République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Dr Yahia Fares de Médéa

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie de la Matiére

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Climatique

Option : Energie et Froid Industriel

Thème

Évaluation de l'efficacité énergétique d'un Éjecto-compression par simulation numérique, applique à une installation frigorifique

Proposé et dirigé par:

- *Dr. ZIRARI MOUNIR.*

Préparée par :

- *Tarasrast Akila*
- *Rahem Aicha*

Promotion 2014/2015

Résumé :

Les machines de production de froid conventionnelle ont généralement des effets catastrophiques sur le globe terrestre, par l'utilisation d'énergies antiques responsables des émissions de gaz a l'effet de serre en plus les fuites des fluides frigorigènes de type HFC qui sont inévitables au fonctionnement de ces systèmes , pour réduire ces effets , les machines frigorifiques à éjecto-compression sont devenues un sujet d'intérêt ces dernières années dans la recherche scientifique .Dans cette mémoire une étude théorique par simulation numérique basé sur la méthode des éléments fini a été menée dans l'objectif d'une étude critique qui a permet de comprendre le comportement dynamique et thermique des phénomènes géométrique de la tuyère convergent -divergente liées à la thermo compression.

Nots clés : Éjecteur à vapeur, machines frigorifique, fluide frigorigène, simulation numérique, éléments finis, écoulement turbulent, modélisation.

ملخص:

آلات إنتاج التبريد التقليدية لها عموما أثار كارثية **على كوكب الأرض،** من خلال استخدام الطاقات القديمة و هذا لاستخدام الوقود الاحفوي المسؤول عن انبعاث غازات الاحتباس الحراري و تسرب المبردات مثل مركبات الهيدروفلوروكربون، **و** هي متصلة في تشغيل هذه النظم, لمواجهة هذه الآثار و للحد من هذه الظاهرة أصبحت أجهزة التبريد قاذف موضوع اهتمام في السنوات الأخيرة في مجال البحث العلمي. أجريت هذه الدراسة النظرية عن طريق المحاكاة العددية القائمة على طريقة العناصر المحددة كدراسة نقدية تساعد على فهم السلوك الديناميكي الحراري و الظواهر الحرارية المتعلقة بالضغط.

المفتاح:

القاذف البخار والتبريد، **مبرد**، والمحاكاة العددية، العناصر المحدودة، التدفق المضطرب، تصميم.

Summary:

The convention production of cold machine have generally harmful effects for the environment, caused by the use of fossil energies responsible for the gas emissions for greenhouse effects and by the escapes for refrigerants for type HFC which are inhérentes for operation of these systems, to reduce these effects, chillers ejector-compression have become a topic of interest in recent years in scientific research.

In this theoretical study by numerical simulation based on the method of finite elements was conducted with the aim of a critical study which helps to understand the dynamic and thermal behavior of phenomena related to thermo compression.

Keywords:

Steam ejector, Refrigerating, refrigerant, numerical simulation, finite elements, turbulent flow modeling.

Remerciements :

Ce mémoire n'aurait pas pu être ce qu'il est, sans l'aide de ***ALLAH*** *qui ma donné la force afin de l'accomplir.*

En premier lieu, je tiens à exprimes ma profonde gratitude à ***Dr.zirari.M,*** *directeur de thèse et maitre de conférences à l'université de Médéa ,de m'avoir permis de réaliser ce travail sous la direction, merci pour votre disponibilité.*

J'exprime toute ma profonde gratitude à ***Me.ziane.f****, je tiens à la remercier vivement pour sa confiance durant le moment de travail de la thèse, pour son soutien lors des moments difficiles pour faire évoluer ce projet, je le remercie encore pour sa disponibilité et la gentillesse et aussi la bonne humeur tous les bons moments passés.*

Je le remercier chaleureusement à tous les enseignements de l'université de Médéa et en particulier ***M.ANOUN, M.KAZERAN****et* ***M.CHEBA, M.triki****, un grande merci pour tous les aides tous au longue de cette étude et merci pour les bonne années universitaire passé.*

Toutes mes salutations à tous mes collègues de la promotion de master 2015, genie climatique pour les sympathiques moments qu'on a passés ensemble.

Que toute personne ayant participé de prés ou de loin dans l'élaboration de ce travail, trouve ici l'expression de mes très vifs remerciements.

Je pense à ma famille qui m'apporte un soutien important, non seulement sur l'aspect sentimental mais également par les encouragements dont j'avais besoin pour mener à bien ce travail.

A mes parents : «merci, cette thèse est la vôtre».

Un grand merci à tous….

Dédicace :

Je dédie ce Modeste de travail …

A mes très chères parents

Aucune dédicace aussi parfaite et douce soit elle, ne saurait exprimer tout ma reconnaissance et tout l'amour que je vous porte.

Ce travail représente le fruit de votre soutien, vos sacrifices, et vous encouragement.

A ma grande mère

A mon frère (abd Salam) et à mes sœurs (linda, ahlam, imene)

Pour leur affectueux soutien moral.

A ma sœur **soulaf**, *en particulier et son marie* **(Azzedine)** *et ses enfants :* **houssam abd almohsin, soufian, tassnim.**

A une personne très chère dans ce monde, qui ma donne l'encouragement et la confiance et aussi pour leur soutien tout au long de ma vie et mes études

A mon très chère frère

Soufian

" رحمه الله "

Pour moi il existe toujours en vie tant qu'il est présent dans mon cœur

A toute ma famille.

A toutes mes amies.

A tous ceux qui de prés ou de loin m'ont aidé à mener à bon terme la réalisation de ce travail.

A toutes celles et à tous ceux qui m'aiment.

Akila …



dédécace

je dédie ce modeste travail à une personne très chére dans ce monde **mamére** qui donnes toujeur plus de courage et a mon **cher père**.

Et a mes fréres :**bachir ,saad,**

A mes très chéres sœurs :**nadia, amel, nasira.**

Et très chers sœurs :

djamila et son marie **abad alkadir** et ses enfants :**aiman et bochra .**

Naima et son marie **fatah** et ses enfants : **mehamaed amin et ibatihal .**

Et tout ma famille et en plus particuliérement : **boabad alah saidani.**

Atoutes mes amies et plus particuliérement : **akila , Ganoun lonise .**

AICHA

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE 01

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES EJECTEURS.

I.1.Introduction 04
I.2.définition d'un éjecteur 04
I.3.principe de fonctionnement de l'éjecteur 04
I.3.1.Avantages et inconvénients de l'éjecteur 05
I.4.Caractéristiques géométriques des éjecteurs 06
I.4.1.Éjecteurs à mélangeur cylindrique 06
I .4.2.Éjecteurs à mélangeur convergent-divergent 07
I.5.Différents type d'éjecteur 08
I.5.1.éjecteur à jet liquide 08
I.5.1.1.compresseurs à jet liquide 08
I.5.1.2. Pompes à vide à jet liquide 09
I.5.1.3.Pompes à liquide à jet liquide 10
I.5.1.4.Pompes à solides à jet liquide 12
I.5.2.Éjecteurs à jet de gaz 13
I.5.2.1.Compresseurs à jet de gaz 13
I.5.2.2.Pompes à vide à jet de gaz 13
I.5.2.3 .Pompes à liquide à jet de gaz 15
I.5.2.4. Pompes à solides à jet de gaz 15
I.5.3.Éjecteurs à jet de vapeur 15
I.5.3.1.Compresseurs à jet de vapeur 16
I.5.3.2.Pompes à vide à jet de vapeur 16
I.5.3.3.Éjecteurs/réchauffeurs à liquide à jet de vapeur 17
I.5.3.4.Éjecteurs à solides à jet de vapeur 18
I.6.Généralités sur les systèmes de réfrigération à éjecteur 18
I.7.Le fluide frigorigène utilisé dans les cycles à éjecteur 19

I.8.Etat de l'art 19
I.8.1.L'influence des conditions opératoires 20
a)L'effet de la température et de la pression du condenseur 20
b) L'effet de la température et de la pression du générateur 21
c)L'effet de la température et de la pression de l'évaporateur 21
I.9.Conclusion 22

CHAPITRE II : MODELES PHYSIQUES ET MATHEMATIQUES.

II.1. Introduction 23
II.2.Équations et modèles mathématiques des écoulements dans ces dispositifs 23
II.3. Modélisation de L'écoulement des Fluides 23
II.3.1. Equation de Navier-Stokes 23
II.3.2.Equation de continuité 24
II.3.3.La décomposition de Reynolds 24
II.3.4.Equation de transport des tensions de Reynolds 25
II.3.5.Equation de l'énergie cinétique turbulente 27
II.4.Les modèles de turbulence et leurs classifications 27
II.4.1.Les modèles à viscosité turbulence algébrique (modèle à zéro équation de transports…. 27
II.4.2. Les modèles à une équation de transport 28
II.4.3.les modèle a deux équations de transport(Le modèle k-ε et RNG) 28
II.4.4.Le modèle k-ε deux couches 29
II.4.5.Le modèle k- ε étendu 29
II.5.Modélisation du transfert de chaleur 30
II.5.1.Equation d'énergie 30
II.5.2.Transferts de chaleur en écoulements incompressibles 30
II.6.Conclusion 30

CHAPITRE III : SOLUTION NUMERIQUE PAR DISCRETISATION.

III.1.Introduction 31
III.2. Méthodes de discrétisation 31
III.2.1.Méthode des différences finies 31
III.2.2.Méthodes des éléments finis 32
III.2.3.Méthode des volumes finis 32
III.3. Présentation de la méthode 33
III.4.Formulation des éléments finis ……..... 33
III.5.Dérivation des équations de discrétisation ……..... 34
III.6.Maillage ……..…..35
III.6.1.Génération de maillage…….…….……..36
III.6.2.Choix d'un maillage ……..…..…..…36
III.6.2.1.Les avantages et les inconvénients de Choix du type de maillage….....……37
III.7.Discrétisation ……..…..38
III.7.1. Terme temporelle ……..……..…….....39
III.7.2. Terme d'advection 39
III.7.2.a.Monotone Streamline Upwind Approach (MSU)..... 41
III.7.2.b. La méthode SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin) 41
III.7.2.c.Approche Colloquée De Galerkin (COLG)..... 41
III.7.3 .Terme de Diffusion..... 42
III.7.4 .Termes source..... 42
III.8.Discrétisation de l'équation de chaleur par éléments finis 43
III.8.1. Discrétisation par éléments finis 43
III.8.1.1. Représentation élémentaire (ou locale) du champ de températures 43
III.8.1.2. Représentation globale du champ de températures 44
III.8.2.Discrétisation de la forme intégrale faible 44
III.8.3.Exemple de calcul élémentaire..... 45
III.9.Approximation de la fonction-test..... 46
III.10.Approximation par éléments finis (Galerkin)..... 46
III.11.Conclusion..... 49

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION.

IV.1.Introduction 50
IV.2.Introduction sur l'ANSYS 50
IV.2.1. Préparation des données 50
IV.2.2. Traitement 51
IV.2.3.Analyse et visualisation des résultats 51
IV.3.Description de la structure étudiée 51
IV.4 .les dimensions des géométries 52
IV.5.les Conditions aux limites 54
IV.5.1. Maillage de système 55
IV.6.Interprétation des résultats 56
❖ Pour la position axiale 56
IV.6.1. Champ de température 56
IV.6.1.1. Les profils des températures 58
IV.6.2. Champ de pression 59
IV.6.2.1. Les profils des pressions 60
IV.6.3. Champ de vitesse 61
IV.6.3.1.Les profils des vitesses 62
❖ Pour la position transversale 63
IV.6.4.Les profils des vitesses 63
IV.7.Etude explicative 66
A/ pour la vitesse primaire 66
IV.7.1. Champ de température 66
IV.7.1.1.Les profils des températures 67
IV.7.2.Champ de pression 68
IV.7.2.1.Les profils des pressions 69
IV.7.3.Champ des vitesses 69
IV.7.3.1.Les profils des vitesses 70
B/ pour la vitesse secondaire 71
IV.7.4.Champ de température 71
IV.7.4.1.Les profils des températures 73
IV.7.5.Champ de pression 73
IV.7.5.1.Les profils des pressions 75

IV.7.6.Champ de vitesse..... 76
IV.7.6.1.Les profils des vitesses..... 77
IV.8.Conclusion 78
CONCLUSION GENERALE **79**
Référence Bibiographique.

Liste des figures et des tableaux

I-LISTE DES FIGURES :

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES EJECTEURS.

Figure I.1: Coupe d'un éjecteur et évolutions des vitesses et pression.....05

Figure I.2 : Schéma de principe d'un éjecteur à liquide ave mélangeur cylindrique….....07

Figure I.3 : Schéma de principe d'un éjecteur à gaz avec mélangeur convergent-divergent ..07

Figure I.4 : Diagramme de définition d'un compresseur à jet liquide……...……09

Figure I.5 : Schéma d'implantation d'une pompe à vide à jet liquide…….. 10

Figure I.6 : Schéma d'implantation de pompes à liquide à jet d'eau dans une installation de dessalement…….…….. ……10

Figure I.7 : Schéma d'installation de mélangeurs à jet liquide sur un bac..... …….11

Figure I.8 : Schéma d'implantation d'une pompe à pied éjecteur (cas classique)…….……12

Figure I.9 : Ensemble pompe à jet d'air/pompe à anneau liquide……..... 14

Figure I.10 : Diagramme de définition de pompes à vide à jet d'air..... 15

Figure I.11 : Exemples d'éjecteurs à jet de vapeur à plusieurs étages 17

Figure I.12 : Schéma de principe d'un éjecteur/réchauffeur à jet de vapeur ……...18

Figure I.13 : le système de réfrigération à éjecteur utilisant l'énergie solaire 19

Figure I.14 : l'effet des conditions opératoires sur le processus d'entrainement et du mélange dans la chambre de mélange..... 21

CHAPITREIII:SOLUTION NUMERIQUEPAR DISCRETISATION.

Figure III.1 : Exemples de mailles utilisées en Volumes Finis 36

Figure III.2 : Maillages structure et non structure 37

Figure III.3:L'approche de ligne de courant d'upwind 40

Figure III.4 : les caractéristiques A, λ, ρ et q..... 45

Figure III.5 : élément a deux nœuds……..……..46

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION.

Figure IV.1 : la géomètre (I) de l'éjecteur à étudie 52

Figure IV.2 : la géomètre (II) de l'éjecteur à étudie..... 53

Figure IV.3: la géomètre (III) de l'éjecteur à étudie 53

Figure IV.4 : la géomètre (IV) de l'éjecteur à étudie 54

Figure IV.5 : Maillage de systèmes..... 55

Figure IV.6 : présentation des points pour présenté ces résultats..... 56

Figure IV.7 : Représentation spatiale de la température pour l'éjecteur (I)..... 56

Figure IV.8 : Représentation spatiale de la température pour l'éjecteurs (II.III.IV)……..57

Figure IV.9 : Diagrammes des températures dans les différents géomètres des éjecteurs..... 58

Figure IV.10 : Représentation spatiale de la pression pour les éjecteurs (I ; II ; III ; IV)…….....59

Figure IV.11 : profils des pressions axiales des cas étudier. 60

Figure IV.12 : Représentation spatiale de la vitesse pour les éjecteurs (I ;II ;III ;IV)…. ….61

Figure IV.13 : Diagrammes des vitesses dans les différents des éjecteurs 62

Figure IV.14 : Présentation schématique des différentes sections pour présenter les résultats…….63

Figure VI.15:Profils de vitesse pour section (A) dans les différents des éjecteurs (I ; II ; III ; IV)…….63

Figure VI.16:Profils de vitesse pour les deux sections (B ; C) pour lesquatregéométries(I ;II ;III ;IV)…….64

Figure IV.17 : Représentation spatiale de la température pour la différente de vitesse 66

Figure IV.18 : Représentation spatiale de la température pour lavitesse (v3=1 m/s).....67

Figure IV.19 : Profils des températures dans les différentes vitesses 67

Figure IV.20 : Représentation spatiale de la pression pour différente vitesse 68

Figure IV.21 : variation de pression en fonction de la position axiale à plusieurs vitesses primaires pour la géomètre (I) de l'éjecteur.....69

Figure IV.22: Représentation spatiale de la vitesse pour la vitesse primaire (v1=0.316 m/s)..69

Figure IV.23 : Représentation spatiale de la vitesse pour la différente de vitesse primaire….70

Figure IV.24 : variation de vitesse en fonction de la position axiale à plusieurs vitesses primaires pour la géomètre (I) de l'éjecteur.....70

Figure IV.25 : Représentation spatiale de la température pour la différente de vitesse secondaire (v1'=0.004 m/s ; v2'=0.0065 m/s).....71

Figure IV.26: Représentation spatiale de la température pour la différente de vitesse secondaire…….72

Figure IV.27 : variation de température en fonction de la position axiale à plusieurs vitesses secondaire pour la géomètre (I) de l'éjecteur……...73

Figure IV.28 : Représentation spatiale de la pression pour la différente de vitesse secondaire (V1'=0.004 m/s)……. 73

Figure IV.29 : Représentation spatiale de la pression pour la différente de vitesse secondair..74

Figure IV.30 : variation de pression en fonction de la position axiale à plusieurs vitesses secondaire pour la géomètre (I) de l'éjecteur……..…… 75

Figure IV.31: Représentation spatiale de la vitesse pour la différente de vitesse secondaire..76

Figure IV.32: Représentation spatiale de la vitesse pour la différente de vitesse secondaire (V4' et V5')……. 77

Figure IV.33 : variation de vitesse en fonction de la position axiale à plusieurs vitesses secondaire pour la géomètre (I) de l'éjecteur…….……...77

II-LISTE DES TABLEAUX :

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES EJECTEURS.

Tableau I .1: les différents types d'éjecteurs 08

CHAPITREII:MODELE PHYSIQUES ET MATHEMATIQUES.

Tableau II.1: constantes du modèle k-ε..... …....29

Tableau II.2: constantes du modèle RNG ..... …29

CHAPITREIII:SOLUTION NUMERIQUEPAR DISCRETISATION.

Tableau III.1:les avantages et les inconvénients de la méthode des différences finis..... 31

Tableau III.2:les avantages et les inconvénients de la méthode des éléments finis..... 32

Tableau III.3:les avantages et les inconvénients de la méthode des volumes finis..... 33

Tableau III.4 : Expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables..... 35

CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSION.

Tableau IV.1 : Généralités de fluide frigorigène R134a..... 51

Tableau IV.2 : Les propriétés thermiques de fluide frigorigène R134a. 52

Tableau IV. 3 : présentation des points pour la géométrie(I) 52

Tableau IV. 4: présentation des points pour la géométrie(II)..... 53

Tableau IV.5 : présentation des points pour la géométrie(III)..... 53

Tableau IV. 6 : présentation des points pour la géométrie(IV).. 54

Tableau IV.7:Les conditions aux limites 54

Notation	Signification	Unité
$a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, a_{i4}, b_i$	Coefficient dans le système d'équation algébrique	
C_μ , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$	Coefficient du mode k-ε	
D_{ij}	Diffusion visqueuse	
F	Distances équivalentes représente la proximité de surface solide	
L_m	Longueur de mélange	m
T	Température	$°K$
P	Pression instantanée	N/m^2
P	Fluctuation de pression	N/m^2
$\bar{P}$	Pression moyenne	N/m^2
K	énergie cinétique turbulente	J/kg
P_k	Production de l`énergie turbulente	
$S_\emptyset$	Terme source	
t	Temps	s
$\overline{R_{ij}}$	Tenseur de Reynolds	
u, v	Fluctuation de vitesse	
U	Composante de la vitesse moyenne dans la direction X	
V	Composante de la vitesse moyenne dans la direction Y	
$\overline{u_i u_j}$	Tension de Reynolds	
$\overline{U_i U_j U_k}$	Terme de diffusion	m/s
h	Coefficient d`échange de convection	
A , A_e , A_s , A_n , A_w	Coefficient dans le système d'équation algébrique discrétisées	

D	Diffusivité massique moléculaire	m^2/s
h	enthalpie massique	J/ kg
Q_e	puissance entre de la chambre d'aspiration	kw
$[\tau_{ij}]$	le tenseur des contraintes visqueuses	
T_{ij}	Transport diffusif du à la fluctuation de vitesse et aux fluctuations de pression	
ε_{ij}	Dissipation visqueuse (car il constitue un puits du à la viscosité' moléculaire).	
$\frac{\overline{U_i U_j}}{K}$	Le coefficient de proportionnalité	
αT	un terme linéaire laissé à la libre utilisation de l'utilisateur	
d	l'opérateur variation el	
L	la fonction de Lagrange de la plaque.	
t1 et t2	les bornes artichautières du temps.	
T	l'énergie cinétique	w
ppi	l'énergie potentielle	w
{wi} et {ẇi}	les vecteurs de déplacement	
{w}	le vecteur global de déplacements	
We	La fonction pesante pour l'élément	
{F}	vecteur des sollicitations externes	
{R}	vecteur des réactions (ou flux) externes Inconnus	
[k]	Matrice rigidité globale de la rigidité obtenue par assemblage	

[M]	Matrice masse rigidité obtenue par assemblage élémentaire	
C2τ	coefficient global réglé à 1,0.	
D , D_n , D_s , D	Flux diffusif à travers les faces e, n, s et w	
F , F_n , F_s , F_w	Flux convectif à travers les faces e, n, s et w	
h'	longueur d'élément le long de la direction d'advection	m
Symboles grecs		
α	La diffusivité thermique	
δ_{ij}	Symboles de Kronecker	
ε	Taux de dissipation de l`énergie cinétique turbulente	m^2/s^2
λ	La conductivité thermique	$W/\mathrm{m}.K$
v	La viscosité cinématique	$\mathrm{m}^2/\mathrm{s}^2$
v_t	La viscosité cinématique turbulente	$\mathrm{m}^2/\mathrm{s}^2$
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Constante thermique dans le modèle k−ε	
ρ	La masse volumique	kg/m^3
τ	Contrainte de cisaillement	N/m^2
τ_{ij}	Tenseur des contraintes de cisaillement	N/m^2
τ_p	Frottement pariétal	$\mathrm{N}/\mathrm{m}.\mathrm{s}^2$
Ø	Variable générale par unité de masse	
Ø'	Composition de fluctuation	
$\overline{\emptyset}$	Grandeur moyenne	
Γ	Coefficient d'échange dans les termes de transport	
$\Gamma_\emptyset$	Coefficient de diffusion	
L_s	Echelle de longueur des grandes structures	

Q'	Flux de chaleur par unité de volume	
C_p	Chaleur massique	
μ	La viscosité dynamique	$Kg/m.\ s$
μt	La viscosité dynamique turbulente	$Kg/m.\ s$
Δs	la distance du point situé en amont à l'aval du m nœuds	m
$\mu\ eff$	La viscosité dynamique effective	Kg/m. s
η	Rendement des pompes	(%)
f	Coefficient de frottement	
π	3.14159 radians	
ΔP	Perte de charge du fluide	(Pa)
δ	coefficient d'intégration en temps pour la méthode Newmark	

Abréviation	
1D	Un dimension
2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
EDP	Equation aux dérivées partielles
COLG	colloquées de Galerkin
MSU	monotone Streamupwind
SUPG	Stream line Upwind/Petro-Galerkin
CFD	Computational Fluid Dynamics
CAD	Computer Aided Design
FEM	Force éléctromotrice
RNG	Random number generator

Introduction générale

Les éjecteurs, appelés également appareils à jet ou encore trompes, sont des appareils statiques destinés à aspirer, comprimer ou mélanger des gaz, des vapeurs, des liquides et parfois des solides grâce à la détente d'un fluide primaire moteur. Celui-ci peut être gazeux, en régime subsonique ou supersonique, ou liquide, en régime incompressible, et apporte l'énergie nécessaire à l'entraînement du fluide secondaire **[1].**

Ces appareils peuvent également assurer la vidange d'une cavité ou d'un volume et, dans certaines applications, concurrencer les pompes à vide mécaniques grâce à leurs capacités d'absorption qui peuvent atteindre $\mathbf{10^6\ m^3/\ h}$ d'air **[1].**

Il est composé d'une tuyère motrice et d'une tuyère secondaire en trois parties, partie convergente, chambre de mélange, partie divergente du diffuseur. L'éjecteur est l'élément où s'effectue le mélange des deux fluides (primaire et secondaire). C'est aussi un compresseur statique qui sert augmenter la pression, donc, c'est un élément moteur de la machine dans laquelle le fluide moteur aspire le fluide de la boucle frigorifique. La partie active de l'éjecteur consiste en système de deux tuyères coaxiales liées par un collecteur d'aspiration **[2].**

Le fluide moteur sous pression est admis à l'entrée de la tuyère primaire, arrivé dans le collecteur, il entraîne le fluide secondaire issu de l'évaporateur. Les deux courants fluides pénètrent ensuite dans la seconde tuyère où après mélange, ils sont comprimés dans le diffuseur jusqu'à la pression du condenseur

Un éjecteur a le grand avantage d'être d'un prix de revient sensiblement inférieur à celui d'une pompe classique, de ne posséder aucune pièce en mouvement donc d'être d'un entretien quasi nul, et de bien résister à la corrosion ou aux attaques de gaz agressifs.

Donc un éjecteur est un dispositif élevant la vitesse d'un fluide dans une section étranglée pour créer une dépression et attirer un autre fluide. La tuyère primaire réalise la conversion de l'enthalpie en énergie cinétique. Dans le diffuseur l'énergie cinétique du mélange est convertie en énergie de pression **[2].**

L'énergie cinétique de cette veine se transforme en pression dans le convergent supersonique qui réduit la vitesse jusqu'à un nombre de Mach voisin de l'unité au col, puis dans le diffuseur final subsonique. Ce type de géométrie permet de diminuer les pertes par frottement et donc améliorer le rendement.

A l'entrée du diffuseur, une onde de choc peut naître provoquant, d'une part la diminution de la vitesse du fluide qui passe brusquement d'une valeur supersonique à une valeur subsonique, et d'autre part l'intensification brusque du processus de compression du fluide qui se produit dans le divergent (le fluide est alors fortement comprimé par ce choc) jusqu'à la pression de sortie de l'éjecteur, c'est-à-dire, jusqu'à celle du condenseur **[2].**

Les fluides suffisamment mélangés en sortie de la chambre de mélange, traversent la partie divergente de la tuyère secondaire (diffuseur subsonique), dans laquelle l'énergie cinétique continue à être convertie en énergie de pression. Donc, le mélange qui s'effectue dans la deuxième tuyère, aura pour conséquence la transformation de l'énergie cinétique et engendrera l'augmentation de la pression.

Dans notre étude on s'intéresse à des caractérisations géométriques de l'éjecteur ; et connaitre ce qui se passe dans les différents conduite de l'éjecteur par simulation numérique à l'aide d'un logiciel de simulation des écoulements des fluides et de transfert de chaleur «ANSYS » ; l'étude comporte quatre chapitres :

- Dans la première chapitre ; définition et représentation des différents types des éjecteurs et leurs utilisations dans différents domaine.
- Le deuxième chapitre ; représentation des modèles mathématique et physique.
- Le troisième chapitre représente les méthodes numérique ou les trois méthodes son données ainsi que le chois de méthode de discrétisation.
- Enfin le dernier (quatrième) chapitre donne la résolution et l'interprétation des résultats obtenus par simulation.

*G*énéralités sur l'éjecteur.

I.1/ Introduction :

La plupart des procédés industriels génèrent des rejets énergétiques qui sont disponibles à un coût très bas et dans certains cas ces procédés ont aussi des besoins en réfrigération. On pourrait donc envisager de satisfaire ces besoins à partir d'un système de réfrigération qui se base sur la technologie de l'éjecteur et qui utilisera les rejets thermiques comme source d'énergie à température modérée.

La technologie de réfrigération avec éjecteur est plus attractive que la technologie conventionnelle à compression car elle est moins coûteuse **[3].**

I.2/ définition d'un éjecteur :

Les éjecteurs sont des appareils statiques dans lesquels l'énergie apportée par la détente d'un fluide sous pression (vapeur d'eau, gaz, liquides....) permet :

- D'aspirer, de comprimer ou de mélanger des fluides
- De mettre sous vide ou sous pression des enceintes
- De transporter des fluides, des poudres ou des boues
- De transférer de la chaleur **[2].**

I.3/principe de fonctionnement de l'éjecteur:

Dans l'éjecteur, le débit à haute pression du générateur (p) s'accélère dans la tuyère primaire cotée convergente de l'éjecteur (i). Ceci crée une basse pression à la sortie du coté divergente de cette tuyère (ii). Cette pression est inférieure à la pression de l'évaporateur (s).

