République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Dr. Yahia Farés de MEDEA

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie de la Matière.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Pour L'obtention d'un Diplôme: master en génie mécanique

Option: énergie et froid industriel

Mémoire De Fin D'étude

Thème

L'analyse Numérique de la Performance d'un Ejecteur dans un Evaporateur Thermique à Vapeur

Proposé et dirigé par:
Dr. ZIRARI MOUNIR

préparée par :
✓ **STOUTAH MALIKA**
✓**BOUZIANI SAIDA**

Juin 2013

Remercîment

Nous formulons notre profonde gratitude à ALLAH le tout puissant qui nous a donné l'énergie nécessaire pour la réalisation de ce Project.

Avant de présenter cette étude nous tenons beaucoup a présenté notre remercîment et nos respects à notre promoteur Dr. ZIRARI MOUNIR , pour son aide précieux et se conseils.

Et à tous ceux qui ont contribué de loin ou de prés à la réalisation de ce Project.

Dédicace

Je dédie se travail à mes cher parents

Et à mes frères Faysal , Djilali ,Omar

Et mes sœurs bâchira, Dalila, Hanane

Et sur tout Guelabi Yousef

A tout la famille bouziani, boualami, belhaniche, Ladjlate

A tout mes amis : Hanane ,rachda, hanane ,mounia ,khadra ,naziha,bassma,ilhem,malika ,

lila,bakhta,souria,amina,

Et à tout qui connait moi

saida

DESIGN-WAREZ

Sommaire

Introduction Générale ……1

Chapitre I : Généralité sur les éjecteurs :

I-1/Etat de l'art :……2

I-2 /Qu'est ce qu'un éjecteur ? :.....2

I-1.3/Principe de fonctionnement de l'éjecteur : ……..2

I-4/Caractéristiques géométriques des éjecteurs :…….3

I-4.1/ Éjecteurs à mélangeur cylindrique :……3

I-4.2/Éjecteurs à mélangeur convergent-divergent :…….4

I-4.3/Éjecteurs à plusieurs étages :……4

I-5/Caractéristique technique :……..5

I-6/Différents type d'éjecteur :……..5

I-6.1/Éjecteurs à jet liquide :…….6

I-6.1.a/Ventilateurs à jet liquide :……..7

I-6.1.b/Compresseurs à jet liquide :……..8

I-6.1.c/pompes à vide à jet liquide : ……..9

I-6.1.d/Pompes à liquide à jet liquide. …….9

I-6.1.e/Pompes à solides à jet liquide : ……...11

I-6.2/Éjecteurs à jet de gaz :……11

I-6.2.a/Ventilateurs à jet de gaz : ……...12

I-6.2.b/Compresseurs à jet de gaz :……12

I-6.2.c/Pompes à vide à jet de gaz : ……13

I-6.2.d/Pompes à solides à jet de gaz :……14

I-6.3 /Éjecteurs à jet de vapeur : ……14

I-6.3.a/Ventilateurs à jet de vapeur :……14

I-6.3.b/Compresseurs à jet de vapeur :……15

I-6.3.c/Pompes à vide à jet de vapeur : ……...15

I-6.3.d/Éjecteurs/réchauffeurs à liquide à jet de vapeur : ……...17

I-6.3.e/Éjecteurs à solides à jet de vapeur :……..18

I-6.4/Éjecteur (gaz) : ……...18

I-6.5/Éjecteur (plasturgie) : ……18

I-6.6/ éjecteurs eau :……20

I-6.7/Éjecteur l'eau de mer : ……...21

I-7/Les éjecteurs supersoniques :……21

I-8/Ejecteurs : Exemples d'application : ……22

I-9/Les donnes disponibles avant les modélisations de l'éjecteur : ……..26

I-10/Réfrigération avec éjecteur :……...26

I-11/Le fluide frigorigène utilisé dans les cycles à éjecteur. ……..26

I-12/Avantages et inconvénients de l'éjecteur : ……27

I-13/Avantages et inconvénients de l'éjecteur supersonique :…….....27

I-14/ Conclusion :……29

Chapitre II : Modèles physiques et mathématiques :

II-1/ Introduction :……30

II-2/ Modélisation de L'écoulement des Fluides :……30

II-2-1/ Equation de Navier-Stokes :……30

II-2-2/Equation de continuité :……31

II-2-3/La décomposition statique (La décomposition de Reynolds) :……31

II-3/ Propriétés générales des écoulements adiabatiques :……..32

II-3-1/ Equations fondamentales :……...32

II-3-1-1/ Equation de conservation de la masse :……32

II-3-1-2/ Equation de la quantité de mouvement :……..33

II -3-1-3/ Equation de l'énergie :……35

II -3-1-4/Equation de Reynolds :……36

II-3-1-5 Équation de l'énergie cinétique fluctuante [8]: K=$\frac{1}{2}$ Rij :……..36

II-3-2/Les équation des mouvements moyennes :……37

II-3-2-1/Équation de continuité de mouvement moyen : ……37

II-3-2-2/Équation de Navier-stocks moyenne :……37

II-3-2-3/Equation de transport des tensions de Reynolds :……..38

II-3-3/Problème de fermeture des équations:……...39

II-4/Quelques hypothèses classiques de la fermeture de turbulence :…….39

II4-1/Hypothèse de chou :……39

II-4-2/Hypothèse de viscosité turbulente de bousines :……40

II-4-3/hypothèse de longueur de mélange de Prandtl :……..40

II-4-4/Hypothèse de Prandtl-Kolmogorov :……40

II-5/Les modèles de turbulence et leurs classifications :……..40

II-5-1/Les modèles à viscosité turbulence algébrique (modèle à zéro équation de transports) ……...40

II-5-2/ Les modèles à une équation de transport……..41

II-5-3/Le modèle k-**ε** et RNG (modèle a deux équations de transport)……41

II-5-4/Le modèle k-$\boldsymbol{\varepsilon}$ deux couches……..42

II-5-5/Le modèle k-$\boldsymbol{\varepsilon}$ étendu…….42

II-5-6/Modèle Algébrique aux tensions de Reynolds (ASM)……..42

II-6/Modélisation du transfert de chaleur:……44

II-6-1/Bilan Thermique : Equation De Chaleur……...44

II-6-2/Transferts de chaleur en écoulements incompressibles :……...45

II -7/Conclusion :…….....46

Chapitre III : Solution numérique par discrétisation

III-1/Introduction : ……...47

III-2/Les méthodes numériques :……..47

III-2-1/Méthode des différences finies :……...47

III-2-2/Méthode des éléments finis :……48

III-2-3/Méthode des volumes finis :……48

III -2-4/ Formulation des éléments finis :……48

III -3-7.1 Les différences finies : ……49

III-3/Dérivation des équations de discrétisation :……50

II.2.2. Maillage : …….....51

II.2.2.1. Génération de maillage :……51

II.2.2.2. Composants du maillage :…….....52

II.2.2.3. Choix du type de maillage :……....52

III-4-1/Discrétisation :……..54

III-4-1-1/Terme temporelle :……54

III-4-1-2/Terme d'advection: ……...55

III-4-1-2-1/Monotone Streamline Upwind Approach (MSU): ……55

III-4-1-2-2/La méthode SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin) :……..56

III-4-1-2-3/Approche Colloquée De Galerkin (COLG) :……57

III-4-1-3/Terme de Diffusion :……57

III-4-1-4/Termes source :……58

III-7 /Étude comparative :……....58

III-7.1 /Formes forte et faible :……59

III-7.2/ Technique d'affaiblissement par la Méthode des résidus pondérés……60

III-7.3/ Méthode des résidus pondérés :……...61

III-7.3.1/ Méthode générale :……61

III-7.3.1.a/ Pondération du résidu par une fonction-test :……61

III-7.3.1.b/ Intégration sur le domaine :……..61

III-7.3.1.c/ Intégration par parties :……..61

III-7.3.1.d/ Introduction des conditions aux limites :…….62

III-7.4/ Discrétisation par éléments finis :……...62

III-7.4/ Approximation par éléments finis (Galerkin) :……...63

III-7.5/ Approximation de la fonction-test :…….64

III-7.6/Discrétisation de la forme intégrale :……...64

III-7.7/ Affichage et post-traitement de la solution :……...66

III-8/Conclusion :…….67

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV-1/Introduction :……...68

IV-2/Introduction sur l'ANSYS:……...68

1/ Préparation des données:……..68

2/ Traitement:……...69

3/ Analyse et visualisation des résultats :…….69

IV-3/Description :……69

IV-4/Conditions aux limites :……...70

IV-4-1/ Maillage de système :……..70

IV-4-2/Condition d'entre : ……...71

IV-5/Interprétation des résultats :…….71

IV-5-1/ Champ de température :……73

IV-5-2/ Champ de vitesse:……79

IV-5-3/Champ de pression:…….....85

IV-6/Conclusion :…….90

Conclusion générale ……91

Liste des figures

Figure I-1: les démentions des deux éjecteurs (a-b)……..3

Figure I -2 : Éjecteurs à mélangeur cylindrique ……...3

Figure I -3: Éjecteurs à mélangeur convergent-divergent…….4

Figure I -4: Éjecteurs à plusieurs étages……5
Figure I-5 : Diagramme de définition d'un ventilateur à jet liquide…….7
Figure I-6 : Schéma de principe d'un laveur de gaz…….8
Figure I-7: Diagramme de définition d'un compresseur à jet liquide……..8
Figure I-8: Schéma d'implantation d'une pompe à vide à jet liquide……..9
Figure I-9: Schéma d'implantation de pompes à liquide à jet d'eau dans une installation de dessalement……...10
Figure I-10: Schéma d'installation de mélangeurs à jet liquide sur un bac de neutralisation……10
Figure I-11 : schéma d'amplification d'une pompe à pied éjecteur……11
Figure I-12: Diagramme de définition d'un ventilateur à jet de gaz……...12
Figure I-13: Groupe de compression à jet de gaz par injection de gaz de raffinerie dans un réseau de chauffage, à l'aide de gaz de process comme fluide moteur……..13
Figure I-14: Ensemble pompe à jet d'air/pompe à anneau liquide……13
Figure I-15: Schéma d'un thermo-compresseur commandé par servomoteur pneumatique……15
Figure I-16: groupe d'éjecteur à jet de vapeur à 2 étages……...16
Figure I-17: Schéma de principe d'un éjecteur/réchauffeur à jet de vapeur……..17
Figure I-18: Jet vacuum pump……18
Figure I-19: schéma jet vacuum pump avec diffuseur……19

Figure I-20 : représentation des paramètres éjecteur avec diffuseur…….19

Figure I-21 : Eau éjecteur ESH 40-40-50……20

Figure I-22 : Eau éjecteur ESH 65-65-80……20
Figure I-23 : Corps avec buse d'entrée ……..21

Figure II-1 : Un élément de la veine……..33

Figure II-2 : Bilan thermique……44

Figure III-1 : Exemples de mailles utilisées en Volumes Finis……51

Figure III-2: Composant d'un maillage……52

Figure II-4 : Exemple de maillage structuré et non structuré autours d'un profil…53

Figure II-5 : l'approche de ligne de courant d'upwind ……55

Figure IV-1 : les différents éjecteurs à étudier (A, B, C)…….69

Figure IV-2 : Maillage de l'éjecteur…….70

Figure IV-3: Présentation des nœuds de l'éjecteur……..71

Figure IV-8: Présentation des différents points pour présenté ces résultats…….72

Figure IV-9 : Représentation de la pression en fonction de la position axial (x)…72

Figure IV-10: Représentation spatiale de la température pour les différentes géométries d'éjecteurs……...76

Figure IV-11: Diagrammes de température dans les différents points des éjecteurs…….77

Figure IV-12: Représentation spatiale de la vitesse pour les différentes géométries d'éjecteurs…….82

Figure IV-13: Diagrammes de vitesses dans les différents points des éjecteurs….83

Figure IV-14: Représentation axial de la pression pour les différentes géométries d'éjecteurs…….88

Figure IV-15: Diagrammes de pression dans les différents points des éjecteurs…….89

Liste des tableaux :

Tableau(I-1) :Dénomination générale des éjecteurs avec leurs caractéristiques principales Dénomination. ……..6

Tableau(II-1) :la décomposition de Reynolds dans les équations de Navier Stokes.....39

Tableau(II-2): constantes du modèle k-ε……..41

Tableau(II-3) : constantes du modèle RNG……..42

Tableau (II-4) : les constantes du modèle ASM……43

Tableau (III-1) : Expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables……..50

Tableau (IV-1): Dimensionnement des différent éjecteurs à étudie (A, B, C)……...70

Tableau (IV-2) : Les propriétés thermiques des différents paramètres……...70

Tableau (IV-3) : Les conditions d'entre des vapeurs d'eau dans différents tuyaux……...71

Bibliographie et références

[1] :Denso, Ejector cycle , http: // www.global Denso .com /en/ environment / story / n01 2 par.html.

[2] :J. H. Keenan, E, P (1950).An investigation of ejector design by analysis and experiment Journal of Applied Mechanics (pp.299-243)http: // www.greenloco.com / Green loco %20.

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

[4]: G.GLUSHCO. Turbulent boundary layer on a flat plate in an incompressible fluid Invest. Acad. Nawk. SSSR MEKH, NOY, (1965).

[5]: W. P. JONES et B.E LAUNDER: the prediction of laminarization with two equation model of turbulence. INT. JL.Heat Mass transfert, vol. 15(n° 2) : page 301-314, (1972).

[6]: M .RAHNEMA, M.YAGHOUBI and A .SABZERVARI, turbulent and flow patterns and pressure fields across a tall building Mechanical Engineering Deparement, Smiras IRAN Mechanical Engineering. Department university of Puerto Rico Mayagnez Puerto Rico engineering vol 20 N°4,(1996).

[7]: Manual of Ansys ver 11, Ansys.inc, USA .

[8]: Journal homepage. Apthermeng.

- Journal homepage: www.elseiver.com/locate/apthermeng.
- http://www.pulaval.com/.
- http://www.cadfem.ch/fr/produits/ansys.html.
- http://www.etsmtl.ca/Etudiants-actuels/Cycles-sup/Realisation-etudes/Citer-pas-plagier.
- http://l3mgp.l3m.univmrs.fr/site/SitePersoPoncet/enseignement/cours_thermo .pdf.
- http://www.ulg.ac.be/labothap
- http://www2.csvt.qc.ca/patriotes/sciences/scp4/listescp.html

- http://www2.csvt.qc.ca/patriotes/sciences/autres.html#Actualit%C3%A9%20scientifique.
- http://www.ida.upmc.fr/_sagaut.
- http://www.techniques-ingenieur.fr/.
- http://ead.univ-angers.fr/~chaussed/frame.html
- http://fr.search.yahoo.com/search?p=m%C3%A9canique+des+fluides&ei=UTF-8&fr=yff35c
- http://www.sciences.univnantes.fr/sites/claude_saintblanquet/synophys/45meflu/45meflu.htm#312
- http://physique.coursgratuits.net/mecanique-des-milieux-continus/fluide-incompressible.php
- http://gev.industrie.gouv.fr/gev-mecaflu/mecaflu/s8/frame_mecaflu_s8.htm
- http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/technologies-du-vide-42175210/ejecteurs-b4250/#pesp
- http://www.memoireonline.com/recherche3.html?cof=FORID%3A11&ie=ISO-8859-15&q=Les+%E9jecteurs&cx=partner-pub-2070567197244873%3Amqp2ps9rfo1&sa=+Recherche+
- http :// www.sndl.cerist.dz
- http://www.technoscience.net/?onglet=glossaire&definition=5797

Dédicace

Grace à ALLAH

Je dédie ce modeste travail à ceux qui sont les plus chères au monde :

- A mes parents:

Pour leurs sacrifices. Leurs encouragements et leurs inquiétudes.

- A mes chères sœurs
- A mon cher frère

Sans oublier toutes ma famille de prés ou de loin et tous ceux qui connaissant "Malika".

- A tous mes amis de prés ou de loin

Malika

Chapitre I

Généralité sur les éjecteurs

Chapitre II

Modèles physique mathématique

Chapitre III

solution numérique par discrétisation

Chapitre IV
Résultats et discussion

Introduction générale

Conclusion générale

L'éjecteur est l'élément essentiel du système tri thermes à éjècto-compresseur. 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.

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.

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.

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 caractérisation 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 .
- Le dernier chapitre donne la résolution et l'interprétation des résultats obtenus par simulation.

Finalement ; on termine le travail par une conclusion générale qui résume le travail.

I -1/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 [1], 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 [2] 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) [3] a proposée une des premières méthodes de conception itérative d'éjecteur impliquant des donnés des propriétés prises des tables de vapeur.

