic boundaries.
Checking node count.
Checking nosolve cell count.
Checking nosolve face count.
Checking face children.
Checking cell children.
Checking storage.
Done.
No nodes moved, smoothing complete.
Done.

Number faces swapped: 3
Number faces visited: 993
No nodes moved, smoothing complete.
Done.

Number faces swapped: 0
Number faces visited: 985
```

Smooth Swap Info

Method	skewness	Number Swapped	0
Minimum Skewness	0.8	Number Visited	985
Number of Iterations	4		

Smooth Swap Close Help

CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE

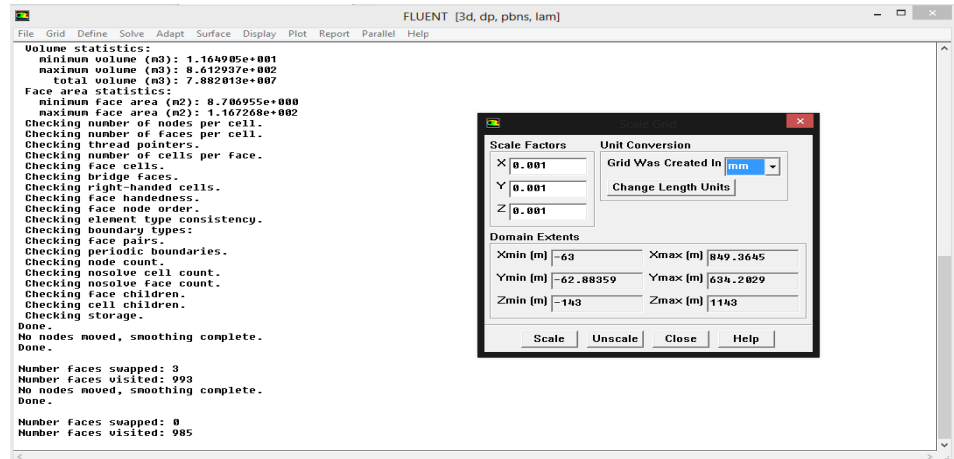
NB : Répétez jusqu'à ce que Fluent affiche que **[zéro faces sont swapped]**

5. Vérification de l'échelle :

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

[Grid] → [Scale].

Affichage :

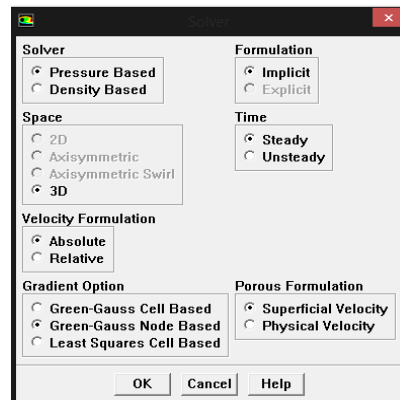


5. Choix du solveur

C'est là qu'on choisit le régime d'écoulement ; stationnaire ou non stationnaire.

[Define] → [Models] → [Solver].

Affichage :



CHAPITRE III : SIMILATION NUMERIQUE

7. Choix du modèle visqueux

Fluent propose différentes modélisations de l'écoulement. Parmi lesquels les écoulements non visqueux, laminaires, turbulents ... etc.

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

$$Re = \frac{U \cdot L}{\nu}$$

Avec :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

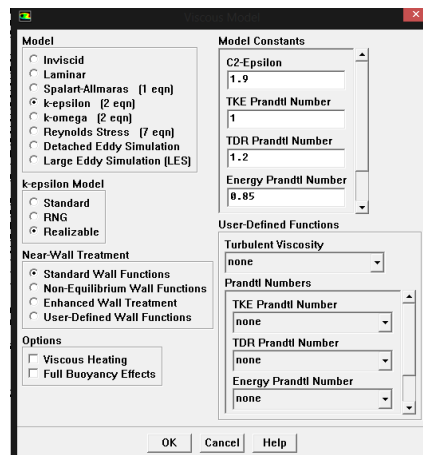
- U : vitesse caractéristique de l'écoulement
- L : longueur caractéristique (dans le cas d'un tube c'est le diamètre)
- ν : viscosité cinématique du fluide.
- μ : viscosité dynamique du fluide.
- ρ : masse volumique du fluide.

Pour un écoulement dans un canal, la transition entre un régime laminaire et un régime turbulent s'effectue généralement pour un nombre de Reynolds critique égal à 2500. Un écoulement est considéré pleinement turbulent lorsque le nombre de Reynolds est supérieur à 5000.

Les calculs seront réalisés en régime turbulent et le modèle K-epsilon réalisable est le modèle idéal pour notre étude.

[Define] → [Models] → [Viscous].

Affichage :



CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE

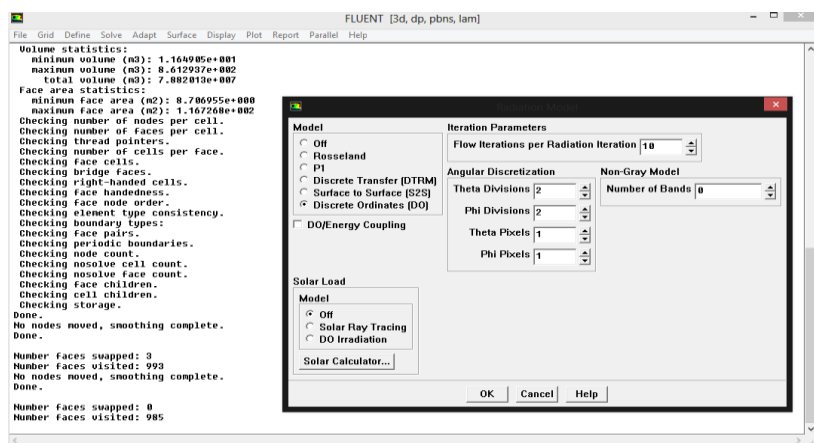
8. Choix du modèle radiation

Fluent propose différents modèles de radiation ; dans notre étude nous avons choisi le modèle DO (Discrete Ordinates). C'est un modèle qui permet d'entrer l'intensité initiale de rayonnement I_0 .

Remarque : l'équation de l'énergie sera automatiquement activée

[Define] → [Models] → [Radiation].

Affichage :

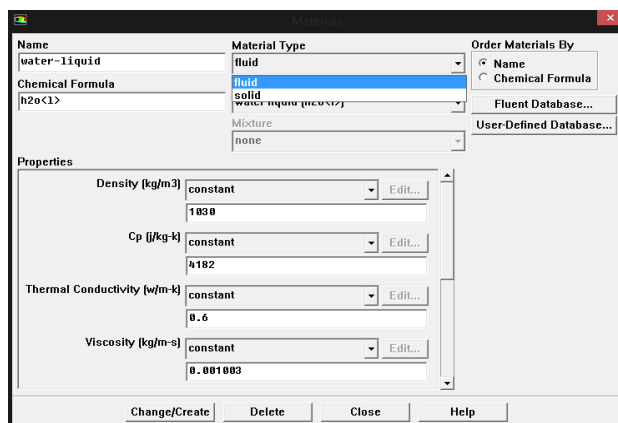


9. Définition des caractéristiques des matériaux (fluide et solide) :

- Les caractéristiques du fluide (eau) sont chargées à partir de la bibliothèque de données de Fluent.
- Les caractéristiques du solide (verre pyrex et PVC) sont programmées et implanté dans fluent. (voir annexe)
- Les caractéristiques des réactifs concernant la réaction sont chargées à partir de la bibliothèque de données de Fluent.

[Define] → [Materials].

Affichage :

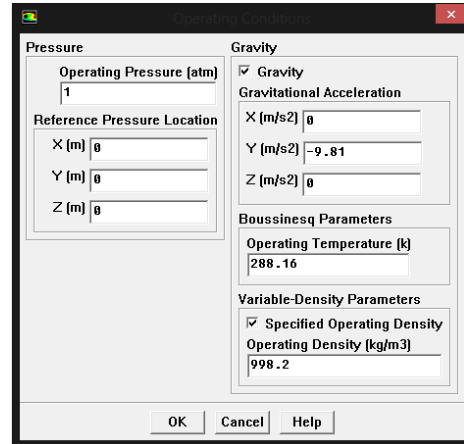


CHAPITRE III : SIMILATION NUMERIQUE

10. Conditions d'opération :

[Define] → [Operating conditions].

Affichage :

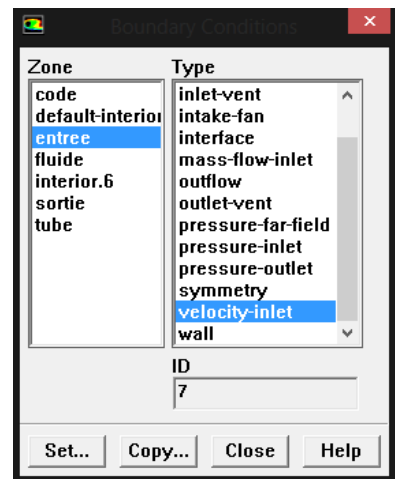


11. Conditions de fonctionnement :

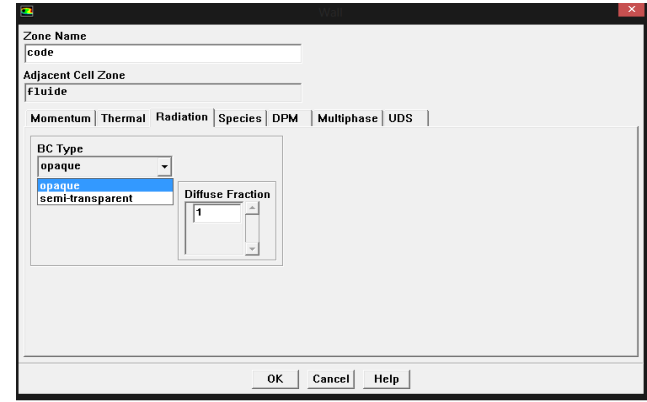
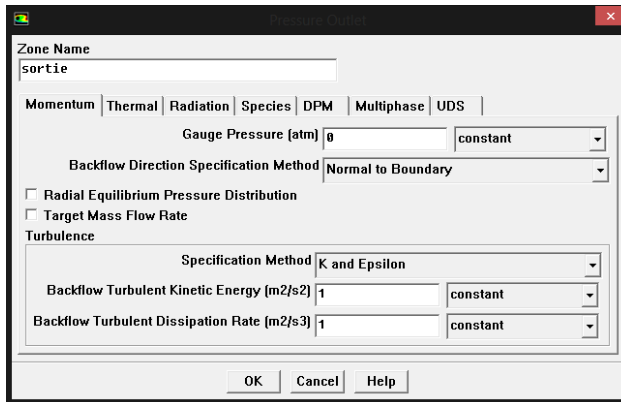
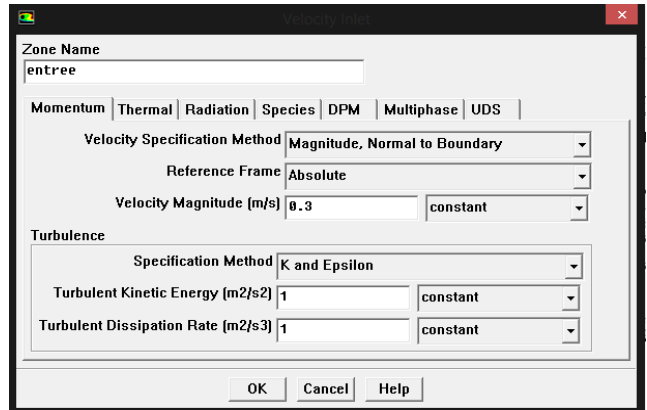
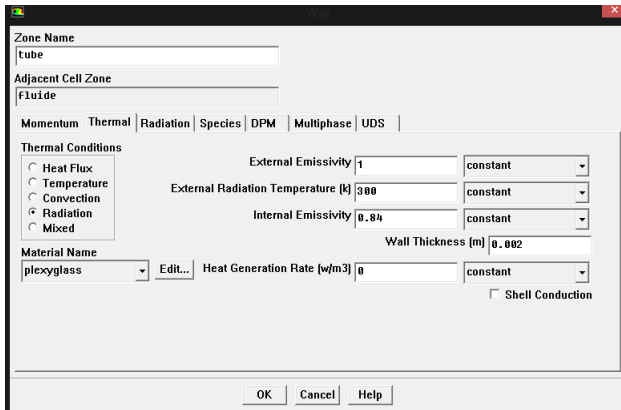
Ensuite, il faut fixer les valeurs des conditions aux limites pour chaque zone. Entrée, sortie, coude, tube :

[Define] → [BoundaryConditions]

Affichage :



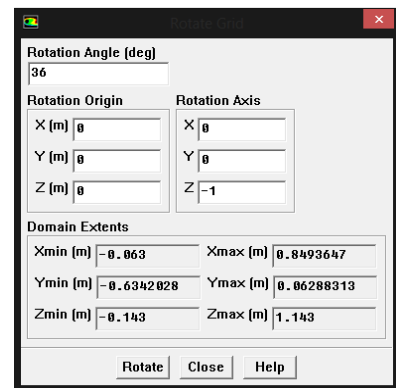
CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE



12. Choix du degré d'inclinaison :

[Grid] → [Rotate]

Affichage :



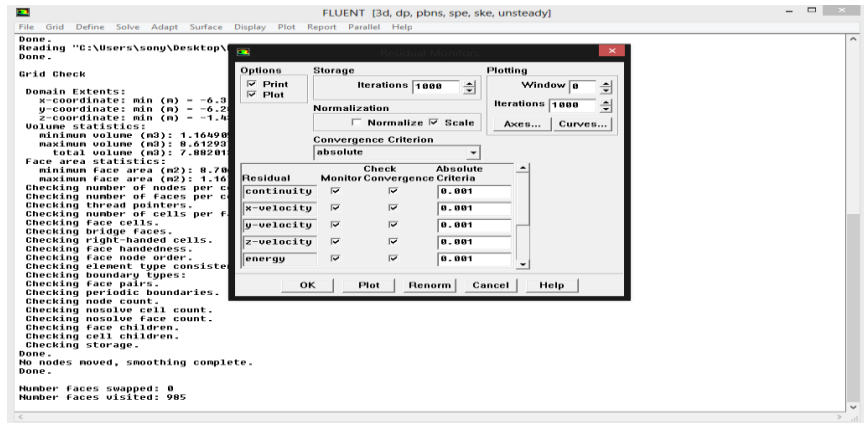
13. Choix des critères de convergence

Il s'agit d'un critère qui doit être vérifiés pour que les calculs de la simulation s'arrêtent. Dans la plupart des cas, le critère de convergence par défaut (10^{-3}) dans Fluent est suffisant. D'où la solution converge quand les résidus atteignent 10^{-3} . Toutefois, dans certains cas il faut pousser les calculs à 10^{-4} voire 10^{-6} . Il n'y a pas de règle universelle.