Le résultat est un entraînement de la vapeur à partir de l'évaporateur. Dans la zone de mélange (iii), à la fin de la section convergente, les deux débits sont mélangés. Après cette opération, la vitesse du mélange devient supersonique. Un choc se produit le long de la zone à surface constante entre les deux sections (iv) et (vi): ceci pour équilibrer la différence de pression du générateur et de l'évaporateur. Après le choc, la vitesse du mélange devient subsonique, dans le diffuseur secondaire, alors la pression augmente pour s'adapter avec la pression du condenseur. (vii)**[4].**

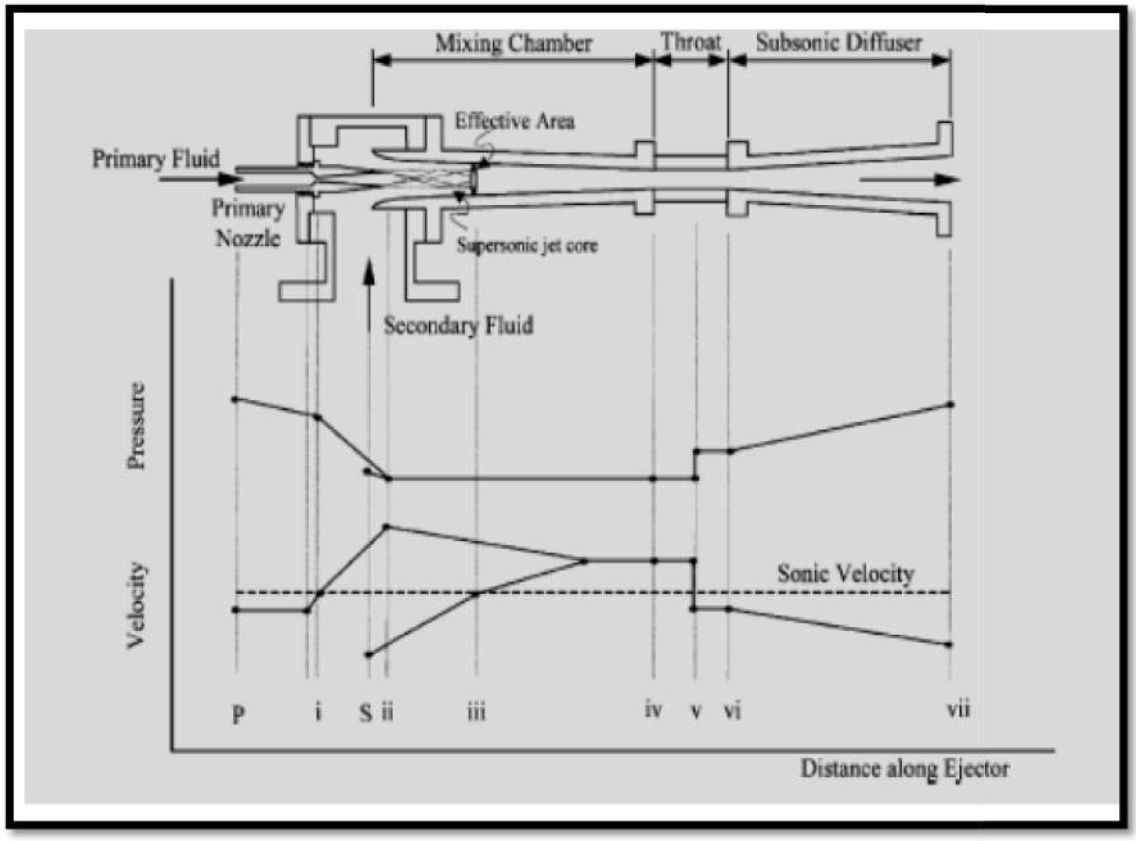


Figure I-1: Coupe d'un éjecteur et évolutions des vitesses et pression.

I.3.1/Avantages et inconvénients de l'éjecteur :

Le principal avantage que procure l'éjecteur supersonique à un cycle de production de froid est : au lieu d'utiliser les énergies nobles (énergie électrique, énergie cinétique…..), il utilise des énergies thermiques gratuites ou non nocives (énergie solaire) ou, il recycle les énergies perdues en forme de chaleur **[2].**

Éjecteur supersonique est un système mécanique très simple sans pièce en mouvement, par conséquent il ne demande pas d'entretien ou une maintenance coûteuse (pas de lubrification ou de friction…..), aussi **[2]** :

- La fabrication d'une machine de réfrigération avec éjecteur supersonique est très simple.
- Grande sécurité d'emplois.
- Le système a éjecteur à une étanchéité parfaite :
  - ✓ Les fluides frigorigènes utilises ne causent pas de pollution a l'environnement.

- ✓ Le système de réfrigération peut fonctionner à des niveaux de pression très basses ce qui permet l'utilisation de fluides frigorigènes inédits comme par exemple l'eau.

Signalons à ce propos que l'un des problèmes pratiques rencontrés lors de l'utilisation d'un éjecteur dans un cycle, sont ses performances qui dépendent beaucoup de ces conditions de fonctionnement : le rapport de compression obtenu est bien évidemment fonction du rapport d'entraînement, mais une variation de ce dernier induit une modification de la géométrie optimale de l'éjecteur, qui est bien évidemment impossible à réaliser **[5].**

Il s'ensuit qu'un éjecteur s'adapte mal à un fonctionnement hors des conditions de désigne **[5].**

I.4/Caractéristiques géométriques des éjecteurs :

Selon leur géométrie, on peut diviser les éjecteurs en deux types principaux : les éjecteurs à mélangeur cylindrique et les éjecteurs à mélangeur convergent-divergent **[6].**

I.4.1/ Éjecteurs à mélangeur cylindrique :

La figure(I.2) montre le schéma de principe d'un éjecteur à liquide et à mélangeur cylindrique. Dans cet éjecteur, la tuyère motrice qui accélère le fluide est donc simplement convergente alors que, dans le cas d'un éjecteur à air ou à vapeur, le flux moteur est généralement supersonique ; la tuyère motrice est donc convergente divergente. Dans tous les cas, la tuyère transforme l'énergie de pression du flux moteur en énergie cinétique et le jet primaire, à grande vitesse, entraîne le fluide secondaire dans le mélangeur par échange de quantité de mouvement. Ce mélange des flux primaire et secondaire s'effectue à pression sensiblement constante dans le mélangeur cylindrique, puis la pression croît dans le diffuseur de sortie comme le montre également la figure (I .2), sur laquelle l'évolution des vitesses des deux flux est également représentée.

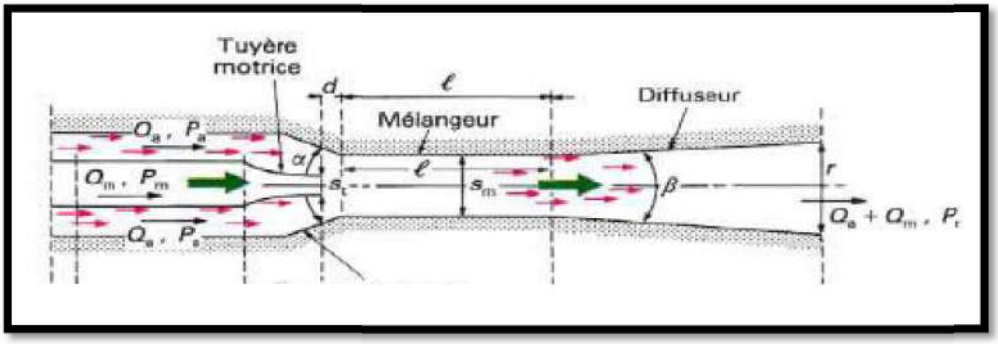


Figure I.2 : Schéma de principe d'un éjecteur à liquide avec mélangeur cylindrique.

Les éjecteurs à mélangeur cylindrique sont plutôt utilisés lorsque le fluide moteur est liquide. Ils le sont également lorsque l'on souhaite comprimer modérément de forts débits mais, dans ce cas, on utilise du gaz comme flux primaire. L'éjecteur fonctionne alors en régime mixte.

I .4.2/Éjecteurs à mélangeur convergent-divergent :

La figure (1.3) montre le schéma de principe d'un éjecteur à gaz et à mélangeur convergent-divergent. Le principe de base du fonctionnement est bien sûr le même que précédemment : l'entraînement du flux secondaire se fait toujours par échange de quantité de mouvement jusqu'à l'obtention d'une veine de vitesse pratiquement uniforme et en général supersonique. L'énergie cinétique de cette veine se transforme de façon quasi isentropique en pression dans le convergent supersonique qui réduit la vitesse jusqu'à un nombre de Mach voisin de l'unité au col, puis dans le diffuseur final subsonique.

Ce type de géométrie permet de réduire la longueur de l'éjecteur, diminue les pertes par frottement et donc améliore le rendement tout en repoussant la limite de désamorçage (Figure I .3).

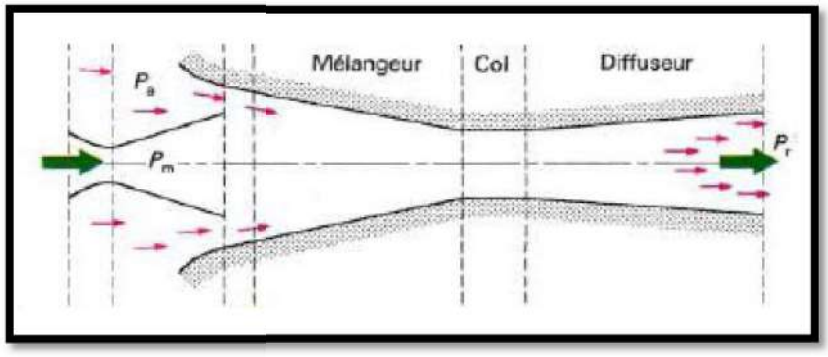


Figure 1.3 : Schéma de principe d'un éjecteur à gaz avec mélangeur convergent-divergent.

I.5/Différents type d'éjecteur

Nous allons maintenant passer en revue les différents types d'éjecteurs compte tenu des trois sources motrices indiquées dans le tableau (I. 1): jet liquide, jet de gaz et jet de vapeur, en faisant référence à divers travaux théoriques, en indiquant le champ d'applications et en donnant autant que possible des caractéristiques numériques**[5].**

Tableau I .1: les différents types d'éjecteurs **[7].**

fluide moteur (A) **fluide aspiré (B)**	**à jet de gaz**	**à jet de vapeur**	**à jet de liquide**
compresseur	compresseur de (gaz) à jet de gaz	compresseur de (vapeur) à jet de vapeur (thermo compresseur)	compresseur de (gaz) à jet liquide
pompe à vide	pompe à vide (gaz) à jet de gaz	pompe à vide (gaz) à jet de vapeur	pompe à vide (gaz) à jet de liquide
pompe à liquide	-------	pompe à liquide à jet de vapeur	pompe à liquide à jet de liquide
pompe à solide	-------	---------	pompe à solide à jet de liquide
réchauffeur	----------	réchauffeur de liquide à jet de vapeur **En ligne ou dans la capacité**	----------

I.5.1/éjecteur à jet liquide.

I.5.1.1/compresseurs à jet liquide.

Ce sont des appareils destinés à extraire et comprimer des gaz tout en les mélangeant au fluide moteur qui est dispersé en fines gouttelettes à la sortie de la tuyère primaire pour obtenir un meilleur brassage des deux flux. La figure (I.4) montre la relation qui existe entre la capacité d'aspiration, la compression ΔPet la pression effective ΔP1 du fluide moteur.

Un exemple typique d'application de ce type d'éjecteur est le mélange liquide-gaz avec une compression d'ozone pour le traite- ment de l'eau.

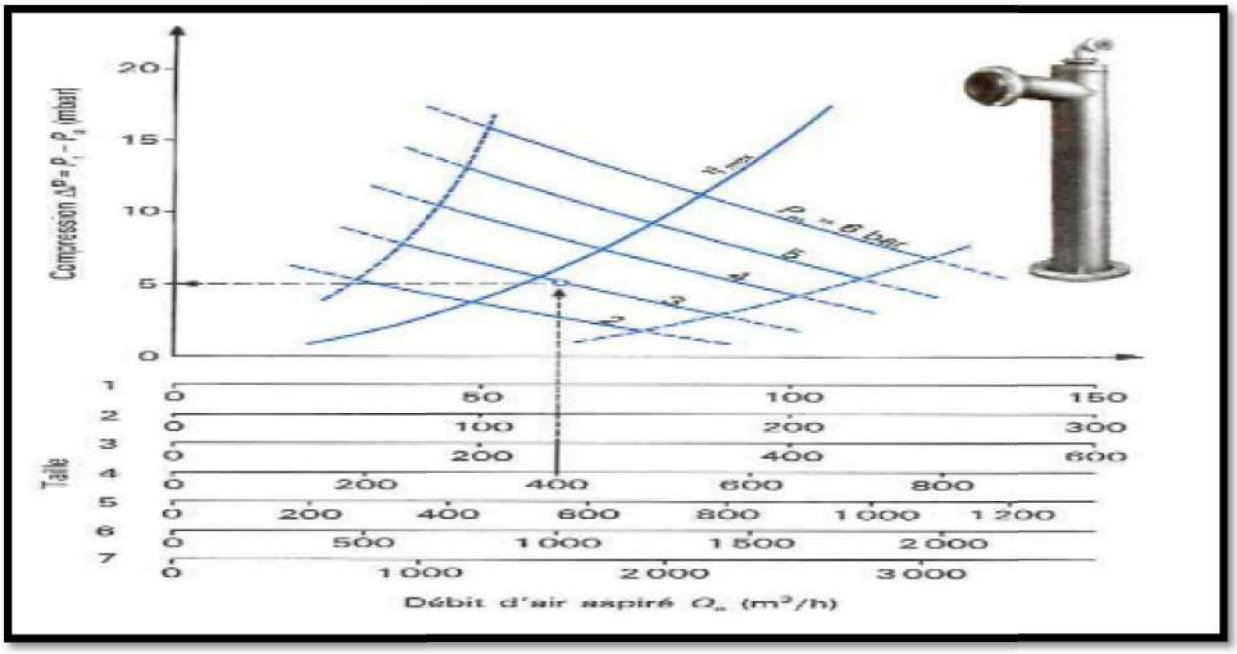


Figure I.4 : Diagramme de définition d'un compresseur à jet liquide.

I.5.1.2/ Pompes à vide à jet liquide :

Dans ces appareils, le fluide moteur est la plupart du temps de l'eau qui peut être facilement recyclée. La pression minimale accessible à débit aspiré nul correspond à la pression de vapeur saturante du liquide moteur et dépend donc de la température. Par exemple, pour de l'eau à 20 oc, la pression limite est voisine de 23 mbar tandis qu'à 10 oC cette pression s'abaisse à 12 mbar environ. Il faut noter que ce type d'appareil fonctionne dans les meilleures conditions lorsque le tuyau de refoulement plonge au-dessous du liquide comme le montre la figure (1.8).

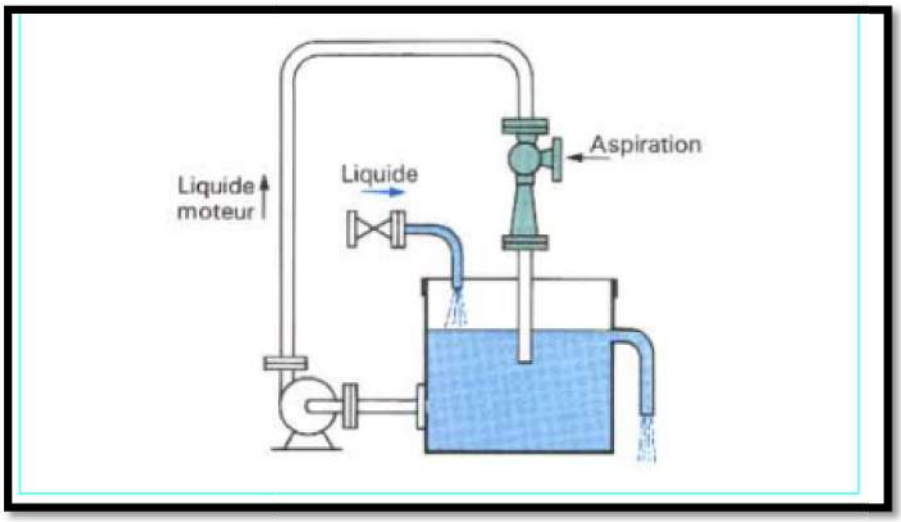


Figure I.5 : Schéma d'implantation d'une pompe à vide à jet liquide.

I.5.1.3/Pompes à liquide à jet liquide :

Ces appareils ont pour principales applications :

- **extraire et mélanger deux liquides.** Ils sont surtout utilisés à ce titre dans la dilution des acides ou des bases jusqu'à obtention de la concentration souhaitée, comme dans le cas du traitement des eaux (figure I.6).

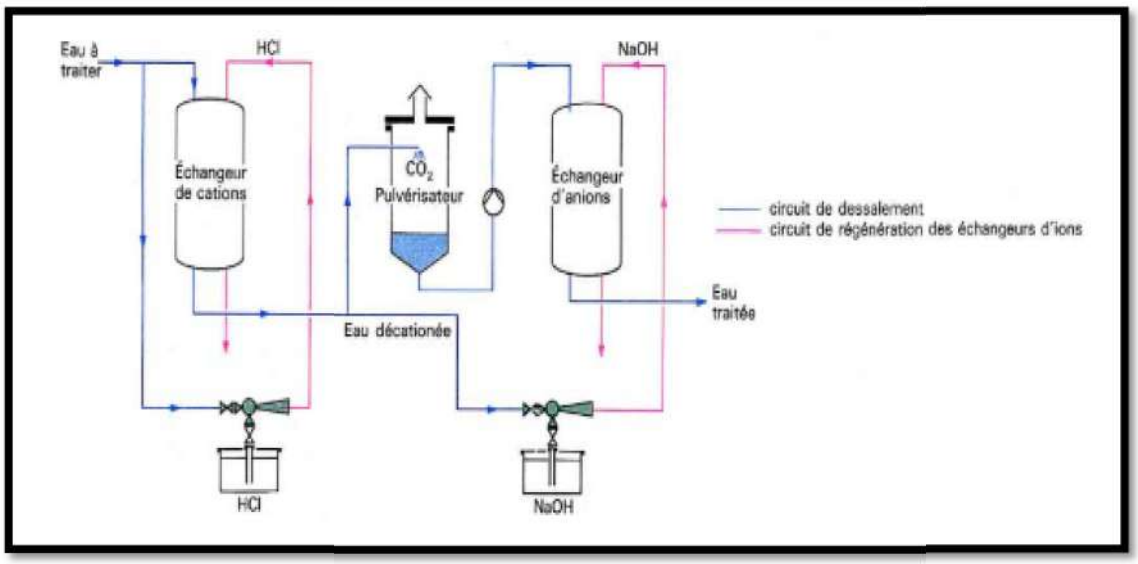


Figure I.6 : Schéma d'implantation de pompes à liquide à jet d'eau dans une installation de dessalement.

Ils peuvent être également utilisés au brassage de liquides dont la viscosité est voisine de celle compatible avec l'utilisation de pompes rotatives ; dans ce cas, ils sont placés à l'intérieur de réservoirs où bacs de stockage. La figure (I.7) donne le diagramme de définition d'un mélangeur à jet liquide, ainsi que l'installation de ces mélangeurs sur un bac de neutralisation

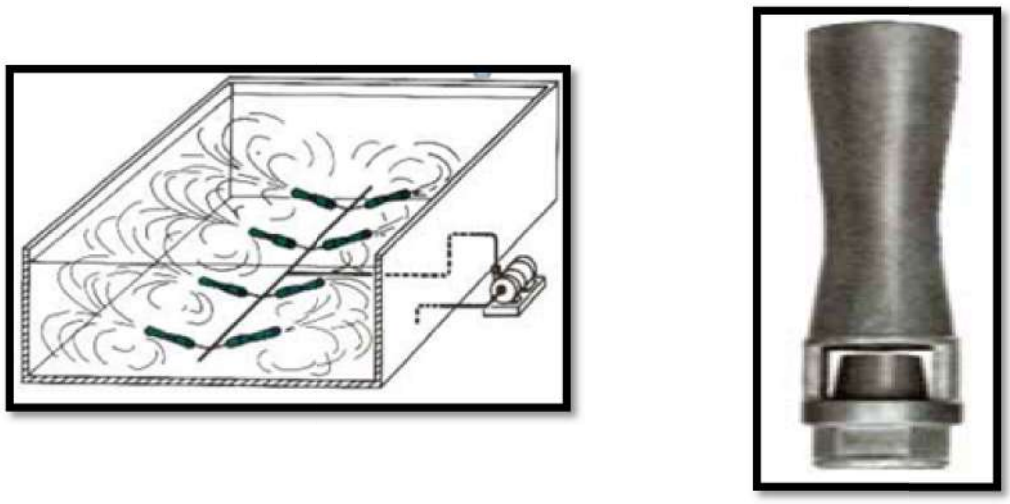


Figure I.7 : Schéma d'installation de mélangeurs à jet liquide sur un bac.

- **élever la pression à l'aspiration d'une pompe rotative pour éviter sa cavitation**. Ils peuvent ainsi en association avec une pompe centrifuge être utilisés dans les installations à aspiration profonde et faibles débits comme par exemple certaines installations domestiques alimentées à partir d'un puits ; ce sont des pompes dites à pied éjecteur dont la figure I.8 montre le schéma d'implantation. Cette combinaison est parfois aussi employée pour les pompes d'alimentation de fusées à propergol liquide.

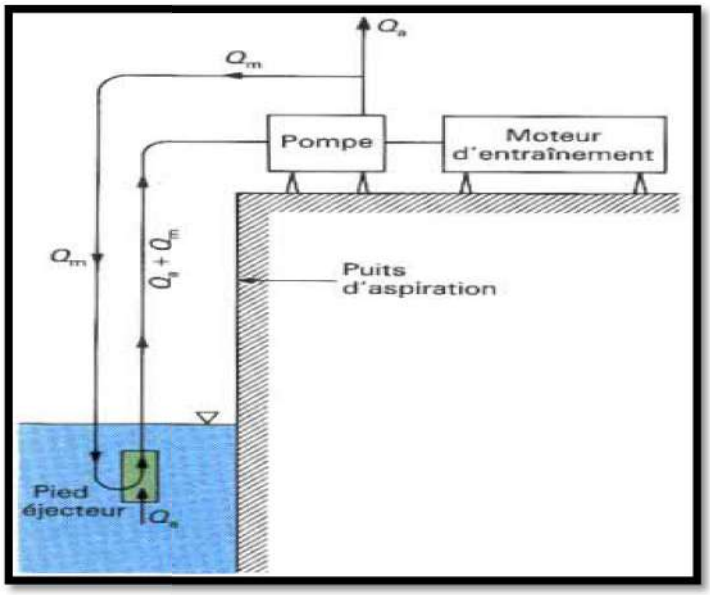


Figure I.8 : Schéma d'implantation d'une pompe à pied éjecteur (cas classique).

- **D'une manière plus générale, aspirer un liquide ou le refouler à un niveau de pression désiré.**

De telles applications se trouvent dans :

- la production d'engrais où les pompes à liquide assurent le transfert et le mélange dans les phases de réaction ;
- la production de polyester à l'aide d'éjecteurs à jet de glycol.
- la vidange de condenseurs de turbines à vapeur.
- le pompage des cales de navire ou le déballastage, etc.

I.5.1.4/Pompes à solides à jet liquide :

Ces pompes à jet ont pour but de transporter des produits granulés d'environ 1 à 1,5 mm de diamètre en forme de billes à surface lisse et ne s'agglomérant pas. Pour que les

produits solides alimentent de façon continue l'éjecteur, ils sont en permanence arrosés par une eau de rinçage.

Ce type d'appareil est utilisé :

- pour extraire du sable ou du gravier, du charbon actif ou des résines échangeuses d'ions.

- pour vider les réacteurs dans les installations de décarbo- natation et de désacidification de l'eau.
- pour mélanger les précipitant dans le traitement de l'eau sale et de l'eau résiduaire.

À titre indicatif, le débit moteur doit être 3 à 5 fois plus grand que le débit de matière à transporter et la pression motrice doit être 2,5 à 3 fois plus grande que la hauteur d'élévation souhaitée, cela pour des conditions normales quant au matériau à véhiculer.

I.5.2/ Éjecteurs à jet de gaz.

Dans ces éjecteurs, le fluide moteur est généralement de l'air accéléré dans une tuyère primaire qui peut être simplement convergente ou convergente-divergente lorsque l'on recherche des performances élevées comme c'est généralement le cas. Le fluide secondaire est également la plupart du temps gazeux mais peut aussi être liquide ou même solide **[8].**

I.5.2.1/ Compresseurs à jet de gaz.

Ces appareils sont voisins des précédents mais permettent des taux de compression plus élevés ($\Delta p > 500$mbar) Parmi les exemples intéressants d'utilisation, citons :

- L'aspiration et le mélange de gaz naturel et de gaz provenant de stockages souterrains
- l'aspiration et le refoulement de gaz chauds de raffinerie à la pression atmosphérique à l'aide de gaz de process.
- la mise sous vide d'une conduite d'aspiration de pompe ou l'amorçage d'un siphon l'élévation d'un liquide ;
- le prélèvement d'échantillons dans l'industrie nucléaire.

I.5.2.2/Pompes à vide à jet de gaz.

Ces pompes utilisent l'air atmosphérique comme fluide moteur et sont généralement reliées à une pompe à anneau liquide comme le montre la figure(I.9). On obtient ainsi un vide intermédiaire de 50 à 100 mbar et une pression d'aspiration de l'éjecteur entre 40 et 5 mbar.

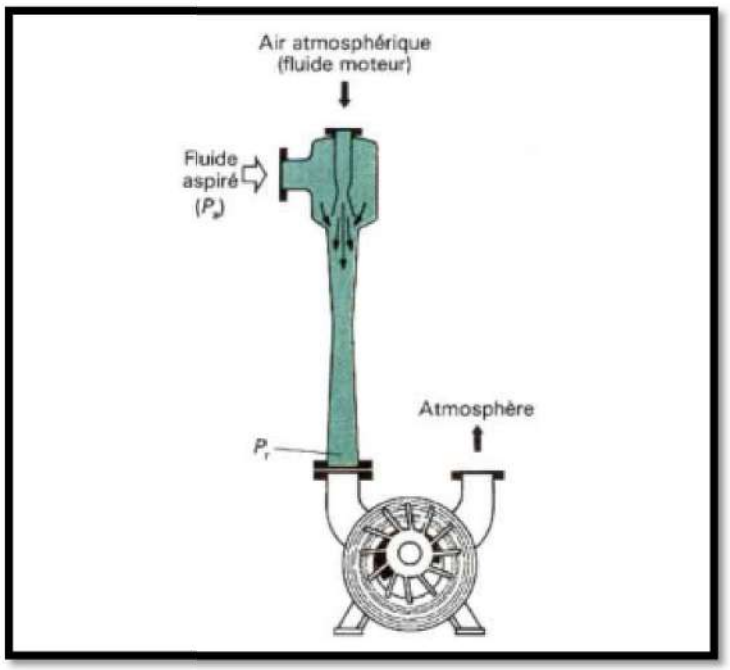


Figure I.9 : Ensemble pompe à jet d'air/pompe à anneau liquide.

Cette solution est utilisée lorsqu'on ne dispose pas de vapeur comme flux moteur et lorsque le débit aspiré est assez faible comme l'indique la (*I.10*) qui précise le diagramme de définition.

Le champ d'application est voisin de celui des appareils précédents et dépend surtout des performances recherchées ; on peut y ajouter :

- la réalisation de bancs d'essais en altitude simulée des moteurs aéronautiques ou des moteurs fusée.
- la réalisation de souffleries à induction.
- les statofusées.

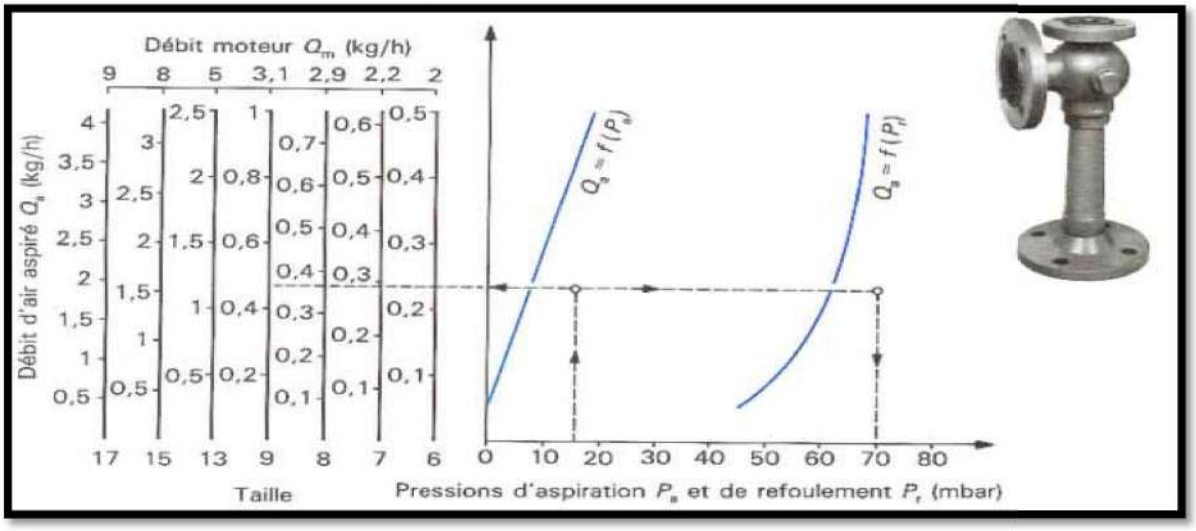


Figure I.10 : Diagramme de définition de pompes à vide à jet d'air.

Dans certaines applications, il faut utiliser des éjecteurs montés en cascade pour obtenir les conditions désirées ; dans cette configuration, le débit moteur d'un étage autre que le dernier doit être repris par l'étage qui lui fait suite de telle sorte que la consommation totale du fluide moteur rapportée au débit aspiré utile est très élevée. On peut toutefois faire mieux si l'on dispose de vapeur.

I.5.2.3 /Pompes à liquide à jet de gaz.

Nous n'avons connaissance d'aucune réalisation industrielle dans ce domaine.

I.5.2.4/ Pompes à solides à jet de gaz.

La seule réalisation à notre connaissance est l'Aspirojet.de conception Bertin, alimenté en air comprimé et qui peut aspirer 3 t/h de sable pour un débit d'air de 5 m 3/min.

I.5.3/Éjecteurs à jet de vapeur.

Ce sont les plus répandus aussi bien sous la forme d'éjecteurs simples que d'éjecteurs en cascade. À titre indicatif.

L'intérêt des éjecteurs à jet de vapeur devient marquant dans le cas des éjecteurs multiples avec condenseurs intermédiaires qui permettent d'accéder à des rapports de compression plus grands pour un même taux d'entraînement massique. Avec deux étages, l'adjonction d'un condenseur conduit en effet à un rapport de compression sensiblement double de celui réalisé sans condenseur. Avec trois étages et deux condenseurs intermédiaires, la pression d'aspiration du premier étage peut être abaissée jusqu'à environ 10 mbar pour un

rapport d'entraînement égal à 1/10 ; la température de l'eau de refroidissement du condenseur doit toutefois être dans ce cas inférieure à 20 c° et la pureté de cette eau contrôlée **[8].**

I.5.3.1/Compresseurs à jet de vapeur.

