

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



UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA



INSTITUT  
D'AERONAUTIQUE  
ET DES ETUDES  
SPATIALES

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*Pour l'obtention du diplôme Master en Aéronautique*

Option : structure d'avion

THEME :

*Ecoulement autour de deux sphères  
combustibles à deux configurations de  
dispositions, en ligne et en quinconce*

Présenté par:

-AMRI oussama tayeb

Encadré par:

Dr. SIDI ALI Kamel

BLIDA : Septembre 2020

# Remerciements

Ce travail est l'aboutissement d'un dur labeur et de beaucoup de sacrifices ; nos remerciements vont d'abord au créateur de l'univers qui nous a doté d'intelligence, et nous a maintenu en santé pour mener à bien cette année d'étude.

Ma profonde gratitude pour la directrice d'institut d'aéronautique et des études spatiales **M<sup>me</sup> Benkhedda** et l'ensemble des enseignants pour leur encouragement et leurs précieux conseils.

Je tiens à exprimer mes profondes reconnaissances et adresser mes sincères remerciements les plus vifs à **Dr Sidi Ali Kamel** pour son encadrement, son orientation, ses conseils et la disponibilité qu'il m'a témoigné pour me permettre de mener à bien ce travail.

J'offre de sincères et chaleureux remerciements à **Dr Renane** et à **Dr allouche** pour leurs soutiens, leurs confiances qu'ils m'ont accordées et leurs attentions exceptionnelles.

Enfin, je remercie vivement les membres du jury pour le soutien et l'intérêt qu'ils ont portés à ce travail.

# Dédicace

Je rends un grand hommage à travers ce modeste travail, en signe de respect et de reconnaissance à ma chère mère **Boumoud Nora** et à mon père **Amri Kamel** pour leurs sacrifices, leurs encouragements et leurs soutiens tout au long de mon cursus.

Je n'oublierai jamais mes chères deux sœurs **Soumia** et **Assia** ainsi que mon cher ami **Boutebal Djamal** et ma belle amie **khareb meriem souha** qui était toujours présent pour m'aider.

Je le dédie également à mes proches, tous mes amis et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

## Résumé

Une simulation va être réalisée sur deux sphères combustibles au graphite du réacteur du type HTR-PM (High Temperature gas-cooled Reactor -Pebble bed Modular). On s'intéresse au refroidissement de ces deux sphères combustibles par l'écoulement d'un gaz (l'hélium) pour des configurations en ligne (à 0° et 90°) et en quinconce (à 45° et -45°). On va faire une deuxième étude où on va effectuer des configurations en quinconce supplémentaires intermédiaires entre 0° et 90° pour voir ses effets sur le transfert de chaleur.

Mots clé : CFD, deux sphères combustibles, configuration, HTR-PM, transfert de chaleur

## Abstract

A simulation will be carried out on two graphite fuel spheres of the HTR-PM type reactor (High Temperature gas-cooled Reactor-Pebble bed Modular). We are interested in the cooling of these two combustible spheres by the flow of a gas (helium) for in-line (0 ° and 90 °) and staggered (45 ° and -45 °) configurations. We will do a second study where we will perform additional staggered configurations intermediate between 0 ° and 90 ° to see its effects on heat transfer.

Keywords: CFD, two fuel spheres, configuration, HTR-PM, heat transfer

## ملخص

سيتم إجراء محاكاة على اثنتين من كريات HTR-PM (مفاعل ذو درجة حرارة عالية مبرد بالغاز - طبقة حصى) نحن مهتمون بتبريد هاتين الكرتين القابلتين للاشتعال عن طريق تدفق غاز (الهليوم) من وقود الجرافيت لمفاعل من النوع أجل تكوينات خطية (0 درجة و 90 درجة) ومتداخلة (45 درجة و -45 درجة). سنقوم بدراسة ثانية حيث سنقوم بإجراء تكوينات إضافية متداخلة وسيطة بين 0 درجة و 90 درجة لمعرفة تأثيرها على نقل الحرارة.

الكلمات المفتاحية : CFD, كرتان للوقود, التكوين, HTR-PM, نقل الحرارة.

Remerciement.....	.....
Dédicace .....	.....
Résumé .....	.....
Table des matières .....	.....
Listes des figures .....	.....
Liste des tableaux .....	.....
Introduction générale.....	.....
Recherche bibliographique.....	.....

## *Table des matières*

<b>Chapitre I Généralités sur les réacteurs nucléaires et les combustibles nucléaires.....</b>	<b>1</b>
I . 1. Introduction .....	1
I . 2. Fission nucléaire.....	1
I . 2.1 Définition .....	1
I . 2.2 Réaction en chaîne .....	2
I . 3. Les principales filières des réacteurs nucléaires .....	2

I . 3.1 Le caloporteur.....	2
I . 3.2 Le modérateur.....	2
I . 3.3 Le combustible .....	2
I . 3.3 Filière des réacteurs nucléaires à eau légère .....	3
I . 3.4.1 Réacteurs à eau pressurisée ( Pressurized Water Reactor ) PWR .....	3
I . 3.4.2 Réacteur à eau bouillante ( Boiling Water Reactor ) RWB .....	4
I . 3.5 Réacteurs à eau lourde (Heavy Water Reactor) HWR.....	6
I . 3.6 Filière des réacteurs nucléaires à haute température .....	7
I . 3.6.1 Réacteurs refroidis à gaz à hautes températures (High-TemperatureGas-CooledReactors) HTGR .....	7
I . 3.6.2 Réacteur modulaire à lit de sphère (Pebble Bed Modular Reactor ) PBMR .....	8
I . 3.6.3 HTR-PM (High Temperature gas-cooled Reactor Pebble-bed Module).....	9
I . 4. Les types de combustibles nucléaires .....	12
I . 4.1 Combustibles à plaque .....	12
I . 4.2 Combustibles cylindriques .....	13
I . 4.3 Combustibles sphériques .....	14
I . 4.3 Recherche Bibliographique .....	15
I . 5. Conclusion .....	21
<b>Chapitre II Description du problème physique et modélisation mathématique.....</b>	<b>16</b>
II . 1. Introduction .....	22

II .2. Description des écoulements .....	23
II .2.1 Configuration en ligne.....	23
II .2.2 Configuration en quinconce .....	25
II . 3. Mise en équations du problème .....	25
II .3.1 mise en équation en coordonnées cartésiennes.....	25
II .3.1.1 Équation de conservation de la masse .....	25
II .3.1.2 Equation de conservation de la quantité de mouvement .....	25
II .3.1.3 Equation de conservation de l'énergie .....	25
II .3.1.4 Equation d'état.....	27
II .3.2 Passage en coordonnées sphériques .....	27
II .3.2.1 Relation entre les cordonnées sphériques et cartésiennes .....	28
II .3.2.2 Equation de conservation de la masse .....	29
II .3.2.3 Equation de quantité de mouvement .....	29
II .3.2.4 Equation de conservation de l'énergie.....	30
II .4. Les conditions aux limites .....	31
II .5. Modèles de turbulence .....	31
II .5.1. Famille RANS (Reynolds-averaged Navier-stokes) .....	31
II .5.1.1 Modèle k- $\epsilon$ .....	32
II .5.1.2 Modèle k- $\omega$ SST .....	33
II .6. Transfert thermique .....	35
II .6.1. Définition.....	35
II .6.2 Les différents modes de transmission de la chaleur.....	35
II .6.2.1 Conduction .....	35
II .6.2.2 Convection .....	36
II .6.2.3 Rayonnement .....	36

II .7. Conclusion .....	36
-------------------------	----

**Chapitre III Maillage et présentation du code de calcul..... 37**

III .1. Introduction.....	38
---------------------------	----

III .2. Le logiciel ANSYS WORKBENCH.....	38
--	----

III .3. Création des géométries .....	39
---------------------------------------	----

III .4. Nomination des surfaces .....	40
---------------------------------------	----

III 5. Maillage.....	41
----------------------	----

III .5.1. Génération de maillage .....	41
--	----

III .5.1.1 Option d'inflation .....	42
-------------------------------------	----

III .5.1.1.1 Rapport de transition (transition ratio) .....	42
---	----

III .5.1.1.2 Couches maximum (Maximum layers) .....	43
---	----

III .5.1.1.3 Taux de croissance (growth rate) .....	43
---	----

III .5.1.2. Algorithme de conformité de patch pour le contrôle de la méthode des tétraèdres (patch conforming algorithm for tetrahedrons method control).....	44
--	----

III .5.1.3 Contrôle du maillage du visage (Face meshing control).....	44
---	----

III .5.2. Critères de qualité de maillage.....	45
--	----

III .5.2.1 Qualité des éléments (element quality).....	46
--	----

III .5.2.2 Rapport Jacobien .....	46
-----------------------------------	----

III .5.2.3 Asymétrie (skewness) .....	47
---------------------------------------	----

III .5.2.4 Qualité orthogonale (orthogonal quality) .....	48
---	----

III .6. Le solver : application avec le code Fluent .....	49
---	----

III .6.1. Présentation du code Fluent .....	49
---	----



III.6.2. La méthode des volumes finis.....	50
III.6.3. Conditions aux limites .....	50
III.6.4. Choix des critères de convergence .....	51
III.6.5. Initialisation des calculs.....	51
III.7. Conclusion .....	52

## **Chapitre IV Résultats des simulations et interprétations.....** 53

IV.1. Introduction.....	54
IV.2. Résultats des simulations d'écoulement de gaz autour des deux sphères.....	54
IV.2.1 Configuration en ligne.....	54
IV.2.1.1 Configuration en ligne à 0° .....	54
IV.2.1.1.1 Analyse des résultats obtenus pour chaque sphère (cas 0°) .....	54
IV.2.1.1.2 Analyse des résultats obtenus pour chaque demi-section (cas 0°).....	58
IV.2.1.2 Configuration en ligne à 90° .....	61
IV.2.1.2.1 Analyse des résultats obtenus pour chaque sphère (cas 90°) .....	61
IV.2.1.2.2 Analyse des résultats obtenus pour chaque demi-section (cas 90°) .....	65
IV.2.2 Configuration en quinconce .....	68
IV.2.2.1 Configuration en quinconce à 45° .....	68
IV.2.2.1.1 Analyse des résultats obtenus pour chaque sphère (cas 45°) .....	68
IV.2.2.1.2 Analyse des résultats obtenus pour chaque demi-section (cas 45°).....	73

IV.2.2.2 Configuration en quinconce à $-45^\circ$ .....	77
IV.2.2.2.1 Analyse des résultats obtenus pour chaque sphère (cas $-45^\circ$ ) .....	77
IV.2.2.2.2 Analyse des résultats obtenus pour chaque demi-section (cas $-45^\circ$ ).....	79
IV.3. Etude de sensibilité de maillage .....	81
IV.4. Conclusion.....	82
<b>Chapitre V Etude d'optimisation</b> .....	<b>83</b>
V.1. Introduction .....	84
V.2. Résultats des simulations pour certains angles intermédiaires entre $0^\circ$ et $90^\circ$ .....	84
V.2.1 Configuration en quinconce .....	84
V.2.2.1 Configuration en quinconce à $15^\circ$ .....	84
V.2.2.1.1 Analyse des résultats obtenus pour chaque sphère (cas $15^\circ$ ) .....	85
V.2.2.1.2 Analyse des résultats obtenus pour chaque demi-section (cas $15^\circ$ ) .....	89
V.2.2.2 Configuration en quinconce à $30^\circ$ .....	93
V.2.2.2.1 Analyse des résultats obtenus pour chaque sphère (cas $30^\circ$ ) .....	93
V.2.2.2.2 Analyse des résultats obtenus pour chaque demi-section (cas $30^\circ$ ) .....	97
V.2.2.3 Configuration en quinconce à $60^\circ$ .....	101
V.2.2.3.1 Analyse des résultats obtenus pour chaque sphère (cas $60^\circ$ ) .....	101
V.2.2.3.2 Analyse des résultats obtenus pour chaque demi-section (cas $60^\circ$ ) .....	105
V.2.2.4 Configuration en quinconce à $75^\circ$ .....	109
V.2.2.4.1 Analyse des résultats obtenus pour chaque sphère (cas $75^\circ$ ) .....	109
V.2.2.4.2 Analyse des résultats obtenus pour chaque demi-section (cas $75^\circ$ ) : .....	113

V.3. Résultats du transfert thermique des simulations de toutes les configurations .....	117
V.4. Conclusion .....	118
Conclusion générale .....	119
Références.....	120
Annexe A .....	123
Annexe B .....	127

## *Liste des figures*

Figure 1-1 Exemple de fission .....	1
Figure 1-2 Représentation schématique du fonctionnement d'un réacteur nucléaire à eau pressurisée .....	4
Figure 1-3 schéma du principe de fonctionnement globale d'un réacteur à eau bouillante .....	5
Figure 1-4 Schéma du principe de fonctionnement d'un réacteur à eau lourde .....	7
Figure 1-5 Schéma du réacteur VHTR (Very High Temperature Reactor) .....	8
Figure 1-6 Schéma d'une unité de PBMR .....	10
Figure 1-7 Système primaire du HTR-PM .....	11
Figure 1-8 principe du procédé de fabrication de plaques combustibles par colaminage .....	13
Figure 1-9 Préparation du combustible .....	14
Figure 1-10 Particule TRISO et ses différentes couches .....	15
Figure 2-1 les sphères combustibles en ligne à 90° dans le tunnel rectangulaire .....	24
Figure 2-2 les sphères combustibles en ligne à 0° dans le tunnel rectangulaire.....	24
Figure 2-3 la configuration en 45° .....	25
Figure 2-4 Le système des coordonnées sphériques et cartésiennes.....	27

Figure 3-1 Création de la simulation sous workbench .....	39
Figure 3-2 Vu de face de la configuration en ligne à 0° .....	40
Figure 3-3 Vu de face de la configuration en ligne à 90° .....	40
Figure 3-4 Vu de face de la configuration en quinconce à 45° .....	40
Figure 3-5 Nombre maximum des couches (4) .....	43
Figure 3-6 Le contrôle du taux de croissance .....	44
Figure 3-7 Vue de face montrant le contrôle de maillage de visage .....	45
Figure 3-8 Triangles idéaux et obliques et Quadrilatères .....	47
Figure 3-9 Vecteurs utilisés pour calculer la qualité orthogonale d'une cellule .....	48
Figure 3-10 Critère de qualité orthogonale .....	49
Figure 3-11 Etape de l'initialisation .....	52
Figure 4-1 le champ de vitesse autour des deux sphères combustibles en ligne à 0° .....	54
Figure 4-2 Evolution de la pression totale de disposition en ligne à 0° .....	55
Figure 4-3 Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en ligne à 0° .....	56
Figure 4-4 Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en ligne à 0° .....	57
Figure 4-5 Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en ligne à 0° ....	58
Figure 4-6 Evolution de la pression totale de disposition en ligne à 0° par section .....	58
Figure 4-7 Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en ligne à 0° par section .....	59
Figure 4-8 Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en ligne à 0° par section .....	60
Figure 4-9 Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en ligne à 0° par section.....	61
Figure 4-10 Le champ de vitesse autour des deux sphères combustibles en ligne à 90° .....	61
Figure 4-11 Evolution de la pression totale de disposition en ligne à 90° .....	62

Figure 4-12 Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en ligne à 90° .....	63
Figure 4-13 Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en ligne à 90° .....	64
Figure 4-14 Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en ligne à 90° .....	65
Figure 4-15 Evolution de la pression totale de disposition en ligne à 90° par section .....	65
Figure 4-16 Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en ligne à 90° par section .....	66
Figure 4-17 Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en ligne à 90° par section ....	67
Figure 4-18 Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en ligne à 90° par section .....	68
Figure 4-19 Le champ de vitesse autour des deux sphères combustibles de disposition en quinconce à 45° .....	68
Figure 4-20 Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à 45° .....	69
Figure 4-21 Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à 45° ....	70
Figure 4-22 Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à 45° .....	71
Figure 4-23 Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à 45° .....	73
Figure 4-24 Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à 45° Par section ....	73
Figure 4-25 Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à 45° par section .....	74
Figure 4-26 Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à 45° par section .....	75
Figure 4-27 Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à 45° par section.....	76
Figure 4-28 Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à -45° .....	77
Figure 4-29 Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à -45° .....	77
Figure 4-30 Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à -45° ...	78

Figure 4-31 Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à $-45^\circ$ .....	78
Figure 4-32 Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à $-45^\circ$ .....	79
Figure 4-33 Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à $45^\circ$ par section .....	79
Figure 4-34 Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à $-45^\circ$ par section .....	80
Figure 4-35 Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à $-45^\circ$ par section .....	80
Figure 4-36 Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à $-45^\circ$ par section .....	81
Figure 4-37 Evolution de la contrainte de cisaillement par nombre des éléments .....	82
Figure 5-1 Le champ de vitesse autour des deux sphères combustibles de disposition en $15^\circ$	85
Figure 5-2 Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à $15^\circ$ .....	85
Figure 5-3 Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à $15^\circ$ .....	86
Figure 5-4 Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à $15^\circ$ .....	87
Figure 5-5 Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à $15^\circ$ .....	89
Figure 5-6 Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à $15^\circ$ par section .....	89
Figure 5-7 Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à $15^\circ$ par section .....	90
Figure 5-8 Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à $15^\circ$ par section .....	91
Figure 5-9 Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à $15^\circ$ par section .....	92
Figure 5-10 Le champ de vitesse autour des deux sphères combustibles de disposition en $30^\circ$ .....	93
Figure 5-11 Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à $30^\circ$ .....	93
Figure 5-12 Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à $30^\circ$ ....	94

Figure 5-13 Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à 30° .....	95
Figure 5-14 Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à 30° .....	97
Figure 5-15 Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à 30° par section ....	97
Figure 5-16 Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à 30° par section .....	98
Figure 5-17 Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à 30° par section .....	99
Figure 5-18 Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à 30° par section .....	100
Figure 5-19 Le champ de vitesse autour des deux sphères combustibles de disposition en 60° .....	101
Figure 5-20 Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à 60° .....	101
Figure 5-21 Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à 60° ..	102
Figure 5-22 Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à 60° .....	103
Figure 5-23 Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à 60° .....	105
Figure 5-24 Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à 60° par section ..	105
Figure 5-25 Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à 60° par section .....	106
Figure 5-26 Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à 60° par section .....	107
Figure 5-27 Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à 60° par section.....	108
Figure 5-28 Le champ de vitesse autour des deux sphères combustibles de disposition en 75° .....	109
Figure 5-29 Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à 75° .....	109

Figure 5-30 Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à 75° ...	110
Figure 5-31 Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à 75° .....	111
Figure 5-32 Evolution du coefficient de convection surfacique pour l'angle de 75° .....	113
Figure 5-33 Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à 75° par section ..	113
Figure 5-34 Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à 75° par section .....	114
Figure 5-35 Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à 75° par section .....	115
Figure 5-36 Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à 75° par section .....	116



## *Liste des tableaux*

Tableau 1-1 Types des réacteurs nucléaires dans le monde .....	3
Tableau 2-1 Données géométriques du tunnel et des deux sphères combustibles .....	23
Tableau 2-2 Les modèles de turbulence dans RANS.....	31
Tableau 2-3 valeurs des constantes du modèle k- $\epsilon$ .....	33
Tableau 3-1 Nature des surfaces.....	41
Tableau 3-2 Paramètre du maillage.....	41
Tableau 3-3 Détails d'inflation.....	42
Tableau 3-4 Valeur d'asymétrie et la qualité de cellule correspondante.....	48
Tableau 3-5 Propriétés de gaz et de graphite avec les conditions aux limites .....	50
Tableau 3-6 Conditions aux limites.....	51
Tableau 3-7 Critères d'arrêt .....	51
Tableau 5-1 Transfert de chaleur de tous les cas simulés .....	117

# Nomenclature

## • Lettres latines

$A$	surface perpendiculaire au flux thermique	$[m^2]$
$C_\mu$	Constante (0.09)	$[-]$
$e$	Enthalpie	$[kj/mol]$
$g$	Gravité	$[m.s^{-2}]$
$M$	Masse	$[kg]$
$n$	Nombre de particules	$[-]$
$P$	Pression	$[Pa]$
$R$	Constante ()	$[-]$
$Re$	Nombre de Reynolds	$[-]$
$T$	Température	$[K]$
$t$	Temps	$[s]$
$T_0$	Température de l'entrée	$[K]$
$\vec{V}$	Vecteur vitesse	$[m.s^{-1}]$
$V_0$	Vitesse de l'entrée	$[m.s^{-1}]$
$v_i$	La composante de vitesse dans la direction correspondante	$[m.s^{-1}]$

## • Lettres grecs

$\rho$	Masse volumique	$[kg.m^{-3}]$
$\theta$	Composante angulaire	$[^\circ]$
$\varphi$	Composante angulaire	$[^\circ]$
$\mu$	Viscosité dynamique	$[Pa.s]$
$\delta$	Epaisseur de la couche limite thermique ou massique	$[m]$
$E_{ij}$	La composante de vitesse de déformation	$[m.s^{-1}]$

# Introduction générale

Les réacteurs nucléaires utilisés dans la production d'énergie continuent de s'implanter un peu partout dans le monde. Après les réacteurs de 2<sup>ème</sup> génération, ceux de la génération 3 sont encore plus fiables, plus sûres et plus performants. Parmi les réacteurs nucléaires à haute température les plus-en vue, c'est les HTR-PM (High Temperature Reactor-Pebble Modular). Ces réacteurs nucléaires offrent des conditions de sûreté élevées et travaillent selon un cycle thermodynamique à températures très élevées. Ce type de réacteurs nucléaires utilise des sphères combustibles dont la disposition dans le cœur peut avoir un effet d'amélioration ou de dégradation des performances de refroidissement.

Ce travail traite du refroidissement de deux sphères dont la disposition est similaire à celle physiquement constatée dans un HTR-PM. L'objectif de ce travail est de savoir le comportement de certains paramètres physiques pour certaines configurations de dispositions de sphères qui pourraient améliorer les performances de refroidissement et trouver quelle est la meilleure configuration à adopter.

Pour réaliser cette étude, les CFD (Computational Fluid Dynamics) ont été utilisés au travers d'un code de calcul qui résout les équations de conservation selon un maillage établi pour chaque configuration dans les trois dimensions de l'espace.

Le premier chapitre est destiné aux généralités sur les réacteurs nucléaires comme son nom l'indique. On commence par la définition du principe de la fission nucléaire qui maintient la régénération de l'énergie au sein du réacteur nucléaire, ensuite, une description des différents types de réacteurs nucléaires et des différents types de combustibles nucléaires convenables a été effectué on se basant sur le réacteur nucléaire du type HTR-PM et son combustible sphérique.

Dans le deuxième chapitre, on a présenté les géométries du notre problème avec une modélisation mathématique de base des écoulements de fluides généralement et spécifiquement l'écoulement de l'hélium gaz autour des deux sphères en coordonnées cartésiennes et sphériques. Les conditions aux limites ont été mentionnées et les modèles de turbulences ont

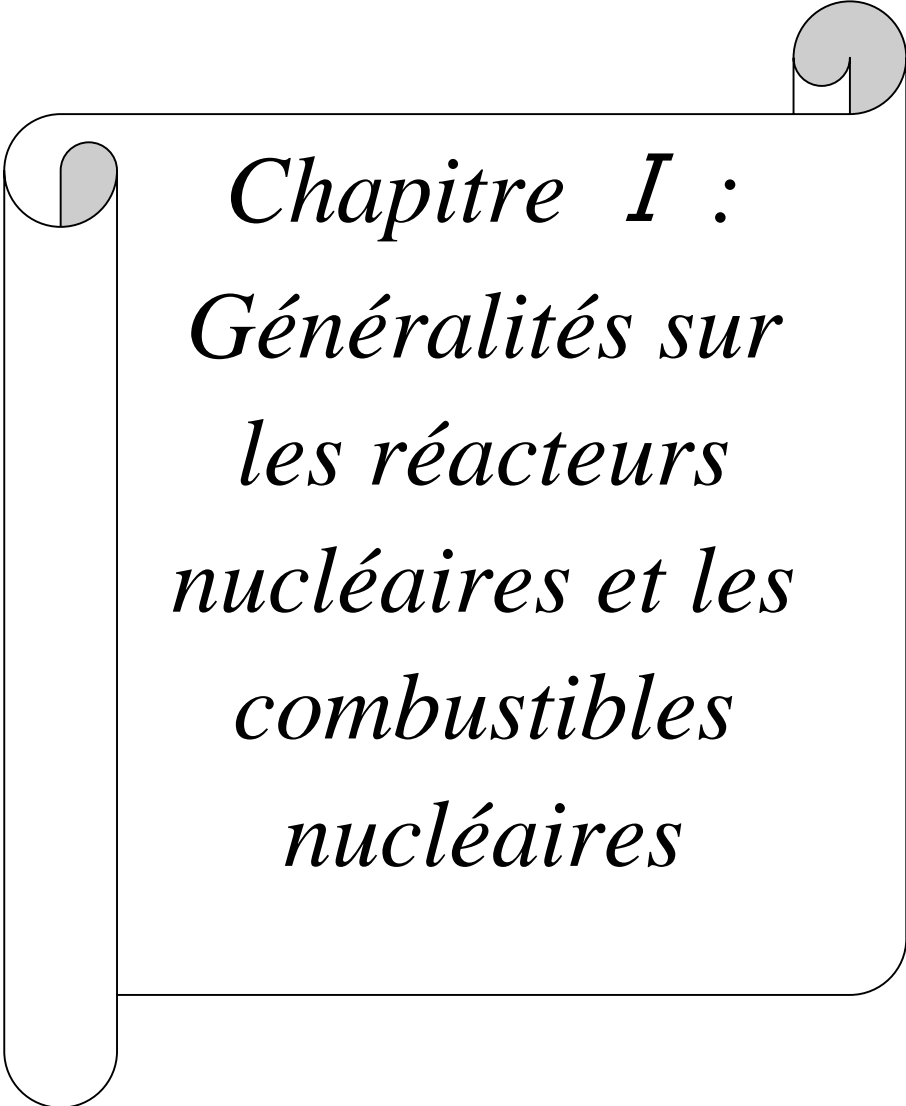
été définis en précisant le modèle qui sera utilisé par la suite dans la simulation avec une simple définition du transfert thermique et ses modes de transmission.

Dans le troisième chapitre, on a effectué la conversion de la modélisation mathématique en modélisation numérique où on a montré les différentes étapes de cette dernière en commençant par la création des géométries avant de générer le maillage qui sera évalué par la suite selon des critères de qualité pour l'initialisation correcte des calculs.

Le quatrième chapitre est dédié à la discussion des résultats des simulations numériques réalisé par le code de calcul FLUENT qui concerne l'écoulement de gaz autour de deux sphères combustibles à deux configuration ; en ligne à  $0^\circ$  et  $90^\circ$  et en quinconce à  $45^\circ$  et  $-45^\circ$ . L'évolution des quatre quantités est discutée pour un nombre de Reynolds fixe de 3000.

Le dernier chapitre est enrichi par une deuxième série des simulations numériques. Les résultats sont discutés pour les mêmes quantités physiques pour la configuration en quinconce à  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $75^\circ$ , le transfert thermique est aussi évalué pour chaque configuration. L'objectif étant de trouver la configuration la plus performante d'un point de vue transfert de chaleur.

Une conclusion générale est introduite en fin de travail pour montrer les différents résultats obtenus, les commenter et donner un avis final fin l'ensemble de ce travail.



*Chapitre I :  
Généralités sur  
les réacteurs  
nucléaires et les  
combustibles  
nucléaires*

### 1. Introduction :

Le réacteur nucléaire est un système énergétique qui peut être utilisé dans des domaines divers comme la production de l'électricité et les recherches scientifiques. Il permet de collecter et transformer les grandes quantités d'énergie on se basant sur le principe de la fission nucléaire qui sera définie par la suite et permet de la contrôler .Les différents types de réacteurs dans le monde sont regroupés selon le combustible où a lieu la fission, le modérateur et le fluide caloporteur qu'ils utilisent.

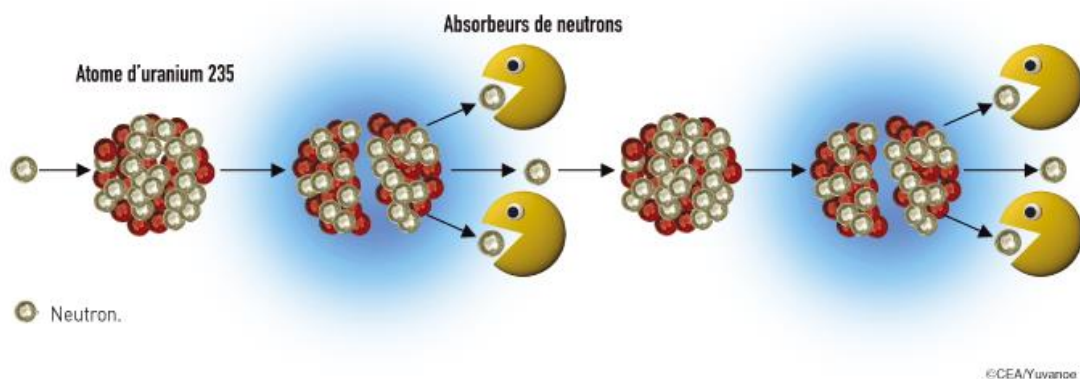
Dans ce chapitre, nous allons expliquer les mécanismes de la fission nucléaire. Nous allons aussi préciser les différents types des réacteurs nucléaires et les différents types des combustibles utilisés.

### 2. Fission nucléaire :

#### 2.1. Définition :

La fission nucléaire est la cassure ou la fragmentation d'un noyau lourd instable dit "fissile" en deux noyaux plus légers.

Cette réaction nucléaire se produit exceptionnellement de manière spontanée, le plus souvent elle est provoquée par l'introduction d'un projectile bien choisi dans le noyau fissile, ce projectile est le neutron. [12]



**Figure (1-1) :** Exemple de fission

### 2.2. Réaction en chaîne :

S'accompagnant d'un grand dégagement d'énergie, la réaction de fission libère aussi deux ou trois neutrons. Ces derniers peuvent rentrer à leur tour en collision avec d'autres atomes lourds et donne naissance alors à de nouveaux neutrons .... C'est la réaction en chaîne.

Dans un réacteur la propagation des fissions se fait d'une manière contrôlée, C'est-à-dire que sur les deux ou trois neutrons libérés lors d'une fission, seul l'un d'entre eux en provoque une nouvelle, les autres étant capturés par les barres de commande, comme montre la figure (1-1). [12]

## 3. Les principales filières de réacteurs nucléaires :

Plusieurs technologies permettent de transformer l'énergie issue de la réaction de fission en électricité. On les caractérise par famille ou filière en fonction des composants principaux : caloporteur, modérateur et combustible. [11]

### 3.1. Le caloporteur :

Un caloporteur est un fluide qui par ses propriétés physiques permet de transporter de la chaleur d'un point à un autre. L'énergie libérée sous forme de chaleur lors de la fission des noyaux de combustibles doit être récupérée. Ce rôle est assuré par le caloporteur qui va donc prendre la chaleur du combustible pour la transporter hors du cœur du réacteur et maintenir la température de celui-ci à une valeur compatible avec la tenue de ses matériaux. [12]

### 3.2. Le modérateur :

Dans un réacteur nucléaire, le modérateur sert à ralentir la vitesse des neutrons libérés lors de la fission qui sont trop énergétiques sans les absorber. Il faut donc les ralentir d'une vitesse de 20000 km/s jusqu'à une vitesse de l'ordre de 2 km/s. Les neutrons lents ont en effet une probabilité beaucoup plus élevée de déclencher la fission d'un autre noyau. [12]

### 3.3. Le combustible :

Le combustible nucléaire est le produit qui contenant des matières fissiles (uranium, plutonium...), fournit l'énergie dans le cœur d'un réacteur nucléaire en entretenant la réaction

nucléaire en chaîne de fission nucléaire. Les principaux atomes fissiles sont l'uranium 233, l'uranium 235, le plutonium 239 et le plutonium 241. [12]

### 3.4. Filière des réacteurs nucléaires à eau légère :

**Tableau (1-1) :** Types des réacteurs nucléaires dans le monde

Types de réacteurs nucléaires de puissance dans le monde				
Type de réacteur	Combustible	Modérateur	Caloporteur	Nombre
Réacteur à eau sous pression (REP)	UO <sub>2</sub> enrichi	Eau ordinaire	Eau ordinaire	292
Réacteur à eau bouillante (REB)	UO <sub>2</sub> enrichi	Eau ordinaire	Eau ordinaire	75
Réacteur à eau lourde sous pression (RELPS)	UO <sub>2</sub> naturel	Eau lourde	Eau lourde	49
Réacteur refroidi par gaz	U naturel et UO <sub>2</sub> enrichi	Graphite	Dioxyde de carbone	14

#### 3.4.1. Réacteurs à eau pressurisée (Pressurized Water Reactor) PWR :

La filière des réacteurs à eau sous pression est la plus répandue dans le monde. Les REP constituent l'essentiel du parc actuel: 69% au niveau mondial et 80% en Europe.

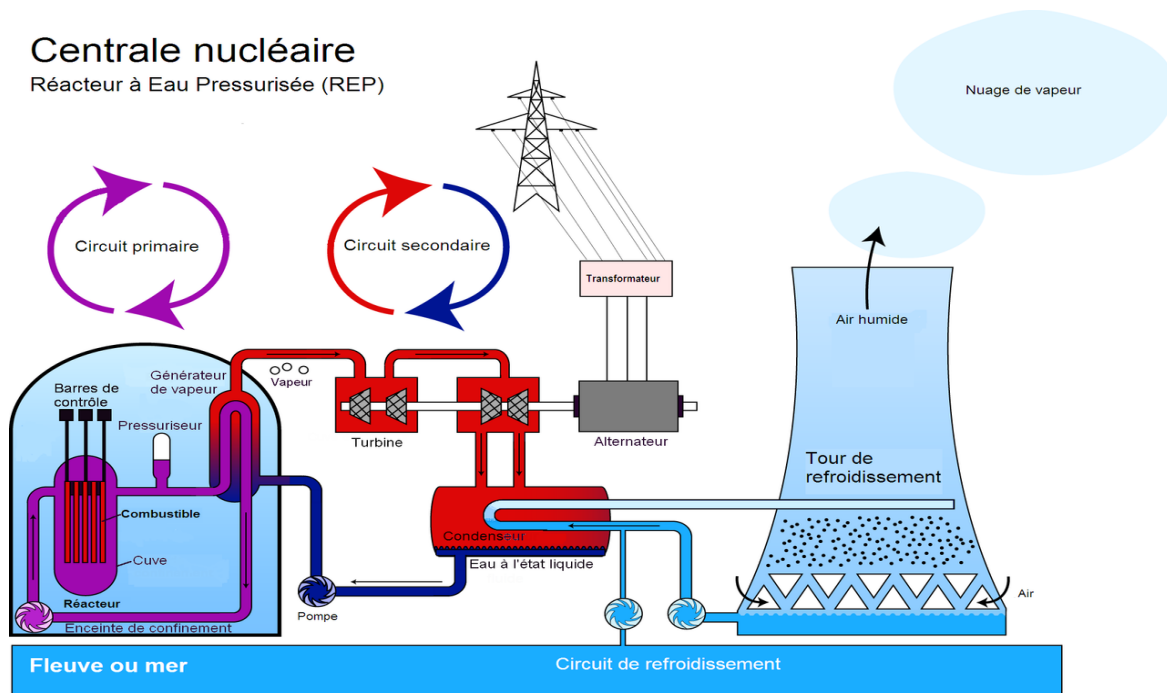
- **Description du PWR :**

Le cœur du réacteur avec le combustible nucléaire est placé dans une cuve elle-même en contact avec de l'eau. La réaction en chaîne chauffe les assemblages de combustible qui chauffent alors l'eau, appelée eau « primaire ». En exerçant une forte pression (155 atmosphères), le pressuriseur empêche cette eau de bouillir. Grâce aux pompes primaires, l'eau « primaire » circule en circuit fermé entre la cuve du réacteur et le Générateur de Vapeur (GV), ce dernier est un échangeur qui va permettre la transmission de la chaleur de l'eau du circuit primaire à l'eau du circuit secondaire. L'eau secondaire - qui ne sera jamais en contact avec le combustible - étant soumise à une pression moins élevée va entrer en ébullition. La vapeur alors produite est acheminée vers le turboalternateur. Une fois actionné par la vapeur, le



turboalternateur produit de l'électricité. A la sortie du turboalternateur, la vapeur est retransformée en eau dans un « condenseur » refroidi par de l'eau de mer ou de rivière ou encore par de l'air frais et humide qui s'engouffre dans les tours en béton appelées « aéroréfrigérantes ». Cette eau est donc un troisième circuit totalement indépendant de l'eau secondaire, elle est ramenée vers le réacteur nucléaire pour être à nouveau transformée en vapeur refermant ainsi le cycle. [11]

La pression permet de maintenir l'eau à l'état liquide, y compris à très haute température. La sécurité en cas d'accident est assurée par les trois barrières qui séparent les matières radioactives de l'environnement : la gaine séparant le combustible de l'eau primaire, les parois de la cuve du réacteur et des échangeurs de chaleur : l'enceinte de la centrale. [13]



**Figure (1-2) :** Représentation schématique du fonctionnement d'un réacteur nucléaire à eau pressurisée

### 3.4.2. Réacteur à eau bouillante (Boiling Water Reactor) RWB :

La filière des réacteurs à eau bouillante REB représente environ le quart des réacteurs construits dans le monde 22 %. [14]

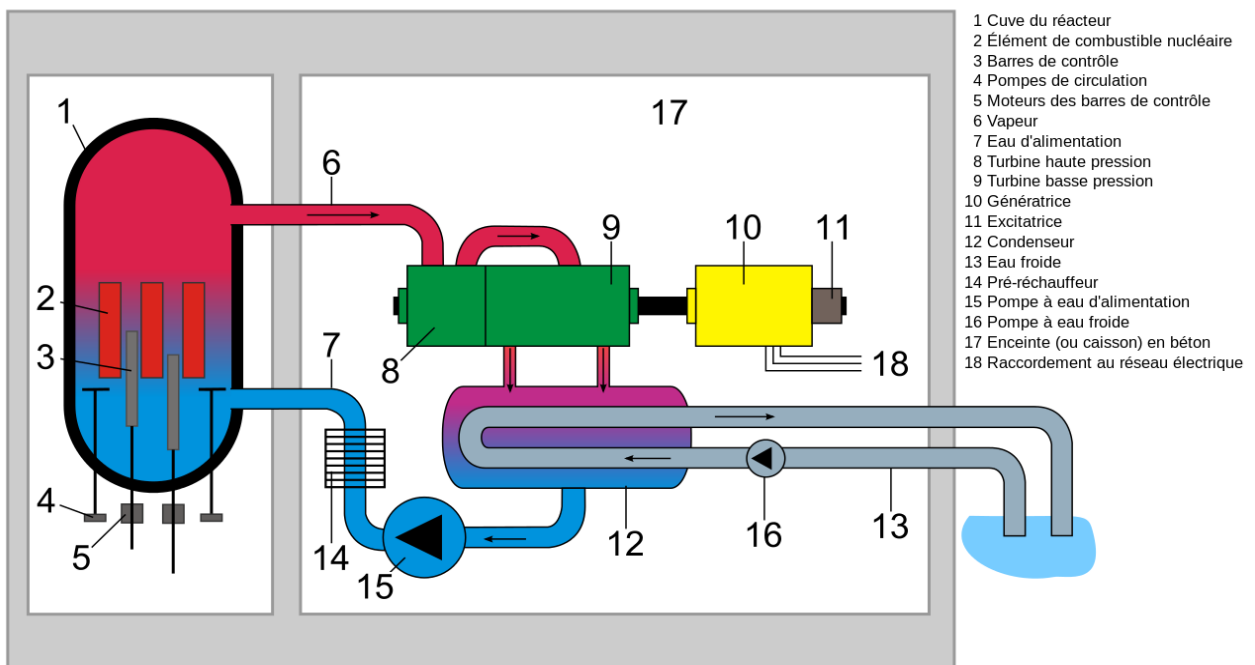
### • Description du REB :

Ce type de réacteur est assez semblable à un réacteur à eau pressurisée, à la différence importante que l'eau primaire se vaporise dans le cœur du réacteur et passe directement dans la turbine sans circuit secondaire. [11]

L'eau légère circule dans le cœur du réacteur, entre en ébullition et se transforme en partie en vapeur. L'eau est maintenue à une pression plus basse que dans un REP (7-8 MPa 70 atm) ce qui lui permet de bouillir à 280°C. L'énergie thermique générée par les réactions en chaîne de fission nucléaire est utilisée pour faire bouillir l'eau.

La vapeur générée dans le cœur du réacteur sort par le haut et va directement aux turbines. La vapeur sortant du réacteur est traitée par des déshydrateurs à vapeur et des séparateurs d'eau avant de pénétrer dans les turbines. Les turbines seront responsables de l'exploitation du générateur électrique et de la production d'électricité.

Ensuite, la vapeur passe à travers un condenseur où elle est reconvertie en eau liquide. Plus tard, il retourne au réacteur nucléaire entraîné par une pompe appropriée et redémarrer le cycle. [14]



**Figure (1-3) :** schéma du principe de fonctionnement global d'un réacteur à eau bouillante

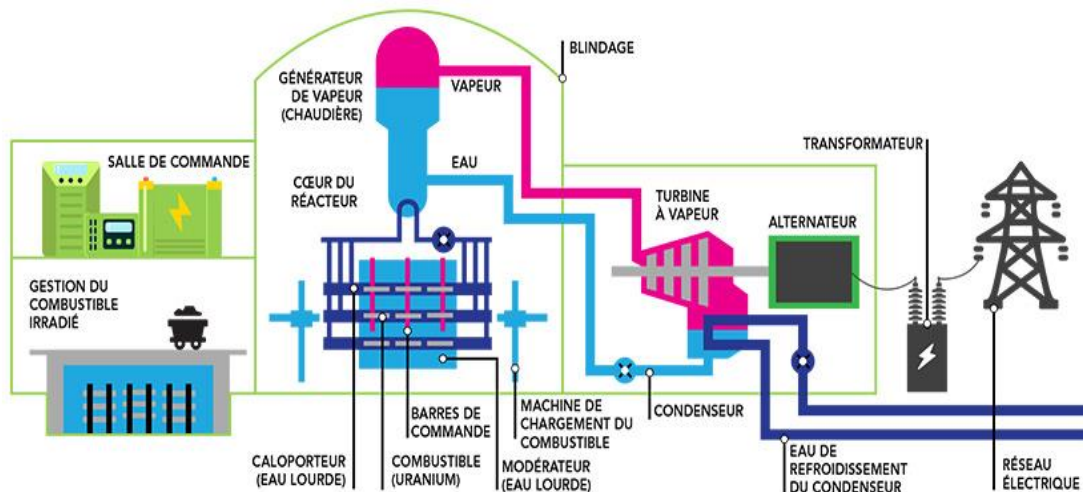
### 3.5. Réacteurs à eau lourde :

Dans le réacteur à eau lourde (PHWR : Pressurized Heavy Water Reactor), 12 grappes de combustible sont placées bout à bout dans un tube à travers lequel on pompe de l'eau (le caloporteur) qui absorbe la chaleur dégagée. Comme l'eau atteint près de 300°C, il se développe une pression d'environ 100 atmosphères. Ces tubes sont donc appelés tubes de force. Chaque tube de force renfermant le combustible et le caloporteur, muni de raccords d'extrémité pour l'entrée et la sortie du caloporteur et constitue alors un canal de combustible. Le cœur du réacteur comprend plusieurs canaux de combustible disposés horizontalement dans un cylindre appelé calandre contenant de l'eau lourde comme modérateur. [15]

À partir des canaux de combustible, le caloporteur est transféré par un tuyau jusqu'aux générateurs de vapeur où la chaleur du combustible est utilisée pour faire bouillir de l'eau dans un circuit secondaire. La vapeur produite entraîne la turbine et fait tourner le générateur qui produit l'électricité. Le caloporteur qui s'est refroidi, retourne alors au réacteur par le circuit primaire fermé. [15]

L'eau lourde du caloporteur circule dans chaque canal de combustible pour ramasser la chaleur produite par la fission du combustible. Ce caloporteur transporte la chaleur aux générateurs de vapeur, où elle sert à chauffer de l'eau ordinaire à l'ébullition pour produire de la vapeur.