I-2 /Qu'est ce qu'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

I -3/Principe de fonctionnement de l'éjecteur :

Les éjecteurs ,appelés également appareils à éjecteur ou encor trompes, sont des appareils statiques destines à aspires, comprimer ou mélanger des gaz, des vapeurs, des liquides et parfois des solides grâces 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.

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.

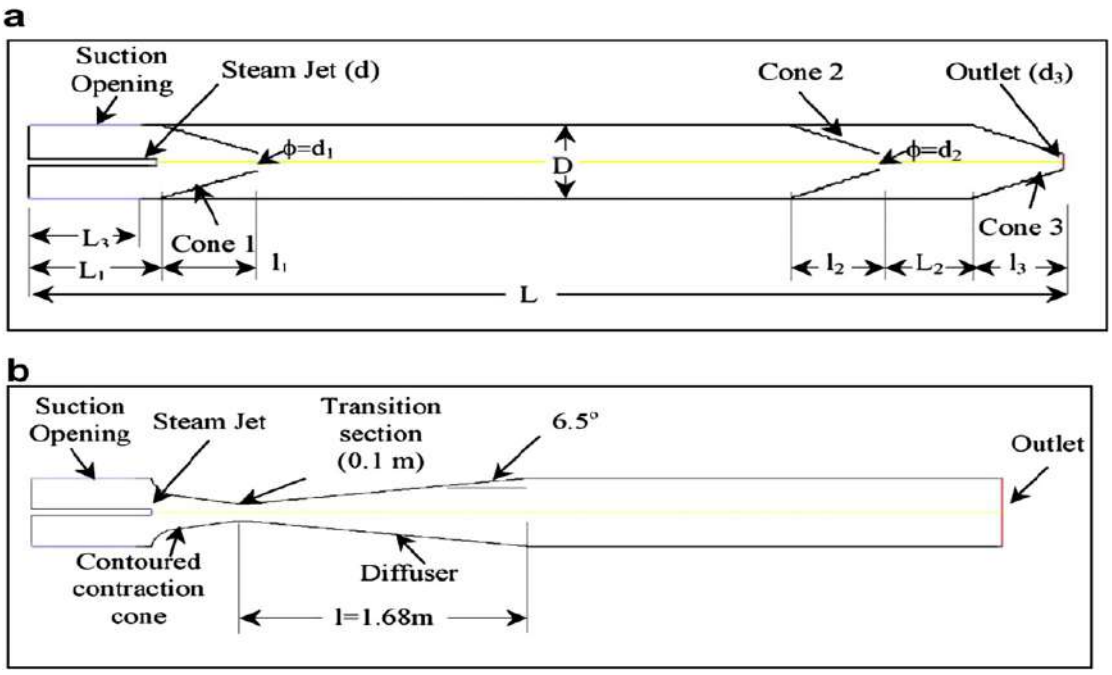


Figure I-1 : les démentions des deux éjecteurs (a, b) [8].

1-4.1/ Éjecteurs 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(figure I -2) .

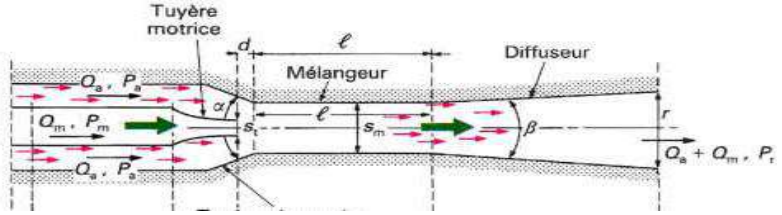


figure I -2 : Éjecteurs à mélangeur cylindrique.

Les éjecteurs à mélangeur cylindrique sont plutôt utilisés lorsque le fluide moteur est liquide. Ils 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.

1-4.2/Éjecteurs 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).

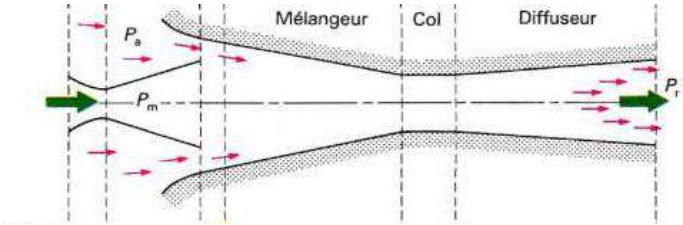


figure I -3: Éjecteurs à mélangeur convergent-divergent

1-4.3/Éjecteurs à plusieurs étages :

Les éjecteurs à un seul étage sont utilisés pour créer un vide, de valeur absolue entre la pression atmosphérique et 0.1 bar. Il est possible d'atteindre un vide plus important, de 0.1bar à 3.76*10-6 bar (3 µm Hg) en utilisant plusieurs étages (figure *I* - 4). Les systèmes à plusieurs étages comprennent souvent des condenseurs de type à contact de surface ou à contact direct. Des inter-condenseurs réduisent les besoins de vapeur motrice et, dans certaines situations, permettent de récupérer le produit de condensation.

Les systèmes à plusieurs étages de sont conçus individuellement pour obtenir le rendement optimal, avec une consommation d'énergie minimale. Ils sont conçus pour accepter divers gaz de traitement, y compris l'air, l'eau, HCl, le butane, SO2, l'éthylène-glycol et de nombreuses autres vapeurs organiques et inorganiques. Quand les conditions le justifient, des matériaux de construction résistant à la corrosion sont utilisés.

Alors que la majorité des éjecteurs ont entraînés à la vapeur, il est possible d'utiliser d'autres fluides. Il est possible d'utiliser comme élément moteur un produit compatible au procédé, afin de maintenir la pureté d'un produit, par exemple : fournit des ensembles complets, clés en main, qui comprennent les éjecteurs, les condenseurs, la tuyauterie de raccordement, l'instrumentation et les commandes électroniques.



figure *I* -4: Éjecteurs à plusieurs étages.

I -5/Caractéristique technique :

- La section du col de la tuyère primaire, simplement convergente ou convergente-divergente, est bien sûr l'un des principaux paramètres puisqu'elle est liée au débit de fluide dont on dispose pour faire fonctionner un éjecteur.
- Le rapport diamètre du mélangeur/diamètre de sortie de la tuyère primaire (dans le même plan) est un paramètre également important si l'on sait que l'éjecteur fonctionne de façon optimale lorsque la pression statique des deux flux est la même dans la section de sortie.
- La longueur du mélangeur cylindrique ou convergent-divergent est un paramètre plus difficile à bien cerner. Il doit bien sûr être suffisamment long pour obtenir un mélange satisfaisant des deux flux mais pas trop pour éviter des pertes inutiles ; le rapport longueur /diamètre peut varier de 10 à 20 (suivant les cas).
- En ce qui concerne le second col séparant le mélangeur convergent du diffuseur, il est préférable qu'il s'étende sur une longueur un peu inférieure au diamètre plutôt que de constituer un simple minimum local de section.
- Quant au diffuseur final, il doit être adapté à la pression de refoulement désirée et respecter l'angle d'ouverture classique β qui assure un bon rendement de diffusion.

I -6/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.

Tableau I-1 :Dénomination générale des éjecteurs avec leurs caractéristiques principales .

Côté aspiration	**Côté moteur**		
	Pompe à jet liquide	**Pompe à jet de gaz**	**Pompe à jet de vapeur**
Ventilateur	Ventilateur à jet liquide	Ventilateur à jet de gaz	Ventilateur à jet de vapeur
	ΔP jusqu'à quelques dizaines de mbar tous débits jusqu'à 100 000 m^3 / h	ΔP jusqu'à quelques centaines de mbar tous débits jusqu'à plusieurs millions de m^3/h	
Compresseur	Compresseur à jet liquide	Compresseur à jet de gaz	Compresseur à jet de vapeur (thermocompresseur)
	Standard jusqu'à des débits moteurs de 50 m^3 / h environ	ΔP > 300 mbar	ΔP > 300 mbar
Pompe à vide	Pompe à vide à jet liquide	Pompe à vide à jet de gaz	Pompe à vide à jet de vapeur
	Standard jusqu'à des débits aspirés de 20 à 30 kg / h et des débits moteurs de 40 m^3 / h environ	Toutes tailles sur demande	P_a jusqu'à 0,005 mbar tous débits jusqu'à plusieurs millions de m^3 / h
Pompe à liquide	Pompe à liquide à jet liquide	Pompe à liquide à jet de gaz	Pompe à liquide à jet de vapeur
	Standard jusqu'à un débit liquide total de 100 000 kg / h	(non commercialisé)	Standard jusqu'à 30 m^3 /h environ de liquide aspiré
Pompe à solides	Pompe à solides à jet liquide	Pompe à solides à jet de gaz	Pompe à solides à jet de vapeur
	Standard jusqu'à 5 000 kg / h de solides aspirés	(non commercialisé)	(non commercialisé)

I -6.1/Éjecteurs à jet liquide :

Le champ d'application de ces appareils est vaste et dépend du but recherché ainsi que du fluide ou du solide aspiré. température de gaz aspiré limitée à 80 °C. Pour des besoins plus importants, on peut trouver jusqu'à environ 1 500 m3/h de gaz aspiré avec un taux de compression de quelques millibars.

I -6.1.a/Ventilateurs à jet liquide :

Ils aspirent de grands débits d'air, de gaz ou de vapeur avec de faibles taux de compression.

La dépression obtenue avec ce type d'appareil se situe dans le domaine de 1 à 20 mbar. Ils sont surtout utilisés pour la ventilation d'ateliers, d'entrepôts ou de réservoirs. L'eau du réseau de distribution est le fluide moteur et peut être recyclée par une pompe.

La ***figure I-5*** donne à titre d'exemple la relation entre le débit aspiré et la compression pour différentes pressions du fluide moteur et pour plusieurs réalisations industrielles ; pour cette gamme d'appareils, la consommation d'eau varie de 0,7 à 26 m^3/h pour un débit aspiré de 30 à 3 000 m^3/h.

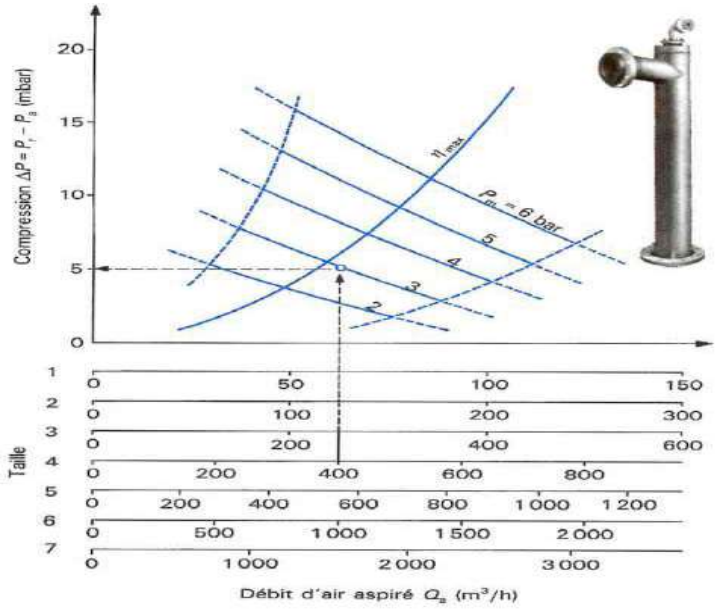


Figure I-5 : Diagramme de définition d'un ventilateur à jet liquide.

D'autres applications concernent la condensation de vapeurs, le refroidissement de gaz, ou l'absorption de gaz plus ou moins toxiques ou corrosifs. Dans ce dernier cas, l'éjecteur travaille en circuit fermé. L'eau motrice circule grâce à une pompe centrifuge et le gaz aspiré est séparé de l'eau dans un bac séparateur ; la température de l'eau est maintenue constante par appoint ou par échangeur.

Un tel éjecteur peut condenser quelques kilogrammes de vapeur par heure, la pression limite étant évidemment la pression de vapeur saturante de l'eau.

Un autre exemple est le laveur de gaz ***(figure I-6)***, souvent utilisé pour laver et dépoussiérer des quantités de gaz auquel on ne veut faire subir qu'une perte de charge très minime. S'il s'agit de gaz dangereux tels que SO_2, HCl, Cl_2, NH_3, etc., ils pourront être ensuite absorbés par des solutions aqueuses, basiques ou acides. Ces appareils sont généralement munis de dévésiculeurs destinés à arrêter les très fines gouttelettes formées lors de la pulvérisation du liquide.

Certains éjecteurs laveurs sont multi-buses au niveau moteur, ce qui permet de pulvériser le liquide de lavage en fines gouttelettes et d'augmenter notablement la surface d'échange. Il existe des appareils de laboratoire dont la gamme d'aspiration va de 0 à environ

150 m3/h avec une température de gaz aspiré limitée à 80 °C. Pour des besoins plus importants, on peut trouver jusqu'à environ 1 500 m3/h de gaz aspiré avec un taux de compression de quelques millibars.

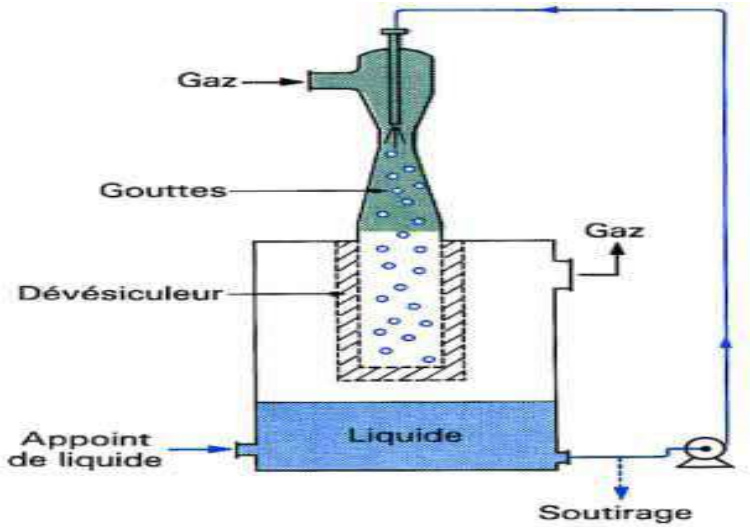


Figure I-6 : Schéma de principe d'un laveur de gaz.

Lorsque le gaz aspiré contient des particules solides ou liquides de taille inférieure ou égale au micromètre, on utilise des éjecteurs laveurs de type Venturi, où la bonne capacité de séparation est due à la vitesse relative élevée entre le gaz chargé de particules et le liquide moteur. On trouve industriellement une gamme d'appareils dont la capacité d'aspiration va de 100 à 30 000 m3/h.

I -6.1.b /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-7*** montre la relation qui existe entre la capacité d'aspiration, la compression ΔP et la pression effective ΔP_1 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 traitement de l'eau.

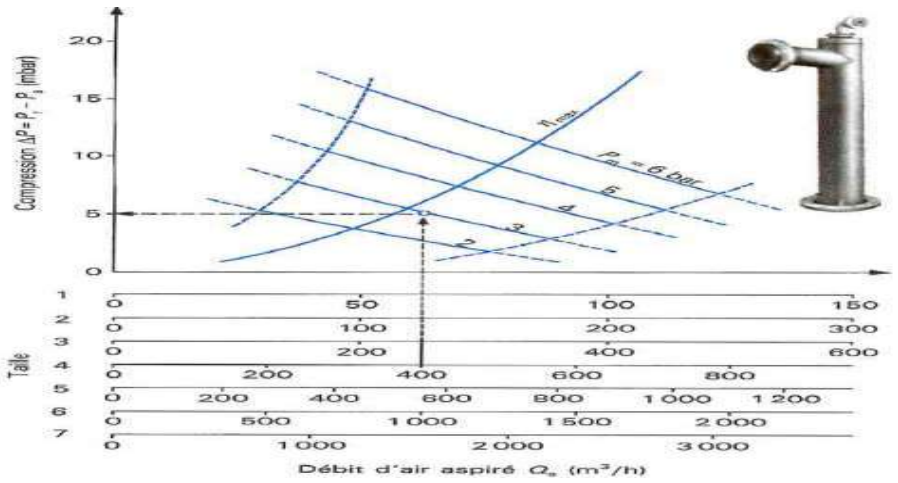


Figure I-7: Diagramme de définition d'un compresseur à jet liquide.

I -6.1.c/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**

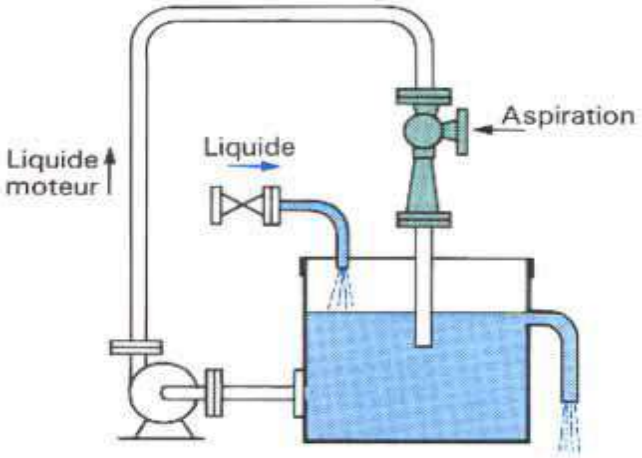


Figure I-8: Schéma d'implantation d'une pompe à vide à jet liquide.