Ces appareils sont aussi appelés **thermo compresseurs** car ils sont généralement utilisés pour comprimer de la vapeur, le flux primaire étant supersonique. De ce fait, ils ont la possibilité d'extraire des volumes importants de vapeur sous vide. Il faut toutefois que l'appareil soit bien adapté aux conditions d'utilisation sous peine de mauvais rendement et même de non-fonctionnement ; mais une telle adaptation est possible par modification manuelle ou automatique de la pression motrice, ou par variation de section de la tuyère motrice **[9].**

I.5.3.2/Pompes à vide à jet de vapeur.

En configuration mono étagé, ce type d'éjecteur, refoulant à l'atmosphère, permet d'atteindre une pression d'aspiration de l'ordre de 100 mbar. Si on recherche des pressions plus basses, on utilise alors des éjecteurs multi étagés avec ou sans condenseurs intermédiaires

.Les applications des éjecteurs mono étagés sont nombreuses et concernent :

- la mise sous vide de conduites de pompes non autoamor- çantes ;
- la mise sous vide de filtres ;
- l'élévation de liquides ;
- la mise sous vide de condenseurs de turbines à vapeur pendant la première phase de mise en service visant à l'obtention d'un vide partiel.
- l'étanchéité aux garnitures et les fuites aux soupapes de certaines turbines à vapeur .
- la production de vide dans des récipients à agitateur pour des procédés discontinus
- le dégazage lors de la fabrication de l'acier.

Ce type d'éjecteur étant largement utilisé en configurations multi-étages avec plus ou moins de condenseurs intermédiaires, un grand nombre de combinaisons sont possibles et il existe un grand éventail de solutions pour résoudre un problème donné. La figure (I.11) en montre deux exemples de réalisation.

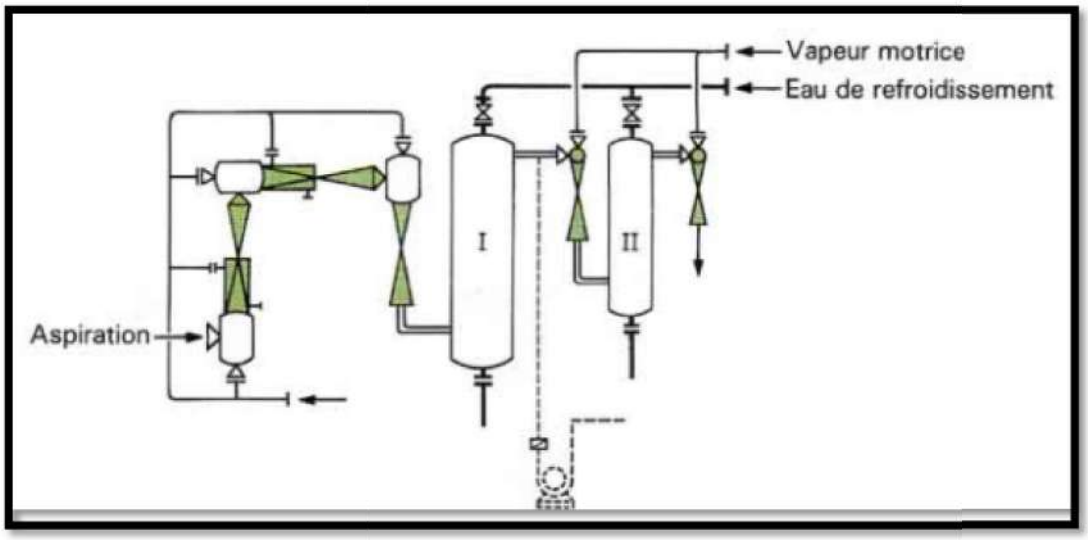


Figure I.11 : Exemples d'éjecteurs à jet de vapeur à plusieurs étages.

I.5.3.3/ Éjecteurs/réchauffeurs à liquide à jet de vapeur.

Ces appareils ont pour but d'aspirer des liquides dont la température ne doit pas être trop élevée (de l'ordre de 50 à 60 c° au maximum) car, pour que la totalité de l'énergie motrice soit utilisée pour l'extraction du liquide, il faut que la vapeur motrice se condense et donc disparaisse en volume. Ces éjecteurs sont autoamorçants car ils fonctionnent d'abord en pompe à vide et vident ainsi la conduite d'aspiration.

Le domaine d'application est surtout orienté vers l'extraction et l'élévation de liquides surtout lorsqu'on vise simultanément à les réchauffer. Ces éjecteurs sont donc employés pour véhiculer : des eaux usées, des vinasses ou des moûts, pour la vidange des cales de navires, et également dans l'industrie nucléaire pour le transport de liquides agressifs et radioactifs dans les zones contaminées et souvent inaccessibles.

Concernant ce même type d'éjecteur, citons les réchauffeurs à jet de vapeur dont la figure(I.12) indique un schéma de principe. La buse de condensation est percée de trous pour le passage de la vapeur, ce qui la met directement en contact avec le liquide à réchauffer.
Ce contact se produit dans une zone où le liquide atteint sa plus grande vitesse donc à l'endroit où sa pression est la plus basse et la turbulence la plus forte. Ces réchauffeurs sont utilisés pour le réchauffage non bruyant de liquides comme ceux employés pour le rinçage des fûts de malterie, le décapage et la coloration des peaux, etc. Comme ils sont parfois montés à l'intérieur du réservoir contenant le liquide à réchauffer, leur implantation a une certaine

influence sur les performances possibles. En fait, il existe sur le marché une grande variété de réchauffeurs permettant d'obtenir une différence de température pouvant atteindre 90 c°.

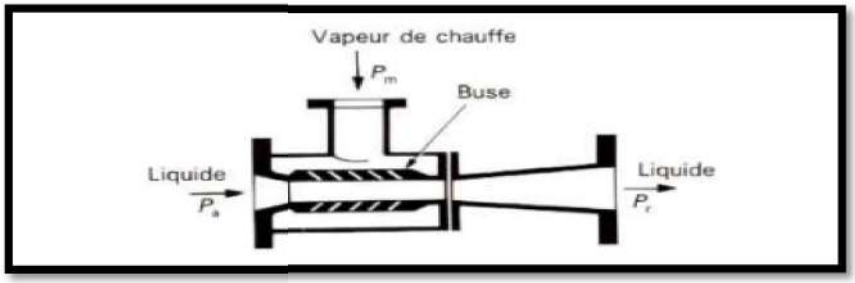


Figure I.12 : Schéma de principe d'un éjecteur/réchauffeur à jet de vapeur.

I.5.3.4/ Éjecteurs à solides à jet de vapeur.

Nous n'avons pas trouvé d'exemple d'un tel appareil. Les besoins potentiels faisant plutôt appel à l'eau comme liquide de rinçage et se situant plutôt sur les chantiers en extérieur, il est clair que l'on préfère alors l'eau à la vapeur comme fluide moteur.

I.6/Généralités sur les systèmes de réfrigération à éjecteur :

L'éjecteur, qui est le cœur du système de réfrigération à jet, a été inventé par « Charles Parsons » en 1901 pour enlever l'air d'un condenseur de la machine à vapeur. En 1910, un éjecteur a été employé par Maurice Leblanc dans le premier système de réfrigération à éjecteur utilisant la vapeur d'eau. Le système de réfrigération est composé de deux sous-systèmes : le sous-système solaire et le sous-système de réfrigération à éjecteur (fig. I.13). Le sous-système solaire a pour but de convertir l'énergie solaire en énergie thermique, et le sous-système de réfrigération à éjecteur a pour but la production de froid. Les deux sous-systèmes sont connectés par un échangeur de chaleur qui est le générateur de vapeur du cycle de réfrigération **[10].**

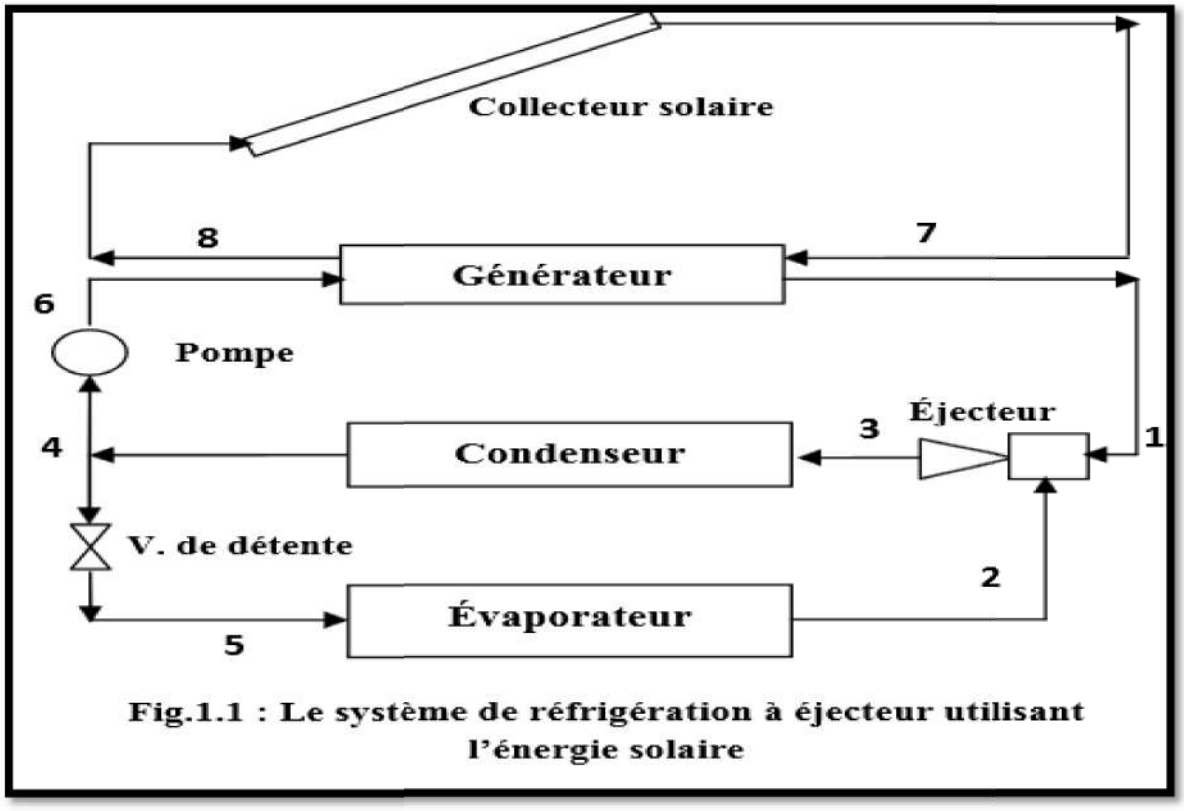


Figure I.13 : le système de réfrigération à éjecteur utilisant l'énergie solaire.

I .7/Le fluide frigorigène utilisé dans les cycles à éjecteur.

La performance de la machine frigorifique à éjecteur dépende directement de fluide frigorifique utilisé **[5].**

Les fluides frigorigènes utilisés peuvent être classes comme des fluides avec vapeur sèche. (R113 isobutane), ou avec vapeur humide (l'ammoniac, l'eau, R22, R142b).

I .8/Etat de l'art :

L'éjecteur qui est le cœur du système de réfrigération à éjecteur, a été inventé par Charles par sons en 1901 **[11],** pour éliminer l'air de condenseur de la machine à vapeur .En 1910, Maurice Leblanc l'emploi pour la première fois dans un système de réfrigération à jet de vapeur. Au commencement ,la conception d'éjecteur était principalement basée sur des expérience, jusqu'à(1950) quand Renan et al **[12,13]**, on publié l'une des premières théories analytique de calcul performance des éjecteurs ,d'écoulement isentropique monodimensionnel ,employé couramment pour prévoir les propriétés du fluide de long de l'axe de l'éjecteur basée sur des équations thermodynamique des gaz parfait et les lois de conservation de la masse, et de l'énergie, ignorant les pertes dues au transfert et un frottement de chaleur, elle

était accompagnée d'un étude expérimental .Stocker (1958) **[12,13]** a proposée une des premières méthodes de conception itérative d'éjecteur impliquant des donnés des propriétés prises des tables de vapeur.

I.8.1/L'influence des conditions opératoires:

Chunnanond et, (2004) ; Sriveerakul et autres, 2007 **[14 ,15,16,17]** ont montrés que la performance d'un éjecteur supersonique représenté par le COP (coefficient de performance pratique) décroit avec la montée de la température (et la pression) au générateur ou par la diminution de la température (et la pression) à l'évaporateur, ou par la montée de la température de changement de phase (et la pression) au condenseur .et que l'évolution du rapport d'entrainement suit celle du COP (coefficient de performance pratique).

a)L'effet de la température et de la pression du condenseur :

Eames et al **[14]**, Aphornratana et Eames (1997) **[14]**, Chunnanond et Aphornratana (2004) **[13, 15,16]** ont suggéré que le rapport d'entrainement est limité par une pression critique au condenseur (à la sortie de l'éjecteur). Cette pression critique dépend des conditions opératoires.

Eames et al **[14]** ont effectué une étude dans laquelle ils présentent l'évolution du rapport d'entrainement en fonction de la pression critique de condensation. Lis ont suggéré que le fonctionnement d'un éjecteur peut être divisé en trois modes :

• Le mode critique ou double étranglement : ($Pc<Pc^*$) pour des pressions de condensation (Pc) inférieures à la pression critique de condensation (Pc^*), le rapport d'entrainement garde la même valeur constante, les fluides primaire et secondaire sont étranglés.

• Le mode subcritique : ($Pc^*<Pc<Pc0$) pour des pressions de condensation

(Pc) serrés entre la pression critique (Pc^*) et la pression (Pc0), la valeur du rapport d'entrainement diminue avec l'augmentation de la pression de condensation, seul le fluide primaire est étranglé.

• Le mode du mal fonctionnement ou le mode de retour de fluide :($Pc>Pc0$), pour des pressions de condensation (Pc) supérieures à une pression (Pc0), le rapport d'entrainement a une valeur négative, les deux fluides ne sont pas étranglés. Ces résultats ont été confirmés par Chunnanond et Aphornratana (2004) **[14, 15]** expérimentalement. Ils ont montré que la pression critique de condensation augmente avec l'augmentation de la température du générateur, et l'augmentation de cette pression réduit le coefficient de performance (COP) du cycle.

b) L'effet de la température et de la pression du générateur :

Par une étude expérimentale Sun et al **[18]** ont montré qu'il existe une température optimale du générateur qui maximise le COP (coefficient de performance pratique) pour chaque température de l'évaporateur.

Chunnanond et Aphornratana **[19, 14, 15]** Disent que l'augmentation du débit du fluide secondaire ou la diminution du débit du fluide primaire, implique une réduction d'angle d'expansion du fluide primaire dans la chambre de mélange, par conséquent la position de l'étranglement du fluide secondaire recule vers la sortie de l'éjecteur **[20]**.

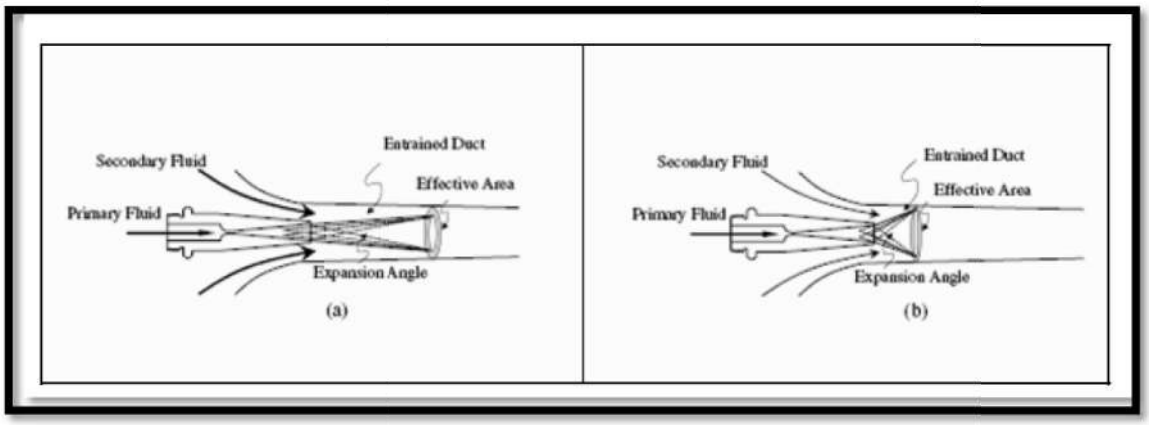


Figure I.14 : l'effet des conditions opératoires sur le processus d'entrainement et du mélange dans la chambre de mélange **[14].**

Aidoun et Ouzzane **[20]** ont fait une étude sur l'influence de la température du générateur sur du mélange des deux fluides (fluide primaire et le fluide secondaire) où ils ont constaté que l'augmentation de la pression du fluide à la sortie de tuyère primaire, (ce qui diminue la force d'entrainement pour l'aspiration du fluide secondaire) provoque une diminution du COP (coefficient de performance pratique) du système.

c)L'effet de la température et de la pression de l'évaporateur :

Chunnanond K. et Aphornratana S. **[14,15]** et Aphornratana S. **[21]** ont analysé l'influence de la température de l'évaporateur sur la performance du cycle de réfrigération à éjecteur. Quand la pression (ou la température) de l'évaporateur augmente, le COP du système et la pression critique de la condensation augmentent.

I.9/ Conclusion.

Dans ce chapitre nous avons exposé les éjecteurs et leurs caractéristiques technique et géométrique (mélangeur cylindrique, mélangeur converge-diverge) et suivant son fonctionnement ou bien la nature des fluides (liquide, gaz ou vapeur) entrons dans la chambre d'aspiration et le tuyau primaire ainsi que leurs utilisations. Dans cette mémoire nous proposant une étude numérique de l'écoulement turbulent conjugué dans un éjecteur incorporé dans une installation frigorifique dans l'objectif de comprendre et par suite améliorer la performance de l'éjecteur dans ces conditions de fonctionnement.

Modèles physiques et mathématiques

II.1/ Introduction :

Dans ce chapitre l'objectif est de présenter la formulation mathématique du problème. Nous commencerons par des définitions concernant l'écoulement, suivi d'une description du système considéré, d'une présentation du domaine d'étude, et enfin d'un bref rappel des équations générales régissant l'écoulement compressible.

II.2/ Équations et modèles mathématiques des écoulements dans ces dispositifs:

Toute la CFD (Computationnel fluide Dynamics), sous une forme ou sous une autre, est fondé sur les principes régissant les équations de la dynamique des fluides: les équations de la continuité, de la quantité de mouvement et de l'énergie.

Ces équations parlent de physique. Ce sont les énoncés mathématiques de trois principes de la physique fondamentale à partir desquels toute la dynamique des fluides est basée:

1. La masse est conservée.
2. Deuxième loi de Newton, F = ma.
3. L'énergie est conservée **[4].**

II.3/ Modélisation de L'écoulement des Fluides :

Tous les problèmes de CFD sont bases sur les lois fondamentales de mécanique des fluides qui sont **[22] :**

II.3.1/ Equation de Navier-Stokes :

La mécanique des fluides est régie au plan macroscopique par les équations de Navier-Stokes issues des principes de conservation habituels de la mécanique : conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Dans le contexte aérodynamique et du vent à basse altitude, ces équations se simplifient **[23]** :

- les vitesses rencontrées sont largement inférieures à la vitesse du son et la masse volumique de l'air est supposée constante. C'est l'hypothèse d'incompressibilité ;
- la température de l'air est constante ;
- l'air est un gaz léger dont le poids propre est négligé devant les autres forces.

Ces équations sont complétées par une loi de comportement du fluide. L'air sera considéré comme un fluide newtonien. Cette loi de comportement suppose une relation linéaire entre les contraintes de cisaillement et le gradient de vitesse, via la viscosité m qui

traduit les effets de frottement interne au fluide. Toutes ces hypothèses permettent d'obtenir les équations de l'aérodynamique basse vitesse.

Les équations de Navier-Stokes sont réduites alors à l'équation de continuité et de la quantité de mouvement **[23].**

$$\vec{\nabla}.\vec{v}=0 \qquad \textbf{(II-1)}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{v}\,.\vec{\nabla}\,)\vec{v} = -\frac{1}{\rho}\,\vec{\nabla}\,\mathrm{p} + \upsilon\,\nabla^2\,\bar{v} + \vec{f} \qquad \textbf{(II-2)}$$

Où $\boldsymbol{u}$ est la vitesse, *p* la pression, r la masse volumique, *f* l'accélération due aux forces de volume et de surface et *t* le temps. Ce système d'équations aux dérivées partielles doit être muni de conditions aux limites, notamment sur les parois solides, et initiales **[23].**

L'équation de quantité de mouvement est l'équivalent de la relation fondamentale de la dynamique (aussi appelée seconde loi de Newton) **[2] :**

$$\sum \vec{F} = \mathrm{m}\vec{a}$$

Dans cette formule, on voit apparaître trois types de forces :

- Les forces de pression, spécifique de la mécanique des fluides.

Les forces de viscosité. Notez que le second terme contenant la viscosité de volume disparait si le fluide est incompressible **[2].**

II.3.2/Equation de continuité :

Cette équation concerne le principe de conservation de la masse dans un élément. Elle exprime l'égalité de la variation de la masse d'élément et de la déférence entre la quantité de fluide qui entre la quantité de fluide pendant le même temps **[3] :**

$$\frac{\partial Ui}{\partial Xi} = 0 \qquad \textbf{(II-3)}$$

II.3.3/La décomposition de Reynolds :

L'utilisation de la décomposition de Reynolds se justifie lorsqu'on a affaire à un phénomène présentant un spectre séparé en deux parties nettement distinctes: une bande de basses fréquences ou de régime quasi permanent, de contribution moyenne sinon constante, du moins variant peu au cours du temps, nettement séparée d'une bande de régimes transitoires de haute fréquence et de contribution moyenne nulle. Ainsi **[24]** :

$$\mathrm{U} = \overline{u_i} + u_i \qquad \mathrm{p} = \overline{P} + \mathrm{p} \qquad \textbf{(II-4)}$$

Où la barre au-dessus du *u* signale la moyenne glissante sur l'échelle choisie, l'apostrophe sur le *u* signale le terme d'écart par rapport à cette moyenne. Il ne s'agit pas forcément d'une perturbation. Cet artifice permet de découpler le problème du flux de base soumis à la viscosité turbulente, du problème de la turbulence elle-même **[25].**

Après avoir introduise la décomposition de **Reynolds** on écrit finalement :

$$\frac{\partial \overline{ui}}{\partial t} + Uj\frac{\partial Ui}{\partial xj} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \vec{p}}{\partial xi} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial xj}(\vec{\tau}_{ij} + R_{ij}) \qquad \textbf{(II-5)}$$

L'effet de la moyenne engendre bien entendu une perte d'information, caractérisée ici Pa r l'apparition d'une corrélation inconnue $\overline{UiUj}$ appelé tenseur de Reynolds. La condition d'incompressibilité implique :

$$Ui\ \frac{\overline{\partial u_i}}{\partial xj} = \frac{\overline{\partial ui\ u\ i}}{\partial xj} \qquad \textbf{(II-6)}$$

Les tensions de Reynolds ou les contraintes de Reynolds $\overline{UiU}$j peuvent être s'écrit sous la forme suivante :

$$[R_{ij}] = -\rho\begin{bmatrix}\overline{UU} & \overline{VU} & \overline{UW}\\ UV & VV & VW\\ \overline{UW} & \overline{VW} & \overline{WW}\end{bmatrix} \qquad \textbf{(II-7)}$$

Ou $[\tau_i]$ est le tenseur des contraintes visqueuse, défini par :

$$[\tau_{ij}] = r\left[\frac{\partial \bar{U}i}{\partial xj} + \frac{\partial Uj}{\partial xi}\right] \qquad \textbf{(II-8)}$$

Avec :

$$\frac{\partial \tau ij}{\partial xij} = r\frac{\partial^2 \bar{U}i}{\partial xj\partial xj}\left[\frac{\partial \bar{U}i}{\partial xj} + \frac{\partial Uj}{\partial xi}\right] \qquad \textbf{(II-9)}$$

II.3.4/Equation de transport des tensions de Reynolds [22] :

Les équations de transport sont de la forme générale : $R_{ij}=\overline{UiUj}$

$\frac{d\varphi}{dt}$ =Production+ diffusion –dissipation+sources additionnelles

Où $\frac{d}{dt}$: représente la dérivée particulaire (rappelons que $\frac{d\varphi}{dt}=\frac{\partial\varphi}{\partial t} + U_J\frac{\partial\varphi}{\partial xj}$) Les équations de départ sont les équations (II.3) et (II.4) dans lesquelles on a introduit l'équation (II.5) et (II.6). On part de l'équation de :

$$\frac{\partial(\bar{u}iui)}{\partial t} + (\bar{U}_I + U_K)\ \frac{\partial(\bar{u}iui)}{\partial xk} = -\frac{1}{\rho}\ \frac{\partial(\overrightarrow{p+p})}{\partial xi} + v\frac{\partial^2(ui+ui)}{\partial xk\partial xk} \qquad \textbf{(II-10)}$$

On fait la différence (II.12)-(II.31) en tendent compte de (II.5) :

$$\frac{\partial ui}{\partial t} + \bar{u}_k\ \frac{\partial Ui}{\partial xk} + U_K\frac{\partial Ui}{\partial xk} + \frac{\partial(Uk\,Ui-\overline{UkUi})}{\partial xj} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial xi} + v\frac{\partial 2ui}{\partial xk\partial xk} \qquad \textbf{(II-11)}$$

On peut écrire (II.12) pour l'indice j :

$$\frac{\partial uj}{\partial t} + \bar{u}_k\ \frac{\partial Uj}{\partial xk} + U_K\frac{\partial Uj}{\partial xk} + \frac{\partial(Uk\,Ui-\overline{UkUi})}{\partial xj} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial xj} + v\frac{\partial 2uj}{\partial xk\partial xk} \qquad \textbf{(II-12)}$$

On multiple (II-12) par $U_{J\ et}$ (II-31) par U_i et on somme les deux équations obtenus. En regroupant certains termes, il vient :

$$\frac{\partial uj}{\partial t} + U_K\frac{\partial Rij}{\partial xk} = -R_{i\,k}\frac{\partial\overline{Uj}}{\partial xk} - R_{j\,k}\frac{\partial\overline{Ui}}{\partial xk} + \frac{P}{\rho}\left(\frac{\partial Ui}{\partial xj} + \frac{\partial Ui}{\partial xi}\right) - \frac{\partial}{\partial xk}\left(\overline{Ui\,Uj\,UK}\right) - \frac{\partial}{\partial xk}\left[\frac{\overline{p}}{\rho}\left(\frac{\partial Ui}{\partial xj} + \frac{\partial Uj}{\partial xi}\right)\right]$$

$$-2v\frac{\partial Ui}{\partial xk}\frac{\partial Uj}{\partial xk} + v\frac{\partial 2\,Rij}{\partial xk\partial xk} \qquad \textbf{(II-13)}$$

Cette équation fait apparaitre au second membre plusieurs contributions : les deux premiers termes traduisent l`action des gradients de vitesse moyenne sur le champ turbulent et représentent la production des tensions de Reynolds (son signe peut dans certain cas être négatif). Le terme de corrélation pression-déformation s`annule par contraction et réalise donc une redistribution d`énergie sur les composantes des tenseurs de Reynolds.

Schématiquement on écrira :

$$\frac{\partial Rij}{\partial t} + \bar{u}_k\ \frac{\partial Rj}{\partial xk} = P_{ij} + Tij + D_{ij} - \varepsilon_{ij} + v\frac{\partial 2\,Rij}{\partial xk\partial xk} \qquad \textbf{(II-14)}$$

Tij: Transport diffusif du à la fluctuation de vitesse et aux fluctuations de pression.

P_{ij} : production.

ε_{ij}: Dissipation visqueuse (car il constitue un puits du a la viscosité' moléculaire).

D_{ij}: Diffusion visqueuse.

L'équation (II.12) est appelée équation de tension de Reynolds ou équation des corrélations doubles

$$R_{ij} = \overline{Ui\,Uj} \qquad \textbf{(II-15)}$$

II .3.5/Equation de l'énergie cinétique turbulente [26] :

En contractant les indices dans le système précédent, on obtient une équation de transport pour l'énergie cinétique turbulent.

$$K=\frac{1}{2}\overline{u_\iota u_\iota} \qquad \textbf{(II-16)}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t}+U_j\frac{\partial k}{\partial x_j}=-\overline{\acute{u}_\iota \acute{u}_k}\frac{\partial ui}{\partial xk}-\frac{1}{2}\frac{\partial \overline{\acute{u}_\iota \acute{u}_\iota \acute{u}_k}}{\partial x_k}-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{\acute{u}_k \acute{p}'}}{\partial x_k}+\nu\frac{\partial^2 k}{\partial x_k \partial x_k}-\nu\overline{\frac{\partial \acute{u}_\iota}{\partial x_k}\frac{\partial \acute{u}_\iota}{\partial x_k}} \qquad \textbf{(II-17)}$$

- $\mathcal{P}_k=-\overline{\acute{u}_\iota \acute{u}_k}\frac{\partial ui}{\partial xk}$: appelé production turbulente. Il caractérise les échanges d'énergie par interaction avec le mouvement moyen. Ce terme est positif comme on le verra par la suite. Il représente de l'énergie cédée par le mouvement moyen au mouvement turbulent.
- $\mathcal{T}_k=-\frac{1}{2}\frac{\partial \overline{\acute{u}_i \acute{u}_i \acute{u}_k}}{\partial x_k}$: Transport turbulent ou diffusion turbulente par les fluctuations de vitesse.
- $\Pi_k=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{\acute{u}_k \acute{p}'}}{\partial x_k}$: transfert d'énergie par l'interaction pression vitesse fluctuantes.
- $\mathcal{D}_k=\nu\frac{\partial^2 k}{\partial x_k \partial x_k}$: Diffusion visqueuse de l'énergie cinétique turbulente par la viscosité.
- $\varepsilon_k=-\nu\overline{\frac{\partial \acute{u}_i}{\partial x_k}\frac{\partial \acute{u}_i}{\partial x_k}}$: dissipation de l'énergie turbulente sous forme de chaleur. Ce terme constitue un puits dans l'équation de *k* et conduit donc toujours à une décroissance de la turbulence.

