



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
La République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de L'Enseignement Supérieur & la Recherche Scientifique



جامعة محمد الحميد بن باديس - مستغانم
Université Abdel Hamid Ben Badis – Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الهندسة الميكانيكية
Département Génie Mécanique

N° d'ordre : M...../GM/2021

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

Etude de la convection naturelle laminaire dans un réservoir sphérique utilisant une source de chaleur sur la paroi inférieure

Présenté par :

- ❖ RACHEDI TOUFIK
- ❖ BENIENE HACENE

Soutenu le 11/07/2021 devant le jury composé de :

Président	Pr. RETIEL.....	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr. KHALDI.....	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Dr. OULD SAID.....	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2020 / 2021

Remerciements

Tous d'abord nous remercions Dieu de nous avoir donné la force et la patience pour finir ce mémoire.

La réalisation de ce travail n'aurait pas abouti sans l'aide, à des degrés divers de certaines personnes envers lesquelles nous éprouvons de profonds sentiments de reconnaissance.

On voudrait d'abord présenter toute notre gratitude et nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail, notamment :

Notre encadreur Dr M. OULD SAID, pour ses conseils judicieux durant toute la période de notre travail. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.

On tient aussi à lui exprimer notre reconnaissance pour les conseils fructueux qu'il nous a prodigués, pour l'aide et le soutien qu'il nous a manifesté dans l'accomplissement de ce travail.

Nous tenons à exprimer une profonde gratitude au Dr. ZELMAT, qui nous a encouragé dans ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à nos familles qui nous ont encouragés durant nos études.

Nous remercions tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation. Ainsi que nous remercions notre jury composé de Pr. RTIEL comme président, et Dr. KHALDI comme examinateur.

Tout le personnel de l'Université ABDELHAMID IBN BADIS MOSTAGANEM

Enfin, on désire remercier nos amis et toutes les personnes qui nous ont aidés à la réalisation de ce travail.

ملخص

محاكاة رقمية للانتقال الحراري الطبيعي غير المضطرب داخل حيز كروي عمودي قد اقترحت، الحيز معزول من الأسفل تم تسخين التجويف من أسفل بمصدر حرارة وتبريده بدرجة حرارة منخفضة في الجدار العلوي ويعتبر جزء من قاع الخزان ثابت الحرارة. معادلة الحفاظ على الكتلة، معادلة الاستمرارية و معادلة الطاقة تم حلها بواسطة طريقة الحجم المنتهية باستعمال رمز التجاري بطلاقة، تأثير العوامل الخاصة $10^3 \leq Ra \leq 10^6$, $Pr=2,163$, $0.1 \leq \varepsilon \leq 0.3$ السلوك الحراري و الديناميكي في الطور المستقر قد دُرس و نوقش.

الكلمات المفتاحية: الحمل الحراري الطبيعي؛ خوارزمية كويلد؛ الميثان

Résumé

La simulation numérique de la convection naturelle laminaire dans une cavité sphérique verticale est proposée, la cavité est chauffée en bas avec une source de chaleur et refroidie avec une température basse dans de la paroi supérieur et une partie du fond de réservoir est considéré comme adiabatique. Les équations de conservations de masse, de continuité et d'énergie sont résolues avec la méthode des volumes finis en utilisant le code de calcul Fluent. L'influence des paramètres caractéristiques ($10^3 \leq Ra \leq 10^6$, $Pr=2,163$, $0.1 \leq \varepsilon \leq 0.3$) sur le comportement thermique et dynamique en régime stationnaire est analysée et discutée.

Mot clés : convection naturelle; Algorithme COUPLED ; méthane

Abstract

The numerical simulation of laminar natural convection in a vertical spherical cavity is proposed. the cavity is heated at the bottom with a heat source and cooled with a low temperature in the top wall and part of the tank bottom is considered as adiabatic. The equations of mass conservation, momentum and energy are resolved with finite-volume method using FLUENT commercial code. The influence of the characteristic parameters ($10^3 \leq Ra \leq 10^6$, $Pr=2,163$, $0.1 \leq \varepsilon \leq 0.3$) on the thermal and dynamic behavior at steadystate is analyzed and discussed.

Keys words : Natural Convection; COUPLED algorithm; methane

Table Des Matières

Nomenclature

Liste des Figures

Introduction générale 1

Chapitre I : Etudes Bibliographiques

I.1 Introduction 3

I.2 Revue bibliographique 3

I.3 Généralités 5

I.3.1 Transfert de chaleur par convection5

I.3.2 Les différents types de convection..... .5

I.3.3 La Convection Naturelle6

I.3.4 La convection dans les enceintes..... .6

I.3.4.1 Cavité carrée..... .7

I.3.4.2 Cavité carrée avec gradient vertical de température..... .7

I.3.4.3 Cavité carrée avec gradient horizontal de température..... .7

I.3.4 Cavité cylindrique8

I.4 Liquéfaction du GNL9

I.5 Stockage du GNL10

I.5.1 Stockage a rien10

I.5.2 Les réservoirs en cavités salines11

I.5.3 Les réservoirs en nappe aquifères..... .11

I.6 Transport du gaz naturel13

I.6.1Gazoduc13

I.6.2 Le m thanier13

I.6.2.1 Méthanier à membrane..... .14

I.6.2.2 Méthanier   sphère..... .14

I.7 Conclusion	15
-----------------------------	----

Chapitre II : Formulations Mathématiques

II.1 Introduction	16
II.2 Modèle physique	16
II.3 Formulation mathématique	16
II.3.1 Equation de continuité .conservation de la masse	17
II.3.2 Équation de quantité de mouvement	18
II.3.3 Équation de l'énergie	18
II.4 Hypothèse simplificatrices	19
II.5 Équation représentatives	19
II.6 Conditions aux limites	20
II.7 Le transfert de chaleur	20
II.8 Conclusion	21

Chapitre III : Simulation Numérique

III.1 Introduction	22
III.2 Généralités sur la CFD	22
III.2.1 Domaine d'utilité de la CFD	22
III.3 Description de Gambit	23
III.3.1 Gambit	23
III.3.2 Interface et étapes de Gambit	23
III.3.2.1 Lancer Gambit	23
III.3.2.2 Construction de la géométrie	24
III.3.2.3 Création de la géométrie	24
III.3.2.4 Génération du maillage	25
III.3.2.5 Les conditions aux limites	25

III.3.2.6 Exportation du maillage de Gambit.....	.26
III.4 Description de fluent .....	.26
III.4.1 Les étapes de solveur fluent.....	.27
III.4.1.1 Lancer Fluent.....	.27
III.4.1.2 Importation de la géométrie.....	.27
III.4.1.3 Vérification du maillage.....	.28
III.4.1.4 Vérification des unités et des dimensions.....	.29
III.4.2.1 Choix du solveur.....	.29
III.4.2.2 Choix du régime d'écoulement .....	.30
III.4.3.1 Les caractéristiques du matériau .....	.30
III.4.3.2 Les conditions opératoires.....	.31
III.4.3.3 Les conditions aux limites .....	.31
III.4.4.1 Contrôle de la solution.....	.32
III.4.4.2 Initialisation.....	.32
III.4.4.3 Choix des critères de convergence.....	.33
III.4.4.4 Allures de l'évolution des résidus de calcul.....	.34
III.5 Critères de convergence .....	.35
III.6 Conclusion.....	.35

Chapitre IV : Résultats & Discussions

IV.1 Introduction.....	.36
IV.2 Influence des différents paramètres .....	.36
IV.3. Validation des résultats .....	.36
IV.3.1 Cas de référence.....	.36
IV.3.2 Sensibilité du maillage .....	.38
IV.4 Résultats et discussions .....	.38
IV.4.1 Effet du nombre de Rayleigh .....	.39

IV.4.2 Effet du rapport de forme.....	.42
IV.5 Conclusion.....	.44
Conclusion générale .....	.45
Références bibliographiques.	

Nomenclature

Symboles latins

a diffusivité thermique [m^2/s]

B Poussée d'Archimède [$N.m^{-3}$]

C_p Chaleur massique [$KJ/Kg K$]

g Accélération de la pesanteur [$m.s^{-2}$]

h Enthalpie massique du fluide [$J.Kg^{-1}$]

Nu Nombre de Nusselt [-]

P Pression [Pa]

Pr Nombre de Prandtl [-]

R Rayon de la cavité [m]

Rat Nombre de Rayleigh thermique [-]

S Section de la paroi [m^2]

t Temps [s]

T Température [k]

T_0 Température de référence [K]

T_{sat} Température de saturation [K]

T_f Température de la paroi froide [K]

T_c Température de la paroi chaude [K]

U La vitesse [$m.s^{-1}$]

u Composantes adimensionnée de la vitesse [-]

V Volume [m^3]

ΔT Différence de Température [k]

ΔP Différence de Pression [Pa]

Symboles grecs

β Coefficient de dilatation thermique [1/K]

ε Rapport de forme [-]

λ Conductivité thermique [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]

ρ Masse volumique [Kg.m^{-3}]

ρ_0 Masse volumique à la température de référence [Kg.m^{-3}]

θ L'angle de la cavité [Rad]

μ Viscosité dynamique [Kg/m.s]

ν Viscosité cinématique [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$]

σ Constante de Stefan-Boltzmann [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$]

Φ Flux radiatif [w]

ϕ Flux radiatif par unité de surface [w.m^{-2}]

Ψ Fonction de courant [-]

∇ Opérateur gradient [-]

∇^2 Opérateur Laplacien [-]

Abréviation

GN Gaz Naturel

GNT Gaz naturel traité

GND Gaz naturel décarbonaté

GNL Gaz naturel liquéfié

GPL Gaz du Pétrole liquéfié

HP Haute Pression

BP Basse Pression

E Entré

S Sortie

CH Methane

C_2H_6 Ethane

C_3H_8 Propane

N₂ Nitrogène

CO₂ Dioxyde de Carbone

He Hélium

H₂O Eau

Liste des figures

CHAPITRE I

- Figure (I.1)** Schéma représentant la configuration de la convection de Rayleigh –Bénard.
- Figure (I.2)** Schéma de convection dans une cavité avec gradient horizontal de température.
- Figure (I.3)** Réservoir de stockage de GNL
- Figure (I.4)** Réservoirs de stockage de gaz.
- Figure (I.5)** Les réservoirs en cavités salines (storengy.com)
- Figure (I.6)** Les réservoirs en nappe aquifères
- Figure (I.7)** Méthanier à membrane
- Figure (I.8)** Méthanier avec cavités sphériques autoporteuses
- Figure (I.9)** Vue de face d'un navire avec cuves auto porteuses de type.

CHAPITRE II

- Figure (II.1)** Modèle physique

CHAPITRE III

- Figure (III.1)** Interface de GAMBIT
- Figure (III.2)** Construction de la géométrie
- Figure (III.3)** Création de la géométrie
- Figure (III.4)** Génération de maillage
- Figure (III.5)** Les conditions aux limites
- Figure (III.6)** Exportation du maillage.
- Figure (III.7)** Enregistrement du fichier
- Figure (III.8)** Lancement du logiciel Fluent.
- Figure (III.9)** Importation de la géométrie.
- Figure (III.10)** Vérification du maillage

Figure (III.11) Choix du solveur

Figure (III.12) Choix de modèle laminaire

Figure (III.13) Les caractéristiques du matériau

Figure (III.14) Choix des conditions opératoires

Figure (III.15) Le flux d'entrée (conditions aux limites)

Figure (III.16) Choix d'ordre d'équation

Figure (III.17) Initialisation de calcul

Figure (III.18) Choix des critères de convergence

Figure (III.19) Choix du nombre des itérations et lancement du calcul

Figure (III.20) Allures de l'évolution des résidus de calcul

CHAPITRE IV

Figure (IV.1) Comparaison des isothermes (a) Résultats Expérimentaux de Calcagni et al [17] (b) Présent travail.

Figure(IV.2) Comparaison des contours des lignes de courant (a) Présent travail (b) Résultats numériques de Calcagni et al [17].

Figure (IV.3) Cavité sphérique verticale avec la paroi inférieure chauffée par une source de chaleur.

Figure (IV.4) Les isothermes pour différents valeurs du nombre de Rayleigh
 $\varepsilon=0,1 \quad \Phi=50 \text{ w}$

Figure (IV.5) Les lignes de courant pour différents valeurs du nombre de Rayleigh
 $\varepsilon=0,1 ; \Phi=50 \text{ w}$

Figure (IV.6) Les lignes de courant pour différents valeurs du rapport de forme
 $Ra=10^5, \Phi=50 \text{ w} ;$

Figure (IV.7) Les isothermes pour différents valeurs du rapport de forme
 $Ra=10^5, \Phi=50 \text{ w}$

Figure (IV.8) Evolution du nombre de Nusselt le long de la paroi chaude en fonction de nombre de Rayleigh et plusieurs rapport de forme ε .



INTRODUCTION
GENERALE

Introduction générale

Le gaz naturel est un hydrocarbure gazeux qui représente une source d'énergie importante, en tenant compte à sa consommation dans le monde entier. Avant qu'il arrive au consommateur, le gaz passe par un long chemin où il rencontre des opérations et des transformations compliquées telles que l'extraction, le traitement, la liquéfaction et le stockage.

Le gaz naturel doit être liquéfié; à cause des raisons de stockage et de commerce, cette opération consiste à rendre le gaz naturel liquide à -160 °C , le volume initial du gaz est réduit 600 fois après le traitement final. Du fait de cette caractéristique, même à des pressions très élevées le gaz naturel peut être stocké à l'état liquide avec des quantités beaucoup plus importantes qu'à l'état gazeux.

Pour stocker les gaz liquéfiés sous pression atmosphérique, la température du gaz doit être abaissée jusqu'à leur point d'ébullition par un système de réfrigération approprié. Les unités de stockage doivent comprendre des isolations thermiques performantes afin d'éviter le réchauffement du gaz réfrigéré.

Les réservoirs de stockage se caractérisent par leurs formes, leurs dimensions géométriques, la pression et la température du produit stocké qui est liée à sa pression par la loi de vapeur saturante.

La convection naturelle dans la cavité est un sujet de recherche approfondie. Beaucoup de recherches sur la mobilité Réaliser des cellules rectangulaires et des cylindres horizontaux, en particulier l'effet de l'allongement de la cavité sur la structure de l'écoulement. Portez une attention particulière aux différents modes de convection Naturellement : on peut ainsi distinguer la situation où le fluide s'écoule immédiatement En mouvement (dans ce cas, le gradient de densité est orthogonal à la force Archimède) ces mouvements n'apparaissent que lorsque le gradient de la masse volumique dépasse une certaine valeur critique (ce sont des cas de gradient La densité est cohérente avec la force d'Archimède, mais opposée à la force d'Archimède). Tout Ce travail a été et a été essentiellement motivé par la situation économique du passé (recherche Système de réacteur nucléaire, la première étude de l'énergie solaire...). De Il est maintenant possible d'imaginer une configuration plus complexe : une cavité ayant la forme suivante tout parallélogramme, flux tridimensionnel, flux entrant Espace annulaire, cavité sphérique (cas d'un méthanier).

Le travail présenté dans ce mémoire, entre dans le cadre de la simulation numérique du transfert thermique par convection naturelle en régime laminaire afin de prévoir l'évolution du flux de chaleur et la dynamique du GNL.

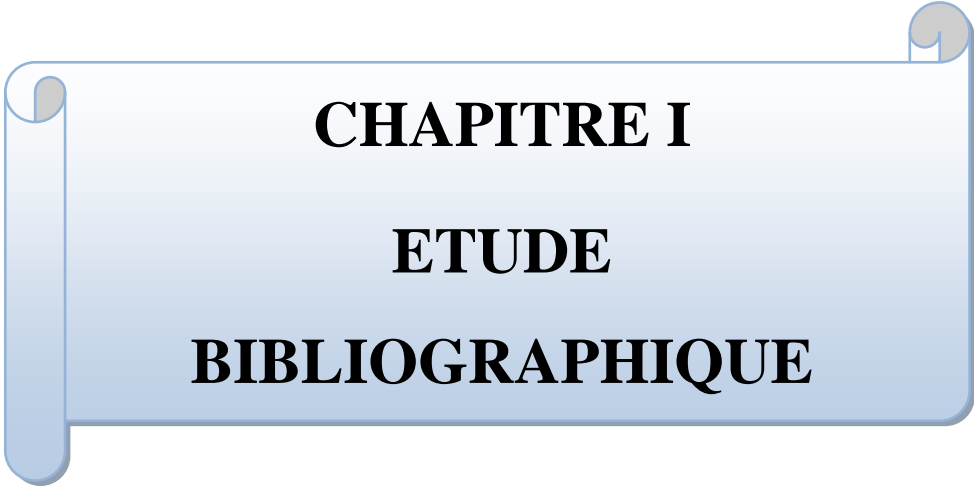
L'objectif général est ici de proposer des méthodes de résolution numérique, permettant d'obtenir une description qualitative et quantitative du phénomène étudié.