Le champ d'application de ce type d'appareil est vaste :

- ✓ distillation ou séchage sous vide ;
- ✓ mise sous vide de siphons, de conduites d'aspiration de pompes centrifuges, de condenseurs ;
- ✓ dégazage de régulateurs à air comprimé ;
- ✓ mise sous dépression de filtres, etc.

Pour des applications particulières dans lesquelles les gaz aspirés sont corrosifs, on utilise des pompes en porcelaine moulée dans un blindage d'acier.

I -6.1.d/ 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* -9**).

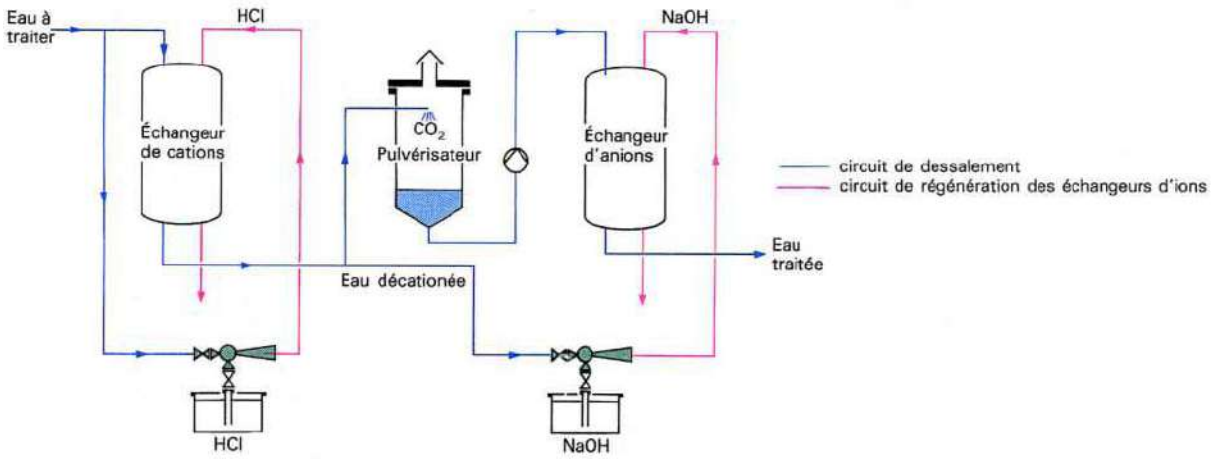


Figure I-9: Schéma d'implantation de pompes à liquide à jet d'eau dans une installation de dessalement.

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* -10** donne le diagramme de définition d'un mélangeur à jet liquide, ainsi que l'installation de ces mélangeurs sur un bac de neutralisation ;

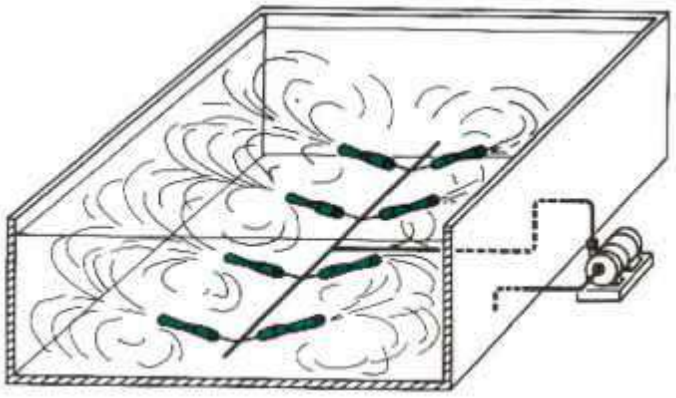


Figure I-10: Schéma d'installation de mélangeurs à jet liquide sur un bac de neutralisation.

- **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* -11** montre le schéma d'implantation.Cette combinaison est parfois aussi employée pour les pompes d'alimentation de fusées à propergole liquide ;

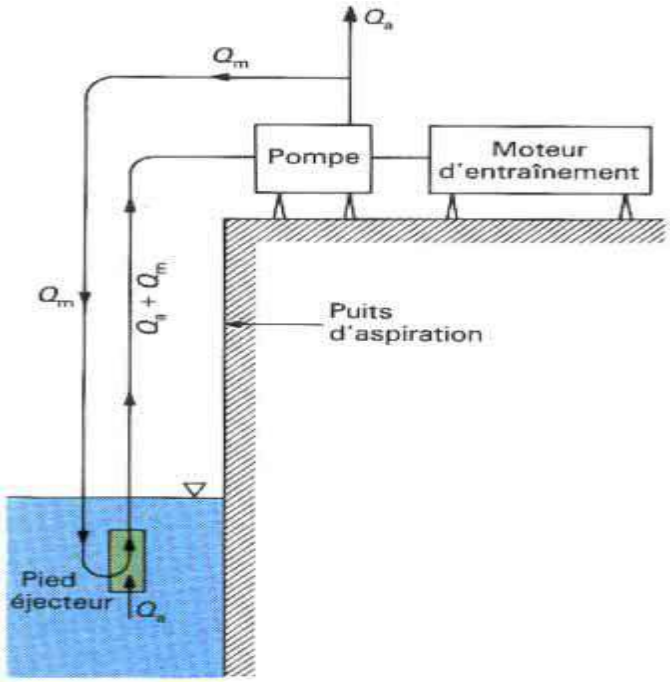


Figure I-11 : Schéma d'implantation d'une pompe à pied éjecteur.

- **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 -6.1.e/ 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.

I -6.2 /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.

I -6.2.a/ Ventilateurs à jet de gaz :

Ce sont des appareils qui servent à l'extraction d'air, de gaz ou de vapeurs jusqu'à un taux de compression de l'ordre de 500 mbar**,** ce qui est supérieur aux performances des ventilateurs à jet liquide .**La figure *I*-12** donne le diagramme de définition de ce type d'appareil.

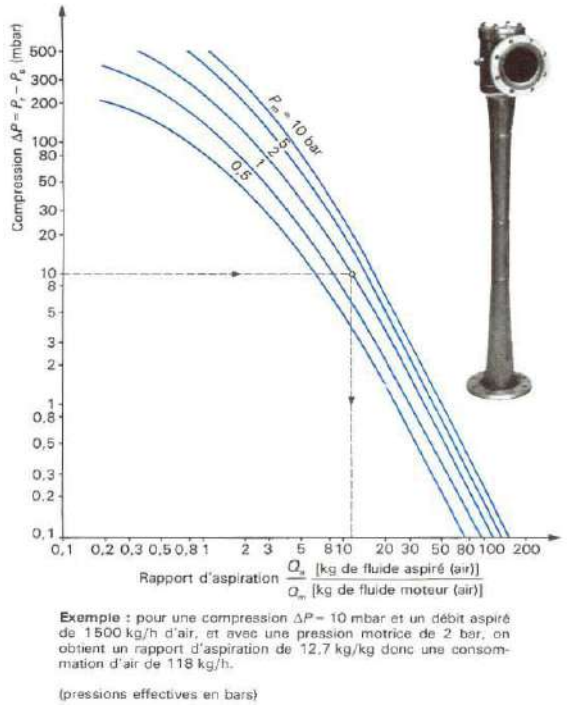


Figure I-12: Diagramme de définition d'un ventilateur à jet de gaz.

Ces ventilateurs sont utilisés :

- ✓ pour l'extraction d'air vicié, de gaz ou de vapeurs malodorantes dans les usines ou entrepôts ;
- ✓ pour la ventilation de réacteurs, de récipients à agitateurs et autres appareils utilisés dans l'industrie chimique ;
- ✓ pour la ventilation de réservoirs sur bateaux par exemple ;
- ✓ comme soufflante ou ventilateur de tirage sur les chaudières ;
- ✓ pour le brassage de l'air ambiant dans le domaine du textile, du cuir et du tabac.

I -6.2.b/ Compresseurs à jet de gaz :

Ces appareils sont voisins des précédents mais permettent des taux de compression plus élevés(**Δ***P* > 500 m bar) . 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 (figure ***I-13***) ;

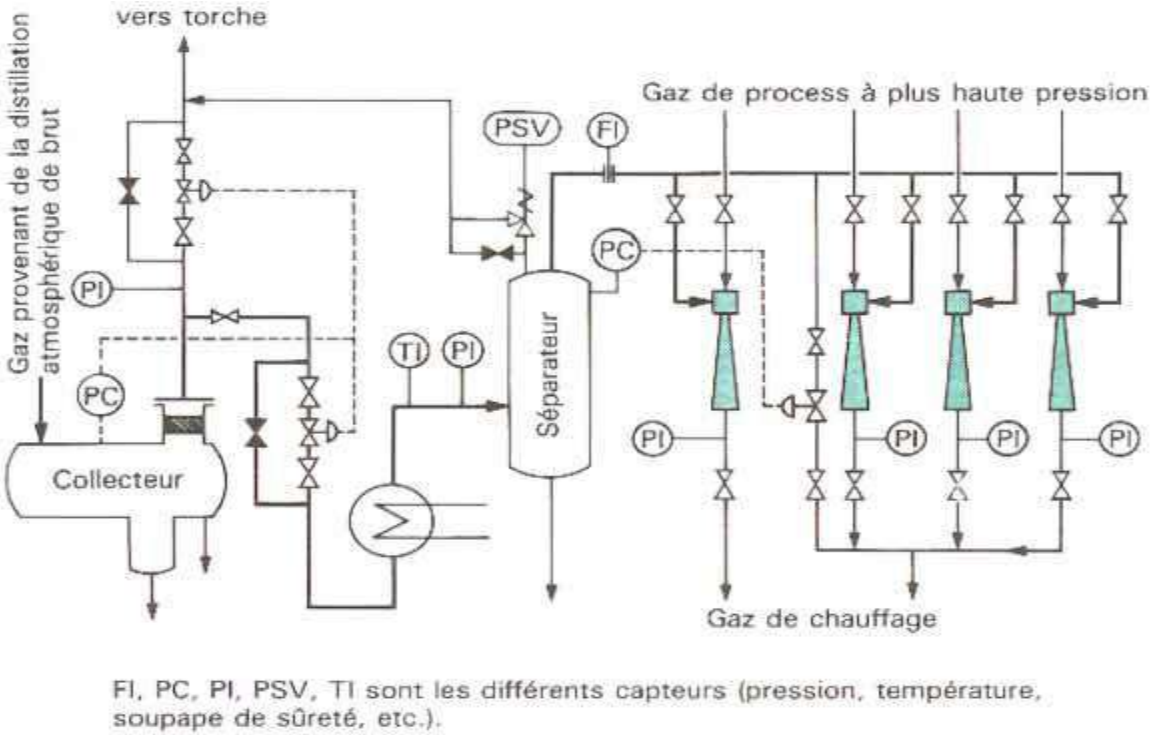


Figure I-13: Groupe de compression à jet de gaz par injection de gaz de raffinerie dans un réseau de chauffage, à l'aide de gaz de process comme fluide moteur.

- ✓ 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 -6.2.c/ 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-14*).** On obtient ainsi un vide intermédiaire de 50 à 100 mbar et une pression d'aspiration de l'éjecteur entre 40 et 5 mbar.

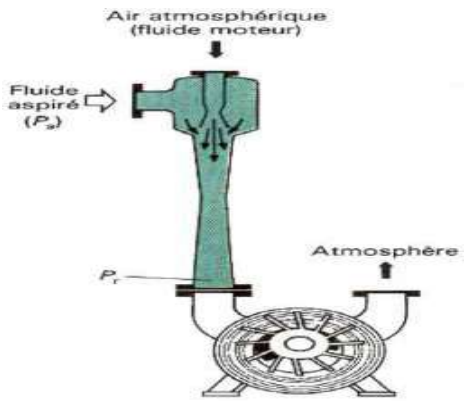


Figure I-14: Ensemble pompe à jet d'air/pompe à anneau liquide.

Cette solution est utilisée lorsqu'on ne dispose pas de vapeur comme flux moteur et lorsque le débit aspiré est assez faible.
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 stato-fusées.

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 -6.2.d/ 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 -6.3 /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..

I -6.3.a /Ventilateurs à jet de vapeur :

Ces appareils sont utilisés pour extraire de l'air, des gaz ou des vapeurs jusqu'à un taux de compression ΔP de l'ordre de 500 mbar ; leurs caractéristiques sont tout à fait analogues à celles des ventilateurs à jet de gaz.

- ✓ Le domaine d'application est vaste et concerne, par exemple :

l'aspiration d'air vicié, de gaz ou de vapeurs malodorantes dans des entrepôts ou des locaux habités ;

- ✓ le dégazage des citernes de navires ;
- ✓ l'utilisation comme soufflante pour le tirage des chaudières ;
- ✓ l'aspiration et le mélange de gaz sur des installations d'incinération;
- ✓ le lavage de gaz.

I -6.3.b /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 comme le montre la **figure *I-15*.**

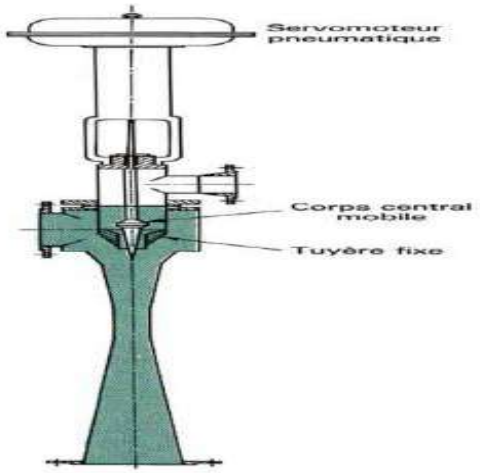


Figure I-15: Schéma d'un thermo-compresseur commandé par servomoteur pneumatique.

En ce qui concerne le vaste domaine d'application, il se rapporte à :

- ✓ l'évaporation ou la concentration (industrie sucrière, brasseries, laiteries, chimie, papeteries) ;
- ✓ la distillation dans l'industrie pétrolière ;
- ✓ la désodorisation ;
- ✓ le dégazage et le séchage sous vide ;
- ✓ le dessalement de l'eau de mer.

Ils peuvent être considérés comme pompes à chaleur car, par leur intermédiaire, une quantité de chaleur est transférée d'une source froide vers une source chaude pour restitution.

I -6.3.c /Pompes à vide à jet de vapeur :

En configuration mono-étage, 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-étages avec ou sans condenseurs

intermédiaires.

Les applications des éjecteurs mono-étages sont nombreuses et concernent :

- ✓ la mise sous vide de conduites de pompes non autoamorçantes;
- ✓ 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. **Figure (I-16)** en montre deux exemples de réalisation.

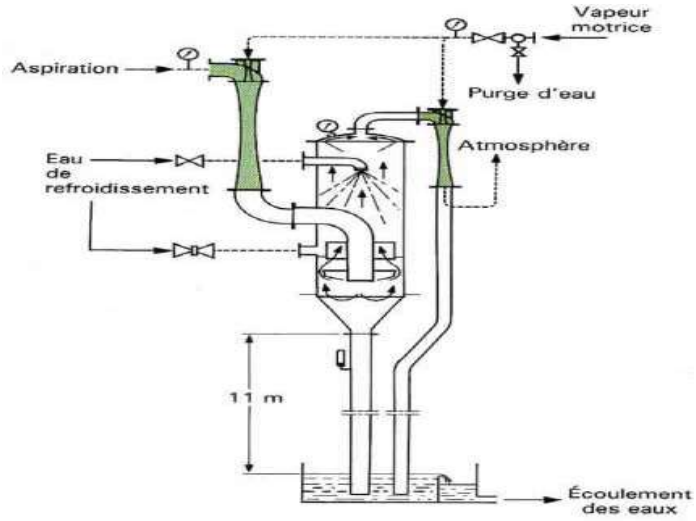


Figure I-16: groupe d'éjecteur à jet de vapeur à 2 étages.

Signalons également les possibilités d'association des pompes à vide à jet de vapeur avec des pompes à anneau liquide.

En ce qui concerne les condenseurs intermédiaires, il peut s'agir soit de condenseurs à surface, soit de condenseurs par mélange où aspire l'éjecteur situé en aval.

Leurs performances sont sensiblement les mêmes au niveau de la pression d'aspiration, de la pression de vapeur motrice, de la consommation de vapeur et du débit massique aspiré mais la consommation d'eau est 2 à 3 fois plus élevée dans le cas d'application avec condenseurs à surface.