II.4/Les modèles de turbulence et leurs classifications :

II.4.1/Les modèles à viscosité turbulence algébrique (modèle à zéro équation de transports).

Aucune équation de transport n'est utilisée dans ce modèle, les tensions de Reynolds sont directement liées aux valeurs moyennes. En s'inspirant de la théorie cinétique des gaz Prandtl, (La première génération de la modélisation de la turbulence 1925).Suggéra que la viscosité turbulente soit mise sous la forme de produit d'une vitesse et d'une longueur caractéristique du mouvement turbulent **[2].**

La longueur utilisée est dite « longueur de mélange » et la vitesse caractéristique s'exprime par l'hypothèse suivante :

$$V = L_m\sqrt{2(dij)^2} \qquad \textbf{(II-18)}$$

Ce qui conduit à l'expression suivante de la viscosité turbulente :

$$V_t = L_m v = L^2{}_m \sqrt{\left(\frac{OCI}{\partial xj} + \frac{OCI}{\partial xI}\right)} \qquad \textbf{(II-19)}$$

II.4.2/ Les modèles à une équation de transport :

Ces modèles introduisent dans la définition de V_t au moins une grandeur turbulente décrire par une équation d'évolution si on utilise l'équation de l'énergie cinétique de la turbulence K sous forme modélisé. On pourra déterminer V_t par l'expression du type kolmogrov-Prandtl **[27].**

$$V_t = C_{vl}\sqrt{k} \qquad \textbf{(II-20)}$$

On écrit alors une équation supplémentaire pour obtenir k.

$$\frac{\partial \bar{k}}{\partial t} + U_j \frac{\partial \bar{k}}{\partial xj} = -2\overline{U'_i U'_j}\ \frac{\partial uj}{\partial xj} - \frac{1}{2}\frac{\partial \overline{U'_i u'_j u'_k}}{\partial xk} - C_K \frac{K^{3/2}}{t} + \frac{\partial uj}{\partial xj}\left((V + C_\sigma K V t)\frac{\partial \bar{k}}{\partial xj}\right) \qquad \textbf{(II-21)}$$

II.4.3/les modèle a deux équations de transport(Le modèle k-ε et RNG) :

Le k- ε RNG [launder & Spalding, 1974] est certainement le modèle le plus repandu.

La viscosité turbulente est donnée par la relation **[22]** :

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}(1 - R_f)^{1/4} \qquad \textbf{(II-22)}$$

Où $\bar{\varepsilon}$, taux de dissipation visqueuse de l'énergie cinétique turbulente, est donné par :

$$\varepsilon = \mu\,\overline{\nabla u / \nabla^t u} \qquad \textbf{(II-23)}$$

Avec :

Les deux équations de fermeture s'écrivent :

$$\rho\left(\frac{\partial k}{\partial t} + (\bar{u}\nabla)k\right) = \nabla\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k\right) + P(1 - R_f) - \rho\varepsilon \qquad \textbf{(II-24)}$$

$$\rho\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + (\bar{u}\nabla)\varepsilon\right) = \nabla\left[\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla\varepsilon\right) + C_{\varepsilon 1}\left(P\left(1 - C_{\varepsilon 3}R_f\right)\frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}\right)\right] \qquad \textbf{(II-25)}$$

Les constantes, déterminées empiriquement par les auteurs du modèle, sont données dans le tableau suivant **[28]** :

Tableau II.1: constantes du modèle k-ε.

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε	σ_t	$C_{\varepsilon 1}C_{\varepsilon 3}$
0.09	1.44	1.92	1	1.3	1	0.7

Cette modèle est ε très répandu de part sa simplicité, sa robustesse et sa facilité de mise en œuvre .Bien que les aspects généraux des écoulements soient bien simulés.

II.4.4/Le modèle k-ε deux couches :

[Chen & Patel, 1988] qui, a proximité des parois, utilise un modèle a une équation (pourk) et exprime ε a l'aide d'une longueur caractéristique déterminée par une formule algébrique fonction du nombre de Reynolds **[29].**

II.4.5/Le modèle k- ε étendu :

[Chen & Kim, 1987], qui ajoute un terme a l'équation du taux de dissipation pour que le transfert d'énergie réponde plus efficacement à la déformation moyenne de l'écoulement, rend le modèle moins d'effusif, le modèle RNG, développe' par le groupe de renormalisation [yakhot & Smith, 1992]**[30]**. Il consiste en une estimation au cours du calcul de la constante Cε1, remplacée dans l`équation de dissipation par Cε1 donnée par l'expression (II.54). Cette expression ajoute un terme fonction du taux de déformation η à l'équation du taux de dissipation le rendant ainsi moins diffusif.

$$\mathbf{C'_{\varepsilon 1} = C\varepsilon_1 - \eta \frac{1-\eta_0}{1+\beta\eta^3}} \qquad \textbf{(II-26)}$$

Avec :

$$\boldsymbol{\eta} = \left(\frac{k}{\varepsilon}\right)\sqrt{\frac{\overline{P}}{\mu_t}} \qquad \textbf{(II-27)}$$

Tableau II-2: constantes du modèle RNG **[2]**.

Cμ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε	σ_t	$C_{\varepsilon 1}C_{\varepsilon 3}$	η_o	β
0.005	1.42	1.68	0.7179	0.7179	1	0.7	4.33	0.012

II.5/Modélisation du transfert de chaleur:

II.5.1/Equation d'énergie :

La modélisation des transferts de chaleur est basée sur une formulation en température des échanges thermiques, dans laquelle le changement de phase ou la dissipation visqueuse sont pris en compte grâce à des termes sources ou polynomiaux formulés en terme de température **[22]**.

II.5.2/Transferts de chaleur en écoulements incompressibles [2]:

La modélisation des transferts thermiques convectif et conductif en interaction avec un écoulement incompressible sont modélisés à partir d'une formulation conservative et d'une approche non-conservative [**31**].

$$\rho c_P \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(VT)T\,\nabla V\right) + \alpha T = \nabla(\lambda \nabla T) + \phi + S \qquad \textbf{(II-28)}$$

Le terme **αT** est un terme linéaire laissé à la libre utilisation de l'utilisateur ainsi que le terme source **S**.

Le terme ϕ est le terme de dissipation visqueuse donnée par la relation suivante :

$$\Phi = 2\,\mu D_{ij}\frac{\partial U_i}{\partial x_i} \qquad \textbf{(II-29)}$$

Avec :

$$D_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial Ui}{\partial xi} + \frac{\partial Uj}{\partial xi}\right) \qquad \textbf{(II-30)}$$

II.6/Conclusion :

On a définie dans ce chapitre les modèles mathématique régissent l'écoulement de fluide avec transfert de chaleur d'un écoulement turbulent ou on à opté pour la méthode eulérienne. À noté que la résolution de problème analytiquement nécessite des méthodes numérique qui sont le but du chapitre suivant.

Solution numérique par discrétisation

III.1/Introduction :

Pour résoudre un problème de la physique il faut distinguer le modèle physique du modèle mathématique. Des différentes méthodes numériques ont été utilisées pour la résolution analytique des équations différentielles partielles (E.D.P) qui régissent ce type d'écoulement. Parmi les méthodes on cite, la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis et la méthode des volumes finis. Le principe de ces méthodes est de transformer les équations différentielles en un système d'équations algébriques.

III.2/Méthodes de discrétisation :

Il y'a trois méthodes numériques qui sont utilisées généralement pour la résolution des systèmes d'équations aux drivées partielles régissant les écoulements. Ces méthodes sont **[32]** :

- la méthode des différences finies.
- la méthode des éléments finis.
- la méthode des volumes finis.

III.2.1/Méthode des différences finies :

La méthode des différences finies consiste à remplacer les dérivées apparaissant dans le problème continu par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la Fonction en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage **[2].**

Tableau III.1:les avantages et les inconvénients de la méthode des différences finis **[22].**

Avantages	Inconvénients
✓ grande simplicité d'écriture. ✓ faible coût de calcul	✓ Limitation de la géométrie des domaines de calculs. ✓ difficultés de prise en compte des conditions aux limites portant sur les dérivées

III.2.2/Méthodes des éléments finis :

La méthode des éléments finis consiste à approcher, dans un sous-espace de dimension finie, un problème écrit sous forme variationnelle (comme minimisation de l'énergie, en général). Dans un espace de dimension infinie. La solution approchée est une fonction déterminée par un nombre fini de paramètres.

Le solide est décomposé en éléments de forme géométrique simple ayant des côtés communs et dont les **s**ommets ou nœuds sont les points d'articulation de plusieurs éléments entre eux. Ces nœuds seront les points d'application des forces intérieures ou extérieures.
L'opération de décomposition est le maillage.

Un bon maillage doit faciliter les opérations Prévues par un programme d'ordinateur.
Il faut donc adopter une méthode systématique de numérotation des éléments et des nœuds **[2].**

Tableau III.2:les avantages et les inconvénients de la méthode des éléments finis **[22].**

Avantages	Inconvénients
✓ Traitement possible de géométries complexes. ✓ détermination plus naturelle des conditions aux limites. ✓ possibilité de démonstrations mathématiques de convergence et de majoration d'erreurs	✓ Complexité de mise en œuvre ✓ coût en temps de calcul et en mémoire.

III.2.3/Méthode des volumes finis :

Cette méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles, comme la méthode des différences finies et celle des éléments finis. Contrairement à la méthode des différences finies qui met en jeu des approximations des dérivées, Dans la méthode des volumes finis les lois de conservations (de la masse, de quantité de mouvement et de l'énergie) sont exprimées localement sons une forme intégrale **[3].** D'Ostrogradski, qui permet de changer une intégrale de volume en intégrale de surface **[33].**

Tableau III.3:les avantages et les inconvénients de la méthode des volumes finis **[22].**

Avantages	Inconvénients
✓ Mise en œuvre relativement facile ✓ Applicable aux géométries complexes.	✓ Moins précis que les méthodes spectrales.

III.3/ Présentation de la méthode :

Comme nous l'avons précédemment évoquée, La méthode des éléments finis a pour but de remplacer un problème mathématique défini dans un milieu continu et sous la forme d'équations différentielles ou d'intégrales, par un problème discret sous forme matricielle qu'il est possible de résoudre numériquement **[22].**

En résumé, cette méthode nécessite la discrétisation d'un continuum en un modèle composé d'un assemblage d'éléments finis qui possèdent des formes et des tailles variées. De plus, le calcul de la solution nécessite la prise en compte d'un certain nombre de paramètres, tels que **[22]** :

- La géométrie discrétisée en éléments finis,
- Les contraintes imposées sur le dispositif,
- Les excitations présentes dans le dispositif,
- Les propriétés des matériaux composant le dispositif.

III.4/Formulation des éléments finis [2] :

L'équation du mouvement de la plaque en vibration libre peut être obtenue du principe de Hamilton, lequel est une généralisation de principe des déplacements dans la dynamique des corps déformables, l'équation différentielle d'équilibre du mouvement est obtenue en utilisant le principe de Hamilton comme suit :

$$\delta \int_1^2 L dt = \delta \int_1^2 (T - \pi p) dt = 0 \qquad \textbf{(III-1)}$$

Où d est l'opérateur variationnel, L est la fonction de Lagrange de la plaque, t1 et t2 sont les bornes artichautières du temps. T est l'énergie cinétique, ppi est l'énergie potentielle les équations de Lagrange deviennent :

$$\frac{d}{dx}\left[\frac{\partial T}{\partial\{\dot{W}_i\}e}\right] - \frac{\partial T}{\partial\{W_i\}e} + \frac{\partial \pi_p}{\partial\{W_i\}e} = \{0\} \qquad \textbf{(III-2)}$$

i=1,2 …..

Où $\{W_i\}$ et $\{\dot{W}_i\}$ sont les vecteurs de déplacement et vitesses des coordonnées généralisées pour l'analyse de la vibration libre, les équations différentielles pour une plaque isotrope s'écrit :

[[K]- w² [M]]{W} = {0}

Où : [k]: Matrice rigidité globale de la rigidité obtenue par assemblage les matrices élémentaires.

[M]: Matrice masse rigidité obtenue par assemblage élémentaire.

{W} : le vecteur global de déplacements.

III.5/Dérivation des équations de discrétisation :

Les équations du système sont écrites sous la forme généralisée suivante **[34]:**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c\emptyset) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x c\emptyset\emptyset) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_y c\emptyset\emptyset) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\emptyset\frac{\partial\emptyset}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma\emptyset\frac{\partial\emptyset}{\partial y}\right) + S_\emptyset \qquad \textbf{(III-3)}$$

Ou :

□: Variable généralisée.

$c\emptyset$: Coefficient d'advection transitoire.

Γ□: Coefficient de diffusion.

S□: Termes source.

Le tableau (III-4) regroupe les expressions des différents termes dans les différentes équations du système.

Tableau III-4 : Expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables.

Variable □	Coefficient d'advection	Diffusivité $\Gamma_{\emptyset}$	Termes source $s_{\square}$
V_X	1	μ	$\frac{-\partial_p}{\partial_x} + \frac{\partial}{\partial_x}\left(\mu\frac{\partial_u}{\partial_x}\right) + \frac{\partial}{\partial_y}\left(\mu\frac{\partial_u}{\partial_y}\right) - \sigma\square\left\|\frac{\square c}{\|\square c\|}\right\|\frac{\square c}{\|\square c\|}$
V_y	1	μ	$\frac{-\partial_p}{\partial_y} + \frac{\partial}{\partial_y}\left(\mu\frac{\partial_u}{\partial_y}\right) + \frac{\partial}{\partial_x}\left(\mu\frac{\partial_u}{\partial_x}\right) - \sigma\square\left\|\frac{\square c}{\|\square c\|}\right\|\frac{\square c}{\|\square c\|}$
T	1	$\frac{k}{\rho c^e}$	$\frac{\varphi}{\rho c^e}$
ρ	1	0	0

La discrétisation de ces équations permet de convertir les équations aux dérivées partielles en équations algébriques qui sont alors résolues par les méthodes numériques traditionnelles.

III.6/ Maillage :

Un maillage est une partition de l'espace ou d'un domaine en cellules appelées éléments. Le mailleur prend en entrée la géométrie, c'est-à-dire le fichier produit par le modeleur géométrique, et fournit en sortie un maillage. Ceci comprend une information géométrique sur les sous-volumes et une information topologique sur la connectivité entre les éléments.

Les maillages non structurés sont sous la forme d'une liste d'éléments interconnectés. Les formes sont souvent des triangles ou des quadrilatères en deux dimensions, et des tétraèdres, des cubes ou des hexaèdres en trois dimensions. La connectivité d'un élément est la liste de ses voisins. Un élément possède un voisin par arête ou par face, selon que le maillage

est bi- ou tridimensionnel. Dans le cas des maillages structurés, la connectivité est par définition implicite, et donc le maillage se résume à une simple liste de nœuds **[2].**

III.6.1/ Génération de maillage :

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée.

La technique de génération de maillage peut être résumée sous la forme suivante :

La géométrie doit être préparée au préalable, avec la définition de tous les composants de la géométrie fuselage, aile, extrados, intrados...etc., sous forme de données numériques, fichier CAD pré-établi ou plutôt sous forme de fichier maillage qu'on peut importer sous ICEM CFD.

La géométrie qui représente les différents domaines fluides est décomposée en sous domaines « maillables ».

Maillages des sous domaines fluides.

La réduction du temps nécessaire à la génération du maillage est un critère de bonne maîtrise de l'utilisation des outils CFD **[2].**

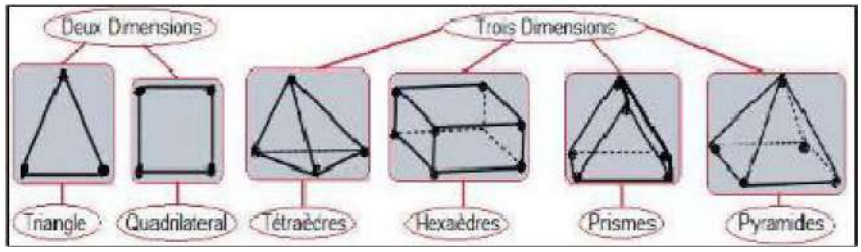


Figure III-1 : Exemples de mailles utilisées en Volumes Finis.

III.6.2/Choix d'un maillage :

La méthode des éléments finis repose sur un découpage de l'espace selon un maillage. D'habitude l'on choisit un maillage carré ou triangulaire mais rien n'interdit de choisir des maillages plus complexes. Il n'est pas non plus nécessaire que le maillage soit régulier et l'on a tendance à resserrer le maillage près des endroits d'intérêt (par exemple aux endroits où l'on pense que la solution va beaucoup varier) ; cependant, il faut veiller à avoir des éléments faiblement distordus (se rapprocher d'un polygone régulier). Plus ce maillage est resserré, plus la solution que l'on obtient par la méthode des éléments finis sera précise et proche de la « vraie » solution de l'équation aux dérivés partielles **[3]**.

Un maillage de très bonne qualité est essentiel pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et signifiant. La qualité du maillage a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul. Une bonne qualité de maillage repose sur la minimisation des éléments présentant des □distorsions□ (skewness en anglais), et sur

une bonne résolution dans les régions présentant un fort gradient (couches limites, ondes de choc,. . .). Un bon maillage doit également être suffisamment lisse **[22].**

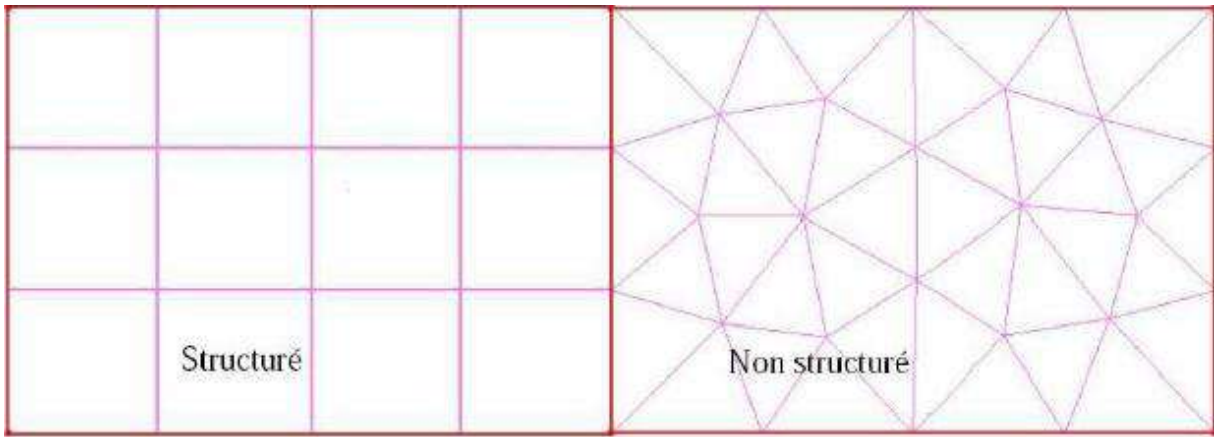


Figure III.2 : Maillages structure et non structure.

III.6.2.1/ Les avantages et les inconvénients de Choix du type de maillage [2] :

- ***Maillage structuré (quadra/hexa).***

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie multi bloc. Cette technique consiste à diviser les domaines de calcul en plusieurs compartiments de mailler séparément.

- ***Les avantages.***

Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de mailles par rapport à un maillage non structuré équivalent.

Réduit les risques d'erreurs numériques dues à la diffusion numérique si l'écoulement est aligné avec le maillage.

- ***les inconvénients.***

Difficile à générer dans le cas d'une géométrie complexe. Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes.

Dans la majorité des cas, la division du domaine de calcul est nécessaire pour faciliter sa génération.

- ***Maillage non structuré (tri/tétra).***

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition.

- ***les avantages.***

- Peut être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments.

- Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés d'où un gain de calcul énorme.

➢ ***les inconvénients.***

- Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré.
- Engendre des erreurs numériques (diffusion numérique) qui peuvent être plus importantes si l'on compare avec le maillage structuré.

❖ ***Maillage hybride.***

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D.

➢ ***les avantages.***

Combine les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré en réduisant les erreurs dues à la diffusion numérique.

➢ ***les inconvénients.***

Ce type de maillage demeure encore difficile à générer notamment dans les Endroits de liaison entre le maillage structuré et le maillage non structuré.

III.7/Discrétisation :

La discrétisation de ces équations permet de convertir les équations aux dérivées partielles en équations algébriques qui sont alors résolues par les méthodes numériques traditionnelles. Le procédé de discrétisation par élément fini consiste à écrire, après intégration, l'équation généralisée, sous forme matricielle élémentaire **[35].**

$$[A_e^{transient}] + [A_e^{advection}] + [A_e^{diffusion}]\ (\emptyset_e) = (S_e^{\emptyset}) \qquad \textbf{(III-4)}$$

Pour les intégrales élémentaire, La méthode Galerkin des résiduels pesés est employée.

III.7.1/ Terme temporelle :

Le premier des contributions de la matrice élémentaire est le terme de transition. Sa forme générale est simplement **[36]:**

$$[A_e^{transient}] = \int W^e \frac{(\partial \rho c_{\emptyset} \emptyset)^e}{\partial t} d(VoL) \qquad \textbf{(III-5)}$$

Avec :

We : La fonction pesante pour l'élément, qui est également la fonction de forme.

Pour le nœud i:

$$\int W^e \frac{(\partial \rho c_{\emptyset} \emptyset)^e}{\partial t} d(VoL) = \int W_i^e \rho c_{\emptyset} W_j^e \ d(VoL) \frac{\partial \emptyset_i^e}{\partial t} \ W_j^e \ d(VoL) \emptyset_j^e \qquad \textbf{(III-6)}$$

Les indices inférieurs i et j indiquent le nombre de nœud. Si la deuxième partie de l'équation (III-10) est négligée, la matrice de masse peut être exprimée comme:

$$M_{ij=}\int W_i^e \rho c_{\emptyset} \; d(VoL) \qquad \textbf{(III-7)}$$

Si l'approximation localisée de masse est employée.

$$M_{ij=|}\delta_{ij} \int W_i^e \rho c_{\emptyset} \; d(VoL) \qquad \textbf{(III-8)}$$

Ou: δ_{ij} = delta de Kronecker (0 si i ≠ j, 1 si i = j).

Il y a deux méthodes d'intégration temporelles : Newmark et (backward différence) différence en arrière.

La méthode d'intégration de temps de Newmark ou, la formulation implicite de base nodale, exprime l'étape de temps courant comme la nième étape de fois et l'expression comporte les résultats précédents d'une étape de temps.

$$(\rho\emptyset)_n = (\rho\emptyset)_{n-1} + \Delta t[\delta\left(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t}\right) + (1-\delta)(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t})_{n-1}] \qquad \textbf{(III-9)}$$

Ou:

δ : coefficient d'intégration en temps pour la méthode Newmark.

$$(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t})_n = \frac{1}{\Delta t\delta}(\rho\emptyset)_{n-1} + (1-\frac{1}{\delta}) \qquad \textbf{(III-10)}$$

III.7.2/ Terme d'advection:

Il ya trois approches pour la discrétisation du terme d'advection. L'approche dite ligne de courant monotone upwind (MSU), La ligne profilée upwind/Petro-Galerkin (SUPG), et les approches colloquées de Galerkin (COLG) **[3].**

III.7.2.a/ Monotone Streamline Upwind Approach (MSU):

Le terme d'advection est manipulé par une approche de ligne de courant monotone basée sur l'idée que le transport pur d'advection est le long des lignes caractéristiques. Il est utile de penser à la formulation de transport d'advection en termes de quantité étant transportée dans un domaine connu de vitesse **[3].**

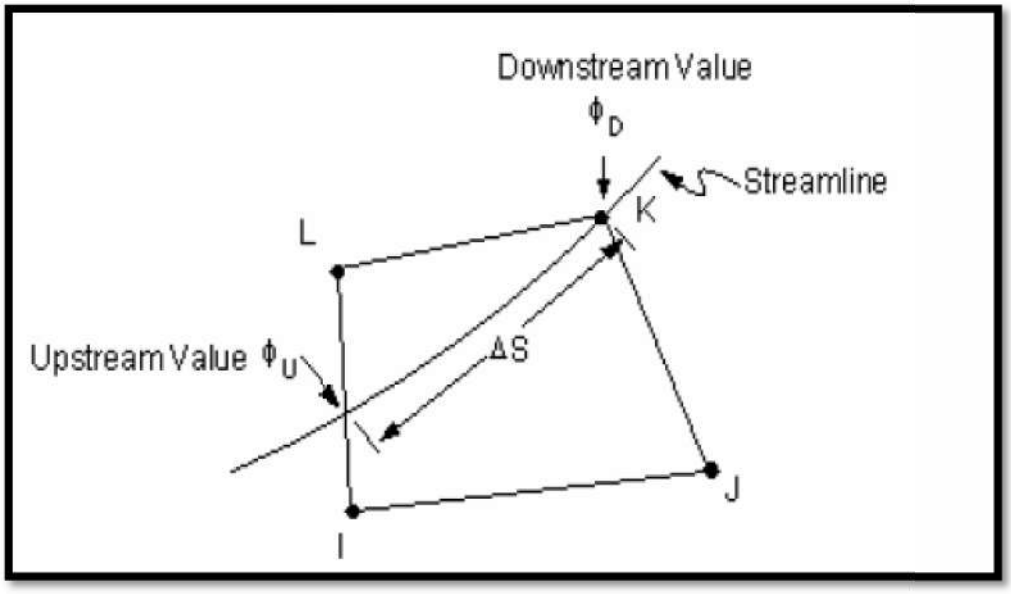


Figure III.3:L'approche de ligne de courant d'upwind.

Le champ de vitesse lui-même peut être envisagé partout comme ensemble de tangente de lignes profilées aux vecteurs de vitesse. Les limites d'advection peuvent donc être exprimées en termes de vitesses aérodynamiques.

Dans le transport pur d'advection, on suppose qu'aucun transfert ne se produit à travers les lignes caractéristiques, c.-à-d. tout le transfert se produit le long des lignes profilées. Par conséquent on peut supposer que le terme d'advection, s'écrit **[34]:**

$$\frac{\partial(\rho V_x c_{\square\square})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y c_{\square\square})}{\partial y} = \frac{\partial(\rho V_s c_{\square\square})}{\partial s} \qquad \textbf{(III-11)}$$

Une fois exprimé le long d'une ligne profilée, et donc constant dans tout l'élément, on peut écrire:

$$\left[A_e^{advection}\right] = \frac{d(\rho V_s c_{\square\square})}{ds} \int w^e \mathbf{d(vol)} \qquad \textbf{(III-12)}$$

Cette formulation est faite pour chaque élément, dont chacun aura seulement un nœud qui obtient des contributions de l'intérieur de l'élément. Le dérivé est calculé en utilisant une différence simple:

$$\frac{\mathbf{d}(\rho V_s c_{\square})}{\mathbf{ds}} = \frac{(\rho V_s c_{\square\square})_u - (\rho V_s c_{\square\square})}{\mathbf{Ds}} \qquad \textbf{(III-13)}$$

Ou :

D : l'indice de la valeur on niveau du nœud aval.

U : l'indice de la valeur prise à l'endroit où la rationalisation dans le nœud sous le vent pénètre dans l'élément.

Δs = La distance du point situé en amont à l'aval du nœud.

La valeur à l'endroit ascendant est inconnue mais peut être exprimée en termes de valeurs nodales inconnues qu'il est entre l'amont et l'aval.

Le processus consiste à cycler par tous pour l'élément et identifier les nœuds arrière. Le calcul effectué est basé sur les vitesses, pour voir d'où elle est venue la ligne profilée dans le nœud. Des facteurs pesants sont calculés, basé sur la proximité de l'endroit d'upwind aux nœuds voisins.

III.7.2.b/ La méthode SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin):

L'approche de SUPG se compose d'une discrétisation de Galerkin du terme d'advection et d'un additionnel de diffusion-un terme de perturbation qui agit seulement dans la direction d'advection **[36]:**

$$\left[A_e^{advection}\right] = \int \mathbf{W^e}\left(\frac{\partial(\rho v_x c_{\emptyset}\emptyset)}{\partial_x} + \frac{\partial(\rho v_y c_{\emptyset}\emptyset)}{\partial_y}\right)\mathbf{d(vol)}C_{2\tau}\int \frac{zh}{2u_{max}}\left(\frac{v_x\partial\omega^e}{\partial_x} + \frac{v_y\partial\omega^e}{\partial_y}\right)\left(\frac{v_x\partial(\rho c_{\emptyset}\emptyset)}{\partial_x} + \right.$$

$$\partial\rho vyc\emptyset\emptyset\partial ydvol \qquad \textbf{(III-14)}$$

Où :

C2τ = coefficient global réglé à 1,0.

h = longueur d'élément le long de la direction d'advection.

$$\square\ \mathbf{mag} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \qquad \{1 \quad \textbf{si } 0 \le p < 3 \ ; \ \frac{p_e}{3} \quad \textbf{si pe} \ge 0\} \qquad \textbf{(III-15)}$$

$$p_e = \frac{\rho c_p \square mag}{2r\emptyset} h \textbf{ Nombre de peclet}$$

Il est clair que pour l'approche de SUPG la maille est raffinée, les termes de perturbation tend à zéro et la formulation de Galerkin approche à l'exactitude du second degré.et donc le terme de perturbation fournit la stabilité nécessaire qui est absente dans la discrétisation pure de Galerkin.