Dans l'étude bibliographique du chapitre 1, nous donnons un aperçu des divers travaux entrepris sur l'étude de la convection naturelle dans des cavités fermées. Ainsi que qu'on donne les principales caractéristiques, les différents procédés de liquéfaction, ainsi que les techniques de stockage du GNL y sont présentés.

Dans le chapitre 2 nous étudions particulièrement les méthodes numériques employées pour la discrétisation et la résolution des équations différentielles en régime variable. Nous développons aussi dans ce chapitre l'analyse mathématique utilisée pour modéliser le comportement du GNL dans le réservoir de stockage. Ce modèle prend en compte des transferts thermiques, qui sont dus à la convection naturelle à l'intérieur du réservoir de stockage.

Le 3ème chapitre concerne la simulation numérique du phénomène de la convection naturelle dans un bac de stockage sphérique dans lequel on a présenté l'outil de simulation, le maillage, et la méthode de résolution.

Dans le chapitre 4, nous présentons les résultats numériques pour diverses situations, afin de mettre en évidence l'effet des entrées de chaleur à travers les parois du réservoir sur le comportement dynamique et thermique du fluide. Dans ce même chapitre, nous proposons une analyse de l'influence des principaux paramètres intervenant dans les équations discrétisées. A savoir, le rapport de forme, le nombre de Rayleigh, et le nombre de Prandtl.



CHAPITRE I
ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. INTRODUCTION

Dans diverses situations physiques et applications technologiques, la nature joue un rôle important comme elle le peut dans les écoulements de fluides et les échanges thermiques de masse.

L'importance d'étudier un tel phénomène est dictée par son rôle dans divers domaines industriels.

La convection naturelle se produit dans de nombreux procédés et en particulier dans le stockage d'hydrocarbures.

Une bonne connaissance des écoulements au niveau des parois, ainsi que des champs de température, nous permet d'évaluer plus ou moins l'énergie traversant ces parois et de prédire le comportement thermique des produits stockés.

Ce phénomène d'écoulement naturel qui est provoqué par un gradient de densité dans un fluide placé dans un champ de gravité peut avoir pour origine un gradient de température, et dans le cas d'un fluide à plusieurs composants à un gradient de concentration.

L'étude de la convection naturelle dans les enceintes a fait l'objet d'un nombre important des travaux théoriques et expérimentaux.

L'intérêt de telles études réside dans son implication dans de nombreuses applications industrielles telles que la thermique des bâtiments, l'industrie métallurgique, le stockage des hydrocarbures,...etc.

L'enceinte rectangulaire continue à être la géométrie qui présente le plus d'intérêt, vu les exigences nouvelles en matière de connaissances des propriétés dynamiques et thermiques des fluides industriels dans ce type d'enceinte, ou les parois sont maintenues à des températures.

Le gaz naturel est un mélange d'hydrocarbures qui sont présents naturellement dans des roches poreuses sous une forme gazeuse. Cette énergie fossile a connu une forte progression depuis les années 70. Représentant la cinquième de la consommation énergétique dans le monde. Il y a plusieurs formes de gaz naturel, on peut les distinguer par leur origine, leur composition et le type de réservoirs de stockage dans lesquels ils se trouvent. Le gaz naturel se compose à la base de méthane et issu de la désagrégation d'anciens organismes vivants [1]

I.2.Revue bibliographique

On a consacré cette partie du travail pour rappeler des travaux exécutés dans le passé sur la convection naturelle dans les enceintes et qui peut donner un aperçu très proche à notre

études. Beaucoup de chercheur ont consacré leurs temps et efforts dans ces investigations, on peut citer parmi eux :

La convection naturelle en régime laminaire dans des cavités a été bien concernée, on peut distinguer plusieurs travaux numérique tels que celle de **Le membre et petit [2]** qui ont traité une cavité cylindrique contenant un liquide chauffé latéralement et refroidi uniformément par une surface libre. Ils ont testés plusieurs fluides en variant le nombre de Prandtl, et un nombre de Rayleigh inférieur à 10^5 . La résolution de ce problème numérique été basé sur la méthode des différences finis.

Khelifi Touhami et Al. [1] Ont présenté une étude numérique de la convection naturelle en régime laminaire et stationnaire, dans une enceinte cylindrique qui contient du gaz naturelle, avec des certaines conditions aux limites. La discussion des résultats obtenus était faite pour un nombre de Rayleigh qui varie entre 10^3 et 10^5 .

Shigeo et Bejan [3] qui ont synthétisé les résultats expérimentaux, et présent les simulations numériques et les études analytiques. Le comportement général du nombre de Nusselt moyen en fonction du rapport de forme de l'enceinte pour différents nombres de Rayleigh a ainsi été obtenu. Les résultats expérimentaux ont effectivement démontré que l'effet du nombre de Prandtl est négligeable lorsque ce dernier est de l'ordre de l'unité ou plus. De cette synthèse, il apparaît clairement que pour un nombre de Rayleigh donné, le transfert de chaleur atteint un maximum pour un certain rapport de forme optimal. Pour $Ra=10^5$.

Torrance et Rockett [18] qui ont étudié numériquement la convection d'air dans une enceinte cylindrique verticale, induite par un petit point chaud centralement situé sur le fond. Des solutions ont été obtenues pour des nombres de Grashof de 4×10^4 à 4×10^{10} . Les résultats théoriques se sont avérés dans un excellent accord avec l'expérimental dans la région laminaire.

Chu et Churchill [19] qui ont étudié la convection naturelle au sein d'une enceinte rectangulaire bidimensionnelle munie d'une source de chaleur discrète. Avec des parois horizontales thermiquement isolées, une paroi verticale froide isotherme et une source de chaleur installée sur l'autre paroi verticale, ils ont obtenu numériquement la position de la source qui optimise le transfert thermique, en fonction du nombre de Rayleigh. Cette position optimale se trouve près du centre de la paroi verticale, mais glisse légèrement vers le bas à mesure que le nombre de Rayleigh augmente.

Anderson et Lauriat [20] qui ont étudié l'écoulement dans une enceinte carrée avec chauffage localisé au dessous grâce à un flux uniforme ou par maintien d'une

température constante tandis qu'un mur vertical était refroidi et isotherme. Les observations expérimentales ont confirmé l'absence de l'instabilité de type Rayleigh Bénard pour le flux, si les nombres de Rayleigh sont plus grands que 5×10^3 .

Novembre et Nansteel [21] qui ont étudié analytiquement et numériquement, la convection naturelle dans une enceinte carrée avec chauffage au dessous et refroidissement le long d'un côté. Dans cette étude des expressions asymptotiques ont été trouvées pour les taux de transfert de chaleur.

Hasnaoui et autres [22] qui ont étudié numériquement par la méthode de différences finies la convection naturelle laminaire dans une enceinte, avec le chauffage localisé sur la paroi inférieure et le refroidissement à travers la paroi supérieure de l'enceinte, tandis que le reste du fond et les murs verticaux étaient adiabatiques. Les paramètres principaux du problème étaient le rapport de forme de l'enceinte, la position de la source de chaleur et le nombre de Rayleigh. L'existence des solutions multiples équilibrées et le comportement oscillant pour un ensemble donné des paramètres ont été démontrés.

I.3.Généralités

I.3.1.Transfert de chaleur par convection

La convection est un moyen de transmission d'énergie entre une paroi solide et un fluide (liquide ou gazeux). Le transfert d'énergie est plus important. Le transfert d'énergie par convection de surface à une température supérieure à la température du fluide environnant s'effectue en plusieurs étapes. Premièrement, la chaleur s'écoule par conduction de la surface vers les particules de fluide adjacentes. L'énergie ainsi transférée est utilisée pour augmenter la température et l'énergie interne de ces particules. Celles-ci vont alors se mélanger avec d'autres particules situées dans la région des basses températures et transférer une partie de leur énergie, qui est désormais stockée dans les particules fluides et transmise sous leur mouvement. [4]

I.3.2.Les différents types de Convection

Le transfert de chaleur par convection dépend du mode d'écoulement du fluide, soit par convection naturel ou convection forcée.

➤ **La convection forcée**

Quand une action externe provoque le mouvement du fluide, telle qu'une pompe ou un ventilateur, on appelle ce type de transfert une convection forcée.

➤ **La convection naturelle**

On dit que la convection est naturelle ou libre. Lorsqu'il se produit des courants dus simplement aux différences de densité qui se résultent des gradients de température, au sein du fluide.

I.3.3.La Convection Naturelle

Dans la convection naturelle, les particules du fluide sont provoquées par des gradients de densité qui viennent du non uniformité de la température. Donc les couches chaudes, avec un poids spécifique plus faible, sont soumises à des forces dirigées vers le haut, suivant le mécanisme analogue de la poussée d'Archimède.

Une partie du fluide dont la température est inférieure à celle du fluide chaud va baisser en sens inverse. La convection naturelle est alors due à la différence de gravité spécifique, donc ce phénomène se produit-en raison de l'existence du champ gravitationnel terrestre.

L'influence de la convection naturelle est bien connue. On peut les observer tous les jours dans l'eau chauffée dans le conteneur. Dans les panaches de certaines cheminées d'usines, la circulation atmosphérique, le vent et les orages sont aussi l'influence de la convection naturelle. Afin de formaliser la convection naturelle, il est nécessaire de décrire le couplage des champs de température, de pression et de vitesse à partir des équations de la quantité de mouvement, de la masse et de la conservation de l'énergie.

Afin de formaliser la convection naturelle, il est nécessaire de décrire le couplage des champs de température, de pression et de vitesse à partir des équations de la quantité de mouvement, de la masse et de la conservation de l'énergie.

La convection libre ou naturelle est la forme la plus courante d'échange par convection. Il apparaît dans le domaine de la force de masse externe, et sa nature peut être différente. Par conséquent, la convection naturelle est l'état d'écoulement obtenu lorsque le fluide est chauffé sans imposer un écoulement externe [4].

I.3.4.La convection dans les enceintes

L'étude de la convection naturelle dans la coquille est devenue l'objet de nombreux travaux théoriques et expérimentaux. L'intérêt de ces études réside dans leur importance dans de nombreuses applications industrielles, telles que le refroidissement des composants, l'électronique, la chaleur des bâtiments, l'industrie métallurgique, la croissance cristalline de l'industrie des semi-conducteurs et la génération accidentelle de chaleur due aux incendies dans les bâtiments des réacteurs nucléaires. [5]

C'est la forme géométrique la plus intéressante. Dans ce type d'enceinte, généralement les deux parois sont maintenues à des températures différentes tandis que les autres sont isolés.

On distingue principalement deux configurations : la première est une cavité contenant du fluide et soumise à un gradient de température vertical (convection de Rayleigh-Benne), et la seconde est une enceinte à gradient de température horizontal.

I.3.4.1. Cavité carrée

La convection naturelle en régime laminaire dans les cavités carrées a connue un grand intérêt, et parmi les études que ce problème a vécu on peut citer celle de **Bates, D.S. Morrison [6]** qui a été parmi les premier à donner des formulation mathématique. En faisant des calculs traditionnels à la main, il a achevé des solutions approximatives, des graphes isothermiques et des lignes de courant pour la convection naturelle à l'intérieur d'une cavité.

I.3.4.2. Cavité carrée avec gradient vertical de température

L'enveloppe chauffée par le bas et refroidie par le haut correspond à la configuration de convection de Rayleigh Bernard, qui traite de la stabilité et du mouvement du fluide confiné entre deux plaques horizontales, qui sont maintenues à une température uniforme et différente (**Figure I-1**). La convection de Rayleigh-Bénard a une longue et riche histoire; pendant des décennies, les gens ont étudié ses diverses applications industrielles et la recherche fondamentale. [7]

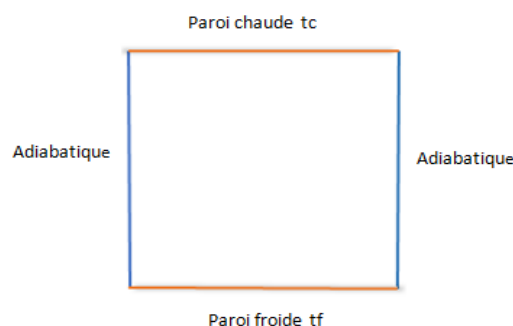


Figure I.1 : La configuration de la convection de Rayleigh –Bénard.

I.3.4.3. Cavité carrée avec gradient horizontal de température

Dans cette configuration, une paroi verticale est chauffée et l'autre est refroidie, et la paroi horizontale est considérée comme adiabatique (**Figure I-2**). Avec cette configuration, il

n'y a pas de gradient de température critique, et le fluide monte alors le long de la paroi chaude et descend le long de la paroi froide. [8]

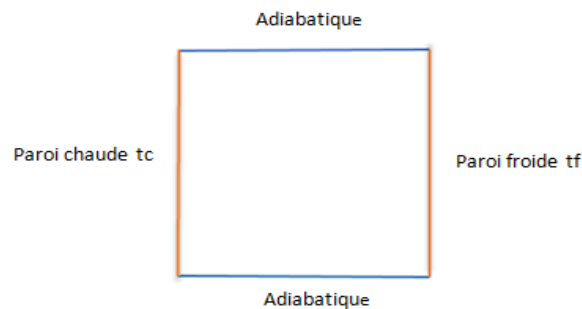


Figure I.2 : La convection dans une cavité avec gradient horizontal de température.

I.3.4.Cavité cylindrique

Les cavités cylindriques traitées dans ce cas, sont des enceintes destinées au GNL.

- Réservoir de stockage

Les réservoirs cylindriques sont des réservoirs de grande taille affectée aux activités de réception de produit au sein des stations de liquéfaction du gaz naturel.

- Réservoir d'exploitation

Sont des réservoirs de petites tailles horizontales ou verticales destinées à l'alimentation des postes de chargement de wagon-citerne.

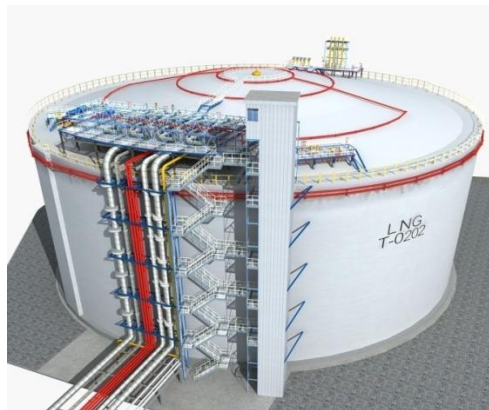


Figure I.3 : Réservoir de stockage de GNL (storeenergy.com)

I.4.Liquéfaction du GNL

Il est parfois impossible de distribuer du gaz naturel sous forme gazeuse (que ce soit pour des raisons politiques, géographiques ou économiques). Le gaz naturel doit être liquéfié et son volume réduit de 600:1 avant de pouvoir être converti en gaz naturel liquéfié.

Le gaz naturel du marché utilise généralement des usines de liquéfaction de GN pour liquéfier et transporter le gaz naturel. Le gaz naturel est un combustible de combustion sans résidus, qui est plus efficace que le charbon. Par exemple, si le gaz naturel est brûlé, par rapport aux pays avec moins d'énergie écologique, l'obtention de gaz naturel pour les pays qui ne disposent pas de leurs propres sources de GNL peut améliorer la qualité de l'air.

Le gaz naturel est d'abord transporté par gazoducs, des gisements extraits aux usines de liquéfaction dotées d'installations balnéaires et portuaires. Dans l'usine de liquéfaction, le gaz naturel subit de multiples traitements en continu :

1) **Epuration** : Cette étape base à extraire le dioxyde de carbone (CO_2) du gaz naturel parce qu'il endommage les unités de liquéfaction à travers le phénomène de solidification, aussi que le sulfure d'hydrogène (H_2S) et d'autres composants soufrés.

2) **Déshydratation** : ce procédure consiste à éliminer l'eau (H_2O) du gaz pour but d'éviter la formation d'hydrates de méthane qui peuvent causer un blocage des échangeurs cryogéniques. le gaz naturel est quasiment du méthane pur, une fois est devenu sec. Ainsi qu'on le débarrasse totalement de toutes les traces de mercure (Hg), qui est un élément toxique qui corrode les alliages utilisés dans les autres processus de liquéfaction.