[Solve] → [Monitors] → [Residual].

CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE

Affichage :

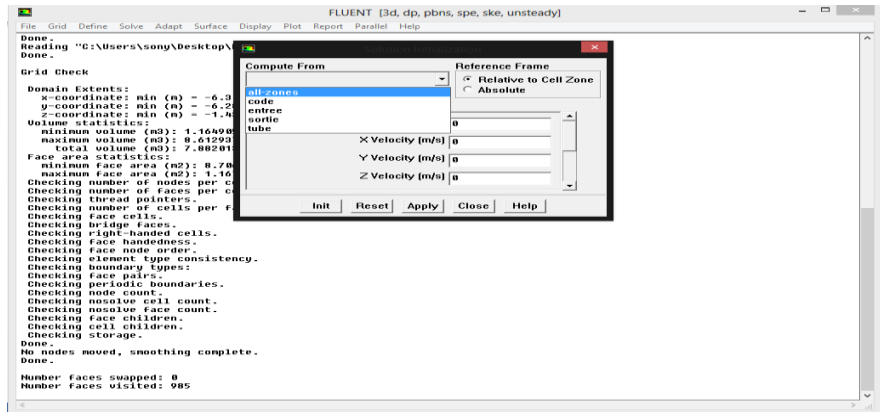


14. Initialisation des calculs

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 à l'entrée sauf suivant l'axe des Z.

[Solve] → [Inisialize] → [Inisialize].

Affichage :



15. Sauvegarde du fichier

Il faut sauvegarder le fichier en format *.cas. S'il y a un bug durant les calculs, il suffit de charger le fichier *.cas, pour ne pas refaire le paramétrage à nouveau.

[File] → [Write] → [Case].

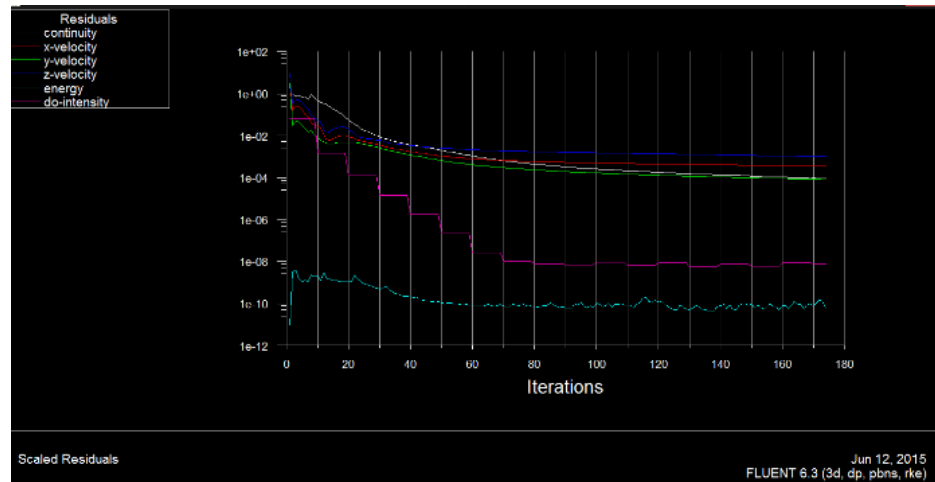
CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE

16. Lancement de la simulation

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 grande.

[Solve] → [Iterate].

Affichage :



II. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre les étapes de la génération d'une géométrie qui représente un photo-réacteur tubulaire par l'outil Gambit. Cette géométrie se compose de cinq (05) tubes en verre de pyrex et des coude en PVC incliné à 36° par rapport à l'horizontal. Au soumet de se photo-réacteur s'écoule une eau infectée par un bactériophage MS2 de densité $\rho=1030 \text{ kg.m}^3$. Le code Fluent a été utilisé pour les simulations numériques en régime stationnaire et non stationnaire.

Notre étude est basée sur un écoulement turbulent. Pour cela, on a utilisé des vitesses moyennes de 0.3, 0.2, 0.1 et 0.07 m/s en gardant toujours le régime turbulent.

Les modèles qu'on a utilisés pour la simulation sont :

- a. Discrete Ordinates pour le rayonnement

CHAPITRE III : SIMILATION NUMERIQUE

b. K- ϵ standard pour l'hydrodynamique

Nous avons pris ainsi deux condition pour le coefficient d'absorption $\alpha= (7.1 \text{ et } 2.2) \text{ m}^{-1}$ pour nous permet de trouver une meilleure solution pour le taux d'inactivation des micro-organismes.

Chapitre IV

DISCUSSION ET INTERPRETATION

=====

I. SIMULATION DU PHOTO-REACTEUR TUBULAIRE

La simulation numérique du photoréacteur solaire est constituée de deux parties :

1. Analyse des résultats de simulation de l'hydrodynamique en régime instationnaire et stationnaire
2. Couplage entre la cinétique d'inactivation des microorganismes et la distribution du rayonnement en régime stationnaire

I.1. ETUDE DE L'HYDRODYNAMIQUE

Afin d'étudier l'écoulement de l'eau à désinfecter dans le photo-réacteur tubulaire nous avons lancé un calcul de simulation dans Fluent en régime non stationnaire et stationnaire.

La vitesse d'écoulement à l'entrée du réacteur est de 0.3 m/s ($Re = 40\,170$) ce qui correspond à un régime turbulent. Le modèle choisi est K- ϵ standart.

Les résultats de calcul relatifs aux champs de vitesse en fonction des variables temporelles et spatiales sont données ci-après:

Affichage du contour de la vitesse : [Display] → [Vectors] → [Vectors of Velocity Colored by Velocity]

CHAPITRE IV : DISCUSSION ET INTERPRETATION

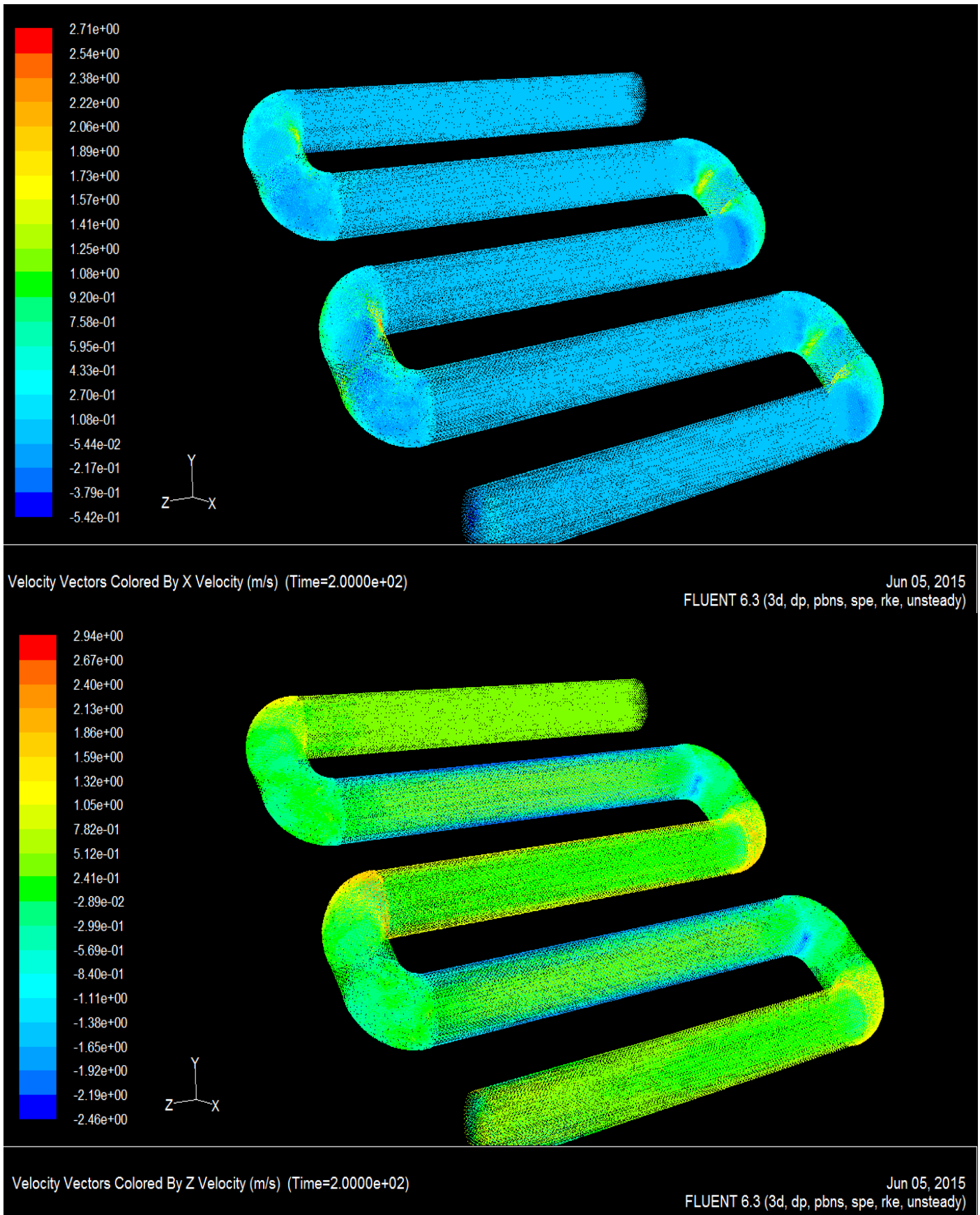


Figure 4.1 : Champ de vitesse selon X, Z en régime non stationnaire

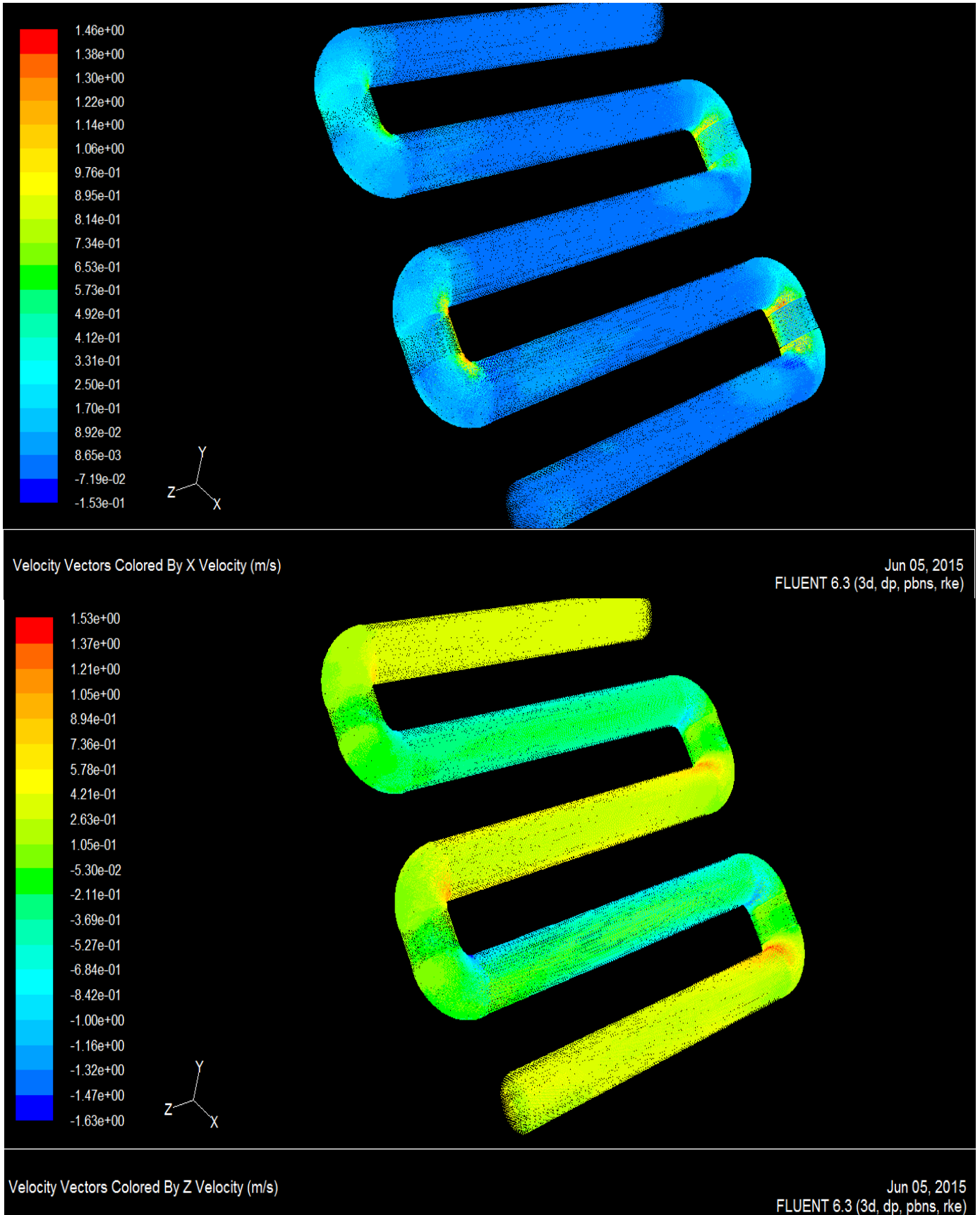


Figure 4.2 : *Champ de vitesse selon X, Z en régime stationnaire*

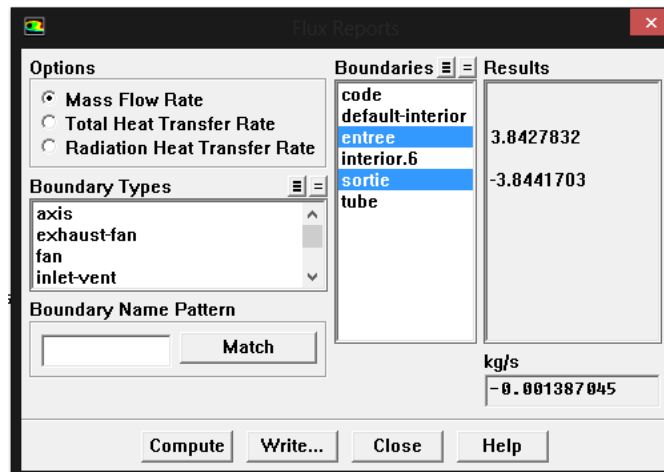
Les champs de vitesse relatifs à l'écoulement de l'eau à désinfecter dans le photo-réacteur tubulaire selon les axes X et Z pour les deux régimes non stationnaire et stationnaire sont donnés par les figures (4.1, 4.2)