III.7.2.c/Approche Colloquée De Galerkin (COLG):

L'approche de COLG emploie le même arrangement de discrétisation avec l'approche de SUPG avec un concept colloqué. Dans cet arrangement, un deuxième ensemble de vitesses, (les vitesses nodales élément-élément-based) qui sont faites pour satisfaire l'équation de continuité, tandis que les vitesses traditionnelles sont faites pour satisfaire les équations de quantité de mouvement **[34].**

$$\left[A_e^{advection}\right] = \int \mathbf{W^e}\left(\frac{\partial(\rho v_x c_\emptyset \emptyset)}{\partial_x} + \frac{\partial\left(\rho v_y c_\emptyset \emptyset\right)}{\partial_y}\right)\mathbf{d(vol)}C_{2\tau}\int \frac{zh}{2u_{mag}^e}\left(\frac{v_x^e \partial w^e}{\partial_x} + \frac{v_y^e \partial w^e}{\partial_y}\right)\left(\frac{v_x^e \partial(\rho c_\emptyset \emptyset)}{\partial_x} + \right.$$

$$\mathbf{vye\partial\rho vyc\emptyset\emptyset\partial y}$$

(III-16)

Dans cette approche, l'équation de pression est dérivée à partir des vitesses nodales (élément-élément-basé), et elle est généralement asymétrique. La conservation exacte soit préservée même sur les mailles brutes.

III.7.3 /Terme de Diffusion :

L'expression pour les termes de diffusion vient d'une intégration au-dessus du domaine de problème après la multiplication par la fonction pesante **[36].**

$$\textbf{Diffusion contribution} = \int W^e \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial x}\right)\mathbf{d(vol)} + \int W^e \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial y}\right)\mathbf{d(vol)} \qquad \textbf{(III-17)}$$

Toutes les variables en x ou y sont traitées de mode semblable. Par conséquent, l'illustration est avec le terme dans la direction de x. Une intégration par partie est appliquée **[35]:**

$$\int W^e \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial x}\right)\mathbf{d(vol)} = \int \frac{\partial W^e}{\partial x}\Gamma_\square \frac{\partial \square}{\partial x}\mathbf{d(vol)} \qquad \textbf{(III-18)}$$

Une fois que la dérivé du φ est remplacé par les valeurs nodales et les dérivés de peser fonctionnent, les valeurs nodales seront enlevées des intégrales.

$$\frac{\partial \square}{\partial x} = \mathbf{W_x^e}\square \qquad \textbf{(III-19)}$$

$$\mathbf{W_x^e} = \frac{\partial \mathbf{W^e}}{\partial x} \qquad \textbf{(III-20)}$$

La matrice de diffusion peut maintenant être exprimée comme:

$$\left[A_e^{diffusion}\right] = \int\left(W_x^e \Gamma_\square W_x^e + W_y^e \Gamma_\square\right)\mathbf{d(vol)} \qquad \textbf{(III-21)}$$

III.7.4 /Termes source:

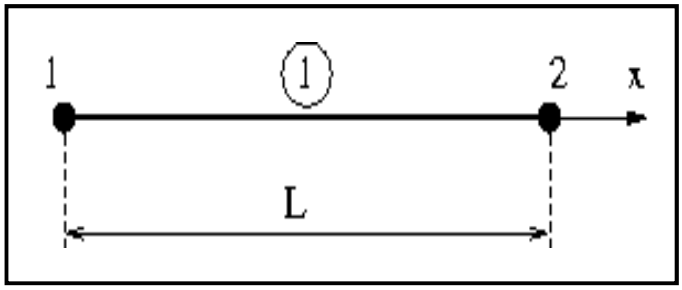
L'évaluation des termes de source se fait comme suite **[36]:**

$$S_\emptyset^e = \int W^e S_\square \mathbf{d(vol)} \qquad \textbf{(III-22)}$$

III.8 /Discrétisation de l'équation de chaleur par éléments finis :

III.8.1/ Discrétisation par éléments finis :

- ✓ Maillage avec un seul élément fini à deux nœuds **[2]** :



- ✓ Forme faible (ou intégrale) :

$$\mathbf{W} = + \int_0^l \frac{d\psi(x)}{dx}(x)\frac{dT(x)}{dx}dx - \int_0^l \psi(x) f dx + \psi(L)h(T(L) - T_{ext}) - \psi(0)q(0) = 0$$

(III-23)

Avec :

$$w_{int} = + \int_0^l \frac{d\psi(x)}{dx}(x)\frac{dT(x)}{dx}dx - \int_0^l \psi(x) f dx$$

$$w_{cl} = +\psi(L)h(T(L) - T_{ext}) - \psi(0)q(0)$$

L'intégration requiert une approximation des variables : Ψ**(x), T(x)**

Et de leurs dérivées :

$$\frac{d\psi}{dx} \quad \frac{dT}{dx}$$ **(III-24)**

III.8.1.1/ Représentation élémentaire (ou locale) du champ de températures.

Le champ de températures T (x, y, t) dans l'élément (e) à pour expression **[22].**

$$T^e(x, y, t) = [N_1^e(x, y) \dots\dots N_1^e(x, y) \dots\dots N_i^e(x, y) \dots\dots N_{n^e}^e(x, y)] \begin{Bmatrix} T_1^e \\ T_i^e \\ T_{n^e}^e \end{Bmatrix}(t)$$

(III-25)

$$\mathbf{T^e(x, y, T) = [N^e(x, y)]\{T(t)\}}$$ **(III-26)**

Ou :

n^e : est le nombre de nœuds de l'élément.

- ✓ les fonctions N_i^e (x, y) sont les fonctions d'interpolation élémentaires.
- ✓ la matrice N^e (x, y) est la matrice d'interpolation élémentaire.
- ✓ le vecteur T^e(t) regroupe les températures des nœuds de l'élément (e).

III.8.1.2/ Représentation globale du champ de températures [22] :

Le champ de températures T(x, y, t) a pour expression sur l'ensemble du domaine V.

$$T(x, y, t) = [\, N_1(x, y) \ldots\ldots N_I(x, y) \quad \ldots\ldots N_n(x, y)\,] \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_i \\ T_{n^e} \end{Bmatrix} (t) \qquad \textbf{(III-27)}$$

$$\mathbf{T(x, y, T) = [N(x, y)]\{T(t)\}} \qquad \textbf{(III-28)}$$

Ou :

- ✓ n' est le nombre de nœuds du maillage.
- ✓ les fonctions Ni (X, y) sont les fonctions d'interpolation (ou fonction de forme).
- ✓ la matrice N [(x, y)] est la matrice d'interpolation.

{T (t)} est le vecteur des températures nodales.

Les fonctions d'interpolation vérifient les relations :

$$\mathbf{N_i^e(x_j, y_j) = \delta_{ij}} \qquad \textbf{(III-29)}$$

$$\mathbf{N_i(x_j, y_j) = \delta_{ij}; \forall i, j} \qquad \textbf{(III-30)}$$

Ou : (x_j, y_j) sont les coordonnées du nœud j

III.8.2/Discrétisation de la forme intégrale faible [3] :

De l'expression du champ de températures T sur le domaine: T = [N] { }

Et {grad T} = [B]{T} avec [B]= [{B1}. Bi … {Bn }]

Où :

Bi dépend du problème traité (spatial, plan, axisymétrique…) pour un problème spatial, Bi s'écrit dans le repère orthonormé (x, y).

$$B_i = \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{Bmatrix}$$

(III-31)

$$\mathbf{T^{\square} = [N]\{T^{\square}\} = \{T\}^T[N]^T et \{gradT^{\square}\} = B\{T^{\square}\}, \{gradT^{\square}\} = \{T^{\square}\}^T[B]^T} \quad \textbf{(III-32)}$$

En portant ces relations dans l'équation (II. 03), il vient :

$$\mathbf{\{T^{\square}\}\left([C]\{\dot{T}\} + [k]\{T\} - \{F\}\right) = 0} \quad \textbf{(III-33)}$$

$$\mathbf{[K] = \int_V^{'}[B]T\lambda[B]dV + \int_S^{'}h[N]\ \ T\ [N]\ dS} \quad \textbf{(III-34)}$$

III.8.3/Exemple de calcul élémentaire :

Elément à deux nœuds (problème a une dimension) considérons un élément à deux nœuds de longuer L dont les caractéristiques A, λ, ρ et q sont constantes **[3].**

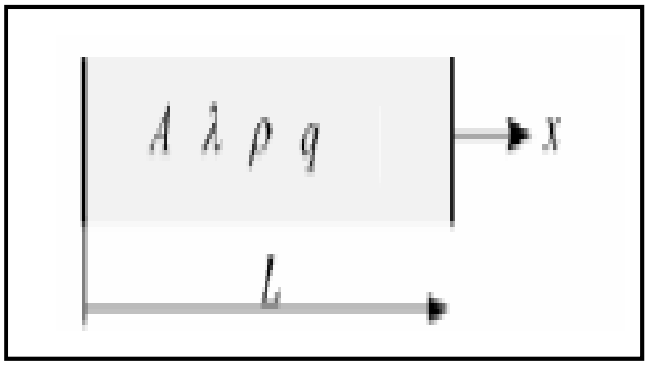


Figure III-4 : les caractéristiques A, λ, ρ et q.

Fonctions d'interpolation sur un élément à deux nœuds :

$$\mathbf{N_1^e = 1 - \frac{X}{L}} \quad \textbf{(III-35)}$$

$$\mathbf{N_2^e = \frac{X}{L}} \quad \textbf{(III-36)}$$

$$\mathbf{L + X1 + X2} \quad \textbf{(III-37)}$$

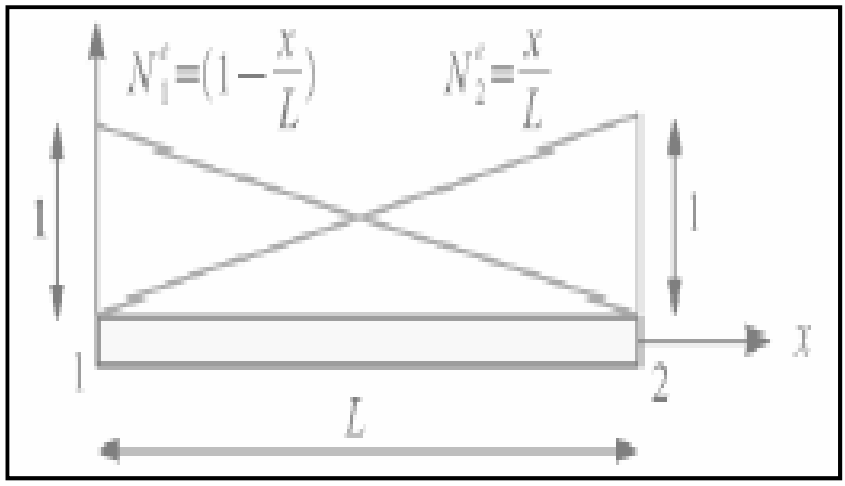


Figure III-5 : élément a deux nœuds.

III.9/ Approximation de la fonction-test [2] :

- ***Plusieurs formulations sont possibles :***

1. Collocation par points ou par sous domaines

2. Moindres carrés

1et 2 Hors programme NF04

3. Galerkin : *Méthode des éléments finis

*La fonction-test est approximée avec les mêmes Ni que T(x)

III.10/ Approximation par éléments finis (Galerkin) :

Définition : une approximation au sens des éléments finis d'une variable T(x) sur un élément à deux nœuds, s'écrit :

T(x)=N1(x)T2+N2(x)T2 **(III-38)**

Vocabulaire : **N1(x), N2(x)**

Sont appelées fonctions d'approximation ou fonctions de forme (fonctions polynomiales)

$$N_j(x_j) = \begin{cases} 1 \; si \;\; i = j \\ 0 \; si \;\;\; i \neq j \end{cases}$$

Utile pour les calculer.

$$\begin{cases} N_1(0) = 1 \\ N_1(L) = 0 \end{cases} \qquad \text{Et} \begin{cases} N_2(0) = 0 \\ N_2(l) = 0 \end{cases}$$

Application : pour un élément fini à deux nœuds

Calcul des fonctions Ni : élément à deux nœuds

1. Choisir l'ordre d'approximation : deux nœuds→ ordre 1

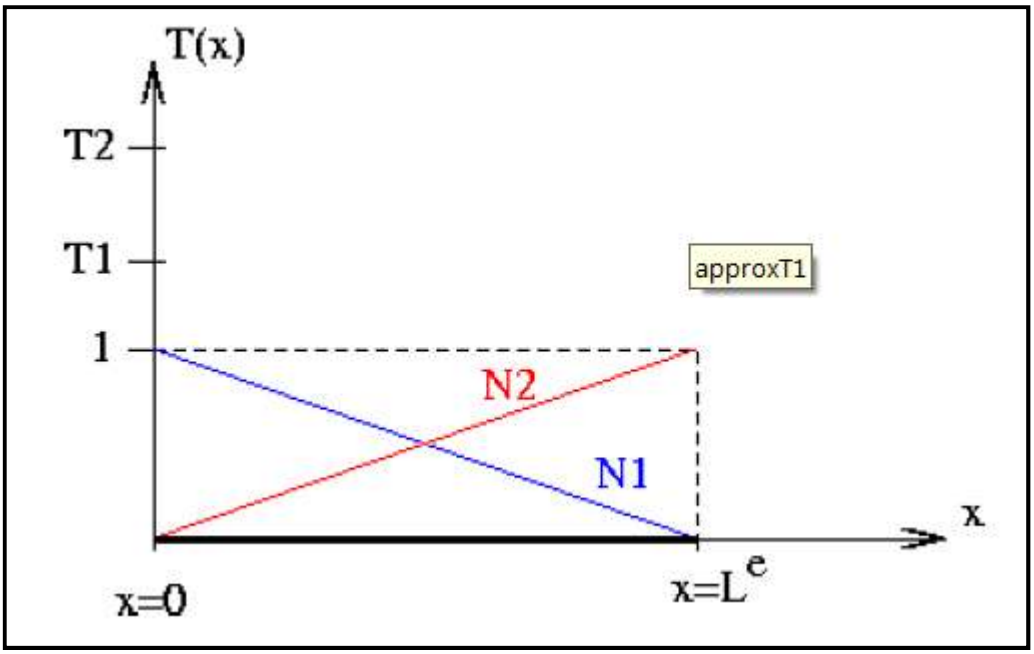
$$\mathbf{N_1(x) = a_1x + b_1} \ , \mathbf{N_2(x) = a_2x + b_2} \qquad \textbf{(III-39)}$$

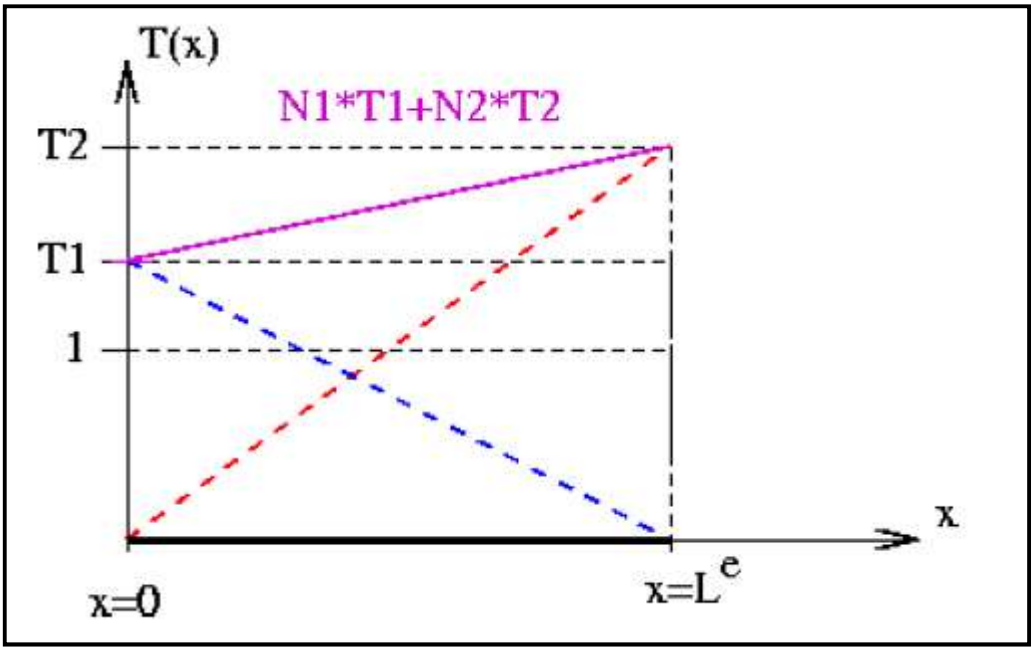
2. Constructiondes deux systèmes d'équations.

$$\begin{cases} N_1(0) = a_1 \times 0 + b_1 = 0 \\ N_2\ (0) = a_1 l + b_1 = 0 \end{cases} , \quad \begin{cases} N_2(0) = a_2 \times 0 + b_2 = 0 \\ N_2\ (0) = a_2 l + b_2 = 0 \end{cases} \qquad \textbf{(III-40)}$$

3. Résolution :

$$\mathbf{N_1(x) = 1 - \frac{x}{l}} \ , \ \mathbf{N_2(x) = \frac{x}{l}} \qquad \textbf{(III-41)}$$


T(x)
T2
T1
1
approxT1
N2
N1
x
x=0
x=L^e


T(x)
N1*T1+N2*T2
T2
T1
1
x
x=0
x=L^e

III.11/Conclusion :

Les modèles physiques mis en place dans le chapitre précédent permettent de prendre en compte tout les couplages entre les principaux phénomènes physiques entrant en jeux, et le passage du domaine contenu au domaine discontinu pour la résolution du problème. Dans ce chapitre on a présenté les trois grands méthodes numériques qui sont utilisées généralement pour la résolution des systèmes d'équations aux drivées partielles, ou on a utilisé la discrétisation de la forme générale des équations du system et l'équation de chaleur par la méthode des éléments finis quelle est la base de l'ANSYS.

Résultats et discussion.

IV.1/Introduction :

Dans ce chapitre les résultats obtenus par le calcul numérique sont discutés et interprétés. Pour résoudre des problèmes d'écoulement, transfert de chaleur, et variation de pression ou bien les pertes de charge ; on a utilisé un logiciel de calcul qui traite ces paramètres des fluides incompressibles en régime variable. Le principe de cette étape repose sur l'étude de l'influence de la géométrie sur les paramètres liés à la sortie de l'éjecteur.

Nous avons donc essayé d'appliquer les modèles mathématiques et physiques par l'application du modèle k-ε en suit comparer les résultats pour les différentes cas des géométries **[2].**

Les résultats obtenus sur les profile de vitesse, champ de température ainsi que le champ de pression ont été réalisés à l'aide du logiciel « ANSYS » on 2D ; on a utilise ce logiciel de simulation « ANSYS », qui est l'un des codes de calcul, basé sur la méthode des éléments finis **[3].**

IV.2/Introduction sur l'ANSYS :

ANSYS est un logiciel de simulation numérique FEM leader de son marché utilisé dans le développement de produits industriels. Il couvre toutes les étapes nécessaires à une simulation: le traitement géométrique, le maillage, la résolution, le traitement de résultats et l'optimisation. ANSYS offre une plateforme de calcul multi-physique intégrant la mécanique des fluides et des structures, l'électromagnétisme, la thermique ainsi que la simulation de systèmes et de circuits **[37].**

De façon générale, une résolution par éléments finis comporte trois étapes :

VI.2.1/ Préparation des données[3] :

Définir le problème; les étapes majeurs sont données ci-dessous:

- Définition des points clés /lignes/surfaces/volumes.
- Définir le type d'élément fini, ses propriétés géométriques et les propriétés physiques des matériaux.
- Maillage des lignes /surfaces/volume.

Les données nécessaires dépendent évidemment de la dimension du problème. (1D, 2D, 3D).

VI.2.2/ Traitement:

Assigner les charges, contraintes (conditions aux limites) et résolution; on spécifie notamment la nature des grandeurs physiques (température, pression, vitesse …), contraintes ou conditions aux limites et, finalement, on résout le système d'équations **[2].**

VI.2.3/Analyse et visualisation des résultats :

Lors de cette étape, on peut examiner :

- La liste des déplacements nodaux.
- Les forces et des moments au niveau des éléments.
- Tracé des Iso contours des contraintes.

Les utilisateurs ANSYS sont de domaines industriels très divers comme la construction de machines, les secteurs de l'énergie, l'automobile, le ferroviaire, l'aérospatial, le médical, la microtechnique, la micro-électronique ou encore les biens de consommation **[2].**

IV.3/Description de la structure étudiée :

Cette étude présente les points saillants de début et les résultats d'une simulation numérique destiné à étudier le comportement et de la performance d'un éjecteur supersonique. Les résultats de cette étude numérique fournir une source précieuse de données de référence qui peut être utilisé pour la validation des modèles numériques d'éjecteurs **[3].**

Le fluide qui circule dans l'éjecteur est **tetrafluoroethane** (R134a) comme un fluide frigorigène.

Tableau IV.1 : Généralités de fluide frigorigène R134a **[38].**

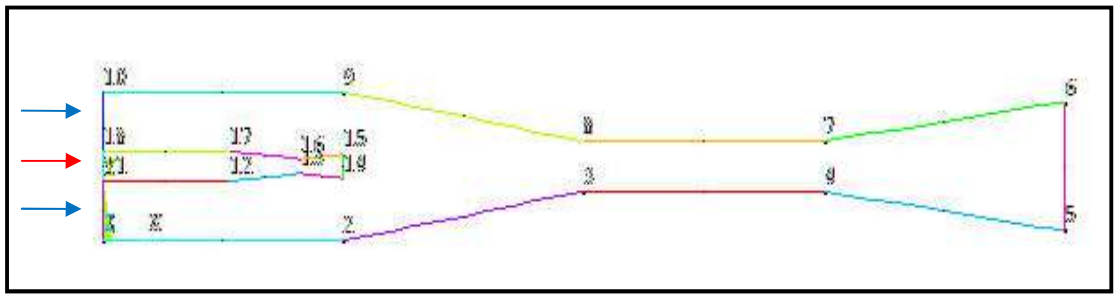
Nom	1, 1, 1,2-tetrafluoroethane
Formule	$CH_2F\text{-}CF_3$
Principaux domaines d'application (sous réserve de la législation en vigueur)	Froid ménager, transport frigorifique et conditionnement d'air
Masse molaire	102,0 kg/k mol

Tableau IV.2 : Les propriétés thermiques de fluide frigorigène R134a **[].**

Liquide	
Conductivité thermique W/ (m K)	0.092
Chaleur spécifique kJ/ (kg K)	1.34
Densité kg/ m_3	1298.70
Viscosité 10_{-6} Pa s	271.08

IV.4 /les dimensions des géométries :

Les dimensions des différentes configurations sont récapitulées dans les tableaux {(IV.3) ;(IV.4) ;(IV.5) ;(IV.6)}, ainsi que les quatre forme géométrique sont indique sur les figures { (IV.1) ;(IV.2) ;(IV.3) ;(IV.4)}.



Fluide primaire.

Fluide secondaire.

Figure IV-1 : la géomètre (I) de l'éjecteur à étudie.

Tableau IV. 3 : présentation des points pour la géométrie(I).

point	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
X(m)	0	0.05745	0.1149	0.17235	0.2298	0.2298	0.17235	0.1149	0.05745	0	0
Y(m)	0	0	0.01	0.01	0.00207	0.02793	0.02	0.02	0.03	0.03	0.012
point	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**				
X(m)	0.03045	0.04745	0.05745	0.05745	0.04745	0.03045	0				
Y(m)	0.012	0.01352	0.01265	0.01735	0.01648	0.018	0.018				

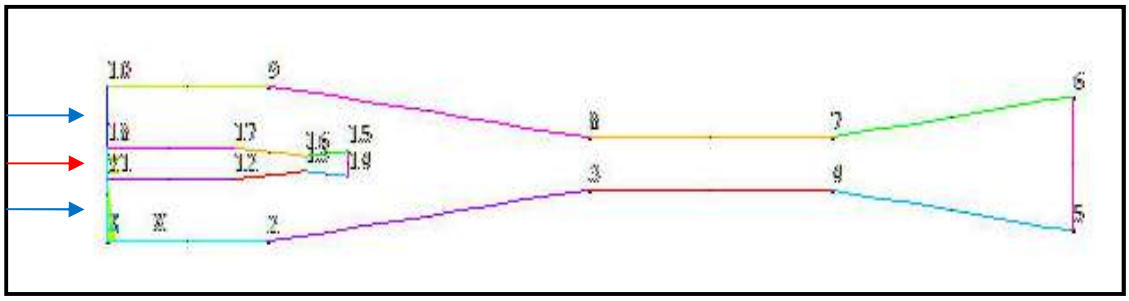


Figure IV-2 : la géomètre (II) de l'éjecteur à étudie.

Tableau IV. 4: présentation des points pour la géométrie(II).

point	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
X(m)	0	0.0383	0.1149	0.17235	0.2298	0.2298	0.17235	0.1149	0.0383	0	0
Y(m)	0	0	0.01	0.01	0.00207	0.02793	0.02	0.02	0.03	0.03	0.012
point	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**				
X(m)	0.03045	0.04745	0.05745	0.05745	0.04745	0.03045	0				
Y(m)	0.012	0.01352	0.01265	0.01735	0.01648	0.018	0.018				

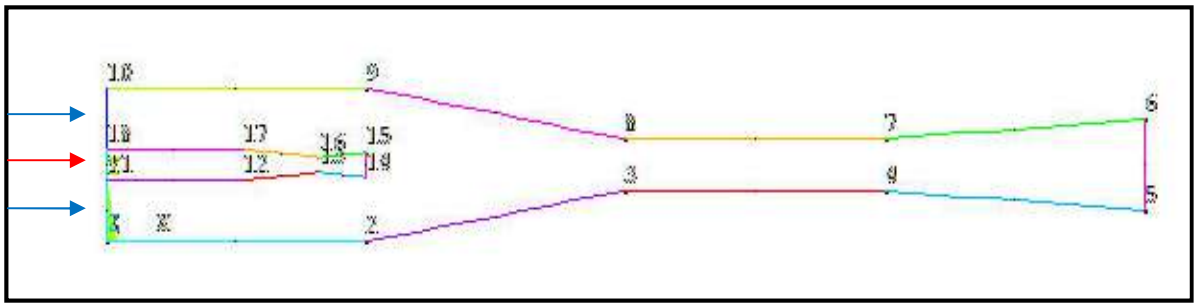


Figure IV-3: la géomètre (III) de l'éjecteur à étudie.

Tableau IV.5 : présentation des points pour la géométrie(III).

point	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
X(m)	0	0.0383	0.1149	0.17235	0.2298	0.2298	0.17235	0.1149	0.0383	0	0
Y(m)	0	0	0.01	0.01	0.00607	0.02393	0.02	0.02	0.03	0.03	0.012
point	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**				
X(m)	0.03045	0.04745	0.05745	0.05745	0.04745	0.03045	0				
Y(m)	0.012	0.01352	0.01265	0.01735	0.01648	0.018	0.018				

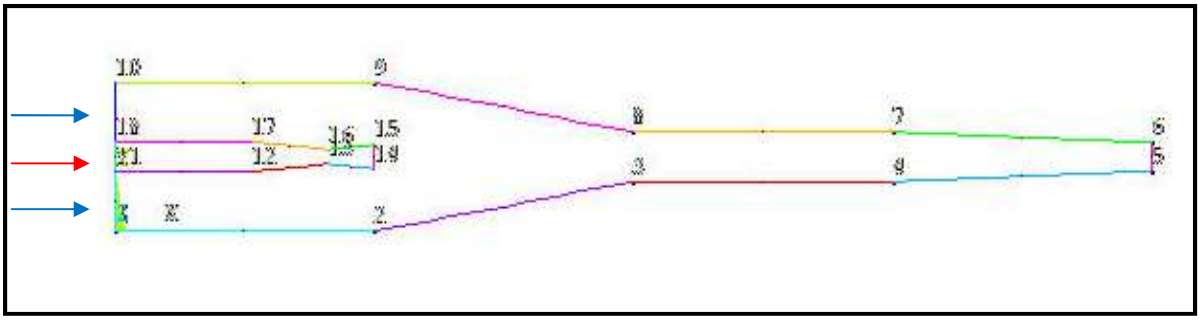


Figure IV-4 : la géomètre (IV) de l'éjecteur à étudie.

Tableau IV. 6 : présentation des points pour la géométrie(IV).

point	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
X(m)	0	0.0383	0.1149	0.17235	0.2298	0.2298	0.17235	0.1149	0.0383	0	0
Y(m)	0	0	0.01	0.01	0.01207	0.01793	0.02	0.02	0.03	0.03	0.012
point	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**				
X(m)	0.03045	0.04745	0.05745	0.05745	0.04745	0.03045	0				
Y(m)	0.012	0.01352	0.01265	0.01735	0.01648	0.018	0.018				

IV.5/les Conditions aux limites :

La procédure de résolution de l'équation d'un écoulement turbulent confiné exige d'impose des conditions limites aux bornes de l'environnement de calcule, recapture le tableau (IV-7), récapitule les conditions limites pour les cas études.

Tableau IV.7: Les conditions aux limites.

Entre de fluide Primaire		**Entre de fluide secondaire**		**Pression de sortie [pas]**
vitesse [m/s]	**température [°K]**	**Vitesse [m/s]**	**température [°K]**	
0.07	363.15	0.006	298.15	0

IV.5.1/ Maillage de système :

On utilise le même maillage(0.001) pour les différentes géométries des éjecteurs (I, II, III, IV).