3) **Pré-refroidissement** : le gaz naturel se fait refroidi à une température près de -30°C . Après, une série de distillations dans les colonnes d'épuration permet d'isoler les hydrocarbures lourds ainsi que le gaz de pétrole liquéfié : propane et butane. Ces derniers peuvent être vendus comme matière.

4) **Liquéfaction** : Après les étapes de compression, refroidissement du gaz, à une pression constante puis détente. Cette opération est refaite à deux ou trois reprises dans des colonnes frigorifiques (pompes à chaleur) dont le gaz sort à -160°C , entièrement liquide à pression atmosphérique.

Le processus de liquéfaction du gaz naturel consomme une quantité importante d'énergie : la station de liquéfaction utilise près de 10% du gaz qui lui est livré pour alimenter ses pompes à chaleur.[9]

I.5.Stockage du gaz naturel

Les réservoirs de GNL, qui disposent d'une capacité de stockage comprise entre 65 000 et 150 000 m³ de GNL permettent de stocker de très grandes quantités d'énergie. Car près de 600 m³ de gaz naturel occupent seulement 1 m³ à l'état liquide (à pression atmosphérique).

Pour assurer une meilleure stabilité du gaz naturel liquéfié, il doit être stocker à une température de -162 °C.

I.5.1.Stockage aérien

Dans le domaine du stockage, il existe plusieurs types d'infrastructures pour le stockage aérien du gaz. Celles-ci se traduisent par la conception d'équipements adaptés à l'état du gaz à stocker : Etat gazeux sous pression atmosphérique ou plus élevée ou état liquide réfrigéré (jusqu'à - 50°C) ou cryogénique (jusqu'à -200 °C), Mais aussi selon des spécificités comme le volume à stocker, les cycles de vidange et de remplissage ainsi que les processus de traitement.

Selon les cas, les solutions de stockage passent par l'emploi d'appareils à pression ou de réservoirs de stockage. On distingue Les capacités cylindriques horizontales (aussi appelées « cigare ») et les sphères qui sont utilisées pour le stockage des gaz sous pression comme le butane ou le propane par exemple.

Les volumes stockés sont de 3000 m³ pour les cigares et de 500 m³ à 10000m³ pour les sphères Les réservoirs cylindriques verticaux à simple ou double paroi avec enceinte extérieure métallique ou béton qui sont utilisés pour le stockage du gaz à l'état liquide. Selon le cas ces réservoirs peuvent être enterrés, semi enterrés, posés ou ancrés au sol. Les volumes stockés sont de l'ordre de 50 000 m³ à 200 000 m³. Ces réservoirs équipent les terminaux méthaniers ou GNL d'exportation des pays producteurs (Pays du golf, Nigéria, Algérie,...) ou importateurs comme, en Belgique ou en France.[10]



Figure. I.4 : Réservoirs de stockage de gaz. [10]

I.5.2. Les réservoirs en cavités salines

Les Cavités Salines présentent des supports spéciaux et des charges importantes sans se fissurer mais en se déformant. Par Injection d'eau, lessive le sel et l'évacuation de la saumure donne des grande cavités ou le gaz naturel est stocker à une pression élevée. Il se fait soutiré par simple détente.

Pour constituer un stockage il faut des cavités de centaines mètres. Il faut environ trois ans de lessivage pour une cavité de 200 000 m³ de volume (**Figure I.5**). Par rapport au stockage précédent, la capacité n'est que de 0,65 milliard de m³, en revanche celui-ci offre la possibilité de prélever brièvement mais très rapidement de grandes quantités de gaz. [10]

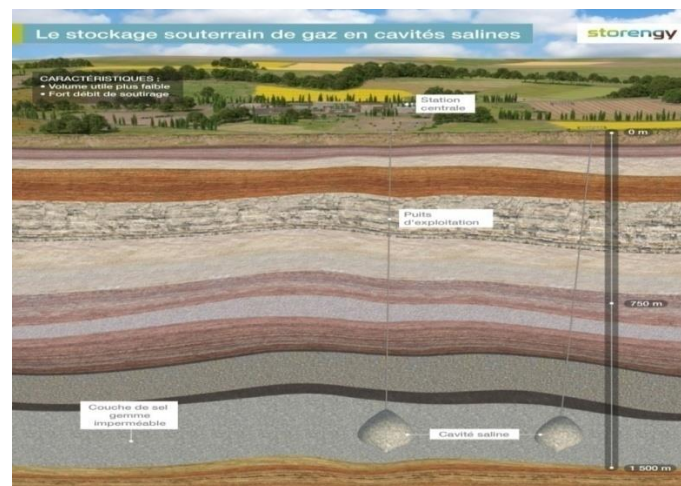


Figure. I.5 : Les réservoirs en cavités salines (storengy.com)

I.5.3. Les réservoirs en nappe aquifères

Pour avoir un réservoir en nappe aquifère il faut générer, entre 400 et 1 200 m de profondeur, une structure géologique qui présente des caractéristiques identiques à celles d'un gisement, à savoir une roche poreuse et perméable imprégnée d'eau susceptible de contenir le

gaz, et une roche de couverture imperméable (**figure. I.6**). Au début, on injecte un gaz inerte sous une pression qui chasse l'eau et assure l'étanchéité du réservoir vers le bas. Le gaz naturel de densité moins forte prend place au-dessus, bien calé sous la roche de couverture.

En raison de l'injection relativement lente, il faut dix ans pour remplir complètement le réservoir, mais il peut être utilisé dès la première année. Après cela, il sera rempli en été et utilisé tout au long de l'hiver si nécessaire pour reconstituer l'approvisionnement [11].

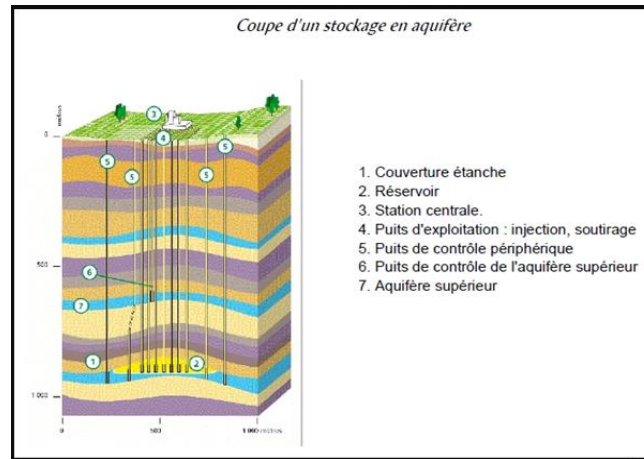


Figure. I.6 : Les réservoirs en nappe aquifères (storengy.com)

Un autre type de stockage de gaz naturel est constitué d'anciens sites on shore. Après l'extraction du gaz naturel, ce type de gisement est un endroit idéal pour le stockage du gaz naturel. Pour le transport des méthaniers, deux types de stockage sont utilisés :

- Des réservoirs cryogéniques.
- Des réservoirs en béton.

La distribution de gaz naturel via les réseaux de gazoducs terrestres n'est pas un hasard : le stockage du gaz naturel est délicat. Contrairement au gaz de pétrole liquéfié, le gaz naturel ne peut être liquéfié qu'à très haute pression ou à très basse température. Ce principe ne s'applique qu'aux méthaniers, c'est-à-dire aux navires qui transportent du gaz en mer. Pour les applications nécessitant un stockage temporaire (carburant automobile), des réservoirs de stockage pouvant résister à une pression d'environ 300 bars doivent être utilisés.

I.6. Transport du gaz naturel

Pendant longtemps, le gaz naturel ne peut être transporté que par voie terrestre via des gazoducs. Ces dernières années, divers facteurs ont contribué au développement du transport maritime, qui s'est développé plus rapidement que le transport par canalisation : la zone de production est éloignée de la zone de consommation (les gazoducs ne traversent pas la mer), et ce mode de transport offre la flexibilité. Aujourd'hui, la part des modes de transport des méthaniers est légèrement inférieure à 10 % du transport de gaz naturel. La route principale fréquemment empruntée par les méthaniers relie les zones de production de GNL L'Indonésie au Japon, du Moyen-Orient aux pays développés (Japon, Europe, États-Unis), du Nigeria et de l'Algérie à l'Europe. [11]

I.6.1. Gazoduc

Un gazoduc est une canalisation utilisée pour transporter des substances gazeuses (dans la plupart des cas des hydrocarbures) sur de longues distances sous pression. La plupart des gazoducs transportent le gaz naturel entre les zones minières et les zones de consommation ou d'exportation. On estime que la longueur totale des gazoducs dans le monde est de 1 million de kilomètres, soit plus de 25 fois la circonférence de la terre. Du champ pétrolifère ou du site de traitement du stockage, le gaz est transporté vers Haute pression (de 16 à plus de 100 bar), dans un grand réseau de transport avec des conduites de gaz naturel comme connexion principale. Ces réseaux comprennent également :

- Des stations de compression, régulièrement espacées (tous les 80 à 250 km selon les réseaux) qui maintiennent la pression du gaz transporté et assurent sa progression dans les canalisations.
- Des stations d'interconnexion qui constituent des nœuds importants du réseau de transport.
- Des postes de livraison qui assurent la livraison du gaz naturel chez les gros industriels ou dans les réseaux aval de distribution. Ces postes assurent généralement des fonctions de détente, de réchauffage, de filtrage et de mesurage du gaz. [11]

I.6.2. Le méthanier

En raison des caractéristiques physiques du GNL, du danger d'une telle cargaison et de sa température de stockage, les méthaniers présentent de nombreuses caractéristiques. 12 m de tirant d'eau et 40 m de tirant d'air. La vitesse moyenne des méthaniers est généralement de 19 nœuds. Le concept technique de ces membranes est le plus ancien) [11].

I.6.2.1. Méthanier à membrane

Ce sont des réservoirs de stockage intégrés dans la double coque de la coque et en suivant ses contours, en exploitant au mieux le volume disponible. L'isolation est assurée par une double membrane métallique étanche, qui se caractérise par le maintien de ses propriétés mécaniques à des températures extrêmement basses. La force mécanique est transmise à la coque à travers le matériau isolant pour protéger la coque du froid [11].



Figure. I.7 : Méthanier à membrane [11]

I.6.2.2. Les méthaniers à sphère

Les réservoirs de stockage sphériques, ont des capacités de 10 000 m³ et selon les modes de sollicitations de vidange et de remplissage la jonction entre la paroi de la sphère et son support doit faire l'objet d'études de conception appropriées pour éviter les problèmes liés aux concentrations de contraintes au droit du support qui, peuvent causer la ruine de l'équipement.

Ce type de méthanier a une silhouette reconnaissable avec quatre à cinq réservoirs sphériques dont la partie supérieure dépasse du pont. Ces billes en aluminium sont soudées et recouvertes d'un matériau isolant en mousse externe, et sont fixées à la coque par une jupe en acier, qui est équipée d'un frein thermique en alliage spécial [11].



Figure. I.8 : Méthanier avec cavités sphériques autoportées [11]

Le méthanier se compose de quatre à cinq réservoirs sphériques en aluminium recouverts de matériaux isolants. La sphère n'est pas intégrée à la coque, mais dépasse du pont du navire. Les méthaniers sont également appréciés des armateurs et sont moins sensibles au ballonnement que les navires à membrane. Cependant, cette caractéristique n'a aucun avantage dans l'utilisation d'un récipient sphérique à remplissage partiel, qui est (comme la membrane) sensible au choc thermique provoqué par le balayage de la paroi du bidon (comme la membrane) Liquide froid.

De plus, à capacité de transport égale, le conteneur citerne sphérique est plus long, plus large et plus lourd que ses concurrents membranaires, ce qui prouve en grande partie la préférence mondiale pour la technologie membranaire française [11].

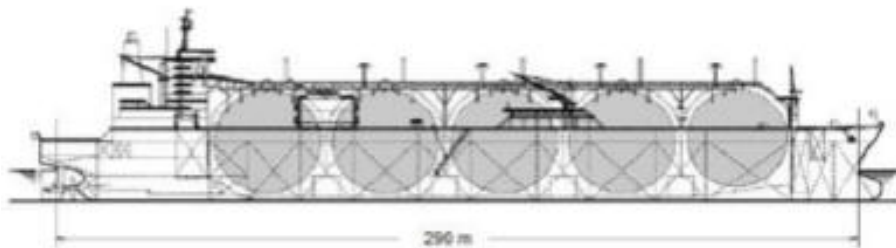
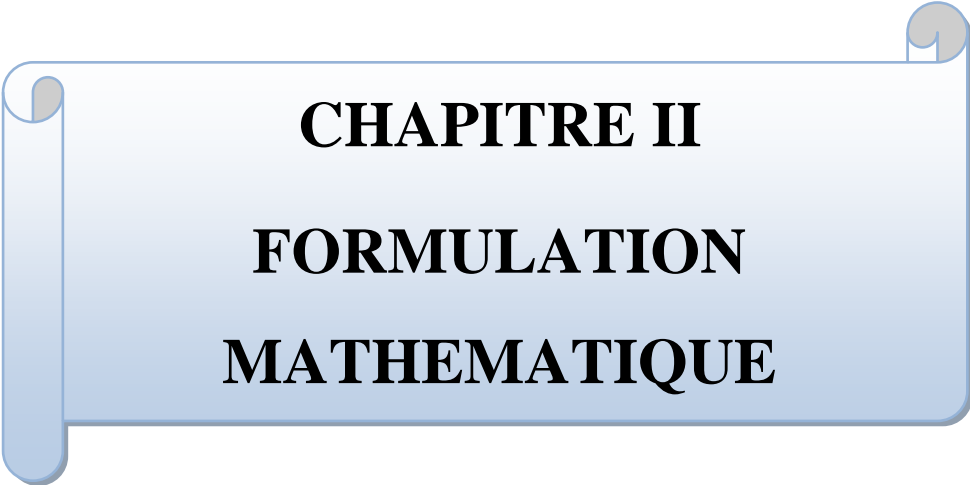


Figure. I.9 : Vue de face d'un navire avec cuves auto porteuses de type [11].

I.7.Conclusion

Ce présent n'a pas d'autre prétention que de fournir les bases pour une analyse des situations de convection naturelle rencontrées pendant le stockage et le transport du gaz naturel dans les réservoirs et les méthanier. On a essayé de donner une image bien claire sur tous les facteurs et procédures qui ont un impacte directe sur ce type d'étude. Cependant, nous allons pris l'initiative de faire nos études pour présenter un autre approche de la convection naturelle dans les bacs de stockages du gaz naturel liquéfié.



CHAPITRE II
FORMULATION
MATHEMATIQUE

II.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter premièrement l'ensemble des hypothèses simplificatrices qui vont nous permettre de réduire les équations générales qui gouvernent l'écoulement, tel que l'équation de continuité (conservation de masse), de quantité de mouvement et les conditions aux limites, nous introduisons les principales grandeurs dynamiques.

II.2. Modèle physique

Nous considérons une cavité sphérique verticale qui contient un fluide méthanier liquide GNL de viscosité cinématique ν et de diffusivité thermique α . Avec une source de chaleur appliquée à la partie inférieure et les parois supérieures sont maintenues à une température froide, la partie restante comprend les parois adiabatiques. Des propriétés de fluide constantes sont supposées, à l'exception des changements de densité avec la température qui induisent des forces de flottabilité, donc l'approximation de Boussinesq est adoptée.