La plage de vitesses atteintes par l'eau à désinfecter varie de [-0.054 à 1.08] m/s selon (X) et [-1.65 à 1.86] m/s selon (Z) pour le régime non stationnaire et de [-0.65 à 1.06] m/s selon (X) et [-0.211 à 0.57] m/s selon (Z) pour le régime stationnaire. Nous constatons que le champ de vitesse au niveau des tubes (variation selon Z) subit moins de fluctuations pour les deux régimes comparativement au coude. En effet, au niveau des coudes (variation selon X), une augmentation sensible de la vitesse est enregistrée et elle est plus prononcée pour le régime non stationnaire.

I.1.1 VERIFICATION DE LA CONSERVATION DU DEBIT

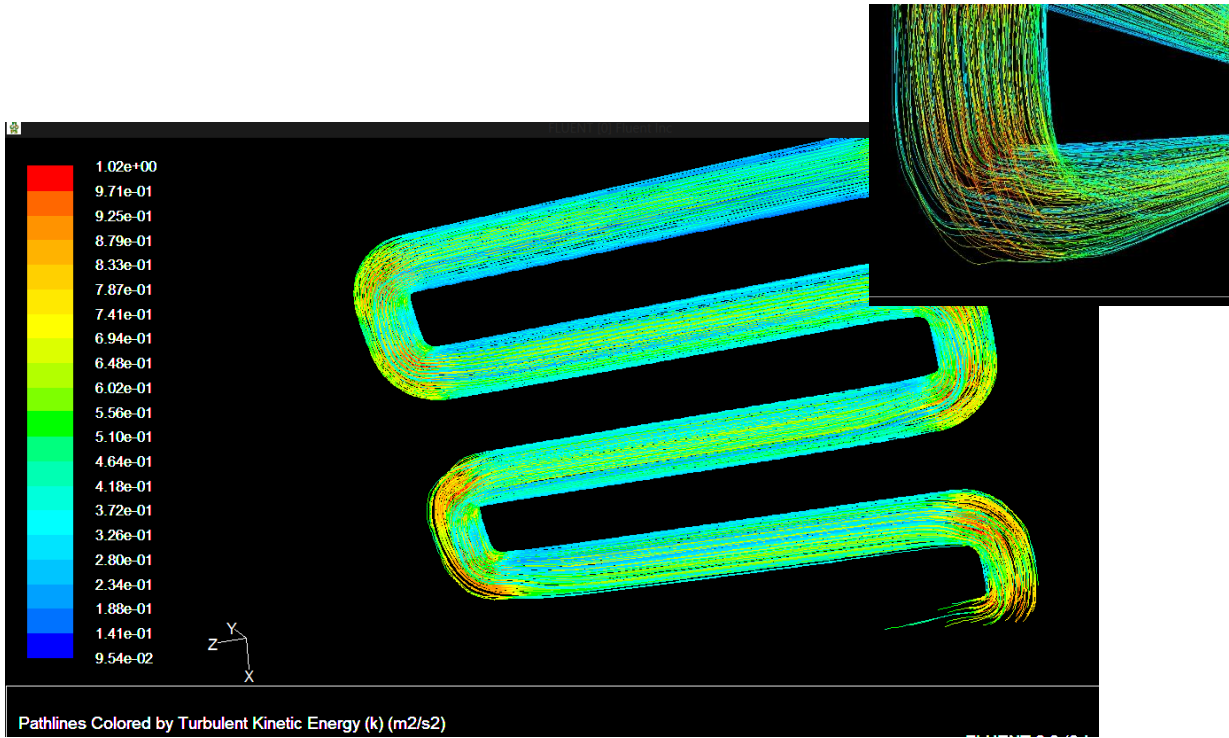
Fluent dispose d'une fenêtre qui nous permis de vérifier la satisfaction ou non de de la condition de conservation du débit.

Affichage → [Report] → [Fluxes]



D'après cet affichage, nous remarquons que la condition de la conservation de masse est satisfaite. En effet, le débit à l'entrée du réacteur et celui à la sortie sont pratiquement égaux en valeur absolue.

I.1.2. CHAMP DE LA TURBULENCE



Nous avons reporté sur la figure ci-dessus la variation de l'énergie cinématique turbulente (k) le long du réacteur tubulaire en fonction des coordonnées spatiales x , y et z . Nous avons constaté qu'au niveau des coudes, les fluctuations de la vitesse sont plus importantes comparativement aux tubes et que la valeur maximale de l'énergie cinématique turbulente atteinte est de $1.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

1.2. ETUDE CINÉTIQUE

La simulation effectuée en régime permanent a pour but la prédiction du rendement de la désinfection de l'eau par rayonnement solaire ou le taux d'inactivation des microorganismes exprimé par "log d'inactivation" en fonction de :

- =====
1. L'angle d'inclinaison du réacteur ;
 2. La transmittance de l'eau à désinfecter ;
 3. La vitesse à l'entrée du réacteur.

A. EAU CHARGÉE DES MICROORGANISMES AVEC UNE TRANSMITTANCE DE 7.1 m⁻¹

A.1. Transmittance de 7.1 m⁻¹, Vitesse de 0.3 m/s, Configuration du réacteur tubulaire : horizontale et inclinée de 36°

A.1.1 DISTRIBUTION DE LA DOSE REÇUE PAR LES MICROORGANISMES

La distribution de la dose reçue est un paramètre primordial dans l'étude de l'efficacité des réacteurs solaires de traitement des eaux. Cette dose est obtenue en utilisant les champs d'intensité de rayonnement calculés par Fluent et les champs de vitesses issus de la simulation hydrodynamique. Pour ce faire, nous avons adopté l'approche eulérienne.

Comme le code de calcul Fluent est conçu pour simuler les réactions chimiques en phase gazeuse notamment les réactions de combustion, il nous a été indispensable de développer une fonction et l'implanter dans Fluent afin de :

1. Calculer la dose de rayonnement UV reçue par les microorganismes lorsqu'ils traversent le réacteur irradié et sa distribution.
2. Utiliser cette fonction pour déterminer le taux d'inactivation des microorganismes.

En désinfection par rayonnement UV, l'abattement des micro-organismes est directement fonction de la dose UV. Celle-ci, exprimée en J/m², est le produit de l'intensité UV à 254 nm appliquée dans le réacteur (I en Watt/m²) par le temps de contact de l'effluent dans la zone irradiée (t en seconde) selon la relation :

$$\text{Dose} = I \cdot dt$$

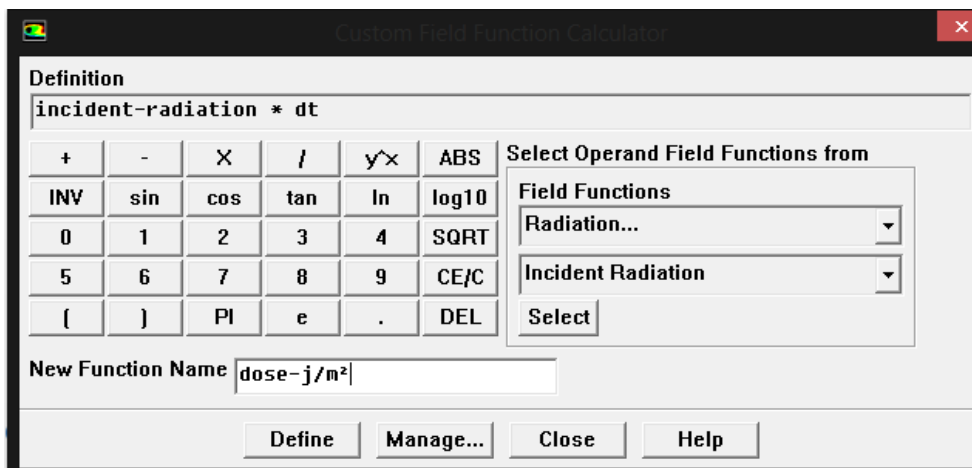
Avec : $I = I_0 * e^{-(\alpha * L)}$

dt : temps d'exposition de chaque maille du réacteur à l'intensité de rayonnement I, en secondes.

$$dt = \frac{dl}{V_{maille}} = \frac{0.008 \text{ m}}{0.3 \text{ m/s}} = 0.026 \text{ s}$$

Fluent permet d'implanter cette fonction à partir de l'option "**Custom Field Function**".