Le réacteur du type CANDU (CANada Deuterium Uranium) représente la quasi-totalité des réacteurs PHWR. La principale caractéristique des réacteurs nucléaires à eau lourde est l'utilisation de l'eau lourde (D<sub>2</sub>O) comme modérateur et caloporteur, cette eau lourde est une combinaison d'oxygène et de deutérium (atome d'hydrogène lourd). L'eau lourde est assez semblable à l'eau ordinaire, sauf qu'elle est un peu plus lourde en raison de la présence d'un neutron supplémentaire dans l'atome d'hydrogène qui fait partie de la molécule d'eau ce qui lui permet de modérer le processus de fission dans le réacteur CANDU et d'utiliser le combustible naturel. [16]



**Figure (1-4) :** Schéma du principe de fonctionnement d'un réacteur à eau lourde

### 3.6. Filière des réacteurs nucléaires à haute température :

#### 3.6.1. Réacteurs refroidis à gaz à haute température HTGR :

Les réacteurs de type HTGR (High Temperature Gas Cooled Reactor) utilisent un combustible d'uranium, un modérateur en graphite et un gaz comme liquide de refroidissement. Dans ce cas, cependant le gaz est de l'hélium. Développé en Allemagne, utilise du combustible d'oxyde d'uranium qui est scellé à l'intérieur d'une coque en graphite pour former un élément combustible de la taille d'une boule de billard. [17]

Les HTGR ont enduit des particules de carburant pour son combustible. Cette particule à un noyau  $UO_2$  avec un revêtement en céramique quadruple et son diamètre est inférieure à 1 mm. Son revêtement protège le noyau  $UO_2$  et confine les produits de fission générés par la fission nucléaire. Le revêtement en céramique offre une résistance aux températures élevées afin qu'il ne tombe pas en panne même à une température de 1600 degrés C.

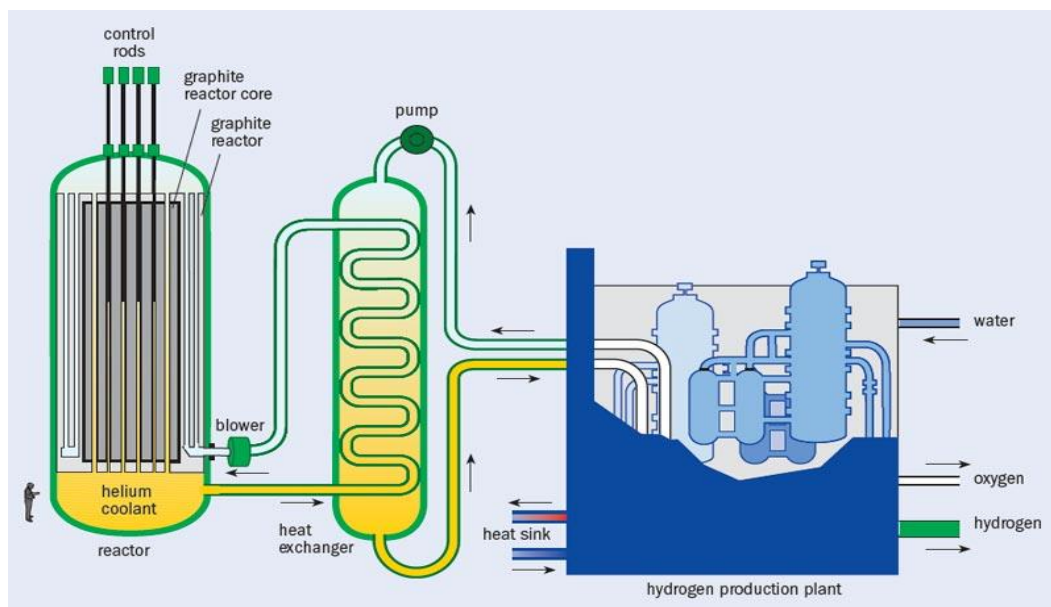
L'avantage du HTGR est que le modérateur, le graphite, le réfrigérant et l'hélium, peuvent fonctionner à haute température sans réagir ni se détériorer. Un HTGR typique fonctionnera à une pression de 100 atmosphères et à une température allant jusqu'à 900 ° C. Cela permet d'obtenir de meilleures conditions thermodynamiques, conduisant à une plus grande efficacité. Le réacteur est conçu de telle sorte qu'en cas de défaillance du liquide de refroidissement, il sera capable de résister à la haute température interne sans défaillance.

Le HTGR peut utiliser un système à double cycle de refroidissement dans lequel le liquide de refroidissement à l'hélium traverse un échangeur de chaleur où la chaleur est

transférée à l'eau et la vapeur est générée pour entraîner une turbine à vapeur. Cet agencement est efficace à environ 38%.

Cependant, un système plus avancé utilise l'hélium directement pour entraîner une turbine à gaz avant d'utiliser la chaleur restante pour augmenter la vapeur. Cet agencement est parfois appelé réacteur à hélium modulaire à turbine à gaz (GT-MHR). En théorie, le GT-MHR peut atteindre une efficacité de conversion d'énergie de 48%.

L'un des avantages du HTGR est qu'il peut être construit dans des unités relativement petites. Les modules peuvent avoir des capacités de production comprises entre 100 et 200 MW, ce qui les rend attrayants pour une plus grande variété d'applications. [17]



**Figure (1-5) :** Schéma du réacteur VHTR (Very High Temperature Reactor)

### 3.6.2. Réacteur modulaire à lit de sphère (Pebble Bed Modular Reactor) PBMR :

Le réacteur modulaire à lit de sphères (PBMR) est un petit réacteur modulaire refroidi à l'hélium et graphite modéré. Il utilise des éléments combustibles sphériques, appelés galets, qui ont approximativement la taille d'une balle de tennis. La genèse du design PBMR naît avec le programme allemand de développement de réacteurs à haute température (HTR).

Les grandes innovations de la courante conception des PBMR est le couplage direct du système de réacteur à haute température à une turbine à gaz et l'atteinte d'un très haut niveau de sécurité passive sans l'utilisation de systèmes d'ingénierie active. La turbine à gaz à cycle

direct élimine le cycle de vapeur complexe et coûteux pour conversion de puissance et entraîne une augmentation de l'efficacité thermique.

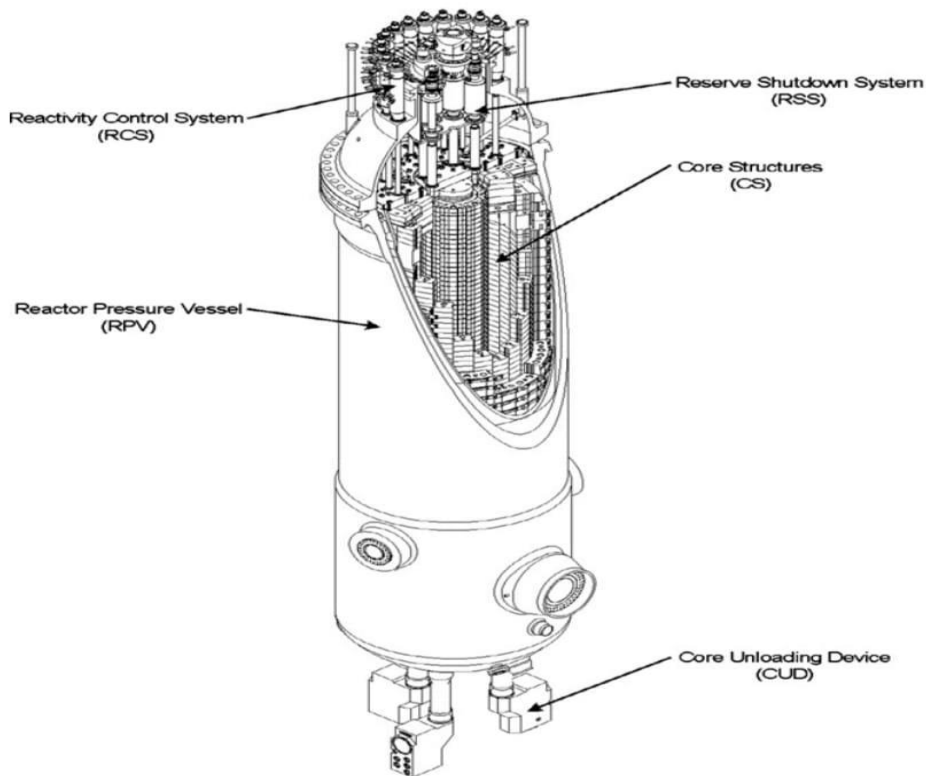
Le combustible du PBMR est de haute qualité avec des taux de défaillance des particules extrêmement faibles. Des tests antérieurs, dans le cadre du programme allemand HTR, ont montré que tant que la température maximale du carburant reste en dessous de 1600°C environ, les produits de fission seront contenus dans le combustible et ses revêtements TRISO.

L'unité de conversion de puissance d'un module PBMR est contenue dans quatre récipients sous pression en acier qui abritent le cœur du réacteur, deux turbocompresseurs et la turbine de production d'électricité. La tuyauterie d'interconnexion permet la récupération et le refroidissement de l'hélium retournant au réacteur pour atteindre la compression de gaz nécessaire et l'efficacité thermodynamique globalement améliorée.

En utilisant une cuve sous pression en acier pour le réacteur au lieu du récipient sous pression en béton des HTR antérieurs, la chaleur d'affaiblissement du cœur pendant les conditions d'accident peut maintenant être rejetée passivement dans l'atmosphère par conduction à travers les parois de la cuve au système de refroidissement de la cavité du réacteur. Le cycle thermodynamique du PBMR est un cycle de Brayton fermé avec récupération.

L'hélium quitte le réacteur à 900°C et passe successivement à travers les turbines à haute et basse pression qui entraînent les compresseurs puis à la turbine de production d'électricité qui est couplé au générateur électrique principal. L'échappement de l'hélium sorti de la turbine de production d'électricité passe maintenant pour la première fois à travers le récupérateur, en transférant sa chaleur à l'hélium retournant au réacteur. Le liquide de refroidissement à l'hélium passe ensuite à travers deux refroidisseurs et les compresseurs, augmenter sa pression à 9 MPa avant de rentrer dans le récupérateur pour la deuxième fois avant de retourner au réacteur à 482°C.

L'efficacité globale de ce cycle est calculée à environ 42% avec le courant des débits de dérivation prudents, y compris le jeu des aubes de turbine et les températures de l'eau de refroidissement. [18]

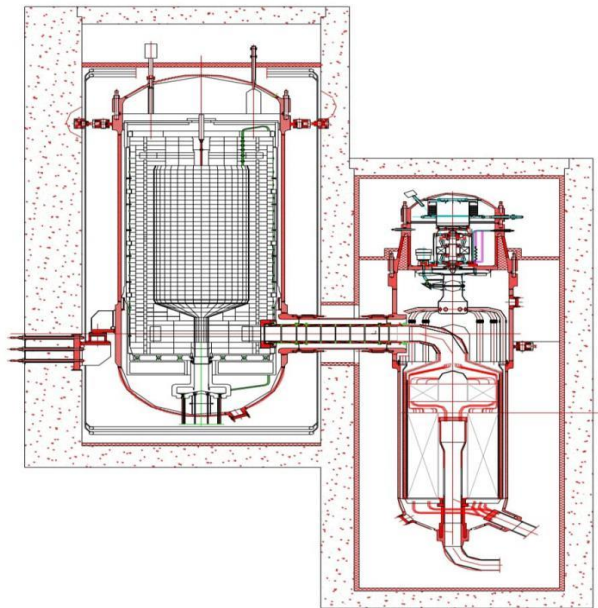


**Figure (1-6) :** Schéma d'une unité de PBMR

### 3.6.3. HTR-PM :

HTR-PM (High Temperature gas-cooled Reactor Pebble-bed Module) est la première centrale nucléaire commerciale de quatrième génération au monde avec une efficacité thermique élevée et des caractéristiques de sécurité inhérentes. En Chine, L'Université de Tsinghua mène actuellement des études pour développer et valider les principaux équipements et technologies liés au projet de démonstration basé sur le projet de HTR-10 (réacteur d'essai refroidi au gaz à haute température de 10 MW). [19]

HTR-PM est composé de deux réacteurs, de deux générateurs de vapeur et d'une turbine à vapeur. Un réacteur et un générateur de vapeur, situés dans la même centrale, forment une unité standard. Son aperçu de la structure peut être vu sur la figure (1-8).



**Figure (1-7) :** Système primaire du HTR-PM

Les boucles primaires des deux réacteurs sont indépendantes avec la même conception de construction, mais les deux réacteurs partagent le système de manutention du combustible, le système de purification de l'hélium et d'autres installations auxiliaires.

La puissance thermique totale est de 500 MW, soit 250 MW de chaque réacteur. La puissance électrique du HTR-PM est de 210 MW et chaque réacteur est composé d'un lit de sphères rempli d'éléments combustibles, de graphite et de briques de carbone, de composants internes du réacteur en métal, de barres de commande et de leur mécanisme d'entraînement, du système d'arrêt de la sphère absorbante et de la cuve de pression du réacteur, etc.

Normalement, le liquide de refroidissement à l'hélium entraîné par le circulateur d'hélium primaire transmet la chaleur générée dans le cœur du réacteur au générateur de vapeur pour chauffer l'eau d'alimentation de 200 °C en vapeur surchauffée de 570 °C dans la boucle secondaire. Ensuite, la vapeur surchauffée est envoyée dans la turbine pour produire de l'électricité.

Différent du réacteur à eau, l'hélium est utilisé comme réfrigérant et caloporteur dans le HTR-PM.

le HTR-PM utilise un mode continu de chargement et de déchargement des éléments combustibles sphériques pendant le fonctionnement du réacteur et près de deux semaines sont nécessaires pour que le HTR-PM redémarre une fois qu'il est déclenché. [20]



- **les caractéristiques de sécurité :**

- Une technologie nucléaire sécurisée peut être trouvée de manière innovante, sur la base de ces idées physiques: lorsque nous employons trois mesures :
  1. utiliser le carbure de silicium (SiC) plus résistant à la chaleur et substantiel comme revêtement de combustible;
  2. abaissement significatif de la densité de puissance volumétrique du cœur du réacteur;
  3. «Diviser 1 en N» ou diviser un grand réacteur en petits modules de réacteur (identiques) le cœur du réacteur peut alors être conçu de telle sorte que la chaleur de désintégration ne puisse jamais chauffer le cœur du réacteur jusqu'à la température limite.
- Basé sur la loi de conservation de l'énergie, la chaleur de désintégration dans le cœur du réacteur ne peut être éliminée que par conduction thermique et rayonnement, qui dépend des propriétés des matériaux; la convection thermique n'est pas nécessaire.
- En ce qui concerne l'élément combustible du HTR-PM, il peut être prouvé que la limite de température maximale du carburant est de 1600–1800 ° C pour maintenir l'intégrité des particules de combustible enrobées.

La puissance thermique d'un module de réacteur est choisie pour être de 250 MW, ce qui fournit une marge suffisante pour que le combustible du réacteur atteigne sa température maximale pendant un accident dépressurisé sans perte de liquide de refroidissement, qui ne dépend d'aucune installation de sécurité technique. [21]

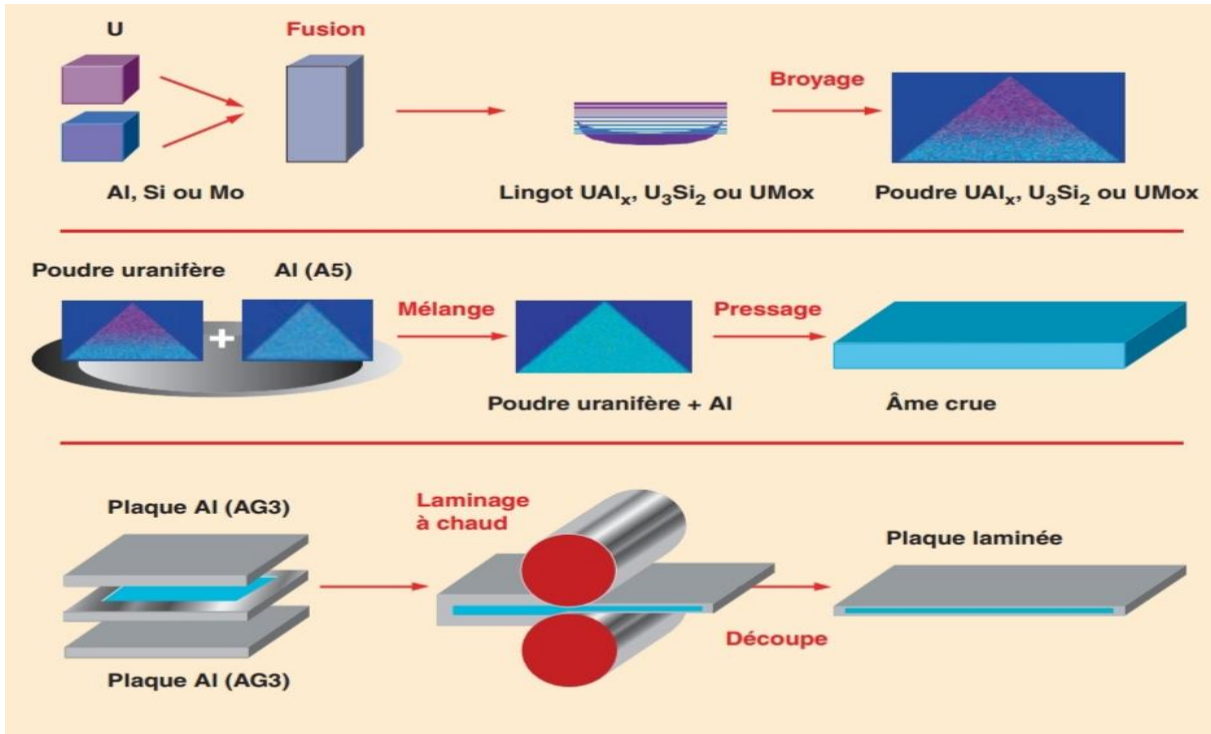
## 4. Les types de combustibles nucléaires :

Le combustible est formé par la chaire fissile et un gainage de protection. Il est placé dans le cœur du réacteur sous trois formes : à plaques, cylindrique et sphérique.

### 4.1. Combustible à plaque :

Ce type de combustible se présente sous forme de plaques planes, cintrées ou non, de faible épaisseur (1,37 mm). L'âme combustible est obtenue par compactage des particules uranifères dispersées dans une matrice d'aluminium pur ou d'alliage à base d'aluminium (notamment aluminium-silicium), le mélange particules/matrice constituant l'âme combustible. Le gainage est ensuite formé de deux plaques d'alliage d'aluminium de faible épaisseur colaminées à chaud et/ou à froid.

Les plaques obtenues sont ensuite assemblées pour former un élément combustible. Dans certains cas, les plaques sont préalablement cintrées pour former un élément tel que celui présenté en Figure (1-9).



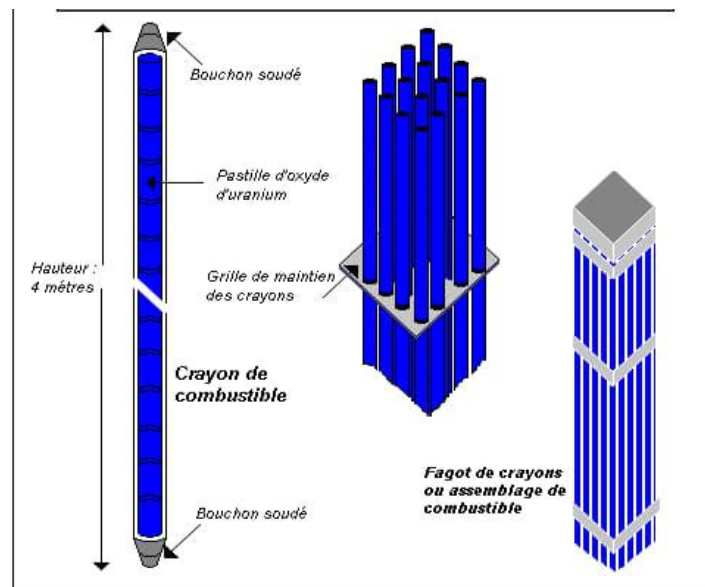
**Figure (1-8) :** principe du procédé de fabrication de plaques combustibles par colaminage

Le combustible de géométrie type « plaque » permet une bonne évacuation du flux thermique à puissance spécifique élevée. Sa température à cœur est de l'ordre de  $100^{\circ}C$  dans des conditions normales de fonctionnement, il est ainsi qualifié de combustible « froid ». [22]

### 4.2. Combustible cylindrique :

Dans la plupart des filières de réacteurs, les combustibles sont constitués d'éléments à géométrie cylindrique circulaire appelés crayons ou aiguilles. Seuls les combustibles des UNGG (réacteurs à uranium naturel graphite-gaz) et HTR (High Temperature Reactor) font exception.

Le crayon est donc généralement l'élément combustible élémentaire (matière fissile + gaine). Il est constitué d'un empilement de pastilles d' $UO_2$ , d'un tube (gaine), et de bouchons aux extrémités. Les crayons sont regroupés en faisceau pour réaliser un assemblage combustible (Figure (1-10)).



**Figure (1-9) :** préparation du combustible

Ce regroupement permet d'une part le fractionnement de la matière fissile, nécessaire pour des raisons neutroniques (rapport de modération approprié) et pour des raisons de refroidissement à haute puissance volumique (rapport surface sur volume élevé). Il permet d'autre part de réduire les durées de manipulation pendant l'arrêt du réacteur pour les opérations de déchargement du combustible utilisé et chargement du combustible neuf.

Ce choix de crayons cylindriques a également permis une fabrication bien maîtrisée des tubes de gaine et des pastilles d'UO<sub>2</sub>. [22]

### 4.3. Combustible sphérique :

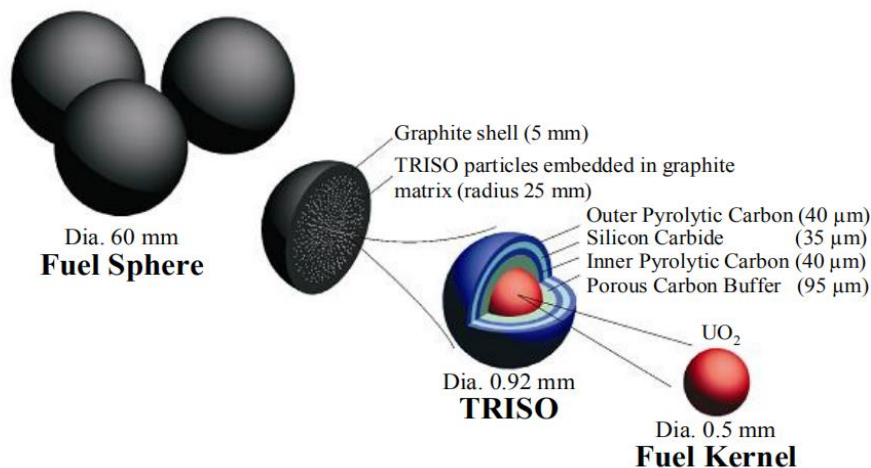
Aujourd'hui, tous les projets HTR utilisent la particule TRISO comme combustible de référence.

- **La particule TRISO :**

TRISO est la contraction de tri-isotropie : la particule est faite de trois matériaux isotropiques. En son centre, la particule possède un cœur sphérique de combustible, le kernel, sous forme d'oxyde, généralement d'UO<sub>2</sub> ou de MOX, ou bien sous forme de carbure. La première couche entourant le cœur est du carbone pyrolytique (pyrocarbone) de basse densité, appelé tampon, qui permet de jouer le rôle d'une éponge et qui absorbe le gonflement du kernel lors de l'irradiation. La seconde couche est encore du pyrocarbone mais de haute densité. Le carbure de silicium SiC (ou de zirconium) de la troisième couche permet de retenir les

radioéléments à l'intérieur de la particule grâce à sa haute densité relative et à sa grande dureté. Le carbure de silicium est censé être parfaitement étanche.

Enfin, la quatrième couche est de nouveau du pyrocarbone haute densité. Les deux couches de pyrocarbone de haute densité servent à protéger mécaniquement le carbure de silicium. La dernière couche permet aussi de faire le lien avec la matrice graphitique. Les PyC doivent présenter la plus grande isotropie possible car sous irradiation, ils deviennent anisotropes et peuvent provoquer un fluage en compression du SiC jusqu'à la rupture. [23]



**Figure (1-10) :** Particule TRISO et ses différentes couches

Le savoir-faire de la fabrication des particules TRISO est primordial pour garantir une fiabilité pendant le fonctionnement du réacteur. La fabrication des TRISO est si délicate que le changement d'un paramètre peut conduire à une baisse considérable de qualité. [24]

#### 4.4 Recherche Bibliographique

[1] K, C, « Lee interaction aérodynamique entre deux des sphères nombre de Reynolds  $10^4$  » Département de l'Ingénierie Mécanique, (Université d'Auckland) 1979.

Interaction aérodynamique entre deux sphères en nombre de Reynolds  $10^4$ . L'expérience a été conçue pour mesurer les forces aérodynamiques en magnitude et la direction sur deux sphères de taille pratique dans les flux d'air. Des balles de tennis de bonne qualité ont été choisies comme sphères et pour atteindre le requis Reynolds nécessitait des vitesses d'air allant jusqu'à 4m/s. En suspendant une seconde sphère proche de celle active dans différentes

Orientations et à une distance de séparation .il est clair que lorsque les sphères sont rapprochées il y a des forces considérables qui tendent à les séparer et si elles sont libres de se déplacer elles seront soumises à une accélération latérale t à un étalement important .en plus de cette force de séparation, il y a une augmentation marquée de la traînée .les particules au bord d'attaque du flux subiront une traînée plus importante que celle à l'arrière.

**[2] Yutaka Tsuji, Yoshinobu Morikawa, Kozo Terashima « interaction fluide \_dynamique entre deux sphères » IntJ. Multiptase Flow Vol.8, No. 1, pp.71-82,1982 Printed in Great Britain.**

Une expérience d'interaction fluide-dynamique entre deux sphère a été réalisée pour obtenir des informations sur l'écoulement diphasique .Deux ou trois sphères ont été installées dans un tunnel d'eau dans une direction longitudinale ou transversale avec un nombre de Reynolds inférieur à  $10^3$  .Les résultats sont résumés comme suit :

L'écoulement derrière la sphère a été visualisé et le changement dans la structure du vortex en raison de l'interaction a été observé. Lorsque les deux sphères sont dans le sens longitudinale, seule la face avant le vortex change de structure et le vortex arrière est le même que le vortex sans interaction. L'angle de stagnation à l'avant de la sphère est le même que celle de sphère unique mais l'angle diminue sur la sphère arrière, c'est-à-dire la position de séparation se déplace en aval. En ce qui concerne le nombre ou la fréquence de Strouhal des tourbillons de délestage, il n'y a aucun effet d'interaction sur les sphères avant et arrière. La force de traînée sur la sphère a été mesurée par une méthode pendulaire qui a été développée pour détecter une petite traînée. La traînée de la sphère arrière est plus largement affectée par l'interaction, diminuant avec une distance décroissante entre les sphères. Alors que les sphères se rapprochent dans le sens transversal, la traînée augmente, mais l'effet disparaît à une distance supérieur à  $I_z/D_{sp}=2\sim 3$  où  $I_z$  est la distance transversale entre les centres des sphères.

**[3] Inchul Kim, Said Elghobashi and William A. Sirignano {flux tridimensionnel sur deux sphères placées cote à cote} J. Fluid Mech. (1993), vol. 246, pp. 465-488 Copyright 1993 Cambridge Université Press.**

Écoulement 3D autour de deux sphères placées coté à coté .Un écoulement tridimensionnels sur deux sphères identiques (solides ou liquides) maintenues fixes les unes par rapport aux autres, la ligne reliant leurs centres est normale à la ligne d'écoulement uniforme est étudiée numériquement à des nombres de Reynolds de 50, 100 et 150. On considère les

coefficients de portance , de moment et de traînée sur les sphères ont été étudiés par rapport à la distance entre les deux sphères .Les résultats de calcul ont montré que pour un nombre de Reynolds donné , les deux sphères se repoussent lorsque l'espacement est de l'ordre du diamètre mais sont faiblement attirés aux distances de séparation intermédiaires .La structure verticale du sillage est significativement différente de celle du sillage axe symétrique qui s'établit aux grandes séparations .Le flux partiellement confiné passant entre les deux sphères entraîne le flux venant autour de leurs autres côtés.

**[4] R.C. Chen, J.L. Wu « les caractéristiques d'écoulement entre deux sphères interactives » Chemical Engineering Science 55 (2000) 1143-1158**

Les caractéristiques d'écoulement d'une sphère interactive au niveau d'une particule ont été étudiées Pour des nombres de Reynolds inférieurs à 200. L'influence de la distance des inter-particules et de la taille des sphères sur la traînée sont plus importantes lorsque la sphère est placée en amont du test. L'effet de La taille, surtout pour des distances inter-particules petites, devient de plus en plus remarquable lorsque le nombre de Reynolds augmente. L'existence d'une sphère en amont favorise l'apparition précoce de la séparation conduisant à la diminution de la traînée. À un angle de 45° et lorsque  $l/d$  est petite, la quantité de liquide due à l'effet de la buse va augmenter ainsi va retarder la séparation de l'écoulement et entraînera une augmentation de la traînée.

**[5] R. Folkersma, H.N. Stein, F.N. van de Vosse « interactions hydrodynamiques entre deux sphères identiques côte à côte disposées à un flux uniforme dirigé perpendiculaire à la ligne reliant les centres des sphères » International Journal of Multi phase Flow 26 (2000) 877–887.**

Les interactions hydrodynamiques entre deux sphères solides identiques sont étudiées numériquement à l'aide d'une méthode des éléments finis. Les sphères sont maintenues fixes l'une par rapport à l'autre , la ligne reliant leurs centres normaux à la direction du flux .La méthode est appliquée en trois dimensions , aux nombres de Reynolds 10 , 50 et  $5 \cdot 10^{-7}$  .Les coefficients de traînée et d'interaction des sphères sont calculés en fonction de la distance entre les deux sphères .Les résultats des calculs montrent que , pour le nombre Reynolds  $Re= 50$  , les deux sphères sont repoussées lorsque l'espace est de l'ordre du diamètre mais sont faiblement attirées à des distances de séparation intermédiaires .

Les résultats concordent avec les données expérimentales et théoriques rapportés pour différents nombres de Reynolds.

**[6] L.Schouveiler, A.Brydon, T.Leweke, M.C.Thompson « Interactions des sillages de deux sphères placées côte à côte » .a) institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre (IRPHE), CNRS/universités Aix Marseille I & II, 49, rue F. joliat-curie, 13884 Marseille cedex 13, France.**

On étudie les sillages périodiques couplés de deux sphères, placées côte à côte dans un flux uniforme à de faibles nombres de Reynolds. Expérimentalement, des colorants fluorescents ont été injectés à travers de petits trous en aval reliés par un canal à travers les sphères avec les tiges support amont creuses. Et par simulations numériques directes. Des régimes d'interaction très différents sont observés, en fonction de la distance de séparation entre les sphères. Pour toucher des sphères, un seul sillage est trouvé. Aux très petites séparations, il est montré grâce à des simulations numériques que les sillages interagissent fortement et que le sillage combiné est décalé par rapport au plan médian entre les sphères. Le sillage est vraisemblablement métastable, ce qui entraîne probablement les fortes vibrations structurelles des sphères observé dans les expériences actuelles, les deux sillages interagissent toujours fortement, et un déstagement déphasé se produit principalement. Un déstagement en phase est observé expérimentalement pour les tailles d'intervalle intermédiaires, tandis que DNS ne révèle pas de différence de phase préférée entre les deux sillages. A des distances supérieures à trois diamètres de sphère, l'interaction n'est pas corrélée. Les variations du nombre critique de Reynolds et des fréquences de déstagement avec la distance séparation sont indiquées.

**[7] A. Jadoon, L. Prah, J.Revestedt « interaction dynamique des deux sphères fixes pour plusieurs configurations et les conditions d'entrée » European Journal of Mechanics B/Fluids 29 (2010) 43–52.**

Les changements dans les caractéristiques des forces ainsi que les modèles de déstagement pour diverses configurations à double sphère sont étudiés .Les nombres de Reynolds considérés sont 300 , 600 et deux conditions d'entrée différentes sont utilisées : stables et pulsantes .Les formations des sphères sont définies par la distance de séparation  $D_0$  entre les sphères et l'angle formé par la ligne reliant les centres des sphères et la direction du flux principal  $\gamma$  .La position de l'une de sphères varie de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  en utilisant un incrément de  $15^\circ$  .Les deux distances de séparations sont étudiées ;  $1.5D$  et  $3D$  .

La méthode utilisée pour les simulations est le volume de l'approche solide (VOS), une méthode basée sur le volume de fluide (VOF).

Une conclusion majeure de ce travail est que l'interaction de la sphère modifie la dynamique de sillage en obstruant la chute du vortex (générant un sillage régulier ou un sillage avec un nombre de Strouhal inférieur) et en changeant la direction de la force de portance afin qu'il soit dans la plupart des cas dirigé dans le plan contenant les centres des sphères. Les résultats montrent également que changer la condition d'entrée donne le même changement relatif de traînée et de portance que pour une seule sphère. La traînée est considérablement réduite en plaçant la sphère en aval dans un agencement en tandem et légèrement augmentée dans une disposition coté à coté.

Cependant, l'effet est diminué en augmentant la distance de séparation et le nombre de Reynolds.

**[8] Engin Pinar, Besir Sain, Muammer Ozgoren and Huseyin Akilli « étude expérimentale des structures d'écoulement autour des sphères côte à côte » [dx.doi.org/10.1021/ie4022732](https://doi.org/10.1021/ie4022732) | Ind. Eng. Chem. Res. 2013, 52, 14492–14503.**

Etude expérimentale des structures d'écoulement autour des deux sphères cote à cote. Des travaux expérimentaux ont été menés dans un canal d'eau une section d'essai de 800 cm de longueur, 100cm de largeur et 75 cm de hauteur, feuilles de plexiglas transparent d'une épaisseur de 15 mm ont été utilisées pour construire la section de test. L'eau a été pompée à travers des filtres à plusieurs étages afin de briser à grande échelle tourbillons pour transporter l'eau dans un grand réservoir passant à travers le redresseur d'écoulement et une section de contraction. En utilisant la visualisation de colorant et une vélocimétrie d'image des particules. Les résultats PIV (particule image velocimetry) révèlent que les statistiques de turbulence, le sillage, la taille et la formation des points critiques varie en fonction du rapport d'écart  $G/D$  des sphères. Les deux sphères coté à coté agissent comme un corps de bluff unique pour  $G/D = 1.0$ . A un très petit rapport d'écart, par exemple, pour  $1,0 \leq G/D \leq 1,5$  les sillages des sphères interagissent fortement en raison des instabilités de la couche de cisaillement interne. Les interactions entre les tourbillons de délestage deviennent plus faibles pour  $G/D = 2,5$  Mais, les régions de sillage sont encore sous l'influence des couches de cisaillement de délestage dues au transfert de quantité de mouvement provoqué par l'écoulement en forme de jet qui se produit à travers les sphères. L'influence de l'écoulement de type jet sur le comportement de sillage devient négligeable pour  $G/D=2,5$ .



**[9] Rahim hassanzadeh, besir sahin, muammer ozgoren « Grande simulation des courants de Foucault autour de deux sphères côte à côte » Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering and Architecture, Culcurova University, Konya, Turkey (Manuscript Received February 23.2012 Revised January 29.2013. Accepted March 14.2013).**

La simulation de grands tourbillons, utilisant une échelle dynamique de sous-grille Smagorinsky, est utilisée pour la prédiction des structures décollement autour de deux identiques sphères fixées côte à côte à un régime d'écoulement sous-critique avec le nombre de Reynolds 5000. La méthode de discrétisation rapide est appliquée pour discrétiser les termes de convection de l'équation de Navier-Stokes au moyen de l'approche en volume fini. Ce travail se concentre principalement sur les structures de sillage en aval des deux sphères interactives situées à trois différentes distances de séparation sans d'intentions entre des sphères telles que  $G/D=1.5, 2, 3$ . Les résultats obtenus ont révélé que l'interaction entre les sillages affecte l'écoulement structures en aval des sphères. Le taux de cette interaction est fortement modifié en fonction de la distance de séparation. D'autre part, certaines données décollement telles que la traînée moyenne et les coefficients de portance moyenne sont affectées en raison des interactions de sillage. Enfin, l'examen de la variation des contraintes de Reynolds le long des différents axes latéraux,  $L/D$ , a révélé que l'effet de buse ne joue pas un rôle significatif sur les caractéristiques de turbulence au-delà du  $G/D=3$ .

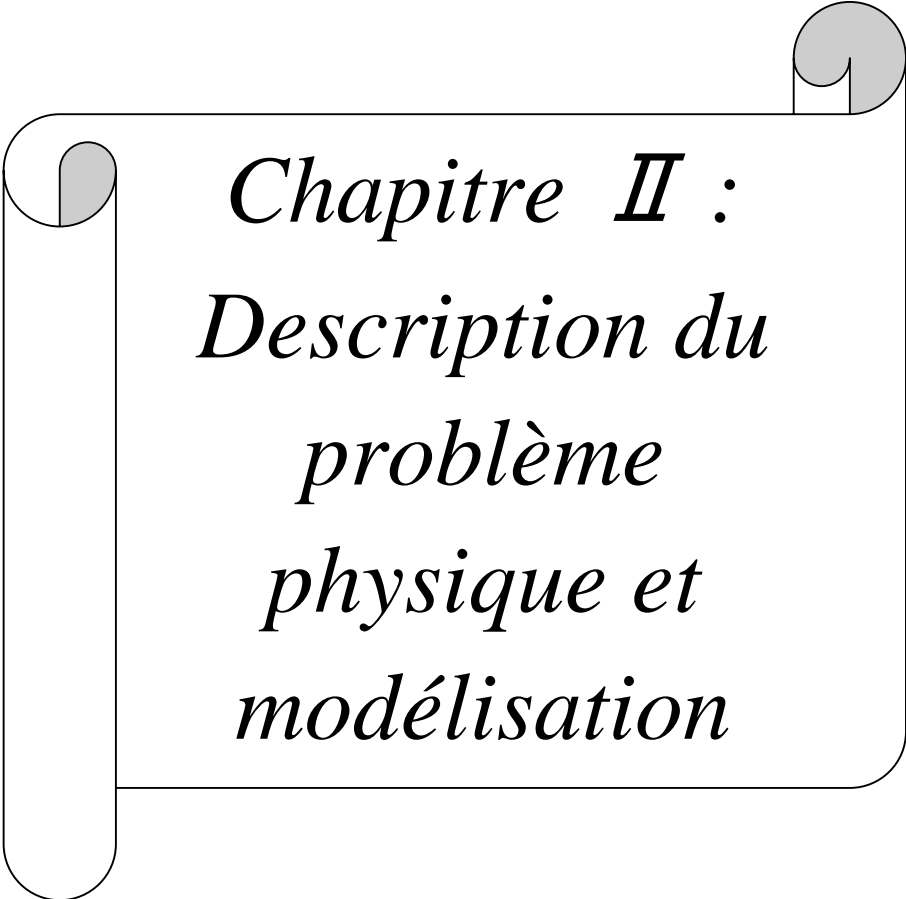
**[10] Shiyang Li, Jian Yang, Quiwang Wang « grande simulation de tourbillon du flux et du transfert de chaleur au-delà des deux sphères côté à côté » applied thermal engineering 121 (2017) 810-819.**

Grande simulation de tourbillon du flux et de transfert de chaleur au-delà d deux sphères coté à coté Cet article a étudié numériquement le débit et le transfert de chaleur au-delà de deux sphères coté à coté à  $Re = 5000$  en utilisant la méthode de simulation des tourbillons (LES). Si le rapport d'écart diminue, la séparation du flux sur la sphère est retardé, entraînant une augmentation des coefficients de traînée .Le nombre de Nusselt local est plus élevé avant la séparation mais devient plus bas après le point de séparation, il est variable avec la diminution des rapports d'écart.

## **5. Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a présenté le principe de la fission nucléaire et le mode de réaction en chaîne qui présente la source d'énergie dans les réacteurs. On a classifié les différentes filières de réacteurs nucléaires selon la relation entre les trois éléments : le caloporteur, le modérateur et le combustible puis on a défini les types de combustible utilisés dans chaque filières.

Pour finir, une recherche bibliographique a été effectuée sur les écoulements autour des deux sphères combustibles.



*Chapitre II :*  
*Description du*  
*problème*  
*physique et*  
*modélisation*

## 1. Introduction :

Les réacteurs nucléaires à gaz utilisent un combustible sphérique. La disposition des sphères combustible dans le cœur du réacteur influe sur les performances énergétiques du réacteur nucléaire et donc sur son refroidissement qui doit être sûr.

La présente étude qui sera menée, en utilisant un code de calcul CFD, établira les principales performances pour deux sphères combustibles qui représenteront une configuration en ligne et une configuration en quinconce.

Dans ce chapitre, on va présenter les géométries de ce problème, et définir la mise en équations qui gouvernante l'écoulement turbulent d'un fluide autour de deux sphères combustible ( équation de conservation de la masse et de l'énergie, équations de conservation de la quantité de mouvement et l'équation d'état) en coordonnées cartésiennes et sphériques, avec les conditions aux limites, nous allons aussi présenté les modèles de turbulences et précisant le modèles que nous allons utiliser dans cette simulation ainsi que nous allons défini le transfert thermique et ses modes de transmission.

## 2. Description des écoulements :

La géométrie du problème est représentée par deux sphères combustibles en graphite de diamètre ( $D_1=D_2$ ) placées dans un tunnel de section rectangulaire de longueur ( $L_1+L_2$ ) et la largeur  $L_3$ .

Le tableau (2-1) résume les données géométriques du tunnel et des deux sphères combustible pour un écoulement interne de :  $Re = 3000$  .