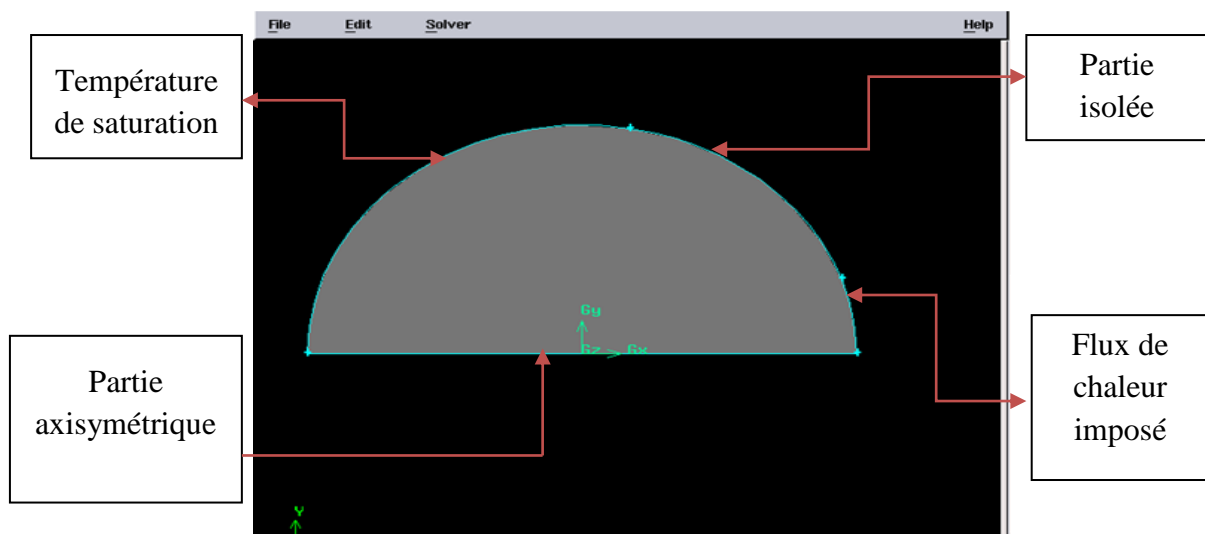


Fig. II.1. Modèle physique

II.3.Formulation mathématique

Les équations régissant l'écoulement sont les équations de continuité, de Navier-stokes et l'équation d'énergie, qui exprime respectivement la conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie. Pour une formulation simple du problème, nous avons considéré

quelques approximations, entre autre l'approximation de Boussinesq. En effet, nous supposons que l'influence de la variation de la masse volumique n'est prise en compte que par l'intermédiaire des forces volumiques, le fluide étant également Newtonien. La masse volumique du fluide varie linéairement avec la température et est donnée par la relation suivante:

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (\text{II. 1})$$

Avec:

β : Coefficient de dilatation.

ρ_0 : Masse volumique à la température de référence.

T_0 : Température de référence.

En mécanique des fluides, en supposant que le fluide est un milieu continu, on peut utiliser les lois classiques de conservation qui sont :

- ✚ Loi de conservation de la masse ou l'équation de continuité.
- ✚ Deuxième loi de Newton (principe de conservation de quantité de mouvement) ou les équations de quantité de mouvement.
- ✚ Loi de conservation d'énergie (premier principe de la thermodynamique) ou l'équation d'énergie.

Dans le cas laminaire, les problèmes d'écoulement de fluide peuvent être traités par la résolution de l'équation de quantité de mouvement, l'équation de continuité et l'équation d'énergie. Quand un écoulement permanent est laminaire, les lignes de courants représentent les trajectoires du fluide et sont des courbes fixes dans l'espace qui ne se mélangent pas au cours du mouvement. Les couches fluides glissent les une sur les autres, sans qu'il y ait passage de particules d'une couche à l'autre.

On va justement dans ce qui suit étudier quelques cas particuliers de l'équation générale de conservation de la masse, de quantité de mouvement et de l'énergie

II.3.1. Equation de continuité (conservation de la masse)

C'est l'équation qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot V) = 0 \quad [\mathbf{12}] \quad (\text{II. 2})$$

Où ρ est la masse volumique et V est le vecteur de vitesse.

II.3.2. Equation de la quantité de mouvement

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide lors de son mouvement et les causes qui le produisent. Il indique que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées. Il s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{D}{Dt}(\rho \cdot V) = \rho F - \text{grad}(p) + \mu \Delta V + \frac{1}{3} \mu \text{grad}(\text{div}(V)) \quad (\text{II. 3})$$

Où F est une force par unité de volume et μ est la viscosité dynamique.

$$\rho \left(\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - \frac{V_\theta^2}{r^2} \right) = - \frac{\partial P}{\partial r} + \rho g_r + \mu \nabla_r^2 V \quad (\text{II. 4})$$

$$\rho \left(V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{V_r V_\theta}{r} \right) = - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \rho g_\theta + \mu \nabla_\theta^2 V \quad (\text{II. 5})$$

[12]

II.3.3. Equation de l'énergie

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie, soit :

$$\frac{D}{Dt}(\rho c_p T) = \Delta(k T) + q + \beta T \frac{Dp}{Dt} + \mu \Phi \quad (\text{II. 6})$$

Avec :

$\frac{D}{Dt}(\rho c_p T)$: La variation totale d'énergie (par accumulation et convection).

$\Delta(k T)$: La variation d'énergie par conduction.

q : Puissance volumique dissipée.

$\beta T \frac{Dp}{Dt}$: La variation d'énergie due à la compressibilité.

$\mu \Phi$: La dissipation irréversible due au frottement visqueux.

Les coefficients C_p , k et β sont respectivement, la capacité calorifique, la conductivité thermique et le coefficient de dilatation isobare du fluide.

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) = \lambda \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \right) + q + \phi \quad [\text{13}] \quad (\text{II. 7})$$

II.4. Hypothèse simplificatrices

Il est maintenant nécessaire d'effectuer un certain nombre d'hypothèses afin d'établir un modèle mathématique simple qui décrit la physique de ce problème, donc on adopte les hypothèses suivantes :

- ✓ L'écoulement est stationnaire et bidimensionnel.
- ✓ Le fluide est Newtonien et incompressible.
- ✓ L'écoulement engendré est laminaire.
- ✓ La température (ou le flux) de la source de chaleur est constante dans le temps.
- ✓ Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.
- ✓ Le travail, induit par les forces visqueuses et de pression, est négligeable.
- ✓ Les propriétés physiques du fluide sont constantes hormis la masse volumique qui obéit à l'approximation de Boussinesq dans le terme de la poussée d'Archimède.
- ✓ La puissance volumique dissipée est négligeable.

II.5. Équation représentatives

Après introduction des hypothèses données ci-dessus, on peut établir les différentes équations nécessaires à la résolution du problème considéré dans cette étude comme suit:

- Equation de continuité

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (v) = 0 \quad (\text{II. 8})$$

- Equation de la quantité de mouvement \vec{r} :

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{v^2}{r} \right) = \rho F_r - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right] \quad (\text{II. 9})$$

- Equation de la quantité de mouvement suivant θ :

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{uv}{r} \right) = \rho F_\theta - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right] \quad (\text{II. 10})$$

- Equation d'énergie :

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right] \quad (\text{II. 11})$$

- Nombre de Prandtl : $Pr = \frac{\rho c_p a}{k}$ (II. 12)

- Nombre de Rayleigh thermique : $Rat = \frac{16 g \beta R_0^4 \phi Pr}{\rho^2 \lambda}$ (II. 13)

II.6. Conditions aux limites

La résolution du système d'équations obtenu précédemment nécessite l'incorporation des conditions aux limites pour chaque variable dépendante.

Sur la paroi adiabatique :

- ✓ Conditions d'adhérence :

Sur toutes les parois, les vitesses sont nulles ($u=v=0$).

- ✓ Conditions thermiques :

- ✚ Sur la paroi inférieure : $0 < R < 1$ et $\frac{3\pi}{2} < \theta < \frac{5\pi}{3}$ on a $\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = 50 \text{ W/m}^2$

- ✚ Sur la paroi supérieure : $0 < R < 1$ et $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ on a $T = T_F$

- ✚ Sur la paroi inférieure : $0 < R < 1$ et $\frac{5\pi}{3} < \theta < 0$ on a $\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \text{ W/m}^2$

- ✚ L'axe de symétrie : $0 < R < 1$

Les paramètres caractéristiques du problème qui interviennent dans les équations adimensionnelles ci-dessus dont les valeurs conditionnent les transferts de chaleur dans le réservoir sont :

- **Les paramètres géométriques**
- L'angle de la cavité $\frac{3\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$
- Le rayon de la cavité $0 \leq R \leq 1$

II.7. Le transfert de chaleur

Le transfert de chaleur par convection naturelle en régime laminaire à travers la cavité est caractérisé par le nombre de Nusselt Nu étant donné que la paroi active est soumise à des températures constantes, le nombre de Nusselt Nu est calculer à l'aide de la formule suivante:

$$Nu = \frac{\partial T}{\partial n}$$

La valeur moyenne du nombre de Nusselt Nu le long des parois verticale (parois actives) de la cavité est donnée par :

$$\overline{Nu} = \int_0^{2\pi} \int_0^{Ar} Nu \, dr \, d\theta$$

$$\text{Avec } Nu = \frac{\bar{h} D}{\lambda}$$

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle physique considéré et les équations qui régissent le phénomène de la convection naturelle en régime laminaire et stationnaire à l'intérieur d'une cavité cylindrique verticale bidimensionnelle. Ensuite, nous avons spécifié les conditions aux limites de toute la frontière du domaine d'écoulement.

r : Rayon en m

φ : Flux radiatif par unité de surface en w/m^2

Pr : nombre de Prandtl



CHAPITRE III

SIMULATION NUMERIQUE

III.1.Introduction

Des différentes méthodes ont été utilisées pour la résolution analytique des équations différentielles partielles (E.D.P) qui régissent ce type d'écoulement de fluide, parmi les méthodes on mentionne : la méthode des différences finis, la méthode des éléments finis, la méthode de volume finis.

Le principe de ces méthodes est de transformer les équations différentielles en un système d'équation algébriques.

Dans ce chapitre, en se basant sur la méthode du volume finis (MVF), cette dernière sera appliquée à la résolution de notre problème dynamique par le code commercial fluent.

III.2.Généralités sur le code de Calcul CFD

La CFD signifie Computational Fluid Dynamics, soit mécanique des fluides numérique en français (MFN), consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par la résolution numérique des équations régissant le fluide. En fonction des approximations choisies, qui sont en général le résultat d'un compromis en termes de besoins de représentation physique par rapport aux ressources de calcul ou modélisation disponibles.

Cette technique consiste à résoudre numériquement les équations de la mécanique des fluides (équations de Navier-stokes) pour simuler l'écoulement de fluide [14].

III.2.1.Domaine d'utilité de la CFD

Le CFD est synthétisé dans des codes et des logiciels commerciaux tels que pour notre cas le Fluent avec son pré processeur de génération de maillage 'Gambit .pour but d'étudier les phénomènes de transfert de chaleur rencontrée dans la mécanique des fluides.

- ✚ Énergétique
- ✚ Aéraulique
- ✚ Aérothermique
- ✚ Aérodynamique/hydrodynamique
- ✚ Écoulements réactifs
- ✚ Dispersion de polluants et de gaz
- ✚ Maitrise de la contamination
- ✚ Gestion des cascades de pression

III.3.Description de Gambit

III.3.1.Gambit

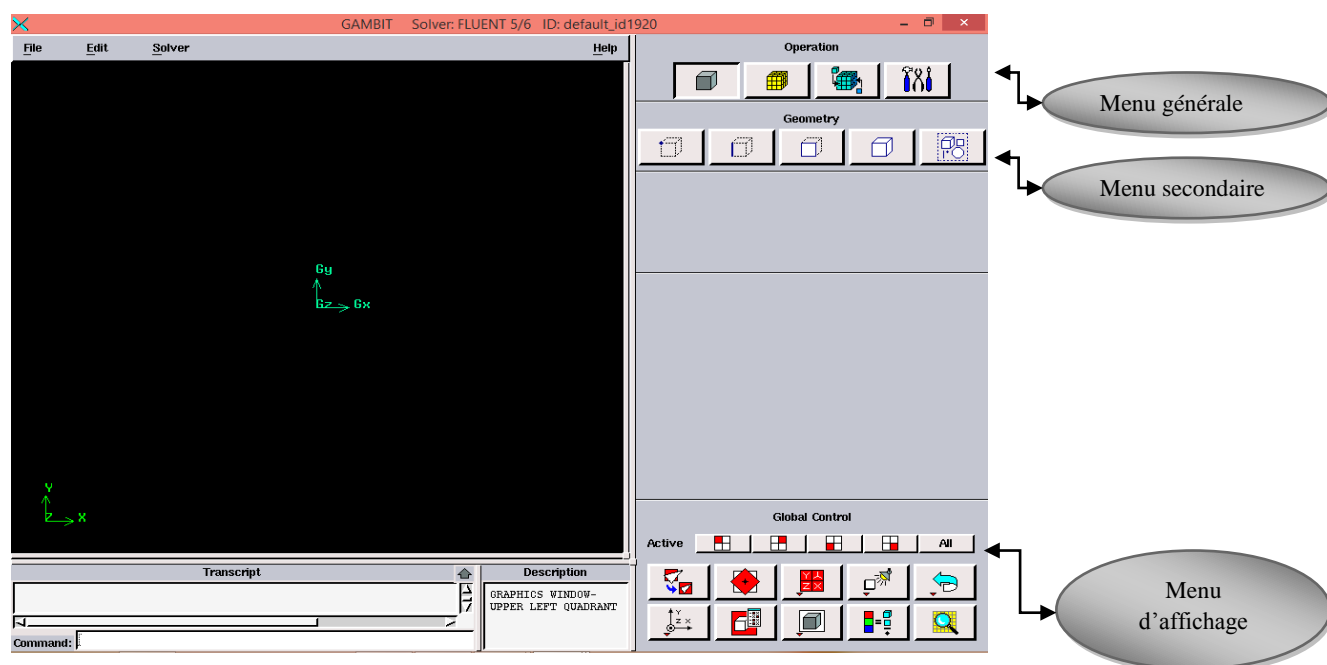
Le logiciel Gambit est un préprocesseur qui permet de réaliser ou d'importer des géométries (surface ou volume) en 2D ou 3D simple ou complexes, il permet de créer plusieurs types de maillage (structuré, non structuré ou hybrides) en coordonnées cartésiennes, polaire, cylindrique ou axisymétriques et de spécifier le types de matériau (fluide ou solide) selon le bon vouloir de l'utilisateur. Le Gambit regroupe trois fonctions :

- Définition de la géométrie du problème.
- Le maillage et sa vérification.
- Da définition des frontières (des conditions aux limites) et définitions des domaines de calculs [15].

III.3.2.Interface et étapes de Gambit

III.3.2.1.Lancer Gambit

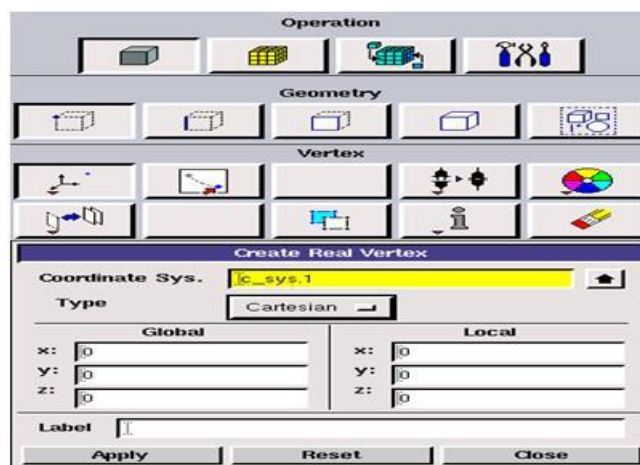
Après lancement du le logiciel, On aperçoit l'interface d'utilisation :



Figure(III.1): Interface de GAMBIT

III.3.2.2. Construction de la géométrie

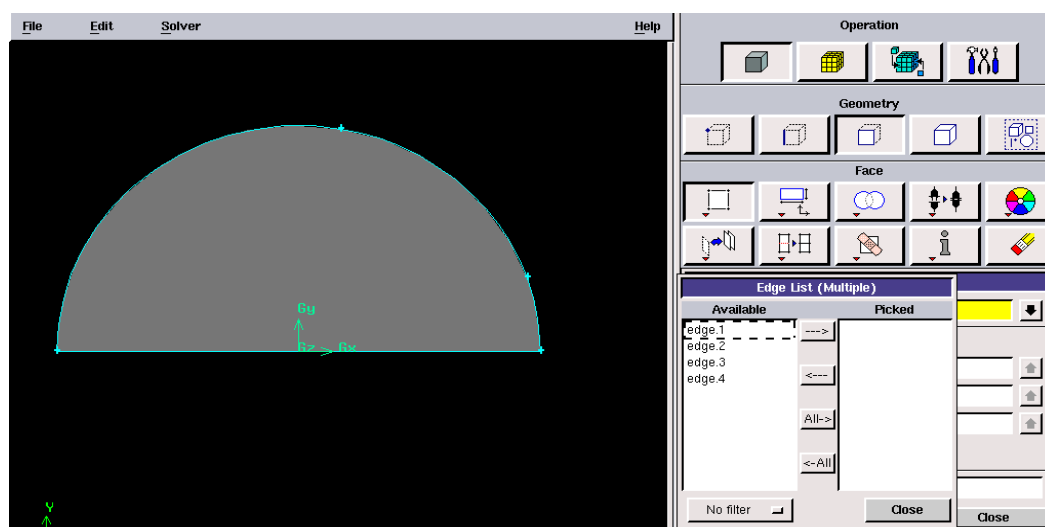
Pour la création de notre géométrie sur gambit 2D, on a choisi de générer point par point, et relier entre eux dans différentes directions à partir des lignes qui sont créé, pour obtenir au finale les faces de géométrie.