[Define] → [Custom Field Function]



Affichage : [Display] → [Contours] → [Dose]

Les résultats relatifs à la distribution de la dose reçue par les microorganismes sont donnés ci-après :

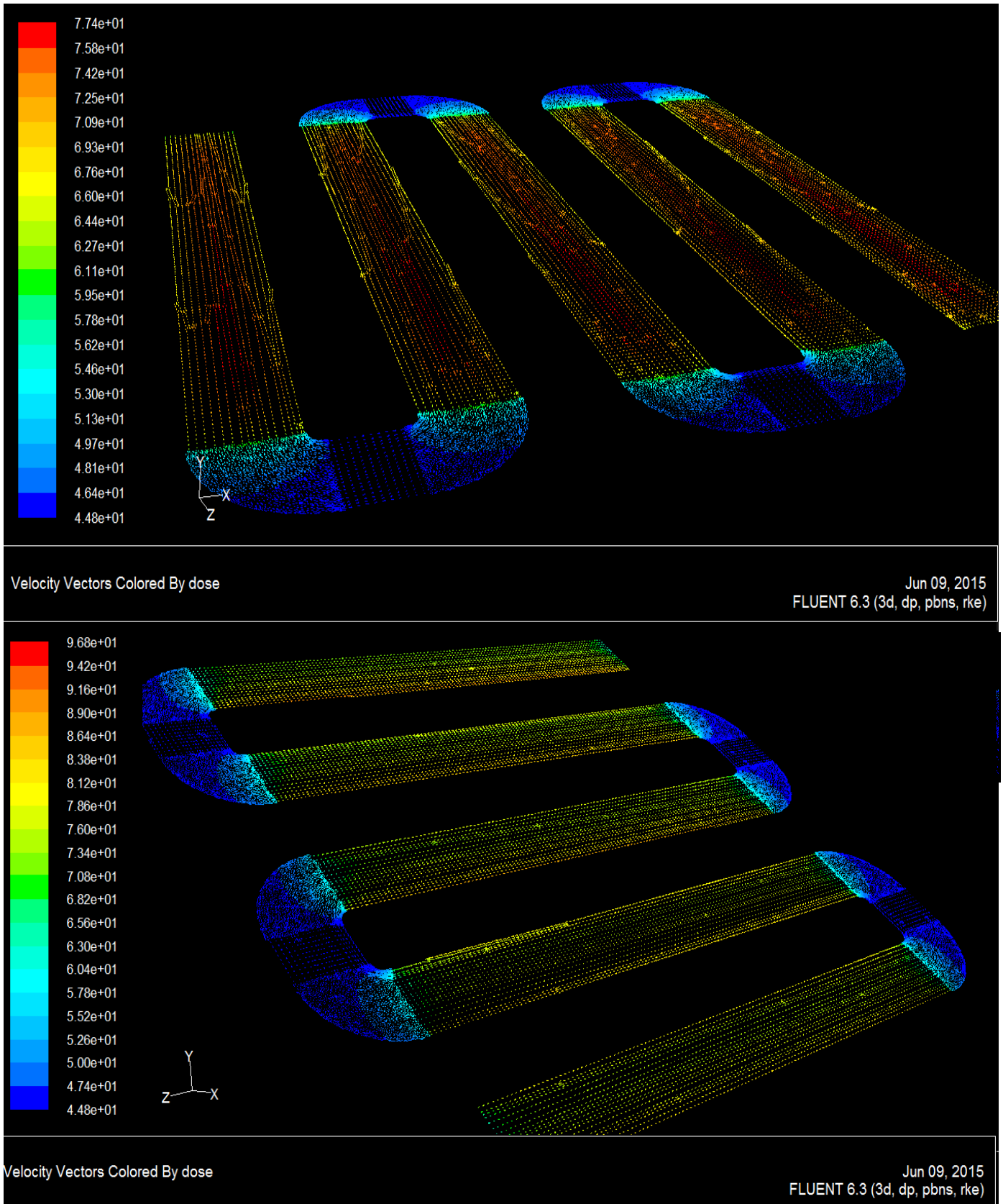


Figure 4.3 : *Distribution de la dose reçue par les microorganismes à 780 w/m² pour les deux configurations [0°,36°] respectivement*

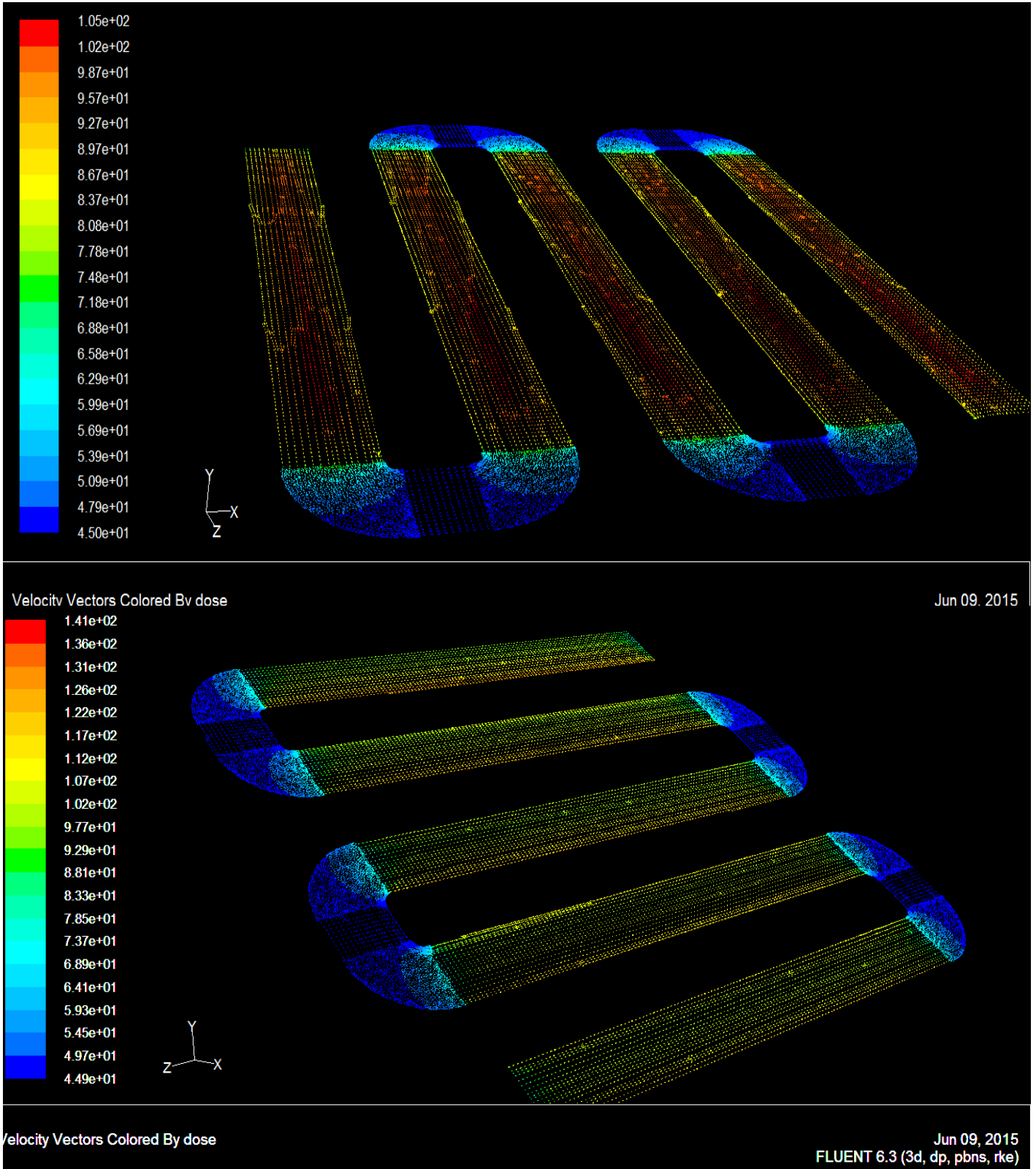


Figure 4.4 : *Distribution de la dose reçue par les microorganismes à 1480 w/m² pour les deux configurations [0°,36°] respectivement*

Les figures 4.3 et 4.4 présentent la variation de la dose reçue par les microorganismes lorsqu'ils traversent le réacteur en fonction de l'intensité du rayonnement solaire et de l'inclinaison du réacteur.

Nous constatons que :

1. la dose reçue par les microorganismes est plus importante au niveau des tubes comparativement aux coudes. Ceci est dû à la différence entre les transmittances des matériaux constituant les tubes et les coudes. En effet, les tubes sont en pyrex et les coudes sont en PVC et le pyrex a une meilleure transmittance du rayonnement par rapport au PVC.
2. Les valeurs maximales de la dose reçue par les microorganismes varient en fonction de l'angle d'inclinaison du réacteur. En effet, elles peuvent atteindre 141 j/m² dans la configuration inclinée et 105 j/m² pour la configuration horizontale.
3. La distribution de la dose reçue par les micro-organismes est symétrique dans la configuration horizontale tandis que pour la configuration inclinée les zones du réacteur qui reçoivent les meilleures doses sont situées dans la partie supérieure des tubes.

A.1.2. TAUX D'INACTIVATION DES MICROORGANISMES

Le taux d'inactivation des microorganismes ce n'est que le rendement de la désinfection d'un réacteur solaire. Il est étroitement lié à la dose reçue par les microorganismes par la relation suivante :

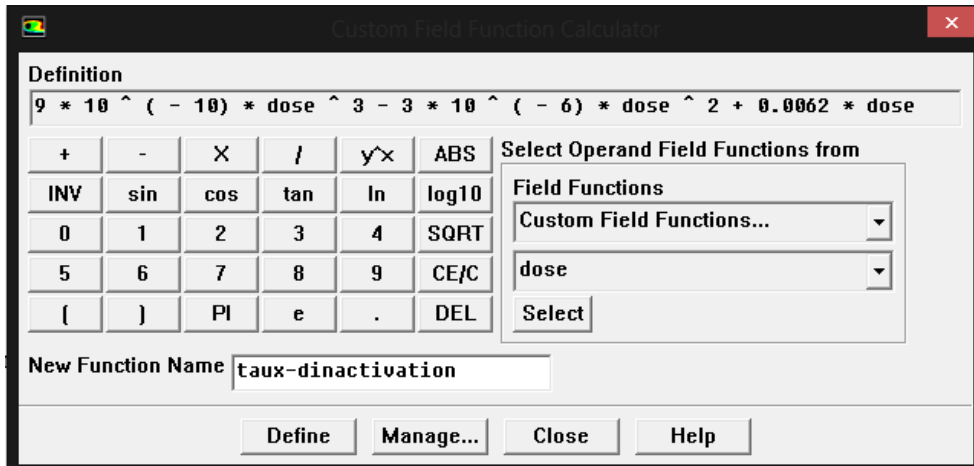
$$\text{LOG (I}_0\text{/I)} = 9 \times 10^{-10} \times \text{Dose}^3 - 3 \times 10^{-6} \times \text{Dose}^2 + 0.0062 \times \text{Dose}$$

Avec :

Log (I₀/I) est le taux d'inactivation des microorganismes.

Le taux d'inactivation a été défini et implanté dans Fluent en utilisant l'option Custom Field Function.

Affichage : [Define] → [Custom Field Functions]



Les résultats donnant la distribution du taux d'inactivation pour les deux configurations du réacteur tubulaire et pour une transmittance de l'eau à désinfecter de 7.1 m⁻¹, sont reportés ci-après.