En ce qui concerne l'utilisation de ces éjecteurs multi-étages, ceux avec condenseurs à mélange servent :

- ➢ principalement à la production du vide dans les installations d'évaporation, de séchage, de distillation, de rectification, de lyophilisation, de polycondensation, de dégazage et de désodorisation ;
- ➢ pour l'obtention du vide nominal sur les condenseurs de turbines à vapeur où cette solution est avantageusement concurrencée par des pompes.

Les éjecteurs avec condenseur à surface ont sensiblement le même champ d'application, mais le fluide aspiré ne doit pas entrer en contact avec l'eau de refroidissement et le condensat doit être récupéré.

Dans ce type d'appareil, on trouve bien sûr des fabrications en porcelaine ou en graphite pour des applications particulières mais également des ensembles mobiles adaptés à des travaux de laboratoire.

I -6.3.d /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 auto-amorçant 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.

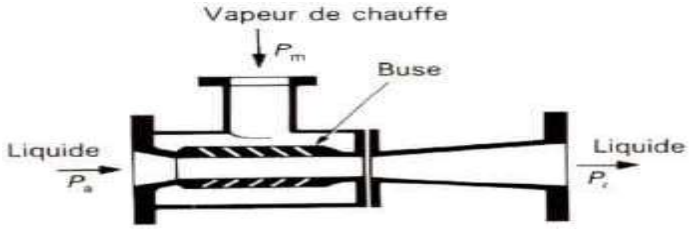


Figure I-17: Schéma de principe d'un éjecteur/réchauffeur à jet de vapeur.

Concernant ce même type d'éjecteur, citons les réchauffeurs à jet de vapeur dont la **figure I-17** 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.

I -6.3.e /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.

- ✓ Un Éjecteur est un dispositif technique utilisé soit en aspiration de gaz, soit en plasturgie

I -6.4 /Éjecteur (gaz) :

Un éjecteur est un outil industriel généralement utilisé pour l'extraction des fumées, ou l'obtention d'un vide. Il fonctionne à partir du principe de l'effet venturi. Un gaz est éjecté à grande vitesse à l'entrée du venturi (généralement de la vapeur d'eau) et l'aspiration se produit au niveau de l'étranglement.

Un éjecteur permet l'obtention d'une aspiration sans utiliser des pièces mobiles. Il remplace donc les pompes là où des pièces mécaniques en mouvement sont à éviter. Il est particulièrement adapté à l'aspiration de particules de diamètre supérieur à 1,0 µm.

I -6.5 /Éjecteur (plasturgie) :

En plasturgie, un éjecteur est une pièce qui éjecte la pièce qui est restée dans la partie mobile du moule.

L'éjecteur est le terme générique qui désigne un appareil à jet capable d'aspirer différents produits :gazeux, liquides et solides (poudres, granulés ou boues) et prend diverses dénominations suivant sa fonction : jet vacuum pump, thermocompresseur, laveur de gaz, éducteur, etc… Le principe de fonctionnement est le même pour tout type d'éjecteur.

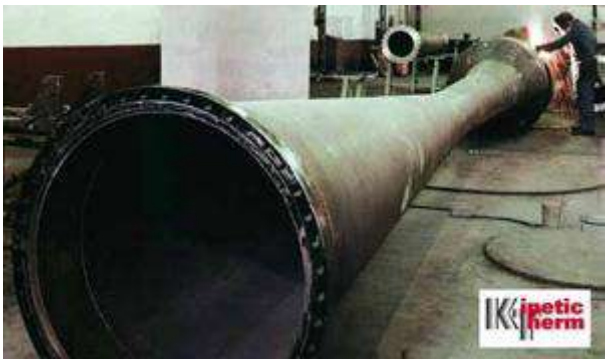


Figure I-18: **Jet vacuum pump**

Appareil à fonctionnement statique permettant d'obtenir le vide dans une enceinte. Le vide correspond à la pression d'aspiration de la vapeur ou du gaz exigée par les besoins du procédé. La pression d'aspiration est obtenue grâce aux lois de la thermo-dynamique et de la mécanique des fluides: un fluide moteur à haut potentiel énergétique est détendu au travers d'une tuyère convergente et divergente et accéléré jusqu'à des vitesses souvent supersoniques. A la sortie de la tuyère l'énergie potentielle du fluide moteur est transformée en énergie cinétique.

A l'entrée du diffuseur le fluide moteur cède une partie de son énergie cinétique au fluide aspiré et le mélange des deux fluides subit une transformation inverse dans laquelle la vitesse est convertie en pression au refoulement du diffuseur.**schéma jet vacuum pump**

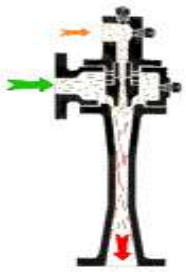


Figure I-19: **schéma jet vacuum pump avec diffuseur.**

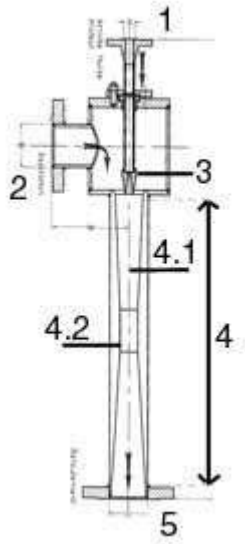


Figure I-20 : **représentation des paramètres éjecteur avec diffuseur.**

1. Arrivée fluide moteur
2. Misesous vide - aspiration
3. Tuyère
4. Diffuseur

4.1. Cône de mélange convergent

4.2. Col du diffuseur

5. Refoulement

cet appareil permet de comprimer des gaz et des vapeurs (taux de compression optimum : 7 à 8 = rapport de la pression de refoulement à la pression d'aspiration) afin d'obtenir une pression d'aspiration constante (vide plus ou moins poussé selon les besoins du procédé).

I -6.6 / éjecteurs eau :

Éjecteurs d'eau sont des pompes à vide, entraînés par une eau à haute pression (ou support similaire) ou à la vapeur. Ils utilisent l'énergie cinétique du fluide moteur pour aspirer les gaz, vapeurs ou d'autres liquides, puis décharger le mélange obtenu contre une contre-pression. Travaux turbine fabrique éjecteurs d'eau à des fins industrielles et marines.



Figure *I*-21 : EAU EJECTEUR ESH 40-40-50.

Les éjecteurs sont de conception simple et fiable en fonctionnement, car ils n'ont pas de pièces mobiles comme les pompes stadanrd. Les principales parties d'un éjecteur sont un boîtier d'entrée, la buse, la chambre de mélange et le diffuseur. Comme il n'y a pas de pièces mobiles, pas de lubrification est nécessaire et l'entretien est minime. Éjecteurs sont à auto-amorçage et facilement activé en tournant simplement sur le débit de l'eau d'entraînement.



Figure *I*-22 : EAU EJECTEUR ESH 65-65-80

Éjecteurs d'eau en fonction de l'application peuvent être fabriqués à partir de matériaux divers allant de bronze, acier, acier inoxydable avec nozzels usualy étant fabriqués à partir de salut acier inoxydable de qualité ou de monel.

D'éjection paramters définissant sont:

Q : Capacité d'aspiration
Hd : Hauteur de refoulement
Hs : Hauteur d'aspiration
Qd : Conduite consommation moyenne

Pd : pression moyenne Conduire à éjecteur d'entrée

I -6.7 /Éjecteur l'eau de mer :

En raison de leur excellente capacité d'aspiration et reliebility, éjecteurs d'eau sont fréquemment utilisés pour les applications marines Shuch que:

- Ballast éjecteur de décapage
- Cale éjecteur de décapage
- Chaîne casier éjecteur
- Des eaux usées (noir) d'aspiration d'eau
- Divers. d'autres applications



Figure *I*-23 : CORPS AVEC BUSE D'ENTRÉE

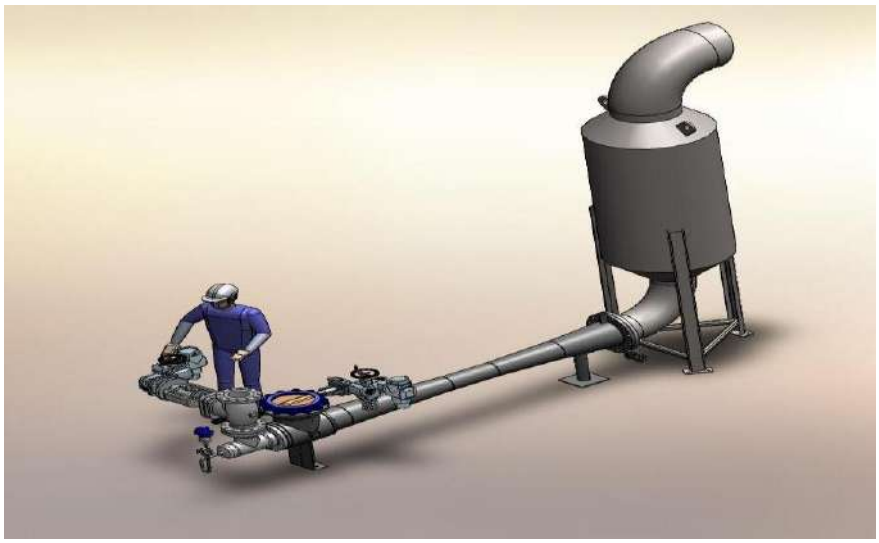
I -7/les éjecteurs supersoniques :

Des éjecteurs supersoniques ont été employés dans des applications de refroidissement/réfrigération depuis le début des années 1900. L'intérêt pour les éjecteurs supersoniques a été ravivé par des efforts récents visant à réduire la consommation d'énergie; les systèmes de réfrigération à éjecteur peuvent être actionnés par l'énergie solaire ou par la chaleur résiduelle produite par un autre processus. Cet article présente les résultats des simulations informatiques de dynamique des fluides (CFD) d'un éjecteur supersonique pour utilisation dans un système de réfrigération. Le modèle proposé a été appliqué à une géométrie correspondant à un appareil expérimental qui fonctionne à l'aide du R245fa. L'impact des conditions de fonctionnement variables (pressions du générateur et de l'évaporateur) sur le ratio d'entraînement et les pressions critiques de condensateur de l'éjecteur a été étudié. D'autres paramètres considérés dans cette étude incluent : la position primaire de sortie de bec; la longueur de la chambre de mélange; et le diamètre de l'entrée secondaire d'écoulement. Les résultats démontrent que le CFD est un outil utile dans la conception des éjecteurs pour des applications de réfrigération.

I -8/Ejecteurs : Exemples d'application :

Un éjecteur permet l'obtention d'une aspiration sans utiliser de pièces mobiles. Il fonctionne à partir du principe de l'effet venturi. L'éjecteur est un appareil industriel utilisé dans de nombreuses applications et est particulièrement adapté à :

- l'aspiration de gaz ou de liquides, chargés ou corrosifs,
- la compression de gaz ou de liquides, chargés ou corrosifs
- le mélange de gaz ou liquides, chargés ou corrosifs
- Mise sous vide rapide d'une enceinte de grand volume
- Ejecteurs de démarrage



Mise sous vide d'une enceinte de 5 100 m3 sous 150 m Bar abs en 40 minutes - Avec un éjecteur de démarrage et son silencieux d'échappement.

- Mise sous vide d'une installation

- Groupes de vide multi-étagés:

<u>- En association avec des condenseurs:</u>

Lorsque le taux de compression demandé est important, il est nécessaire de prévoir plusieurs éjecteurs montés en série avec condenseurs intermédiaires.



Groupe de vide à deux étages avec condenseurs tubulaires intermédiaire et final - Aspiration de 210 Kg/h d'air et hydrocarbures sous 110 mBar abs

- En association avec pompe à anneau liquide:

Par exemple, un Ejecteur à air permettant d'abaisser la pression d'aspiration de la pompe et d'éviter sa cavitation, ou encore, un Ejecteur à vapeur permettant d'atteindre des pressions plus basses jusqu'à 0.3 mBar abs .

- Amorçage de pompes centrifuges

L'éjecteur monté sur un ballon tampon, assure la mise sous vide de la pompe et de sa tuyauterie d'aspiration. L'instrumentation montée sur le ballon permet le pilotage du système



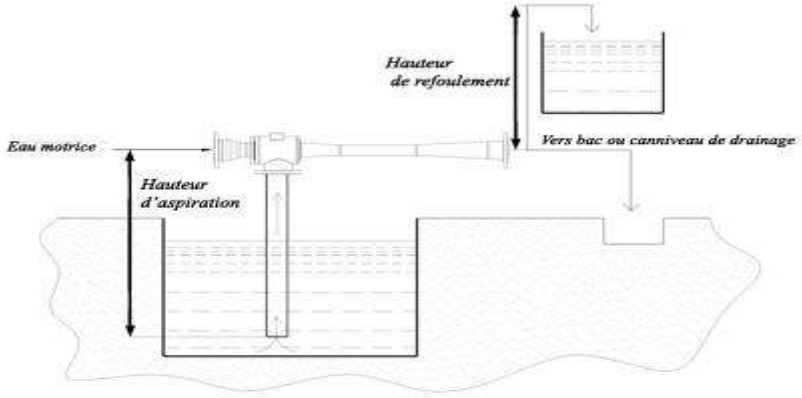
- Prise d'échantillons sous vide

Ce dispositif, utilisant de l'air ou de l'azote comme fluide moteur, permet de prélever un échantillon du produit en cours d'élaboration dans un réacteur chimique travaillant sous vide.



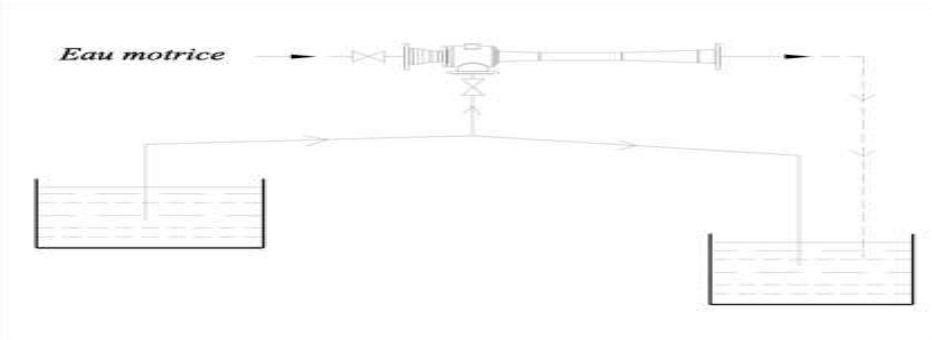
- Transvasement / Evacuation

Dans la configuration suivante, le contenu de la cuve pourra soit être évacué vers un caniveau de drainage ou bien vers une cuve située à une altitude plus élevée.



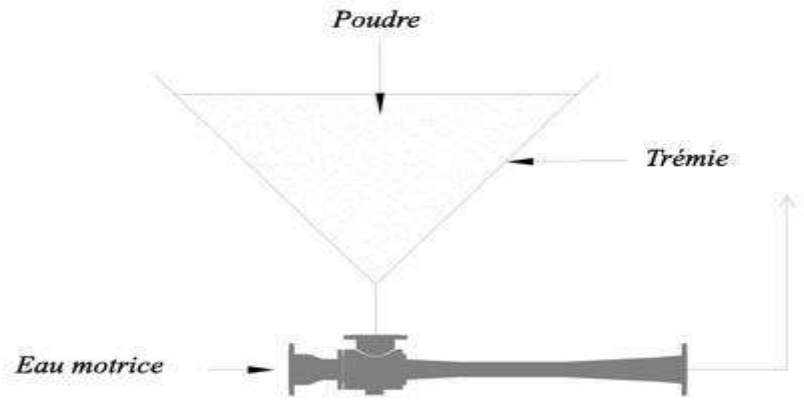
- Transvasement (Siphon)

L'éjecteur peut également être utilisé pour créer une dépression dans le circuit de transvasement et ainsi amorçer un siphon. La production de vide s'effectue uniquement lors de la phase d'amorçage du siphon.



- Mélange / Transport

La dilution d'une poudre dans un liquide moteur ou le transport de granulat peuvent être effectués au moyen d'un éjecteur.



Exemple: Reminéralisation d'eau distillée



- Exemples d'autres applications

Construction navale :

- Purges de fonds de câles de bateaux.
- Vidanges de sanitaires de bateaux.

Energie :

- Ejecteurs des buées - récupération de l'air et de la vapeur d'eau en sortie d'arbre des turbines.

Ventilation :

- Ejecteurs à très faibles taux de compression destinés à récupérer les rejets gazeux nocifs en industrie.

En général :
De par leur robustesse et leur simplicité d'utilisation les éjecteurs offrent une multitude d'applications potentielles. N'hésitez pas à nous consulter.