Figure(III.2): Construction de la géométrie.

III.3.2.3. Création de la géométrie

Dans cette étape on a crée la géométrie finale, le cas étudié est le cas d'un bac de stockage sphérique d'un méthanier. On à crée une demie sphère axisymétrique.



Figure(III.3): Création de la géométrie

III.3.2.4. Génération du maillage

Dans notre cas on a un maillage structuré de type quadrilatéral avec un spacing de 0.005.

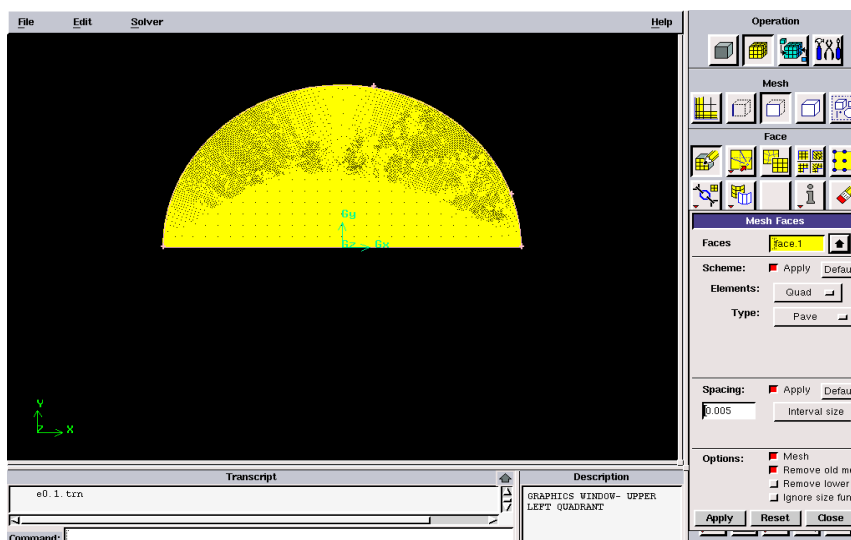


Figure (III.4): génération de maillage

III.3.2.5. Les conditions aux limites

La figure suivante résume les différentes conditions qu'on peut imposer pour un écoulement du méthane dans une cavité sphérique entraînée.

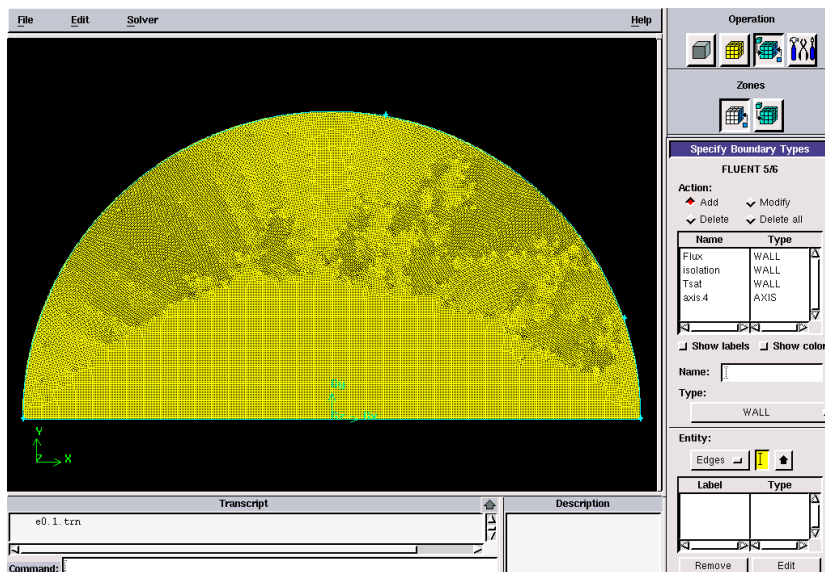
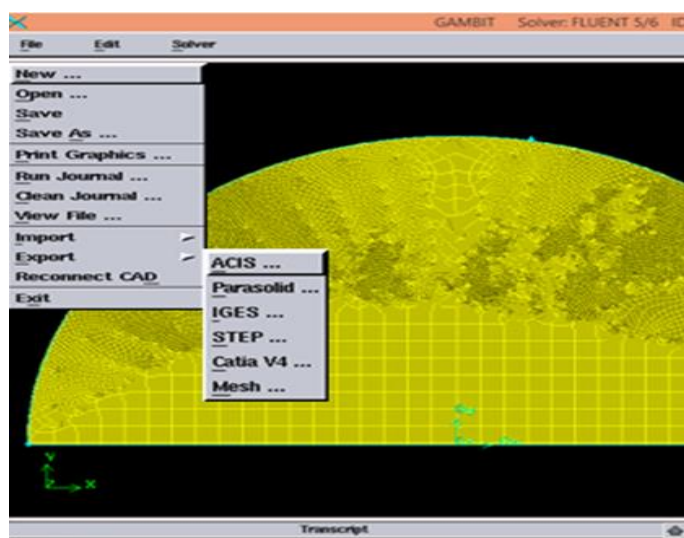


Figure (III.5): Les conditions aux limites

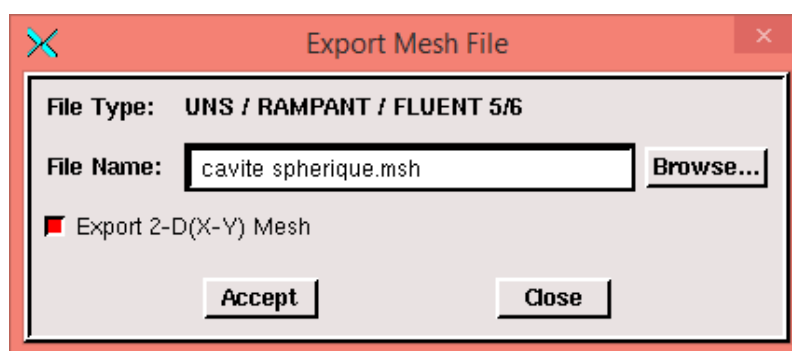
III.3.2.6. Exportation du maillage de Gambit

Après la création de la géométrie et les conditions aux limites, on exporte le maillage au Solveur Fluent suivant l'étape : **File -export-mesh**



Figure(III.6): Exportation du maillage.

Il nécessite d'exporter le maillage, en format « .msh » pour que le fluent soit compétent de le lire et de l'utiliser après enregistrement, comme suit :



Figure(III.7) : Enregistrement du fichier

III.4. Description de fluent

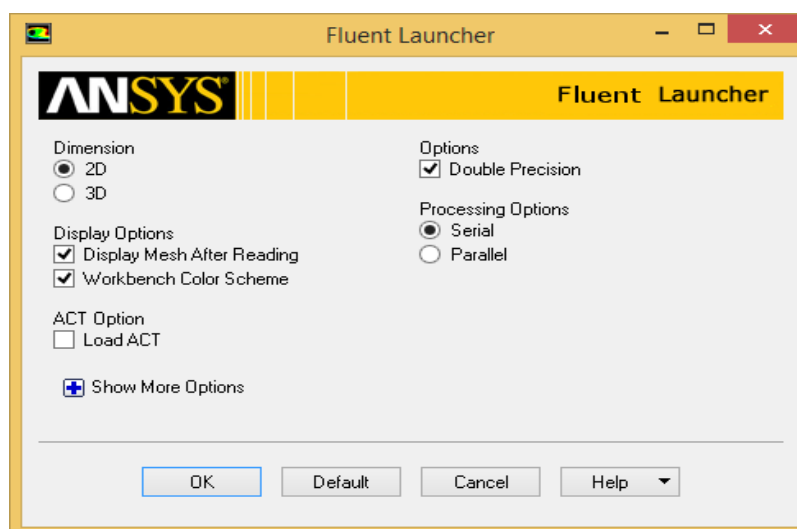
Fluent est un logiciel qui permet de résoudre et simuler des problèmes de mécanique des fluides et de transferts thermiques par la méthode des volumes finis.

ANSYS FLUENT est un logiciel adaptatif de la mécanique des fluides numérique (CFD) qui permet de simuler le transfert de chaleur, la turbulence et les réactions. Le logiciel possède des capacités de calcul de haute performance et peut modéliser des structures bidimensionnelles et tridimensionnelles, des écoulements laminaires, transitoires, turbulents, des fluides incompressibles et compressibles. Fluent est également capable de produire des écoulements à l'état gazeux ou liquide tout en étant capable d'éditer les propriétés du fluide / solide. La version ANSYS utilisée dans ce projet est ANSYS 19.2 [15].

III.4.1. Les étapes de solveur fluent

III.4.1.1. Lancer Fluent

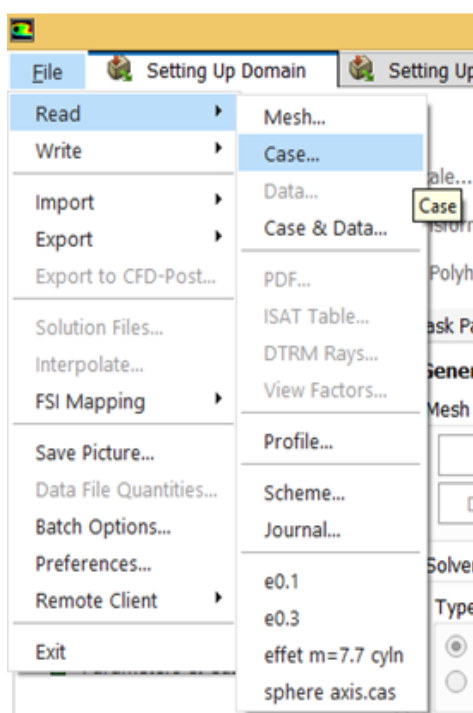
Puisque notre géométrie est en 2D, pour le domaine de calcul le choix du 2D double précision le plus semblable notre étude, il est donc distingué comme suit :



Figure(III.8): Lancement du logiciel Fluent.

III.4.1.2. Importation de la géométrie

Pour commencer l'étude il faut importer le fichier (*.msh) généré sous Gambit par l'étape suivante: **File – Read – Case**

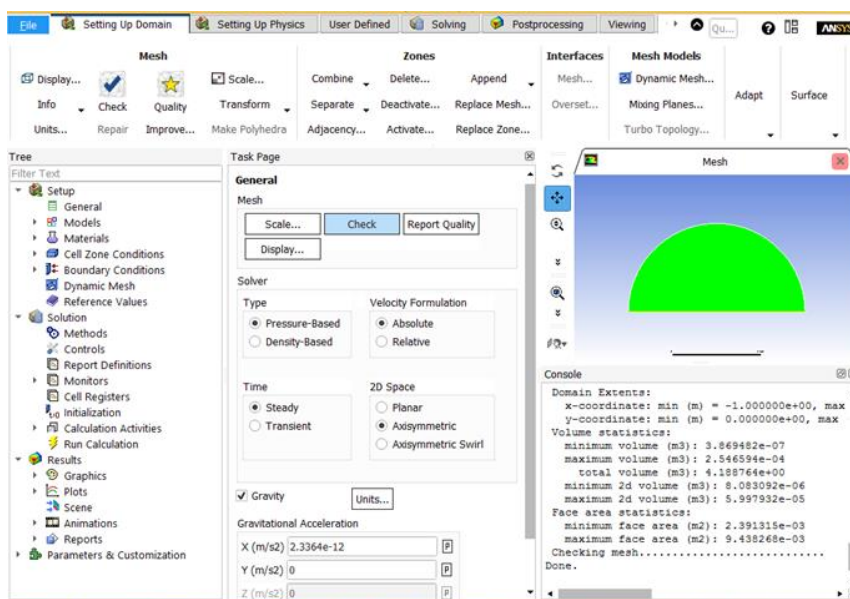


Figure(III.9): Importation de la géométrie.

III.4.1.3. Vérification du maillage

Le principal menu que nous allons étudier est le menu Grid. Il permet de vérifier si le maillage importé ne comporte pas des déformations :

Grid-Chek



Figure(III.10): Vérification du maillage

III.4.1.4. Vérification des unités et des dimensions

Il faut vérifier que les dimensions et les unités affichées satisfassent aux dimensions du modèle physiques de notre cas : **Grid – Scale**

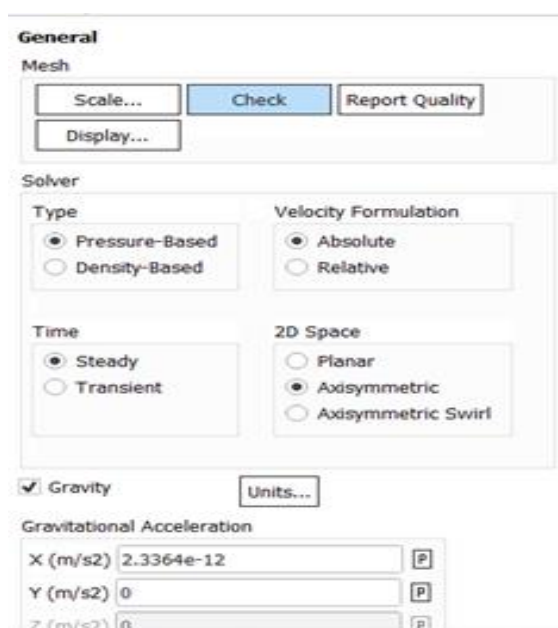
Pour vérifier que la géométrie ressemblons parfaitement a ce que l'on veut, il est possible de vérifier la forme de la grille en cliquant : **display-grid**

C'est le maillage vérifié avec l'échelle adaptée, on déterminera les paramètres de calcul qui se trouve dans le second menu **Define**.

III.4.2.1. Choix du solveur

ANSYS Fluent comprend deux types de solveurs: le solveur basé sur la pression et le solveur basé sur la densité. Le premier solveur était utilisé à l'origine pour les écoulements incompressibles et les écoulements légèrement compressibles, le deuxième a été conçu pour les écoulements compressibles à grande vitesse . Même si les deux solveurs ont maintenant été développés pour gérer une large gamme d'écoulement, le solveur basé sur la densité peut toujours avoir une supériorité sur le solveur basé sur la pression pour les écoulements compressibles à grande vitesse [16].

Ce menu permet de choisir le type de solveur que l'on souhaite utiliser (schéma implicite, régime stationnaire, configuration 2D...) définit comme suit :

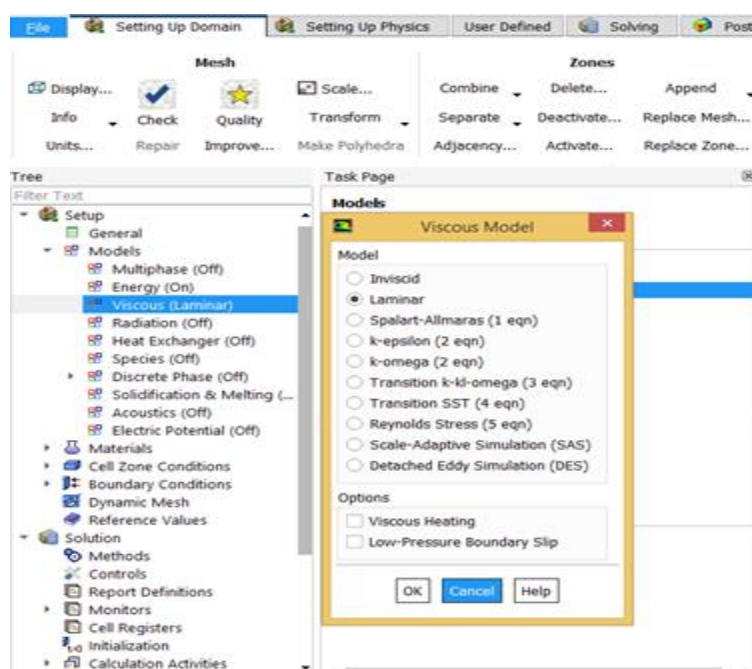


Figure(III.11): Choix du solveur

III.4.2.2.Choix du régime d'écoulement

Il existe différentes modélisations de l'écoulement laminaire. Parmi lesquels les écoulements non visqueux, turbulents.