Affichage : [Display] → [Contours]

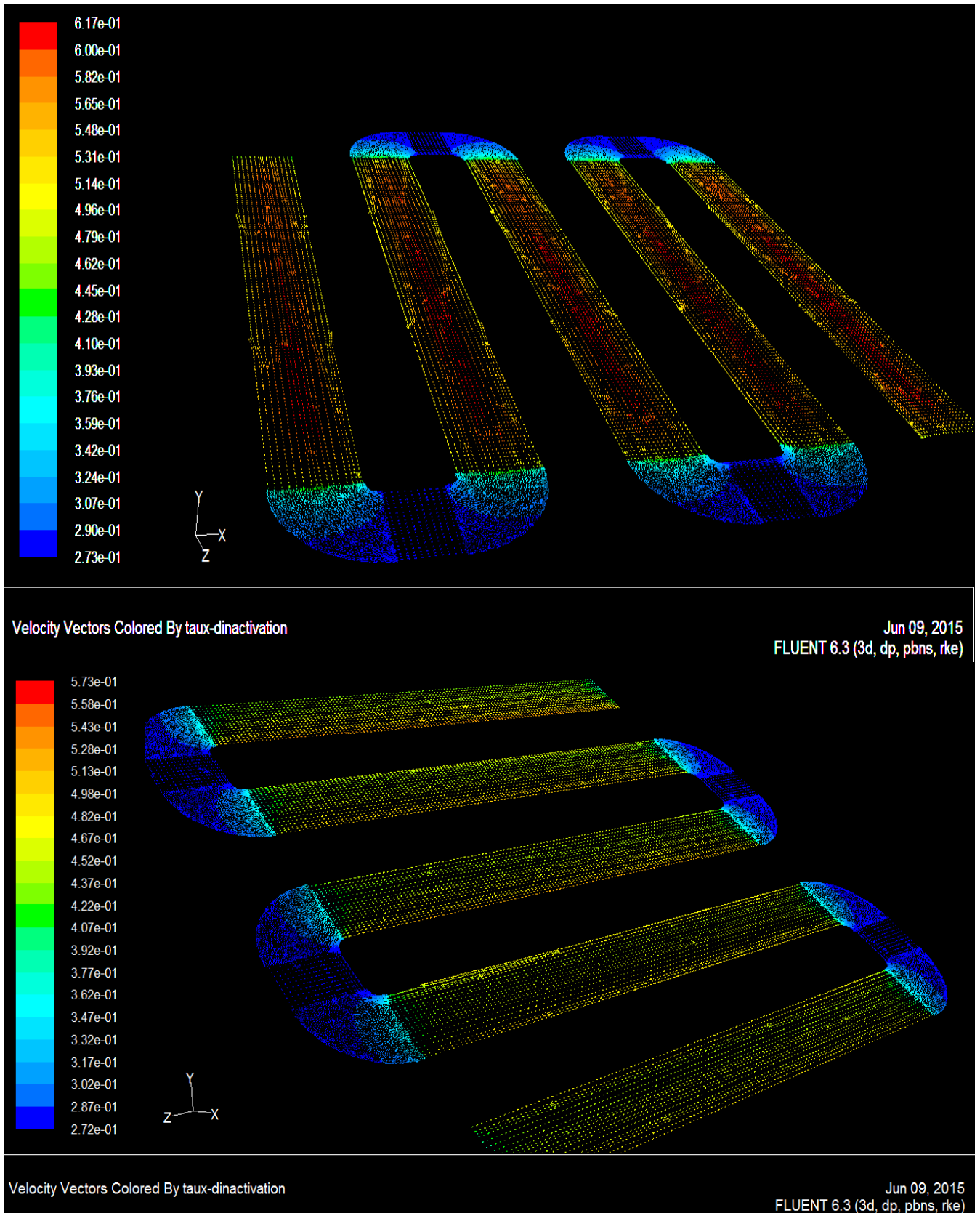


Figure 4.5 : *Distribution du taux d'inactivation ($\log I_0/I$) à 780 w/m^2 pour les deux configurations $[0^\circ, 36^\circ]$ respectivement.*

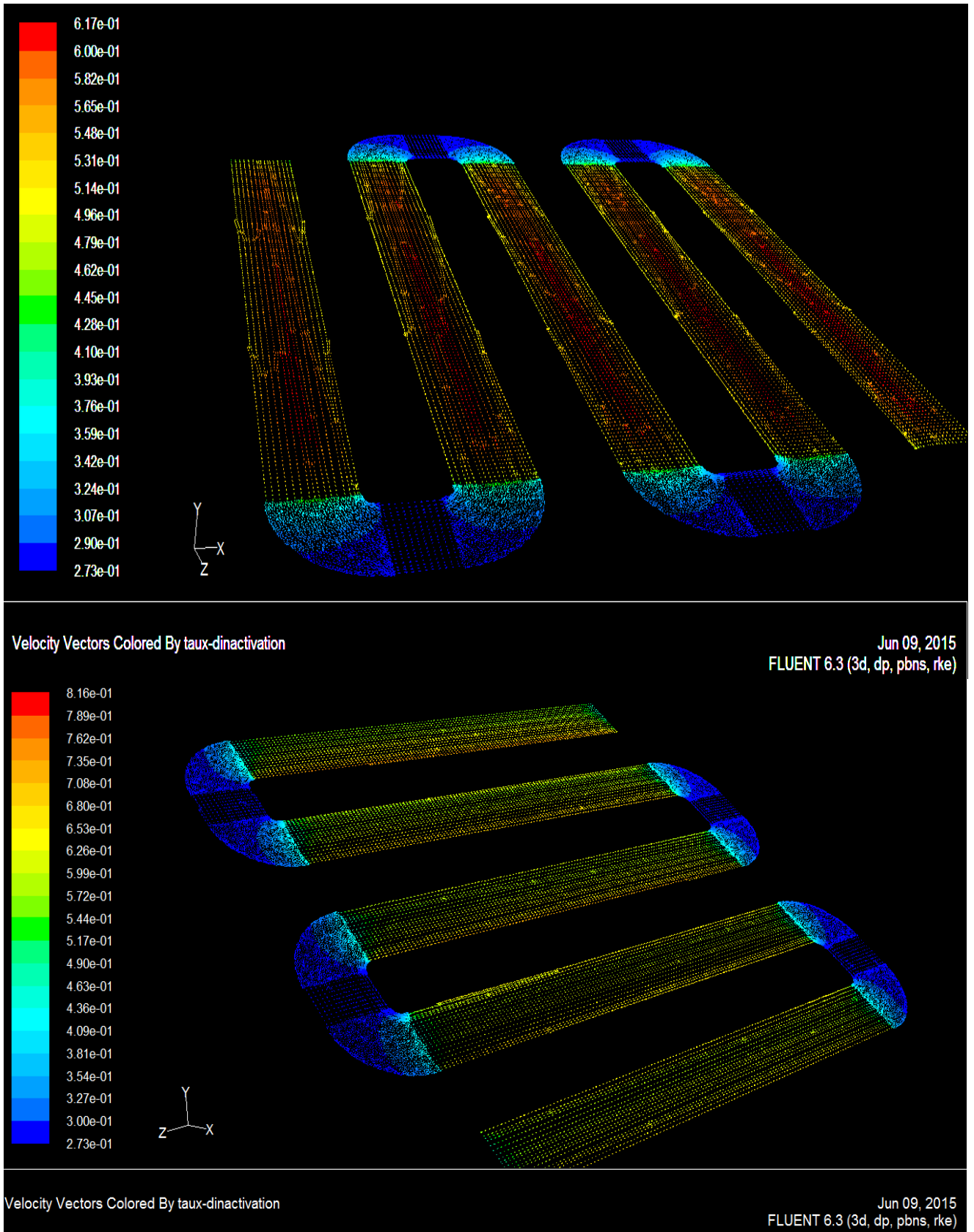


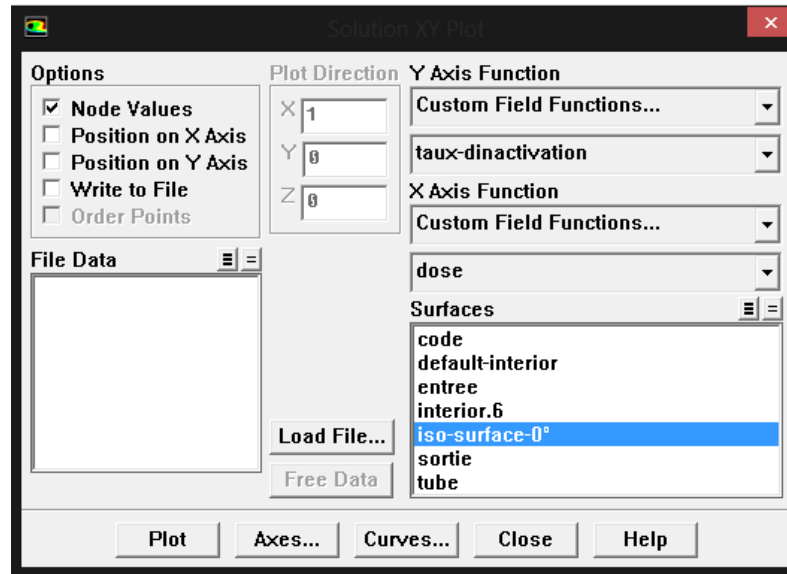
Figure 4.6 : *Distribution du taux d'inactivation ($\log I_0/I$) à 1480 w/m^2 pour les deux configurations $[0^\circ, 36^\circ]$ respectivement*

CHAPITRE IV : DISCUSSION ET INTERPRETATION

=====

Nous avons aussi tracé les variations du taux d'inactivation des microorganismes en fonction de la dose reçue par ces derniers.

Affichage : [Plot] → [XY Plot]



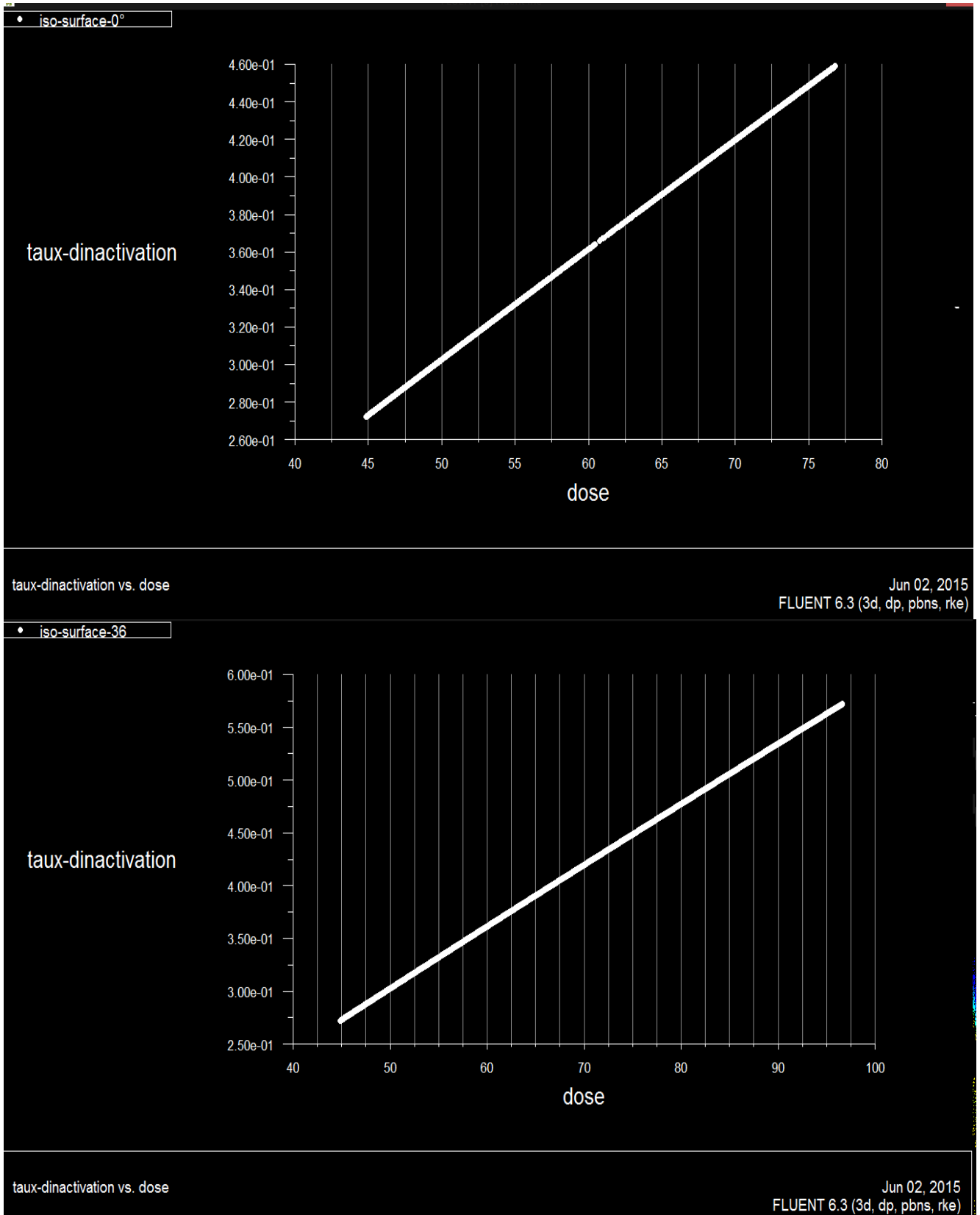


Figure 4.7 : *Distribution du taux d'inactivation ($\log I_0/I$) en fonction de la dose (j/m^2) reçue par les microorganismes à 780 w/m^2 pour les deux configurations $[0^\circ, 36^\circ]$ respectivement*

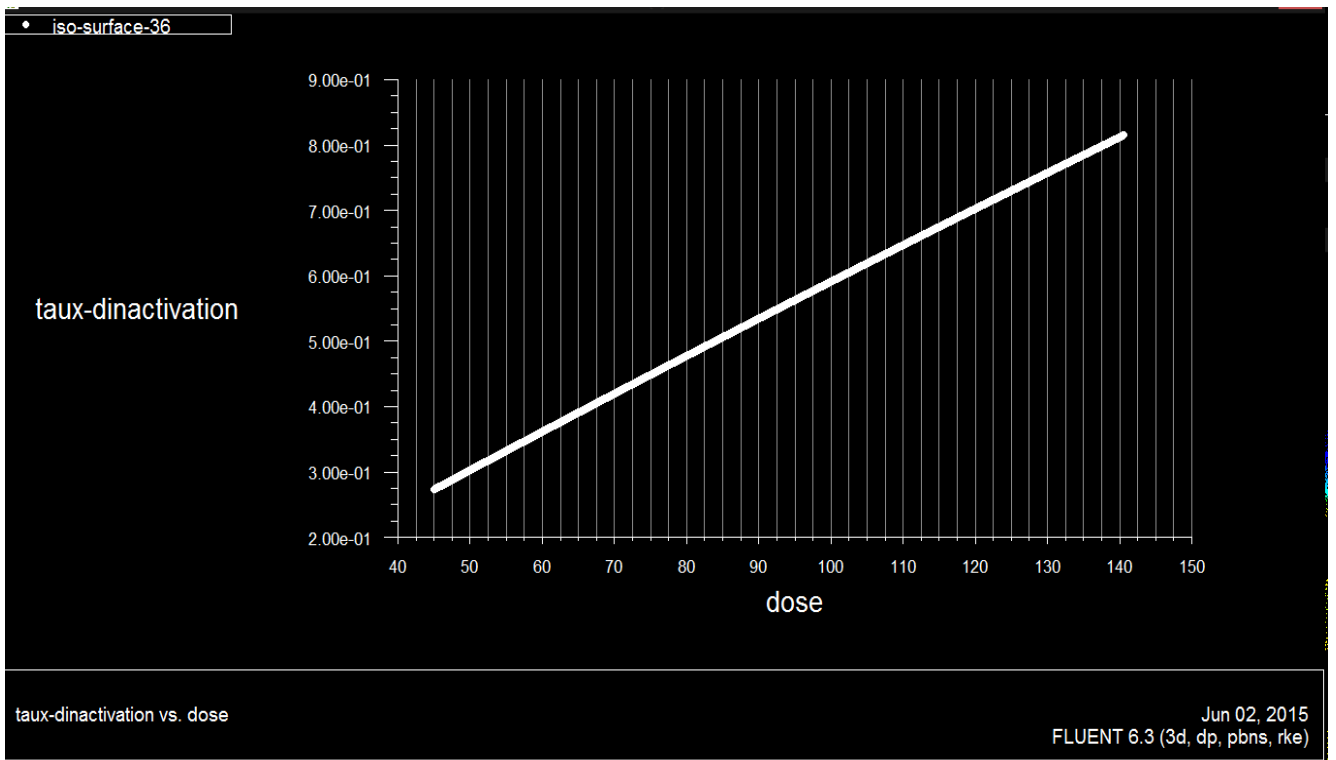
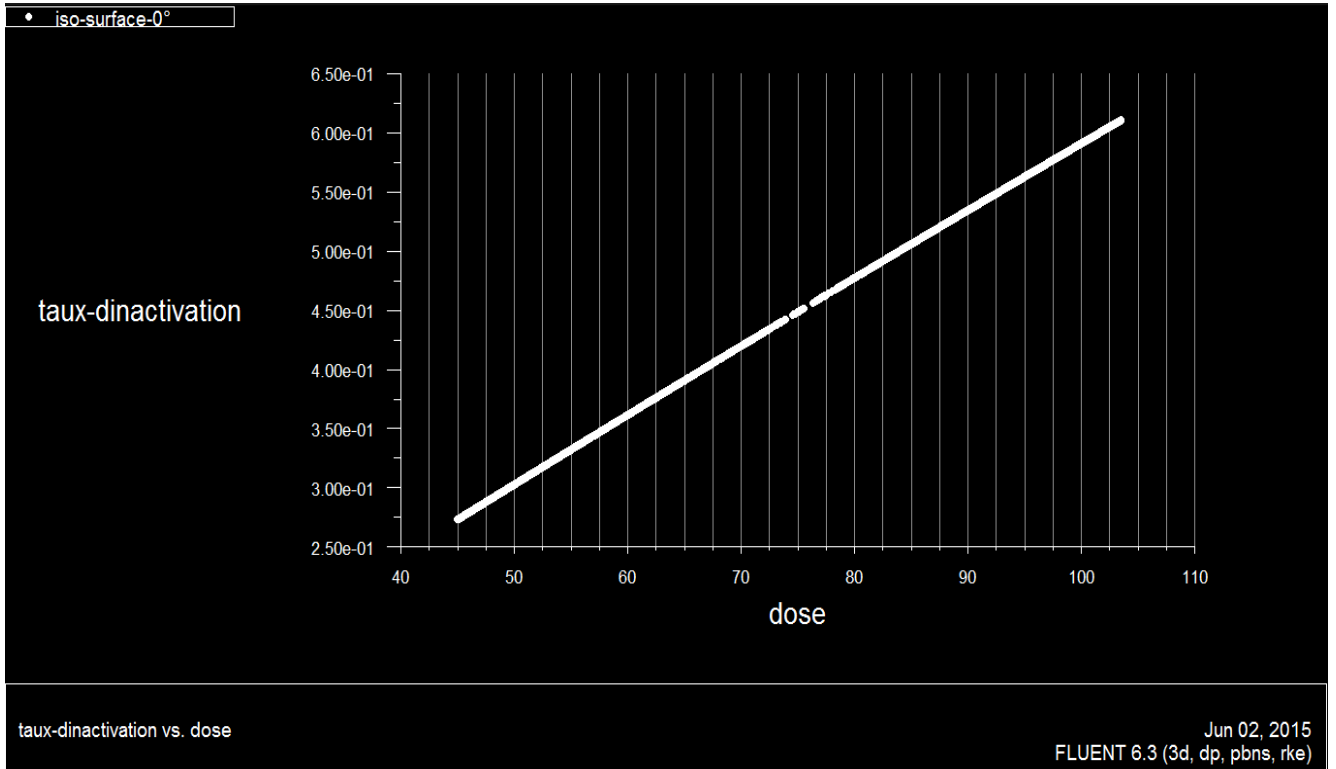


Figure 4.8 : Distribution du taux d'inactivation ($\log I_0/I$) en fonction de la dose (j/m^2) reçue par les microorganismes à 1480 w/m^2 pour les deux configurations $[0^\circ, 36^\circ]$ respectivement

Pour un rayonnement solaire de 1480 W/m^2 nous avons comparé la variation du taux d'inactivation en fonction de la dose reçue par les microorganismes pour les deux configurations horizontale et inclinée. Les courbes obtenues sont des droites superposées. Le taux maximal de désinfection correspond au réacteur incliné.