I -9/Les donnes disponibles avant les modélisations de l'éjecteur :

On dépose :

- D'un débit du fluide frigorigène (fluide entraine), selon la puissance frigorifique de la machine tri thermique.
- D'après la relation

$$\mathbf{m_e} \approx \frac{Q_e}{\triangle h_{changement\ de\ phase}}$$

h : enthalpie massique.

Q_e : puissance entre de chambre d'aspiration.

De la pression et de la température (P_2, T_2) du fluide frigorigène (fluide entrainé) à la section d'entrée la chambre d'aspiration de l'éjecteur, pression de chargement de phase de fluide frigorigène a la température de l'évaporation (source chaude).

.De la pression et de la température (P_1, T_1) du fluide moteur, (fluide primaire) à la section d'entrée de la tuyère primaire de l'éjecteur. Pression de changement de phase de fluide moteur à la température du générateur (bouilleur).

.De la pression (P_3) de fluide total (moteur+entrainé) à la section de sortie de l'éjecteur pression de changement de phase du fluide total à la température du condenseur (source froide).

I -10/Réfrigération avec éjecteur :

La plupart des procédés industriels génèrent des rejet énergétique qui sont disponibles à un cout très bas et dans certains cas ces procédés ont aussi des besoins en réfrigération .

On pourrait donc envisage de satisfaire ces besoins à partir d'un système de réfrigération qui se base sur la technologie de l'éjecteur et qui utiliser a les rejets thermique 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.

Un cycle de réfrigération à éjecteur utilise les rejets thermiques industriels comme source de chaleur dans (en générale) la gamme des températures de +60°C à +400°C , pour produit de froid a nivaux de 0°C +20°C .

I -11/Le fluide frigorigène utilisé dans les cycles à éjecteur :

La performance de la machine frigorifique à éjecteur dépende directement de fluide frigorifique utilisé.

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 -12/Avantages et inconvénients de l'éjecteur :

- Au lieu d'utiliser les énergies nobles (Energie électrique, Energie cinétique…), le cycle à éjecto-compression utilise les énergies thermiques gratuites ou non nocives (Energie solaire).
- Il recycle les énergies perdues en forme de chaleur.

Il à un système mécanique très simple sans pièces en mouvement.

- Il ne demande pas d'entretien ou une maintenance couteuse (pas de lubrification ou de
- friction).

La fabrication d'une machine de réfrigération avec éjecteur supersonique est très simple.

- Grande sécurité d'emplois.
- Le système à éjecteur a une étanchéité parfaite du cout :
- Les fluides frigorigènes utilisés ne causent pas de pollution à l'environnement.
- Le système de réfrigération peut fonctionner à des niveaux de pression très basses ce qui, permet l'utilisation des fluides frigorigènes inédits comme par exemple l'eau.
- Grande variété de matériaux pour le construire.
- La plupart des gaz et les réfrigérants peuvent être utilisés.
- Pas de limite de température (sauf pour les martiaux).

I -13/Avantages et inconvénients de l'éjecteur supersonique :

Le principal avantage que procure l'éjecteur supersonique à un cycle de production de froid est :

Au lieu d'utiliser les énergies nodales (énergie électrique, énergie cinétique …) il utilise des énergies thermiques gratuites ou non nocives (énergie solaire) où il recycle les énergies perdues en forme de chaleur.

Un éjecteur supersonique est un système mécanique très simple sans pièce en mouvement,

Par conséquent il ne demande pas d'entretien ou une maintenance couteuse (pas de lubrification ou de friction)

Aussi :

- La fabrication d'une machine de réfrigération avec éjecteur supersonique est très simple.
- Grand sécurité d'emploi.
- Le système à éjecteur a une étanchéité parfait de cou :
- Les fluides frigorigènes utilisés ne causent pas de pollution à l'environnement.
- Le système de réfrigération peut fonctionner à des nivaux de pression très basses ce qui permet l'utilisation de fluides frigorifique inédits comme par exemple l'eau.

Signalons à ce propos que l'un des problèmes pratique rencontrés lors de l'utilisation d'un éjecteur dans un cycle, sont ces performances qui dépendant 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. Il s'ensuit qui un éjecteur s'adapte mal à un fonctionnement hors des conditions de design.

I-14/Conclusion :

Le proposé d'étudie le procédé par simulation numérique de l'objectif de comprendre d'améliorer le performance d'un éjecteur dans un évaporateur thermique à vapeur, où ces performances sont dépend beaucoup de ces conditions de fonctionnement.

Et nous avons étudié dans ce chapitre les éjecteurs on cas générale et leurs caractéristiques technique

et les types on éjecteurs suivant les géométries (mélangeur cylindrique, mélangeur converge-diverge et éjecteur à plusieurs ou à multi-étage) et les fluides utilisé ainsi, que leurs utilisations.

II-1/ Introduction :

Dans ce chapitre on s'intéresse à la modélisation mathématique de transfert de chaleur et l'écoulement diphasique turbulent de fluide incompressible en régime variable, ou les modèles de fermeture sont abordés.

Depuis quelque décennies, Prandtl, Navier-stockes et Reynolds ont pu découvrir les lois fondamentales de la mécanique des fluides, il restait aux ingénieurs et l'homme de science exploiter ces loi et les mètres au service de l'homme.

Dans son ensemble, la mécanique des fluides est gouvernée par trois équations fondamentales. Celles-ci sont l'équation de continuité, l'équation de la quantité de mouvement et l'équation de l'énergie.

II-2/ Modélisation de L'écoulement des Fluides :

II-2-1/ Equation de Navier-Stokes :

En mécanique des fluides, les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles non-linéaires qui décrivent le mouvement des fluides dans l'approximation des milieux continus. Elles gouvernent par exemple les mouvements de l'air de l'atmosphère, les courants océaniques, l'écoulement de l'eau dans un tuyau, et de nombreux autres phénomènes d'écoulement de fluides. Elles sont nommées d'après deux physiciens du XIX^{e} siècle, Claude Navier et George Stokes. Notons qu'il est possible de démontrer les équations de Navier-Stokes à partir de l'équation de Boltzmann.

➢ Expression pour les écoulements de fluides incompressibles :

Pour un fluide visqueux newtonien et lorsque l'écoulement est incompressible, l'équation de l'énergie est découplée des équations de continuité et de quantité de mouvement, c'est-à-dire qu'on peut déterminer la vitesse et la pression indépendamment de l'équation de l'énergie. L'expression des équations de continuité et de quantité de mouvement sont considérablement simplifiées. On obtient alors :

- Équation de continuité appelée alors équation d'incompressibilité

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

- Équation de bilan de la quantité de mouvement

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

Où :

$\nu=\frac{\mu}{\rho}$: désigne la viscosité cinématique du fluide (unité SI: $m^2\cdot s^{-1}$)

L'équation de quantité de mouvement est l'équivalent de la relation fondamentale de la dynamique (aussi appelée seconde loi de Newton) : $\sum \vec{F} = m\vec{a}$

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.

II-2-2/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.

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

II-2-3/La décomposition statique (La décomposition de Reynolds) :

Elle consiste à décomposé chaque grandeur instantané φ des équations des Navier-Stokes en une grandeur moyenne φ et une fluctuation turbulente. Les équations de Navier - Stokes étant non linéaires, l'opération de moyenne fait apparaître de nouveaux termes qui traduisent l'influence de la turbulence sur l'écoulement moyen.

$$\varphi = \bar{\varphi} + \dot{\varphi} \qquad \textbf{(II-4)}$$

Avec la valeur moyenne de φ est exprimée par la relation suivante :

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{T}\int_0^T \varphi \, dt \qquad \textbf{(II-4-a)}$$

Dans le cadre de la modélisation en un point de la turbulence, on ne s'intéresse qu'aux moyennes statiques de la vitesse et de la pression. On décomposé ainsi les grandeurs instantanées selon la règle de Reynolds :

$$U_i = \bar{U}i + u_i$$

$$P = \bar{P} + p \qquad \textbf{(II-5)}$$

II-3/ Propriétés générales des écoulements adiabatiques :

II-3-1/ Equations fondamentales :

II-3-1-1/ Equation de conservation de la masse :

L'analyse qui va suivre se situe dans le cadre général de l'approximation unidimensionnelle. Nous supposons que l'écoulement est stationnaire, qu'il n'y a pas d'apport de chaleur δq=0, pas de travail δw=0, pas de force de frottement pariétal, pas d'obstacles induisant une traînée au sein de l'écoulement. Nous supposons d'autre part que l'effet des forces de volume est négligeable, et que l'écoulement est isentropique ds=0. Dans ces conditions, la conservation de la masse s'exprime sous la forme suivante :

$$\dot{m} = \rho A u = C^{te} \tag{II-6}$$

Avec :

- ρ : Masse volumique.
- u : Vitesse de l'écoulement.
- A : Aire de la section de la veine donnée.

$$\dot{m} = \frac{Au}{v} \quad donc \quad \dot{m}v = Au \tag{II-7}$$

$$\dot{m}dv = Adu + udA \tag{II-8}$$

$$\frac{dv}{v} = \frac{du}{u} + \frac{dA}{A} \tag{II-9}$$

Comme

$$\frac{dv}{v} = -\frac{d\rho}{\rho} \tag{II-10}$$

La relation (II-10) devient :

$$\frac{d\rho}{\rho}+\frac{du}{u}+\frac{dA}{A}=0 \qquad \textbf{(II-11)}$$

La relation (II-11) est l'équation de la continuité de la veine qui exprime la conservation de la masse. Si la section de la veine reste invariable (A=C^{te}) l'équation de la continuité (II-11) devient plus simple.

$$\frac{d\rho}{\rho}+\frac{du}{u}=0 \qquad \textbf{(II-12)}$$

II-3-1-2/ Equation de la quantité de mouvement :

Pour exprimer la conservation de la quantité de mouvement, nous partons du bilan macroscopique. Considérons l'élément de la vine de la Figure II-1, et envisageons le volume de contrôle délimité par les surfaces A, A+δA et la surface latérale δΣ.

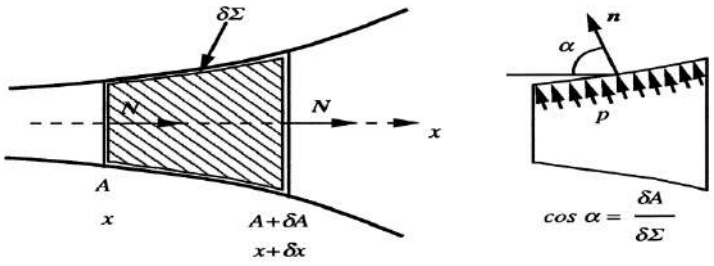


Figure (II-1) : Un élément de la veine

Pour cet élément, on peut exprimer la force pariétale qui s'exerce sur δΣ sous la forme :

$$\delta F_p=-\delta(FN) \qquad o\grave{u} \qquad F=PA+\dot{m}u \qquad \textbf{(II-13)}$$

En projection sur l'axe des x, l'expression (II-13) devient :

$$\delta F_{px} = -\delta(PA + \dot{m}u) \quad \textbf{(II-14)}$$

La force pariétale élémentaire peut aussi être évaluée en fonction de la pression moyenne qui s'exerce sur δΣ :

$$\delta F_{px} = -P\delta\sum \cos\alpha \quad \textbf{(II-15)}$$

Comme

$$\cos\alpha = \frac{\delta A}{\delta\sum} \quad \textbf{(II-16)}$$

On obtient :

$$\delta F_{px} = -P\delta A \quad \textbf{(II-17)}$$

En substituant cette relation (II-17) dans (II-14), on trouve

$$-P\delta A = -P\delta A - A\delta P - \dot{m}\delta u \quad \textbf{(II-18)}$$

Le terme $u\dot{\delta}m$ n'apparait pas dans l'expression (II-18) car $\dot{m}$ est constant dans toute la veine. On tire finalement :

$$dP + \rho u du = 0 \quad \textbf{(II-19)}$$

La relation (II-19) est l'équation de la quantité de mouvement.

Après quelques transformations, l'équation de la quantité de mouvement peut prendre d'autre forme.

$$-\frac{dP}{\rho} = udu \quad \textbf{(II-20)}$$

$$-\frac{dP}{\rho}\frac{d\rho}{d\rho} = -\frac{dP}{d\rho}\frac{d\rho}{\rho} \quad et \quad \frac{dP}{d\rho} = a^2 \quad avec\ M = \frac{u}{a} \qquad \textbf{(II-21)}$$

La relation (II-21) devient :

$$\frac{d\rho}{\rho} = -M^2\frac{du}{u} \qquad \textbf{(II-22)}$$

II -3-1-3/ Equation de l'énergie :

La conservation de l'énergie peut être exprimée en partant du premier principe de la thermodynamique écrit pour un système ouvert en régime permanent ou de l'expression équivalente du bilan macroscopique d'énergie. Pour l'unité de masse de fluide, on peut écrire :

$$\delta\left(h + \frac{u^2}{2} + gz\right) = w' + q \qquad \textbf{(II-23)}$$

Ici w'=0, q=0 et les forces volumiques peuvent être négligées. L'expression (II-23) devient :

$$\delta\left(h + \frac{u^2}{2}\right) = 0 \qquad \textbf{(II-24)}$$

Et par conséquent :

$$h + \frac{u^2}{2} = h_i \qquad \textbf{(II-25)}$$

Est constante dans l'ensemble du système. La constante désignée par h_i est l'enthalpie d'arrêt, c'est-à-dire l'enthalpie du fluide ramené aux conditions d'arrêt (au repos). Il est important de noter que l'enthalpie h ne peut jamais dépasser l'enthalpie d'arrêt h_i. D'après l'expression (II-25) ; la vitesse locale peut être déterminée à partir de l'enthalpie et l'enthalpie d'arrêt suivant :

$$u = [2(h_i - h)]^{1/2} \qquad \textbf{(II-26)}$$

II -3-1-4/Equation de Reynolds :

Les expériences réalisées par Reynolds (1883) lors de l'écoulement d'un liquide dans une conduite cylindrique rectiligne dans laquelle arrive également un filet de liquide coloré, ont montré l'existence de deux régimes d'écoulement : laminaire et turbulent.

En utilisant des fluides divers (viscosité différente), en faisant varier le débit et le diamètre de la canalisation, Reynolds a montré que le paramètre qui permettait de déterminer si l'écoulement est laminaire ou turbulent est **un nombre sans dimension appelé nombre de Reynolds** et donné par :

$$R_e=\frac{\rho v D}{\mu} \quad \text{ou} \quad R_e=\frac{v D}{\upsilon} \qquad \textbf{(II-27)}$$

ρ =masse volumique du fluide, v=vitesse moyenne, D=diamètre de la conduite

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

μ =viscosité dynamique du fluide, υ =viscosité cinématique

L'expérience montre que :

- Si **Re<2000** le régime est LAMINAIRE.
- Si **2000<Re<3000** le régime est INTERMEDIAIRE .
- Si **Re>3000** le régime est TURBULENT.

Ces valeurs doivent être considérées comme des ordres de grandeur, le passage d'un type d'écoulement à un autre se faisant progressivement.

II-3-1-5 Équation de l'énergie cinétique fluctuante [8]: $K=\frac{1}{2}R_{ij}$

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\overline{U}_k\frac{\partial k}{\partial xj}=-\overline{u_i u_k}\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_k}-\frac{1}{2}\frac{\partial \overline{u_i u_j u_k}}{\partial x_k}-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{U_k p}}{\partial x_k}+\nu\frac{\partial^2 k}{\partial x_k \partial x_k}-\nu\overline{\frac{\partial U_i}{\partial x_k}\frac{\partial U_j}{\partial x_k}} \qquad \textbf{(II-28)}$$

Cette équation que l'on peut obtenir par contraction tensorielle de l'équation aux tensions de Reynolds, exprimé que la variation de l'énergie cinétique de la turbulence est due aux effets des termes du second membre : Production d'énergie par action des gradients de vitesse moyenne sur la turbulence, transport par diffusion sous l'action des fluctuations de vitesse et de pression ; dissipation visqueuse et enfin diffusion visqueuse.

Schématiquement on écrira :

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\overline{U_k}\frac{\partial k}{\partial x_k}=P+D-\varepsilon+\nu\frac{\partial^2 k}{\partial x_k \partial x_k} \qquad \textbf{(II-29)}$$

L'équation de K est utilisée notamment dans les modèles simplifiées a un ou deux équations de transport.