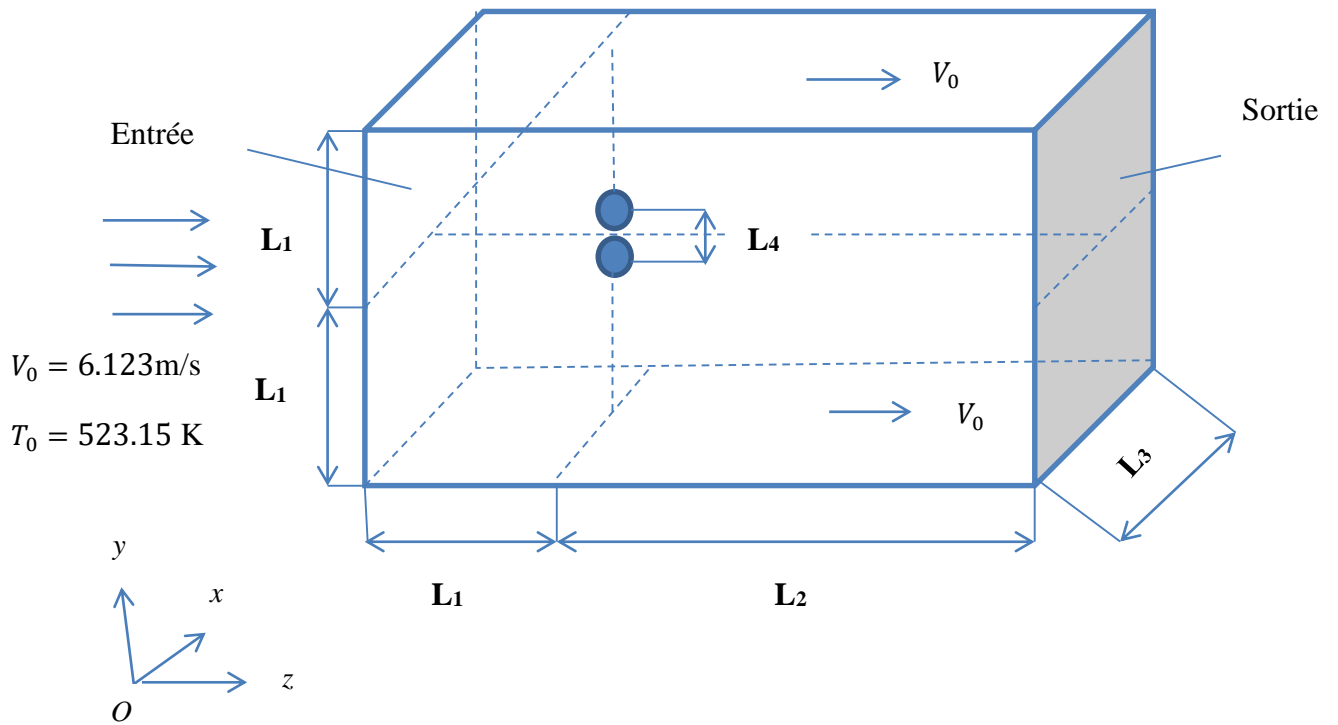
**Tableau (2-1)** : Données géométriques du tunnel et des deux sphères combustibles

	$D_1$ (m)	$D_2$ (m)	$L_1$ (m)	$L_2$ (m)	$L_3$ (m)	$L_4$ (m)
<b>Les sphères combustibles</b>	0.06	0.06				
<b>Le tunnel cylindrique</b>			0.18	0.6	0.36	0.061

### 2.1 Configuration en ligne

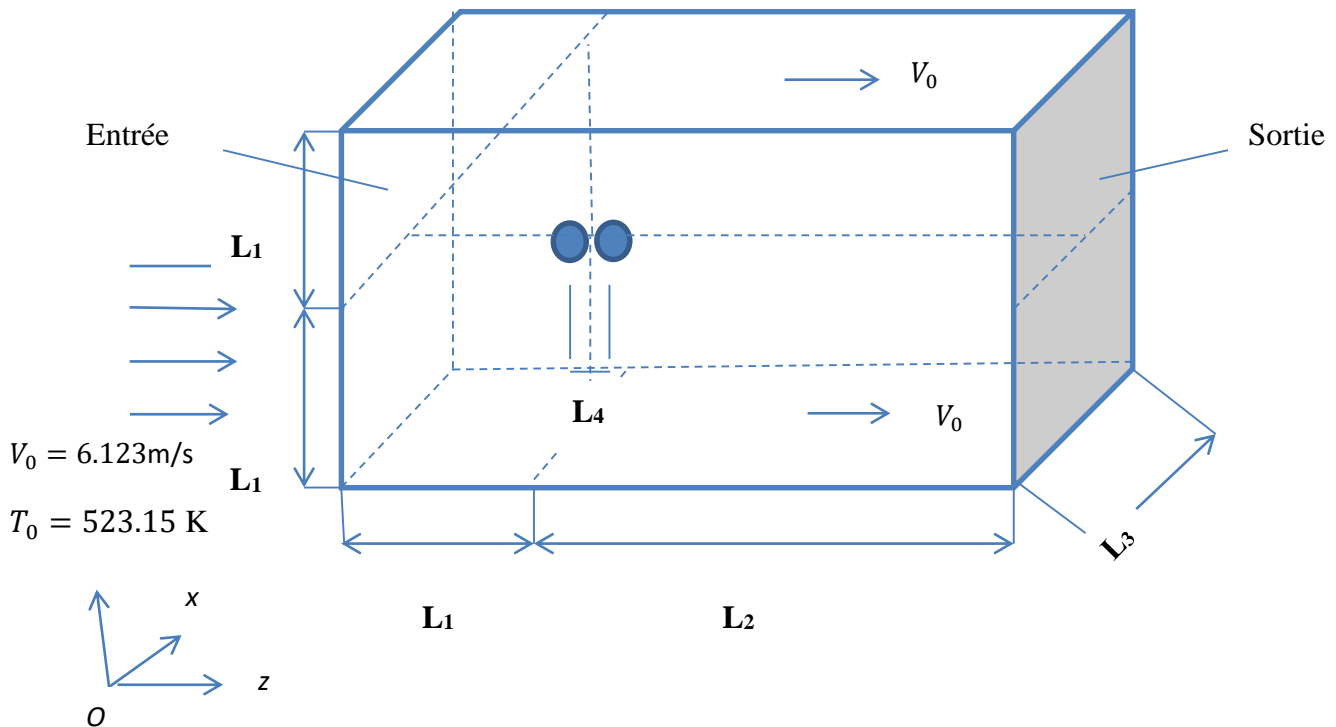
## Chapitre II Description du problème physique et modélisation mathématique

Pour la première configuration, les sphères combustibles en graphite seront disposées verticalement puis horizontalement Comme montrent les figures ci-dessous.



**Figure (2-1)** : les sphères combustibles en ligne à  $90^\circ$  dans le tunnel rectangulaire

La figure (2-1) montre la configuration en ligne à  $90^\circ$  des deux sphères combustibles, c'est à dire les deux sphères sont disposées l'une au-dessus de l'autre.

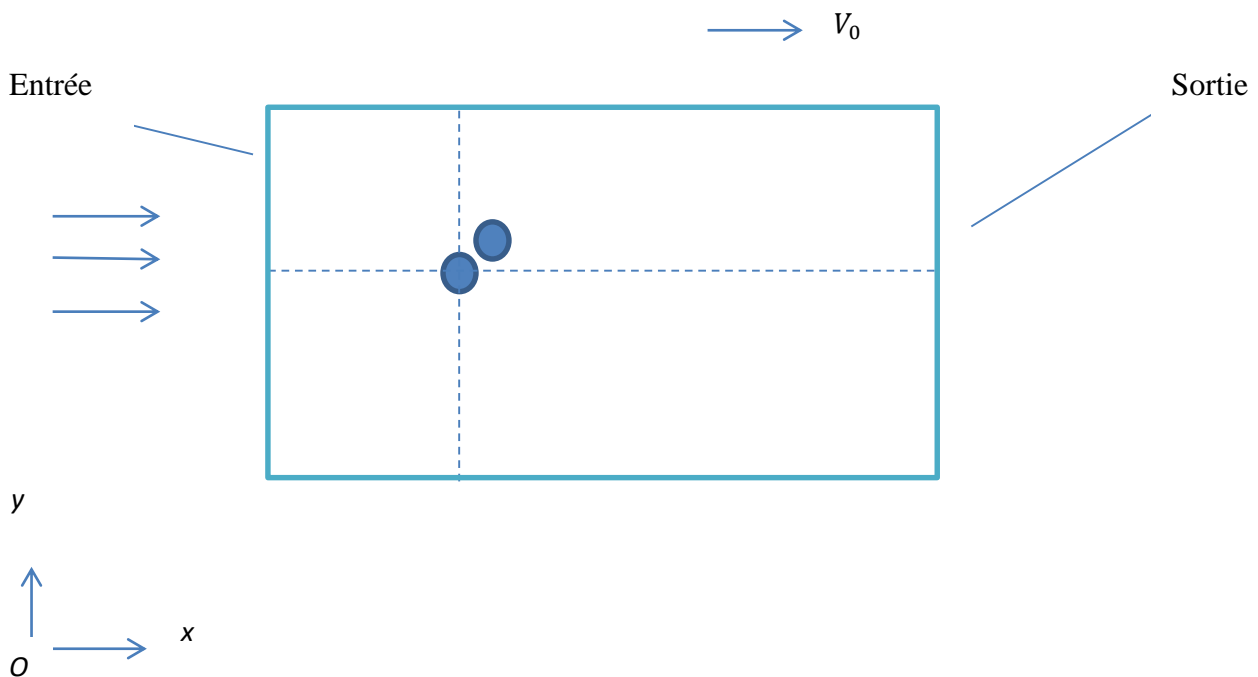


**Figure (2-2)** : les sphères combustibles en ligne à  $0^\circ$  dans le tunnel rectangulaire

La figure (2-2) montre la configuration en ligne à  $0^\circ$  des deux sphères combustibles, c'est à dire les deux sphères sont disposées derrière l'autre.

### 2.2 Configuration en quinconce :

Pour la seconde phase de l'écoulement pour les sphères en quinconce, on a fait un écart de  $15^\circ$  à chaque fois entre les deux sphères c'est à dire un décalage de  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $75^\circ$ . La figure (2-3) montre la configuration en quinconce à  $45^\circ$  des deux sphères, c'est-à-dire la sphère du bas est décalée par rapport à la sphère du haut de  $45^\circ$ .



**Figure (2-3) :** la configuration en  $45^\circ$ .

### 3. Mise en équations du problème :

La mise en équations du problème des deux sphères combustibles immergées dans un fluide et qui gouvernante l'écoulement de ces deux particules qui sont : l'équation de conservation de la quantité de mouvement, l'équation de conservation de la masse et l'équation de conservation de l'énergie.

Pour toutes les équations de transport de l'écoulement, cette écriture est la plus générale et la plus répandue.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (2-1)$$

### 3.1 mise en équations en coordonnées cartésiennes :

#### 3.1.1. Équation de conservation de la masse :

Le principe de conservation de la masse du fluide contenu dans tout domaine D, suivi dans son mouvement, requiert l'invariance de :

$$M(t) = \int_D \rho(\mathbf{x}, t) dV. \quad (2-4)$$

C'est-à-dire :

$$\frac{dM}{dt} = 0. \quad (2-5)$$

Donc on a :

$$-\left( \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2-6)$$

L'équation de la conservation de la masse s'écrit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z_i} (\rho v_i) = 0. \quad (2-7)$$

#### 3.1.2. Equation de conservation de la quantité de mouvement :

Le principe fondamental de la dynamique veut que toute variation (temporelle) de quantité de mouvement résulte de l'application de forces. Donc, on peut écrire une relation générale de la forme :

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \cdot (\rho v_j \cdot v_i) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}. \quad (2-8)$$

#### 3.1.3. Equation de conservation de l'énergie :

L'équation de conservation de l'énergie se définit comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( e + \frac{1}{2} v_i v_i \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \rho v_j \left( e + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} v_i v_i \right) \right] = \frac{\partial}{\partial y} (v_i - \tau_{ij}) - \frac{\partial q_j}{\partial y} \quad (2-9)$$

Avec (e) l'enthalpie

**3.1.4. Equation d'état :**

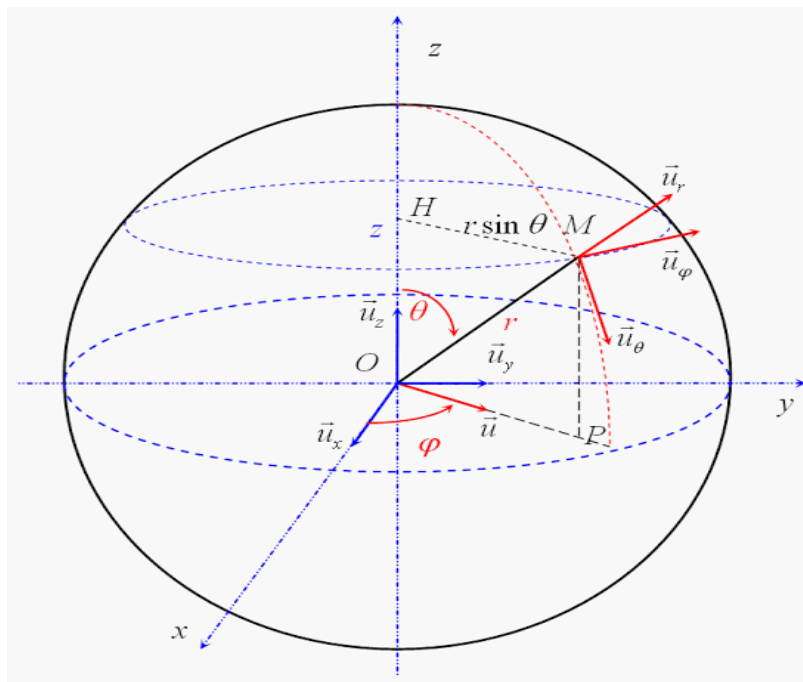
Pour le fluide, En considérant un fluide en équilibre thermodynamique, on applique la loi des gaz parfaits :

$$Pv = nRT \quad (2-10)$$

Sa pression p, température T, volume v, et la quantité de particules n, exprimée en moles R constante

**3.2. Passage en coordonnées sphériques :**

Dans ce travail, on va transférer toutes les équations de conservation (conservation de la masse, conservation de quantité de mouvement et conservation d'énergie) des coordonnées cartésiennes (x,y,z) aux coordonnées sphériques (  $\varphi, \theta, r$ ) (figure 2.4 )



**Figure (2-4) :** le système de coordonnées sphériques et cartésiennes

Avec  $\vec{u} = \vec{v}$  (2-11)



**3.2.1. Relation entre les coordonnées sphériques et cartésiennes :**

La projection  $H$  du point  $M$  sur l'axe  $Oz$  donne la cote :

$$z = OH = r \cos \theta \quad (2-12)$$

Si  $P$  est la projection de  $M$  sur le plan  $xOy$  on a :

$$OP = r \sin \theta \quad (2-13)$$

Les coordonnées  $x$  et  $y$  du point  $M$  sont celles du point  $P$  c'est à dire :

$$x = OP \cos \varphi = r \sin \theta \cos \varphi \quad (2-14)$$

$$y = OP \sin \varphi = r \sin \theta \sin \varphi \quad (2-15)$$

Le vecteur unitaire  $\vec{v}$  suivant  $OP$  a pour expression :

$$\vec{v} = \cos \varphi \vec{v}_x + \sin \varphi \vec{v}_y \quad (2-16)$$

Le vecteur unitaire  $\vec{v}_\varphi$  est directement perpendiculaire à  $\vec{u}$ . Il fait un angle  $(\varphi + \pi/2)$  avec l'axe  $Ox$  et s'écrit :

$$\vec{v}_\varphi = -\sin \varphi \vec{v}_x + \cos \varphi \vec{v}_y \quad (2-17)$$

Le vecteur unitaire  $\vec{v}_r$  a pour expression :

$$\vec{v}_r = \sin \theta \vec{v} + \cos \theta \vec{v}_z = \sin \theta [\cos \varphi \vec{v}_x + \sin \varphi \vec{v}_y] + \cos \theta \vec{v}_z \quad (2-18)$$

$$\vec{v}_r = \sin \theta \cos \varphi \vec{v}_x + \sin \theta \sin \varphi \vec{v}_y + \cos \theta \vec{v}_z \quad (2-19)$$

Enfin, le vecteur unitaire  $\vec{v}_\theta$  est directement perpendiculaire à  $\vec{v}_r$  et s'écrit :

$$\vec{v}_\theta = \cos \theta \vec{v} - \sin \theta \vec{v}_z = \cos \theta [\cos \varphi \vec{v}_x + \sin \varphi \vec{v}_y] - \sin \theta \vec{v}_z \quad (2-20)$$

$$\vec{v}_\varphi = \cos \theta \cos \varphi \vec{v}_x + \cos \theta \sin \varphi \vec{v}_y - \sin \theta \vec{v}_z \quad (2-21)$$

### 3.2.2. Equation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{2v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_\theta \cot \theta}{r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} = 0 \quad (2-22)$$

### 3.2.3. Equation de quantité de mouvement :

Selon l'axe  $r$  :

$$\begin{aligned} & \rho \left[ \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{v_\varphi}{r \sin \theta} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} - \frac{v_\theta^2}{r} - \frac{v_\varphi^2}{r} \right] \\ &= - \frac{\partial p}{\partial r} \\ &+ \mu \left[ \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2v_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} + \frac{\cot \theta}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \varphi^2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \frac{2v_\theta \cot \theta}{r^2} - \frac{2}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} \right] + \rho g_r \end{aligned} \quad (2-23)$$

Selon l'axe  $\theta$  :

$$\begin{aligned} & \rho \left[ \frac{\partial v_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_r v_\theta}{r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_\varphi}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\theta}{\partial \varphi} - \frac{v_\varphi^2 \cot \theta}{r} \right] \\ &= - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} \\ &+ \mu \left[ \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r^2 \sin^2 \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\cot \theta}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial v_\theta}{\partial \varphi^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right. \\ &\quad \left. - \frac{2 \cos \theta}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} \right] + \rho g_\theta \\ & \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{2v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_\theta \cot \theta}{r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} = 0 \end{aligned} \quad (2-24)$$

Selon l'axe  $\varphi$  :

$$\begin{aligned}
 & \rho \left[ \frac{\partial v_\varphi}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{v_r v_\varphi}{r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \theta} + \frac{v_\theta v_\varphi \cot \theta}{r} + \frac{v_\varphi}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} \right] \\
 & = - \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \\
 & + \mu \left[ \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r^2 \sin^2 \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial \theta^2} + \frac{\cot \theta}{r^2} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \theta} \right. \\
 & \left. + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{2}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} + \frac{2 \cos \theta}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial v_\theta}{\partial \varphi} \right] + \rho g_\varphi
 \end{aligned} \tag{2-25}$$

### 3.2.4. Equation de conservation de l'énergie :

$$\begin{aligned}
 & \rho \hat{C}_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{v_\varphi}{r \sin \theta} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) \\
 & = k \left( \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right) \\
 & + \mu \Phi_u
 \end{aligned} \tag{2-26}$$

En mettant :

$$\mu \Phi_u = \emptyset \tag{2-27}$$

$\emptyset$  : Fonction de dissipation

$$\begin{aligned}
 \emptyset = 2\mu & \left\{ \left[ \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{\text{div} \vec{v}}{3} \right]^2 + \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} - \frac{\text{div} \vec{v}}{3} \right]^2 \right. \\
 & \left. + \left[ \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{v_r}{r} + \frac{v_\theta}{r \tan \theta} - \frac{\text{div} \vec{v}}{3} \right]^2 \right\} \\
 & + \mu \left\{ \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v_\theta}{r} \right) \right]^2 + \left[ r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v_\varphi}{r} \right) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} \right]^2 \right. \\
 & \left. + \left[ \frac{\sin \theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{v_\varphi}{\sin \theta} \right) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} \right]^2 \right\}
 \end{aligned} \tag{2-28}$$

Toutes les équations nécessaires pour cette étude ont été présentées clairement afin de faire objet de bilan.

## 4. Les conditions aux limites :

Pour notre problème, l'écoulement de gaz autour de deux sphères combustibles dans tunnel de section rectangulaire est étudié pour une température d'un HTR-PM, un débit d'un HTR-PM et la vitesse est déduite de débit.

Les hypothèses de notre problème (écoulement de gaz autour des deux sphères combustibles en graphite) sont :

- Ecoulement permanent
- Ecoulement incompressible

## 5. Modèles de turbulence :

La modélisation de la turbulence est une branche de la mécanique des fluides utilisée pour prédire le comportement d'un écoulement dans lequel tout ou partie du fluide est turbulent.

Les méthodes mises en œuvre pour résoudre ce problème reposent sur la physique statistique : la turbulence est considérée comme un processus statistique dont on suppose qu'il peut être décrit par la seule distribution temporelle en chaque point.

Chaque approche de modélisation de la turbulence peut être utile selon l'application et les quantités physiques d'intérêt. Il y a un compromis à faire entre la simplicité du calcul et la richesse de l'information obtenue. Il incombe à l'aérodynamicien de bien choisir la méthodologie appropriée à ses besoins.

### 5.1. Famille RANS (Reynolds-averaged Navier-stokes):

**Tableau (2 - 2) :** Les modèles de turbulence dans RANS

<b>RANS</b>  <b>Eddy-viscosity Models</b>	<b>Zero Equation model</b>
	Standard k- $\epsilon$ model
	Standard k- $\omega$ model
	SST model

Consiste à résoudre uniquement la partie moyenne de l'écoulement et à modéliser les échelles de la turbulence (bonne prédictions des forces moyennes sur le corps). La solution est donnée par les équations moyennées dans le temps.

C'est l'approche la plus largement utilisée pour les écoulements industriels (conception de la forme des ailes et des pales, estimation initiale pour des calculs plus poussées) puisque le coût de calcul faible (20 heures sur 128 processeurs).

Une simulation des équations RANS réduit considérablement les efforts de calcul par rapport à une simulation numérique directe (DNS) ou une simulation des grandes échelles (LES) et elle est largement utilisée pour les calculs d'ingénierie. Pour économiser les ressources de calcul, l'approche moyennée (RANS) est utilisée pour ce projet de recherche. [25]

### 5.1.1. Modèle k-ε :

Il s'agit d'un modèle à deux équations qui donne une description générale de la turbulence au moyen de deux équations de transport (EDP) une pour l'énergie cinétique turbulente (k) et l'autre pour la dissipation (epsilon). La dissipation turbulente est la vitesse à laquelle les fluctuations de vitesse se dissipent. Les coefficients sont dérivés empiriquement, Valable uniquement pour les débits turbulents. Dans le modèle k-ε standard, la viscosité turbulente est déterminée à partir d'une échelle de longueur de turbulence unique, de sorte que la diffusion turbulente calculée est celle qui ne se produit qu'à l'échelle spécifiée, alors qu'en réalité toutes les échelles de mouvement contribueront à la diffusion turbulente. [26]

Ce modèle Facile à utiliser avec une convergence assurée, obtient un premier résultat facilement, pas forcément très précis et permet la comparaison avec une étude analogue sous Fluent.

Le modèle k-ε standard (Launder et Spalding, 1972) se base sur le concept Bousinesq (1977). Les termes des contraintes de Reynolds sont : [27]

$$-\rho \overline{v_i v_j} = 2\mu_i s_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2-29)$$

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \quad (2-30)$$

L'énergie cinétique turbulente est définie par :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k v_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (2-31)$$

Pour la dissipation  $\varepsilon$  :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon v_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2-32)$$

$v_i$  : La composante de vitesse dans la direction correspondante

$E_{ij}$  : La composante de vitesse de déformation

$\mu_t$  : La viscosité turbulente

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2-33)$$

Avec  $C_\mu = 0.09$  (2-34)

**Tableau (2- 3)** : valeurs des constantes du modèle k- $\varepsilon$

Modèles de turbulence	$C_\mu$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$\sigma_K$	$\sigma_\varepsilon$
k- $\varepsilon$ standard	0.09	1.44	1.92	1	1.3

### 5.1.2. Modèle k- $\omega$ SST :

Le modèle k- $\omega$  SST (Shear Stress Transport) a une équation de transport se base sur le modèle k- $\omega$ . Il combine le modèle Wilcox k-  $\omega$  original qui est efficace près des murs et le modèle k- $\varepsilon$  standard à l'écart des murs en utilisant une fonction de mélange (blending function). La formulation de viscosité turbulente est modifiée pour tenir compte des effets de transport de

la contrainte de cisaillement turbulente principale. Les options de transition et de cisaillement sont empruntées du modèle k- $\omega$ .

Ce modèle offre des avantages similaires au standard k- $\omega$ . Le modèle SST représente le transport de la contrainte de cisaillement turbulente et donne des prédictions très précises de l'apparition et de la quantité de séparation d'écoulement sous des gradients de pression négatifs, ce modèle est complet et adapté à notre cas d'écoulement confiné. La SST est recommandée pour des simulations de couche limite de haute précision.

La dépendance vis-à-vis de la distance entre les parois rend cette méthode moins adaptée aux écoulements de cisaillement libres par rapport à la norme k- $\omega$ . Il nécessite une résolution de maille près du mur. [28]

Le premier modèle implémenté est la version baseline (BSL). Ce modèle est l'origine du modèle shear stress transport (SST)

Pour la dissipation spécifique  $\omega$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho \bar{v}_i \frac{\partial \omega}{\partial x_i} = P_\omega - \beta^* \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (2-35)$$

Pour l'énergie cinétique de turbulence  $k$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{v}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = P_k - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (2-36)$$

Avec les définitions suivantes :

$$P_k = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} \quad \tau_{ij} = 2\mu_t S_{ij} \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \quad \mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \quad (2-37)$$

Le terme de production  $\tau_{ij} \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j}$  s'explique de la manière suivante :

$$P_k = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} \quad (2-38)$$

Avec

$$\tau_{ij} = 2\mu_t \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2-39)$$

En 2D, il se simplifie à :

$$P_k = \mu_t \left[ 2 \left( \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) + \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (2-40)$$

Avec

$$F_1 = \tanh(\text{arg}_1^4) \quad \text{arg}_1 = \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} d^2} \right]$$

$$CD_{k\omega} = \max \left( 2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right) \quad (2-41)$$

La définition de la viscosité turbulente est l'unique différence entre les modèles Baseline et SST de Menter. Cette modification dans le calcul de  $\mu_t$  a été introduite pour pallier à la tendance erronée qu'ont la plupart des modèles de turbulence à deux équation.

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (2-42)$$

$$F_2 = \tanh(\text{arg}_2^2) \quad \text{arg}_2 = \max \left( 2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega} \right)$$

## 6. Transfert thermique :

### 6.1 Définition :

Un transfert thermique, appelé plus communément chaleur, est, avec le travail, l'un des modes d'échange d'énergie interne entre deux systèmes. C'est une notion fondamentale de la thermodynamique. On distingue trois types de transfert thermique, qui peuvent coexister : conduction, convection et rayonnement.

### 6.2 Les différents modes de transmission de la chaleur :

#### 6.2.1 La conduction :

Transmission provoqué par la différence de température entre deux régions d'un milieu en contact physique. Il n'y a pas de déplacement appréciable des atomes ou molécules.

Dans le cas d'un champ de températures à une dimension :

$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad \text{ou} \quad q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2-43)$$



A : surface perpendiculaire au flux thermique

$\lambda$  : Conductivité thermique du matériau

$\frac{dT}{dx}$  : Le gradient de température au point x considéré, c'est à dire la variation de la température par unité de longueur dans la direction x

- Le signe moins : le flux de chaleur est positif quand la température diminue avec x

### 6.2.2 La convection :

Transmission provoquée par le déplacement d'un fluide (liquide ou gazeux).

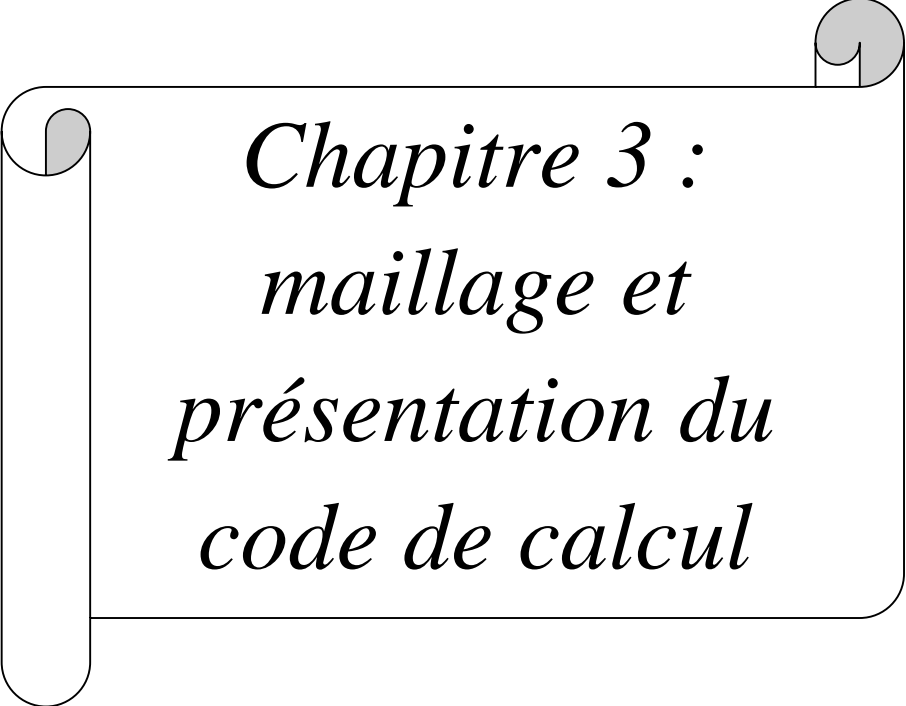
### 6.2.3 Le rayonnement :

Transmission provoqué par la différence de température entre deux corps sans contact physique, mais séparés par un milieu transparent tel que l'air ou le vide. Il s'agit d'un rayonnement électromagnétique. [32]

## 7. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté les géométries du problème (configuration en ligne, configuration en quinconce), ensuite on a mentionné les équations de base de la mécanique des fluides (l'équation de conservation de la masse, l'équation de conservation de la quantité de mouvement et l'équation de conservation de l'énergie) en coordonnées cartésiennes et sphériques.

Après, on a défini les conditions aux limites de ce problème, on a présenté les modèles de turbulences (Famille de RANS) et précisant le modèle que nous allons utiliser dans cette simulation (modèles k- $\omega$  SST), on a défini également le transfert thermique et ses modes de transmission.



*Chapitre 3 :  
maillage et  
présentation du  
code de calcul*

## 1. Introduction :

Pour dire qu'on a pu résoudre le problème de simulation numérique, il faut bien définir les conditions aux limites de ce problème et assurer une bonne résolution bonne une qualité des éléments et de maillage (il n'y a pas de vide entre les couches, augmenter le nombre total des éléments pour avoir des bons résultats). Pour atteindre ce but, plusieurs logiciels CFD sont disponibles, dans notre cas on a choisi le logiciel ANSYS Workbench et on va introduire le code de calcul fluent qui peut à son tour nous assurer un maillage fin dans la couche limite des sphères combustibles, donner une bonne résolution au niveau de cette couche et une bonne simulation de produit avec un faible potentiel d'erreur ce qui permet d'accélérer le rythme de production.

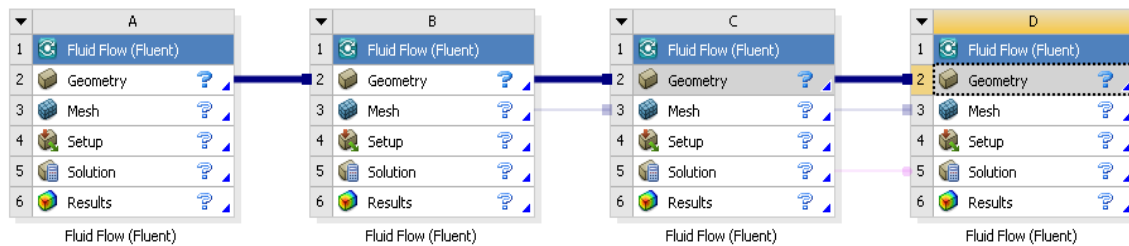
Il sert à quoi ce logiciel, comment on va l'utiliser (création de géométrie - nomination des surfaces - maillage) et comment afficher les résultats des calculs, c'est ce qu'on va découvrir dans ce chapitre.

## 2. Le logiciel ANSYS WORKBENCH :

ANSYS Workbench est le résultat de 40 années de développement et d'acquisitions. La capacité de son meilleur intégré et la robustesse de ses solveurs font d'ANSYS le logiciel le plus efficace du marché, autant pour les débutants que pour les utilisateurs confirmés. De la mécanique des structures statiques et la simulation des effets dynamiques à l'optimisation des paramètres et de la topologie, l'utilisateur ANSYS peut représenter sa tâche, la résoudre, améliorer la conception et minimiser les erreurs. L'uniformité des workflows et l'automatisation accélèrent et simplifient le processus de simulation.

WORKBENCH est une plateforme qui vous permet de réaliser toutes les étapes de la simulation dans une interface unique et de connecter les différents modules et physiques associés (fluides, thermique, structure...). La simplicité de son interface graphique vous permettra de gagner du temps et d'accroître votre productivité.

On effectue toutes les étapes de la simulation dans une interface unique simple d'utilisation : conception, préparation de la géométrie, maillage, résolution, analyses des résultats et optimisation.



**Figure (3-1)** : Création de la simulation sous workbench

L'analyse par éléments finis est une représentation mathématique d'un système physique comprenant une pièce / un assemblage (modèle), des propriétés de matériau et des conditions aux limites applicables {collectivement appelées prétraitement}, la solution de cette représentation mathématique {résolution} et l'étude des résultats de cette solution {post-traitement}. Des formes simples et des problèmes simples peuvent être et sont souvent réalisés à la main. La plupart des pièces et assemblages du monde réel sont beaucoup trop complexes pour être exécutés avec précision, et encore moins rapidement, sans l'utilisation d'un ordinateur et d'un logiciel d'analyse approprié. [29]

ANSYS Workbench nous permet de communiquer avec l'essentiel des logiciels de CAO (conception assistée par ordinateur) et de créer une associativité en temps réel. Les modifications géométriques sont directement mises à jour dans votre modèle pour un gain de temps énorme.

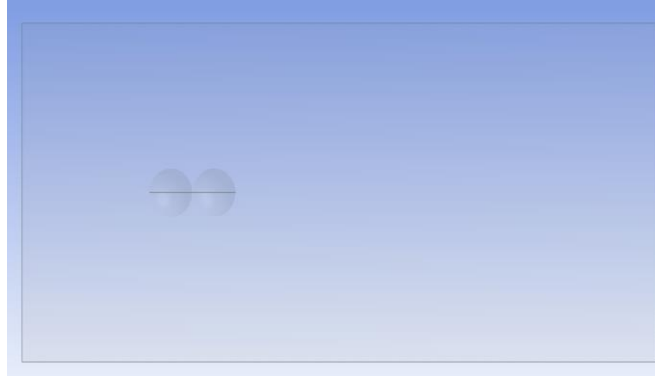
Avec ses solveurs spécifiques, ANSYS couvre la plupart des domaines physiques : Mécanique des structures, Mécanique des fluides, Thermique, Electromagnétisme et Multi-physiques.

### 3. Création des géométries :

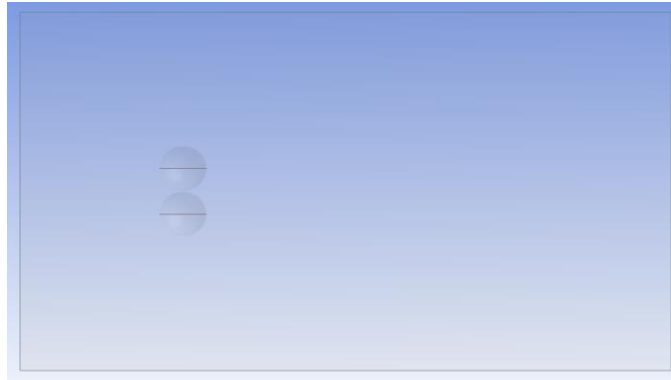
La présente étude qui sera menée, en utilisant un code de calcul CFD (computational fluid dynamics), établira les principales performances pour deux sphères combustibles qui représenteront une configuration en ligne et une configuration en quinconce. Par la création d'un projet {fluide flow (fluent)} on a effectué la géométrie de notre problème.

En premier lieu, on a créé les deux sphères dans un tunnel de section rectangulaire et on a ajouté des plans pour couper les sphères en deux parties égales. Ensuite on a extrudé l'ensemble, on a activé la fonction "boolean" puis on les a freeze.

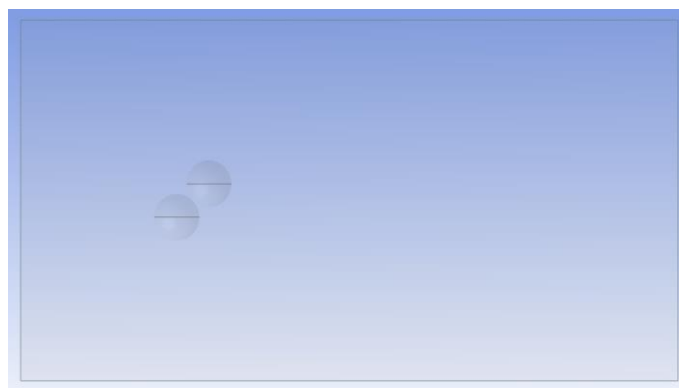
Pour les configurations en ligne et en quinconce : la première, les deux sphères seront disposées verticalement puis horizontalement. Pour la seconde, on fait un écart de  $15^\circ$  à chaque fois entre les deux sphères c'est à dire un décalage de  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $75^\circ$ .



**Figure (3-2)** : Vu de face de la configuration pour l'angle  $0^\circ$  (disposition horizontale)



**Figure (3-3)** : Vu de face de la configuration pour l'angle  $90^\circ$  (disposition verticale)



**Figure (3-4)** : Vu de face de la configuration pour l'angle  $45^\circ$

## 4. Nomination des surfaces :

La nomination des surfaces sert à donner accès pour :

1. déterminer les conditions aux limites (exp : la pression, la température et la vitesse pour "inlet", la température des deux sphères)
2. Obtenir les résultats des quantités physiques surtout les résultats surfaciques (la contrainte de cisaillement et le nombre de NUSSELT surfacique)
3. Déterminer les conditions et la qualité du maillage (dans notre cas on n'est pas vraiment intéressé par la qualité de maillage du tunnel autant qu'on est intéressé par la qualité de maillage autour des deux sphères).

Les surfaces sont nommées comme suit :

**Tableau (3-1) :** Nature des surfaces

Surface	Nature
Entrée	Velocity inlet
Sortie	Pressure outlet
Sphères 1	Wall
Sphères 2	Wall
Sphères 3	Wall
Sphères 4	Wall
Conduite	Symmetry

## 5. Maillage :

### 5.1. Génération de maillage :

**Tableau (3-2) :** Paramètres du maillage

Ordre des éléments	Linéaire
Taille des éléments généraux	0.005 m
Taille des éléments de la couche limite	0.0009 m
Facteur d'agrandissement	1.2
Nombre des nœuds	730427
Nombre des éléments	3507136

### 5.1.1 Option d'inflation :

Les paramètres Option d'inflation déterminent les hauteurs des couches d'inflation. L'inflation est utile pour la résolution de la couche limite CFD, la résolution de l'entrefer électromagnétique ou la résolution concentrations de contraintes élevées pour les structures.

**Tableau (3-3) :** Détails d'inflation

Option d'inflation	Transition en douceur
Rapport de transition	Default (0,272)
Couche maximum	4
Taux de croissance	1,2

#### 5.1.1.1 Rapport de transition (transition ratio) :

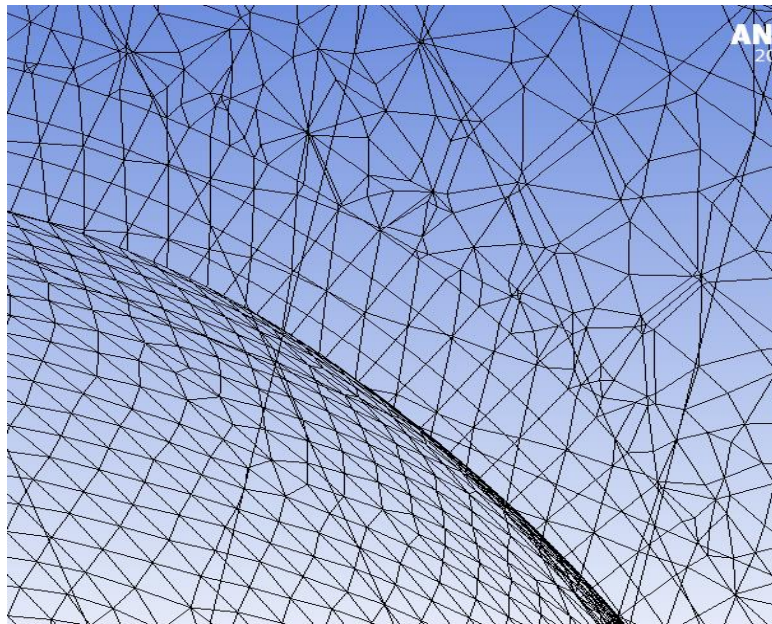
En termes simples, la commande de rapport de transition détermine la vitesse à laquelle les éléments adjacents se développent. Le changement de taille est basé sur le volume entre la dernière couche d'éléments de la couche de gonflage et la première couche d'éléments dans la région tétraèdre (ou région hexaèdre pour le maillage CutCell). La valeur du ratio de transition est une valeur idéale et devrait produire un changement de taille précis pour l'inflation à partir d'une frontière plane. Cependant, sachez que les zones de forte courbure introduiront une imprécision dans le changement de taille. Si la détection de proximité est activée, les éléments à proximité et les éléments avec les rapports hauteur / largeur (aspect ratio) du prisme correspondant à la valeur définie par la commande Hauteur maximale sur la base ignorent ce rapport de transition.

La commande Taux de transition n'est applicable que lorsque l'option d'inflation est transition en douceur. Les valeurs valides pour le rapport de transition sont comprises entre 0 et 1. Lorsque la préférence physique est définie sur CFD et la préférence du solveur est définie sur CFX (logiciel ANSYS permet d'effectuer des simulations en matière de mécanique des fluides

), La valeur par défaut du taux de transition est de 0,77. Pour toutes les autres physiques préférences, y compris CFD lorsque la préférence du solveur est définie sur Fluent ou Polyflow, la valeur par défaut est de 0,272. [30]

### 5.1.1.2 Couches maximum (Maximum layers) :

La commande Maximum Layers détermine le nombre maximum de couches d'inflation à créer dans le maillage. Les valeurs valides sont comprises entre 1 et 1000. La valeur par défaut est 5 pour les corps solides et 2 pour les corps surfaciques. Si vous définissez un nombre de couches maximum différent sur les régions adjacentes, la marche en escalier sera utilisée entre les régions. La commande Nombre maximum de couches est applicable uniquement lorsque l'option d'inflation est transition en douceur, épaisseur de la première couche, premier rapport hauteur / largeur (aspect ratio) ou dernier rapport hauteur / largeur (aspect ratio). [30]

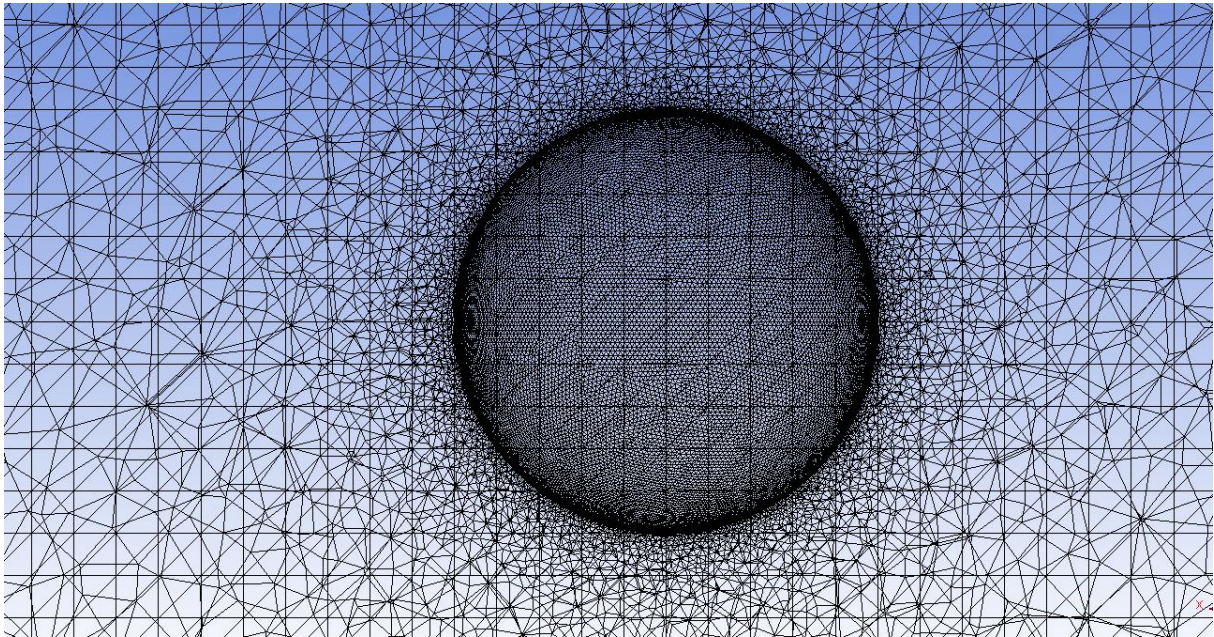


**Figure (3-5) :** Nombre maximum des couches (4)

### 5.1.1.3 Taux de croissance (growth rate) :

La commande Taux de croissance détermine l'épaisseur relative des couches d'inflation adjacentes. En bougeant à l'écart de la face sur laquelle le contrôle de gonflage est appliqué, chaque couche successive est approximativement un facteur de taux de croissance plus épais que le précédent. Les valeurs valides sont comprises entre 0,1 et 5,0. La valeur par défaut est 1,2. Le contrôle du taux de croissance n'est applicable que lorsque l'option d'inflation est transition en douceur, d'abord épaisseur de couche, épaisseur totale ou premier rapport hauteur / largeur. [30]





**Figure (3-6)** : Le contrôle du taux de croissance

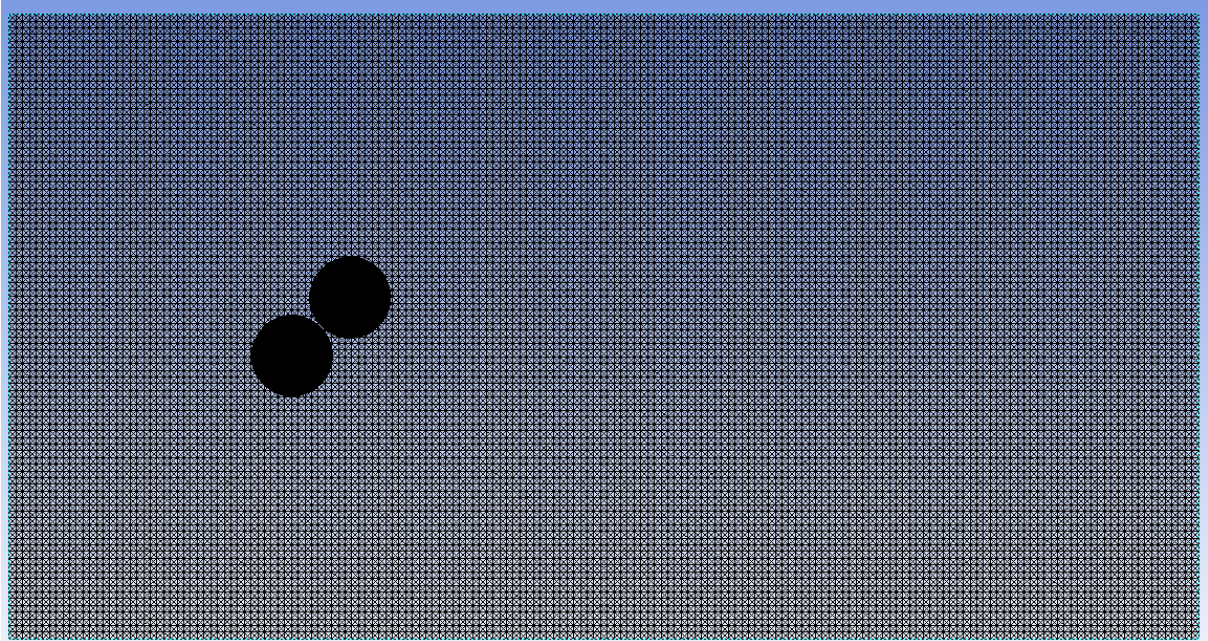
### **5.1.2. Algorithme de conformité de patch pour le contrôle de la méthode des tétraèdres (patch conforming algorithm for tetrahedrons method control) :**

La méthode de maille Tétra conforme au patch est une maille tétra de Delaunay avec un front de technique avancée d'insertion de points utilisée pour le raffinement du maillage. La méthode de maillage Tetra conforme au patch fournit:

- Prise en charge de l'inflation 3D.
- Couche pyramidale intégrée pour une transition quad-tet conforme.
- Contrôle intégré de la croissance et de la douceur. Le mailleur essaiera de créer une variation de taille lisse basée sur le facteur de croissance spécifié.
- Suppression des fonctionnalités sous une certaine taille (Mesh Defeaturing). [30]

### **5.1.3 Contrôle du maillage du visage (Face meshing control) :**

Les commandes de maillage de face vous permettent de générer un maillage libre ou mappé sur les faces sélectionnées. L'application du maillage détermine automatiquement un nombre approprié de divisions pour les arêtes sur la face de frontière. Si vous spécifiez le nombre de divisions sur l'arête avec une commande Dimensionnement, l'application Maillage tente d'appliquer ces divisions. [30]



**Figure (3-7)** : vue de face montrant le contrôle de maillage de visage

## 5.2. Critères de qualité de maillage :

Vérifier la qualité du maillage détermine le comportement du logiciel par rapport aux limites d'erreur et d'avertissement :

- Oui, erreurs (par défaut) - Si l'algorithme de maillage ne peut pas générer un maillage qui dépasse toutes les limites d'erreur, le message d'erreur est imprimé et le maillage échoue.
- Oui, erreurs et avertissements - Si l'algorithme de maillage ne peut pas générer un maillage qui dépasse toutes les limites d'erreur, un message d'erreur est imprimé et le maillage échoue. De plus, si l'algorithme de maillage ne peut pas générer un maillage qui dépasse toutes les limites d'avertissement (cible), un message d'avertissement est imprimé.
- Non - Les contrôles de qualité du maillage sont effectués à différentes étapes du processus de maillage (par exemple, après la surface maillage avant le maillage volumique). Le paramètre Non désactive la plupart des contrôles de qualité, mais certain la vérification est toujours effectuée. De plus, même avec le paramètre Non, les mesures de qualité cible sont toujours utilisées pour améliorer le maillage. Le paramètre Non est destiné au dépannage et doit être utilisé avec prudence car cela pourrait entraîner des échecs du solveur ou des résultats de solution incorrects. [30]

### 5.2.1 Qualité des éléments (element quality) :

L'option Qualité de l'élément fournit une métrique de qualité composite comprise entre 0 et 1. Cette métrique est basée sur le rapport du volume à la somme du carré des longueurs d'arête pour 2D quad / tri éléments, ou la racine carrée du cube de la somme du carré des longueurs d'arête pour éléments 3D. Une valeur de 1 indique un cube ou un carré parfait tandis qu'une valeur de 0 indique que l'élément a un volume nul ou négatif.