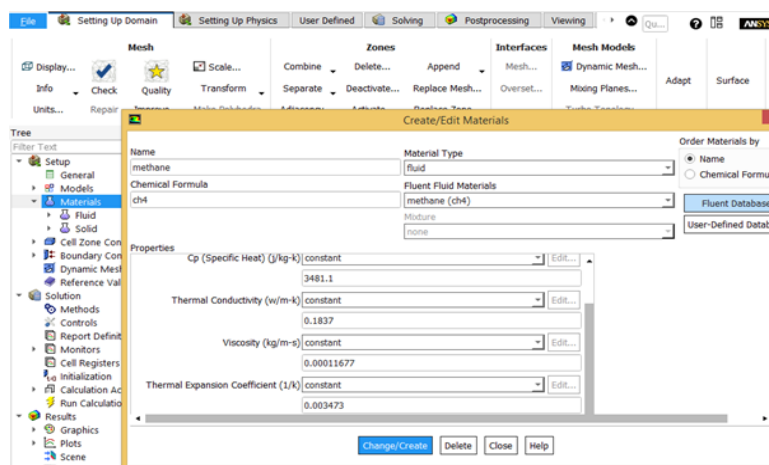
Define -- Models -- Viscous



Figure(III.12): Choix de modèle laminaire

III.4.3.1.Les caractéristiques du matériau

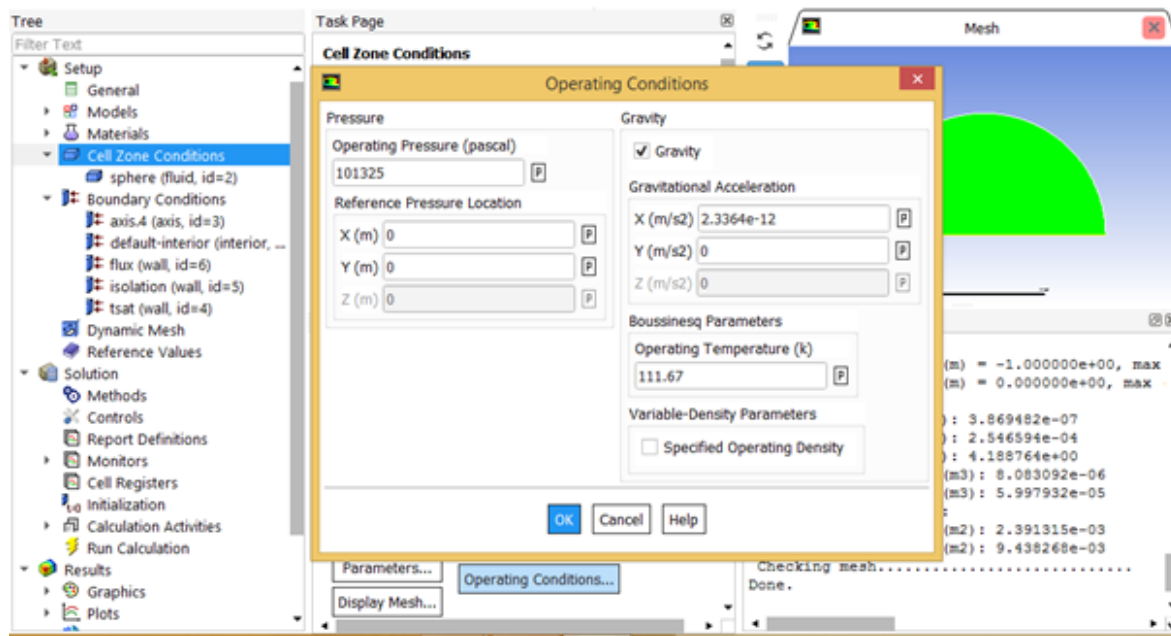
On définit le choix de fluide comme suit : **Define – Materials**



Figure(III.13): Les caractéristiques du matériau

III.4.3.2. Les conditions opératoires

Cette activité permet de placer les conditions de fonctionnement :

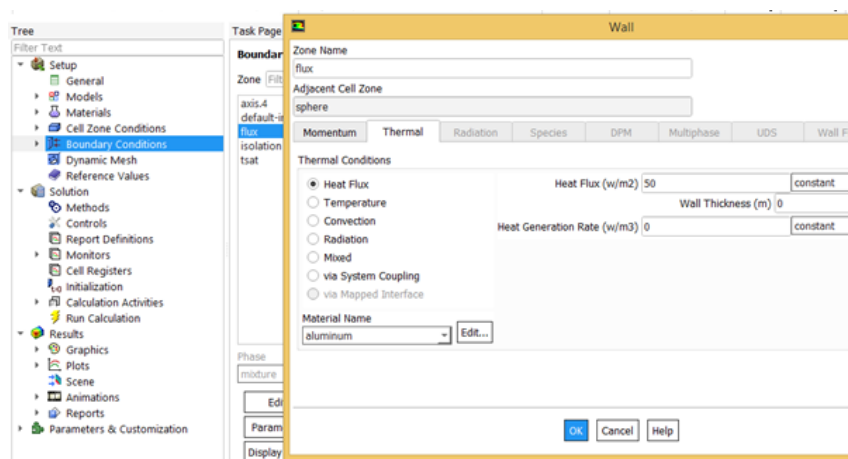


Figure(III.14): choix des conditions opératoires

III.4.3.3. Conditions aux limites

Il est nécessaire de fixer les valeurs des conditions aux limites du problème à traiter :

Define- Boundary conditions

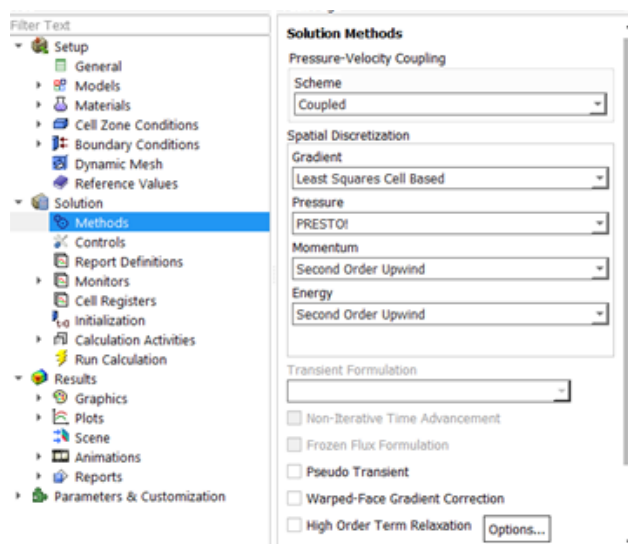


Figure(III.15): Le flux d'entrée (conditions aux limites)

Le menu Solve permet de déterminer les différents éléments pour initialiser le Solveur de Fluent.

III.4.4.1. Contrôle de la solution

Cette étape nous permis d'estimer les schémas de discrétisations, ainsi que le choix d'ordre des équations et l'algorithme(ou choix de solution). **Solve – Methods**



Figure(III.16): Choix d'ordre d'équation

III.4.4.2. Initialisation

Cette option permet de initialiser le calcul : **Solve -- Initialize -- Initialize**

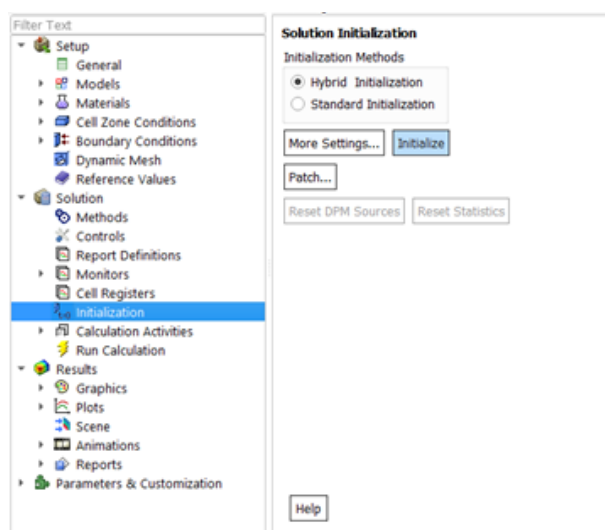
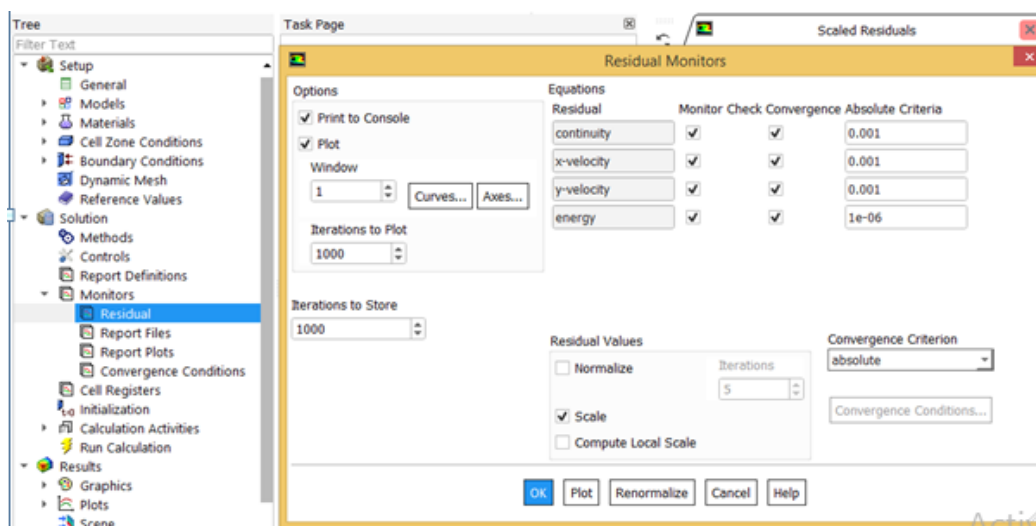


Figure (III.17): initialisation de calcul

III.4.4.3. Choix des critères de convergence

Il se fait de favoriser les critères de convergence qui doivent être considérés pour que les calculs soient arrêtés : Solve -- Monitors -- Résidual...



Figure(III.18): Choix des critères de convergence

Pour afficher la convergence à l'écran pendant les calculs sous forme d'un graphe, il faut activer l'option Plot

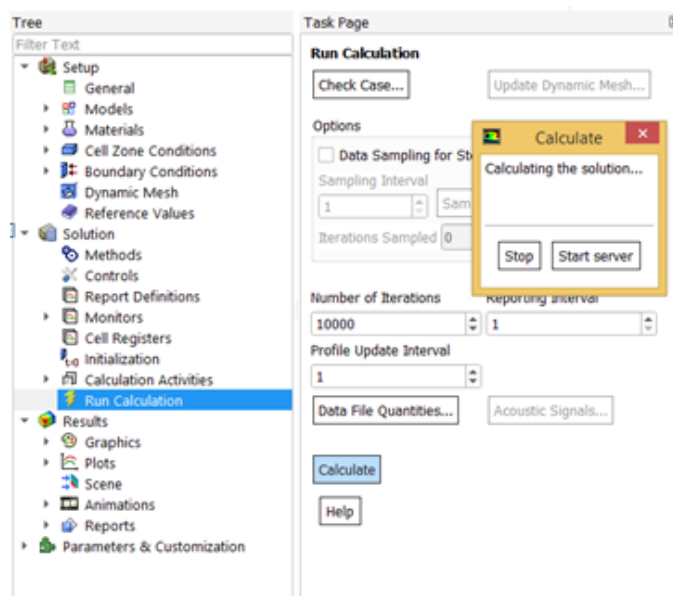
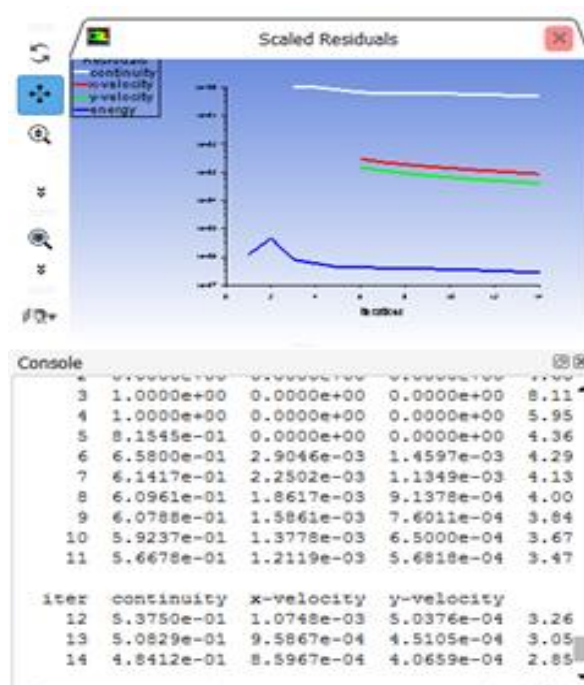


Figure (III.19) : Choix du nombre des itérations et lancement du calcul

III.4.4.4. Allures de l'évolution des résidus de calcul

Le calcul convergé quand le résidu est stable,



Figure(III.20): Allures de l'évolution des résidus de calcul

On peut visualiser et analyser les résultats à l'aide post-traitement que propose Fluent.

Ces fonctionnalités sont principalement :

❖ Display

1. Le premier menu Contours qui accède d'étudie les variations des variables sous forme de ligne de courant, profile de vitesse : **Display -- Contours...**

2. Le second menu vectors, les valeurs sont expliquées par des vecteurs pour la visualisation les vecteurs des vitesses : **Display-- Vectors...**

❖ surface

Surface : visualisation des zones expriment du maillage (ligne, plans...), cette option Surface permet de créer les lignes ou les plans dans la géométrie à partir des points.

❖ Plot

Plot offre la potentialité de faire des graphes en 2D pour toutes les variables sur les lignes ou plan créés.

Pour réaliser une cavité (2D) et étudier sa complexité les étapes de la simulation sont les mêmes sauf que dans le premier module (géométrie) on change le type d'analyse de (3D) à (2D).

III.5. Critères de convergence

Ce critère est une condition spécifique pour les résidus qui définissent la convergence d'une solution itérative. La convergence a été jugée sur la base de trois critères. Tout d'abord, les résidus d'équations normalisés pour les équations de la quantité de mouvement, de la continuité, de la turbulence et de la fraction volumique ont été surveillés et devraient baisser de manière souhaitable en dessous de $1e^{-6}$. Cependant, ce critère seul ne suffit pas pour juger de la validité de la solution. Dans certains cas, le critère résiduel peut ne jamais être rempli même si la solution est valide et pour d'autres, la solution peut être incorrecte même si les résidus sont faibles.

On essaie d'avoir une bonne convergence tout au long de la simulation et donc les critères sont rendus stricts afin d'obtenir un résultat précis.

Des instabilités numériques peuvent apparaître avec un problème mal posé, un maillage de mauvaise qualité et/ou des paramètres de solveur inappropriés et présentés comme des résidus en augmentation (divergents) ou «bloqués». Les résidus divergents impliquent un déséquilibre croissant dans les équations de conservation.

Les principales solutions pour remédier à ces problèmes sont:

- Vérifier que le problème est bien posé.
- Calculer une solution initiale en utilisant un schéma de discrétisation de premier ordre.
- Remailler ou raffiner les cellules de la géométrie.

III.6. Conclusion :

Après avoir présenté les principes de base de la procédure de résolution numérique et le logiciel qui réalise la géométrie et le maillage GAMBIT avec le code de simulation FLUENT.

Nous avons spécifié les conditions aux limites de toute la frontière du domaine d'écoulement pour résoudre les équations régissant le mouvement d'un fluide en écoulement en convection naturelle en régime laminaire. La résolution qui est effectuée par le logiciel FLUENT donne des résultats qui sont présentés dans le chapitre suivant.



CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV-1 Introduction

Le but de ce chapitre est d'appliquer les formules établies dans une cavité sphérique chauffée dans la partie inférieure.

Cette cavité contenant du méthane ; en conséquence nous abordons ici les 2 points suivants :

- Etude du régime laminaire.
- Etude de l'état stationnaire, et analyse de l'influence des principaux paramètres qui interviennent dans ce phénomène.

L'étude de la convection naturelle dans une cavité sphérique est liée directement à deux principaux paramètres physiques : le nombre de Rayleigh **Ra** et le nombre de Prandtl **Pr**.