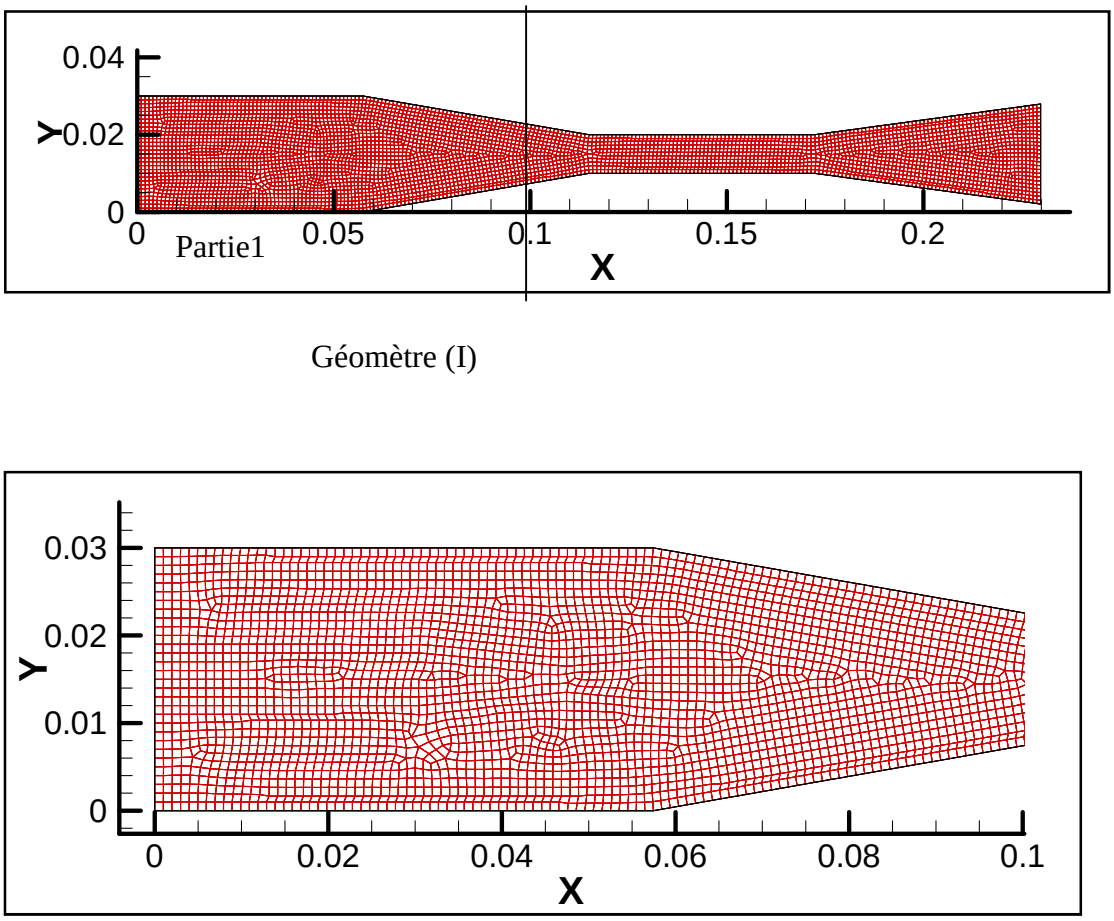


Figure IV-5 : Maillage de systèmes.

IV.6/Interprétation des résultats :

❖ ***Pour la position axiale :***

Pour mieux connue que ce passe dans l'éjecteur ; on a choisir des différents sections dans le système (la figure IV-6) et tracer la variation en déférents variables suivant la direction axiale.

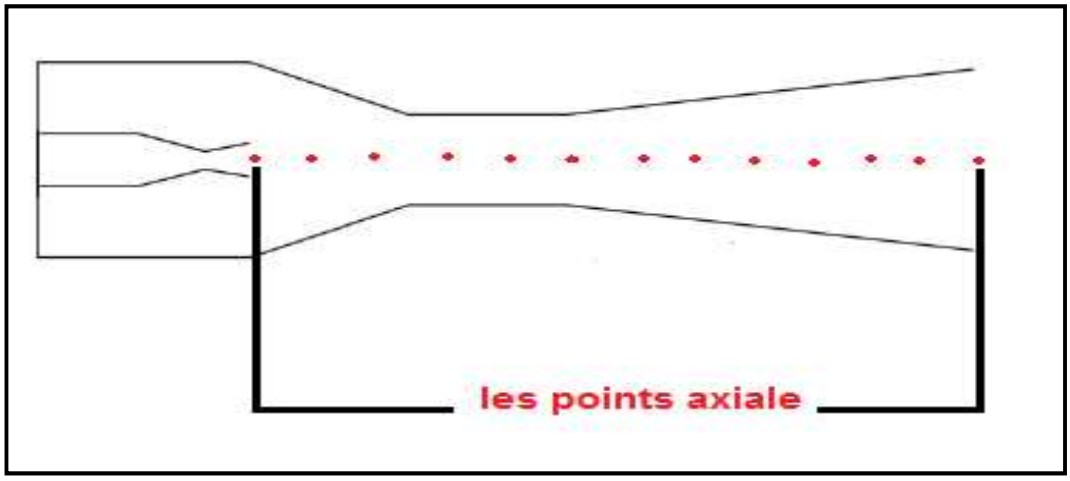
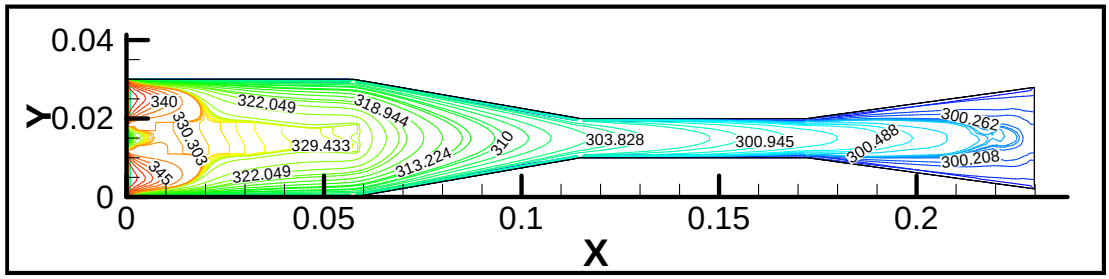


Figure IV-6 : présentation des points pour présenté ces résultats.

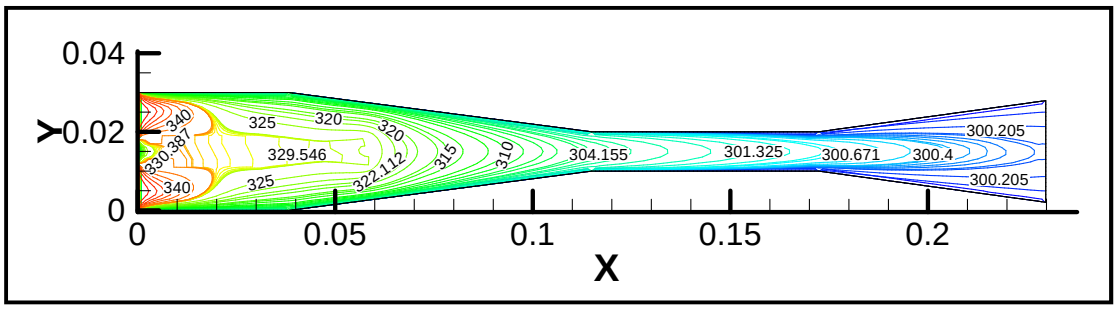
IV.6.1/ Champ de température :

Les figures suivantes représentent la variation de la température dans les différents éjecteurs (I; II; III; IV).

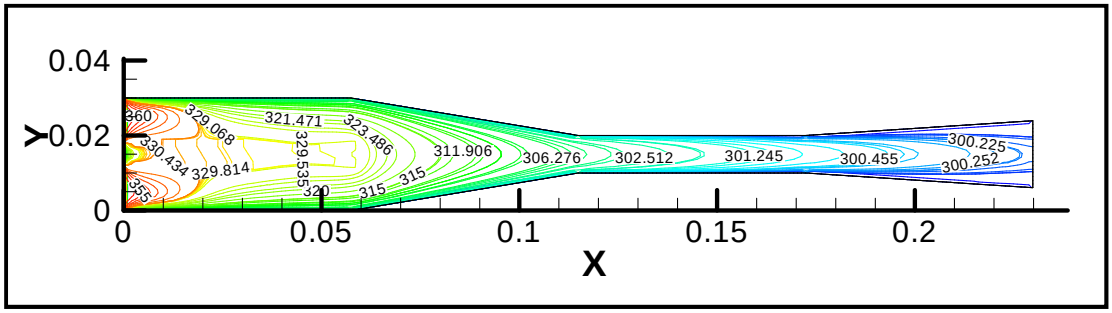


Géométre (I)

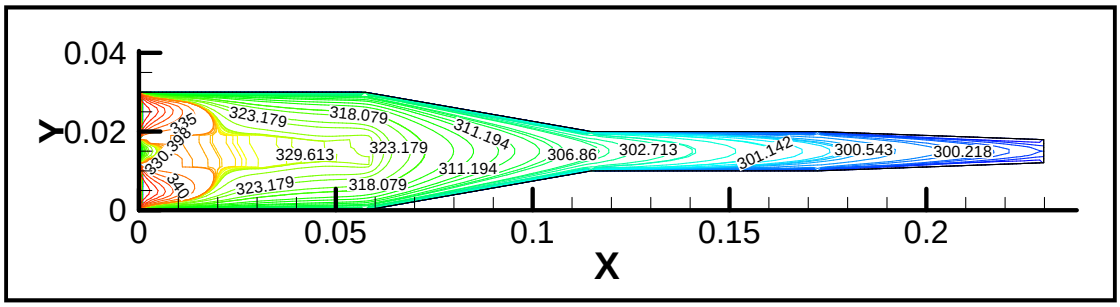
Figure IV-7 : Représentation spatiale de la température pour l'éjecteur (I).



Géomètre(II)



Géomètre (III)



Géomètre(IV)

Figure IV-8 : Représentation spatiale de la température pour les éjecteurs (II.III.IV).

IV.6.1.1/ Les profils des températures :

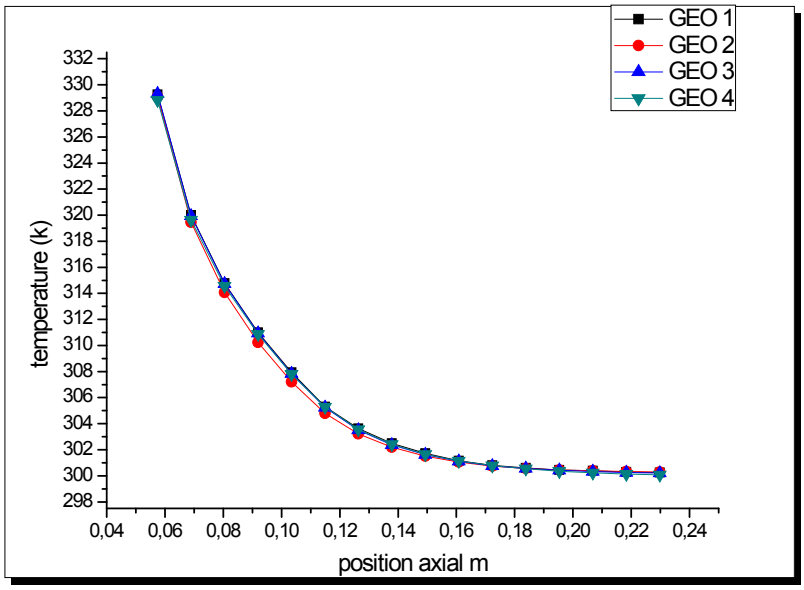


Figure IV-9 : Diagrammes des températures dans les différents géomètres des éjecteurs.

Interprétation et discussion des résultats :

La figure (IV-9) représente la variation de température de fluide en fonction de la coordonnée axiale pour les différentes géométries (G1 ; G2 ; G3 ; G4).

Nous constatons que les courbes sont très rapprochées dans les quatre éjecteurs, on peut dire alors que la modification proposée n'influence pas la température et donc la diffusion thermique.

La température diminuée après certains valeur, le graphe devient décroissent donc il ya un changement de température à transfert de chaleur entre les particules de fluide, donc on constat que dans ces la température est indépendamment à la variation géométrique et dynamique.

IV .6.2/ Champ de pression :

Les figures suivantes représentent la variation de la pression dans les différents points des éjecteurs.

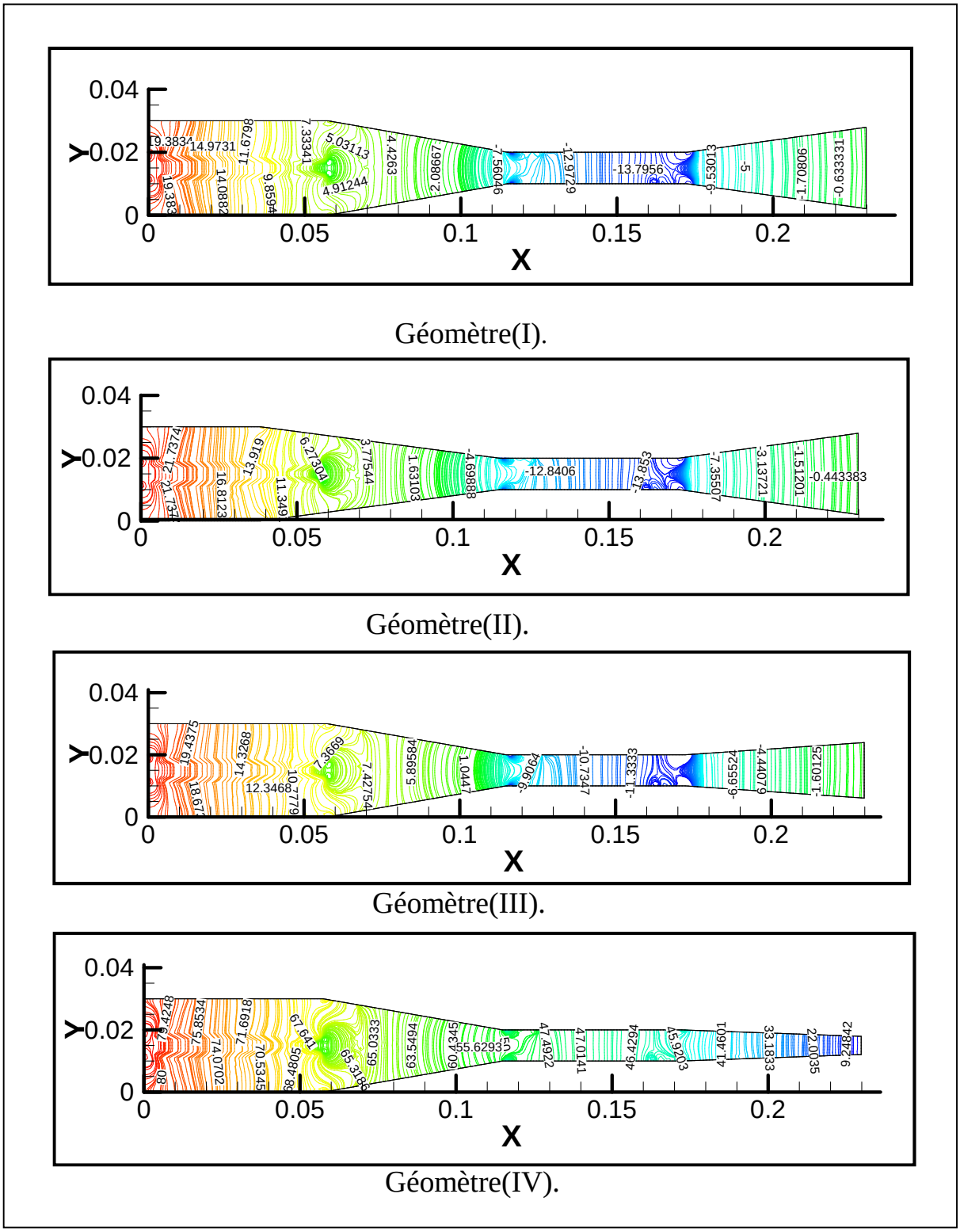


Figure IV-10 : Représentation spatiale de la pression pour les éjecteurs (I ; II ; III ; IV).

IV.6.2.1/ Les profils des pressions :

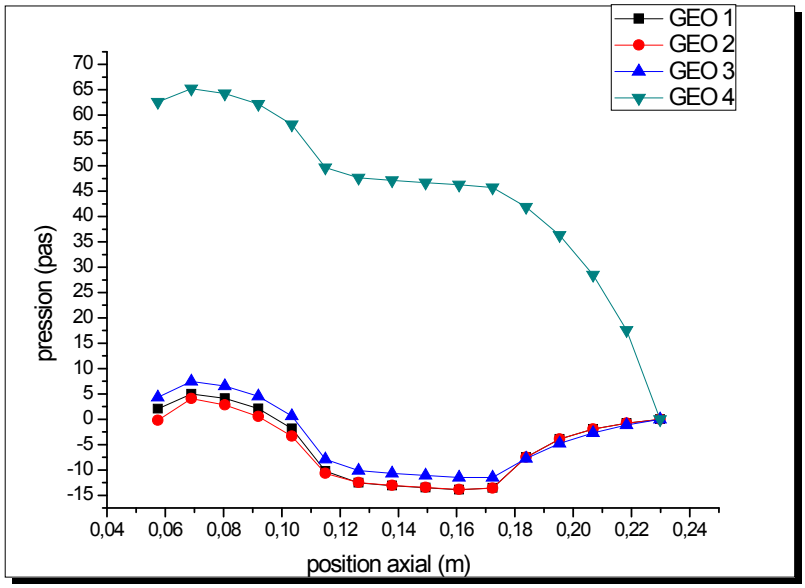


Figure IV-11 : profils des pressions axiales des cas étudier.

Interprétation et discussion des résultats :

La figure (IV-11) représente la variation de la pression en fonction des coordonnées axiale de différents géomètre (G1 ; G2 ; G3 ; G4)

D'après les graphes obtenus on remarque une augmentation de la pression pour les quatre géométries dans l'intervalle [0.06-0.07].

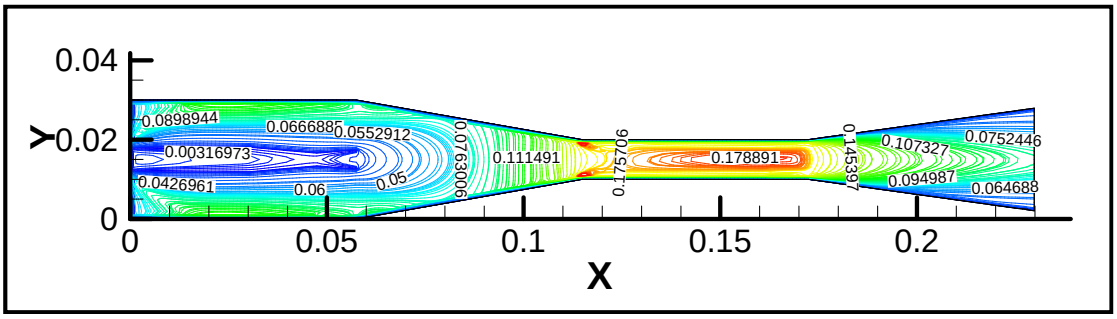
Dans l'intervalle [0.07-0.17] on remarque une diminution de pression pour les différents géométrie (G1 ; G2 ; G3 ; G4) jusqu'à des valeur constants [0.11-0.17] .

Un changement de pression dans l'intervalle [0.18-0.24] pour la géométrie (G1 ; G2 ;G3) , on remarque une augmentation de pression à cause une diminution la vitesse à la sortie de l'éjecteur et l'augmentation des interaction entre les particule de fluide (l'onde de choc) par contre pour la géométrie(G4) , la pression diminue à cause une augmentation de la vitesse.

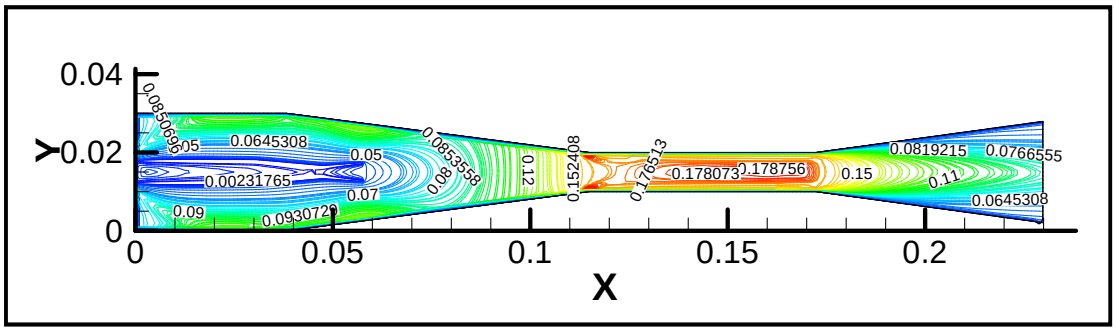
La diminution de pression causée par la divergence des parois et l'énergie cinétique. Dans l'éjecteur le siège d'écoulements très complexes du fait des nombreux phénomènes physiques qui entrent en jeu (interaction entre des flux supersonique et subsonique, chocs, mélange, instabilités, …).

IV.6.3/ Champ de vitesse :

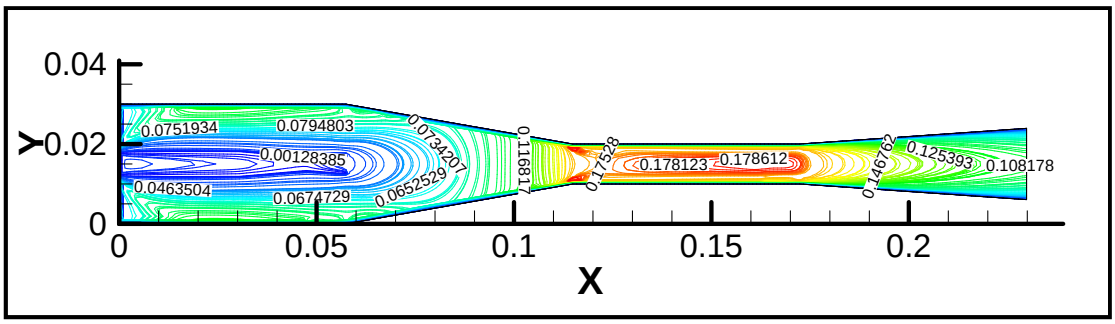
Les figures suivantes représentent la variation de la vitesse dans les différents éjecteurs (I ; II ; III ; IV).



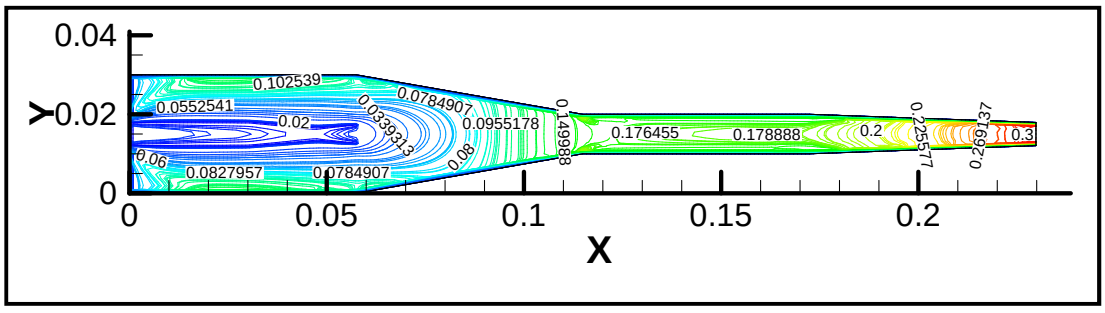
Géomètre(I).



Géomètre (II).



Géomètre(III).



Géomètre(IV).

Figure IV-12 : Représentation spatiale de la vitesse pour les éjecteurs (I ; II ; III ; IV).

IV.6.3.1/ Les profils des vitesses :

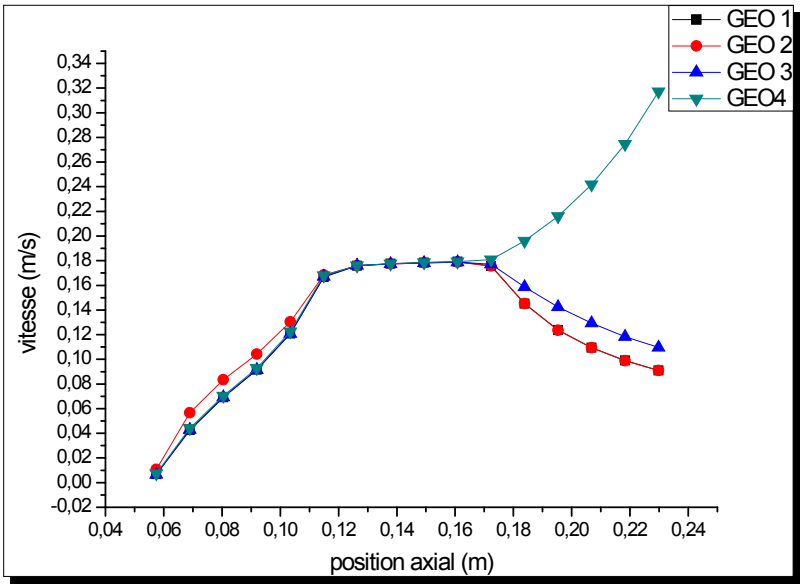


Figure IV-13 : Diagrammes des vitesses dans les différents des éjecteurs.

Interprétation et discussion des résultats :

La figure (IV-13) représente la variation de vitesse en fonction des coordonnées axiale pour les quatre géométries différents dans la géométries (G1 ;G2 ;G3) on constant que pas de grand différance entre les graphe , puisque il sont très rapproché la vitesse augmente jusqu'à à un valeur maximale puis la vitesse prendre des valeurs constante dans l'intervalle [0.11-0.17].

Une augmentation de la vitesse pour la géométrie (G4) à l'intervalle [0.17-0.23] au contraire pour les géométries (G1 ; G2 ; G3) on remarque d'après le graphe une diminution de la vitesse dans le même intervalle, à cause de l'augmentation de la vitesse.

Une diminution de champ de vitesse, cause à la divergence des parois d'éjecteur

Si on à un élargissement sur la géométrie on constant un augmentation des perte des charges et perte thermiques ainsi que la vitesse s'écoule avec des valeurs moyennes on contraire, si on à une diminution de taille des géométries ; la vitesse s'écoule avec des valeurs maximum au niveau de col, les pertes des charges et pertes thermiques sera diminuées.

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que la géomètre jeu un grand rôle sur la performance dynamique de l'éjecteur.

❖ Pour la position transversale :

Pour métrisé les aspis était à la fusion dynamique de à travail de l'éjecteur on a proposé de valaient la variation de la vitesse transversale pour les trois positions à travail le col (mélangeur) (la figure IV-15).

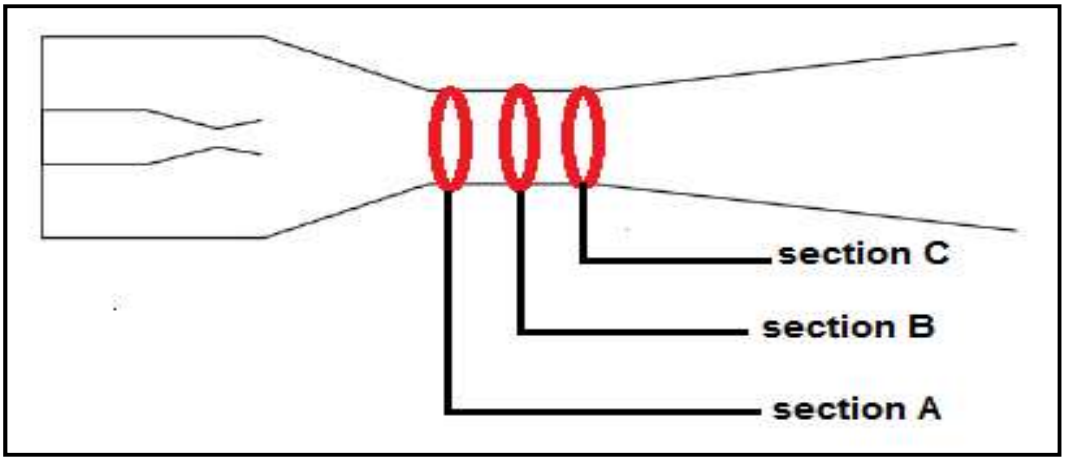


Figure IV-14 : Présentation schématique des différentes sections pour présenter les résultats.