**Notre résultat = 0.81 →very good**

Cela peut également être exprimé comme suit:

- Pour les éléments bidimensionnels:

$$quality = C \left( area / \sum (Edgelen\theta)^2 \right)$$

- Pour les éléments en brique tridimensionnels:

$$quality = \left[ volume / \sqrt{[\sum (Edgelen\theta)^2]^3} \right]$$

### 5.2.2 Rapport Jacobien :

Il y en a deux :

- Rapport jacobien (nœuds d'angle), qui est limité par -1 (pire) et 1 (meilleur) sur le graphique à barres des mesures de maillage. Un élément avec un jacobien ratio  $\leq 0$  doit être évité.

**Notre résultat = 0.998**

- Le rapport Jacobien (MAPDL), qui est utilisé par le solveur MAPDL, est l'inverse du rapport Jacobien (nœuds d'angle). Le rapport Jacobien (MAPDL) est borné par l'infini négatif et l'infini positif, mais tous les éléments de valeur négative sont collectés et attribués arbitrairement la valeur -100 aux fins de la graphique à barres de mesures de

maillage. Un élément avec un rapport Jacobien  $\leq 0$  devrait être évité. Un ratio Jacobien dont la valeur est proche de 1 est le meilleur.

Notre résultat = 1.0014

**Nb :** Il existe deux façons de calculer le rapport Jacobien: soit en fonction des nœuds d'angle (points nodaux), soit basé sur des points de Gauss (points d'intégration).

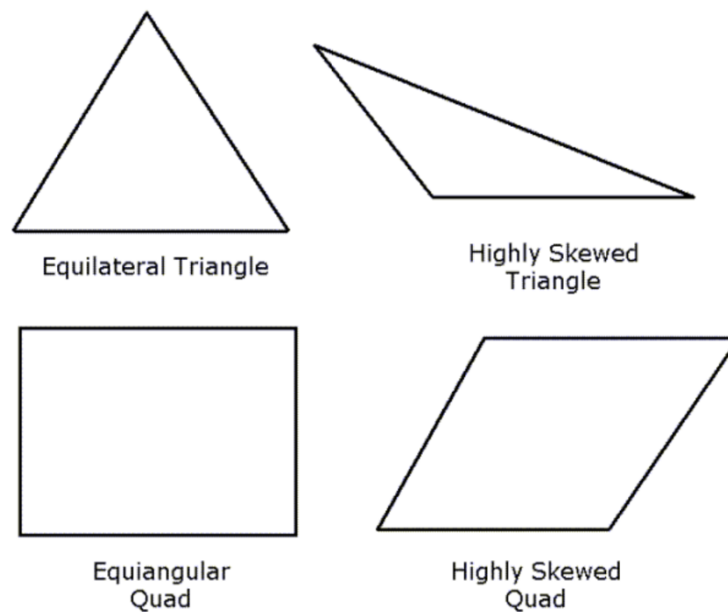
### 5.2.3 Asymétrie (skewness) :

Selon la définition de l'asymétrie, une valeur de 0 indique une cellule équilatérale (meilleure) et une valeur de 1 indique une cellule complètement dégénérée (pire). Deux méthodes pour mesurer l'asymétrie sont:

- Basé sur le volume équilatéral (s'applique uniquement aux triangles et tétraèdres).
- Basé sur l'écart par rapport à un angle équilatéral normalisé.

Cette méthode s'applique à toutes les cellules et formes de visage, y compris les pyramides et les prismes.

L'asymétrie est l'une des principales mesures de qualité d'un maillage. L'asymétrie détermine à quelle distance idéal (équilatéral ou équiangulaire) une face ou une cellule. [30]



**Figure (3-8) :** Triangles idéaux et obliques et Quadrilatères

Le tableau suivant répertorie la plage de valeurs d'asymétrie et la qualité de cellule correspondante :

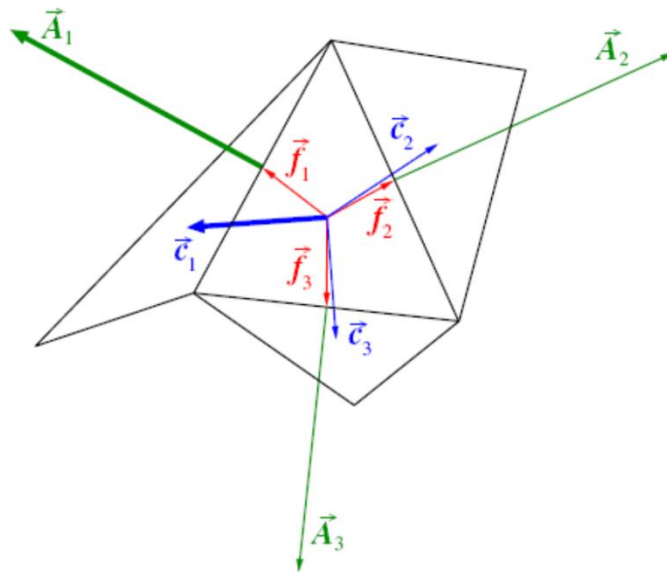
**Tableau (3-4) :** Valeurs d'asymétrie et la qualité de cellule correspondante

Valeur de l'asymétrie	Qualité de cellule
1	Degenerate
$0.9 - < 1$	Bad (silver)
$0.75 - 0.9$	Poor
$0.5 - 0.75$	Fair
$0.25 - 0.5$	Good
$> 0 - 0.25$	Excellent
0	Equilateral

Notre résultat = 0.21

#### 5.2.4 Qualité orthogonale (orthogonal quality) :

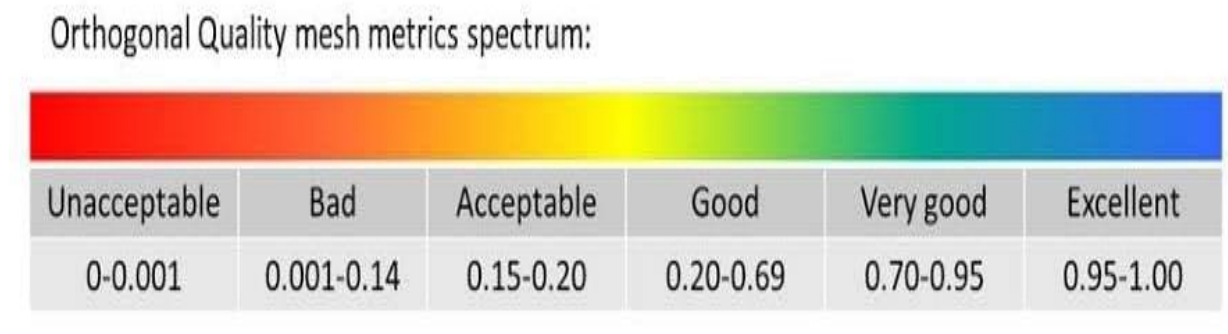
La plage de qualité orthogonale est de 0 à 1, où une valeur de 0 est la pire et une valeur de 1 est la meilleure. La qualité orthogonale des cellules est calculée à l'aide du vecteur normal de face  $\vec{A}_i$ , pour chaque face; les vecteur du centre de gravité de la cellule au centre de gravité de chacune des cellules adjacentes  $\vec{c}_i$  et le vecteur du centre de gravité de la cellule par rapport à chacune des faces  $\vec{f}_i$  comme montre la figure ci-dessous.



**Figure (3-9) :** Vecteurs utilisés pour calculer la qualité orthogonale d'une cellule

Enfin, la qualité orthogonale dépend du type de cellule: Pour les cellules tétraédriques, prismatiques et pyramidales, la qualité orthogonale est le minimum de l'orthogonalité et (asymétrie à 1 cellule).

Pour les cellules hexaédriques et polyédriques, la qualité orthogonale est la même que l'orthogonalité. [30]



**Figure (3-10)** : Critère de qualité orthogonale

Notre résultat = 0.788

## 6. Le solveur : application avec le code Fluent

### 6.1. Présentation du code Fluent :

Fluent est un programme informatique conçu pour la simulation des écoulements de fluide et du transfert de chaleur dans des géométries complexes. Il présente une grande flexibilité des résultats et une adaptation avec n'importe quel type de maillage. Il permet le raffinement du maillage en fonction des conditions aux limites, des dimensions et même des résultats déjà obtenues. Cela est très utile dans la région à gradients importants (couches limites, couches à cisaillement libre).

Fluent écrit en langage C, il emploie toute la flexibilité et la puissance qu'offre ce langage. Il utilise l'architecture serveur client nécessaire au calcul parallèle sur plusieurs machines. Fluent dispose d'un outil de graphisme pour l'affichage des résultats et leur exploitation. On peut aussi exporter les résultats vers un autre logiciel de graphisme, et l'option UDF (user defined functions) permet de résoudre des équations additionnelles ou des termes sources additionnelles définies par l'utilisateur. [31]

## 6.2. La méthode des volumes finis :

Le code Fluent utilise la méthode des volumes finis pour discrétiser les équations de transport.

Dans cette méthode, on intègre des équations de conservation que l'on applique sur chaque volume de contrôle élémentaire. A partir des variables connues aux centres des volumes, on évalue les flux aux surfaces des volumes par interpolation. La grille est a priori quelconque, permettant ainsi de traiter des écoulements à géométrie complexe. Cette méthode donne de très bon résultat car elle garantit la conservation des bilans massique et thermique sur tout le domaine étudié. [31]

## 6.3. Conditions aux limites :

Pour les conditions aux limites, il faut bien définir :

- la température, la vitesse et la pression pour la section d'entrée.
- l'hélium comme fluide de refroidissement.
- les sphères en graphite avec leur propre température.

Dans ce cas, le débit et la température d'entrée sont ceux d'un HTR-PM et la vitesse est déduite du débit.

Nos conditions aux limites sont mentionnées dans les tableaux suivants :

**Tableau (3-5)** : Propriétés de gaz et de graphite avec les conditions aux limites

	Hélium	Les sphères combustibles
$\mu$ (kg/ms)	$1,99 \cdot 10^{-5}$	
$C_p$ (J/kg.k)	5193	1690
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	0,1625	1750
$k$ (W/m.k)	0,152	25
$v$ (m/s)	6,123	
$r$ (J/kg.k)	2077,5	

**Tableau (3-4) :** Conditions aux limites

Zone	Température (k)	Pression (Pa)	Nbre de Reynolds	Intensité de turbulence (%)
Inlet (entrée)	523,15	1013	3000	5%
Sphères	1328,15	-	-	-
Outlet (sortie)	-	0	-	-

#### 6.4. Choix des critères de convergence :

Pour arriver à des résultats bien précis, il faut diminuer les valeurs critiques de convergence le plus possible pour les différentes quantités physiques (la continuité, k, l'énergie ....) Comme montre le tableau ci-dessous (tableau 3-5) afin de minimiser le pourcentage d'erreur.

**Tableau (3-6) :** Critères d'arrêt

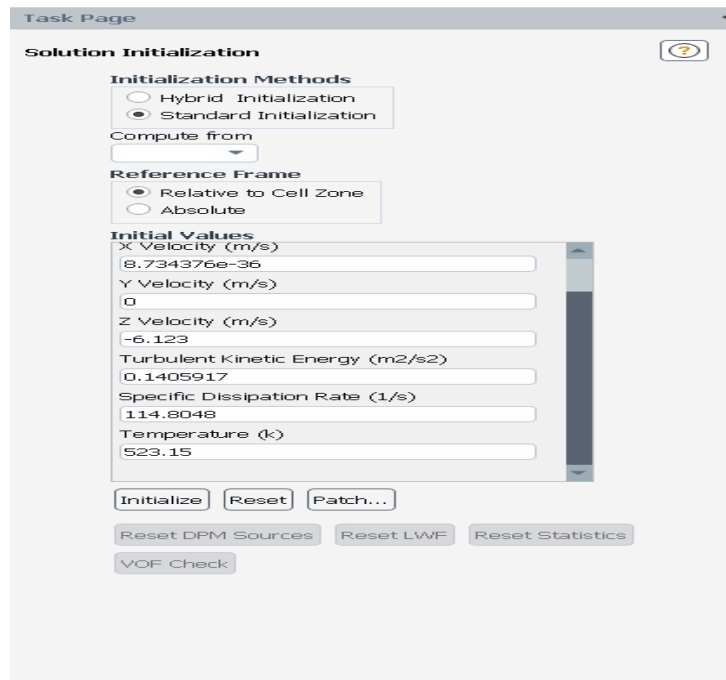
Continuité	$10^{-5}$
K	$10^{-5}$
$\omega$	$10^{-5}$
Energie	$10^{-6}$
$V_x$	$10^{-5}$
$V_y$	$10^{-5}$
$V_z$	$10^{-5}$
Nombre max d'itérations	1000

#### 6.5. Initialisation des calculs :

Avant de simuler le cas, nous fournirons des conditions aux limites qui initialiseront le débit avec la valeur respective sur cette limite, comme la vitesse d'entrée est de 5 m / s et la pression de sortie est la pression atmosphérique. Mais quelle sera la valeur sur le domaine fluide (intérieur)? Si aucune valeur n'est fournie, comment effectuer le calcul avec les cellules vides? Pour ces raisons, les valeurs supposées des paramètres physiques sont initialisées dans tout le domaine par diverses méthodes. L'initialisation peut également nous aider à atteindre la



convergence plus rapidement en fournissant une valeur approximative proche du résultat attendu de sorte qu'elle n'affecte pas la simulation.

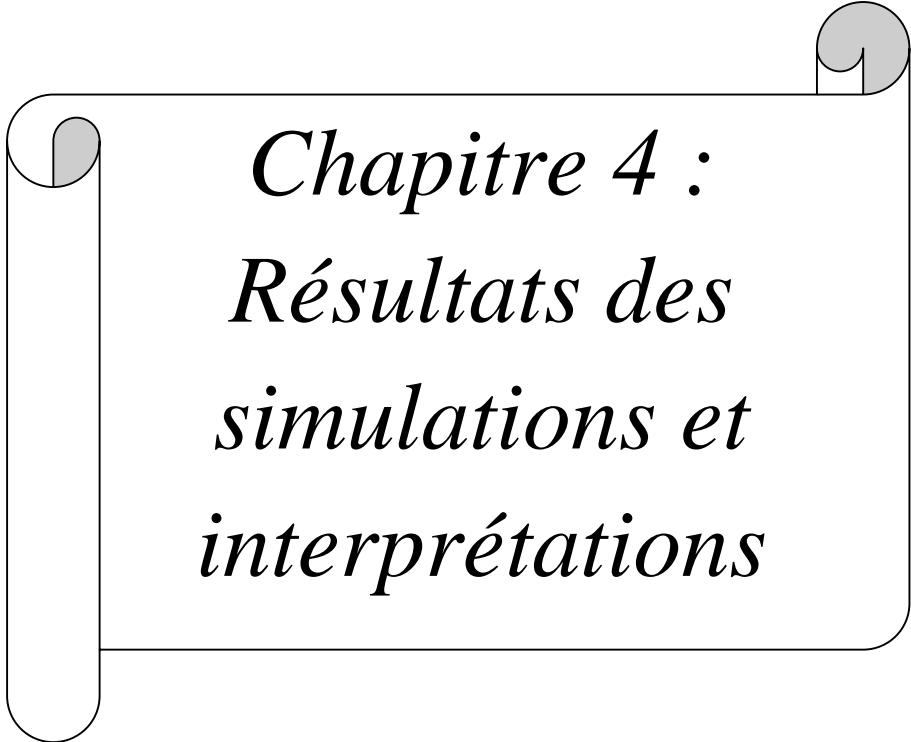


**Figure (3-11)** : l'étape de l'initialisation

## 7. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté le logiciel ANSYS WORKBENCH. On a choisi le mode de calcul FLUENT comme outils pour notre problématique qui modélise par la méthode des volumes finis les écoulements des fluides. Avant de lancer les calculs, il faut bien définir toutes les données y compris les conditions aux limites et les critères d'arrêt.

Ce chapitre a mis la plateforme la plus correcte possible pour assurer un maillage assez raffiné avant de lancer les simulations.



*Chapitre 4 :  
Résultats des  
simulations et  
interprétations*

## 1. Introduction :

Dans le présent chapitre, les résultats obtenus par les simulations numériques sont présentés. L'évolution des quatre quantités ou grandeurs physiques (la pression, la contrainte de cisaillement, le nombre de NUSSELT surfacique et le coefficient de convection surfacique) est étudié pour deux configurations en ligne à  $0^\circ$  et  $90^\circ$  et pour deux configurations en quinconce à  $45^\circ$  et  $-45^\circ$ . L'ensemble des résultats obtenus se font pour un nombre de Reynolds fixe de 3000. Nous allons aussi faire une étude de sensibilité de maillage.

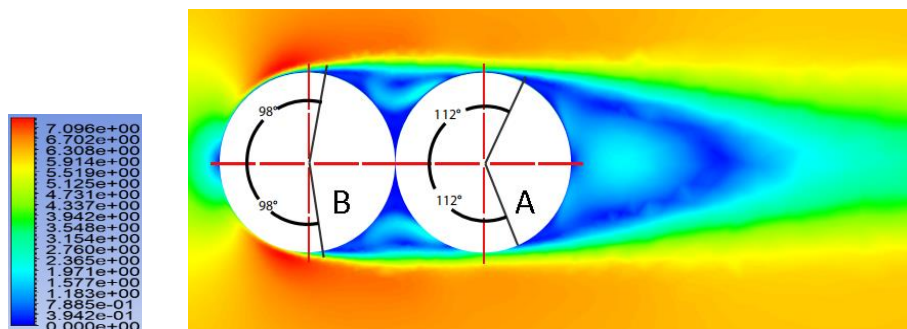
Les données numériques ont été présentées. Les simulations sont réalisées avec une vitesse du fluide à l'entrée de 6.123 m/s pour un débit de  $\text{m}^3/\text{s}$  et une température du fluide de 523.15 k.

## 2. Résultats des simulations de l'écoulement de gaz autour des deux sphères :

Les résultats des simulations de l'écoulement de l'hélium autour des deux sphères combustibles pour deux configurations en ligne à  $0^\circ$  et  $90^\circ$  et pour deux configurations en quinconce à  $45^\circ$  et  $-45^\circ$  sont présentés par : la pression totale, la contrainte de cisaillement, le nombre de NUSSELT surfacique et le coefficient de convection surfacique.

### 2.1 Configuration en ligne :

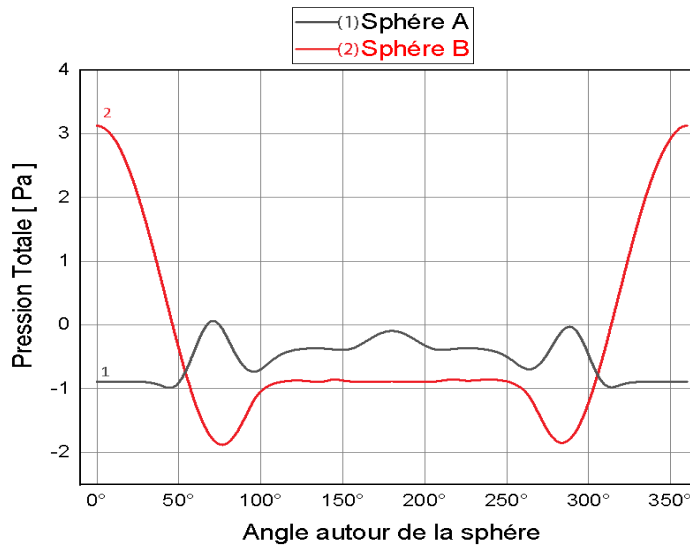
#### 2.1.1 Configuration en ligne à $0^\circ$ :



La figure (4-1) : le champ des vitesses autour des deux sphères combustibles en ligne à  $0^\circ$ .

#### 2.1.1.1 Analyse des résultats obtenus pour chaque sphère (cas $0^\circ$ ) :

- Evolution de la pression totale :



**La figure (4-2) :** Evolution de la pression totale de disposition en ligne à 0°.

**-Pour la sphère A :**

On remarque que la pression totale est minimale de -0,9 Pa à l'angle 0° à cause de la présence d'un obstacle (la sphère B) et reste stable à peu près à cette valeur jusqu'à l'angle de 48° où elle augmente pour atteindre une valeur maximale de 0 Pa à 70° car là où le fluide a commencé à affecter sur la paroi. Ensuite, elle diminue vers -0,7 à l'angle de 90° parce que le fluide prend la forme de la surface sphérique, puis il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle 180° par la présence des turbulences.

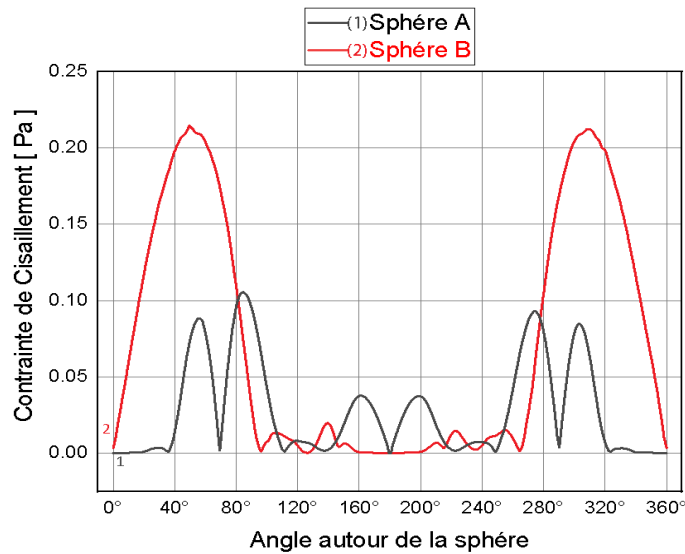
Dans la deuxième partie (360° -180°) le graphique est symétrique à celui de la première partie (0°-180°).

**-Pour la sphère B :**

On remarque que la pression totale commence par une valeur maximale de 3,2 Pa car en amont sera toujours maximale, et elle diminue vers une valeur minimale de -1,8 à l'angle de 75° car le fluide prend la forme de la surface sphérique. Ensuite, elle augmente un peu vers -0,9 à 108° puis il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle 180° par la présence des turbulences.

Dans la deuxième partie (360° -180°) le graphique est symétrique à celui de la première partie (0°-180°).

• Evolution de la contrainte de cisaillement :



**La figure (4-3)** : Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en ligne à 0°.

**-Pour la sphère A :**

On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0.003 Pa et reste stable jusqu'à l'angle de 38° à cause de la présence d'un obstacle (la sphère B) où elle augmente en deux pic dont un est maximale de 0.0115 à l'angle de 84° là où le fluide a commencé à affecter sur la paroi. Après, elle diminue vers 0 Pa à l'angle 112° qui représente l'angle de décollement. Le tracé subit des perturbations jusqu'à 180° par la présence des turbulences .

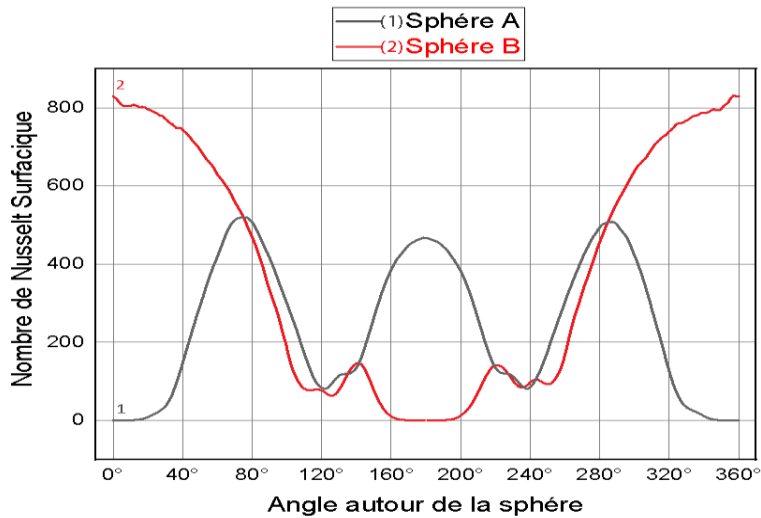
Dans la deuxième partie (360° -180°) le graphique est symétrique à celui de la première partie (0°-180°).

**-Pour la sphère B :**

On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0.007 Pa ensuite elle augmente vers 0.22 Pa à un angle de 53° à cause de l'augmentation du frottement de fluide à la surface de la sphère, après elle diminue vers 0 à l'angle 98° qui représente l'angle de décollement. Le tracé subit des perturbations jusqu'à 180° par la présence des turbulences.

Dans la deuxième partie (360° -180°) le graphique est symétrique à celui de la première partie (0°-180°).

- Evolution du nombre de NUSSELT surfacique :



La figure (4-4) : Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en ligne à 0°.

**-Pour la sphère A :**

À l'angle de 0°, le nombre de NUSSELT est nul et ne commence de s'élever qu'à partir de l'angle de 18° pour prendre une valeur maximale de 520 à l'angle de 75° car l'application du fluide sur la sphère est augmenté par l'augmentation des frottements. Ensuite, il diminue vers sa valeur minimale de 90 à 120° car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Puis il augmente vers 480 à 180° par la présence des turbulences.

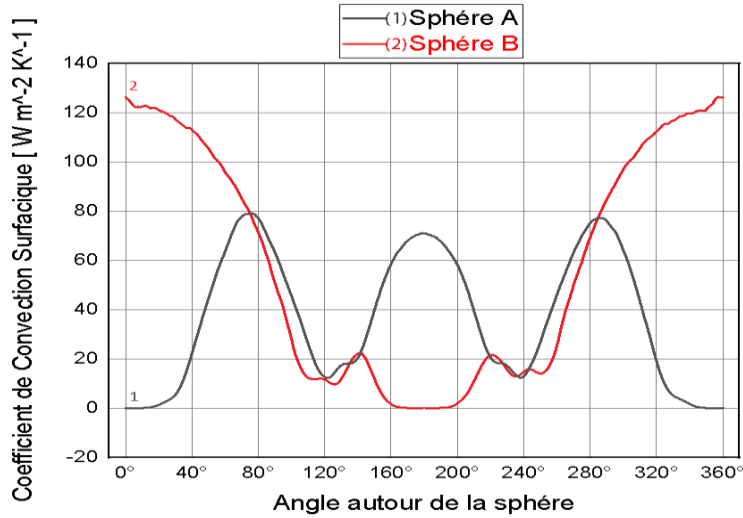
Dans la deuxième partie (360° -180°) le graphique est symétrique à celui de la première partie (0°-180°).

**-Pour la sphère B :**

Pour un angle de 0°, le nombre de NUSSELT prend une grande valeur de 830 puisque le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k, ensuite il descend vers une valeur de 95 à 126° car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après, il augmente un peu et descend encore pour s'annuler cette fois à l'angle 163° et reste nul jusqu'à l'angle de 180° par la présence d'un obstacle (la sphère A).

Dans la deuxième partie (360° -180°) le graphique est symétrique à celui de la première partie (0°-180°).

- Evolution du coefficient de convection surfacique :

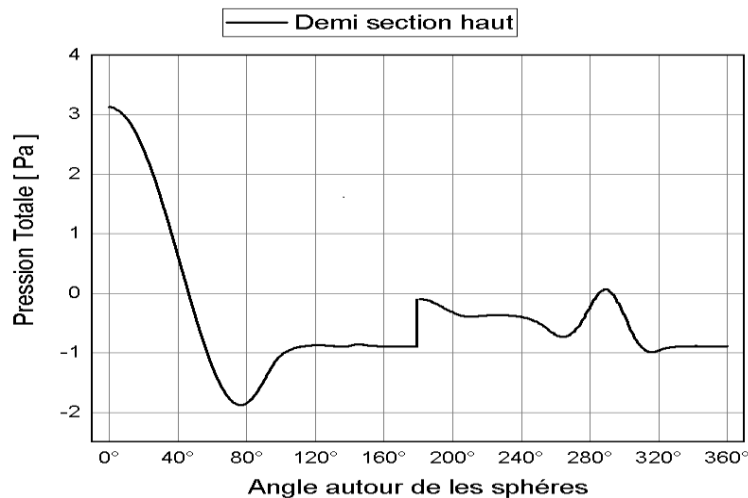


**La figure (4-5)** : Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en ligne à  $0^{\circ}$ .

Il faut mentionner que les mêmes commentaires cités auparavant pour le nombre de NUSSELT surfacique restent valables pour le coefficient de convection surfacique.

### 2.1.1.2 Analyse des résultats obtenus pour chaque demi-section (cas $0^{\circ}$ ) :

- Evolution de la pression totale :



**La figure (4-6)** : Evolution de la pression totale de disposition en ligne à  $0^{\circ}$  par section

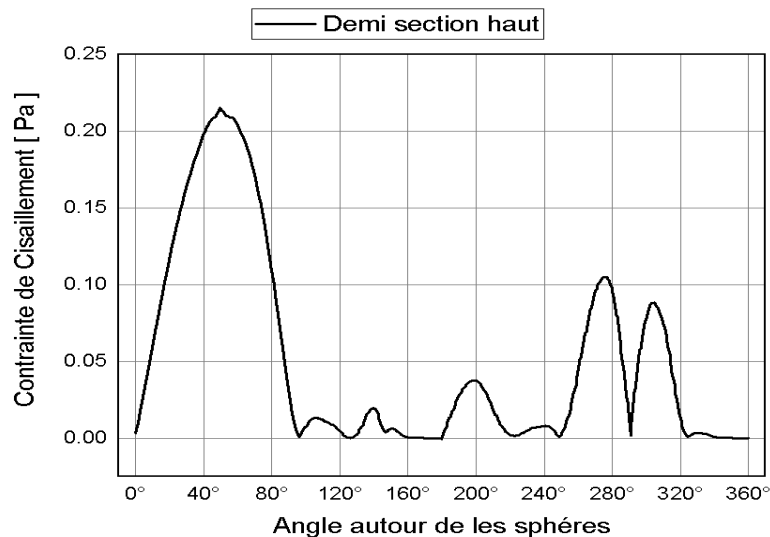
### -Pour la demi-section haute :

On remarque que la pression totale commence par une valeur maximale de 3,2 Pa car en amont sera toujours maximale, et elle diminue vers une valeur minimale de -1,8 Pa à l'angle de 75° car le fluide prend la forme de la surface sphérique. Ensuite, elle augmente un peu vers -0.9 Pa à 108°, il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle 180° par la présence des turbulences. Après, et à cet angle, elle augmente tout localement vers -0.05 Pa et continue par des hauts et bas discrets jusqu'à 360°.

### -Pour la demi-section basse :

Le graphique est identique à celui de la demi-section haute.

- **Evolution de la contrainte de cisaillement :**



**La figure (4-7) :** Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en ligne à 0° par section.

### -Pour la demi-section haute :

On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0.003 Pa ensuite elle augmente vers 0.22 Pa à un angle de 53° à cause de l'augmentation du frottement de fluide à la surface de la sphère, ensuite elle diminue vers 0 à l'angle 98° qui représente l'angle de décollement. Le tracé subit des perturbations jusqu'à 180°. La contrainte de cisaillement augmente vers 0.04 Pa à 200° et diminue vers 0 à l'angle 248° qui représente l'angle de

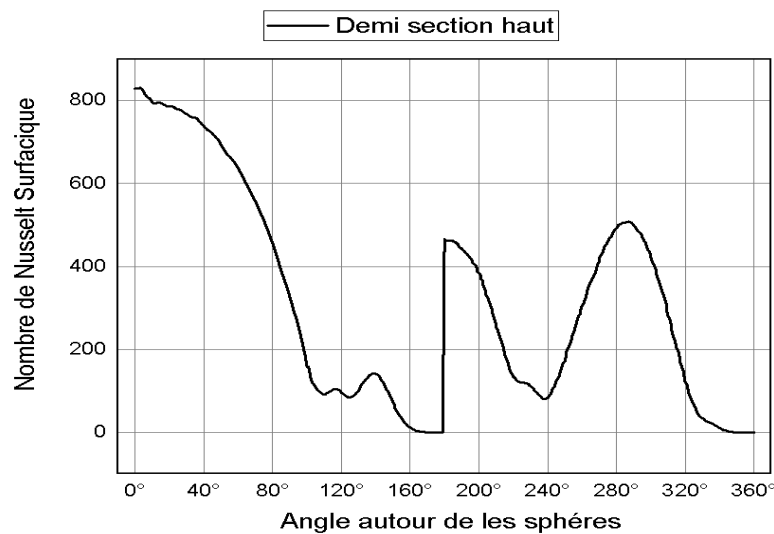


décollement. Elle augmente en deux pic, un vers 0.11 Pa à  $277^\circ$  et l'autre vers 0.085 Pa à  $308^\circ$  là où le fluide a commencé à affecter sur la paroi, puis elle diminue jusqu'à l'angle de  $360^\circ$ .

**-Pour la demi-section basse :**

Le graphique est identique à celui de la demi-section haute.

- **Evolution du nombre de NUSSELT surfacique :**



**La figure (4-8) :** Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en ligne à  $0^\circ$  par section.

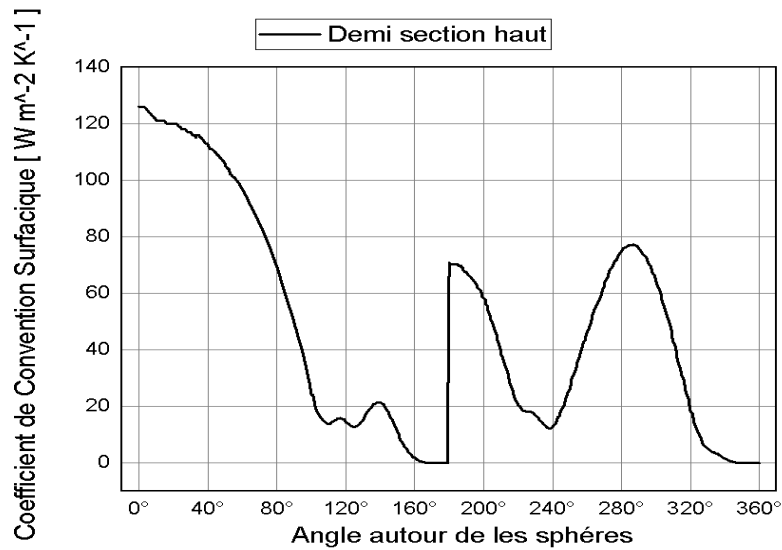
**-Pour la demi-section haute :**

Pour un angle de  $0^\circ$ , le nombre de NUSSELT prend une grande valeur de 830 puisque le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k, ensuite il descend vers une valeur de 95 à  $126^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Il augmente un peu et descend encore pour s'annuler cette fois à l'angle  $168^\circ$  et reste nul jusqu'à l'angle de  $180^\circ$  par la présence d'un obstacle. Après, et à cet angle, il augmente tout localement vers 480 et aussi vers 520 à  $288^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère est augmenté par l'augmentation des frottements. Enfin, il diminue car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements pour arriver nul à  $360^\circ$ .

**-Pour la demi-section basse :**

Le graphique est identique à celui de la demi-section haute.

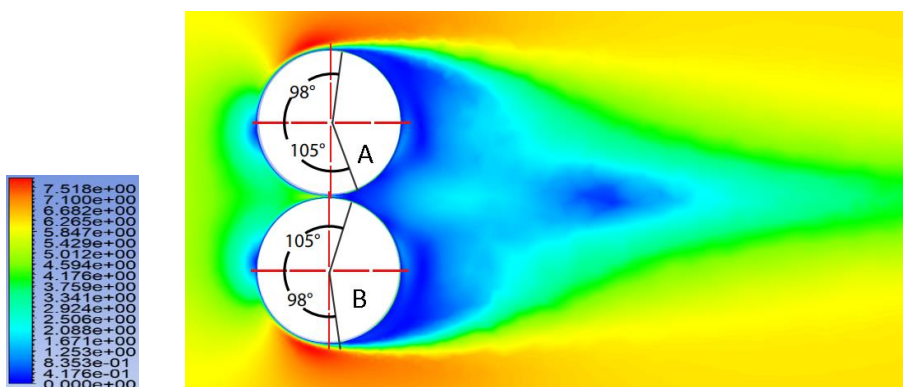
- Evolution du coefficient de convection surfacique :



**La figure (4-9)** : Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en ligne à  $0^\circ$  par section.

Il faut mentionner que les mêmes commentaires cités auparavant pour le nombre de NUSSELT surfacique restent valables pour le coefficient de convection surfacique.

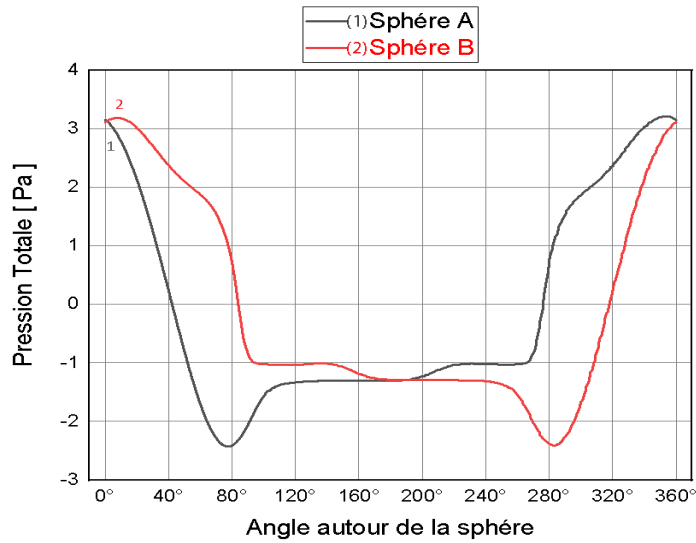
### 2.1.2 Configuration en ligne à $90^\circ$ :



**La figure (4-10)** : Le champ des vitesses autour des deux sphères combustibles en ligne à  $90^\circ$ .

#### 2.1.2.1 Analyse des résultats obtenus pour chaque sphère (cas $90^\circ$ ) :

- Evolution de la pression totale :



**La figure (4-11)** : Evolution de la pression totale de disposition en ligne à 90°.

**-Pour la sphère A :**

On remarque que la pression totale est maximale de 3.18 Pa à l'angle 0° car en amont sera toujours maximale ensuite, elle diminue strictement pour atteindre une valeur minimale de -2,4 Pa à 77° car le fluide prend la forme de la surface sphérique. Ensuite, elle augmente légèrement vers -1,3 Pa à 100° à cause de l'apparition des turbulences et reste stable jusqu'à l'angle de 180°.

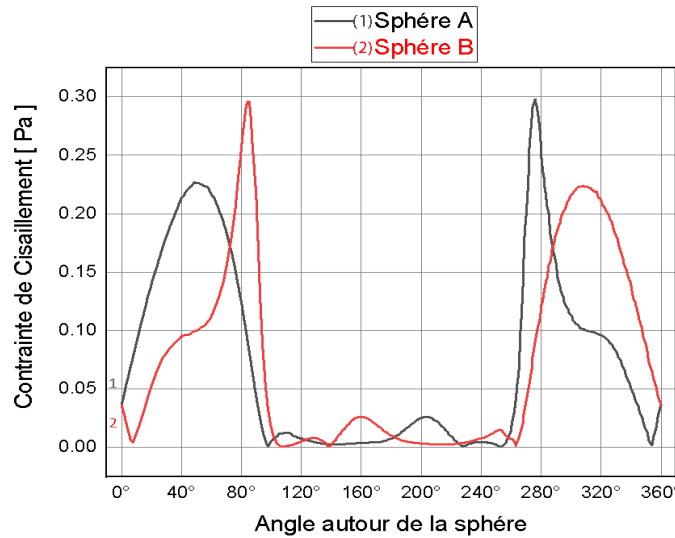
A l'angle 360°, la pression totale commence par une valeur maximale de 3.2 Pa car le fluide est toujours perpendiculaire au point de départ, et elle diminue vers -1 Pa à 267° parce que le fluide prend la forme de la surface sphérique, enfin il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle 180° par la présence des turbulences.

**-Pour la sphère B :**

De l'angle 0° à l'angle 180° : le graphique est identique à la partie 360°-180° de la sphère A.