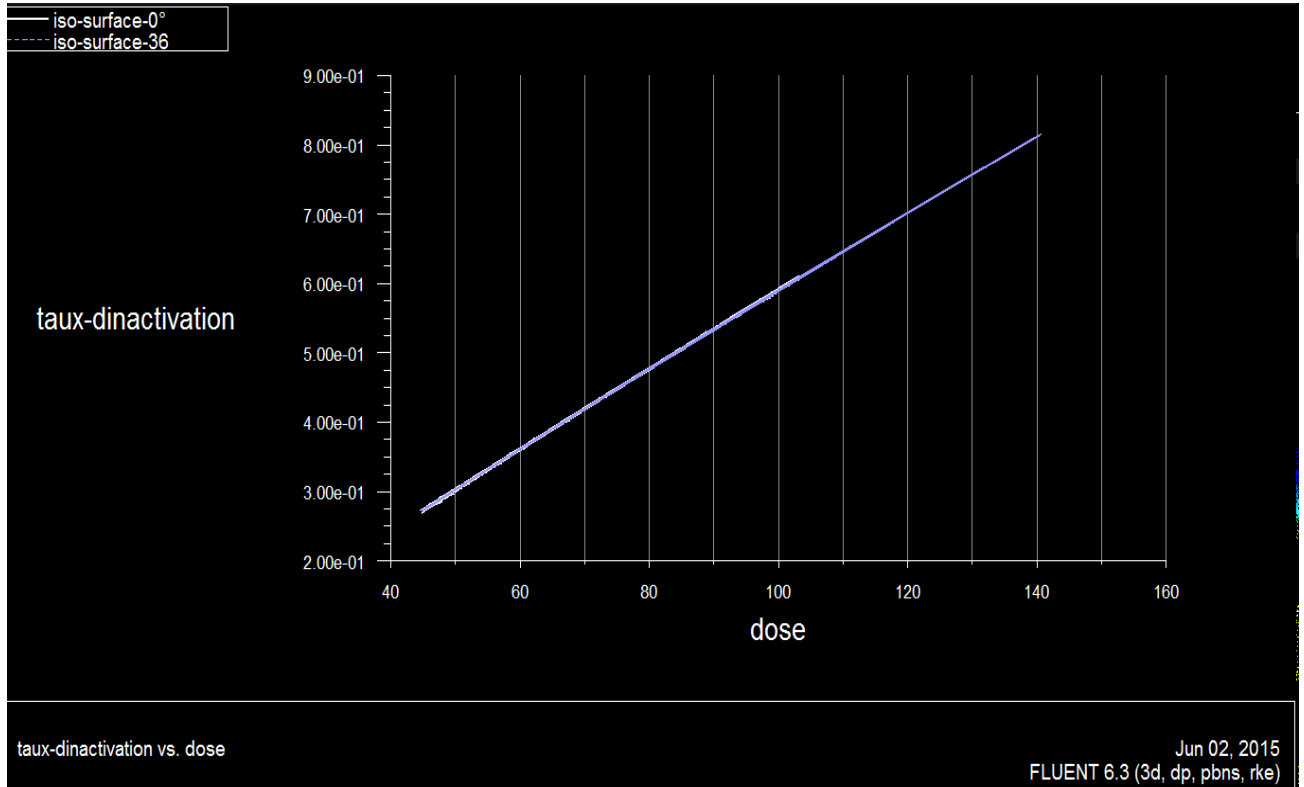


Figure 4.9 : Distribution du taux d'inactivation ($\log I_0/I$) en fonction de la dose (j/m^2) reçue par les microorganismes de 1480 w/m^2 pour les deux configurations $[0^\circ, 36^\circ]$

L'analyse des résultats obtenus montrent que la dose maximale reçue par les microorganismes peut atteindre 141 j/m^2 pour la configuration inclinée de 36° et une valeur de 105 j/m^2 pour la configuration horizontale. En effet, d'après la littérature une dose de 141 j/m^2 est suffisante pour inactiver les microorganismes de type MS2 et permet d'augmenter la transmittance de l'eau jusqu'à 85 %. Dans le cas de notre étude le taux d'inactivation obtenu est proche de 1log qui correspond en pourcentage à 90 % des microorganismes désactivée (voir annexe)

=====

B. EAU CHARGÉE DE MICROORGANISMES AVEC UNE TRANSMITTANCE DE 2.2 m^{-1}

**B.1. Transmittance de 2.2 m^{-1} , Vitesse de 0.3 m/s , Configuration du réacteur tubulaire :
horizontale et inclinée de 36°**

**B.1.1. LA DISTRIBUTION DU TAUX D'INACTIVATION EN FONCTION DE LA DOSE REÇUE
PAR LES MICROORGANISMES**

[Defline] → [Custom Field Function]

Les résultats donnant la distribution du taux d'inactivation en fonction de la dose reçue par les microorganismes pour les deux configurations du réacteur tubulaire et pour une transmittance de l'eau à désinfecter de 2.2 m^{-1} , sont reportés ci-après.