II-3-2/Les équation des mouvements moyennes :

II-3-2-1/Équation de continuité de mouvement moyen :

L'équation de continuité du champ moyen est obtenue par moyenne de l'équation :

$$\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \qquad \textbf{(II-30)}$$

II-3-2-2/Équation de Navier-stocks moyenne :

Toutes les opérations de l'équation (II-3) sont linéaires à l'exception de celui du terme d'advection donc on obtient immédiatement l'équation moyenne suivante :

$$\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial t} + \overline{U_j}\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_i} + U_j\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{p_i}}{\partial x_i} + \nu\frac{\partial^2 \overline{U_i}}{\partial x_i \partial x_i} \qquad \textbf{(II-31)}$$

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

$$\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial t} + U_j\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\overline{\tau_{ij}} + R_{ij}\right) \qquad \textbf{(II-32)}$$

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

$$U_i\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} = \frac{\partial \overline{U_i U_j}}{\partial x_j} \qquad \textbf{(II-33)}$$

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

$$\left[R_{ij}\right] = -\rho\begin{bmatrix} \overline{UU} & \overline{VU} & \overline{UW} \\ \overline{UV} & \overline{VV} & \overline{VW} \\ \overline{UW} & \overline{VW} & \overline{WW} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(II-34)}$$

Où $[\tau i]$ est le tenseur des contraintes visqueuse, défini par :

$$[\tau ij] = \Gamma\left[\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right] \qquad \textbf{(II-34-a)}$$

Avec :

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_{ij}} = \Gamma\frac{\partial^2 \overline{U_i}}{\partial x_j \partial x_j}\left[\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right] \qquad \textbf{(II-34-b)}$$

II-3-2-3/Equation de transport des tensions de Reynolds :

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

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

Où $\frac{d}{dt}$: représente la dérivée particulaire (rappelons que $\frac{d\Phi}{dt}=\frac{\partial\Phi}{\partial t}+U_j\frac{\partial\Phi}{\partial x_j}$).

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 :

$$\frac{\partial(\overline{U_i}U_i)}{\partial t}+\left(\overline{U_k}+U_k\right)\frac{\partial\left(\overline{U_i}U_i\right)}{\partial x_k}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial(\overline{p}+p)}{\partial x_i}+\nu\frac{\partial^2(\overline{U_i}+U_i)}{\partial x_k\partial x_k} \qquad \textbf{(II-35)}$$

On fait la différence (II.37)-(II.31) en tendent compte de (II.32):

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+\overline{U_k}\frac{\partial u_i}{\partial x_k}+U_k\frac{\partial\overline{U_i}}{\partial x_k}+\frac{\partial(u_k u_i-\overline{u_k u_i})}{\partial x_i}=\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+\nu\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k\partial x_k} \qquad \textbf{(II-36)}$$

On peut écrire (II.37) pour l'indice j :

$$\frac{\partial u_j}{\partial t}+\overline{U_k}\frac{\partial u_j}{\partial x_k}+U_k\frac{\partial\overline{U_j}}{\partial x_k}+\frac{\partial(u_k u_j-\overline{u_k u_j})}{\partial x_i}=\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_j}+\nu\frac{\partial^2 u_j}{\partial x_k x_k} \qquad \textbf{(II-37)}$$

On multiple (II-37) par u_j et (II-31) par u_i et on somme les deux équations obtenus. En regroupant certains termes, il vient :

$$\frac{\partial u_j}{\partial t}+U_k\frac{\partial R_{ij}}{\partial x_k}=-R_{ik}\frac{\partial\overline{U_j}}{\partial x_k}-R_{jk}\frac{\partial\overline{U_i}}{\partial x_k}+\frac{P}{\rho}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_i}{\partial x_i}\right)-\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\overline{U_i U_j U_k}\right)-$$
$$\frac{\partial}{\partial x_k}\left[\frac{\overline{p}}{\rho}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\right]-2\nu\frac{\partial U_i}{\partial x_k}\frac{\partial U_j}{\partial x_k}+\nu\frac{\partial^2 R_{ij}}{\partial x_k\partial x_k} \qquad \textbf{(II-38)}$$

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 :

$$\frac{\partial R_{ij}}{\partial t}+\overline{U_k}\frac{\partial R_{ij}}{\partial x_k}=p_{ij}+T_{ij}+D_{ij}-\varepsilon_{ij}+\nu\frac{\partial^2 R_{ij}}{\partial x_k\partial x_k} \qquad \textbf{(II-39)}$$

T_{ij} : Transport diffusif du à la fluctuation de vitesse et aux fluctuations de pression
P : 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

$$R_{ij} = \overline{U_i U_j}$$

II-3-3/Problème de fermeture des équations:

Le système à résoudre comporte alors plus d'inconnues que d'équation, d'où la nécessite d'utiliser des modèles de fermeture pour le fermer.

On pourrait poursuivre la démarche, on trouve de nouvelles équations qui introduiraient à leur tour de nouvelles inconnues, ainsi que l'équation exacte d'un moment d'ordre *n* ($\overline{u_{i,1} u_{i,2} u_{i,3} \dots \dots u_{i,n}}$) implique nécessairement un moment d'ordre supérieur. Il est donc nécessaire de modéliser les inconnues supplémentaires à l'aide de lois complémentaire n'introduisant pas de nouvelle inconnue : modèle de fermeture.

Inconnue à calculer	Equation disponible	Nombre des équations	Inconnues supplémentaires
Champ de Vitesse Moyenne u_i (3) Pression Moyenne (1)	(1) Continuité (3)N_ S moyenne	(4)	Tension de Reynolds $\overline{u_i u_j}$ (6)
Champ de Vitesse Moyenne u_i (3) Pression Moyenne (1) Tension de Reynolds $\overline{u_i u_j}$ (6)	(1) Continuité (3)N_ S Moyenne (6)Tension de Reynolds	10	Corrélation triple $\overline{u_i u_j u_k}$(10) Corrélation Pression Vitesse $\overline{u_i \frac{\partial p}{\partial x_j}}$ (9) Corrélation Gradient de Vitesse $\overline{\frac{\partial U_i}{\partial x_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k}}$

Tableau II-1: La décomposition de Reynolds dans les équations de Navier Stokes[7].

Le problème donc est celui de la liaison entre les tensions de Reynolds et le champ moyen.

Pour réaliser la fermeture, des hypothèses et des modèles supplémentaires seront nécessaires pour traduire le comportement du milieu turbulent, il permet alors d'obtenir un nombre d'équation égale à celui des inconnues et ces équations peuvent ensuite être résolues par voie numérique.

II-4/Quelques hypothèses classiques de la fermeture de turbulence :

II-4-1/Hypothèse de chou :

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad \textbf{(II-40)}$$

II-4-2/Hypothèse de viscosité turbulente de bousines :

$$-\overline{u_i u_j} = \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3} k\delta_{ij} \qquad \textbf{(II-41)}$$

II-4-3/hypothèse de longueur de mélange de Prandtl :

$$\nu_t = L^2{}_m \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right) \qquad \textbf{(II-42)}$$

Qui devient en écoulement de type couche limite :

$$\nu_t = L^2{}_m \frac{\partial U_1}{\partial U_2} \qquad \textbf{(II-43)}$$

L_m : Etant la longueur de mélange qui peut être détermine' facilement pour un certain nombre d`écoulement.

II-4-4/Hypothèse de Prandtl-Kolmogorov :

$$\nu_t = C_\nu \sqrt{KL} \qquad \textbf{(II-44)}$$

II-5/Les modèles de turbulence et leurs classifications :

II-5-1/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.

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

$$V = L_m \sqrt{(2d_{ij})^2} \qquad \textbf{(II-45)}$$

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

$$V_T = L_m V = L_m{}^2 \sqrt{\left(\frac{\overline{OC_I}}{\partial x_J} + \frac{\overline{OC_I}}{\partial x_I}\right)^2} \qquad \textbf{(II-46)}$$

Lm : Longueur de mélange.

La longueur de mélange se calcul suivant le type d'écoulement des expressions variées, obtenus en générale a partir de l'expérience, sont en effet disponibles pour les écoulements
standard. Cependant, ces modèles ignorent complètement le caractère non local de la turbulence.

II-5-2/ 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 Kolmogorov -Prandtl [4] :

$$V_T = C_a L_s \sqrt{K} \qquad \textbf{(II-47)}$$

Où : L_s est une échelle de longueur des grandes structures turbulentes donnée en chaque P_t de l'écoulement.

II-5-3/Le modèle k-ε et RNG (modèle a deux équations de transport) :

Le k- ε RNG [launder & Spalding, 1974] est un modèle de turbulence est dérivé des instantanés de Navier-Stokes, en utilisant une technique mathématique appelée «groupe de renormalisation" (RNG) méthodes. Les résultats analytiques de dérivation dans un modèle avec des constantes différentes de celles de la norme k-ε modèle, et des termes supplémentaires et des fonctions dans les équations de transport pour k et ε. Les constantes deviennent :

$$\propto_t = \rho c_{\propto} \frac{K^2}{\varepsilon} \qquad \textbf{(II-48)}$$

Où ε taux de dissipation visqueuse de l'énergie cinétique turbulent, est donnée par la relation suivante:

$$\varepsilon = \propto \overline{\nabla \bar{u} : \nabla^t \bar{u}} \qquad \textbf{(II-49)}$$

Les deux équations de fermeture s'écrivant :

$$\rho\left(\frac{\partial K}{\partial t} + (\bar{u}\nabla)K\right) = \nabla\left(\left(\propto + \frac{\propto_t}{\sigma_k}\right)\nabla K + \mathrm{P} + G - \rho\varepsilon\right) \qquad \textbf{(II-50)}$$

$$\rho\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + (\bar{u}\nabla)\varepsilon\right) = \nabla\left(\left(\propto + \frac{\propto_t}{\sigma_k}\right)\nabla\varepsilon + C_{\varepsilon 1}(P + C_{\varepsilon 3}G)\frac{\varepsilon}{K} - C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{K}\right)$$

Avec :

$$\mathrm{P} = \propto_t t_r(\nabla\bar{u} : \nabla\bar{u} + \nabla^t\bar{u} : \nabla\bar{u}) \qquad \textbf{(II-51)}$$

$$G = -\frac{\propto_t}{\sigma_t}\beta g . \nabla\bar{T}$$

Les constantes, déterminées empiriquement par les auteurs du modèle, sont données dans le tableau suivant [5]:

c_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε	σ_T	$C_{\varepsilon 1}C_{\varepsilon 2}$
0,09	1,44	1,92	1	1,3	1	0,7

Tableau II.2: constantes du modèle k-ε

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, il apparaît certaines insuffisances dues notamment à la valeur des constantes et au fait que le modèle est trop diffusif. Les modifications apportées au modèle k$-\varepsilon$ sont nombreuses, dont notamment les extensions suivantes:

II-5-4/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.

II-5-5/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]. Il consiste en une estimation au cours du calcul de la constante$C_{\varepsilon 1}$, remplacée dans l`équation de dissipation par $C_{\varepsilon 1}$ donnée par l'expression (II.54). Cette expressions ajoute un terme fonction du taux de déformation η à l'équation du taux de dissipation le rendant ainsi moins diffusif.

$$C_{\varepsilon 1}^{'} = C_{\varepsilon 1} - \eta \frac{(1-\eta_0)}{1+\beta\eta^3} \qquad \textbf{(II-52)}$$

c_μ	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	σk	$\sigma\varepsilon$	σt	$C_{\varepsilon 1}C_{\varepsilon 2}$	η_0	β
0.005	1.42	1.68	0.7179	0.7179	1	0.7	4.33	0.012

Tableau II-3: constantes du modèle RNG

II-5-6/Modèle Algébrique aux tensions de Reynolds (ASM):

A partir des équations de Reynolds, Robin (1972) a proposé que le transport (convection plus diffusion) des contraintes de Reynolds est proportionnel a celui de l'énergie cinétique turbulente on a :

$$\frac{\partial(\rho U_k \overline{U_i U_j})}{\partial x_k} - D_{ij} = \frac{\overline{U_i U_j}}{K}(P_K - \rho\varepsilon) \qquad \textbf{(II-53)}$$

*o*ù : $\frac{\overline{U_i U_j}}{K}$: est le coefficient de proportionnalité qui n'est pas une constante en générale

L′introduction de cette hypothèse (II. 41) Dans l'équation de transport est de la forme suivante :

$$\frac{\partial(\rho U_K \overline{U_i U_j})}{\partial x_k} = D_{ij} + P_{ij} + Rij = \frac{2}{3}\rho E \delta_{ij} \qquad \textbf{(II-54)}$$

*O*ù:

$$\overline{U_i U_j} = K\left[\left(\frac{2}{3}\delta_{ij} + ((1-C_2)\left(\frac{P_{ij}}{\varepsilon} - \frac{2}{3}\frac{P_k}{\varepsilon}\delta_{ij}\right)\right) \Big/ \left(\rho C_1 + \frac{P_k}{\varepsilon} - \rho\right)\right]$$

(II-55)

Avec :

$$P_{ij} = -\rho\overline{U_i U_k}\frac{\partial U}{\partial x_t} - \rho\overline{U_i U_k} - \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \qquad \textbf{(II-56)}$$

La sommation donne la production d'énergie turbulente :

$$\boldsymbol{P_k = \frac{1}{2} P_{ij}} \qquad \textbf{(II-57)}$$

Pour la redistribution d'énergie, différents modèles sont proposés dans le présent code (TEAM), ils ont utilisés le modèle suivant :

$$\mathbf{R_{ij} = R_{ij,1} + R_{ij,2} + R_{ij,w}} \qquad \textbf{(II-58)}$$

Où :

$$\mathbf{R_{ij,1} = -C_1 \rho \varepsilon \left(\frac{\overline{U_i U_j}}{K} - \frac{2}{3}\delta_{ij} \right)} \qquad \textbf{(II-59)}$$

$$\mathbf{R_{ij,2} = -C_2 \left(P_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij} \right)} \qquad \textbf{(II-60)}$$

Et w (les termes a la proximité de la paroi) :

$$\mathbf{R_{11,w} = \left\{ \acute{C}_1 \frac{\varepsilon}{K} V'^2 - C_2 \acute{C}_2 \left(P_{22} - \frac{2}{3} P_k \right) \right\} F}$$

$$\mathbf{R_{11,w} = \left\{ -2\acute{C}_1 \frac{\varepsilon}{K} V'^2 - C_2 \acute{C}_2 \left(P_{22} - \frac{2}{3} P_k \right) \right\} F} \qquad \textbf{(II-61)}$$

$$\mathbf{R_{11,w} = \left\{ \acute{C}_1 \frac{\varepsilon}{K} V'^2 - C_2 \acute{C}_2 \left(P_{22} - \frac{2}{3} P_k \right) \right\} F}$$

$$\mathbf{R_{11,w} = \left\{ -1.5\acute{C}_1 \frac{\varepsilon}{K} \overline{UV} + 1.5 C_2 \acute{C}_2 P_{12} \right\} F}$$

Et le terme F est donnée par:

$$\mathbf{F = \frac{K^{3/2}}{2.\varepsilon X_n}} \qquad \textbf{(II-62)}$$

Est enfin achevée par l'équation suivante pour l'énergie turbulente K:

$$\boldsymbol{\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U K) = \frac{\partial}{\partial x_k}\left(C_k \frac{K}{\varepsilon} \overline{U_k U_i} \frac{\partial K}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \varepsilon} \qquad \textbf{(II-63)}$$

Et pour la fermeture de l`équation de dissipation s on a :

$$\boldsymbol{\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_1 \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k}\left(C_\varepsilon \frac{K}{\varepsilon} \overline{U_k U_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right)} + \mathbf{\frac{\varepsilon}{K}(C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) - \rho \varepsilon} \qquad \textbf{(II-64)}$$

Les constants empiriques intervenants dans le modèle sont données dans le tableau suivant [6]:

C_s	C_1	C_2	C_ε	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	C'_1	C'_2
0,22	1,8	0,6	0,15	1,44	1,92	0,5	0,3

Tableau (II-4) : les constantes du modèle ASM

L'ensemble des équations (II.63), (II.64) et (II.55) constitue le modèle de contrainte algébrique. La distribution des équations (II-64) à (II-63) dans l'équation (II-55) donne le système algébrique suivant :

$$a_{i1}\overline{U'^2} + a_{i2}\overline{U'^2} + a_{i3}\overline{U'V'} + a_{i4}\overline{W'^2} = b_i \quad \textbf{(II-65)}$$

La condition de contraintes normales inconditionnellement positives est assurée par la détermination simultanée de toutes les contraintes normales par la résolution du système algébrique suivant :

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho\overline{U^2} \\ \rho\overline{V^2} \\ \rho\overline{W^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad \textbf{(II-66)}$$

Où les coefficients sont définis tel que :

$a_{ij} \leq 0$ pour i ≠ j

Le système algébrique (II-66) est résolu par le théorème de cramer.

soit :

$$\rho\overline{U^2} = \frac{V_1}{V}, \quad \rho\overline{V^2} = \frac{V_2}{V}, \rho\overline{W^2} = \frac{V_3}{V}$$

Une fois les contraintes normales déterminées, nous calculons la contrainte de cisaillement par :

$$\overline{U'V'} = -\frac{a_{31}}{a_{33}}U'^2 - \frac{a_{33}}{a_{33}}V'^2 - \frac{a_{32}}{a_{33}}W'^2 - \frac{b_3}{a_{33}} \quad \textbf{(II-67)}$$

II-6/Modélisation du transfert de chaleur:

II-6-1/Bilan Thermique : Equation De Chaleur :

Soit v une partie quelconque de **V** limitée par la surface s

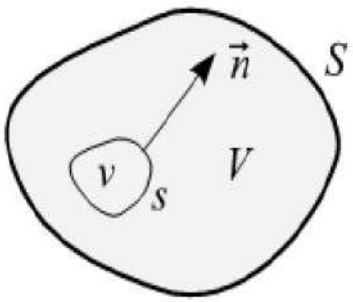


Figure II-2 : Bilan thermique.