De l'angle 360° à l'angle 180° : le graphique est identique à la partie 0°-180° de la sphère A.

• Evolution de la contrainte de cisaillement :



**La figure (4-12)** : Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en ligne à 90°.

**-Pour la sphère A :**

On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0.04 Pa ensuite elle augmente vers 0.225 Pa à un angle de 53° à cause de l'augmentation du frottement du fluide à la surface de la sphère, après elle diminue vers 0 à l'angle 98° qui représente l'angle de décollement. Le tracé subit des perturbations jusqu'à 180° par la présence des turbulences.

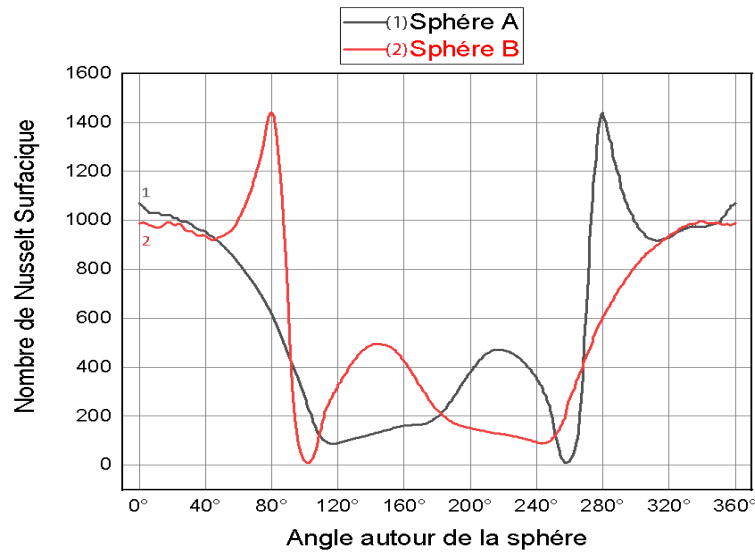
La contrainte de cisaillement prend la même valeur de départ à l'angle 360° ensuite elle augmente vers une valeur maximale de 0.29 Pa à 276° à cause de l'augmentation du frottement du fluide à la surface de la sphère, après elle diminue vers 0 Pa à l'angle 255° qui représente l'angle de décollement. Pour subir des perturbations jusqu'à l'angle 180° par la présence des turbulences.

**-Pour la sphère B :**

De l'angle 0° à l'angle 180° : le graphique est identique à la partie 360°-180° de la sphère A.

De l'angle 360° à l'angle 180° : le graphique est identique à la partie 0°-180° de la sphère A.

• Evolution du nombre de NUSSELT surfacique :



**La figure (4-13)** : Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en ligne à 90°.

**-Pour la sphère A :**

À l'angle 0°, le nombre de NUSSELT prend une grande valeur de 1060° puisque le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k, et diminue vers 100 à 116° car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements, et finis par augmentation discrète vers 200 à l'angle de 180° par la présence des turbulences.

Pour un angle de 360°, le nombre de NUSSELT prend une grande valeur de 1060 puisque le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k, ensuite il descend un peu pour augmenter à une valeur maximale de 1450 à l'angle 280° par la présence d'un obstacle qui fait augmenter l'application de l'hélium sur la paroi et par la suite l'augmentation des frottements en présence d'une haute pression . Après il diminue strictement vers 100 à 260° car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Pour augmenter encore vers 490 à 215° et il diminue finalement vers 200 pour l'angle de 180°, par la présence des turbulences.

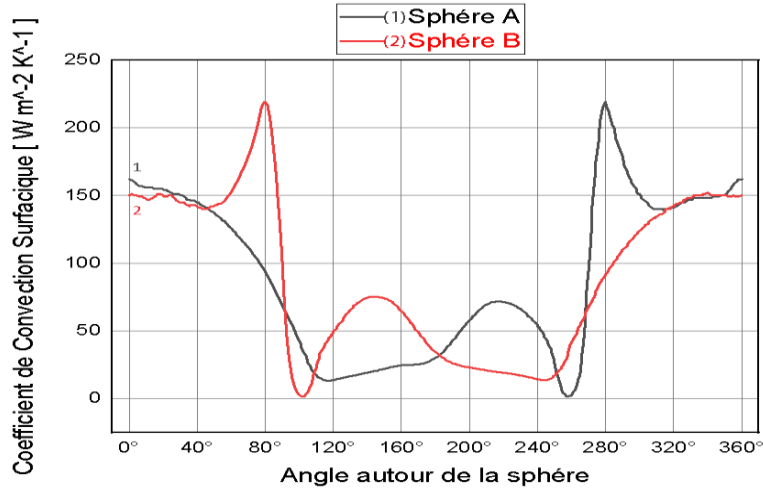
**-Pour la sphère B :**

De l'angle 0° à l'angle 180° : le graphique est identique à la partie 360°-180° de la sphère A.

De l'angle 360° à l'angle 180° : le graphique est identique à la partie 0°-180° de la sphère

A.

- Evolution du coefficient de convection surfacique :

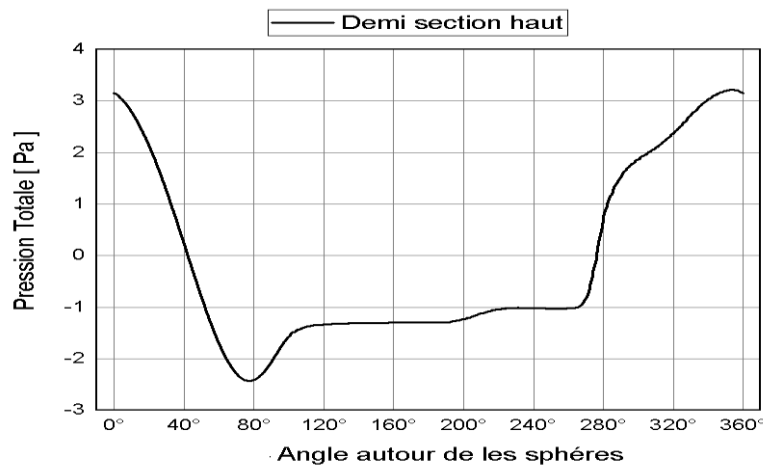


**La figure (4-14)** : Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en ligne à 90°.

Il faut mentionner que les mêmes commentaires cités auparavant pour le nombre de NUSSELT surfacique restent valables pour le coefficient de convection surfacique.

### 2.1.2.2 Analyse des résultats obtenus pour chaque demi-section (cas 90°) :

- Evolution de la pression totale :



**La figure (4-15)** : Evolution de la pression totale de disposition en ligne à 90°  
Par section.

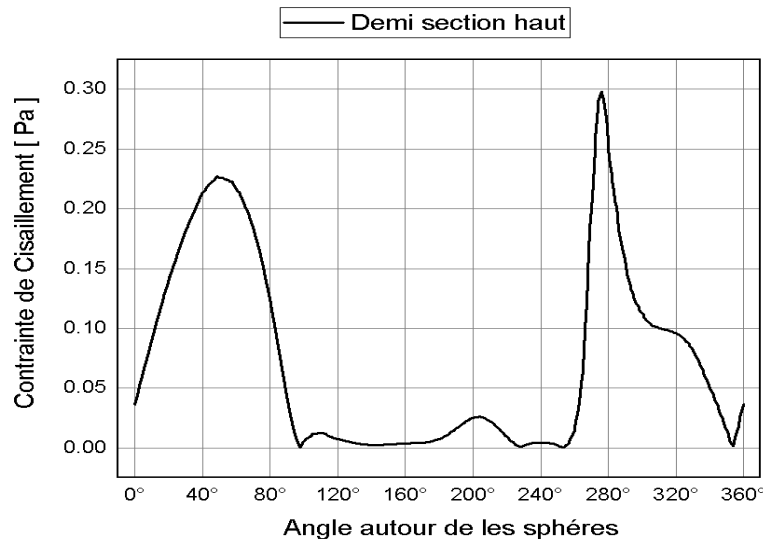
### -Pour la demi-section haute :

On remarque que la pression totale est maximale de 3.18 Pa à l'angle 0° car en amont sera toujours maximale ensuite, elle diminue strictement pour atteindre une valeur minimale de -2,4 Pa à 77° car le fluide prend la forme de la surface sphérique. Ensuite, elle augmente légèrement vers -1,3 Pa à 100° à cause de l'apparition des turbulences et reste stable jusqu'à l'angle de 180°. Après, elle augmente un peu et se stabilise à -1 Pa jusqu'à 267°. Elle augmente pour atteindre sa valeur maximale encore une fois à l'angle de 360°.

### -Pour la demi-section basse :

Le graphique est symétrique à celui de la demi-section haute.

- **Evolution de la contrainte de cisaillement :**



**La figure (4-16)** : Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en ligne à 90°  
Par section.

### -Pour la demi-section haute :

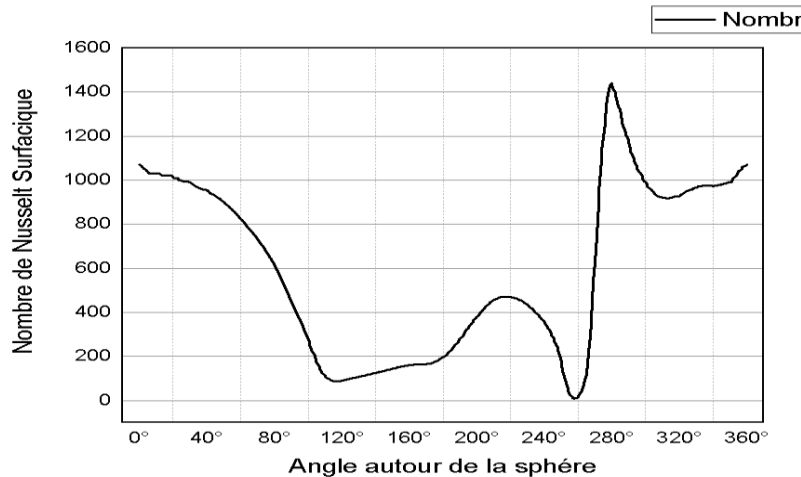
On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0.04 Pa ensuite elle augmente vers 0.225 Pa à un angle de 53° à cause de l'augmentation du frottement du fluide à la surface de la sphère, après elle diminue vers 0 à l'angle 98° qui représente l'angle de décollement. Le tracé subit des perturbations par la présence des turbulences jusqu'à 255° où il s'annule ; c'est l'angle de décollement. La contrainte augmente vers une valeur maximale de

0.29 Pa à 276° à cause de l'augmentation du frottement du fluide à la surface de la sphère, après elle diminue vers sa valeur de départ à 360°.

**-Pour la demi-section basse :**

Le graphique est symétrique à celui de la demi-section haute

- **Evolution du nombre de NUSSELT surfacique :**



**La figure (4-17) :** Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en ligne à 90°  
Par section.

**-Pour la demi-section haute :**

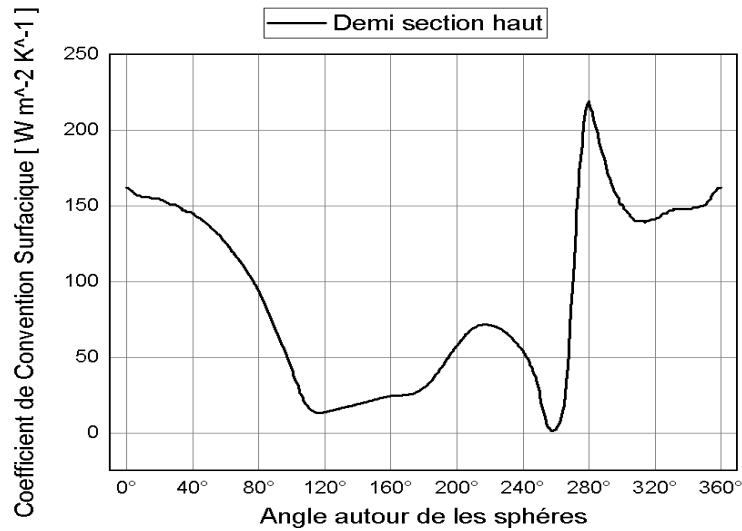
À l'angle 0°, le nombre de NUSSELT prend une grande valeur de 1060° puisque le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k, et diminue vers 100 à 116° car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements, et il augmente discrètement vers 490 à 215° par la présence des turbulences. Après il diminue strictement vers 10 à 260° car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements pour augmenter à une valeur maximale de 1450 à l'angle 280° par la présence d'un obstacle qui fait augmenter l'application de l'hélium sur la paroi et par la suite l'augmentation des frottements en présence d'une haute pression. Enfin, il diminue ou revient à sa valeur initiale à l'angle de 360°.

**-Pour la demi-section basse :**

Le graphique est symétrique à celui de la demi-section haute



- Evolution du coefficient de convection surfacique :

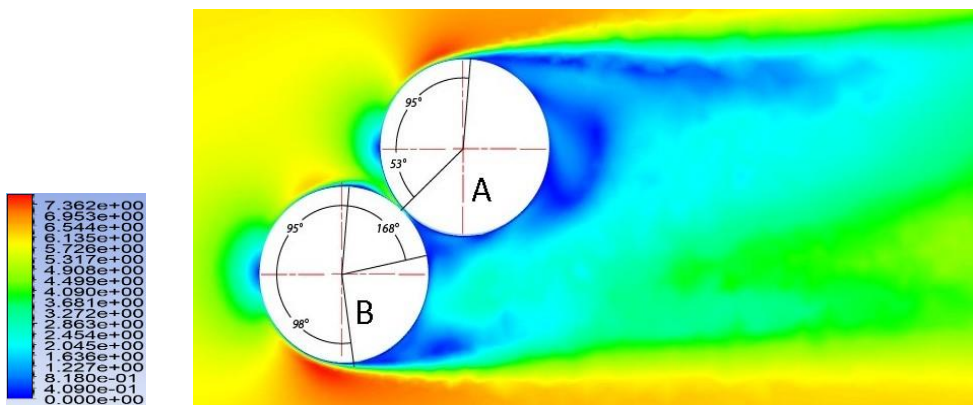


**La figure (4-18)** : Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en ligne à 90° par section

Il faut mentionner que les mêmes commentaires cités auparavant pour le nombre de NUSSELT surfacique restent valables pour le coefficient de convection surfacique.

## 2.2 Configuration en quinconce :

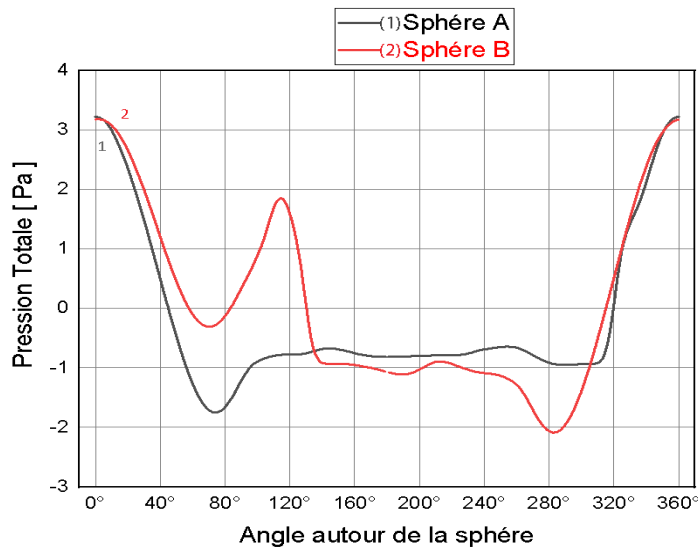
### 2.2.1 Configuration en quinconce à 45°:



**La figure (4-19)** : Le champ de vitesse autour des deux sphères combustibles de disposition en quinconce à 45°

#### 2.2.1.1 Analyse des résultats obtenus pour chaque sphère (cas 45°) :

- Evolution de la pression totale :



**La figure (4-20)** : Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à 45°

**-Pour la sphère A :**

On remarque que la pression totale est maximale de 3.23 Pa à l'angle 0° car en amont sera toujours maximale jusqu'à une valeur minimale de -1.75 Pa à l'angle de 77.8° car le fluide prend la forme de la surface sphérique. Ensuite, il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle 180° par la présence des turbulences.

A l'angle 360°, la pression totale commence par une valeur maximale de 3.23 Pa car le fluide est toujours perpendiculaire au point de départ, après la pression diminue à -0.95 Pa à l'angle de 310° parce que le fluide prend la forme de la surface sphérique puis elle augmente un peu vers -0.6 Pa à 258° à cause de la présence d'un obstacle (la moitié supérieure de la sphère B) et enfin il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle 180° par la présence des turbulence.

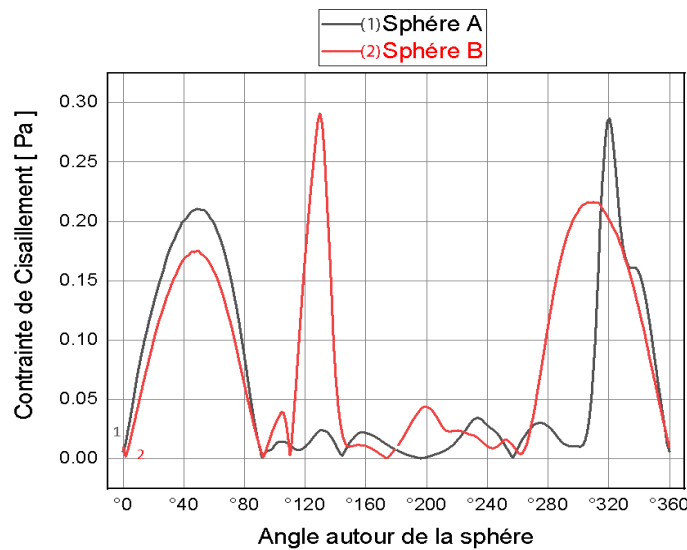
**-Pour la sphère B :**

On remarque que la pression totale commence par une valeur maximale de 3.23 Pa à l'angle 0° car le fluide est toujours perpendiculaire au point de départ, après elle diminue jusqu'à une valeur de -0.24 Pa à l'angle de 70° car le fluide prend la forme de la surface sphérique. Ensuite, elle augmente vers 1.9 Pa à l'angle de 112° à cause de la présence d'un obstacle (la moitié inférieure de la sphère A) puis elle descend vers -0.98 Pa à 140° parce que le fluide

commence à se libérer par la disparition de l'obstacle puis il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle  $180^\circ$  par la survenue des turbulences.

A l'angle  $360^\circ$ , la pression totale commence par une valeur maximale de 3.23 Pa car le fluide est toujours perpendiculaire au point de départ, après elle diminue jusqu'à une valeur minimale de -2.07 Pa à l'angle  $282^\circ$  car le fluide prend la forme de la surface sphérique puis il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle  $180^\circ$  par la présence des turbulences.

- **Evolution de la contrainte de cisaillement :**



**La figure (4-21) :** Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à  $45^\circ$

**-Pour la sphère A :**

On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0.007 Pa ensuite elle augmente vers 0.21 Pa à un angle de  $49^\circ$  à cause de l'augmentation du frottement du fluide à la surface de la sphère, après elle diminue vers 0 à l'angle  $95^\circ$  qui représente l'angle de décollement. Le tracé subit des perturbations jusqu'à  $180^\circ$ .

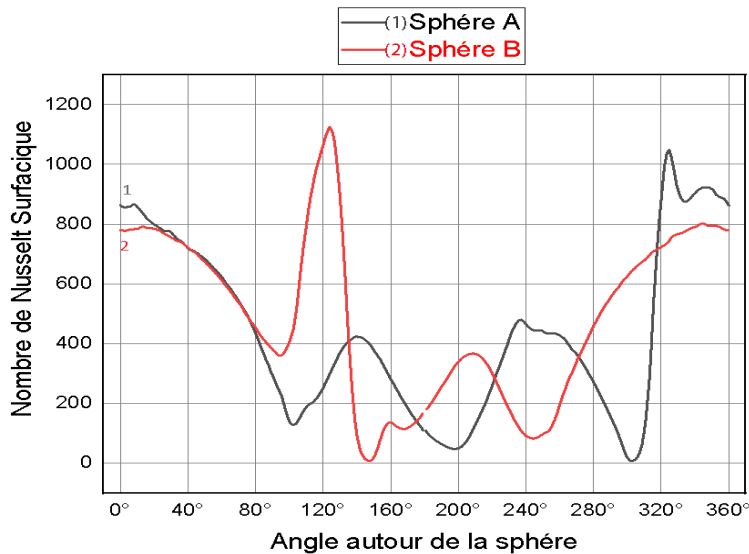
La contrainte de cisaillement prend la même valeur de départ à l'angle  $360^\circ$  ensuite elle augmente vers une valeur maximale de 0.285 à  $320^\circ$  à cause de l'augmentation du frottement du fluide à la surface de la sphère, après elle diminue vers 0.01 Pa à l'angle  $307^\circ$  où le fluide quitte la paroi pour subir des perturbations jusqu'à l'angle  $180^\circ$  par la présence des turbulences.

**-Pour la sphère B :**

On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0.003 Pa ensuite elle augmente vers 0.17 Pa à un angle de 49° à cause de l'augmentation du frottement de fluide à la surface de la sphère , après elle diminue vers 0 à l'angle 95° qui représente l'angle de décollement du fluide .ce derniers revient à la surface par la présence d'un obstacle d'où l'accroissement vers une valeur maximale de 0.29 Pa à 130° avant de descendre vers 0 Pa à 168° (un autre angle de décollement). Ensuite, il y arrive quelques perturbation dans le tracé jusqu'à l'angle 180° par la présence des turbulences.

La contrainte de cisaillement prend la même valeur de départ à l'angle 360° ensuite elle augmente vers 0.22 Pa à 310° à cause de l'augmentation du frottement de fluide à la surface de la sphère, après elle diminue vers 0.006 Pa à 268° où le fluide quitte la paroi pour subir des perturbations jusqu'à l'angle 180° par la présence des turbulences.

• **Evolution du nombre de NUSSELT surfacique :**



**La figure (4-22) :** Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à 45°

**-Pour la sphère A :**

Pour un angle de 0°, le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k , le nombre de NUSSELT prend une grande valeur de 886 ensuite il descend vers une valeur de 145 à 103° car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements.

Après, par la présence des turbulences, il y arrive des perturbations jusqu'à l'angle 180°.

A l'angle 360°, le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k, le nombre de NUSSELT prend une grande valeur de 886 ensuite il augmente à 1080 à l'angle 324° par la présence d'un obstacle qui fait augmenter l'application de l'hélium sur la paroi et par la suite l'augmentation des frottements en présence d'une haute pression. Ensuite, il descend pour s'annuler à 302° car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements.

Après, par la présence des turbulences, il y arrive des perturbations jusqu'à l'angle 180°.

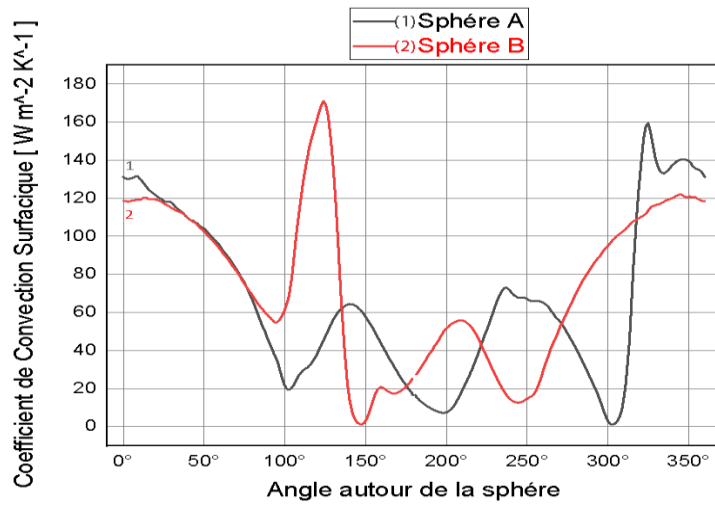
### **-Pour la sphère B :**

Pour un angle de 0°, le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k, le nombre de NUSSELT prend une grande valeur de 780 ensuite il descend vers une valeur de 370 à 97° car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après il s'élève à une valeur maximale de 1110 à 122° par la présence d'un obstacle qui fait augmenter l'application de l'hélium sur la paroi et par la suite l'augmentation des frottements en présence d'une haute pression. Puis il s'annule à l'angle de 148° car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après, par la présence des turbulences, il y arrive des perturbations jusqu'à l'angle 180°.

A l'angle 360°, le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k, le nombre de NUSSELT prend une grande valeur de 780 ensuite il descend vers une valeur de 97 à 246° car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après, par la présence des turbulences, il y arrive des perturbations jusqu'à l'angle 180°.

**NB :** le nombre de NUSSELT surfacique est plus élevé avant l'angle de séparation et il est plus bas après cet angle.

- Evolution du coefficient de convection surfacique :

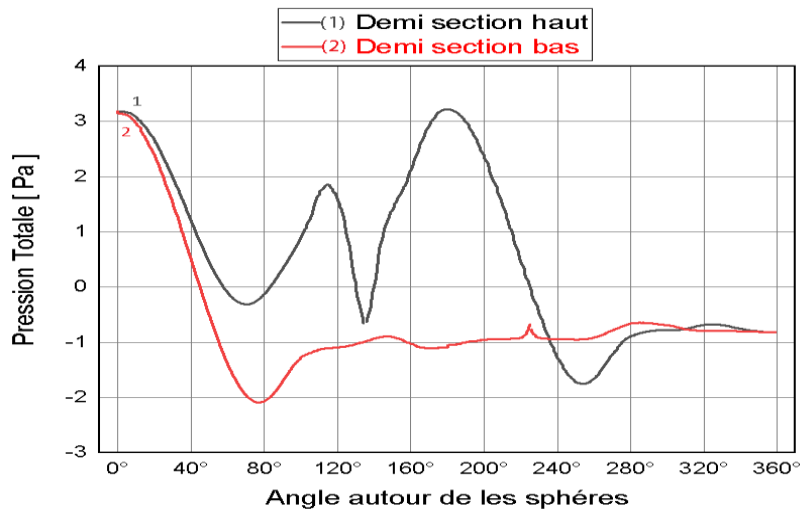


**La figure (4-23)** : Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à 45°

Il faut mentionner que les mêmes commentaires cités auparavant pour le nombre de NUSSELT surfacique restent valables pour le coefficient de convection surfacique.

### 2.2.1.2 Analyse des résultats obtenus pour chaque demi-section (cas 45°) :

- Evolution de la pression totale :



**La figure (4-24)** : Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à 45°  
Par section

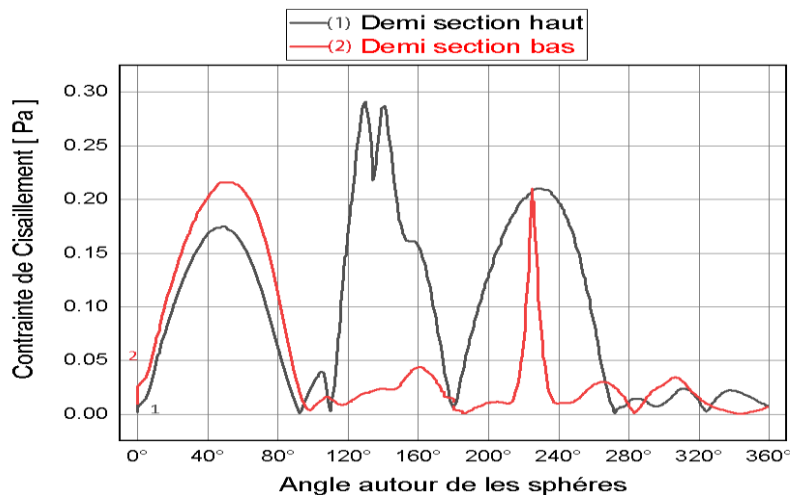
### -Pour la demi-section haute :

On remarque que la pression totale commence par une valeur maximale de 3.23 Pa à l'angle 0° car le fluide est toujours perpendiculaire au point de départ, après elle diminue jusqu'à une valeur de -0.24 Pa à l'angle de 70° car le fluide prend la forme de la surface sphérique. Ensuite, elle augmente vers 1.9 Pa à l'angle de 112° à cause de la présence d'un obstacle et elle descend vers -0.98 Pa à 140° parce que le fluide commence à se libérer par la disparition de l'obstacle. Puis, elle augmente encore à sa valeur maximale de 3.18 Pa à l'angle de 180° et descend vers une valeur minimale de -1.75 Pa à 257°. Enfin, il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle 360° par la présence des turbulences.

### -Pour la demi-section basse :

On remarque que la pression totale est maximale de 3.18 Pa à l'angle 0° car en amont sera toujours maximale. Ensuite, elle diminue strictement pour atteindre une valeur minimale de -2,05 Pa à 77° car le fluide prend la forme de la surface sphérique. Puis, elle augmente légèrement vers -1,3 Pa à 100° et subit des fluctuations jusqu'à l'angle de 360° à cause des turbulences.

### • Evolution de la contrainte de cisaillement :



**La figure (4-25)** : Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à 45° par section

### -Pour la demi-section haute :

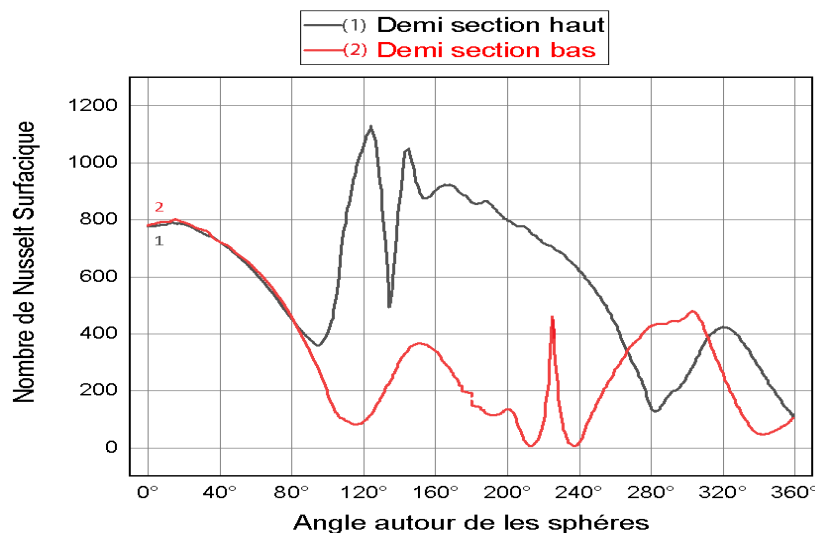
On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0.007 Pa. Ensuite, elle augmente vers 0.16 Pa à un angle de 49° à cause de l'augmentation du frottement du fluide à la

surface de la sphère et elle diminue vers 0 à l'angle 95° qui représente l'angle de décollement. Après, elle augmente pour faire deux pics successifs vers une valeur maximale de 0.285 Pa à 130° et 145° à cause de la production des turbulences par la présence d'obstacle et elle diminue vers 0.01 Pa à l'angle de 180°. Elle augmente encore une fois vers 0.215 Pa à 228° et descend pour s'annuler à 268° qui représente l'angle de décollement. Enfin, il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle 360° par la présence des turbulences.

### -Pour la demi-section basse :

La contrainte de cisaillement prend la même valeur de départ à l'angle 0° ensuite elle augmente vers 0.22 Pa à 48° à cause de l'augmentation du frottement de fluide à la surface de la sphère, après elle diminue vers 0.006 Pa à 95° où le fluide quitte la paroi pour subir des perturbations jusqu'à l'angle 184° où elle s'annule, c'est l'angle de décollement, avant de faire un autre pic vers 0.22 Pa à 223° à cause de la production des turbulences par la présence d'obstacle. Enfin, il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle 360° par la présence des turbulences

- Evolution du nombre de NUSSELT surfacique :



**La figure (4-26)** : Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à 45°  
Par section.

### -Pour la demi-section haute :

Pour un angle de 0°, le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k, le nombre de

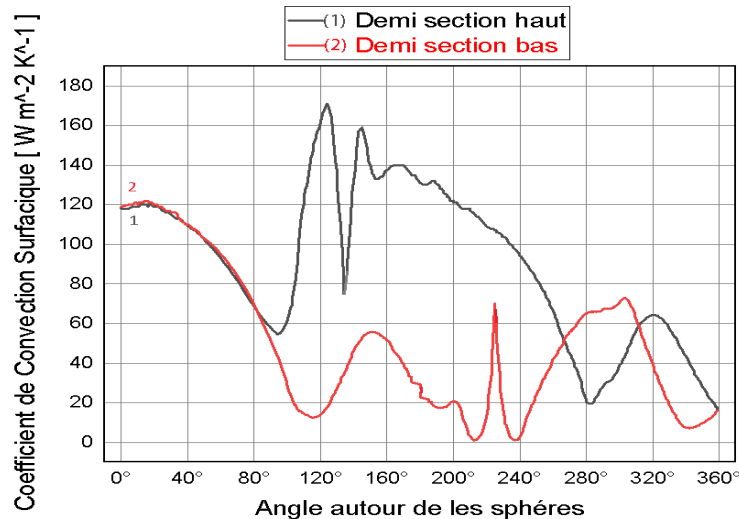


NUSSELT prend une grande valeur de 780 ensuite il descend vers une valeur de 370 à  $97^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après, il s'élève à une valeur maximale de 1110 à  $122^\circ$  succédé par un autre pic vers 1010 à  $145^\circ$  par la présence d'un obstacle qui fait augmenter l'application de l'hélium sur la paroi et par la suite l'augmentation des frottements en présence d'une haute pression. Puis, il diminue et se perturbe un peu jusqu'à l'angle  $360^\circ$ .

### -Pour la demi-section basse :

Pour un angle de  $0^\circ$ , le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k, le nombre de NUSSELT prend une grande valeur de 780 ensuite il descend vers une valeur de 100 à  $117^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après, il s'élève à une valeur de 370 à  $154^\circ$  par la présence d'un obstacle qui fait augmenter l'application de l'hélium sur la paroi et par la suite l'augmentation des frottements en présence d'une haute pression. Puis, il s'annule en deux fois successives à l'angle de  $215^\circ$  et  $240^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements et se termine par se recourber vers  $360^\circ$ .

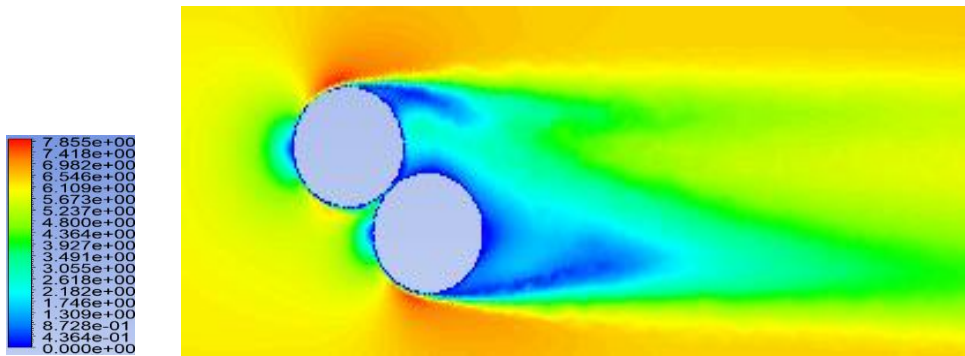
### • Evolution du coefficient de convection surfacique :



**La figure (4-27) :** Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à  $45^\circ$  par section

Il faut mentionner que les mêmes commentaires cités auparavant pour le nombre de NUSSELT surfacique restent valables pour le coefficient de convection surfacique.

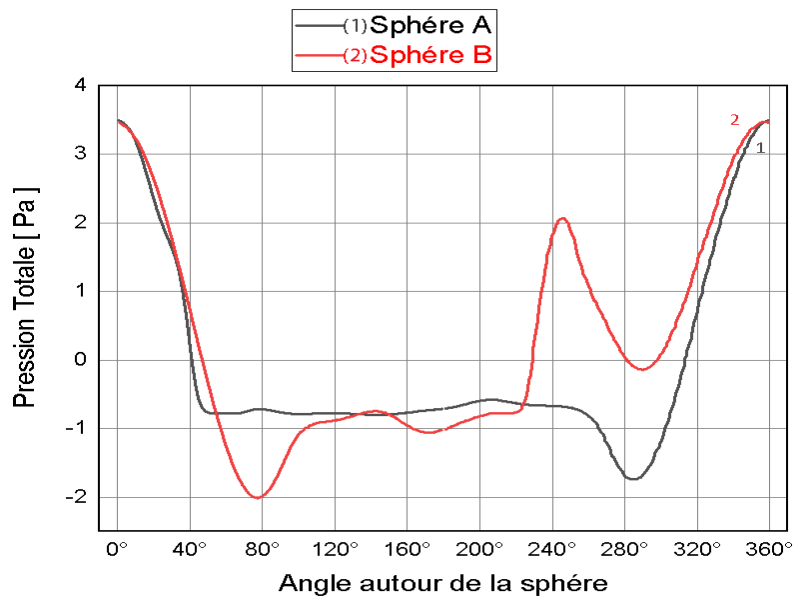
### 2.2.2 Configuration en quinconce à $-45^\circ$ :



La figure (4-28) : Le champ des vitesses autour des deux sphères combustibles de disposition en  $-45^\circ$

#### 2.2.2.1 Analyse des résultats obtenus pour chaque sphère (cas $-45^\circ$ ) :

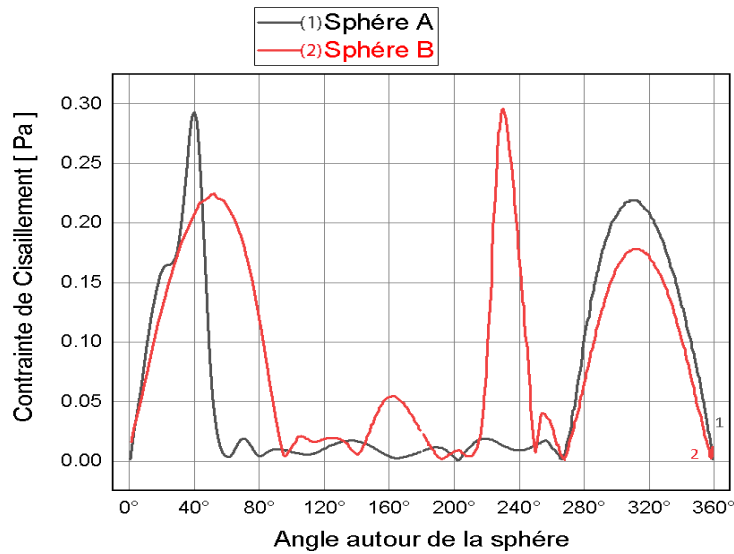
- Evolution de la pression totale :



La figure (4-29) Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à  $-45^\circ$

Le graphique présenté dans la figure (4-29) est inversement identique à celui de  $45^\circ$  présenté dans la figure (4-20).

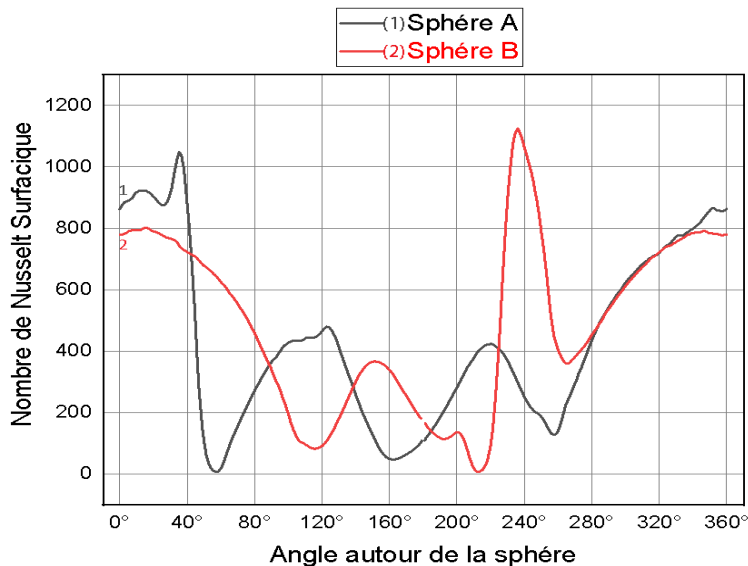
• Evolution de la contrainte de cisaillement :



**La figure (4-30)** : Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à -45°

Le graphique présenté dans la figure (4-30) est inversement identique à celui de 45° présenté dans la figure (4-21).

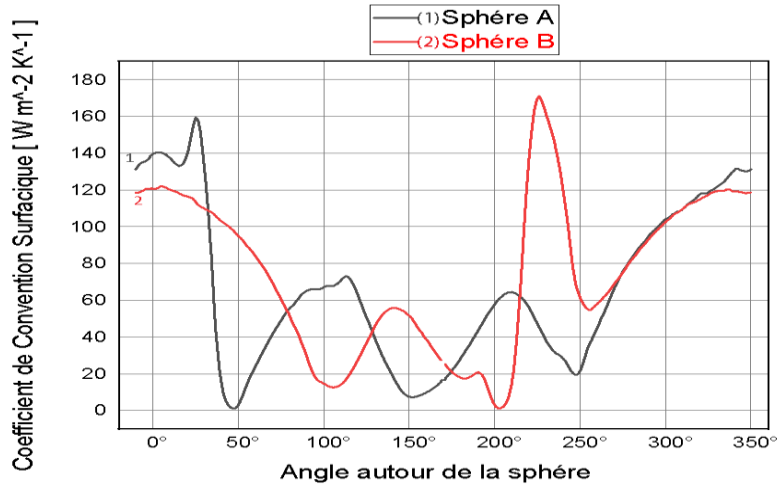
• Evolution du nombre de NUSSELT surfacique :



**La figure (4-31)** : Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à -45°

Le graphique présenté dans la figure (4-31) est inversement identique à celui de 45° présenté dans la figure (4-22).

- Evolution du coefficient de convection surfacique :

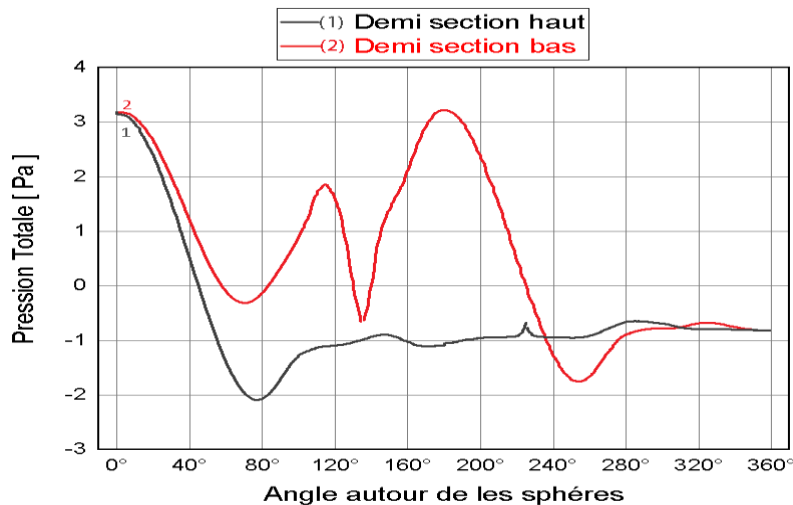


**La figure (4-32) :** Evolution du coefficient de convection surfaccique de disposition en quinconce à -45°

Il faut mentionner que les mêmes commentaires cités auparavant pour le nombre de NUSSELT surfaccique restent valables pour le coefficient de convection surfaccique.