Des tests nécessaires ont été dans notre simulation numérique pour optimiser le temps et la précision des calculs, pour simuler les distributions d'écoulement et de la température dans une cavité sphérique pour un pas du temps égal à 0.

IV-2 Influence des différents paramètres

Le problème s'agit de la convection naturelle dans une enceinte sphérique présentant une source de chaleur localisée au centre de la paroi horizontale inférieure.

Une validation du code de calcul a été faite en comparant nos résultats avec ceux de la littérature. Pour le but de vérifier l'exactitude des résultats numériques obtenus dans le présent travail tels que le nombre de Rayleigh qui caractérise l'échange thermique, et le nombre de Prandtl qui caractérise l'importance relative des effets thermiques et visqueux ; au delà on a varié le nombre de Rayleigh et flux entrant en fixant le nombre de Prandtl, et à voir son influence sur les profils de température et de vitesse.

IV.3 .Validation des résultats

IV.3.1 Cas de référence

On a pris l'étude de Calcagni et al [17] qui a étudié la convection naturelle en régime laminaire dans une cavité cylindrique remplie par un fluide cryogénique (Méthane) et le nombre de Prandtl est fixée à 2, application au stockage du GNL, comme référence.

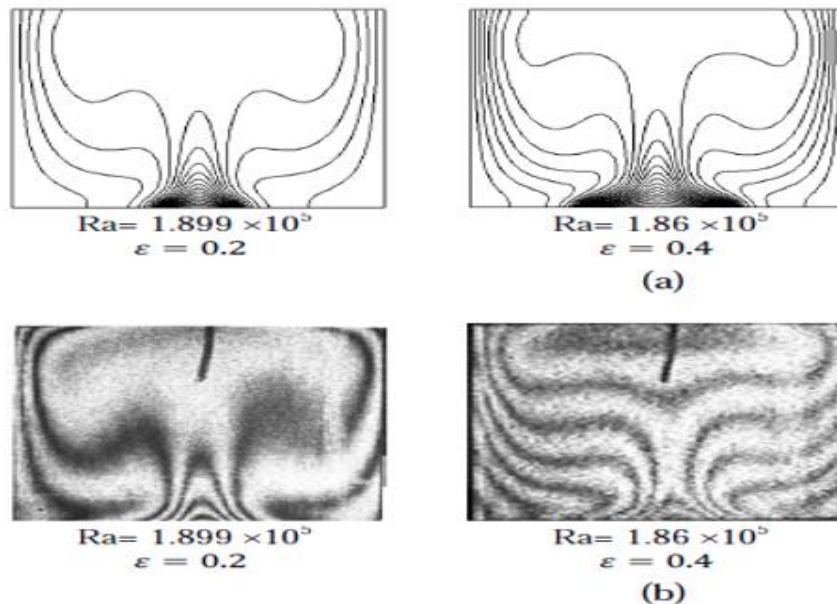
Les résultats ont été testés et validés avec succès par rapport à ceux obtenus numériquement par [17]. Nos résultats spécifiques au gaz naturel liquéfiant ont été obtenus pour des nombres de Rayleigh variant entre 10^3 et 10^5 et différents rapports de forme de la cavité. La

comparaison de ces résultats obtenus nous confirmera l'exactitude des résultats obtenus par le logiciel "Fluent".

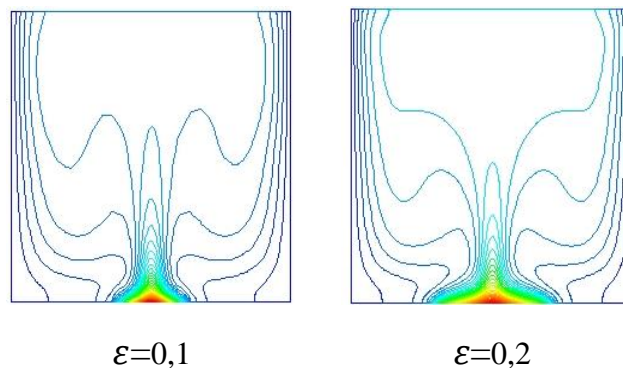
Les lignes de courants et les isothermes sont obtenues par "Fluent" dans tout le domaine pour différents nombres de Rayleigh Ra et rapport de forme ϵ .

Le domaine est résolu en régime permanent avec un maillage raffiné au des parois représenté dans la figure IV.1.

Par ailleurs, la Figure IV.2 montre également que notre code nous fournit une bonne distribution des vitesses et des températures dans l'enceinte. En effet. Les isothermes et les lignes des courants sont en parfait accord avec celles présentées par [17].



(A) Résultats Expérimentaux de calcagni et al [17].



(B) Présent travail $Ra=10^5$

Figure (IV.1) : Comparaison des isothermes (a) Résultats Expérimentaux de calcagni et al [17] (b) Présent travail.

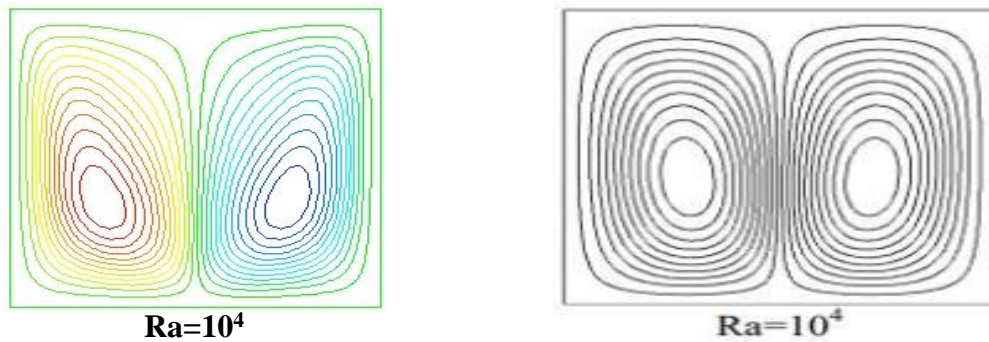


Figure (IV.2) : Comparaison des contours des lignes de courant (a) Présent travail (b) Résultats numériques de calcagni et al [17].

IV.3 .2. Sensibilité de maillage

Après validation du code de calcul pour le cas de la convection naturelle en régime laminaire dans une cavité cylindrique rempli de GNL, nous passons à la simulation de notre cas qui représentée cavité sphérique une présence du méthane pour des nombres de Rayleigh allant de 10^3 à 10^6 en fonction du rapport de forme. Les conditions aux limites appliquées, réelles, sont les conditions de stockage du méthane.

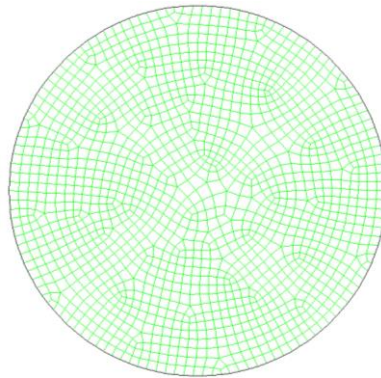


Figure IV.3. Cavité sphérique verticale avec la paroi inférieure
Chauffée par une source de chaleur.

IV.4. Résultats et discussion

Dans ce chapitre une simulation numérique du transfert de chaleur par convection naturelle laminaire et de l'écoulement des fluides est effectuée pour différents nombre de Rayleigh et plusieurs valeurs du rapport de forme dans une dans un back de stockage remplie par du méthane.

Les résultats obtenus sous forme des lignes de courants et de la distribution de température pour différents nombres de Rayleigh thermique, Rat , de plus le rapport de forme ε de la surface chauffante sur la partie inférieure.

Nous considérons une cavité sphérique verticale fermée qui contient un fluide cryogénique de viscosité cinématique ν et de diffusivité thermique α .

IV.4.1. Effet du nombre de Rayleigh :

L'effet de différents nombres de Rayleigh sur la convection naturelle des transferts de chaleur dans une enceinte délimitée par deux parois, rempli du méthane ($Pr = 2.16$) a été étudié pour quatre nombres de Rayleigh différents. Des résultats ont été présentés sous forme des lignes de courants ; isothermes, nombres de Nusselt moyens.

Lorsque source de chaleur est imposée sur la partie inférieure de la cavité sphérique verticale, nous varions le nombre de Rayleigh entre 10^3 et 10^6 tout en restant en régime laminaire.

Les figures IV.4 & 5 montrent les lignes de courant et les isothermes pour différents nombres de Rayleigh, on remarque lorsque la valeur du nombre de Rayleigh est augmentée, Ra est augmenté à 10^5 ou plus, une cellule formée sur toute l'enceinte respectivement dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Une différence marquée dans le modèle de ligne de courant a lieu pour un nombre Rayleigh particulier ayant des géométries différentes dans la taille chauffante.

Le transfert de chaleur des surfaces chauffantes vers la paroi active se produit par des phénomènes de flottabilité. Avec des valeurs du nombre de Rayleigh plus importantes, on remarque la formation des couches limites au niveau des parois verticales, à cause d'un encombrement des lignes de courant. La concentration d'isothermes près de la paroi incurvée froide, montre que le taux de transfert de chaleur est élevé à proximité de ces parois. Des isothermes moins attachés se forment dans le cœur de l'enceinte, ce qui indique un transfert de chaleur plus faible.

Pour un nombre de Rayleigh thermique très faible ($Rat \leq 10^4$), les résultats montrent qu'un écoulement convectif faible existe dans la cavité. Ainsi lorsque le nombre de Rayleigh augmente, le centre des cellules se déplace vers la paroi verticale et la taille du centre augmente également.

Avec des nombres de Rayleigh de 10^6 , les isothermes présentent presque la même allure pour tous les nombres de Rayleigh. L'effet de la présence de source de chaleur sur les

isothermes devient plus fort avec l'augmentation du nombre de Rayleigh. Et pour des nombres de Rayleigh inférieurs, l'intensité de convection dans l'enceinte devient est très faible.

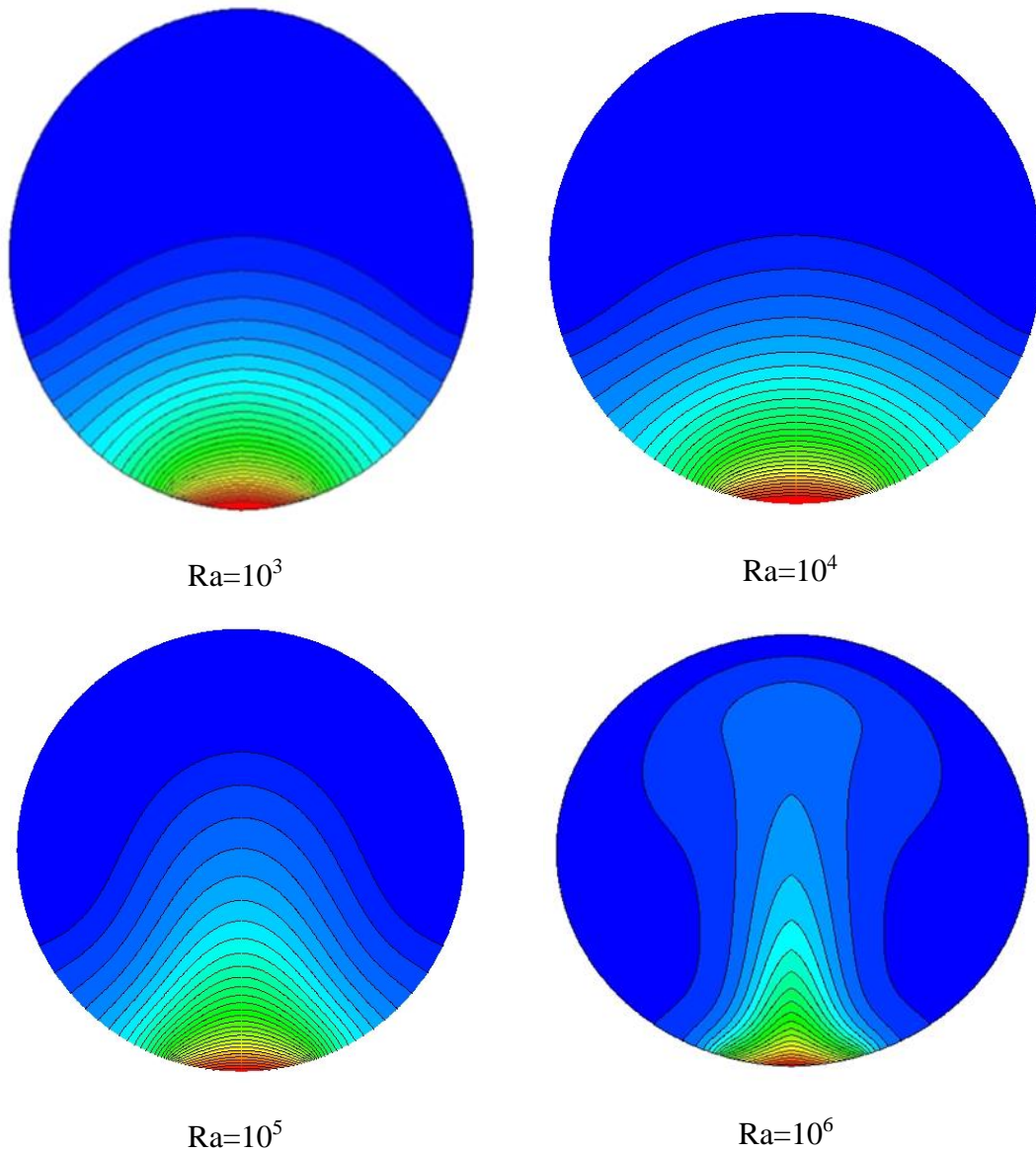


Figure (IV.4) : Les isothermes pour différents valeurs du nombre de Rayleigh
 $\varepsilon=0,1 \Phi=50 \text{ w .}$

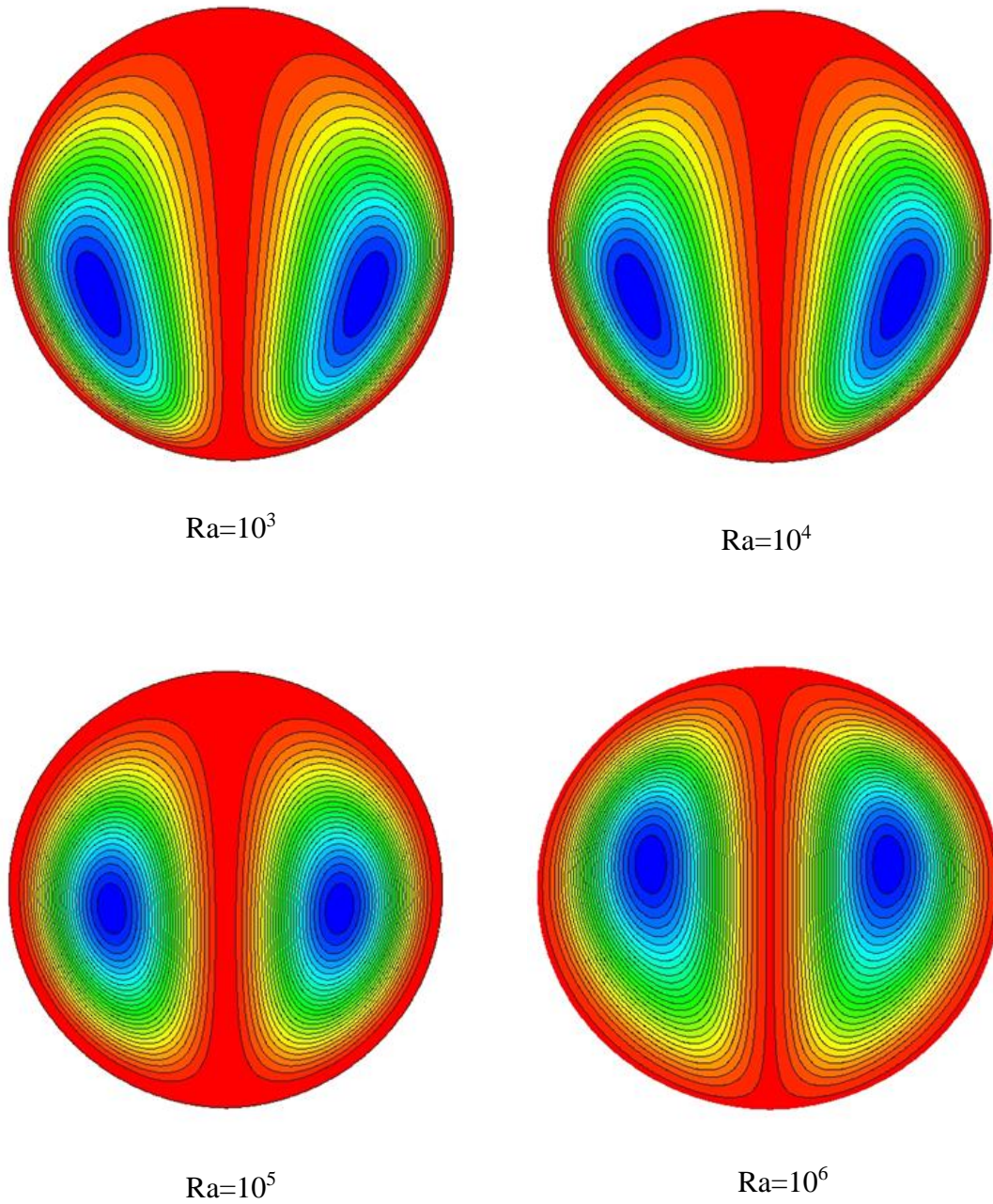


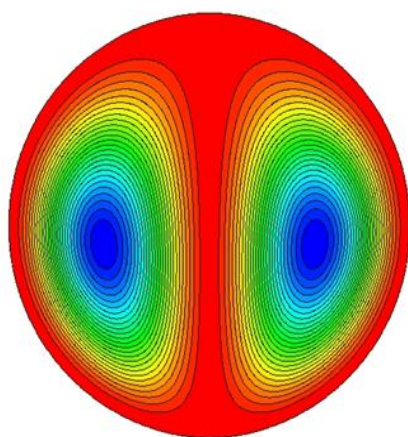
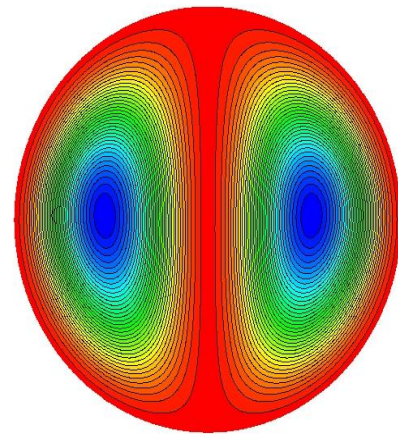
Figure (IV.5) : Les lignes de courant pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh
 $\varepsilon=0,1 \quad \Phi=50 \text{ w.}$