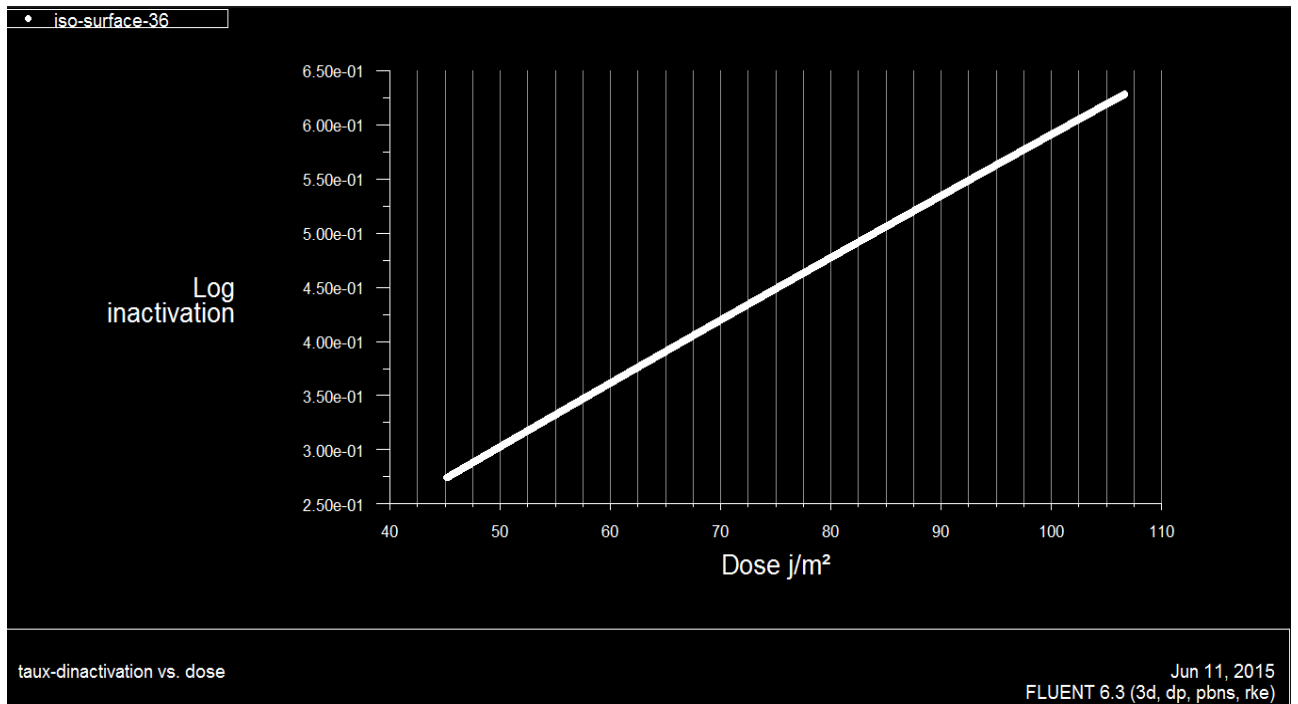
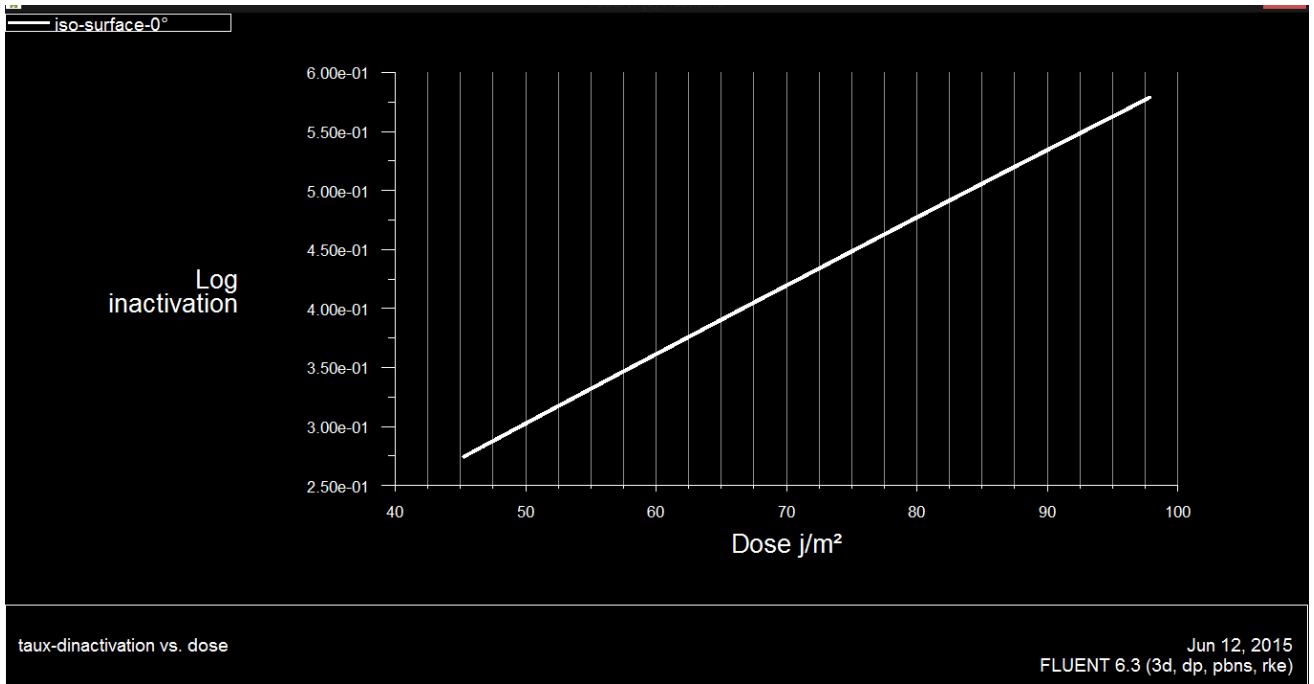


Figure 4.10 : *Distribution du taux d'inactivation ($\log I_0/I$) en fonction de la dose (j/m^2) reçue par les microorganismes à 780 w/m^2 pour les deux configurations $[0^\circ, 36^\circ]$ respectivement.*

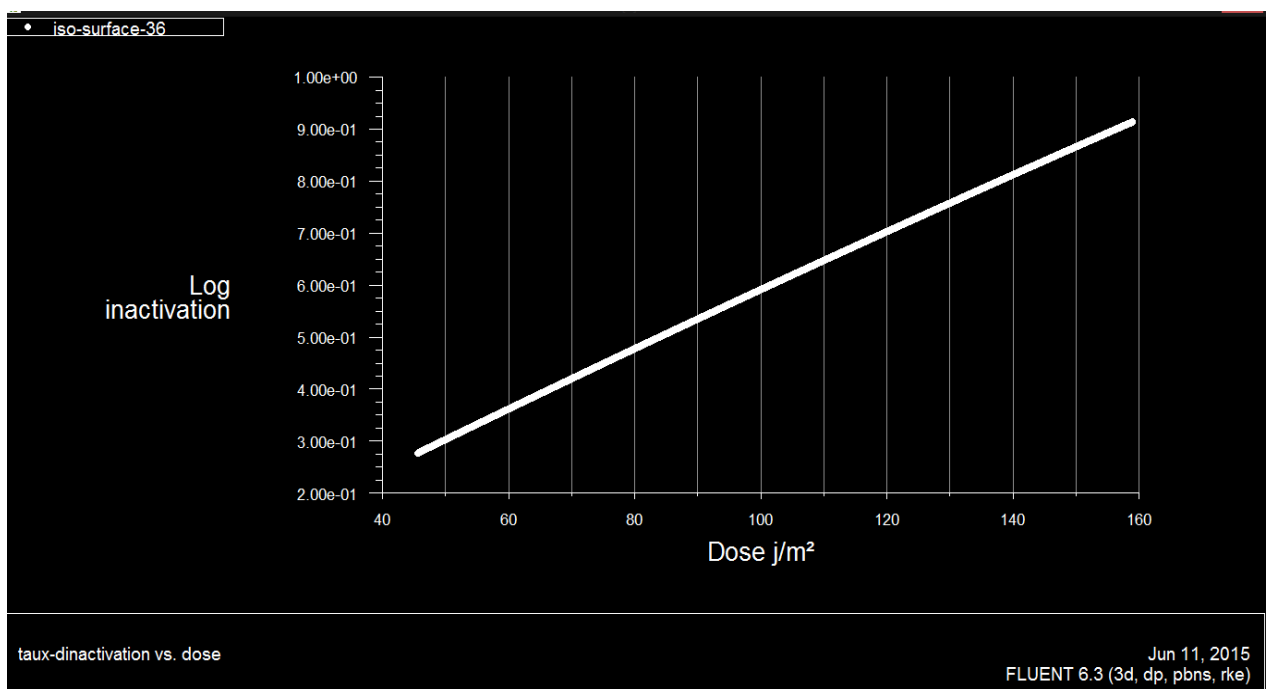
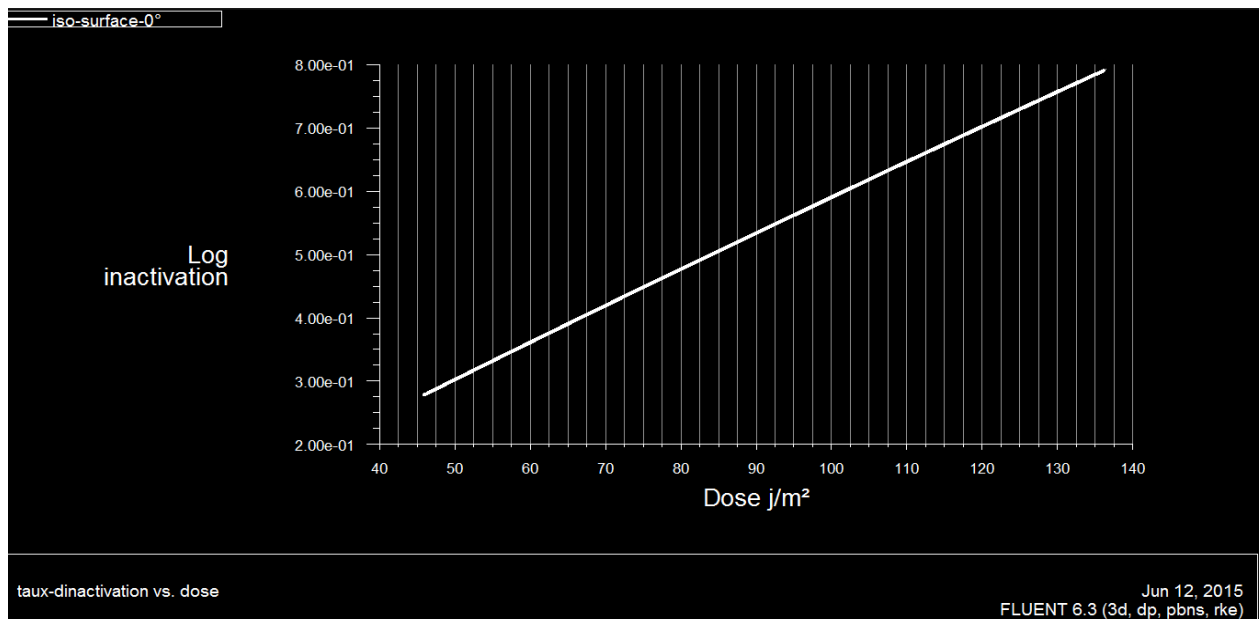


Figure 4.11 : Distribution du taux d'inactivation ($\log I_0/I$) en fonction de la dose (j/m^2) reçu par les microorganismes à 1480 w/m^2 pour les deux configurations $[0^\circ, 36^\circ]$ respectivement.

Avec un coefficient d'absorption $\alpha = 2.2 \text{ m}^{-1}$ le taux d'inactivation obtenu est proche de 1 log qui correspond à 90% des microorganismes qui ont été désactivée (voir annexe). Nous

CHAPITRE IV : DISCUSSION ET INTERPRETATION

constatons que le rendement de désinfection est meilleur lorsque l'eau à désinfecter est moins chargée en microorganismes.

1.3. ETUDE SUR L'INFLUENCE DE LA VARIATION DE TEMPS DE SEJOUR

Afin d'étudier l'influence de la variation du temps de séjour sur le rendement de la désinfection, nous avons analysé pour la configuration optimale du réacteur solaire, la variation de taux d'inactivation ($\log I_0/I$) en fonction de la vitesse d'entrée.