### 2.2.2.2 Analyse des résultats obtenus pour chaque demi-section (cas -45°) :

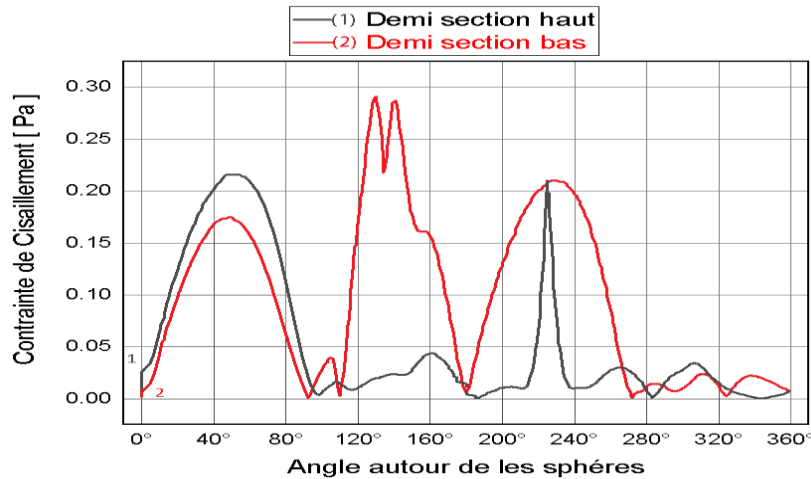
- Evolution de la pression totale :



**La figure (4-33)** Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à 45° par section.

Le graphique de la demi-section haute de l'angle de  $-45^\circ$  montré dans la figure (4-33) est identique au graphique de la demi-section basse de l'angle de  $45^\circ$  présenté dans la figure (4-24)

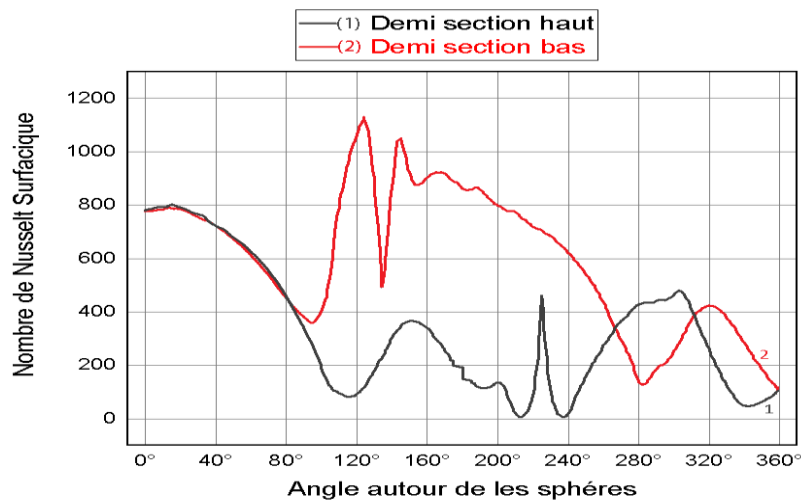
- **Evolution de la contrainte de cisaillement :**



**La figure (4-34) :** Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à  $-45^\circ$  par section

Le graphique de la demi-section haute de l'angle de  $-45^\circ$  montré dans la figure (4-34) est identique au graphique de la demi-section basse de l'angle de  $45^\circ$  présenté dans la figure (4-25)

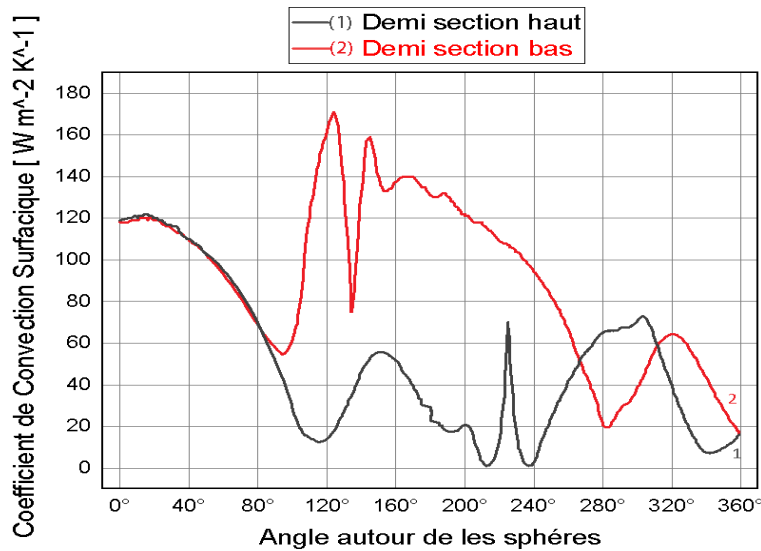
- **Evolution du nombre de NUSSELT surfacique :**



**La figure (4-35) :** Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à  $-45^\circ$  par section

Le graphique de la demi-section haute de l'angle de  $-45^\circ$  montré dans la figure (4-35) est identique au graphique de la demi-section basse de l'angle de  $45^\circ$  présenté dans la figure (4-26)

- Evolution du coefficient de convection surfacique :

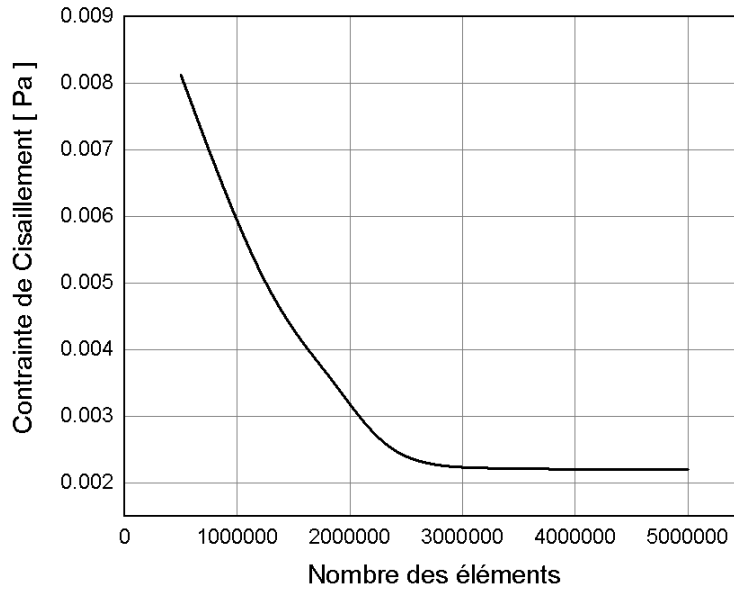


**La figure (4-36)** : Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à  $-45^\circ$  par section

Il faut mentionner que les mêmes commentaires cités auparavant pour le nombre de NUSSELT surfacique restent valables pour le coefficient de convection surfacique.

### 3. Etude de sensibilité de maillage :

Un maillage de qualité est primordial pour obtenir une bonne convergence lors de la simulation numérique. Il ne doit être ni trop lâche pour ne pas perdre d'information, ni trop dense pour ne pas nécessiter trop de sources de calcul.



**La figure (4-38)** : Evolution de la contrainte de cisaillement par nombre des éléments.

On remarque que la contrainte de cisaillement diminue en fonction de nombre des éléments jusqu'à 2800000 éléments. A partir de ce nombre, la contrainte de cisaillement reste stable et constante quel que soit le nombre des éléments choisis.

Donc, l'étude sur la sensibilité du maillage indique que :

- De 00 à 2800000 nombre des éléments : les résultats obtenus dépendent du maillage.
- A partir de 2800000 : les résultats obtenus ne dépendent plus du maillage.

## 5. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a exposé les résultats obtenus par les simulations numériques en détaillant l'évolution des quatre quantités ou grandeurs physiques (la pression, la contrainte de cisaillement, le nombre de NUSSELT surfacique et e coefficient de convection surfacique) pour les configurations fondamentales en ligne ( $0^\circ$  et  $90^\circ$ ) et en quinconce ( $45^\circ$  et  $-45^\circ$ ). Enfin, on a fait une étude de sensibilité de maillage

Ce chapitre a étudié seulement les configurations fondamentales de disposition en ligne et en quinconce.



*Chapitre V : Etude  
d'optimisation*



## **1. Introduction :**

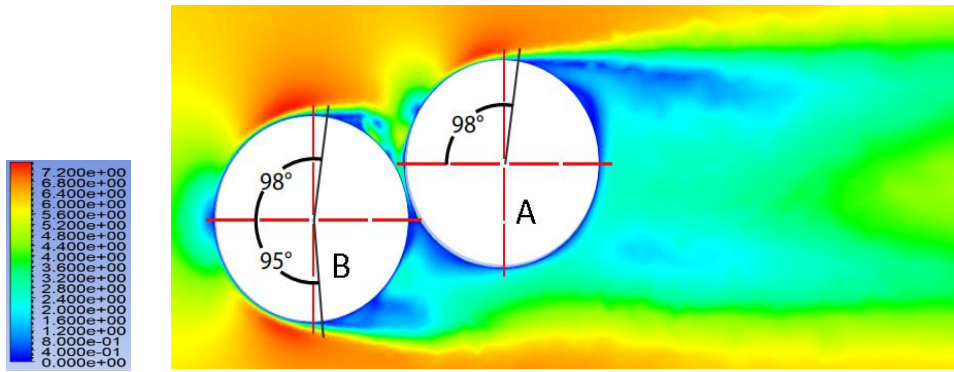
Dans ce chapitre, d'autres simulations ont été faite dans le cadre d'optimisation des résultats des simulations numériques pour les configurations fondamentales en ligne à  $0^\circ$  et  $90^\circ$  et les configurations en quinconce à  $45^\circ$  et  $-45^\circ$  à la recherche de la disposition appropriée pour trouver le meilleur refroidissement des deux sphères combustibles. Les résultats des simulations sont présentés, toujours, par le comportement des quatre quantités physiques : la pression, la contrainte de cisaillement, le nombre de NUSSELT surfacique et le coefficient de convection surfacique. L'étude sera exécutée pour d'autres quatre configurations en quinconce à  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $75^\circ$  ; les valeurs de transfert thermique pour chaque cas sont aussi montrées.

## **2. Résultats des simulations pour certains angles intermédiaires entre $0^\circ$ et $90^\circ$ :**

A la recherche d'une meilleure disposition des deux sphères combustibles, un balayage de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  a été réalisé par un décalage de  $15^\circ$  à chaque fois ; c'est-à-dire des configurations à  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  et  $90^\circ$ . Les configurations en ligne à  $0^\circ$  et  $90^\circ$  et les configurations en quinconce à  $45^\circ$  et  $-45^\circ$  ont été déjà étudié dans le chapitre précédent (chapitre 4), et maintenant ce sont les résultats des simulations de l'écoulement de l'hélium autour des deux sphères combustibles pour les quatre configurations en quinconce à  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $75^\circ$  qui sont présentés par : la pression totale, la contrainte de cisaillement, le nombre de NUSSELT surfacique et le coefficient de convection surfacique.

### **2.1 Configuration en quinconce :**

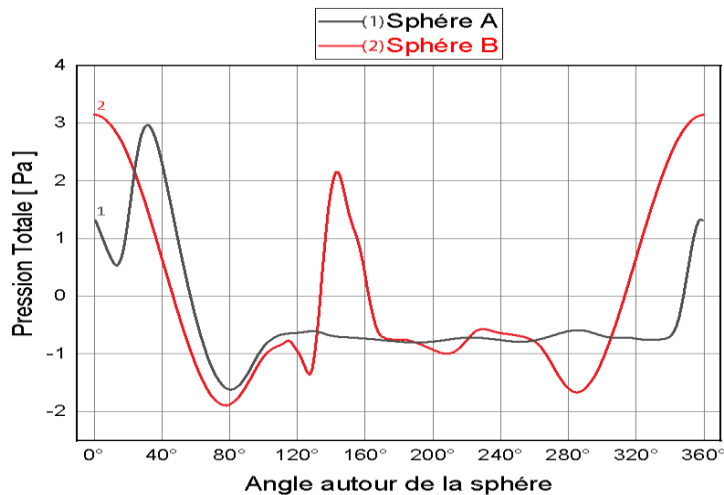
#### **2.2.1 Configuration en quinconce à $15^\circ$ :**



**La figure (5-1) :** Le champ des vitesses autour des deux sphères combustibles de disposition en  $15^\circ$

### 2.2.1.1 Analyse des résultats obtenus pour chaque sphère (cas $15^\circ$ ) :

- **Evolution de la pression totale :**



**La figure (5-2) :** Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à  $15^\circ$ .

#### -Pour la sphère A :

On remarque que la pression totale commence par une valeur de 1.35 Pa et descend un peu pour remonter à une valeur maximale de 3 Pa à  $30^\circ$  où le fluide est perpendiculaire à la paroi. Ensuite, elle diminue vers une valeur minimale de -1.6 Pa à l'angle de  $81^\circ$  car le fluide prend la forme de la surface sphérique. Puis, il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle  $180^\circ$  par la présence des turbulences.

A l'angle  $360^\circ$ , la pression totale commence par la même valeur marquée à l'angle 0 et elle diminue vers -0,7 Pa à  $340^\circ$  car le fluide prend la forme de la surface sphérique.

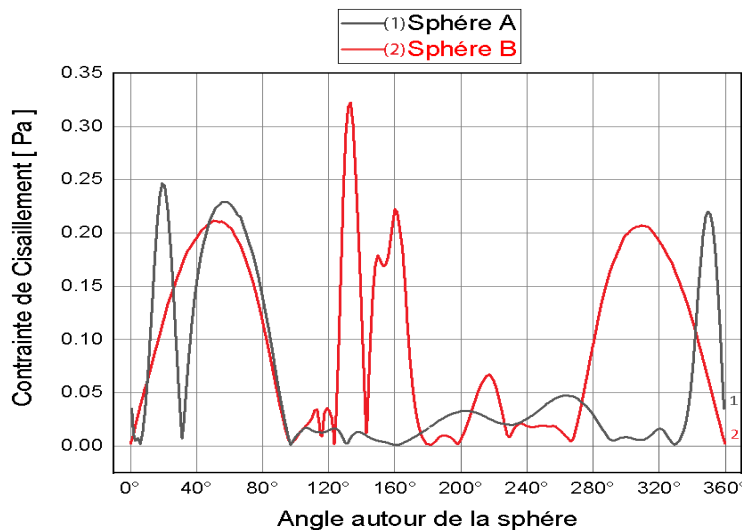
Ensuite, il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle  $180^\circ$  par la présence des turbulences.

### -Pour la sphère B :

On remarque que la pression totale est maximale de 3.23 Pa à l'angle  $0^\circ$  car en amont sera toujours maximale jusqu'à une valeur minimale de -1.9 Pa à l'angle de  $77.8^\circ$  car le fluide prend la forme de la surface sphérique. Ensuite, il y a un pic à l'angle de  $145^\circ$  pour une valeur de 2,1 Pa à cause de la présence d'un obstacle (la sphère A). il y arrive des légères fluctuations avant de descendre à -0,7 à l'angle de  $180^\circ$  par la présence des turbulences.

A l'angle  $360^\circ$ , la pression totale commence par une valeur maximale de 3.2 Pa car le fluide est toujours perpendiculaire au point de départ, et elle diminue vers -1.6 Pa à  $290^\circ$  car le fluide prend la forme de la surface sphérique. Ensuite, il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle  $180^\circ$  par la présence des turbulences.

### • Evolution de la contrainte de cisaillement :



**La figure (5-3)** : Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à  $15^\circ$ .

### -Pour la sphère A :

On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0.035 Pa ensuite elle augmente vers une valeur maximale de 0.24 Pa à un angle de  $20^\circ$  à cause de l'augmentation du frottement de fluide à la surface de la sphère. Après elle diminue vers 0.01 à l'angle de  $31^\circ$  à cause de la diminution des vitesses qui réduit le frottement et augmente une fois vers 0.225 Pa

à l'angle de  $59^\circ$  avant de diminuer et s'annuler à  $98^\circ$  qui représente l'angle de décollement. Le tracé subit des perturbations jusqu'à  $180^\circ$ .

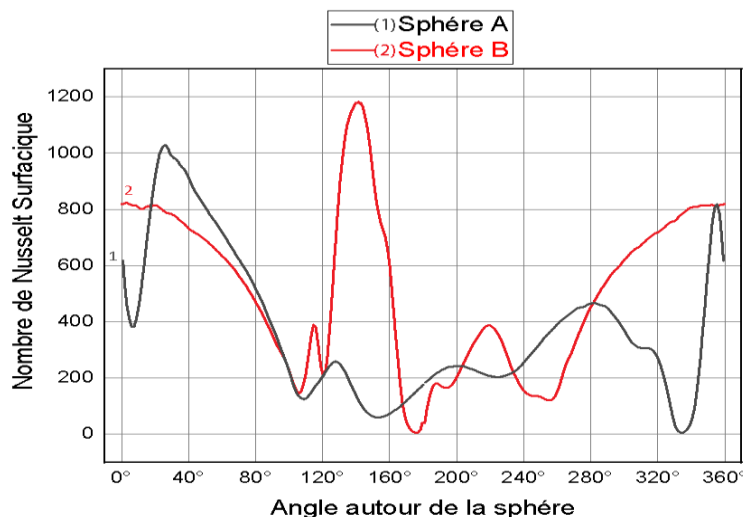
La contrainte de cisaillement prend une valeur de 0.04 Pa à l'angle  $360^\circ$  ensuite elle augmente vers une valeur de 0.225 Pa à  $348^\circ$  à cause de l'augmentation du frottement de fluide à la surface de la sphère. Après elle diminue vers 0.002 Pa à l'angle  $329^\circ$  pour subir des perturbations jusqu'à l'angle  $180^\circ$

### -Pour la sphère B :

On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0.003 Pa et elle augmente vers 0.215 Pa à l'angle de  $53^\circ$  à cause de l'augmentation du frottement de fluide à la surface de la sphère, ensuite elle descend pour s'annuler à  $98^\circ$  qui représente l'angle de décollement du fluide. Ensuite, on constate la présence de deux pics dont un est maximale de 3,3 Pa à l'angle de  $132^\circ$  et l'autre de 0.225 Pa à l'angle de vue  $160^\circ$  à cause de la production des turbulences par la présence d'obstacle, puis se diminue vers 0,001 Pa à  $180^\circ$ .

La contrainte de cisaillement prend la même valeur de départ à l'angle  $360^\circ$  ensuite elle augmente vers 0.21 Pa à  $312^\circ$  à cause de l'augmentation du frottement de fluide à la surface de la sphère, après elle diminue vers 0 à  $265^\circ$  qui représente l'angle de décollement. Le tracé subit des perturbations jusqu'à  $180^\circ$  par la présence des turbulences.

### • Evolution du nombre de NUSSELT surfacique :



**La figure (5-4)** : Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à  $15^\circ$

### **-Pour la sphère A :**

Pour un angle de  $0^\circ$ , le nombre de NUSSELT prend une valeur de 620 ensuite il descend et augmente rapidement vers une valeur maximale de 1030 à  $25^\circ$  par la présence d'un obstacle qui fait augmenter l'application de l'hélium sur la paroi. Et, il diminue vers 120 à  $98^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après, par la présence des turbulences, il y arrive des perturbations jusqu'à l'angle  $180^\circ$ .

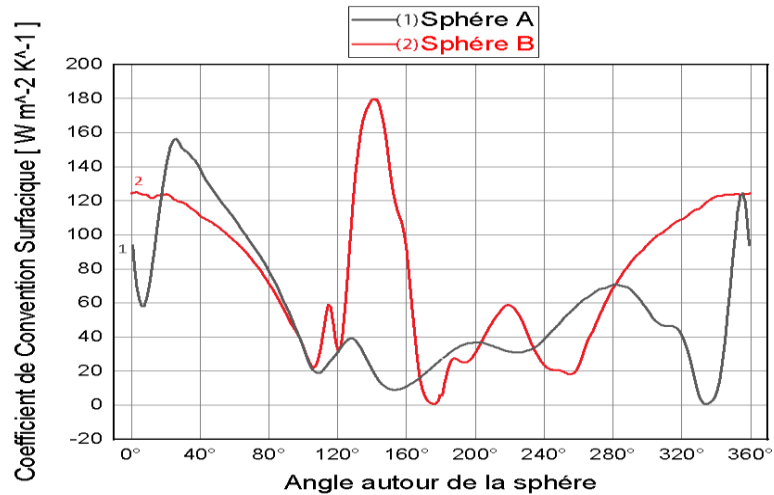
A l'angle  $360^\circ$ , le nombre de NUSSELT prend la même grande valeur de l'angle 0 et augmente un peu par la présence d'un obstacle qui fait augmenter l'application de l'hélium sur la paroi et par la suite l'augmentation des frottements en présence d'une haute pression. Puis, il diminue et s'annule à  $335^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après, par la présence des turbulences, il y arrive des perturbations jusqu'à l'angle  $180^\circ$ .

### **-Pour la sphère B :**

Pour un angle de  $0^\circ$ , le nombre de NUSSELT prend une valeur de 830 et il diminue vers 150 à  $108^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Pour augmenter et atteindre une valeur maximale de 1190 à l'angle de  $140^\circ$  par la présence d'un obstacle qui fait augmenter l'application de l'hélium sur la paroi et par la suite l'augmentation des frottements en présence d'une haute pression. Il finit par s'annuler à  $180^\circ$ .

A l'angle  $360^\circ$ , le nombre de NUSSELT prend la même grande valeur de l'angle 0 ensuite, il descend vers 130 à l'angle de  $258^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après, il s'accroît vers 395 à  $220^\circ$  et diminue pour s'annuler à  $180^\circ$  par la présence des turbulences.

- **Evolution du coefficient de convection surfacique :**

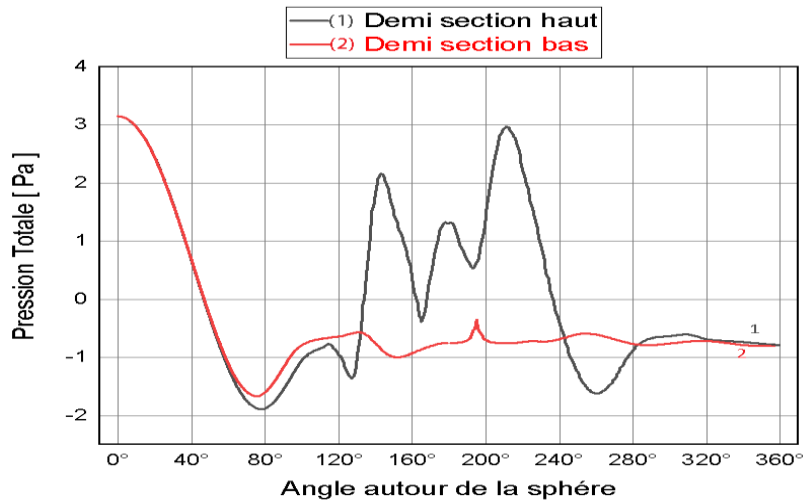


**La figure (5-5) :** Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à 15°

Il faut mentionner que les mêmes commentaires cités auparavant pour le nombre de NUSSELT surfacique restent valables pour le coefficient de convection surfacique.

**2.2.1.2 Analyse des résultats obtenus pour chaque demi-section (cas 15°) :**

- **Evolution de la pression totale :**



**La figure (5-6) :** Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à 15° par section.

**-Pour la demi-section haute :**

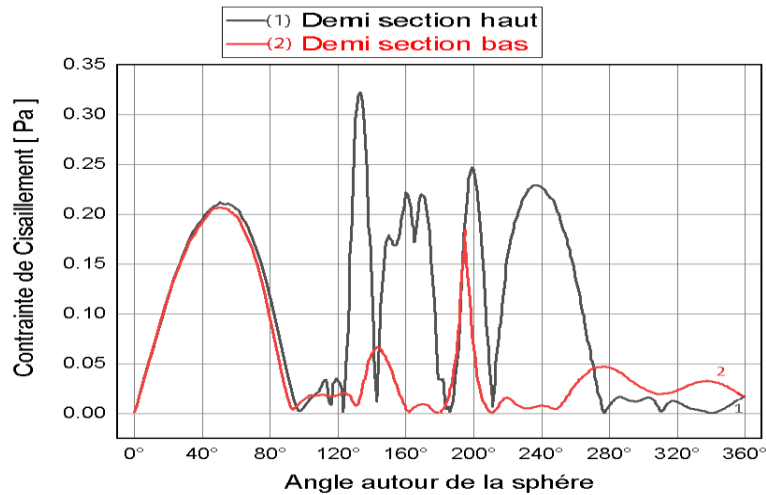
On remarque que la pression totale est maximale de 3.23 Pa à l'angle 0° car en amont sera toujours maximale et elle diminue jusqu'à une valeur minimale de -1.9 Pa à l'angle de 77.8° car le fluide prend la forme de la surface sphérique. Ensuite, il y a trois pics aux angles

de  $145^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $210^\circ$  pour les valeurs de 2.1 Pa, 1.3 Pa, 3 Pa respectivement à cause de la présence d'un obstacle. Après, il y arrive des fluctuations en présence des turbulences jusqu'à l'angle  $360^\circ$ .

### -Pour la demi-section basse :

A l'angle  $0^\circ$ , la pression totale commence par une valeur maximale de 3.2 Pa car le fluide est toujours perpendiculaire au point de départ, et elle diminue vers -1.6 Pa à  $70^\circ$  car le fluide prend la forme de la surface sphérique. Ensuite, il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle  $360^\circ$  par la présence des turbulences.

- **Evolution de la contrainte de cisaillement :**



**La figure (5-7) :** Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à  $15^\circ$  par section

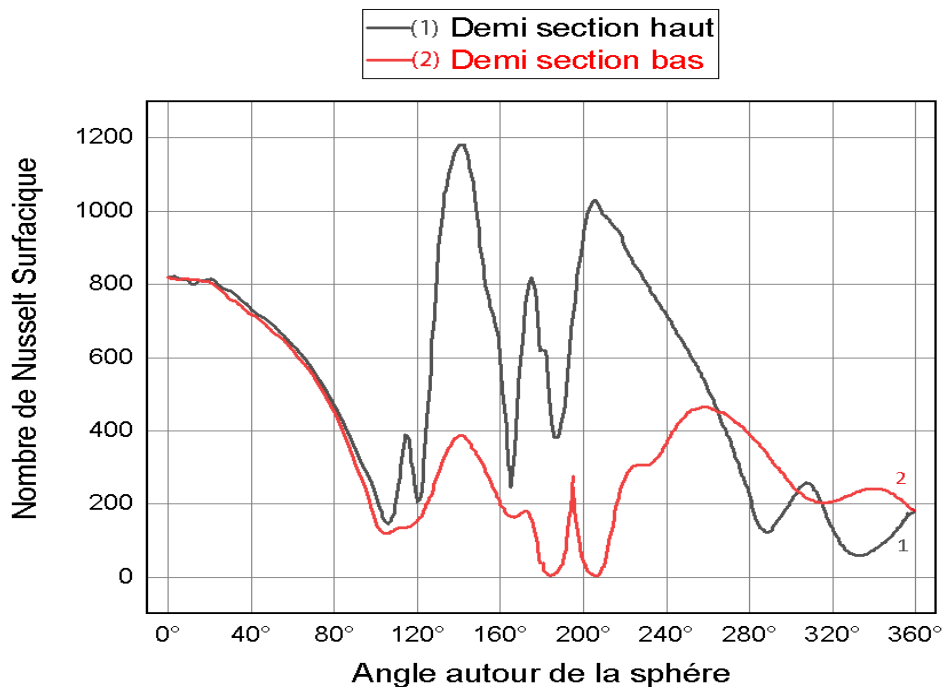
### -Pour la demi-section haute :

On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0.003 Pa et elle augmente vers 0.215 Pa à l'angle de  $53^\circ$  à cause de l'augmentation du frottement de fluide à la surface de la sphère, ensuite elle descend pour s'annuler à  $98^\circ$  qui représente l'angle de décollement du fluide. Ensuite, on constate la présence de quatre pics dont un est maximale de 3,3 Pa à l'angle de  $132^\circ$  et les autres de 0.22 Pa, 0.25 Pa, 0.225 Pa en vue des angles  $170^\circ$ ,  $200^\circ$ ,  $235^\circ$  par la présence d'obstacle. il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle  $360^\circ$  par la présence des turbulences.

**-Pour la demi-section basse :**

La contrainte de cisaillement prend valeur de départ à l'angle  $0^\circ$  de 0,0035 Pa ensuite elle augmente vers 0.21 Pa à  $312^\circ$  à cause de l'augmentation du frottement de fluide à la surface de la sphère, après elle diminue vers 0 à  $95^\circ$  qui représente l'angle de décollement. Le tracé subit des perturbations jusqu'à  $180^\circ$  par la présence des turbulences. Après, on remarque la présence d'un pic vers 0.18 Pa à  $193^\circ$ , puis il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle  $360^\circ$  par la présence des turbulences.

- **Evolution du nombre de NUSSELT surfacique :**



**La figure (5-8) :** Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à  $15^\circ$  Par section.

**-Pour la demi-section haute :**

Pour un angle de  $0^\circ$ , le nombre de NUSSELT prend une valeur de 830 et il diminue vers 150 à  $108^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Pour augmenter une fois et atteindre une valeur maximale de 1190 à l'angle de  $140^\circ$  par la présence d'un obstacle qui fait augmenter l'application de l'hélium sur la paroi et par la suite

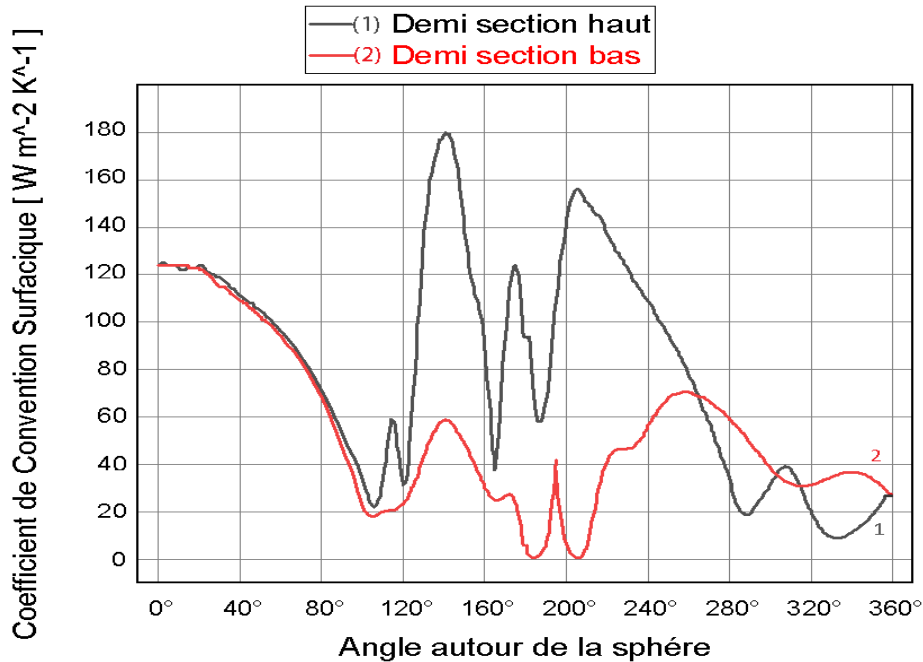


l'augmentation des frottements en présence d'une haute pression. Ensuite, il chute vers 210 à 165°. Il y a un pic vers 803 à 176° puis il augmente vers 1010 à 205° pour descendre vers 200 à l'angle de 360°.

### -Pour la demi-section basse :

A l'angle 0°, le nombre de NUSSELT prend la valeur de 830 ensuite, il descend vers 130 à l'angle de 102° car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Ensuite, il s'accroît vers 395 à 140° et diminue pour s'annuler à 180°. Il augmente vers 460 à 257° pour diminuer vers 200 à l'angle de 360° car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements.

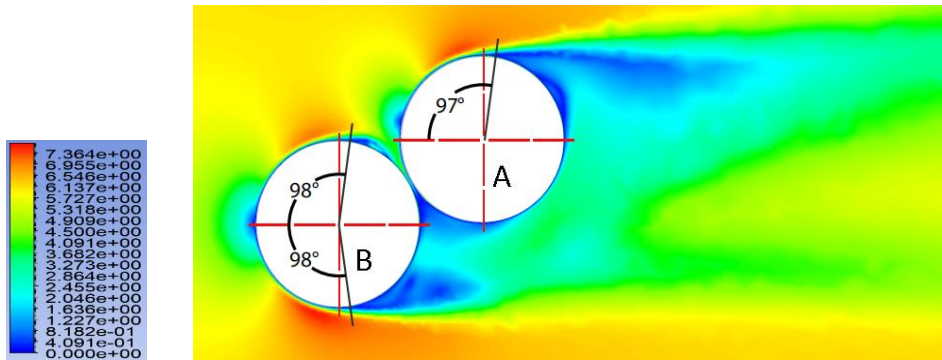
- **Evolution du coefficient de convection surfacique :**



**La figure (5-9) :** Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à 15° par section

Il faut mentionner que les mêmes commentaires cités auparavant pour le nombre de NUSSELT surfacique restent valables pour le coefficient de convection surfacique.

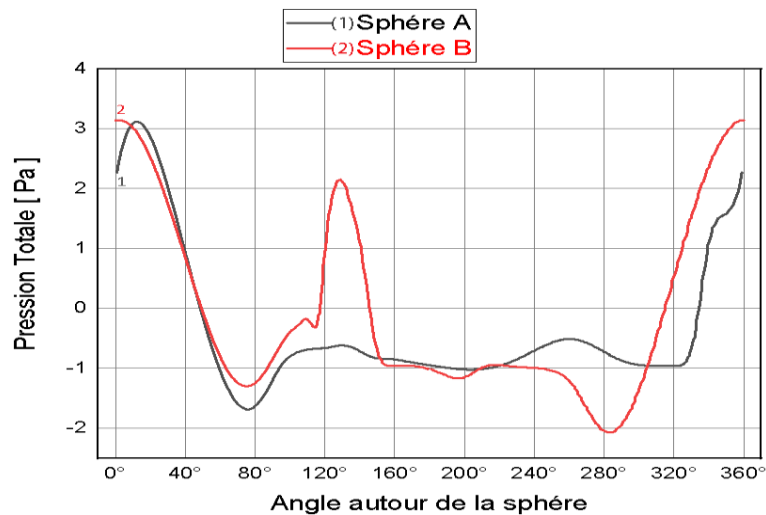
### 2.2.2 Configuration en quinconce à 30°:



**La figure (5-10)** : Le champ de vitesse autour des deux sphères combustibles de disposition en 30°

#### 2.2.2.1 Analyse des résultats obtenus pour chaque sphère (cas 30°)

- Evolution de la pression totale :



**La figure (5-11)** : Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à 30°

- Pour la sphère A :

On remarque que la pression totale à l'angle 0 s'accroît de 2,3 Pa vers une valeur maximale de 3,1 Pa à 17° où le fluide est perpendiculaire à la paroi. Ensuite, elle diminue strictement pour atteindre une valeur minimale de -1,7 Pa à 78° car le fluide prend la forme de la surface sphérique. Ensuite, il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle 180° par la présence des turbulences.

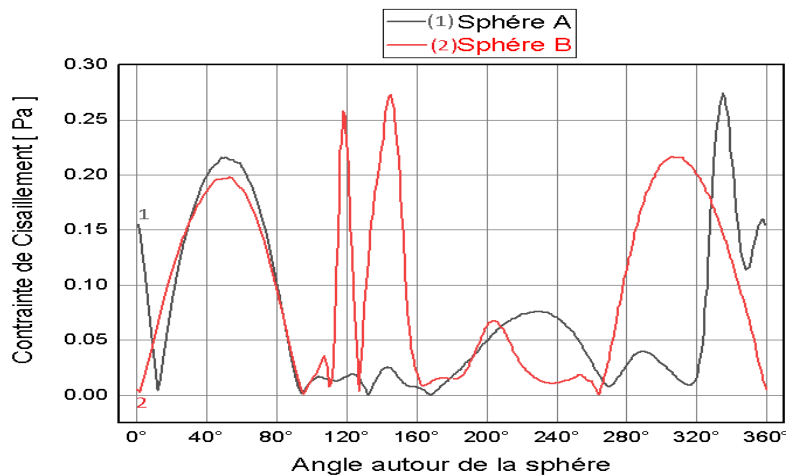
A l'angle  $360^\circ$ , la pression totale commence par une valeur de 2,3 Pa et diminue vers -1 Pa à  $325^\circ$  car le fluide prend la forme de la surface sphérique et en se stabilisant un peu à cette valeur jusqu'à l'angle de  $302^\circ$ . Après, il y a des légères fluctuations jusqu'à l'angle  $180^\circ$  par la présence des turbulences.

### - Pour la sphère B :

On remarque que la pression totale commence par une valeur de 2,3 Pa car le fluide est toujours perpendiculaire au point de départ et diminue vers -1,2 Pa à l'angle de  $77^\circ$  car le fluide prend la forme de la surface sphérique. Ensuite, elle augmente à 2,1 Pa à l'angle de  $130^\circ$  à cause de la présence d'un obstacle (la sphère A) pour diminuer vers -1 à  $180^\circ$  par la libération du fluide en dehors de l'obstacle.

A l'angle  $360^\circ$ , la pression totale commence par une valeur maximale de 3,2 Pa car le fluide est toujours perpendiculaire au point de départ et diminue vers une valeur minimale de -2,05 Pa à  $283^\circ$  car le fluide prend la forme de la surface sphérique. Ensuite, elle s'accroît vers -1 Pa à  $250^\circ$  et enfin il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle  $180^\circ$  par la présence des turbulences.

### - Evolution de la contrainte de cisaillement :



**La figure (5-12)** : Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à  $30^\circ$

### - Pour la sphère A :

On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0,152 Pa ensuite elle descend vers 0,007 Pa à  $16^\circ$  à cause de la diminution des vitesses qui réduit le frottement et

augmente vers 0.225 Pa à l'angle de 50° à cause de l'augmentation du frottement du fluide à la surface de la sphère avant de s'annuler à 97° qui représente l'angle de décollement. Ensuite, il y arrive quelques perturbation dans le tracé jusqu'à l'angle 180° par la présence des turbulences.

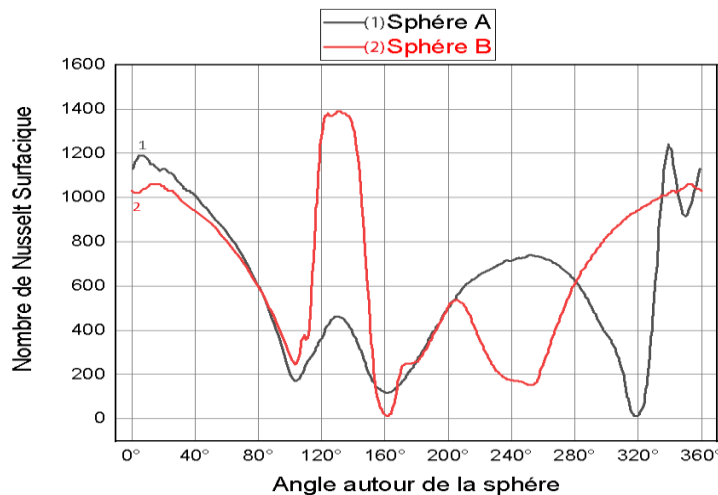
La contrainte de cisaillement prend la même valeur de départ à l'angle 360° ensuite elle augmente vers une valeur maximum 0.275 Pa à 335° à cause de l'augmentation du frottement du fluide à la surface de la sphère par la présence de l'obstacle (la sphère B), après elle diminue à 0.015 Pa à 317°. Le tracé subit des perturbations jusqu'à 180° par la présence des turbulences.

**- Pour la sphère B :**

On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0.003 Pa ensuite elle augmente vers 0.195 Pa à un angle de 54° à cause de l'augmentation du frottement du fluide à la surface de la sphère, après elle diminue vers 0 à l'angle 97° qui représente l'angle de décollement. Ensuite, on constate la présence de deux pics dont un est maximale de 0.275 Pa à l'angle de 143° et l'autre de 0.26 Pa à l'angle de vue 119° à cause de la production des turbulences par la présence d'obstacle . Le tracé subit des perturbations jusqu'à 180°.

La contrainte de cisaillement prend la même valeur de départ à l'angle 360° ensuite elle augmente vers 0.22 à 309° par l'augmentation du frottement après elle diminue pour s'annuler à l'angle 262° où le fluide quitte la paroi pour subir des perturbations jusqu'à l'angle 180° par la présence des turbulences.

**• Evolution du nombre de NUSSELT surfacique :**



**La figure (5-13) :** Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à 30°

### - Pour la sphère A :

Pour un angle de  $0^\circ$ , le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de  $523.15^\circ\text{C}$  et la température de la sphère  $1328.15^\circ\text{C}$ , le nombre de NUSSELT prend une grande valeur de 1130 ensuite il descend vers une valeur de 195 à  $103^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après, par la présence des turbulences, il y arrive des perturbations jusqu'à l'angle  $180^\circ$ .

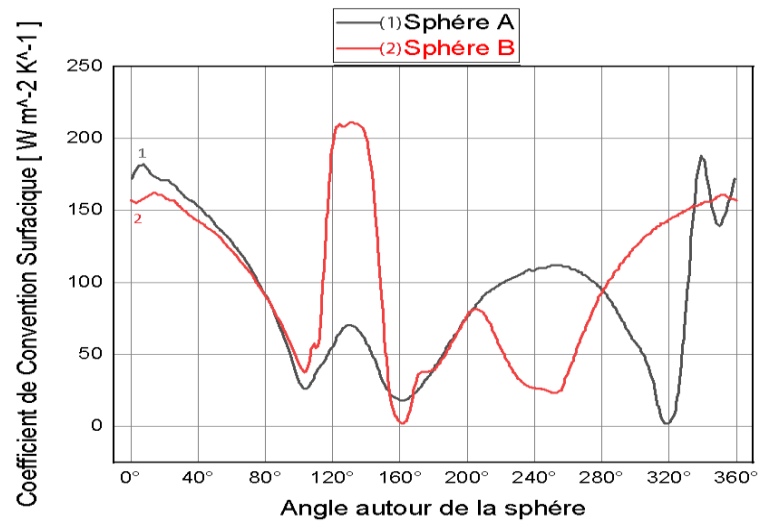
A l'angle  $360^\circ$ , le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de  $523.15^\circ\text{C}$  et la température de la sphère  $1328.15^\circ\text{C}$ , le nombre de NUSSELT prend la même grande valeur de l'angle 0 ensuite il augmente à une valeur maximale de 1220 à l'angle  $339^\circ$  par la présence d'un obstacle qui fait augmenter l'application de l'hélium sur la paroi et par la suite l'augmentation des frottements en présence d'une haute pression ensuite, il descend strictement où il s'annule à l'angle de  $320^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après, il s'élève pour se recourber vers l'angle de  $180^\circ$  en présence des turbulences.

### - Pour la sphère B :

Pour un angle de  $0^\circ$ , le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de  $523.15\text{ k}$  et la température de la sphère  $1328.15\text{ k}$ , le nombre de NUSSELT prend une grande valeur de 1020 ensuite il descend vers une valeur de 270 à  $103^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après il s'élève à une valeur maximale de 1400 à  $132^\circ$  par la présence d'un obstacle qui fait augmenter l'application de l'hélium sur la paroi et par la suite l'augmentation des frottements en présence d'une haute pression. Puis, il descend pour s'annuler à  $162^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements avant de s'élever à 230 pour l'angle de  $180^\circ$  en présence des turbulences.

A l'angle  $360^\circ$ , le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de  $523.15^\circ\text{C}$  et la température de la sphère  $1328.15^\circ\text{C}$ , le nombre de NUSSELT prend la même grande valeur de l'angle 0 ensuite il diminue vers 180 à  $254^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après, par la présence des turbulences, il y arrive des perturbations jusqu'à l'angle  $180^\circ$ .

- Evolution du coefficient de convection surfacique :

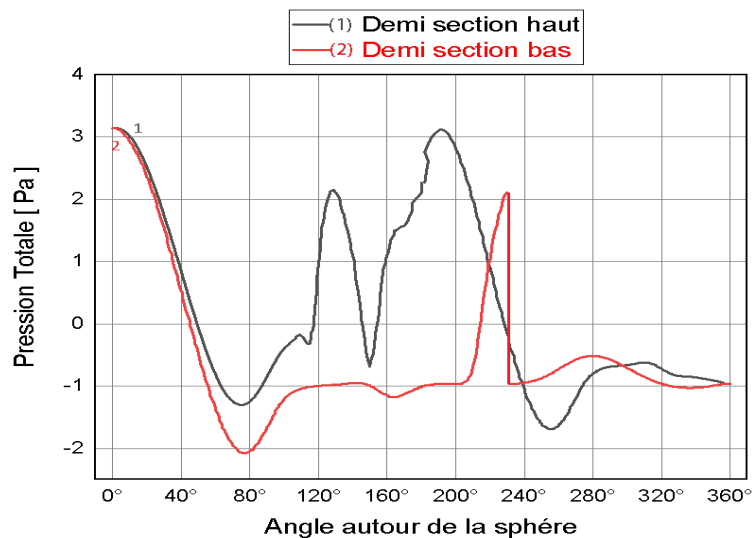


La figure (5-14) : Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à  $30^\circ$

Il faut mentionner que les mêmes commentaires cités auparavant pour le nombre de NUSSELT surfacique restent valables pour le coefficient de convection surfacique.

#### 2.2.2.2 Analyse des résultats obtenus pour chaque demi-section (cas $30^\circ$ ) :

- Evolution de la pression totale :



La figure (5-15) : Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à  $30^\circ$  par section.