IV.6.4/Les profils des vitesses :

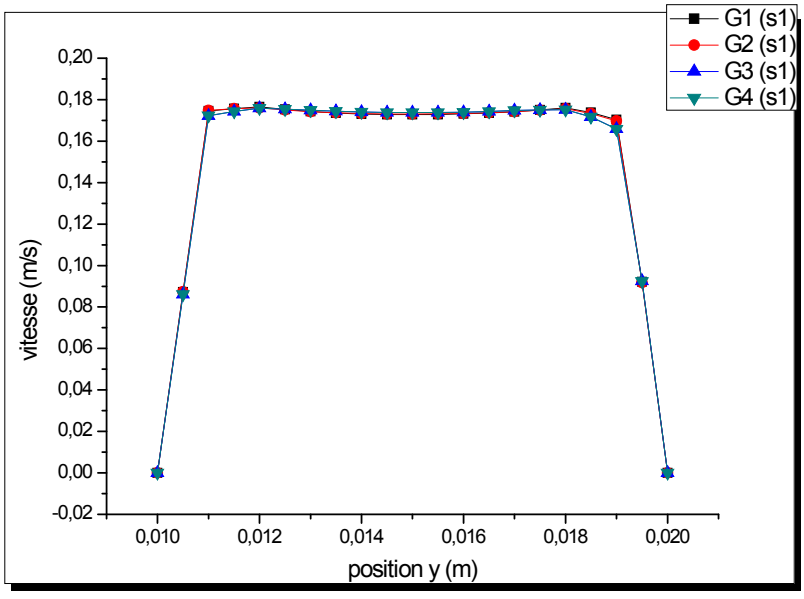
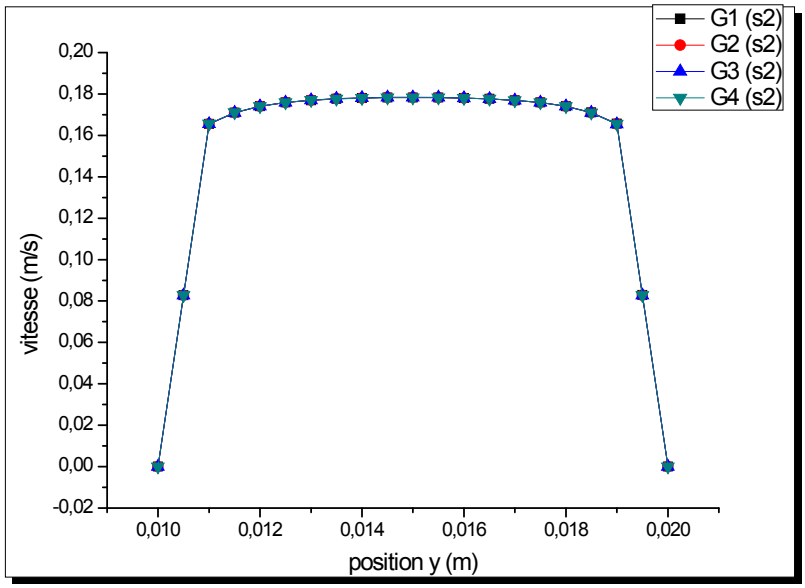
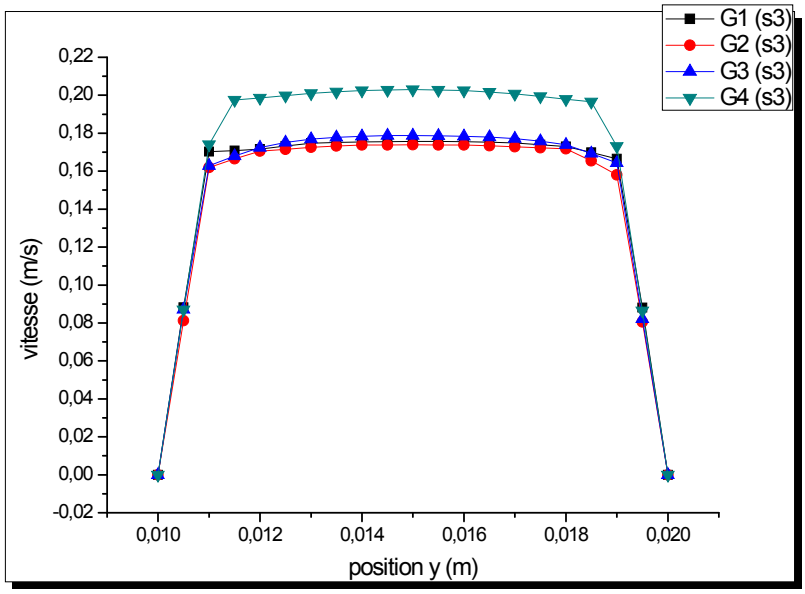


Figure VI.15: Profils de vitesse pour section (A) dans les différents des éjecteurs (I ; II ; III ; IV).



Section B



Section C

Figure VI-16: Profils de vitesse pour les deux sections (B ; C) pour les quatre géométries (I ; II ; III ; IV).

- ***Interprétation et discussion des résultats :***

Suivant la direction transerversale de l'écoulement de champs de vitesse on peut voir :

Pour les quartes géométries la vitesse augmente jusqu'à une valeur maximal dans les trois section (A ;B ;C) on la diffusion de fluide et la convergence des parois puis prend des valeur constant sauf dans la section (C) , la géomètre (G4) la vitesse prend une valeur maximale par rapport les autres lorsque la pression est diminuée à cause des force s frottements due au parois entre les particules de fluide (l'onde de choc) , à la sortie de l'éjecteur .

La vitesse diminuée pour les quatre géométries dans les trois sections cause à la divergence des parois d'éjecteurs (couche limite).

IV.7/étude explicative :

A/ pour la vitesse primaire :

Dans cette étude on va changer la vitesse primaire et la vitesse secondaire constante dans la géométrie (I) de l'éjecteur.

IV.7.1/Champ de température :

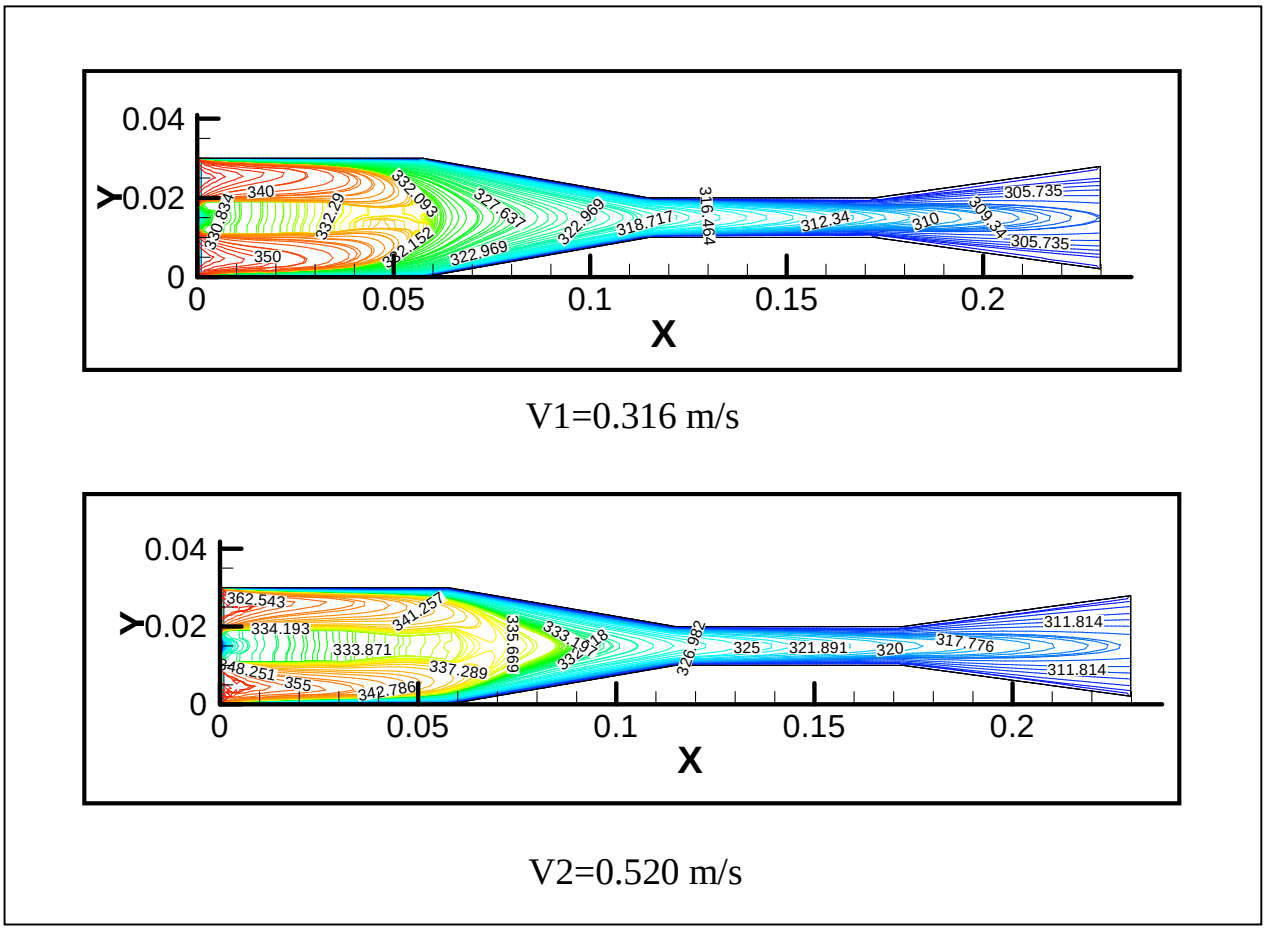
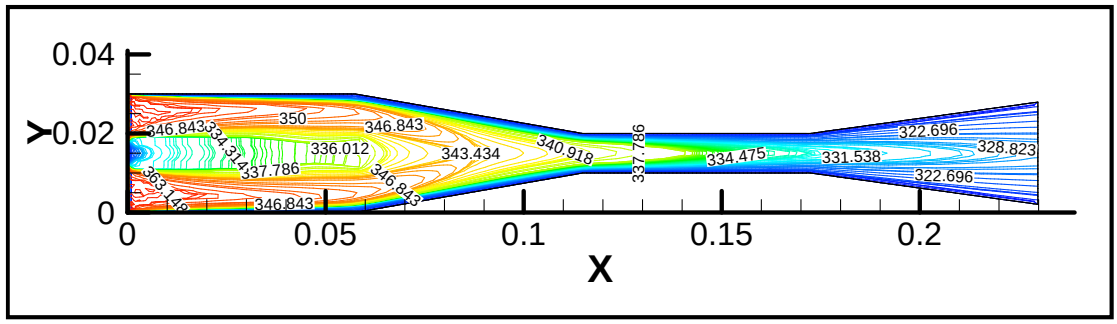


Figure IV-17 : Représentation spatiale de la température pour la différente de vitesse.



V3=1 m/s

Figure IV-18 : Représentation spatiale de la température pour la vitesse (v3=1 m/s).

IV.7.1.1/Les profils des températures :

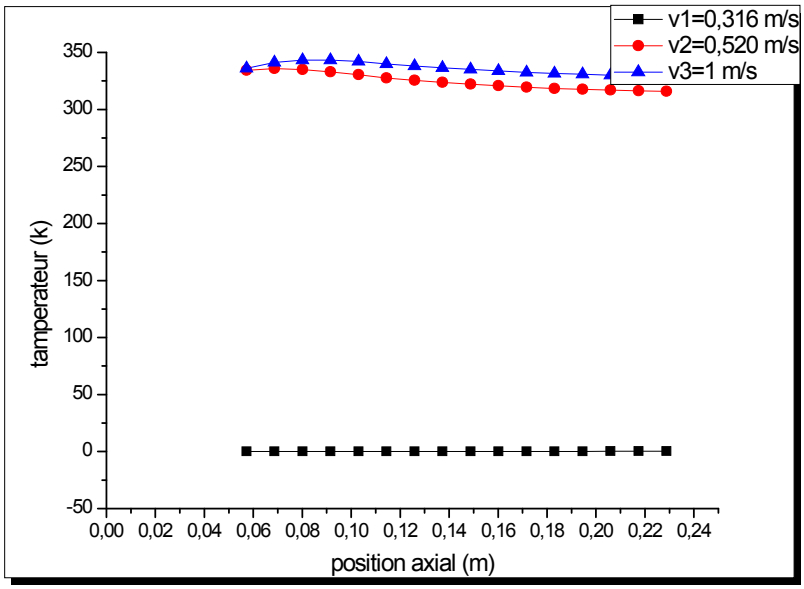


Figure IV-19 : Profils des températures dans les différentes vitesses.

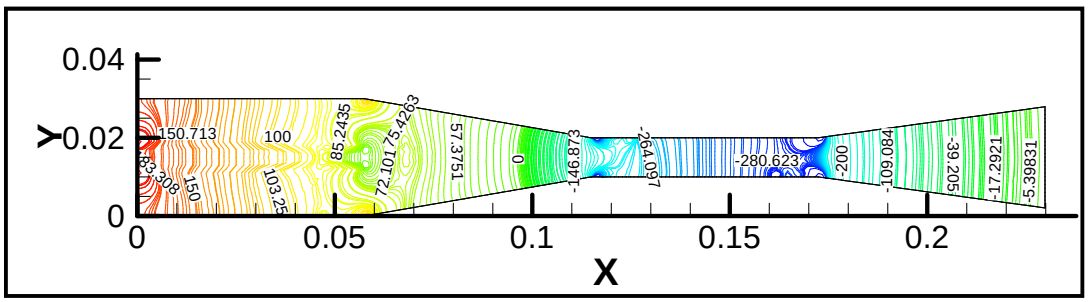
- ***Interprétation et discussion des résultats :***

La Figure (IV-20) représente la variation de la température en fonction de la coordonnée axiale (x) pour les trois différentes vitesses primaires.

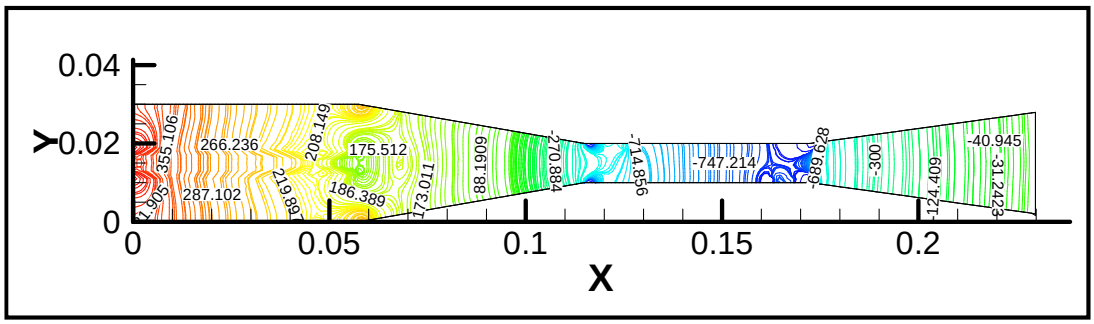
Et à partir les résultats obtenus dans la figure (IV-20) on observe que dans la vitesse 2(v2=0.520 m/s)et vitesse 3 (v3=1 m/s) la température reste constante au long de l'axe des (x)

et on remarque que la température dans la vitesse 1 (v1=0.316 m/s) reste approximativement constant.

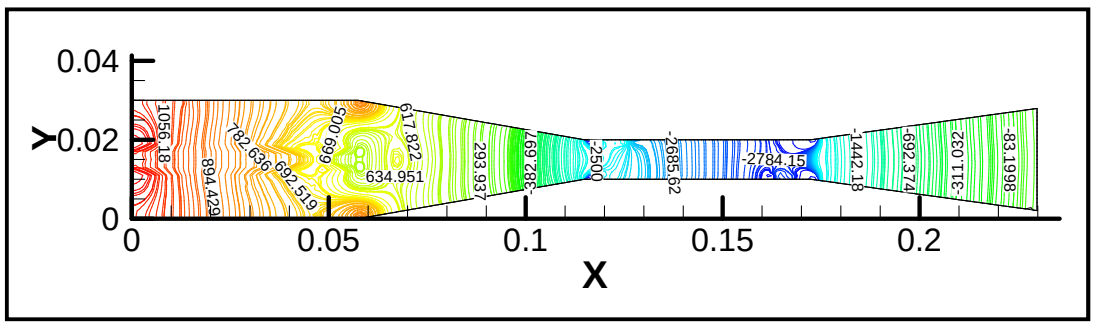
IV.7.2/Champ de pression :



V1=0.316 m/s



V2=0.520 m/s



V3=1 m/s

Figure IV-20 : Représentation spatiale de la pression pour différente vitesse.

IV.7.2.1/Les profils des pressions :

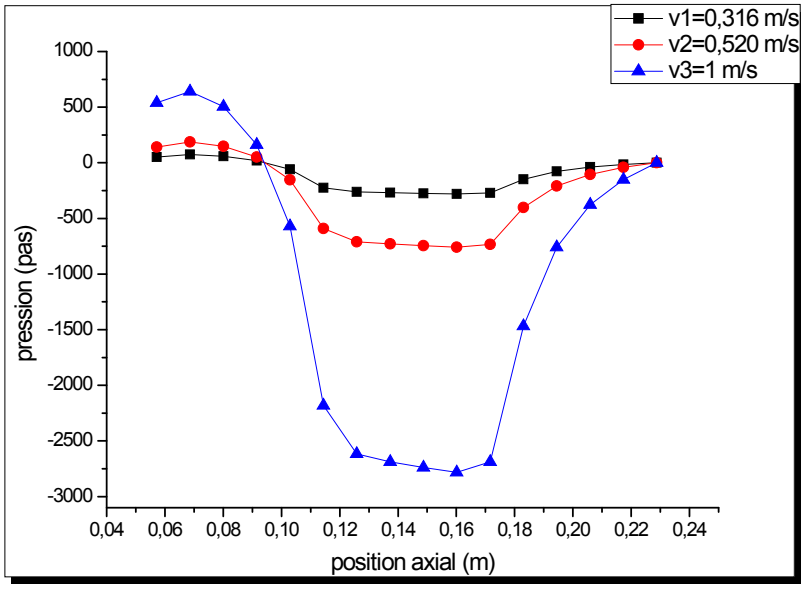


Figure IV-21 : variation de pression en fonction de la position axiale à plusieurs vitesses primaires pour la géomètre (I) de l'éjecteur.

Interprétation et discussion des résultats :

La Figure (IV-22) représente la variation de la pression en fonction de la coordonnée axiale (x) pour les trois différentes vitesses primaires de la géomètre(I).

D'après la lecture de la figure (IV-22) on ressortit une diminution de la pression lié à une augmentation de vitesse primaire.

IV.7.3/Champ des vitesses:

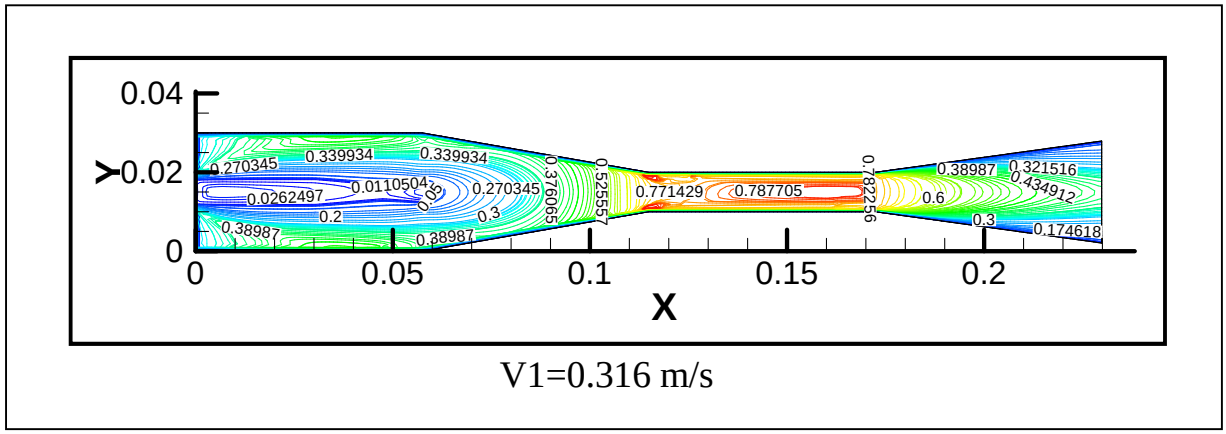


Figure IV-22: Représentation spatiale de la vitesse pour la vitesse primaire (v1=0.316 m/s).

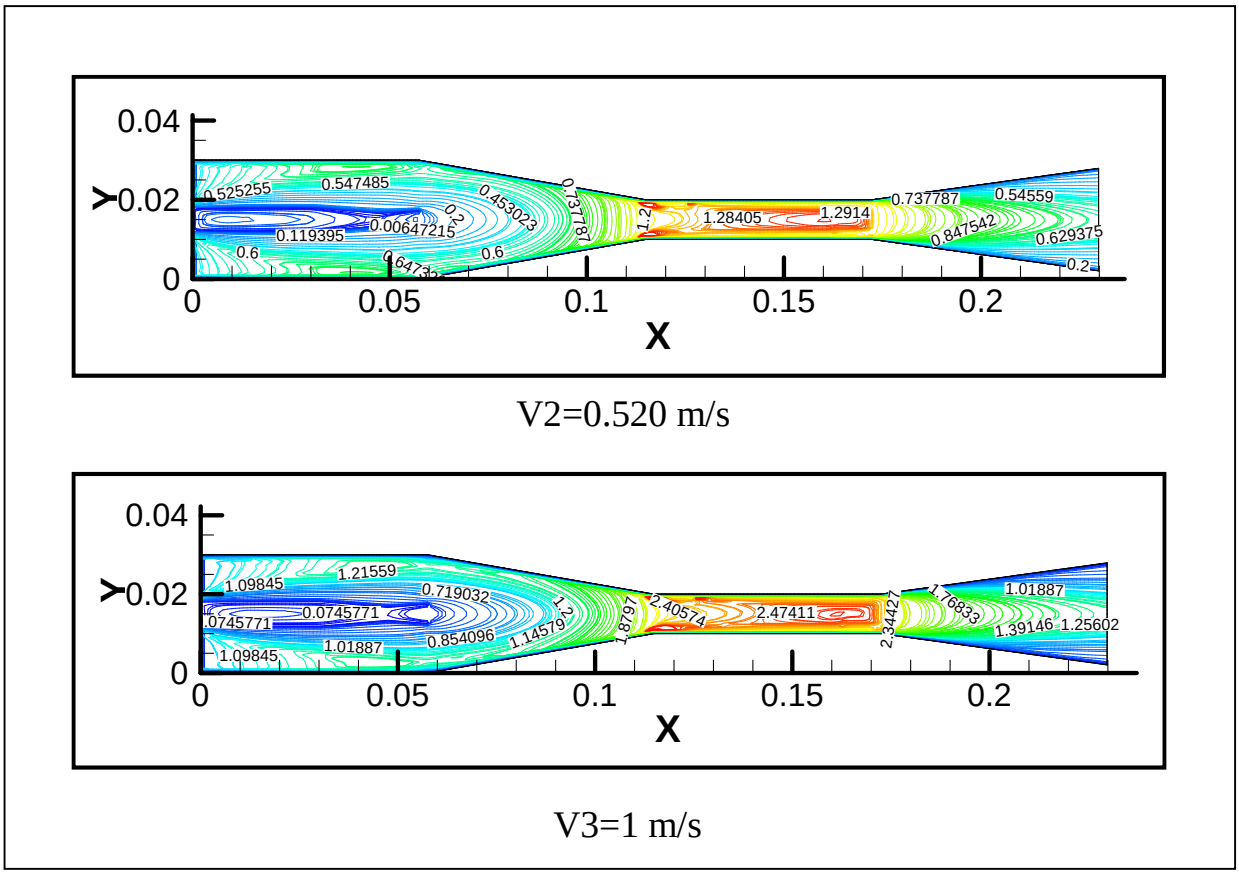


Figure IV-23 : Représentation spatiale de la vitesse pour la différente de vitesse primaire.

IV.7.3.1/Les profils des vitesses :

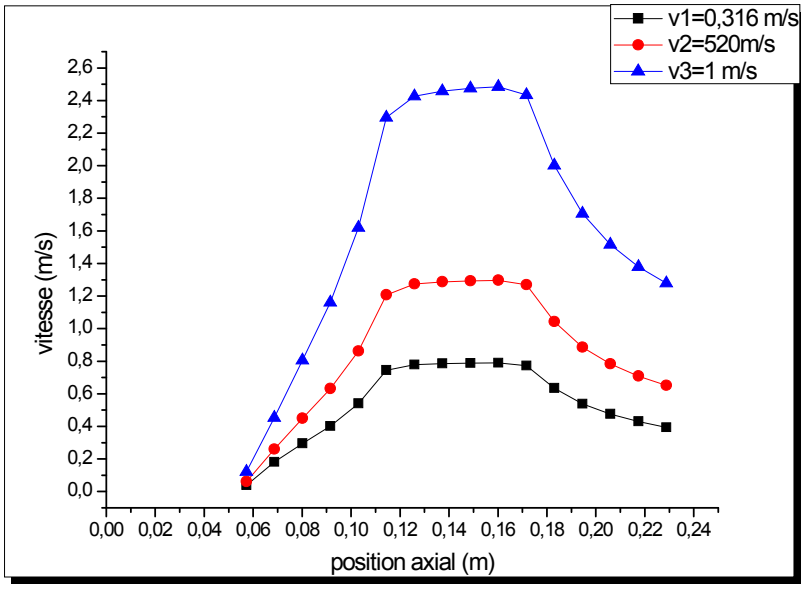


Figure IV-24 : variation de vitesse en fonction de la position axiale à plusieurs vitesses primaires pour la géomètre (I) de l'éjecteur.

- ***Interprétation et discussion des résultats :***

La Figure (IV-25) représente la variation de la vitesse en fonction de la coordonnée axiale (x) pour les trois différentes vitesses primaires de la géomètre(I).

A noter par la courbe qu'il existe une augmentation de la vitesse comme cela a changé chaque fois que la vitesse primaire et une plus grande vitesse de fluide augmentée dans la géomètre de l'éjecteur.

B/ pour la vitesse secondaire :

Dans cette étude on va changer la vitesse secondaire et la vitesse primaire constante dans la géométrie (I) d'éjecteur.

IV.7.4/Champ de température :

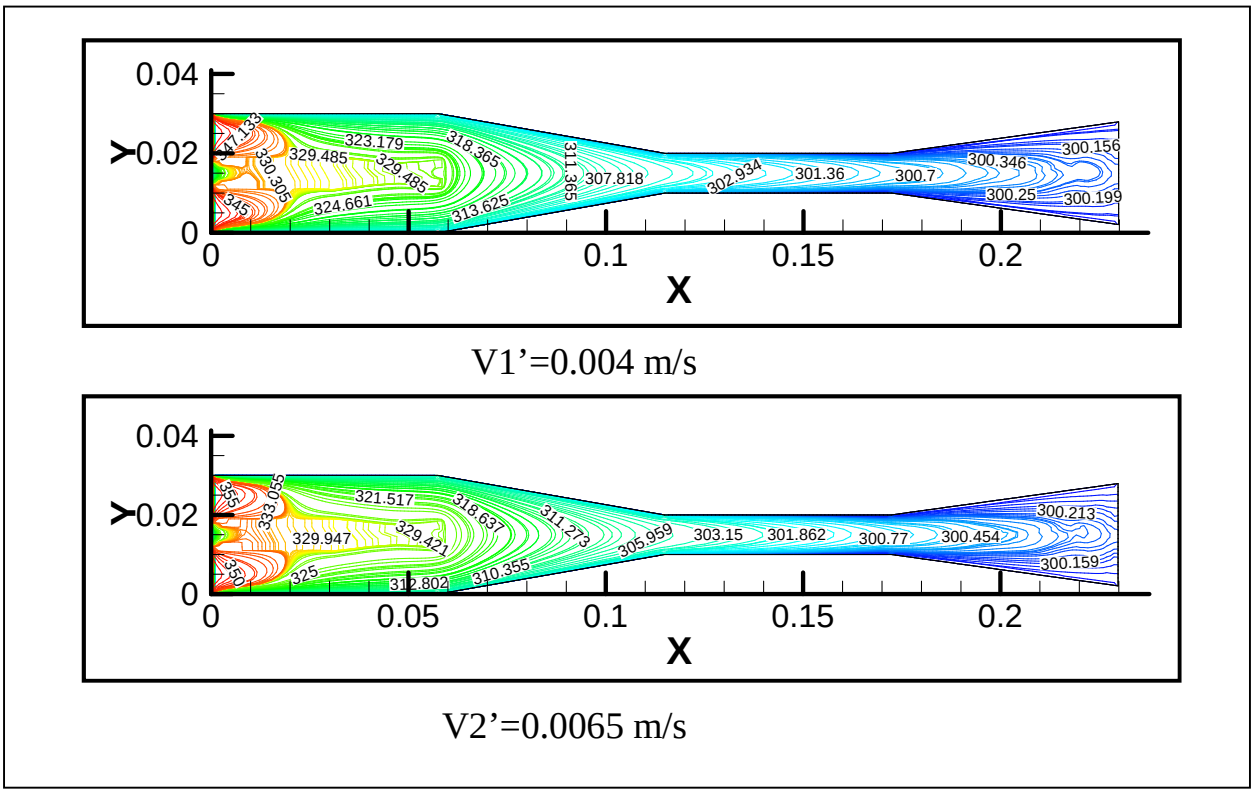
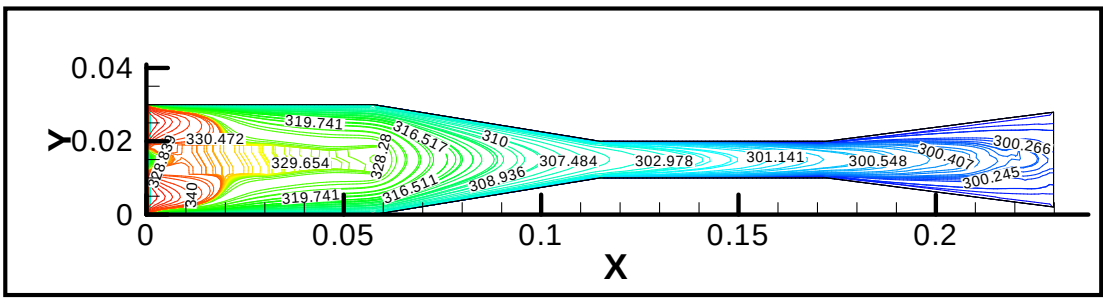
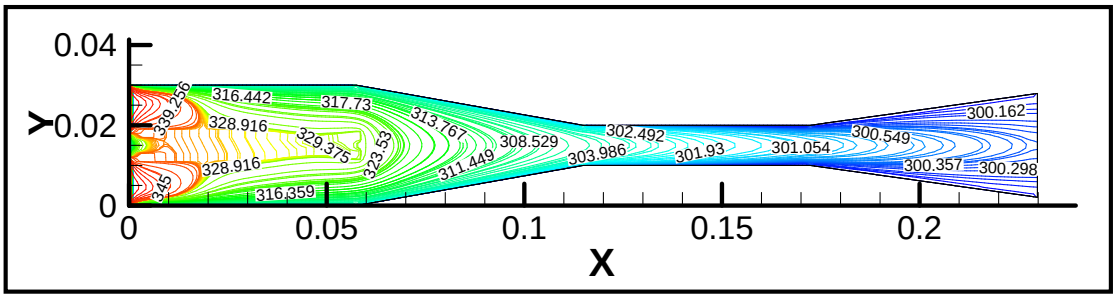


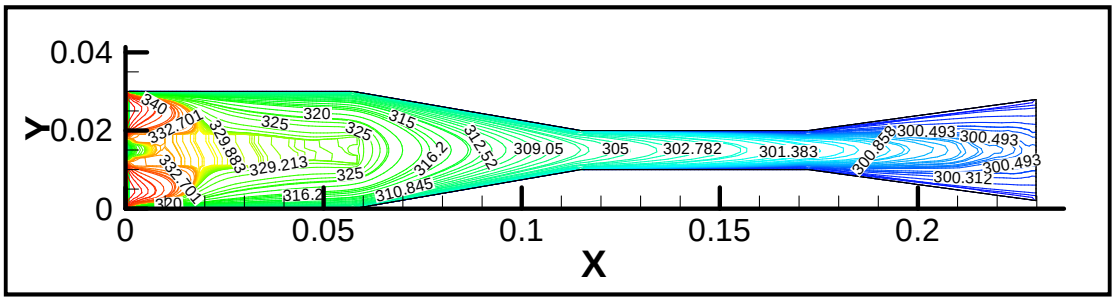
Figure IV-25 : Représentation spatiale de la température pour la différente de vitesse secondaire (v1'=0.004 m/s ; v2'=0.0065 m/s).