L'effet du temps de séjour sur le taux d'inactivation des microorganismes est présenté ci-après :

a) Transmittance de 7.1 m^{-1} , Vitesse (0.07, 0.1 et 0.2) m/s, Configuration optimale du réacteur tubulaire (incliné de 36°)

Tableau 4.1 : *Distribution Du taux d'inactivation ($\log I_0/I$) en fonction de la dose (j/m^2) reçue par les microorganismes de [780 à 1480] w/m^2 respectivement. Pour la configuration optimale à 36° .*

Vitesse (m/s)	Intensité (w/m^2)	Temps de séjours (s)	La dose (j/m^2)	Log inactivation
0.3	780	7.53	97	0,55
0.3	896	7.53	105	0,625
0.3	1012	7.53	112	0.67
0.3	1128	7.53	120	0.7
0.3	1244	7.53	125	0.73
0.3	1480	7.53	140	0.81
0.2	780	11.3	145	0,85
0.2	896	11.3	155	0,9
0.2	1012	11.3	167	0,95
0.2	1128	11.3	178	1.3
0.2	1244	11.3	190	1.75
0.2	1480	11.3	210	1,2
0.1	780	22.6	290	1,6
0.1	896	22.6	310	2,2
0.1	1012	22.6	335	1,69
0.1	1128	22.6	1,9	1,79
0.1	1244	22.6	195	1,9
0.1	1480	22.6	425	1,95
0.07	780	32.3	415	2,1
0.07	896	32.3	450	2,3
0.07	1012	32.3	475	2,4
0.07	1128	32.3	512	2,5
0.07	1244	32.3	550	2,65
0.07	1480	32.3	600	2,8

CHAPITRE IV : DISCUSSION ET INTERPRETATION

Les pourcentages optimaux qui correspondent à chaque dose par rapport au taux d'inactivation, sont donnés ci-après (voir annexe) :

Intensité (W/m ²)	Vitesse (m/s)	Dose (j/m ²)	Log inactivation	Pourcentage (%)
1480	0.3	140	0.81	90
	0.2	210	1.2	90
	0.1	425	1.95	99
	0.07	600	2.8	99.9

b). Transmittance de 2.2 m⁻¹, Vitesse (0.07, 0.1 et 0.2) m/s, Configuration optimale du réacteur tubulaire (incliné de 36°)

Tableau 4.2 : *Distribution Du taux d'inactivation (log I₀/I) en fonction de la dose (j/m²) reçue par les microorganismes de [780 à 1480] w/m² respectivement. Pour la configuration optimale à 36°.*

Vitesse m/s	Intensité w/m ²	Temps de séjour (s)	Dose j/m ²	log inactivation
0,3	780	7,53	106,6	0,63
0,3	896	7,53	115,3	0,67
0,3	1012	7,53	123,96	0,72
0,3	1128	7,53	132,62	0,77
0,3	1244	7,53	141,28	0,81
0,3	1480	7,53	158,89	0,91
0,2	780	11,3	159,96	0,91
0,2	896	11,3	172,95	0,98
0,2	1012	11,3	185,94	1,05
0,2	1128	11,3	198,93	1,12
0,2	1244	11,3	211,92	1,18
0,2	1480	11,3	238,35	1,31
0,1	780	22,6	319,94	2,01
0,1	896	22,6	345,92	2,17
0,1	1012	22,6	371,9	2,34
0,1	1128	22,6	397,87	2,51
0,1	1244	22,6	423,85	2,69
0,1	1480	22,6	476,71	3,04
0,07	780	32,3	457,06	2,29

CHAPITRE IV : DISCUSSION ET INTERPRETATION

0,07	896	32,3	494,18	2,43
0,07	1012	32,3	531,29	2,58
0,07	1128	32,3	586,4	2,72
0,07	1244	32,3	605,52	2,85
0,07	1480	32,3	681,02	3,11

Les pourcentages optimaux correspondent par rapport à chaque dose pour chaque taux d'inactivation :

Intensité (W/m ²)	Vitesse (m/s)	Dose (j/m ²)	Log inactivation	Pourcentage (%)
1480	0.3	158.89	0.91	90
	0.2	238.35	1.31	90
	0.1	476.71	3.04	99.9
	0.07	681.02	3.11	99.9

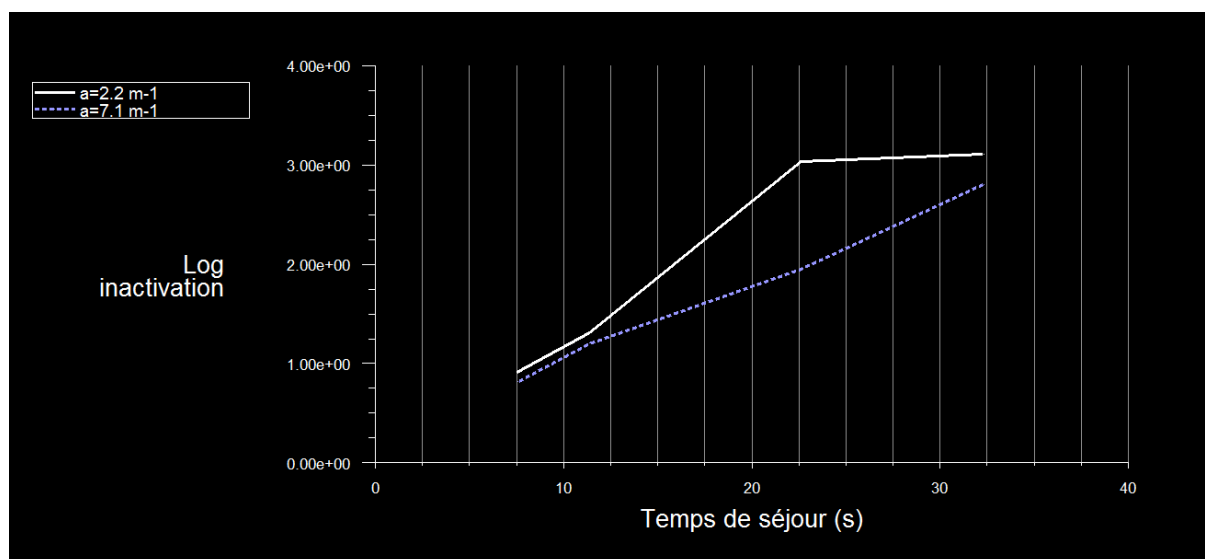


Figure 4.12 : *Distribution du temps de séjour en fonction de l'inactivation ($\log I_0/I$) des microorganismes à 1480 W/m² pour la configuration optimale.*

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que le temps de séjour influe positivement sur le rendement de désinfection du réacteur. En effet, lorsque nous augmentons le temps de séjour dans le réacteur nous garantissons un meilleur contact entre les

CHAPITRE IV : DISCUSSION ET INTERPRETATION

=====

microorganismes et les rayonnements traversant le réacteur ce qui permet d'atteindre la dose
d'inactivation requise.

CONCLUSION GENERAL

Dans cette étude nous avons simulé un photo-réacteur tubulaire de désinfection de l'eau par le code de calcul Fluent. Le but de ce mémoire était d'appliquer la CFD, "Computational Fluid Dynamic", à un procédé de traitement des eaux : simple, non coûteux, et utilisant une source d'énergie renouvelable et inépuisable.

La simulation de l'hydrodynamique a été effectuée en régime d'écoulement turbulent. Le modèle de fermeture utilisé est le k- ϵ .

L'équation de transfert radiatif a été résolue par la méthode des ordonnées discrètes. La cinétique de désinfection a été couplée à la distribution du rayonnement afin d'étudier l'efficacité du réacteur en adoptant l'approche eulérienne.

Nous avons démontré que la distribution de la dose reçue n'est pas homogène au sein du réacteur et elle est fortement influencée par l'angle d'inclinaison du réacteur ainsi que par l'intensité du rayonnement solaire. Les valeurs maximales ont été enregistrées pour la configuration inclinée.

Suite au couplage de la cinétique d'inactivation des microorganismes à la distribution du rayonnement et à l'hydrodynamique, nous avons pu calculer le rendement de la désinfection et démontrer ainsi l'efficacité de ce procédé pour traiter les eaux chargées de microorganismes pathogènes en utilisant le rayonnement solaire.

L'influence du temps de séjour sur le taux d'inactivation a été également étudiée. Les résultats obtenus montrent que les doses élevées recommandent des temps de séjour élevés.

Références bibliographiques

- [1] Water Environment Federation, “Wastewater disinfection”, Manual of practice FD10,1996.
- [2] 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.
- [3] USEPA. “Design Manual: Municipal Wastewater Disinfection”, Cincinnati, Ohio, 1986.
- [4] AWWA, « Alternative disinfection technologies for small drinking water systems »,1990.
- [5] USEPA, “Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule”, 2006.
- [6] Numerical simulation of an open channel ultraviolet wastewater disinfection reactor, Rajib Kumar Saha, thesis, 2013.
- [7] Modelling of UV disinfection reactors by means of Computational Fluid Dynamics, TU Wien, 2006.
- [8] Masselot M., <http://www.edu.up.mc.fr>
- [9] A. Acra, Y. Karahagopian, Z. Raffoul, R. Dajani, Disinfection of oral rehydration solutions by sunlight, The Lancet 316 (1980) 1257-1258.
- [10] A. Acra, M. Jurdi, H. Mu, Y. Karahagopian, Z. Raffoul, Water disinfection by solar radiation:Assessment and Application, International Development Research Centre 53 (1990) 65.
- [11] T.M. Joyce, K.G. Mcguigan, M. Elmore-Meegan, R.M. Conroy, Inactivation of fecal bacteria in drinking water by solar energy, Applied and Environmental Microbiology 62 (1996) 399–402.
- [12] K.G. McGuigan, T.M. Joyce, R.M. Conroy, J.B. Gillespie, M. Elmore-Meegan, Solar disinfection of drinking water contained in transparent plastic bottles: characterizing the bacterial inactivation process, Journal of Applied Microbiology 84 (1998) 1138- 1148.

- [13] S.C. Kehoe, T.M. Joyce, P. Ibrahim, J.B. Gillespie, R.A. Shahar, K.G. McGuigan, Effect of agitation, turbidity, aluminium foil reflectors and volume on inactivation efficiency of batch-process solar disinfectors., *Water Research* 35 (2001) 1061- 1065.
- [14] R.H. Reed, Solar inactivation of faecal bacteria in water the critical role of oxygen, *Letters in Applied Microbiology* 24 (1997) 276-280.
- [15] <http://www.sodis.ch>.
- [16] S. Gelover, L.A. Gómez, K. Reyes, M. Teresa Leal, A practical demonstration of water disinfection using TiO₂ films and sunlight, *Water Research* 40 (2006) 3274- 3280.
- [17] Katadyn France SA, BP 39, 77680 Roissy -en-Brie, France.
- [18] A.-G. Rincón, C. Pulgarin, Fe³⁺ and TiO₂ solar-light-assisted inactivation of E. coli at field scale: Implications in solar disinfection at low temperature of large quantities of water, *Catalysis today* 122 (2007) 128-136.
- [19] S.C. Kehoe, T.M. Joyce, P. Ibrahim, J.B. Gillespie, R.A. Shahar, K.G. McGuigan, Effect of agitation, turbidity, aluminium foil reflectors and container volume on the inactivation efficiency of batch-process solar disinfectors, *Water Research* 35 (2001) 1061-1065.
- [20] US EPA, “Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule” (2006).
- [21] Mignot V. , <http://www.u-picardie.fr> .
- [22] Bolton James R., “ Calculation of ultraviolet fluence rate distributions in an annular reactor: significance of refraction and reflection ”, *Water Research*, Vol. 34, No. 13, 3315 - 3324 (2000).
- [23] USEPA “Wastewater Technology Fact Sheet Ultraviolet Disinfection”, septembre 1999.
- [24] Yang Q., Ang P.L., Ray M. B., Pehkonen S.O., “Light distribution field in catalyst suspensions within an annular photoreactor”, *Chemical Engineering Science* 60, 5255–5268 (2005).

- [25] Dykstra Trevor S., Chauret Christian, Gagnon Graham A., "Hydraulic Calibration and Fluence Determination of Model Ultraviolet Disinfection System", *Journal of Environmental Engineering*, 1046-1055 (2002).
- [26] Linden K.G. and A.A. Mofidi., "Measurement of UV irradiance: tools and considerations Proceedings", *Water Quality Technology Conference, AWWA, Tampa Bay, FL.1-3* (1999).
- [27] Wastewater disinfection using UVA, UVC and solar radiations, Sadek Igoud, Fatiha Souahi, Chems Eddine Chitour, Lynda Amrouche, Chahinez Lamaa, Nadia Chekir, Amar Chouikh, 4^{ème} Conference on Desalination and Water Treatment, Tunisia, 2013.
- [28] Some aspects of photocatalytic reactor modeling using computational fluid dynamics, Yash Boyjoo, Ming Ang, Vishnu Pareek, *Chemical Engineering Science*, 2012.
- [29] 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.
- [30] *Fluent Guid*
- [31] A numerical prediction on the reduction of microorganisms with UV disinfection, Chan Li, Baoqing Deng and Chang Nyung Kim, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010.