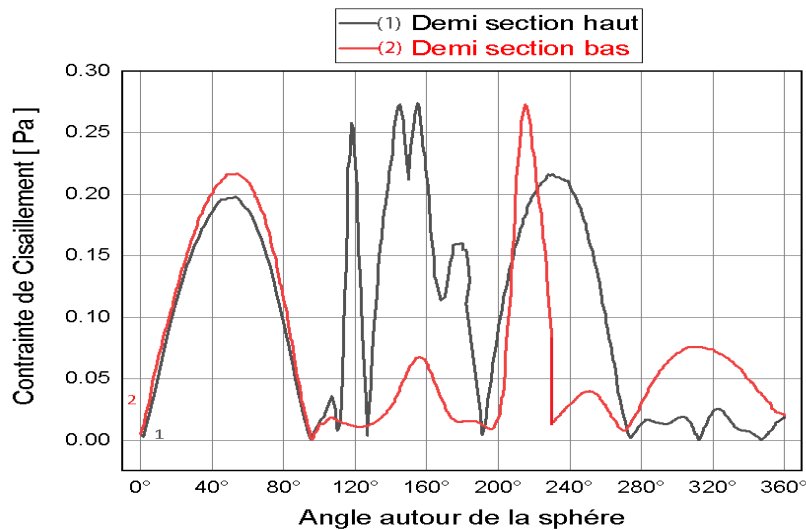
**-Pour la demi-section haute :**

On remarque que la pression totale commence par une valeur de 3,2 Pa car le fluide est toujours perpendiculaire au point de départ et diminue vers -1,2 Pa à l'angle de 77° car le fluide prend la forme de la surface sphérique. Ensuite, elle augmente à 2,1 Pa à l'angle de 130° à cause de la présence d'un obstacle pour diminuer vers -0,7 à 150° par le dégagement du fluide en dehors de la paroi. La pression augmente vers sa valeur maximale à 190° et descend vers -1.7 Pa à 254° et se perturbe jusqu'à l'angle de 360° par la présence des turbulences.

**-Pour la demi-section basse :**

A l'angle 0°, la pression totale commence par une valeur maximale de 3,2 Pa car le fluide est toujours perpendiculaire au point de départ et diminue vers une valeur minimale de -2,05 Pa à 78° car le fluide prend la forme de la surface sphérique. Ensuite, elle s'accroît vers -1 Pa à 110° et il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle 210° par la présence des turbulences. On remarque un pic vers 2.05 Pa à 230° et finir par des perturbations jusqu'à l'angle de 360°.

• **Evolution de la contrainte de cisaillement :**



**La figure (5-16) :** Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à 30° par section

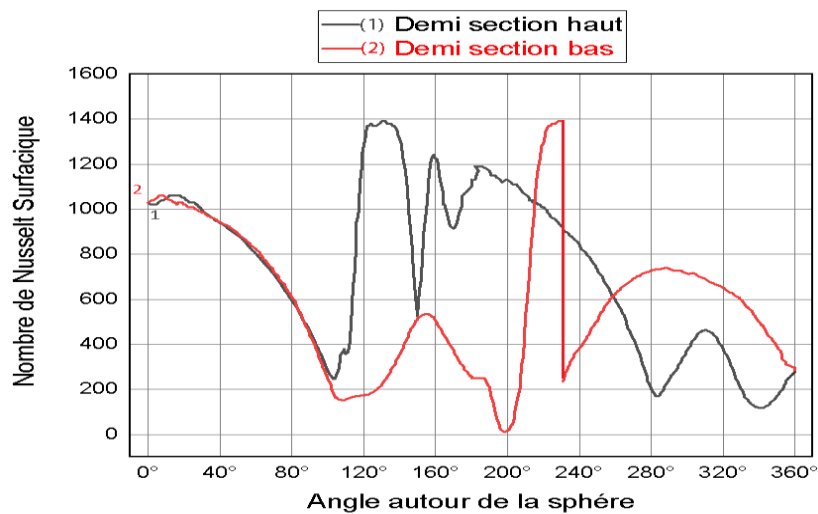
**-Pour la demi-section haute :**

On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0.003 Pa ensuite elle augmente vers 0.195 Pa à un angle de  $54^\circ$  à cause de l'augmentation du frottement du fluide à la surface de la sphère, après elle diminue vers 0 à l'angle  $97^\circ$  qui représente l'angle de décollement. Ensuite, on constate la présence de deux pics dont un est maximale de 0.275 Pa à l'angle de  $143^\circ$  et l'autre de 0.26 Pa à l'angle de vue  $119^\circ$  à cause de la production des turbulences par la présence d'obstacle . elle augmente vers 0.215 Pa à  $230^\circ$  et diminue pour s'annuler à  $273^\circ$ , c'est l'angle de décollement et se termine par des fluctuations jusqu'à  $360^\circ$

### -Pour la demi-section basse :

La contrainte de cisaillement prend la même valeur de départ de la section haute à l'angle  $0^\circ$  ensuite elle augmente vers 0.22 Pa à  $51^\circ$  par l'augmentation du frottement et elle diminue pour s'annuler à l'angle  $98^\circ$  où le fluide quitte la paroi pour subir des perturbations jusqu'à l'angle  $180^\circ$  par la présence des turbulences. On remarque la présence d'un pic 0.275 Pa à  $215^\circ$  et se termine par des perturbations à cause de la production des turbulences par la présence d'obstacle.

### • Evolution du nombre de NUSSELT surfacique :



**La figure (5-17)** : Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à  $30^\circ$   
Par section.

### -Pour la demi-section haute :

Pour un angle de  $0^\circ$ , le fluide entre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k , le nombre

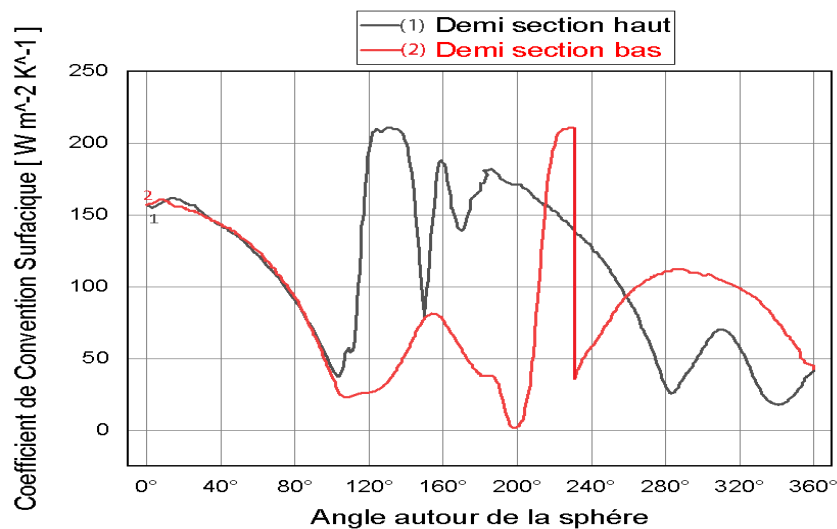


de NUSSELT prend une grande valeur de 1020 ensuite il descend vers une valeur de 250 à 103° car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après il s'élève à une valeur maximale de 1400 à 132° par la présence d'un obstacle qui fait augmenter l'application de l'hélium sur la paroi et par la suite l'augmentation des frottements en présence d'une haute pression. Puis, il descend vers 520 à 150° on remarque un pic vers 1220 à 160° et il augmente un peu pour descendre vers 190 à 284° et se termine par des perturbations jusqu'à 360° par la présence des turbulences.

### -Pour la demi-section basse :

A l'angle 0°, le fluide entre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k, le nombre de NUSSELT prend la même grande valeur de 1020, ensuite il diminue vers 180 à 106° car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après, par la présence des turbulences, il y arrive des perturbations jusqu'à l'angle 180°. Il s'annule à l'angle de 200°, puis on remarque un pic vers une valeur maximale de 1400 à 230°. Il augmente encore vers 750 à 290° et il descend vers 300 à l'angle de 360°.

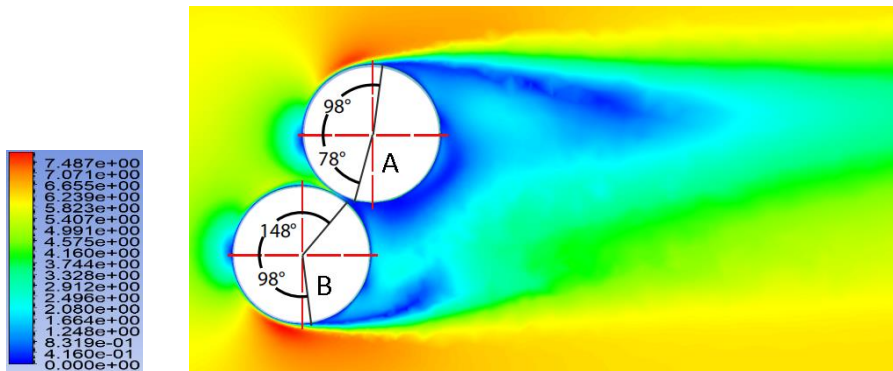
### • Evolution du coefficient de convection surfacique :



**La figure (5-18)** : Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à 30° par section

Il faut mentionner que les mêmes commentaires cités auparavant pour le nombre de NUSSELT surfacique restent valables pour le coefficient de convection surfacique.

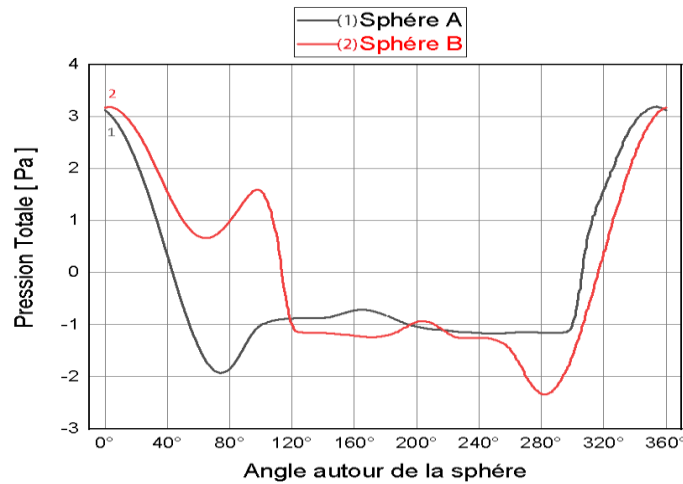
### 2.2.3 Configuration en quinconce à 60°:



**La figure (5-19)** : Le champ de vitesse autour des deux sphères combustibles de disposition en 60°

#### 2.2.3.1 Analyse des résultats obtenus pour chaque sphère (cas 60°) :

- **Evolution de la pression totale :**



**La figure (5-20)** : Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à 60°

- **Pour la sphère A :**

On remarque que la pression totale est maximale de 3.1 Pa à l'angle 0° car le fluide est toujours perpendiculaire au point de départ. Ensuite, elle diminue strictement pour atteindre une valeur minimale de -1,95 Pa à 77° car le fluide prend la forme de la surface sphérique. Ensuite, il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle 180° par la présence des turbulences.

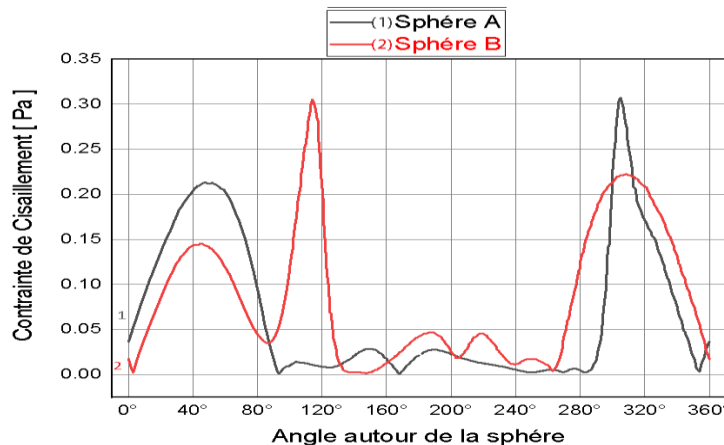
A l'angle  $360^\circ$ , la pression totale commence par une valeur maximale de 3.2 Pa car le fluide est toujours perpendiculaire au point de départ et elle diminue vers -1.15 Pa à  $297^\circ$  à cause du fluide prend la forme de la surface sphérique où elle reste à peu près aux alentours de cette valeurs jusqu'à l'angle  $180^\circ$ .

### - Pour la sphère B :

On remarque que la pression totale commence par une valeur maximale de 3,2 Pa car en amont sera toujours maximale et elle diminue vers 0.7 Pa à l'angle de  $64^\circ$  car le fluide prend la forme de la surface sphérique .Ensuite, elle augmente à 1,6 Pa à l'angle de  $98^\circ$  à cause de la présence d'un obstacle (la moitié inférieure de la sphère A) pour diminuer vers -1.1 Pa à l'angle de  $120^\circ$  parce que le fluide commence à se libérer par la disparition de l'obstacle .puis il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle  $180^\circ$  par la présence des turbulences.

A l'angle  $360^\circ$ , la pression totale commence par une valeur maximale de 3,2 Pa car le fluide est toujours perpendiculaire au point de départ, et elle diminue vers une valeur minimale de -2,3 Pa à  $283^\circ$ .car le fluide prend la forme de la surface sphérique Ensuite, elle s'accroit vers -1.2 Pa à  $205^\circ$  et enfin il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle  $180^\circ$  par la présence des turbulences.

### • Evolution de la contrainte de cisaillement :



**La figure (5-21) :** Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à  $60^\circ$

### - Pour la sphère A :

On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0.04 Pa ensuite elle augmente vers 0.22 Pa à un angle de  $53^\circ$  à cause de l'augmentation du frottement du fluide à la

surface de la sphère, après elle diminue vers 0 à l'angle  $96^\circ$  qui représente l'angle de décollement. Le tracé subit des perturbations jusqu'à  $180^\circ$ .

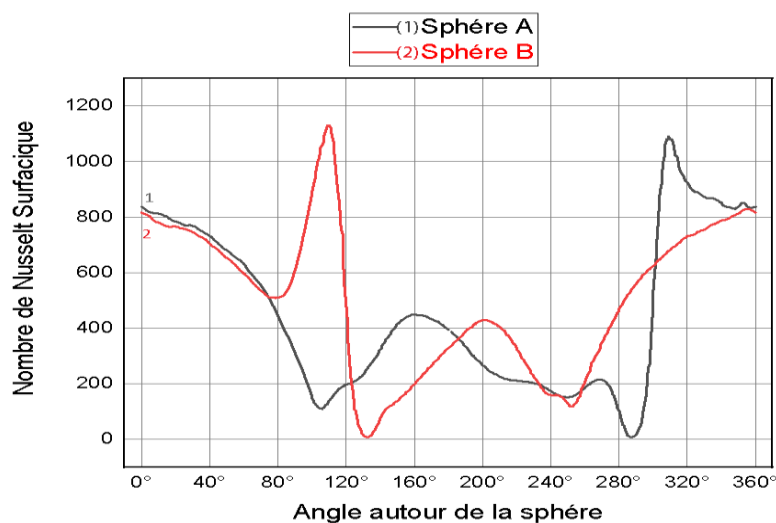
La contrainte de cisaillement prend la même valeur de départ à l'angle  $360^\circ$  ensuite elle augmente vers une valeur maximale de 0.31 Pa à  $308^\circ$  à cause de l'augmentation du frottement du fluide à la surface de la sphère, après elle diminue vers 0 Pa à l'angle  $282^\circ$  qui représente l'angle de décollement, pour subir des perturbations jusqu'à l'angle  $180^\circ$  par la présence des turbulences.

### - Pour la sphère B :

On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0.025 Pa ensuite elle augmente vers 0.145 Pa à un angle de  $49^\circ$  à cause de l'augmentation du frottement de fluide à la surface de la sphère, après elle diminue vers 0.4 Pa à l'angle  $88^\circ$  avant d'augmenter vers une valeur maximale de 0.31 Pa à  $115^\circ$  à cause de la présence d'un obstacle (la moitié inférieure de la sphère A) puis elle s'annule à  $148^\circ$  qui représente l'angle de décollement pour subir des perturbations jusqu'à l'angle  $180^\circ$  par la présence des turbulences.

La contrainte de cisaillement prend la même valeur de départ à l'angle  $360^\circ$  ensuite elle augmente vers 0.22 Pa à  $310^\circ$  à cause de l'augmentation du frottement de fluide à la surface de la sphère, après elle diminue pour s'annuler à  $262^\circ$  où le fluide quitte la paroi pour subir des perturbations jusqu'à l'angle  $180^\circ$  par la présence des turbulences.

### • Evolution du nombre de NUSSELT surfacique :



**La figure (5-22)** : Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à  $60^\circ$

### - Pour la sphère A :

Pour un angle de  $0^\circ$ , le nombre de NUSSELT prend une grande valeur de 830 puisque le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k ensuite il descend vers une valeur de 125 à  $103^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après, par la présence des turbulences, il y arrive des perturbations jusqu'à l'angle  $180^\circ$ .

A l'angle  $360^\circ$ , le nombre de NUSSELT prend la même grande valeur de l'angle 0 puisque le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k en suite il augmente à une valeur maximale de 1100 à l'angle  $310^\circ$  par la présence d'un obstacle qui fait augmenter l'application de l'hélium sur la paroi et par la suite l'augmentation des frottements en présence d'une haute pression ensuite, il descend strictement il s'annule à l'angle de  $290^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements.

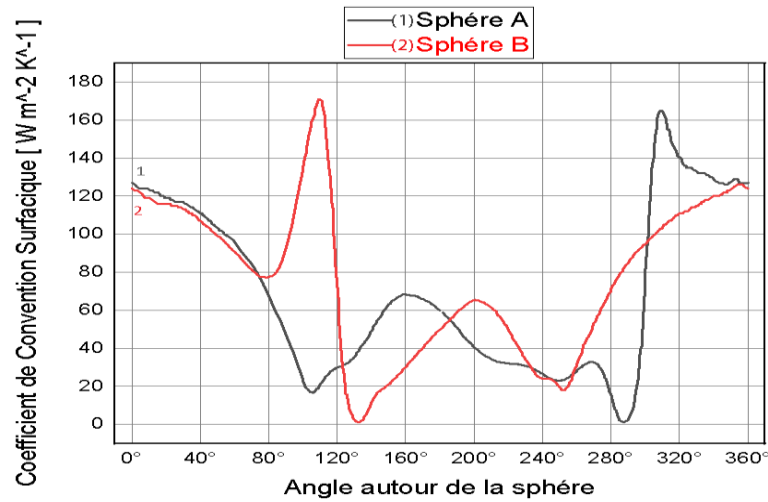
Après, par la présence des turbulences, il y arrive des perturbations jusqu'à l'angle  $180^\circ$ .

### - Pour la sphère B :

Pour un angle de  $0^\circ$ , le nombre de NUSSELT prend une grande valeur de 810 puisque le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k ensuite il descend vers une valeur de 510 à  $77^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après il s'élève à une valeur maximale de 1130 à  $110^\circ$  par la présence d'un obstacle qui fait augmenter l'application de l'hélium sur la paroi et par la suite l'augmentation des frottements en présence d'une haute pression. Puis il descend pour s'annuler à  $132^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements avant de s'élever à 340 pour l'angle de  $180^\circ$ .

A l'angle  $360^\circ$ , le nombre de NUSSELT prend la même grande valeur de l'angle 0 puisque le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k. Ensuite il diminue vers 130 à  $254^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après, par la présence des turbulences, il y arrive des perturbations jusqu'à l'angle  $180^\circ$ .

- Evolution du coefficient de convection surfacique :

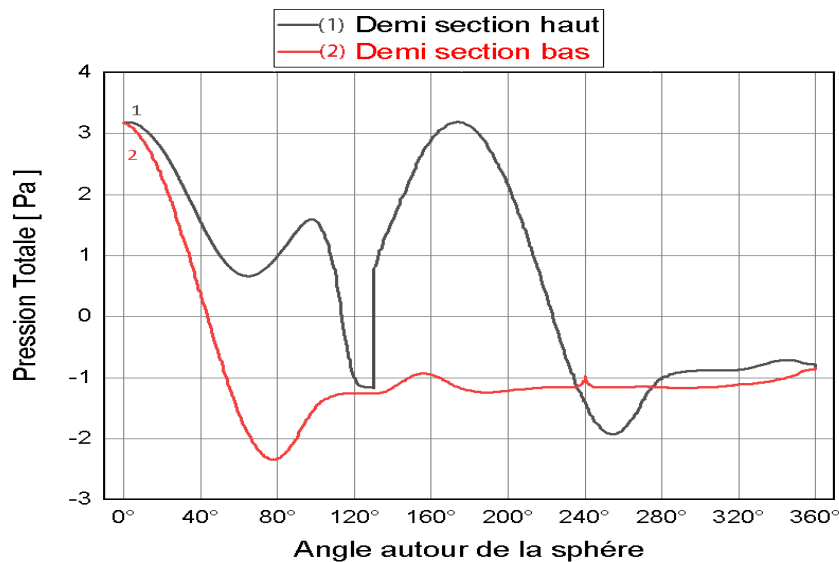


**La figure (5-23)** : Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à 60°

Il faut mentionner que les mêmes commentaires cités auparavant pour le nombre de NUSSELT surfacique restent valables pour le coefficient de convection surfacique

### 2.2.3.2 Analyse des résultats obtenus pour chaque demi-section (cas 60°) :

- Evolution de la pression totale :



**La figure (5-24)** : Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à 60° par section.

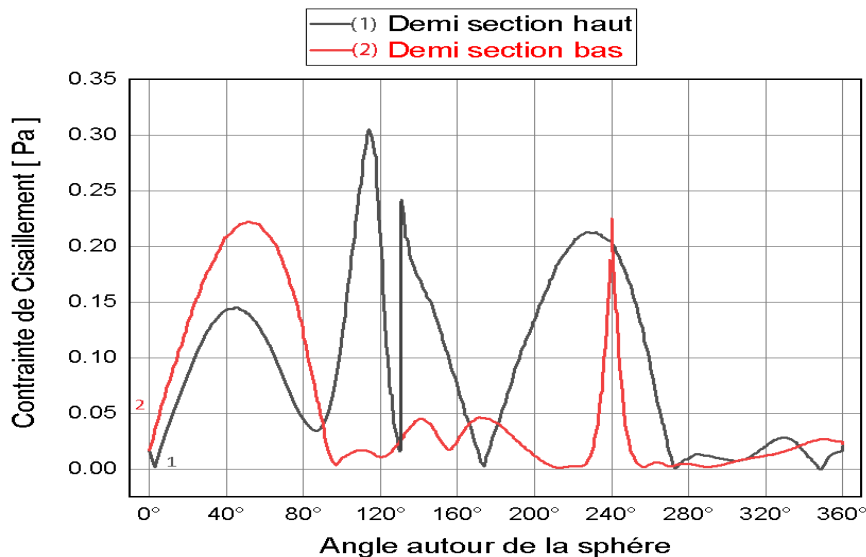
### -Pour la demi-section haute :

On remarque que la pression totale commence par une valeur maximale de 3,2 Pa car en amont sera toujours maximale et elle diminue vers 0.7 Pa à l'angle de 64° car le fluide prend la forme de la surface sphérique .Ensuite, elle augmente à 1,6 Pa à l'angle de 98° à cause de la présence d'un obstacle et diminue vers -1.1 Pa à l'angle de 120° parce que le fluide commence à se libérer par la disparition de l'obstacle. Elle s'accroît vers 3.2 Pa à 175° et elle diminue pour se perturber jusqu'à l'angle de 360° sous l'effet des turbulences.

### -Pour la demi-section basse :

A l'angle 0°, la pression totale commence par une valeur maximale de 3,2 Pa car le fluide est toujours perpendiculaire au point de départ, et elle diminue vers une valeur minimale de -2,3 Pa à 77° car le fluide prend la forme de la surface sphérique Ensuite, elle s'accroît vers -1.2 Pa à 155° et enfin il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle 360° par la présence des turbulences

- Evolution de la contrainte de cisaillement :



**La figure (5-25) :** Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à 60° par section

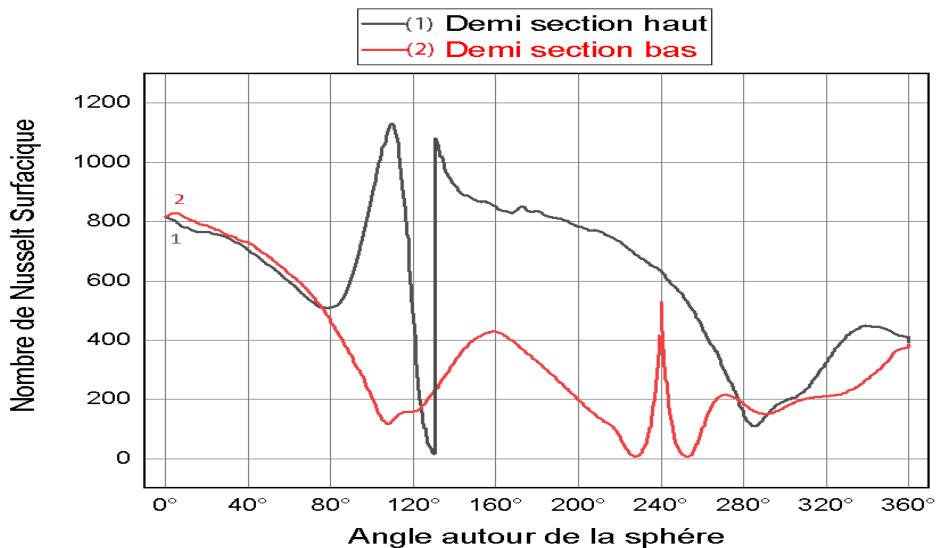
**-Pour la demi-section haute :**

On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0.025 Pa ensuite elle augmente vers 0.145 Pa à un angle de 49° à cause de l'augmentation du frottement de fluide à la surface de la sphère, après elle diminue vers 0.4 Pa à l'angle 88° avant l'apparition de deux pics dont un est maximale vers 0.31 Pa à 115° et l'autre vers 0.24 Pa à 132° à cause de la présence d'un obstacle. Elle augmente vers 0.21 Pa à 225° et elle descend pour s'annuler à 270° qui représente l'angle de décollement. Le tracé subit des perturbations jusqu'à l'angle de 360°.

**-Pour la demi-section basse :**

La contrainte de cisaillement prend la même valeur de départ de la section haute à l'angle 0° ensuite elle augmente vers 0.22 Pa à 50° à cause de l'augmentation du frottement de fluide à la surface de la sphère, après elle diminue pour s'annuler à 98° où le fluide quitte la paroi pour subir des perturbations jusqu'à l'angle 226°. On remarque la présence d'un pic vers 0.225° à 240° et se termine par des fluctuations jusqu'à l'angle de 360° en présence des turbulences.

• **Evolution du nombre de NUSSELT surfacique :**



**La figure (5-26) :** Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à 60°  
Par section.



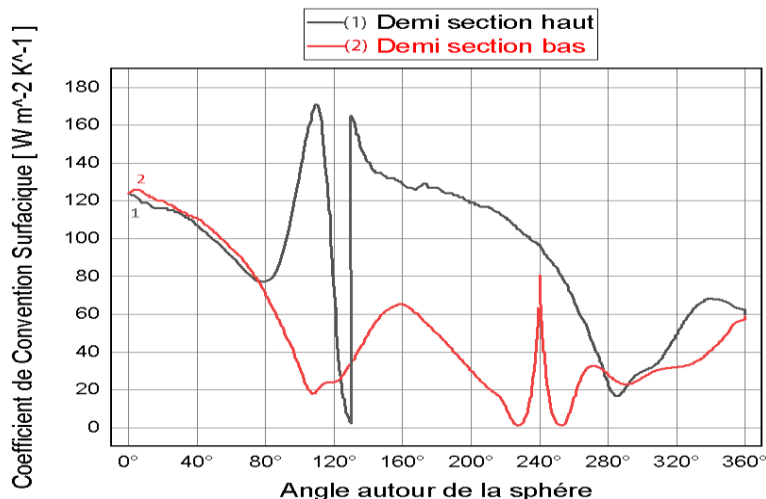
### -Pour la demi-section haute :

Pour un angle de  $0^\circ$ , le nombre de NUSSELT prend une grande valeur de 810 puisque le fluide entre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k ensuite il descend vers une valeur de 510 à  $77^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après il s'élève à une valeur maximale de 1130 à  $110^\circ$  par la présence d'un obstacle qui fait augmenter l'application de l'hélium sur la paroi et par la suite l'augmentation des frottements en présence d'une haute pression. Il descend vers 5 à  $132^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements et il augmente localement vers 1090 pour diminuer vers 110 à  $288^\circ$  et se termine par une élévation vers 400 à  $360^\circ$ .

### -Pour la demi-section basse :

A l'angle  $0^\circ$ , le nombre de NUSSELT prend la valeur de 810 puisque le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k. Ensuite il diminue vers 130 à  $106^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Il s'élève vers 440 à  $160^\circ$  et diminue et s'annule vers  $228^\circ$ , on remarque la présence d'un pic vers 540 à  $240^\circ$  avant de s'annuler encore une fois à  $252^\circ$ . Il se termine par une augmentation vers à  $360^\circ$ .

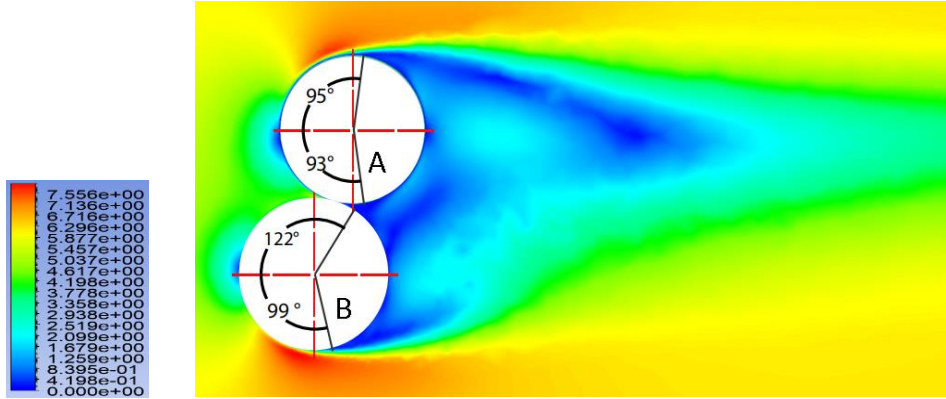
- Evolution du coefficient de convection surfacique :



**La figure (5-27)** : Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à  $60^\circ$  par section

Il faut mentionner que les mêmes commentaires cités auparavant pour le nombre de NUSSELT surfacique restent valables pour le coefficient de convection surfacique.

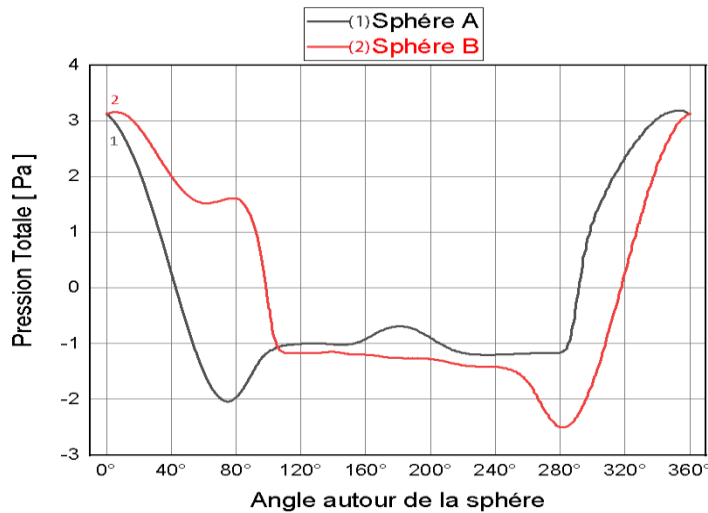
### 2.2.4 Configuration en quinconce à 75°:



**La figure (5-28)** : Le champ de vitesse autour des deux sphères combustibles de disposition en 75°

#### 2.2.4.1 Analyse des résultats obtenus pour chaque sphère (cas 75°) :

- Evolution de la pression totale :



**La figure (5-29)** : Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à 75°

- Pour la sphère A :

On remarque que la pression totale est maximale de 3.1 Pa à l'angle 0° car le fluide est toujours perpendiculaire au point de départ ensuite, elle diminue strictement pour atteindre une

valeur minimale de -2 Pa à 77° parce que le fluide prend la forme de la surface sphérique. Ensuite, il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle 180° par la présence des turbulences.

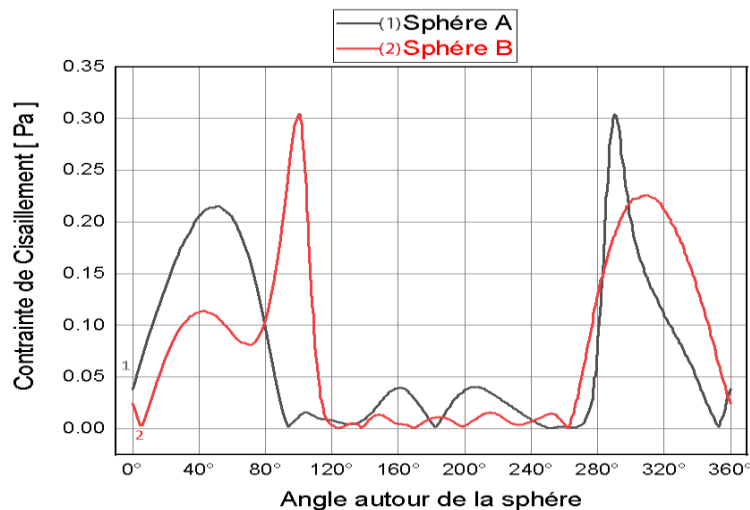
A l'angle 360°, la pression totale commence par une valeur maximale de 3.1 Pa car le fluide est toujours perpendiculaire au point de départ et elle diminue vers -1.2 à 284° parce que le fluide prend la forme de la surface sphérique où elle reste à peu près aux alentours de cette valeurs jusqu'à l'angle 180°.

### - Pour la sphère B :

On remarque que la pression totale commence par une valeur maximale de 3,2 Pa car en amont sera toujours maximale et elle diminue vers -1.1 à l'angle de 103° parce que le fluide prend la forme de la surface sphérique. Ensuite, il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle 180° par la présence des turbulences.

A l'angle 360°, la pression totale commence par une valeur maximale de 3,2 Pa car en amont sera toujours maximale et elle diminue vers une valeur minimale de -2,4 Pa à 283° parce que le fluide prend la forme de la surface sphérique. Enfin il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle 180° par la présence de turbulences.

### • Evolution de la contrainte de cisaillement :



**La figure (5-30) :** Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à 75°

### - Pour la sphère A :

On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0.04 Pa ensuite elle augmente vers 0.22 Pa à un angle de  $53^\circ$  à cause de l'augmentation du frottement du fluide à la surface de la sphère, après elle diminue vers 0 à l'angle  $95^\circ$  qui représente l'angle de décollement. Le tracé subit des perturbations jusqu'à  $180^\circ$  par la présence des turbulences.

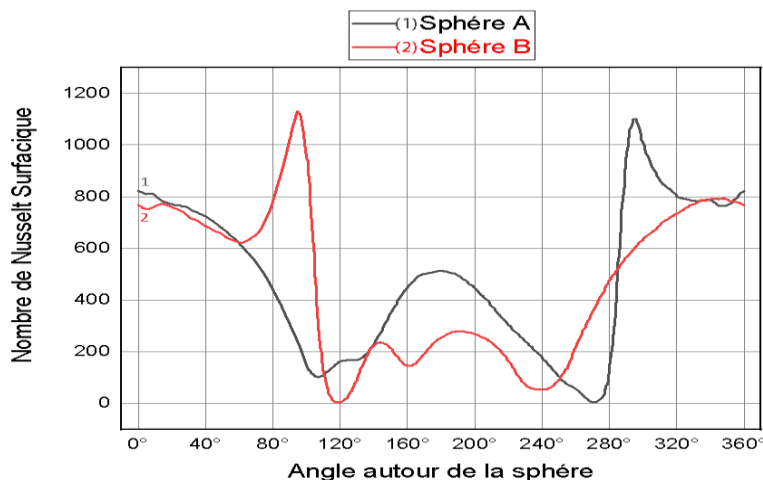
La contrainte de cisaillement prend la même valeur de départ à l'angle  $360^\circ$  ensuite elle augmente vers une valeur maximale de 0.305 Pa à  $291^\circ$  à cause de l'augmentation du frottement du fluide à la surface de la sphère, après elle diminue vers 0 Pa à l'angle de  $267^\circ$  qui représente l'angle de décollement pour subir des perturbations jusqu'à l'angle  $180^\circ$  par la présence des turbulences.

### - Pour la sphère B :

On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0.025 Pa avant d'augmenter vers une valeur maximale de 0.31 Pa à  $114^\circ$  à cause de l'augmentation du frottement du fluide à la surface de la sphère, puis elle s'annule à  $122^\circ$  où le fluide quitte la paroi pour subir des perturbations jusqu'à l'angle  $180^\circ$  par la présence des turbulences.

La contrainte de cisaillement prend la même valeur de départ à l'angle  $360^\circ$  ensuite elle augmente vers 0.225 Pa à  $310^\circ$  à cause de l'augmentation du frottement de fluide à la surface de la sphère, après elle diminue vers 0 Pa à  $261^\circ$  où le fluide quitte la paroi pour subir des perturbations jusqu'à l'angle  $180^\circ$  par la présence des turbulences.

### • Evolution du nombre de NUSSELT surfacique :



**La figure (5-31)** : Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à  $75^\circ$

### - Pour la sphère A :

Pour un angle de  $0^\circ$ , le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k, le nombre de NUSSELT prend une grande valeur de 810 ensuite il descend vers une valeur de 110 à  $105^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après, par la présence des turbulences, il y arrive des perturbations jusqu'à l'angle  $180^\circ$ .

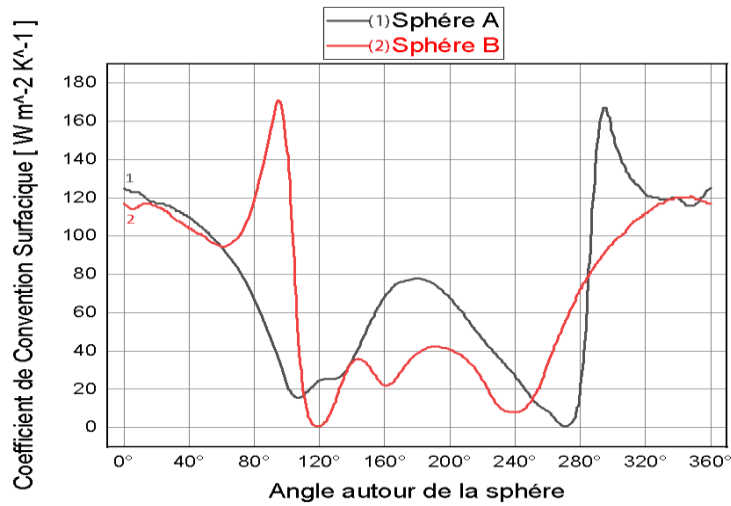
A l'angle  $360^\circ$ , le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k, le nombre de NUSSELT prend la même grande valeur de l'angle 0 ensuite il augmente à une valeur maximale de 1100 à l'angle  $295^\circ$  ensuite, il descend strictement où il s'annule à l'angle de  $273^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après, en présence des turbulences, il augmente vers 520 jusqu'à l'angle  $180^\circ$ .

### - Pour la sphère B :

Pour un angle de  $0^\circ$ , le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k, le nombre de NUSSELT prend une grande valeur de 760 ensuite il descend vers une valeur de 630 à  $62^\circ$ . Après il s'élève à une valeur maximale de 1140 à  $108^\circ$  puis il descend pour s'annuler à  $118^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Par la présence des turbulences, il y arrive des perturbations jusqu'à l'angle  $180^\circ$ .

A l'angle  $360^\circ$ , le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k, le nombre de NUSSELT prend la même grande valeur de l'angle 0 ensuite il diminue vers 80 à  $240^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Après, par la présence des turbulences, il y arrive des perturbations jusqu'à l'angle  $180^\circ$ .

### • Evolution du coefficient de convection surfacique :

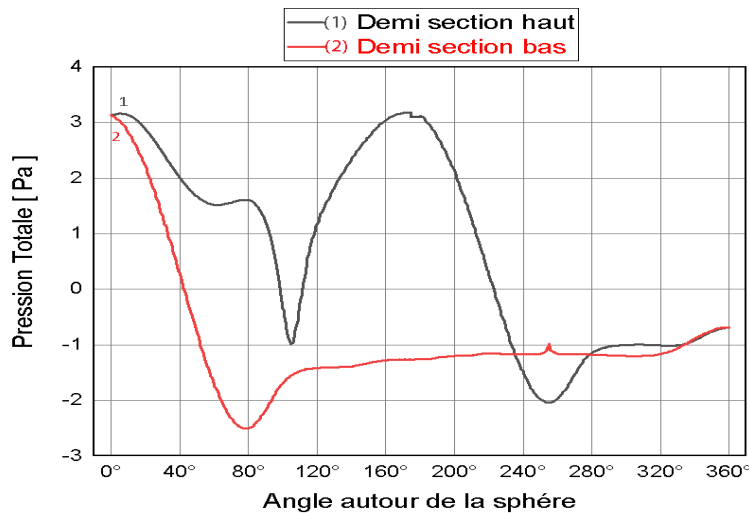


**La figure (5-32)** : Evolution du coefficient de convection surfacique pour l'angle de  $75^\circ$

Il faut mentionner que les mêmes commentaires cités auparavant pour le nombre de NUSSELT surfacique restent valables pour le coefficient de convection surfacique.

#### 2.2.4.2 Analyse des résultats obtenus pour chaque demi-section (cas $75^\circ$ ) :

- Evolution de la pression totale :



**La figure (5-33)** : Evolution de la pression totale de disposition en quinconce à  $75^\circ$  par section.

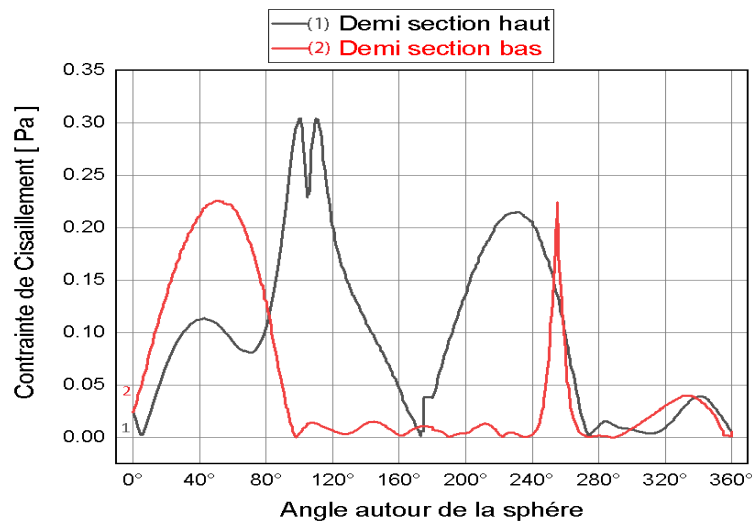
### -Pour la demi-section haute :

On remarque que la pression totale commence par une valeur maximale de 3,2 Pa car en amont sera toujours maximale et elle diminue vers -1 Pa à l'angle de 105° parce que le fluide prend la forme de la surface sphérique. Ensuite, elle augmente vers sa valeur maximale encore une fois à 175° et elle diminue vers une valeur minimale de -2 Pa à 254°. Elle se termine par une augmentation à -0.8 Pa à 360°.

### -Pour la demi-section basse :

A l'angle 0°, la pression totale commence par une valeur maximale de 3,2 Pa car en amont sera toujours maximale et elle diminue vers une valeur minimale de -2,4 Pa à 77° parce que le fluide prend la forme de la surface sphérique. Enfin il y arrive des légères fluctuations jusqu'à l'angle 360° par la présence de turbulences.