La puissance thermique stockée dans **v** est égale a la somme de la puissance thermique q générée par les sources volumiques contenues dans **V** et de la puissance thermique reçue sous forme de flux a travers la surface **S** :

$$\int \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dv = \int q dv + \int -\vec{n}\left(-\bar{\bar{\lambda}}\,\overrightarrow{grad}\,T\right) ds \quad \textbf{(II-68)}$$

Le domaine v étant arbitraire, on en déduit : en tout point du solide :

$$\rho c_p \dot{T} - \text{div.}\left(-\bar{\bar{\lambda}}\,\overrightarrow{grad}\,T\right)q = 0 \qquad \textbf{(II-69)}$$

Pour un matériau homogène et isotrope, l'équation (II. 4) s'écrit dans le repère orthonormé {x, y} :

$$\rho c_p \dot{T} = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + q \qquad \textbf{(II-70)}$$

Où :

$$\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

II-6-2/Transferts de chaleur en écoulements incompressibles :

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.

$$\rho c_p\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(VT)T\nabla V\right) + aT = \nabla(\lambda\nabla T) + \Phi + S \qquad \textbf{(II-71)}$$

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 :

$$\Phi = 2\mu D_{ij}\frac{\partial U_i}{\partial x_i}$$

Avec :

$$D_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)$$

II -7/Conclusion :

On a définie dans ce chapitre mathématique de transfert de chaleur et l'écoulement diphasique turbulent et la non linéarité des équations.

L'intérêt des modèles ASM et RSM par rapport aux modèles du premier ordre K-ε est qu'ils permettent de s'affranchir d'une relation locale entre les tensions de Reynolds et l'écoulement moyen.

Donc il impossible de résoudre le problème analytiquement alors la nécessité des méthodes numérique qui sont le but du chapitre suivant.

III-1/Introduction :

Pour résoudre un problème de la physique il faut distinguer le modèle physique du modèle mathématique. Le modèle physique peut s'exprimer en mots et phrases qu'il est nécessaire de traduire en expressions mathématiques. Lorsque le problème est ainsi bien posé, il est alors possible de le résoudre soit mathématiquement (solution analytique) ou numériquement (solution numérique). Les solutions analytiques, basées sur la forme locale du problème (Equations aux Dérivées Partielles: « E.D.P » associées aux conditions initiales et aux limites), ne peuvent être déterminées dans le cas général sauf dans certains cas classique connus depuis bien longtemps. Dans le cas général où il y'a des difficultés si l'on résoudre les équations aux drivées partielles qui régissent les phénomènes étudiés, on fait appel aux méthodes numériques, le principe de ces méthodes est de transformer les équations différentielles en un système d'équations algébriques.

III-2/Les méthodes numériques :

On présente les méthodes numériques comme des méthodes pour résoudre des problèmes physiques et mathématiques ou plus généralement des équations différentielles avec conditions aux limites.

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 :

- 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 noeuds du maillage.

- Avantages : grande simplicité d'écriture et faible coût de calcul.
- Inconvénients : limitation de la géométrie des domaines de calculs, difficultés de priseen.

compte des conditions aux limites portant sur les dérivées ou les gradients de l'inconnue.

III-2-2/Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis consiste à rapprocher les équations différentielles régissant pour un système avec un ensemble d'équations algébriques concernant un nombre limité de variables. Ces méthodes sont populaires parce qu'ils peuvent facilement être programmés. Les techniques des éléments finis ont été initialement développées pour des problèmes structurels, mais ils ont été étendus à de nombreux problèmes du terrain. 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 noeuds 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 noeuds.
Avantages : traitement possible de géométries complexes, détermination plus naturelle des conditions aux limites, possibilité de démonstrations mathématiques de convergence.
Inconvénients : complexité de mise en oeuvre et coût en temps de calcul et en mémoire..

III-2-3/Méthode des volumes finis :

Cette méthode est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles comme la méthode des différences finies et la méthode des éléments finis mais, contrairement à la méthode de différence finies qui utilise des approximations de dérivées, la méthode de volume fini utilise comme la méthode d'éléments finis, des approximations d'intégrales. 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. La clé de cette méthode réside dans l'application du théorème de la divergence ou théorème d'Ostrogradski, qui permet de changer une intégrale de volume en intégrale de surface. L'un des principaux avantages de la méthode des volumes finis est d'assurer une conservation intégrale exacte des grandeurs quelle que soit la taille du maillage et c'est pour raison qu'elle est très largement utilisée pour la résolution des phénomènes gouvernés par des équations à dérivées partielles.

III-3/Formulation des éléments finis :

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 obtenues en utilisant le principe de Hamilton comme suit :

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

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 :

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

i=1,2 …..
Où {wi} et {ẇi} 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-4/Les différences finies :

Étant donné une fonction *f*(*x*) et une constante positive *h*, je défini la différence latérale ascendante :

$$\Delta_h f(x) \equiv f(x+h) - f(x). \qquad \textbf{(III-3)}$$

En général, la constante *h* est définie par le contexte, ce qui me dispense de la faire figurer en indice.
Comme je ne travaillerai, dans la suite, qu'avec des abscisses équidistantes *xi* = *x*0 + *ih; i* =0*;* 1*;* 2*;* 3*; : : :*, j'utiliserai la notation plus concise

$$\Delta f(x_i) \equiv \Delta f_i = f(x_{i+1}) - f(x_i) \equiv f_{i+1} - f_i . \qquad \textbf{(III-4)}$$

h s'appelle le pas ou l'intervalle tabulaire et *f*(*xi*+1) = *f*(*xi*+*h*). Je défini maintenant par récurrence les différences latérales d'ordre supérieur

$$\Delta^{p+1} f \equiv \Delta^p f(x+h) - \Delta^p f(x), \qquad p \geq 0. \qquad \textbf{(III-5)}$$

Par convention,

$$\Delta^0 f(x) \equiv f(x). \textbf{ Ainsi, } \Delta^2 f = f(x+2h) - 2f(x+h) + f(x). \textbf{ (III-6)}$$

Le calcul pratique des différences finies se fait commodément à l'aide d'un tableau (semblable à celui utilisé pour formelles différences divisées, mais sans divisions).

x_i	f_i	Δf_i	$\Delta^2 f_i$	$\Delta^3 f_i$
x_0	f_0			
		Δf_0		
x_1	f_1		$\Delta^2 f_0$	
		Δf_1		$\Delta^3 f_0$
x_2	f_2		$\Delta^2 f_1$	
		Δf_2		$\Delta^3 f_1$
x_3	f_3		$\Delta^2 f_2$	
		Δf_3		$\Delta^3 f_2$
x_4	f_4		$\Delta^2 f_3$	
		Δf_4		
x_5	f_5	$\vdots$	$\vdots$	

III-5/Dérivation des équations de discrétisation :

Les équations du système sont écrites sous la forme généralisée suivante [7]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_{\emptyset})+\frac{\partial}{\partial x}(\rho Vx\, c_{\emptyset}\emptyset)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho Vy\, c_{\emptyset}\emptyset) =\frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_{\emptyset}\frac{\partial \emptyset}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_{\emptyset}\frac{\partial \emptyset}{\partial y})+ S_{\emptyset} \quad \textbf{(III-7)}$$

Où:

$\emptyset$: Variable généralisée

$c_{\emptyset}$: Coefficient d'advection transitoire.

$\Gamma_{\emptyset}$: Coefficient de diffusion.

$S_{\emptyset}$: Termes source.

Le tableau (III-1) regroupe les expressions des différents termes dans les différentes équations du système.

Variable $\emptyset$	coefficient d'advection $c_{\emptyset}$	Diffusivité $\Gamma_{\emptyset}$	Termes source $S_{\emptyset}$
Vx	1	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}(\mu\frac{\partial u}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\mu\frac{\partial u}{\partial y})-\sigma\nabla\left\lvert\frac{\nabla c}{\lVert\nabla c\rVert}\right\rvert\frac{\nabla c}{\lVert\nabla c\rVert}$
T	1	$\frac{K}{\rho C^e}$	$\frac{\varphi}{\rho c^e}$
ρ	1	0	0

***Tableau III-1 : Expression des* coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables.**

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 noeuds.

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.

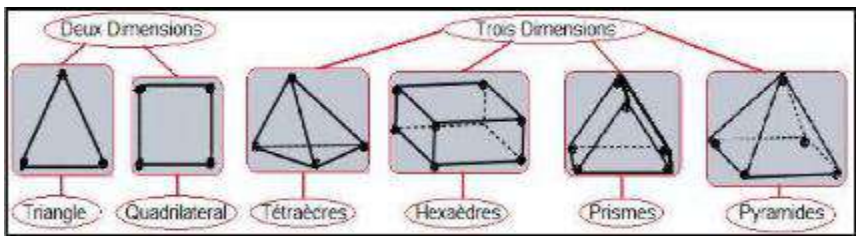


Figure III-1 : Exemples de mailles utilisées en Volumes Finis.

III-6.2/ Composants du maillage :

Les composants sont définis dans un processeur : Cell = volume de contrôle divisant la géométrie

Le domaine de calcul est défini par un maillage qui représente le fluide et les faces solides qui interviennent.

Face = frontière d'une cell .

Edge = frontière d'une face .

Node = point de maillage.

Zone = groupe de nœuds, face et/ou cell.

Les conditions limites sont assignées aux faces zones.

Les données des matériaux et les termes sources sont assignés aux cell zones.

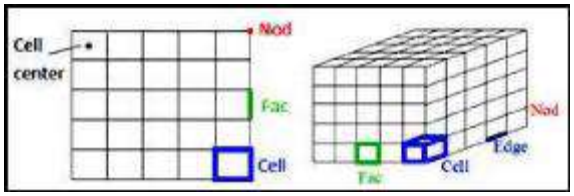


Figure III-2: Composant d'un maillage.

III-6.3/ Choix du type de maillage :

> 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.

formes géométriques simplifiées et de les

✓ 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.

✓ Ses 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.

✓ Ses 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.

✓ Ses 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.

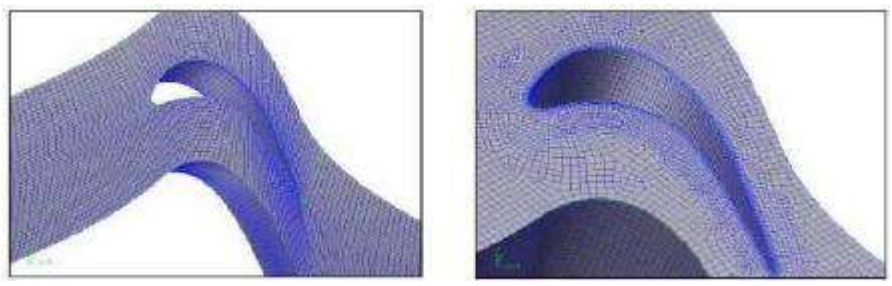


Figure (II.4). Exemple de maillage structuré et non structuré autours d'un profil.

> Maillage hybride

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

✓ Ses avantages

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

✓ Ses 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-6.4/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 .

$$([A_e^{\text{transient}}] + [A_e^{\text{dvection}}] + A_e^{\text{diffusion}}])\ \{\emptyset e\} = \{s_e^{\emptyset}\} \qquad \text{[III -8]}$$

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

III-6.5/ Terme temporelle :

Le premier des contributions de la matrice élémentaire est le terme de transition. Sa forme générale est simplement [7]:

$$[A_e^{\text{tr ansient}}] = \int w^e \frac{(\partial \rho\, c\emptyset\, \emptyset)^e}{\partial t} \mathrm{d(vol)} \qquad \text{[III -9]}$$

Avec :

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

Pour le noeud i:

$$\int w^e \frac{(\partial \rho\, c\emptyset\, \emptyset)^e}{\partial t} \mathrm{d(vol)} = \int w_i^e \rho c_{\emptyset} w_j^e \mathrm{d(vol)} \frac{\partial \emptyset_i^e}{\partial t} + \int w_i^e \frac{\partial\, \rho c\emptyset}{\partial t} w_j^e \mathrm{d(vol)}\, \emptyset_j^e \qquad \text{[III -10]}$$

Les indices inférieurs i et j indiquent le nombre de noeud. Si la deuxième partie de l'équation [III.3] est négligée, la matrice de masse peut être exprimée comme:

$$M_{ij} = \int w_i^e\ \rho c\emptyset w_j^e \mathrm{d(vol)} \qquad \text{[III -11]}$$

Si l'approximation localisée de masse est employée.

$$\mathbf{Mij} = \delta ij \int w_i^e\ \rho c_{\emptyset}\ \mathbf{d\ (vol)} \qquad \text{[III -12]}$$

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.

$$(\rho\emptyset)n = (\rho\emptyset)n-1+\Delta t[\delta(\delta(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t}) + (1 - \delta)(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t})_{n-1}] \qquad \textbf{[III -13]}$$

Ou:

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

$$(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t})n = \frac{1}{\Delta t\delta}(\rho\emptyset)_n - \frac{1}{\Delta t\delta}(\rho\emptyset)_{n-1} + (1 - \frac{1}{\delta}) \qquad \textbf{[III -14]}$$

III-6.6/ 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).

III-6.6.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.

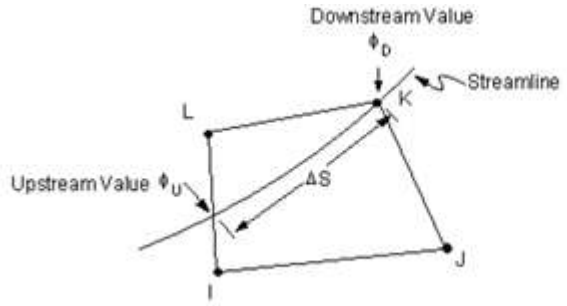


Figure (II.5).l'approche de ligne de courant d'upwind

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 [7]:

$$\frac{\partial(\rho\, Vx\, c\emptyset\emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\, Vy\, c\emptyset\emptyset)}{\partial y} = \frac{\partial(\rho\, Vs\, c\emptyset\emptyset)}{\partial s} \qquad \textbf{[III -15]}$$

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

$$[A_e^{\text{dvection}}]=\frac{d(\rho\ Vs\ c\emptyset\emptyset)}{ds}\int w^e \mathrm{d(vol)} \qquad \text{[III -16]}$$

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

$$\frac{d(\rho\ Vsc\emptyset)}{ds}=\frac{(\rho\ Vsc\emptyset\emptyset)u-(\rho\ V\ sc\emptyset\emptyset)D}{Ds} \qquad \text{[III -17]}$$

Ou :

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

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

Δs = la distance du point situé en amont à l'aval du noeud.

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 noeuds arrière. Le calcul effectué est basé sur les vitesses, pour voir d'où elle est venue la ligne profilée dans le noeud. Des facteurs pesants sont calculés, basé sur la proximité de l'endroit d'upwind aux noeuds voisins.

III-6.6.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 [7]:

$$[A_e^{\text{dvection}}]=\int w^e\{\frac{\partial(\rho\ Vx\ c\emptyset\emptyset)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho\ Vy\ c\emptyset\emptyset)}{\partial y}\}\mathrm{d(vol)}+c_{2\tau}\int\frac{zh}{2u_{mag}}\{\frac{Vx\ \partial\omega^e}{\partial x}+\frac{Vy\partial\omega^e}{\partial y}\}$$
$$\{\frac{v_x\partial(\rho c_\emptyset\emptyset)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v_y c_\emptyset\emptyset)}{\partial y}\}\mathrm{d(vol)} \qquad \text{[III -18]}$$

Ou:

C2τ = coefficient global réglé à 1,0.