IV.4.2. Effet du rapport de forme

Pour mettre en évidence l'effet du rapport de forme ε de la surface chauffante par la source de chaleur de la partie inférieure du back de stockage sphérique verticale, nous avons considéré différentes valeurs du rapport de forme $0.1 \leq \varepsilon \leq 0.3$ sont données sur les figures IV.6 & 7 pour $Ra = 10^5$ et $\varnothing = 50$. Au rapport de forme = 0.1, les lignes de courant forment une cellule unique située presque au centre, et les isothermes correspondants présentent les caractéristiques de la quasi conduction.

La couche de fluide autour de la partie chauffante monte vers le haut en raison de la densité décroissante et de la faible circulation dans l'enceinte. D'autre part, des augmentations supplémentaires du rapport de forme, l'intensité de recirculation augmente avec des formations de couche limite sont observées près de la surface chauffée et la paroi refroidies. Le flux de chaleur touche la paroi supérieure pour échanger de la chaleur. Pour toutes les configurations.

La figure IV.8 montre l'effet du rapport de forme sur le nombre de Nusselt moyen. La longueur de la surface chauffante sur la paroi froide est maintenue constante avec des différentes valeurs du Rayleigh. On peut observer que pour un nombre de Rayleigh thermique Ra faible, le nombre de Nusselt moyen pour les trois cas est très proche. Mais quand le nombre de Rayleigh thermique augmente, il y a une grande variation dans le nombre de Nusselt moyen. Et lorsque la longueur de la surface chauffante est importante, la valeur de nombre de Nusselt moyen est maximale.

 $\varepsilon=0,1$  $\varepsilon=0,2$

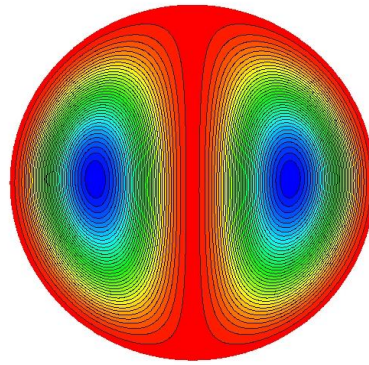
 $\varepsilon=0,3$

Figure (IV.6) : Les lignes de courant pour différents valeurs du rapport de forme
 $Ra=10^5, \Phi=50 \text{ w}$;

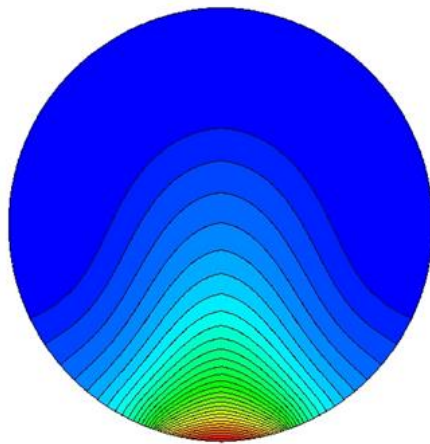
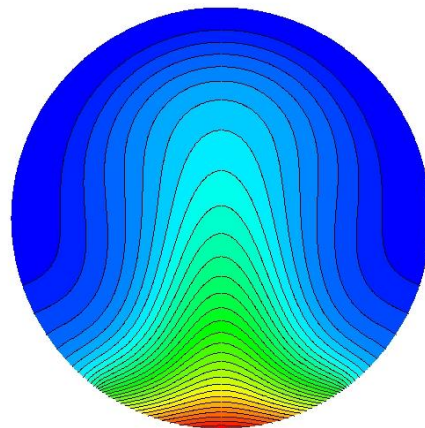
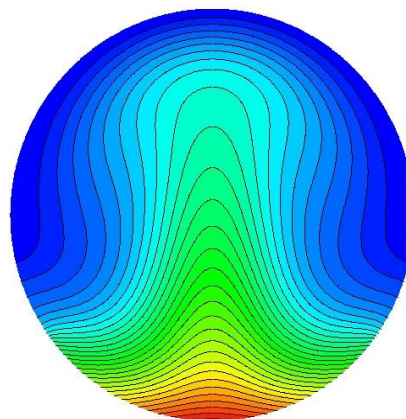
 $\varepsilon=0,1$  $\varepsilon=0,2$  $\varepsilon=0,3$

Figure (IV.7) : Les isothermes pour différents valeurs du rapport de forme
 $Ra=10^5, \Phi=50 \text{ w}$

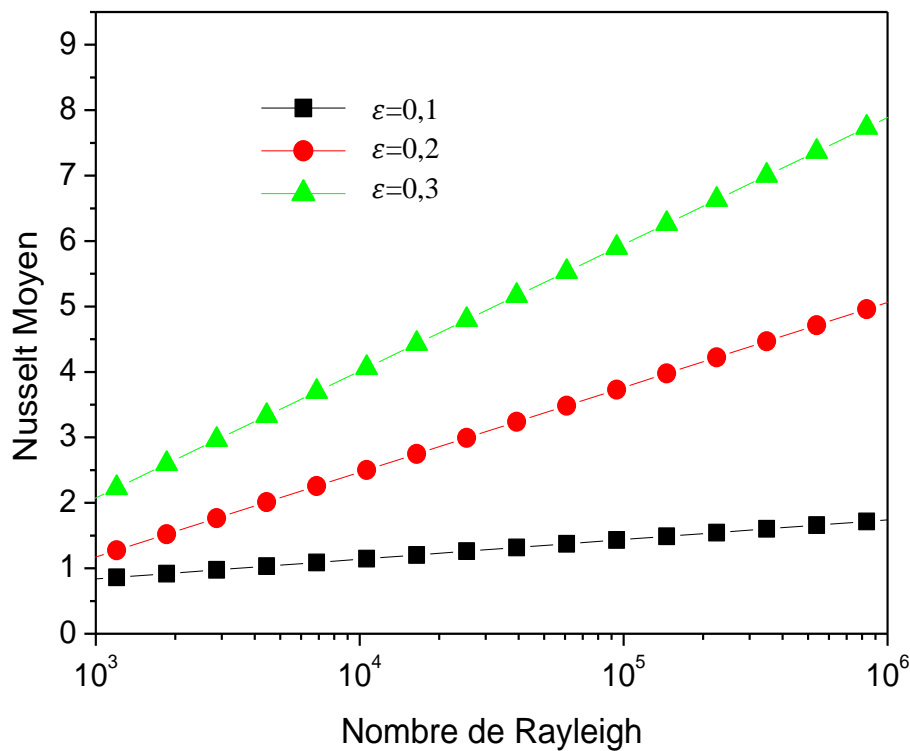


Figure IV.8. Evolution du nombre de Nusselt le long de la paroi chaude en fonction de nombre de Rayleigh et plusieurs rapport de forme ε .

IV.5 Conclusion

Les résultats obtenus par la simulation numérique de la convection naturelle dans un bac de stockage cryogénique sphérique verticale rempli par le méthane liquide nous a permis de se faire une idée plus claire sur ce phénomène qui est la convection naturelle qui joue un rôle important dans le domaine du stockage des gaz.

Premièrement on a validé le code de calcul CFD Fluent pour une cavité cylindrique verticale 2D avec le travail [17].

En plus la simulation numérique a donné plusieurs données que ce soit qualitatives ou quantitatives qui montrent la relation entre différentes propriétés thermodynamiques comme la température, nombre de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh ou en fonction du rapport de forme pris. Et tout cela a aidé à mieux comprendre qui est les paramètres qui influent la convection naturelle dans le régime laminaire et les effets de cette influence sur le stockage des gaz.



**CONCLUSIONS
GENERALE**

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire, on a présenté une simulation numérique de la convection naturelle au sein d'un bac de stockage cryogénique sphérique verticale.

Dans une première partie, on a étudié le stockage du GNL et on a pris le travail de [17] comme référence pour valider le code de calcul CFD Fluent, on a pris comme modèle physique une cavité vertical qu'on lui a appliqué une source de chaleur constante à la paroi inférieure) et tout le long de la paroi supérieure est soumis à une température froide et une partie du fond du réservoir est supposée adiabatique, le modèle comprend un axe de axis symétrie vertical et le réservoir est supposé rempli du GNL.

La simulation numérique a été faite en considérant un écoulement laminaire dans une cavité sphérique. Les équations de Navier-Stokes et l'équation d'énergie ont été résolues par la méthode des volumes finis. Des résultats ont été obtenus pour des nombres de Rayleigh (Ra) entre 10^3 et 10^6 et un nombre de Prandtl (Pr) égal à 2 (Méthane liquide) en fonction du rapport de forme de la cavité ε .

Les résultats quantitatif et qualitatif ont été testés et validés avec succès par rapport à ceux obtenus numériquement par [17] ce qui nous a permis de procéder à l'application de la simulation numérique au stockage du méthane.

Dans la deuxième partie, on a pris le même modèle physique mais on a considéré un réservoir sphérique contenant de du méthane On a effectué la simulation numérique pour différents valeurs du nombre de Rayleigh et plusieurs valeurs de rapports de forme ($\varepsilon=0.1$; $\varepsilon=0.2$; $\varepsilon=0.3$).

On a étudié l'influence du maillage et on a constaté que la solution est indépendante du maillage, ensuite grâce aux champs de température et lignes de courant on a pu mieux comprendre le phénomène de la convection naturelle, et on a vu aussi l'influence du nombre de Rayleigh et on a conclu que l'augmentation du nombre de Rayleigh augmente influe sur la structure d'écoulement, ce qui signifie que le transfert de chaleur par convection naturelle augmente avec l'augmentation de nombre de Rayleigh.

On autre, une influence des variations du nombre de Nusselt, vitesse axiale et température statique en fonction de la position radiale pour différents nombre de Rayleigh (entre 10^3 et 10^6) et l'analyse des résultats a montré que le nombre de Nusselt moyen et la vitesse axiale augmentent avec l'augmentation de nombre de Rayleigh.

Cet humble travail nous a permis d'approfondir nos connaissances sur ce phénomène qui est la convection naturelle qui touche beaucoup de domaines dans la vie quotidienne et ainsi dans l'industrie et parmi-eux le stockage des gaz liquéfiés dans les réservoirs cryogéniques.

Références bibliographique

- [1] M.S. Khelifi-Touhami, A. Benbric, D. Lemonnier, D. Blay, Laminar natural convection flow in a cylindrical cavity application to the storage of LNG, J. Pet.
- [2] A. Lemembre, J.P Petit, Laminar natural convection in a laterally heated and upper cooled vertical cylindrical enclosure, Int. J Heat Mass transfer 41 (16) 2437-2454,(1995)
- [3] K. Shigeo, A. Bejan. "Experimental study of natural convection in a cavity rectangular with different end temperatures". Int. J. Heat Mass Transfer, 23, 1117-1126. (1980).
- [4] Kamotani Y, Wang L.W, et Ostrach S. "Natural convection heat transfer in a water layer with localized heating from below". in Natural Convection in Enclosures HTD, Vol. 26, pp. 43-8. (1983).
- [5] A. Benkhelifa, 'Etude Numérique de la Stratification Thermique dans une Cuve de Stockage Cylindrique', Thèse de Magister, C.D.E.R., Bouzaréah, Alger, Algérie, 1994.
- [6] Bates, D.S. Morrison, Modeling the behavior of stratified liquid natural gas in the storage tanks: a study of the rollover phenomenon, Int. J. Heat Mass Transfer 40 (1997) 1875e1884.
- [7] A. Begar. "Etude de la convection naturelle dans une cavité comportant des sources de chaleur". Mémoire de magistère en mécanique, Université de Batna, Algérie, (2007)
- [8] N. Ibrir. "Etude la convection naturelle dans une cavité rectangulaire contenant du métal liquide". Mémoire de magistère en mécanique, Université de Batna, Algérie, (2006).
- [9] Migliore, C. (2003) Design and Economic Analysis of the Hydrate Technologies for Transportation and Storage of Natural Gas. MSc Dissertation. University of Salford.
- [10] Process Evaluation/Research Planning (PERP) program report (2004). Advances in LNG Technology. NEXANT ChemSystems, New York.
- [11] Peebles, M. (1992) Natural Gas Fundamentals. Shell International Gas Limited, London, United Kingdom
- [12] R. Aris, Vectors, Tensors, and the basic Equations of Fluid Mechanics, *Dover, New-York* , 1962.
- [13] G.K. Batchelor, An Introduction to Fluid Mechanics, *Cambridge Univ. Press* , 1967.

- [14] K. Koyama, CFD Simulation on LNG Storage Tank to improve Safety and Reduce Cost, Asia Simulation Conference 2006 (JSST 2006), 2006, pp. 39-43.
- [15] Aszodi A, E. Krepper, H.M. Prasser, Experimental and numerical investigation of one and two phase natural convection in storage tanks, Heat and Mass transfer 36 497-504 (2000).
- [16] A. Benkhelifa, '*Etude Numérique de la Stratification Thermique dans une Cuve de Stockage Cylindrique*', Thèse de Magister, C.D.E.R.,
- [17] B. Calcagni, F. Marsili, M. Paroncini. "Natural convective heat transfer in square enclosures heated from below". Applied thermal engineering, 25, 2522–2531. (2005).
- [18] Torrance K.E. et Rockett J.A. "*Numerical study of natural convection in an enclosure with localized heating from below*". J. Fluid Mech, Vol. 36, pp. 33-54. (1969).
- [19] Chu H.H.-S., Churchill S.W. et Patterson C.V.S. "*The effects of heater size, location, aspect ratio, and boundary conditions on two-dimensional, laminar, natural convection channels*". J. Heat Transfer, Vol. 98, pp. 1194-201. (1976).
- [20] R. Anderson, G. Lauriat. "*The horizontal natural convection boundary layer regime in a closed cavity*". in: Proceeding of 8th Int. Heat Transfer Conference, San Francisco, CA, pp. 1453–1458. (1986).
- [21] November M et Nansteel M.W. "*Natural convection in rectangular enclosures heated from below and cooled along one side*". Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30 No. 11, pp. 2433-40. (1987).
- [22] M. Hasnaoui, E. Bilgen, P. Vasseur. "*Natural convection heat transfer in rectangular cavities partially heated from below*". J. Thermophys. Heat Transfer, 6, 255–264. (1992).