- **Evolution de la contrainte de cisaillement :**



**La figure (5-34) :** Evolution de la contrainte de cisaillement de disposition en quinconce à 75° par section

### -Pour la demi-section haute :

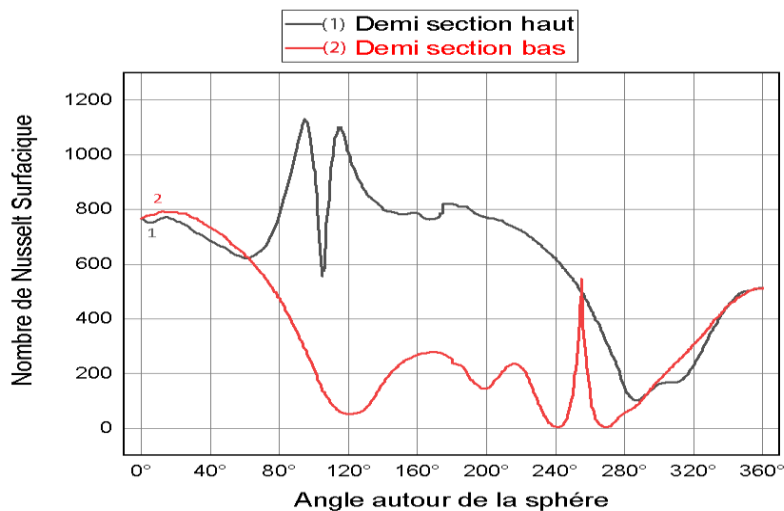
On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0.025 Pa avant d'augmenter vers une valeur maximale de 0.31 Pa à travers deux pics successifs à 100 et à 114° à cause de l'augmentation du frottement du fluide à la surface de la sphère, et elle s'annule à 176° qui représente l'angle de décollement. Elle augmente vers 0.22 Pa à 228° et descend pour

s'annuler une deuxième fois à 272°. Enfin, il y arrive des fluctuations jusqu'à l'angle de 360° par la présence des turbulences.

**-Pour la demi-section basse :**

On remarque que le point d'arrêt correspond à une contrainte de 0.04 Pa ensuite elle augmente vers 0.22 Pa à un angle de 53° à cause de l'augmentation du frottement du fluide à la surface de la sphère, après elle diminue vers 0 à l'angle 95° qui représente l'angle de décollement. Le tracé subit des perturbations jusqu'à 240° par la présence des turbulences. On remarque la présence d'un pic à l'angle 265° vers une valeur de 0.23 Pa et elle se termine par des fluctuations jusqu'à l'angle 360°.

• **Evolution du nombre de NUSSELT surfacique :**



**La figure (5-35) :** Evolution de nombre de NUSSELT de disposition en quinconce à 75°  
Par section.

**-Pour la demi-section haute :**

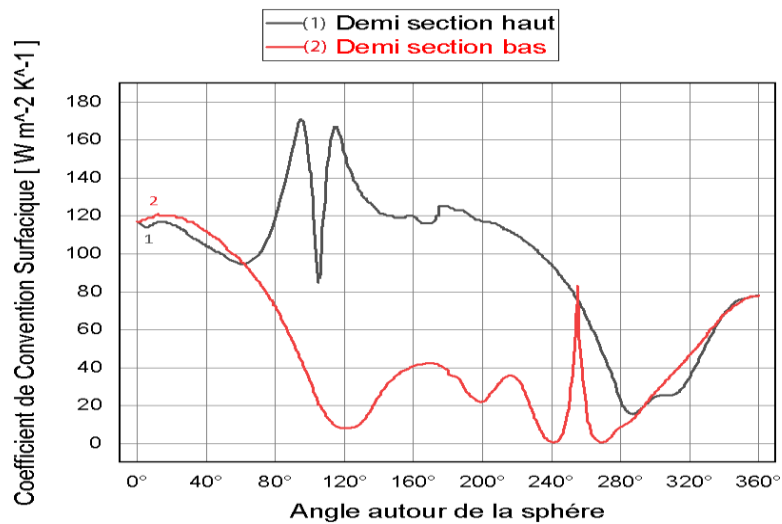
Pour un angle de 0°, le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k , le nombre de NUSSELT prend une grande valeur de 760. Ensuite, il descend vers une valeur de 630 à 62°. Après il s'élève à travers deux pics successifs vers une valeur maximale de 1140 à 108° et vers 1100 à l'angle de 115°. Puis, il descend vers une valeur minimale de 110 à 290° et augmente une dernière fois vers 510 à l'angle de 360°.



### -Pour la demi-section basse :

A l'angle  $0^\circ$ , le fluide rentre en collision avec la paroi de haute pression et puisque la température du fluide est de 523.15 k et la température de la sphère 1328.15 k, le nombre de NUSSELT prend la valeur de 760 ensuite il diminue vers 80 à  $120^\circ$  car l'application du fluide sur la sphère diminue par la diminution des frottements. Il augmente vers 380 à  $174^\circ$  et descend pour s'annuler à  $241^\circ$  et on remarque un pic vers 560 à  $256^\circ$  avant de s'annuler encore à  $266^\circ$ . Enfin, il augmente vers 510 à l'angle de  $360^\circ$ .

- Evolution du coefficient de convection surfacique :



**La figure (5-36)** : Evolution du coefficient de convection surfacique de disposition en quinconce à  $75^\circ$  par section

Il faut mentionner que les mêmes commentaires cités auparavant pour le nombre de NUSSELT surfacique restent valables pour le coefficient de convection surfacique.

### 3. Résultats du transfert thermique des simulations de toutes les configurations :

**Tableau (5-1)** : Transfert de chaleur de tous les cas simulés.

Décalage entre les deux sphères combustibles (°)	Transfert de chaleur entrée/sortie (W)
0°	1136.524
60°	1449.041
90°	1451.446
75°	1457.791
15°	1517.745
30°	1518.352
45°	1524.862

Pour l'angle de 0°, on a obtenu une valeur 1136.524 W pour le transfert de chaleur entre l'entrée et la sortie, ce qui la rend la mauvaise configuration à cause des valeurs enregistrées dans la sphère A dans les quantités physiques pression et contrainte de cisaillement par la présence de l'Obstacle sphère B qui empêche le bon refroidissement de la sphère A.

Pour l'angle de 60°, on a obtenu une valeur 1449.041 W pour le transfert de chaleur entre l'entrée et la sortie, elle est mieux que la position 0° mais reste quand même insuffisante pour un bon refroidissement parce que les turbulences dans le passage entre les deux sphères ne sont pas vraiment considérables.

Pour l'angle de 90°, on a obtenu une valeur 1451.446 W pour le transfert de chaleur entre l'entrée et la sortie, elle reste loin d'être la meilleure configuration parce que dans le passage entre les deux sphères, les turbulences (ce qui est normalement un facteur très important pour le bon refroidissement) sont presque nulles par le manque de l'inclinaison.

Pour l'angle de 75°, on a obtenu une valeur 1457.791 W pour le transfert de chaleur entre l'entrée et la sortie, elle est mieux que la position 0° mais reste quand même insuffisante pour un bon refroidissement parce que les turbulences dans le passage entre les deux sphères ne sont pas vraiment considérables.

Pour l'angle de  $15^\circ$ , on a obtenu une valeur 1517.745 W pour le transfert de chaleur entre l'entrée et la sortie, ce qui la qualifie pour être une position meilleure que les positions précédentes parce qu'elle ne présente pas un angle de décollement dans la moitié inférieure de la sphère A et donc le fluide ne quitte plus la paroi et provoque un bon refroidissement dans cette région et aussi parce que l'angle est petit ce qui donne une grande performance des turbulences dans le passage entre les deux sphères.

Pour l'angle de  $30^\circ$ , on a obtenu une valeur 1518.352 W pour le transfert de chaleur entre l'entrée et la sortie, ce qui la qualifie pour être une position meilleure que les positions précédentes parce qu'elle ne présente pas un angle de décollement dans la moitié inférieure de la sphère A et donc le fluide ne quitte plus la paroi et provoque un bon refroidissement dans cette région et aussi parce que l'angle est petit ce qui donne une grande performance des turbulences dans le passage entre les deux sphères.

Pour l'angle de  $45^\circ$ , on a obtenu une valeur 1524.862 W pour le transfert de chaleur entre l'entrée et la sortie, ce qui la rend la configuration la plus convenable parce que c'est la seule position qui possède deux angles de décollement ce qui provoque le plus la production des turbulences qui présentent un facteur principal du refroidissement.

### 4. Conclusion :

Dans ce chapitre, pour une optimisation des résultats des simulations pour les configurations en ligne à  $0^\circ$  et  $90^\circ$  et pour les configurations en quinconce à  $45^\circ$  et  $-45^\circ$ , une deuxième série des simulations numériques a été réalisée pour les configurations en quinconce à  $15^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  et  $70^\circ$ . Les résultats sont présentés par l'évolution de la pression, de la contrainte de cisaillement, du nombre de NUSSELT surfacique et du coefficient de convection surfacique. Les valeurs de transfert thermique ont été aussi présentées. Les résultats obtenus ont confirmé, encore ; que la disposition la plus appropriée des deux sphères combustibles pour son refroidissement est la disposition en quinconce à  $45^\circ$ , les autres dispositions d'autant moins efficaces.

# Conclusion générale

Des simulations numériques ont été exécutées sur deux sphères combustibles en graphite du réacteur nucléaire du type HTR-PM. Deux sphères combustibles de 6 cm de diamètre chacune sont placées dans un tunnel de section carrée. En premier lieu, elles sont placées l'une au-dessus de l'autre (configuration en ligne à  $90^\circ$ ), ensuite, l'une derrière l'autre (configuration en ligne à  $0^\circ$ ) et enfin elles sont décalées de  $45^\circ$  la sphère du bas par rapport à la sphère du haut, puis inversement. Dans notre étude, et pour un même nombre de Reynolds, on a détaillé l'évolution des quatre quantités physiques à savoir la pression, la contrainte de cisaillement, le coefficient de transfert de chaleur et le nombre de Nussalt. Une série d'autres simulations a été effectuée pour des angles variants entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$  afin de définir la meilleure disposition.

Lors de la première série de simulation, on a trouvé que l'écoulement est bien établi et le comportement des quatre quantités physiques était correct. La contrainte de cisaillement et l'angle de décollement sont des valeurs de confirmation de ce comportement correct.

Dans la deuxième étude, une deuxième série de simulations numériques a été faite afin de voir la fiabilité des premiers résultats avec le même nombre de Reynolds et les mêmes conditions de l'écoulement que pour la première étude ont été maintenus et seulement la disposition des deux sphères qui a été changée à chaque fois. Les résultats ont été présentés en termes d'évolution des quatre quantités physiques. D'après ce qu'on a pu remarquer, certes il y avait une optimisation des résultats précédents mais la configuration en quinconce à  $45^\circ$  reste toujours la disposition où les deux sphères sont refroidies le mieux par rapport aux autres configurations.

L'objectif de ce travail est atteint et l'ensemble des résultats obtenus répondent à toutes les questions posées à savoir l'utilisation des codes CFD pour ce genre de problèmes et les valeurs physiquement correctes qui ont été trouvées.

# Références

- [1] K, C, Lee « interaction aérodynamique entre deux des sphères nombre de Reynolds  $10^4$  » Département de l'Ingénierie Mécanique, (Université d'Auckland 1979)
- [2] Yutaka Tsuji, Yoshinobu Morikawa, Kozo Terashima « interaction fluide \_dynamique entre deux sphères » IntJ. Multiphase Flow Vol.8, No. 1, pp.71-82,1982 Printed in Great Britain
- [3] Inchul Kim, Said Elghobashi and William A. Sirignano {flux tridimensionnel sur deux sphères placées côte à côte} J. Fluid Mech. (1993), vol. 246, pp. 465-488 Copyright 1993 Cambridge University Press
- [4] R.C. Chen, J.L. Wu « les caractéristiques d'écoulement entre deux sphères interactives » Chemical Engineering Science 55 (2000) 1143-1158
- [5] R. Folkersma, H.N. Stein, F.N. van de Vosse « interactions hydrodynamiques entre deux sphères identiques côte à côte disposées à un flux uniforme dirigé perpendiculaire à la ligne reliant les centres des sphères » International Journal of Multi phase Flow 26 (2000) 877–887
- [6] L.Schouveiler, A.Brydon, T.Leweke, M.C.Thompson « Interactions des sillages de deux sphères placées côte à côte » .a) institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre (IRPHE), CNRS/universités Aix Marseille I & II, 49, rue F. joliat-curie, 13884 Marseille cedex 13, France b) Fluids laboratory for Aeronautical and Industrial Research (FLAIR) Department of Mechanical Engineering, Monash University, Victoria 3800, Australia Received 2 May 2003; accepted 15 May 2003
- [7] A. Jadoon, L. Prahl, J.Revestedt « interaction dynamique des deux sphères fixes pour plusieurs configurations et les conditions d'entrée » European Journal of Mechanics B/Fluids 29 (2010) 43–52
- [8] Engin Pinar, Besir Sain, Muammer Ozgoren and Huseyin Akilli « étude expérimentale des structures d'écoulement autour des sphères côte à côte » [dx.doi.org/10.1021/ie4022732](https://doi.org/10.1021/ie4022732) | Ind. Eng. Chem. Res. 2013, 52, 14492–14503

- [9] Rahim hassanzadeh, besir sahin, muammer ozgoren « Grande simulation des courants de Foucault auteur de deux sphères côte à côte » Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering and Architecture, Culcurova University, Konya, Turkey (Manuscript Received February 23.2012 Revised January 29.2013. Accepted March 14.2013)
- [10] Shiyang Li, Jian Yang, Quiwang Wang « grande simulation de tourbillon du flux et du transfert de chaleur au-delà des deux sphères côte à côte » applied thermal engineering 121 (2017) 810-819
- [11] principe de fonctionnement d'un réacteur nucléaire, connaissance des énergies (2005)
- [12] commissariat de l'énergie atomique, 2002, Le fonctionnement d'un réacteur Nucléaire, CEA, N°6, vol 8, pp 4-5.
- [13] Réacteurs nucléaires, laradioactivité.com
- [14] Oriol Planas - Ingénieur Technique Industriel, spécialité mécanique, « BWR systems overview. Shows Mark I/II/III containment and shows BWR6 components », energie nucléaire (2017)
- [15] J.a.l. Robertson, « centrales nucléaires » (2006)
- [16] « centrale nucléaire » , énergie nb power
- [17] Paul Breeze, « in power generation technologies » (third édition) (2019)
- [18] S. Ion, D. Nicholls, † R. Matzie‡ and D. Matzner, « Pebble bed modular reactor—the first Generation IV reactor to be constructed » Nuclear Energy, (2004), 43, No. 1, Feb., 55–62
- [19] Yangping Zhoua, \*, Pengfei Hao b, Fu Li a, Lei Shi a, Feng He b, Yujie Donga, Zuoyi Zhang, « Experiment study on thermal mixing performance of HTR-PM reactor outlet », Nuclear Engineering and Design (2016)
- [20] Yong Zhang, Yangping Zhou, « Research on Fault Diagnosis of HTR-PM Based on Multilevel Flow Model », Proceedings of the HTR (2014)

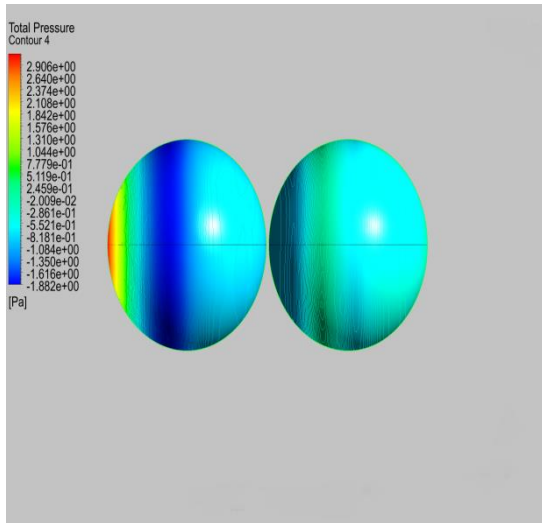
- [21] Zuoyi Zhang\*, Yujie Dong, Fu Li, Zhengming Zhang, Haitao Wang, Xiaojin Huang, Hong Li, Bing Liu, Xinxin Wu, Hong Wang, Xingzhong Diao, Haiquan Zhang, Jinhua Wang « The Shandong Shidao Bay 200 MWe High-Temperature Gas-Cooled Reactor Pebble-Bed Module (HTR-PM) Demonstration Power Plant: An Engineering and Technological Innovation ». INET, Tsinghua university, China (2016)
- [22] Yannik Guérin, Jean Henckes, « conception et fabrication de combustibles à base d'uranium » (2008)
- [23] Fabrice Guittonneau. « Développement de stratégies de gestion du combustible HTR ». Université de Nantes, (2009)
- [24] van Minh Bui. « La décroissance bêta des produits de fission pour la non-prolifération et la Puissance résiduelle des réacteurs nucléaires ». Physique Nucléaire Théorique [nucl-th]. Ecole des Mines de Nantes, (2012). Français.
- [25] LAAZAB SBAA « T de V des écoulements » Université de Saad dahleb de blida (2019)
- [26] « simulation du mouvement d'un train avec le logiciel OpenFOAM » - Comparaison de modèles de turbulence Energétique et Procédés Bureau d'Etudes Industrielles
- [27] A. Zeghib\* et K Talbi « Comparaison des différents modèles de turbulence d'un écoulement aérodynamique dans un cyclone Revue des Energies Renouvelables CISM'08 Oum El Bouaghi (2008) 311 – 324
- [28] Iacombe Francis « vérification et validation d'une loi de paroi consistante du modèle de turbulence  $k - \omega$  SST » département de génie mécanique école polytechnique de montréal (mai 2017)
- [29] « Fundamental FEA Concepts and Application » ANSYS
- [30] « Guide de l'utilisateur du maillage » ANSYS 2020
- [31] Mohamed Achour « interaction des structures tourbillonnaires avec la couche limite dans une cavité différentiellement chauffée » Université Mentouri – Constantine ( 30/06/2010 )
- [32] Stéphane Olivier et Haubert Gié, « sciences physiques » Thermodynamique, Paris, Tec & Doc Lavoisier, coll (1998)

# *Annexe A*

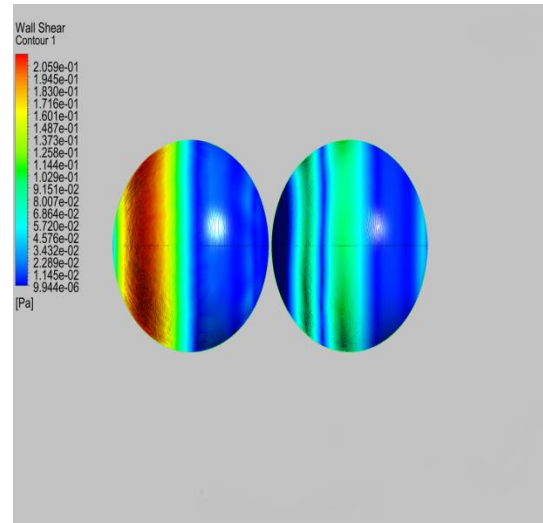
**Contours des simulations de l'écoulement de gaz autour des deux sphères combustibles de disposition en ligne ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ) et en quinconce ( $45^\circ$ )**



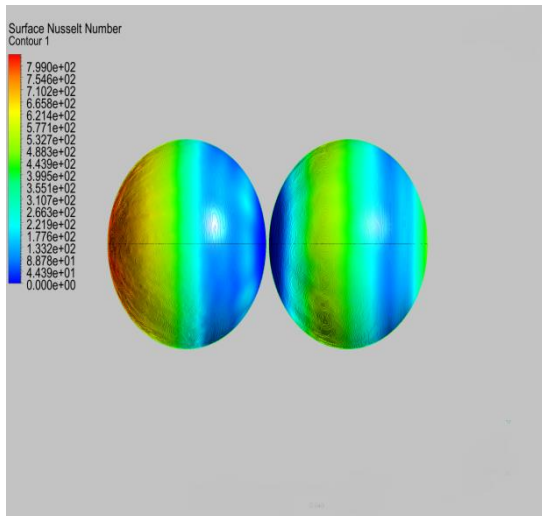
# 1. contour de l'écoulement de gaz autour des deux sphères de disposition en ligne à 0° :



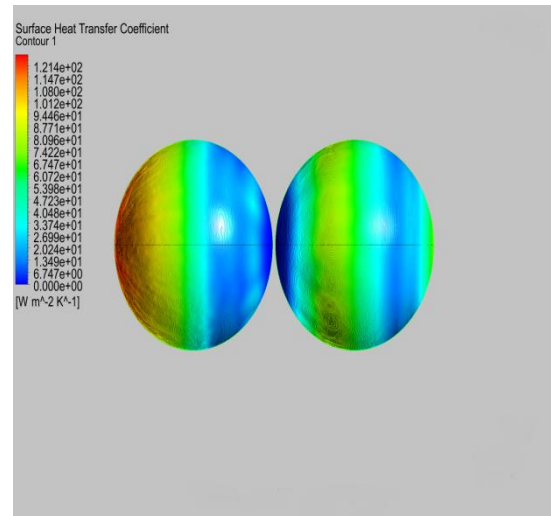
A. Contour de la pression totale



B. Contour de la contrainte de cisaillement

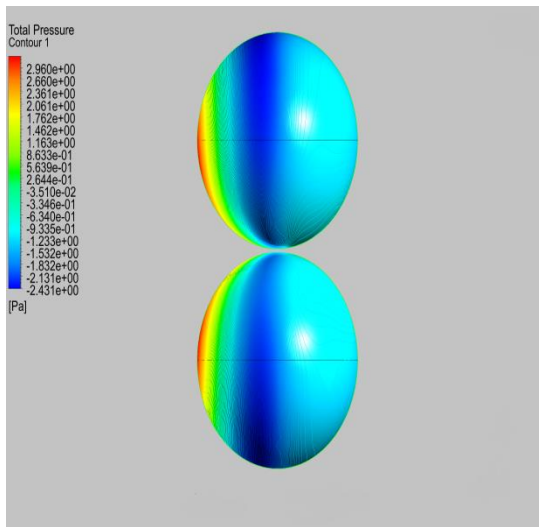


C. Contour du nombre de NUSSELT

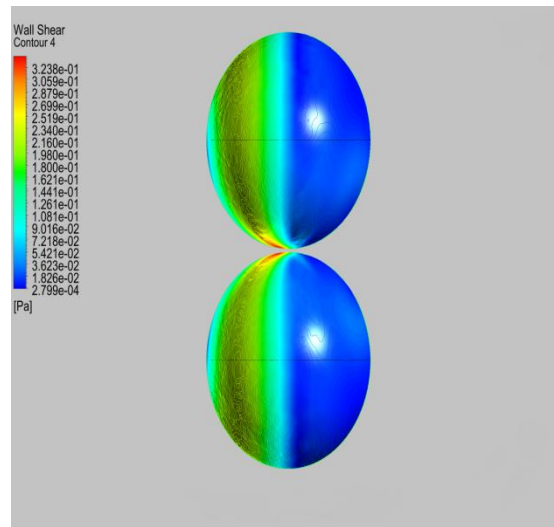


D. Contour du coefficient de convection

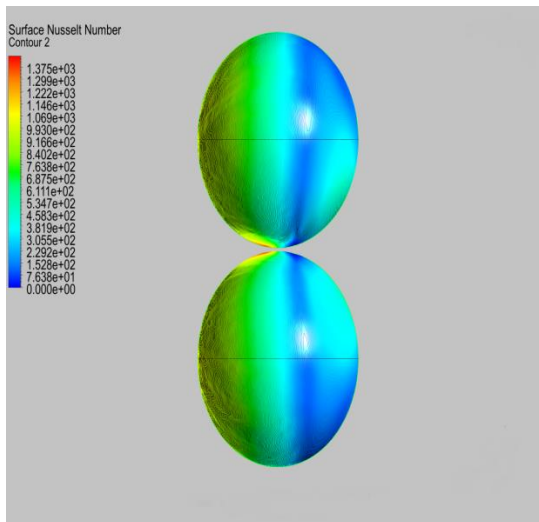
## 2. contour de l'écoulement de gaz autour des deux sphères de disposition en ligne à 90° :



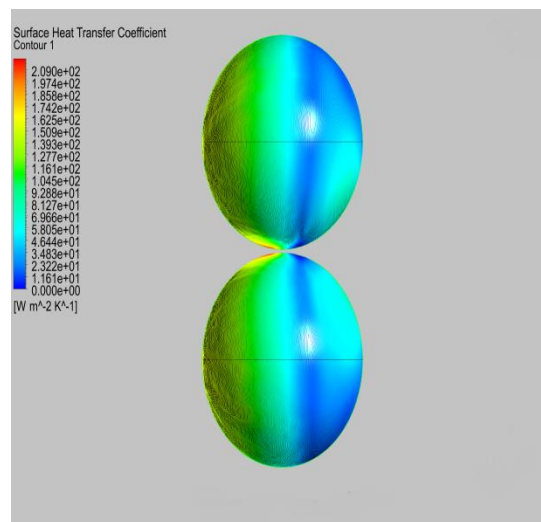
A. Contour de la pression totale



B. Contour de la contrainte de cisaillement

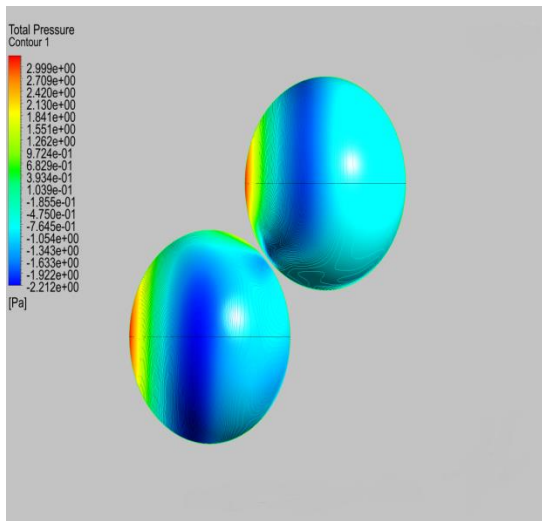


C. Contour du nombre de NUSSELT

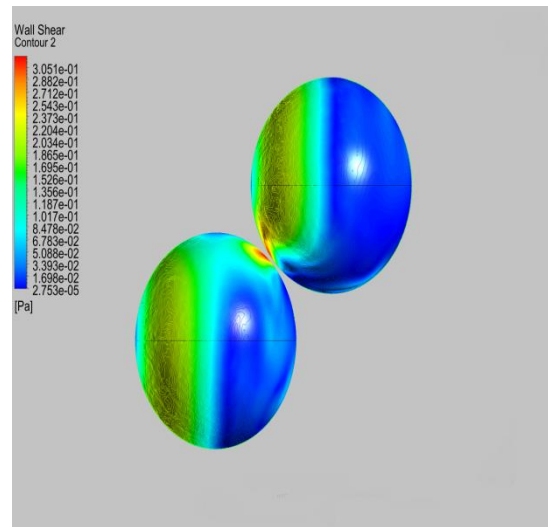


D. Contour du coefficient de convection

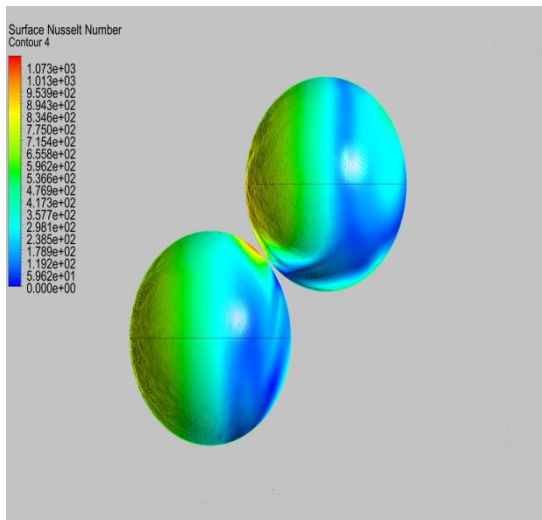
### 3. contour de l'écoulement de gaz autour des deux sphères de disposition en quinconce à 45° :



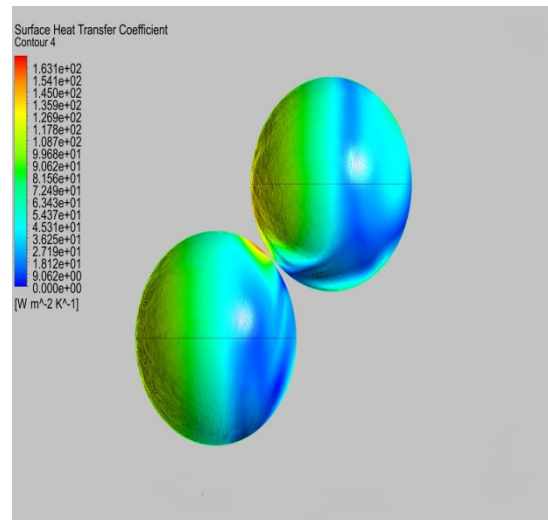
A. Contour de la pression totale



B. Contour de la contrainte de cisaillement



C. Contour du nombre de NUSSELT

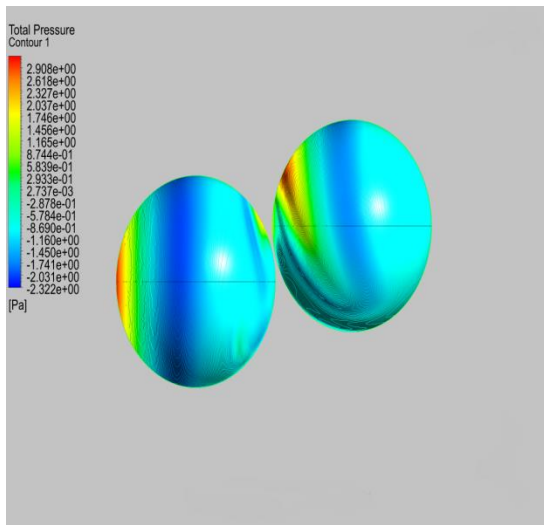


D. Contour du coefficient de convection

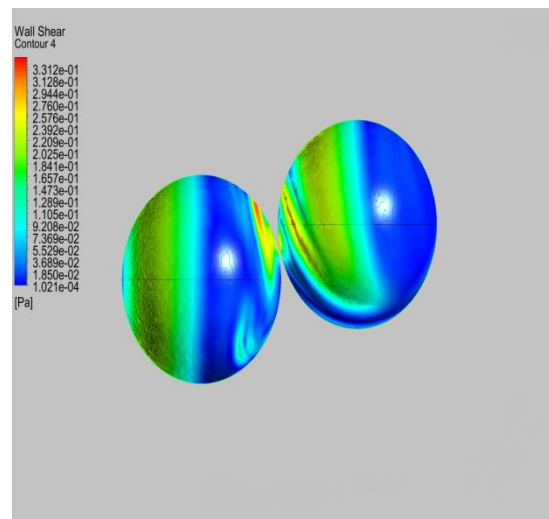
# *Annexe B*

**Contours des simulations de l'écoulement de gaz autour des deux sphères combustibles de disposition en quinconce ( $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ )**

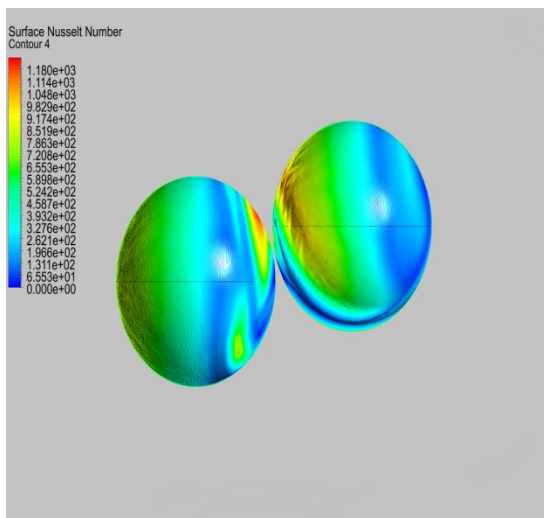
# 1. contour de l'écoulement de gaz autour des deux sphères de disposition en quinconce à 15° :



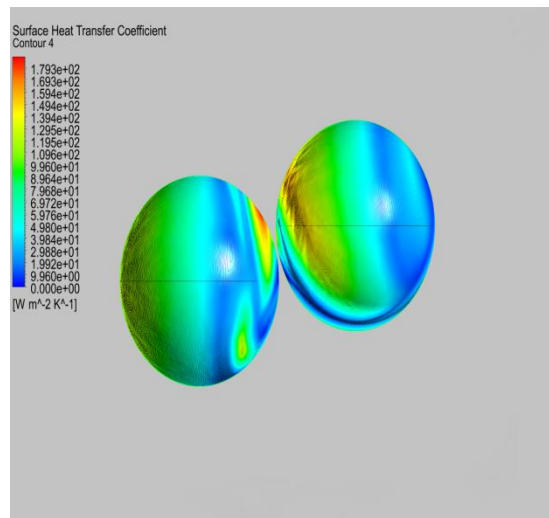
A. Contour de la pression totale



B. Contour de la contrainte de cisaillement

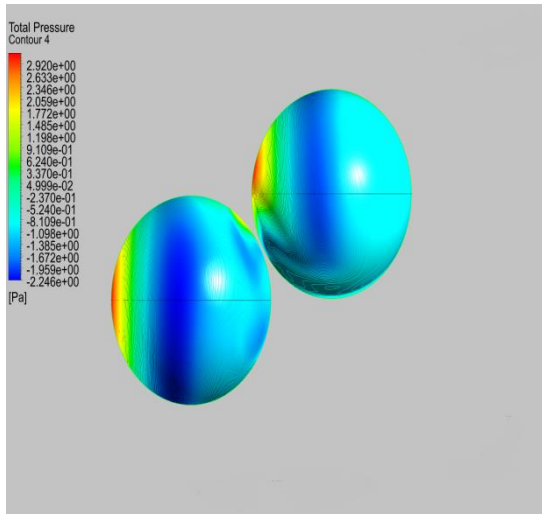


C. Contour du nombre de NUSSELT

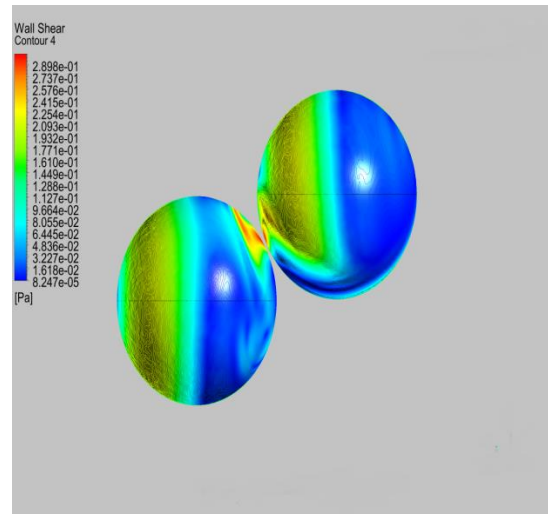


D. Contour du coefficient de convection

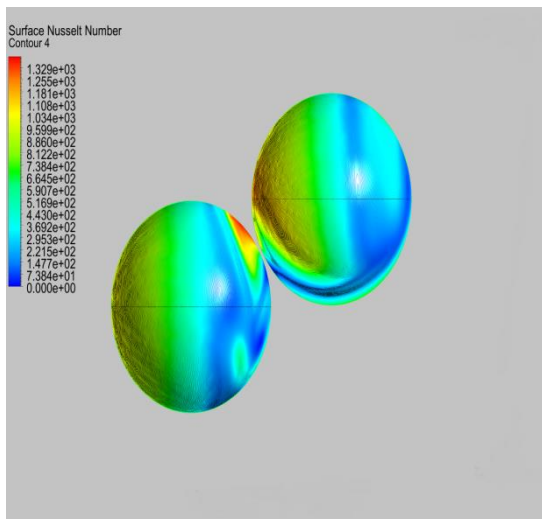
## 2. contour de l'écoulement de gaz autour des deux sphères de disposition en quinconce à 30° :



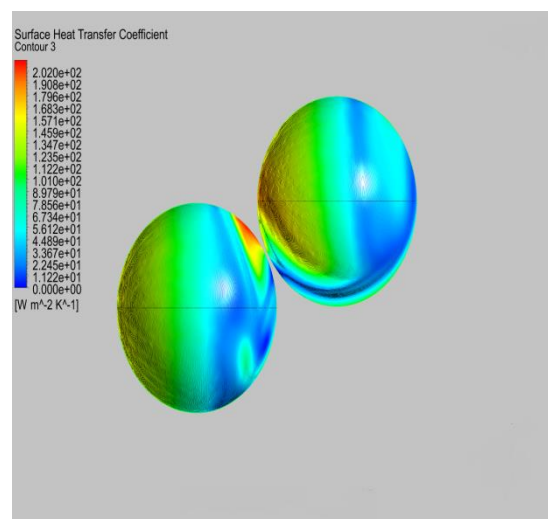
A. Contour de la pression totale



B. Contour de la contrainte de cisaillement

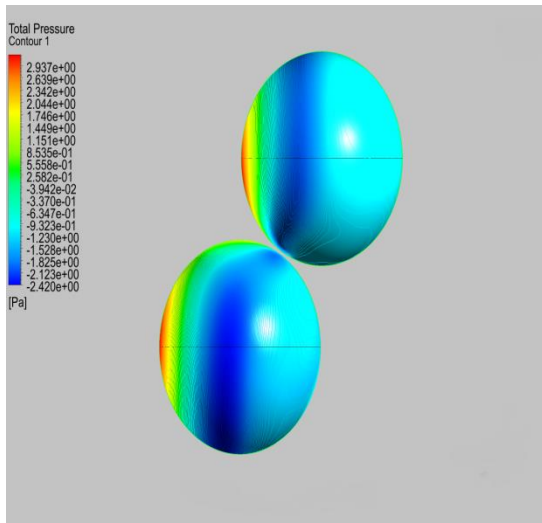


C. Contour du nombre de NUSSELT

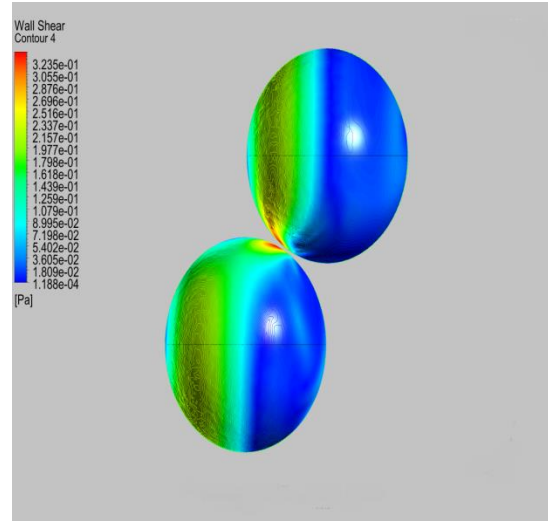


D. Contour du coefficient de convection

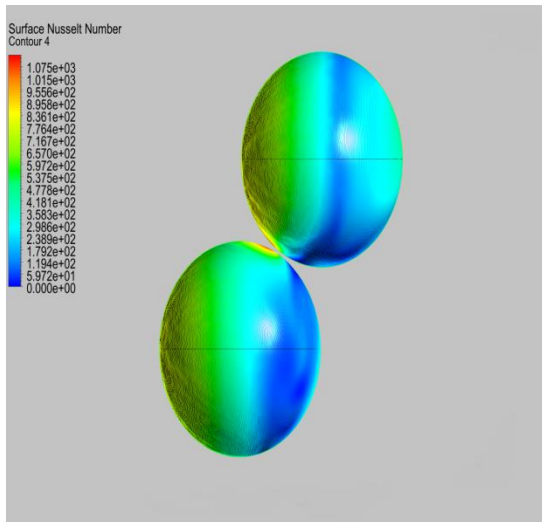
### 3. contour de l'écoulement de gaz autour des deux sphères de disposition en quinconce à 60° :



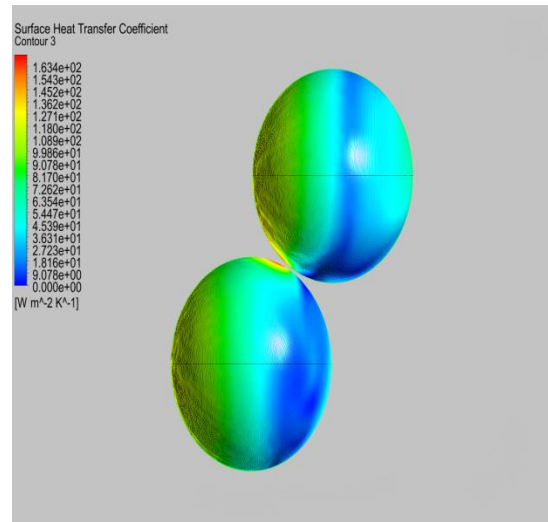
A. Contour de la pression totale



B. Contour de la contrainte de cisaillement

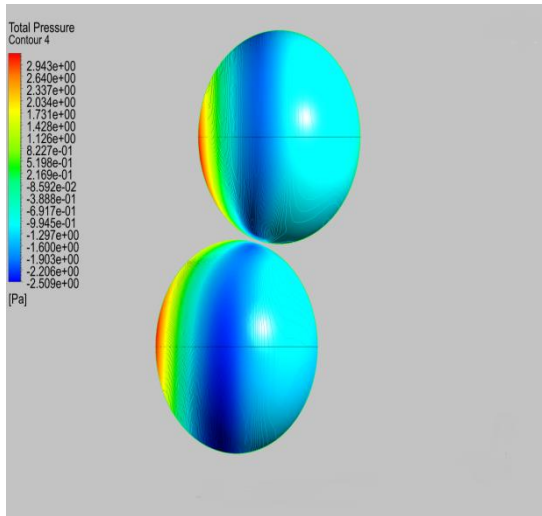


C. Contour du nombre de NUSSELT

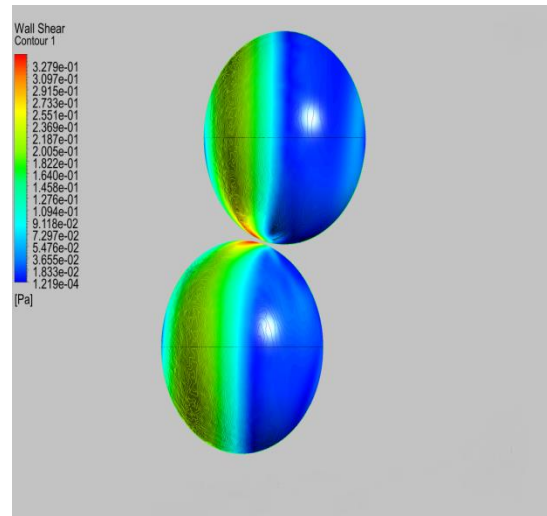


D. Contour du coefficient de convection

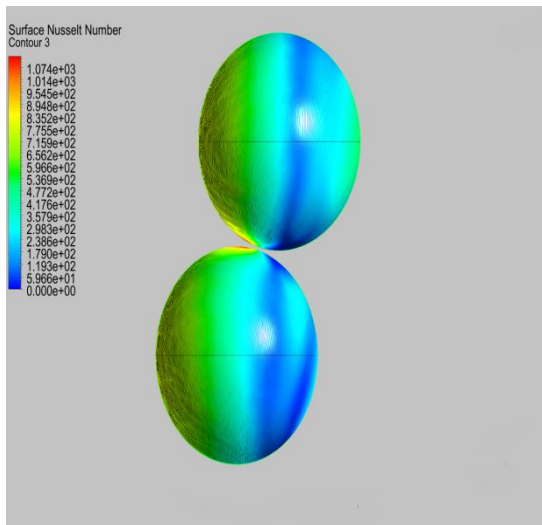
#### 4. contour de l'écoulement de gaz autour des deux sphères de disposition en quinconce à 75° :



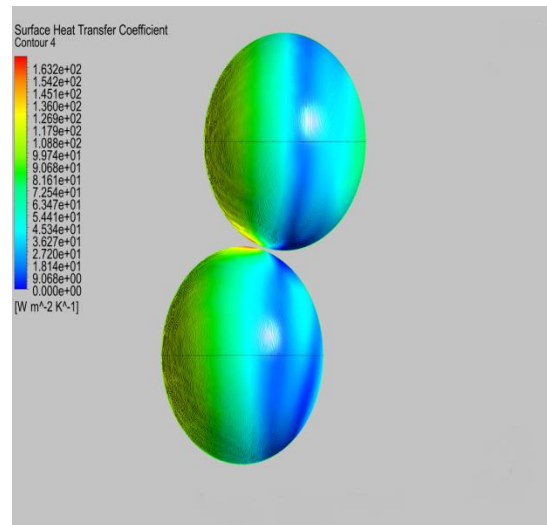
A. Contour de la pression totale



B. Contour de la contrainte de cisaillement



C. Contour du nombre de NUSSELT



D. Contour du coefficient de convection