V3’=0.009 m/s



V4’=0.03 m/s



V5’=0.06 m/s

Figure IV-26: Représentation spatiale de la température pour la différente de vitesse secondaire.

IV.7.4.1/Les profils des températures :

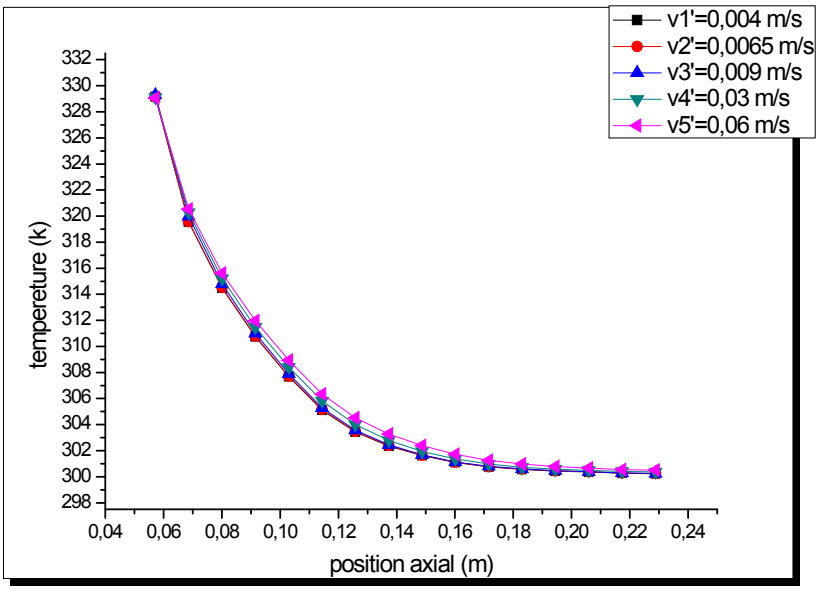


Figure IV-27 : variation de température en fonction de la position axiale à plusieurs vitesses secondaire pour la géomètre (I) de l'éjecteur.

- ***Interprétation et discussion des résultats :***

La figure (IV-28) représente la variation de température en fonction de la position axiale pour différent vitesse secondaire. D'après les résultats blennies les variations de champ de température s'indique seulement si on a un rencontre de fluide puis il reste constant au long d'éjecteur alors la température ne dépond pas à la chaque vitesse.

IV.7.5/Champ de pression:

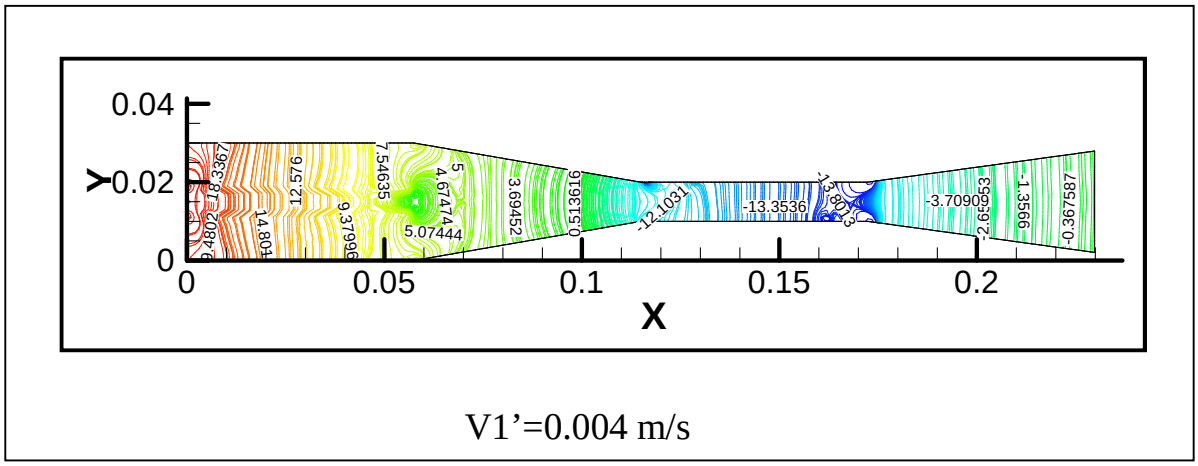
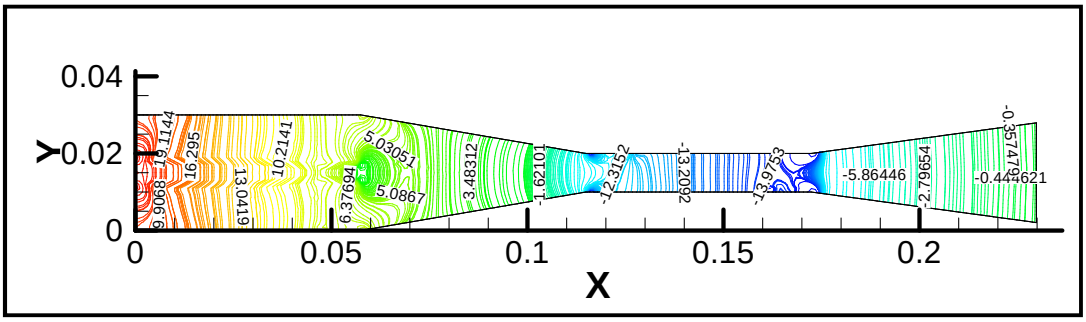
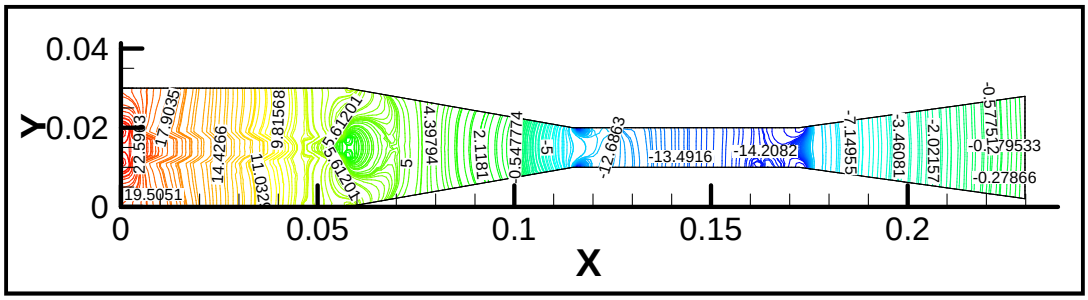


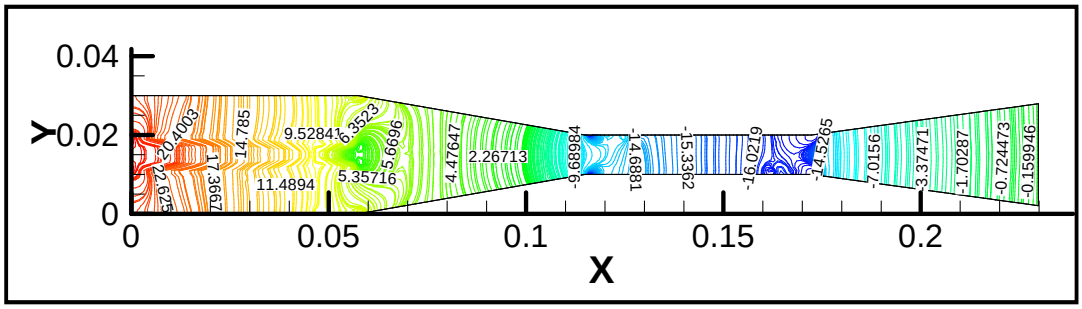
Figure IV-28 : Représentation spatiale de la pression pour la différente de vitesse secondaire (V1'=0.004 m/s).



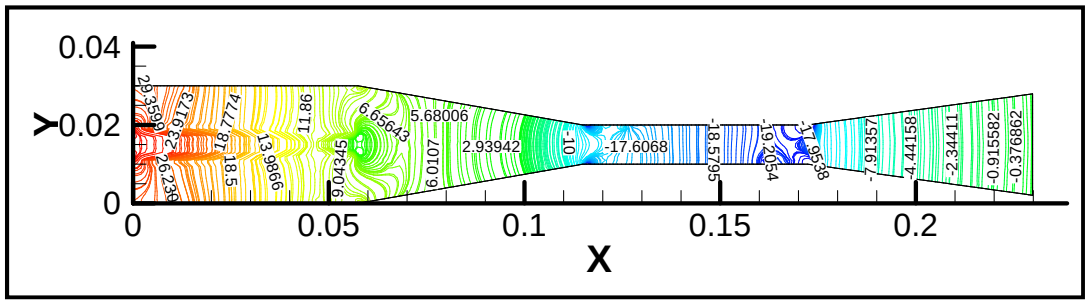
V2’=0.0065 m/s



V3’=0.009 m/s



V4’=0.03 m/s



V5’=0.06 m/s

Figure IV-29 : Représentation spatiale de la pression pour la différente de vitesse secondaire.

IV.7.5.1/Les profils des pressions :

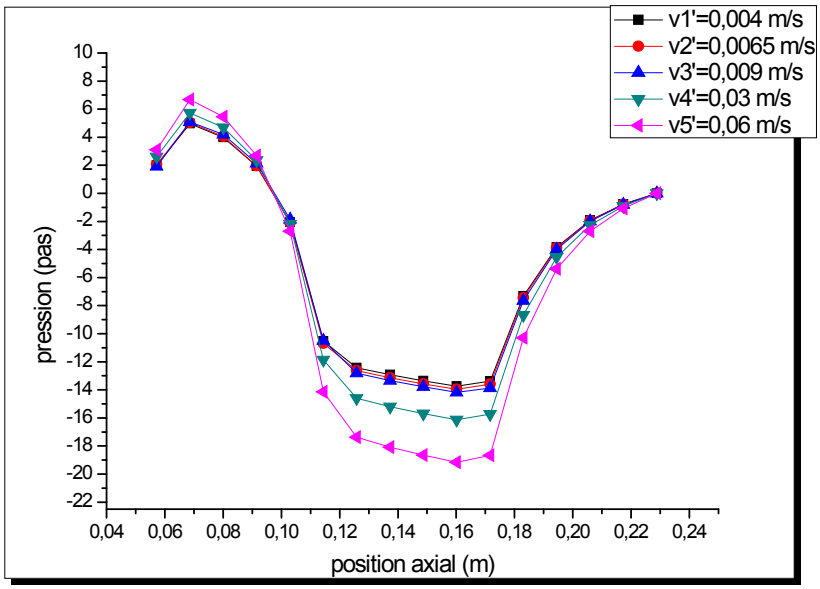


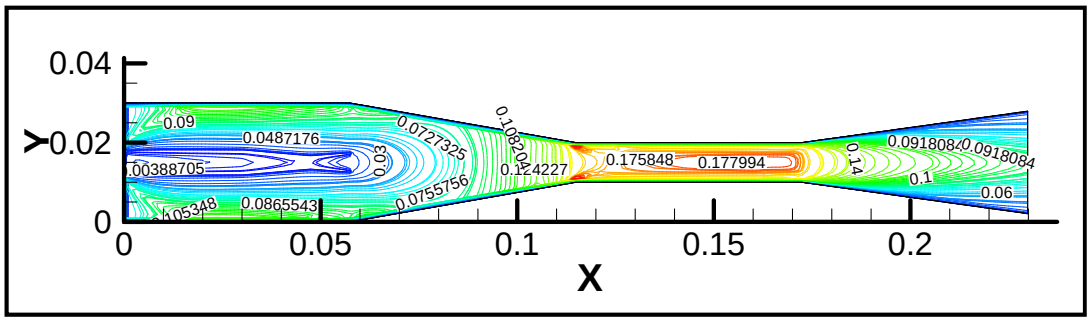
Figure IV-30 : variation de pression en fonction de la position axiale à plusieurs vitesses secondaire pour la géomètre (I) de l'éjecteur.

Interprétation et discussion des résultats :

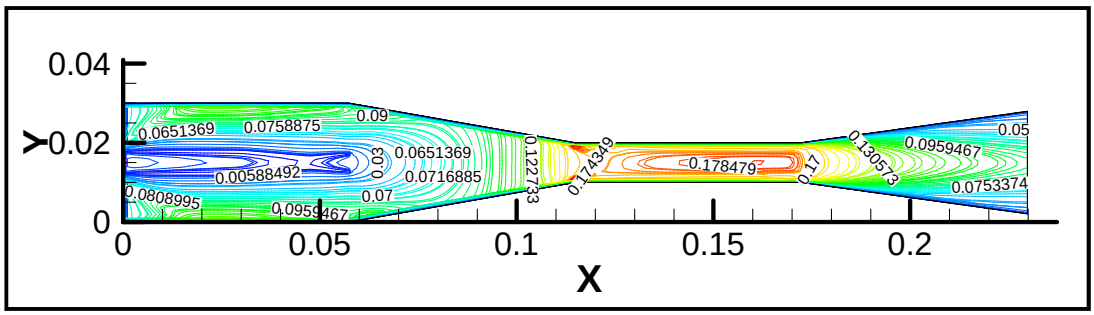
La figure (IV-11) représente la variation de pression en fonction de la position axiale pour la différente vitesse secondaire de la géomètre (I).

On remarque un chute de pression pour chaque vitesse secondaire prend même couse, presque la même valeur la diminuassions de pression causé par la divergence des parois et l'énergie cinétique.

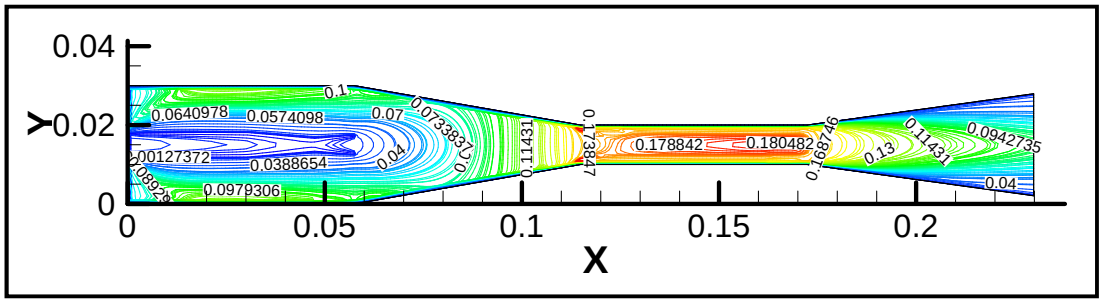
IV.7.6/Champ de vitesse :



V1'=0.004 m/s



V2'=0.0065 m/s



V3'=0.009 m/s

Figure IV-31: Représentation spatiale de la vitesse pour la différente de vitesse secondaire.

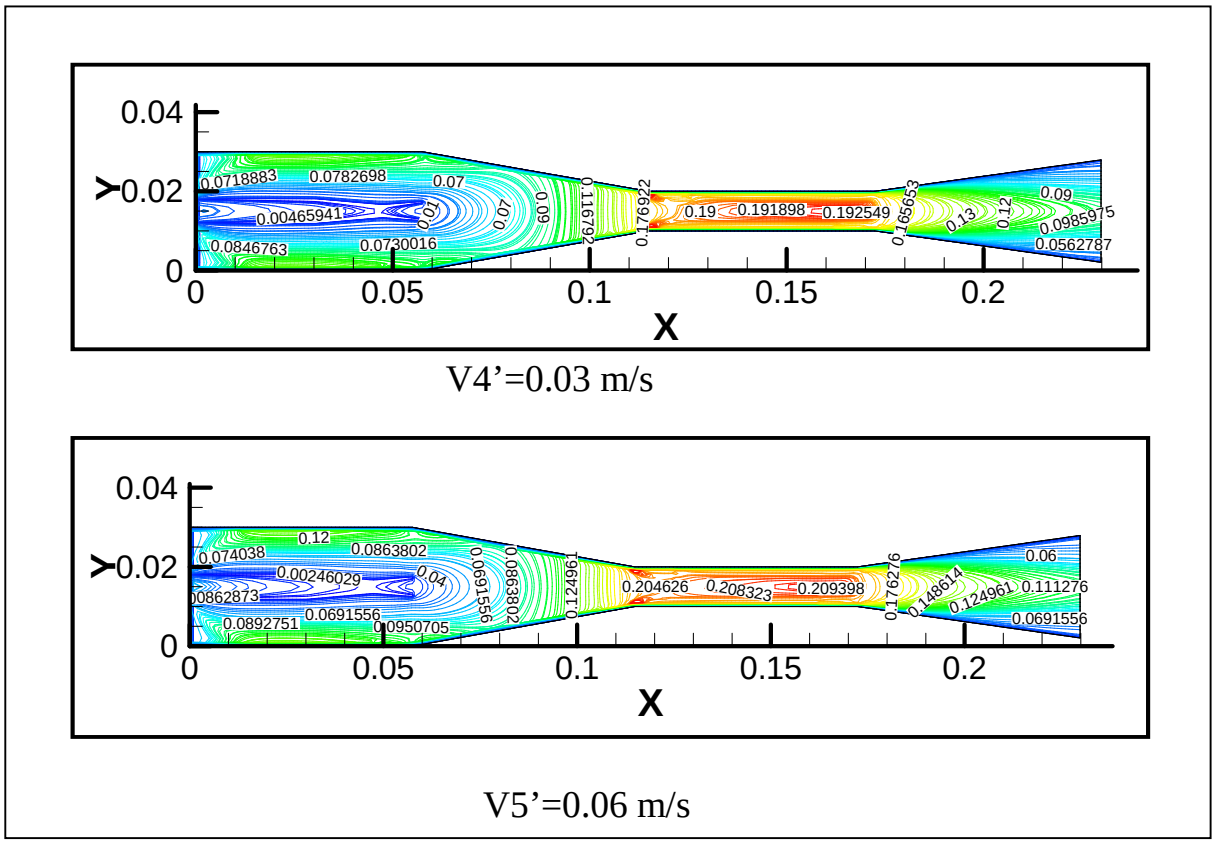


Figure IV-32: Représentation spatiale de la vitesse pour la différente de vitesse secondaire (V4' et V5').

IV.7.6.1/Les profils des vitesses :

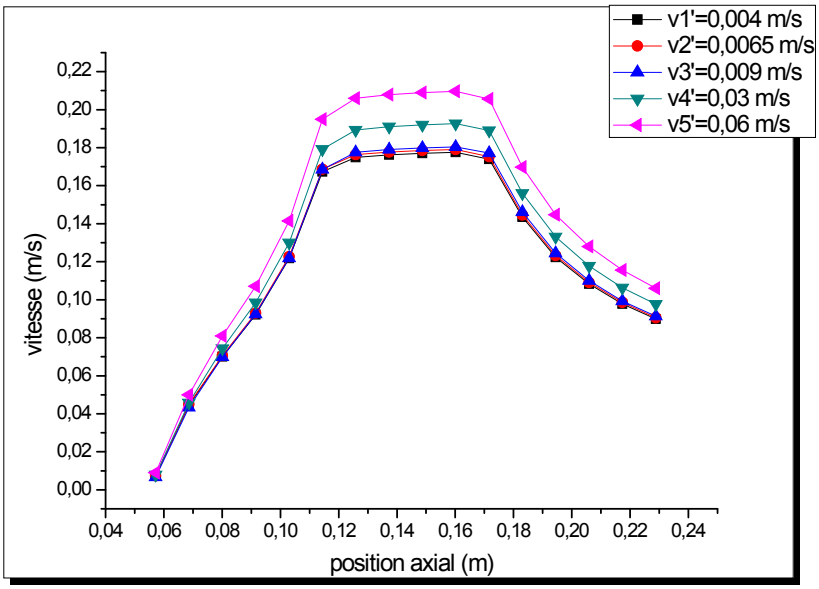


Figure IV-33 : variation de vitesse en fonction de la position axiale à plusieurs vitesses secondaire pour la géomètre (I) de l'éjecteur.

- ***Interprétation et discussion des résultats :***

La figure (IV-11) représente la variation de vitesse en fonction de la position axiale pour la vitesse secondaire de la géomètre (I).

On remarque la vitesse pour chaque variation de vitesse secondaire la même courbe on (v1' ; v2' ; v3') presque la même valeur, augmentation de vitesse dans la vitesse (v4' et v5)' couse par la convergent des parois et énergie cinétique.

*IV.8/*Conclusion :

Ce chapitre était consacré à l'analyse des modèles numériques des différents géomètres d'éjecteur développés sous l'ANSYS.

D'après les résultats : on peut conclure que la géométrie jeu un rôle très important sur la performance de l'éjecteur.

Par contre la géométrie n'influx pas largement sur la température des vapeurs tournant dans l'éjecteur.

Conclusion générale

Dans le présent travail en a étudie numériquement par éléments finies l'écoulement conjugué au transfert de chaleur dans des géométries différentes de la tuyère convergente divergente, ainsi que l'étude de l'influence des paramètres dynamiques et géométrique sur les performances de l'éjecteur. Par l'analyse des résultats de simulation des différents cas étudié, on conclure que :

- La géométrie joue un rôle dans importants pour la performance des éjecteurs.
- La vitesse primaire d'entré de l'écoulement joue un rôle primordiale sur le phénomène de compression de fluide.
- La géométrie de tuyère divergente favorise mieux la compression.

Référence bibliographique

[1] : DAOUD KHADIDJA ; BOUGAMRA KARIMA, *" Étude numérique de la compression par un éjecteur"*, Master 2012/2013.

[2] : STOUTAH MALIKA ; BOUZIANI SAIDA, *"l'analyse numérique de la performance d'un éjecteur dans un évaporateur thermique à vapeur"*, Master 2013.

[3] : BENBIA LEILA, *" éjecteur à vapeur d'eau pour la réfrigération : étude, simulation et dimensionnement "*, Mémoire magister, université de Batna, 2012/2013.

[4] : ABDELHAKIM LIMANE, *" étude numérique d'un système de réfrigération à éjecteur"*, Mémoire magister université M'hamed BOUGARA, boumerdes, 25/06/2009.

[5] : http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/technologies-du-vide-42175210/ejecteurs-b4250/#pesp.

[6] :SCHMITT (H), *"diversity of jet pumps and ejector techniques 2nd symposion en jet pumps and ejectors and gaz lift techniques Cambridge"*, 24 et 26 mars 1975.

[7] : HARRELL.GS, K.A, *"performance tests of a two-phase ejector , proceedings of the intersocirty energy conversion engineering conference"*,(1995),(pp.49-5).orlando.

[8] : PLUVIOSE (M) et PERILHON(C),*" turbomachines description principes de basse [BM4280] machine hydrauliques et thermiques "*, 2002.

[9] : MERZAK MEDJAR,*"étude de la production de froid par éjecteur fonctionnement avec de la vapeur d'eau produit par une chaudiére solaire"*, Mémoire magister université M'hamed BOUGARA, boumerdes, 24/06/2009.

[10] : Denso, ejector cycle, http://www.globaldenso.com/en/environment/story/nol/2par.html.

[11]: J.H.KEENAN, E.P. An inverstigation of ejector design by analysis and axperiment.*"Journal of applied Mechanics"*(pp.299-241).http://www.greenloco .com/Greenloco°/°20, (1950).

[12] : S.B. Riffat, S.a. (2001).CFD modeling and experimental invertigation of an ejector refrigeration system using methanol as the working fluid. *"international journal of energy research int",* (pp.115-128).

[13] : IW.EAMES, S.APHORNRATANA, H.HAIDER,*"A theoretical and experimental study of a small-scale steam jet refrigerator .int ",* J Refrig 1995; 18(6): pp (378-86).

[14] : S.A.KANJANAPON CHUNNANOND, *"ejectors: application in refrigeration technology .renewable and sustainable energy"* , (pp.129-155),2004.www.elsevier.

[15] : S.A. KANJANAPON CHUNNANOND, *"an experimental invertigation of a steam ejector refrigerator: the analysis of the pressure profile along the ejector "*.elsevier ltd.*2003*

[16] : J.C.SPEIGHT, *"Perry's standard tables and formulas for chemical engineers"*,publié par McGraw-Hill professional.2003.

[17] : ANDRE LALLEMAND,LATRA BOUMARAF, *"modeling of an ejector refrigerating system operating in dimensioning and off-dimensioning conditions with the working fluids R142b and R600a:applied thermal engineering",* (29-2009),(pp: 1087–1093).

[18] : ANDRE LALLEMAND, LATRA BOUMARAF, *"comportement d'un éjecteur dans des conditions de fonctionnement nominales et non nominales "*,12émes journées internationales de thermique .Tanger.2005.

[19] : Z.AIDOUN, M.OUZZANE, *"the effect of operating conditions on the performance of a supersonic ejector for refrigeration international journal of refrigeration"*, volume 27 Issue 8 December 2004, pages (974-984).

[20] : B.J.HUANG, J.C, *"empirical correlation for ejector design .international journal of refrigeration",* (*1999*), (pages: 379-388).

[21] : MELOUKI OMAR, MESBAH ABDERRAOUF,*"étude numérique comparative de l'influence entre des tubes carré et cylindrique d'un faisceau aligné, sur les performances thermique d'un échangeur tube et calandre", Mémoire master (2013/2014).*

[22] : J.B.CHARCOT, *"la seconde croisière du : pourquoi-pas?",* au groenland, 1931.

[23] : T.J CRAFT, *«development in a low-Reynolds number second-moment closure and its application to separating and reattachinghlows*", international journal of heat and fluid flow.(pp:541-548),(1998).

[24] : S.BENHAMADUCHE, N.JARRIN, D.LAURENCE, "*synthetic turbulent inflow condition for large-eddy simulation*", turbulence, heat and mass transfer 4. (2003).

[25]:http://www.sciences.univnantes.fr/sites/claudesaintblanquet/synophys/45nef.lu/45meflu.htm#312.

[26] : http://www.springer.com/978-3-642-39509-3.

[27] : C.MENEVEAU, K.R.SREENIVASAN.J, *"the multifractal nature of turbulent energy dissipation "*, fluids mach, vol .224, (1991), page: 499.

[28] : E.SZECHENYI,*" simulation de nombre de Reynolds élevés sur un cylindre en soufflerie"*, la recherche aérospatiale 1974-3,page :155.(1974).

[29] : J.DELOUR, J.FMUZY, A.ARNEODO, "*intermittency of one dimensional velocity spatial profiles in turbulence: a magnitude cumulant analysis"*, Eur. Phys .J.B-vol.23 (2001).page:243.

[30] : J.L.ESTIVALEZES; *"notes de cours"* ,26 novembre 2006.

[31] : http://13mgp.13m.univmrs.fr/siteperso poncet/ensergnement/cours-thermo.pdf.

[32] : Journal homepage epthermeng.

[33] : EMMANUEL LEVEQUE,"*contributions à la description de l'agitation turbulente d'un fluide visqueux incompressible "*, université CLAUDE BERNARD lyon1, le 10 décembre 2004.

[34] : G.GLUSHCO, *"turbulent boundary layer on a flat plate in an incompressible fluids invest "*, acad.nawk.SSSEMEKHNOY,(1965).

[35] : W.P.JONES, B.E.LAUNDER, *"the prediction of laminarization with two equation model of turbulence "*, INT.JL.heat mass transfer, vol .15(n°2); pages: 301-314, (1972).

[36] : http://gev.industrie.gouv.fr/gev-necaflu/necaflu/s8/frane-mecaflo-s8.htm.

[37] : http://www.ida.upmc.fr/-sagaut.

[38] : http://thetis.enscpb.fr.notice.théorique.janvier2010.

[39] : SERRAH.NOUREDDINE, BENHAMDI.BILAL, *"initiation sur la simulation numérique des écoulement diphasiques dans les échangeur"*, Mémoire master 2011/2012.

[40] : http://www.pulaval.com/.

[41] : KANJANAPON.CHUNNANOND, S.A,*" ejecteur: application in refrigeration technology renewable and sustainable energy"*, 2004,(pp:129-155).www.elsevier.

[42] : Modèle d'étalement et traitement numérique, discrétisation la forme générale des équations de système par élément fini.

[43] : B.E.LAUNDER, D.B.SPALDING, *"the numerical computation of turbulent transport dv.geophysics"*, vol 118A, (1974).

[44] : http://www.cadfem.ch/fr/produits/ansys.htm.

[45] : E-mail :iif-iir@iifiir.org-website:www.iifiir.org, *"organisation intergouvememental pour le développement du fluide.*