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

$$U_{mag}=\sqrt{V_x{}^2+V_y{}^2} \qquad \begin{cases} 1 & si\ 0\le p<3 \\ \frac{p_e}{3} & si\ p_e\ge 0 \end{cases} \qquad \text{[III -19]}$$

$p_e=\frac{\rho cp\ U_{mag}h}{2\Gamma\phi}$ 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-6.6.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 [7].

$$[A_e^{\text{dvection}}]=\int w^e\{\frac{\partial(\rho\, Vx\, c\emptyset\emptyset)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho\, Vy\, c\emptyset\emptyset)}{\partial y}\}d(vol)+c_{2\tau}\int\frac{zh}{2u_{mag}^e}\{\frac{v_x^e\,\partial\omega^e}{\partial x}+\frac{V_y^e\partial\omega^e}{\partial y}\}$$
$$\{\frac{v_x^e\partial(\rho c_{\emptyset}\emptyset)}{\partial x}+\frac{v_y^e\partial(\rho v_y c_{\emptyset}\emptyset)}{\partial y}\}d(vol) \qquad \text{[III -20]}$$

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-6.7 /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 [7].

$$\text{Diffusion contribution} =\int w^e\frac{\partial}{\partial x}(\Gamma\emptyset\frac{\partial\emptyset}{\partial x})d(vol)+\int w^e\frac{\partial}{\partial y}(\Gamma\emptyset\frac{\partial\emptyset}{\partial y})d(vol) \quad \text{[III -21]}$$

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:

$$\int w^e\frac{\partial}{\partial x}(\Gamma\emptyset\frac{\partial\emptyset}{\partial x})d(vol)=\int\frac{\partial w^e}{\partial y}(\Gamma\emptyset\frac{\partial\emptyset}{\partial y})d(vol) \qquad \text{[III -22]}$$

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

$$\frac{\partial\emptyset}{\partial x}=W_x^e\emptyset \qquad \text{[III -23]}$$

$$W_x^e=\frac{\partial w^e}{\partial x} \qquad \text{[III -24]}$$

La matrice de diffusion peut maintenant être exprimée comme:

$$\left[A_e^{diffusion}\right]=\int w_x^e\,\Gamma\phi W_x^e+W_y^e\,\Gamma\phi)\mathrm{d(vol)} \qquad \textbf{[III -25]}$$

III-6.8 /Termes source:

L'évaluation des termes de source se fait comme suite [7]:

$$s_\phi^e=\int w^e\, s_\phi \mathrm{d(vol)} \qquad \textbf{[III -26]}$$

III-7 /Étude comparative : différences finies et éléments finis

*Différences finies (rappels)	* Éléments finis
• Équation d'équilibre + C. aux L.	= Forme FORTE ☑
• Générer le maillage du domaine	Obtention forme faible intégrale ✘
• Nœuds équidistants	Maillage ☑
• Nœuds	Nœuds
• Éléments (connectivité)	Éléments (connectivité) ✘
• Éléments (connectivité)	Discrétisation de la forme ✘
• Obtention de l'équation discrète	intégrale sur chaque élément
• (matrice et vecteur élémentaires)	(matrice et vecteur élémentaires)
• Formules « toutes faites »	= Assemblage ☑
• Idem pour les C. aux L.	…… ✘
• Construction du système	…… ✘
• Résolution du système	
• Post-traitement	

III-7.1 /Formes forte et faible :

Particularité de la méthode des éléments finis (MEF) : Discrétiser, non pas la relation d'équilibre, mais une forme« affaiblie » de cette équation.

Vocabulaire : cette forme est appelée sous des noms divers:

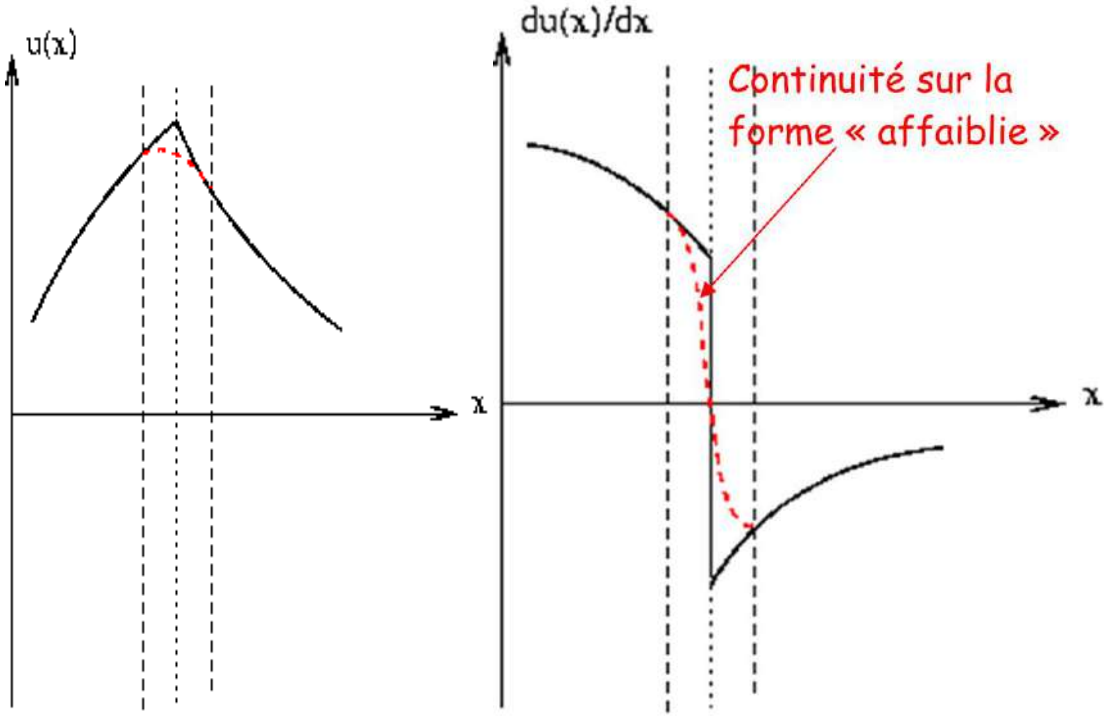
- ☐ Forme faible
- ☐ Forme intégrale
- ☐ Forme variationnelle …

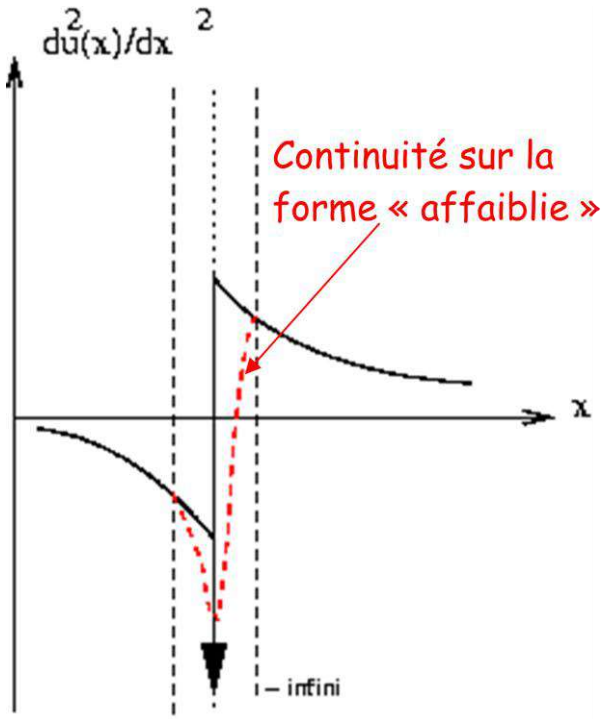
- ☐ Motivation : affaiblir pour réduire certaines contraintes mathématiques (discontinuités …) empêchant l'utilisation d'outils classiques pour sa résolution.
- ☐ Conséquence : la solution d'une forme faible correspond à une solution approchée ou « faible » en termes de continuité.

Illustration du principe d'affaiblissement

Discontinuité sur la dérivée exacte

Continuité sur la dérivée « affaiblie »





Solution « forte » : traits pleins noirs

Solution « faible » : traits pointillés rouges

Avec affaiblissement : dérivées ordre 1 et 2 sont désormais continues et donc discrétisables et intégrables !

III-7.2/ Technique d'affaiblissement par la Méthode des résidus pondérés :

Reprenons l'exemple de thermique 1D régi par :

$$\mathbf{k}\frac{d^2T(x)}{dx^2} + f = 0, \quad \forall\, x \in [0, L] \qquad \textbf{[III -27]}$$

f**:cst**

$$\mathbf{T}\,(x = 0) = 30$$

$$\mathbf{q(L)} = -k\frac{dT}{dx}(L) = h(T(L) - T_{ext}\,) \qquad \textbf{[III -28]}$$

Définition : nous appelons résidu (noté *Res*), l'expression mathématique de la forme forte du problème étudié.

Soit, dans notre cas : $Res(T) = k\frac{d^2T(x)}{dx^2} + f$ **[III -29]**

Ce résidu s'annule quand T(x) est solution.

III-7.3/ Méthode des résidus pondérés :

III-7.3.1/ Méthode générale :

1. Pondération du résidu par une fonction-test
2. Intégration sur le domaine
3. Intégration par parties
4. Introduction des conditions aux limites

Application : équation de la chaleur en 1D :

III-7.3.1.a/ Pondération du résidu par une fonction-test :

$$\Psi(x)\times\left(k\frac{d^2T}{dx^2}+f\right)=0,\qquad \forall x\in[0,L],\forall\Psi(x)\,fonction-test \qquad \textbf{[III -30]}$$

$\left(k\frac{d^2T}{dx^2}+f\right)$: **résidu**

III-7.3.1.b/ Intégration sur le domaine :

$$W=\int_0^L\Psi(x)\times\left(k\frac{d^2T}{dx^2}+f\right)dx=0,\forall x\in[0,L],\forall\Psi(x) \qquad \textbf{[III -31]}$$

III-7.3.1.c/ Intégration par parties :

$$W=-\int_0^L\frac{d\Psi(x)}{dx}(x)k\frac{dT(x)}{dx}dx+\left[\Psi(x)k\frac{dT(x)}{dx}\right]+\int_0^L\Psi(x)f\,dx=0 \qquad \textbf{[III -32]}$$

$$\forall x\in[0,L],\forall\Psi(x)$$

Avantages :

1. Réduction de l'ordre maximum des dérivées présentes
2. Introduction « naturelle » des conditions aux limites

✓ **intégrations par parties en 1D :**

$$\int_0^L\Psi(x)\frac{dT(x)}{dx}dx=-\int_0^L\frac{d\Psi(x)}{dx}T(x)\,dx+[\Psi(x)T(x)]_0^l$$

[III -33]

$$\int_0^L\Psi(x)\frac{d^2T(x)}{dx^2}dx=-\int_0^L\frac{d\Psi(x)}{dx}\frac{dT(x)}{dx}dx+\left[\Psi(x)\frac{dT(x)}{dx}\right]_0^l$$

Technique d'affaiblissement par la Méthode des résidus pondérés

III-7.3.1.d/ Introduction des conditions aux limites :

$$\boldsymbol{W = -\int_0^L \frac{d\Psi(x)}{dx}(x) k \frac{dT(x)}{dx} dx + \Psi(L) k \frac{dT}{dx}\Big|_L - \Psi(0) k \frac{dT}{dx}\Big|_0 + \int \Psi(x) f\, dx = 0} \quad \textbf{[III -34]}$$

$$\Psi(L) k \frac{dT}{dx}\Big|_L = \textbf{-h (T(L)-T}_{\textbf{ext}}$$

$$\forall x \in [0, L], \forall \Psi(x)$$

Traitement de :

$$-\Psi(0) k \frac{dT}{dx}\Big|_0 \qquad \textbf{[III -35]}$$

Deux possibilités :

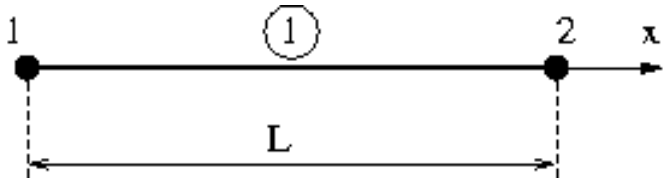
1.Introduction du flux inconnu en x=0 :

$$-\Psi(0) k \frac{dT}{dx}\Big|_0 = \Psi(0) q(0) \quad \Psi(0) q(0) \qquad \Psi(0) = 0 \qquad \textbf{[III -36]}$$

2. Élimination en choisissant :

III-7.4/ Discrétisation par éléments finis :

- Maillage avec un seul élément fini à deux noeuds :



- Forme faible (ou intégrale) :

$$\boldsymbol{W = +\int_0^L \frac{d\Psi(x)}{dx}(x) \frac{dT(x)}{dx} dx - \int_0^L \Psi(x) f\, dx + \Psi(L) h(T(L) - T_{ext}) - \Psi(0) q(0) = 0} \qquad \textbf{[III -37]}$$

$\textbf{W}_{\textbf{int}}$ $\qquad$ $\textbf{w}_{\textbf{cL}}$

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

et de leurs dérivées : $\frac{d\Psi}{dx}, \frac{dT}{dx}$

III-7.4/ 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 :

$$T(x)=N_1(x)T_2+N_2(x)T_2 \qquad \textbf{[III -38]}$$

- Vocabulaire : $N_1(x), N_2(x)$

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

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

Application : pour un élément fini à deux noeuds

Calcul des fonctions N_i : élément à deux noeuds

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

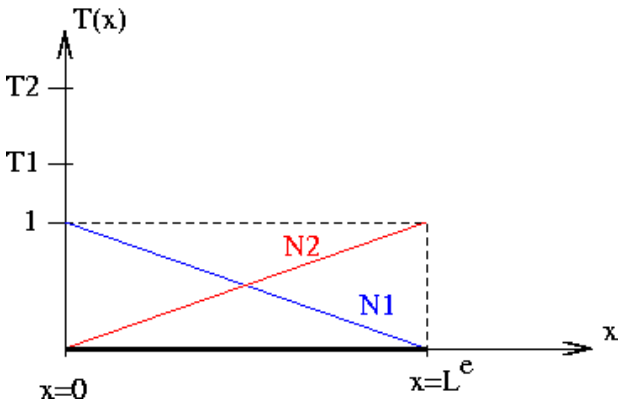
$$N_1(x)=a_1x+b_1, \qquad N_2(x)=a_2x+b_2 \qquad \textbf{[III -39]}$$

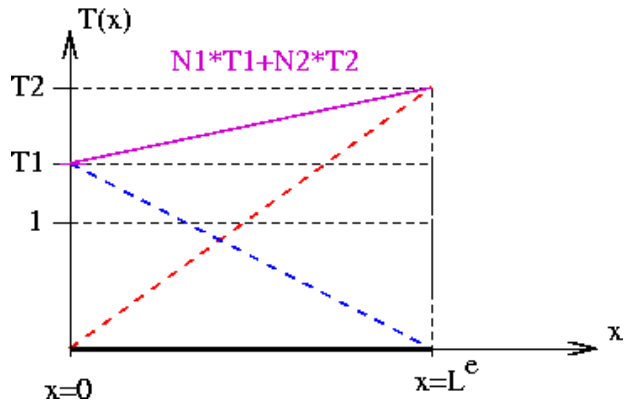
2.Constructiondes deux systèmes d'équations

$$\begin{cases}N_1(0)=a_1\times 0+b_1=1 \\ N_1(L)=a_1L+b_1=0\end{cases}, \quad \begin{cases}N_2(0)=a_2\times 0+b_2=0 \\ N_2(L)=a_2\times L+b_2=1\end{cases} \qquad \textbf{[III -40]}$$

3.Résolution :

$$N_1(x)=1-\frac{x}{L}, \qquad N_2(x)=\frac{x}{L}$$





III-7.5/ Approximation de la fonction-test :

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-7.6/Discrétisation de la forme intégrale :

$$\boldsymbol{T(x) = N_1(x)T_1 + N_2(x)T_2 = \langle N_1(x) \quad N_2(x)\rangle \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix}} \qquad \textbf{[III- 41]}$$

Vecteur ligne — Vecteur colonne

- La fonction-test est approximée de la même manière :

$$\boldsymbol{\Psi(x) = N_1(x)\Psi_1 + N_2(x)\Psi_2 = \langle N_1(x) \quad N_2(x)\rangle \begin{pmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{pmatrix}} \qquad \textbf{[III -42]}$$

Vocabulaire : si la variable inconnue et la fonction-test utilisent les mêmes fonctions Ni, l'approximation est alors dite de type GALERKIN

- Les dérivées se calculent selon :

$$\boldsymbol{\frac{dT}{dx} = \langle \frac{dN_1(x)}{dx} \quad \frac{dN_2(x)}{dx}\rangle \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix}, \frac{d\Psi}{dx} = \langle \frac{dN_1(x)}{dx} \quad \frac{dN_2(x)}{dx}\rangle \begin{pmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{pmatrix}} \qquad \textbf{[III -43]}$$

- Rappel : $W = W_{int} + W_{CL}$
- Introduction des approximations dans la forme intégrale :

$$\boldsymbol{W_{int} = \int_0^L \langle \Psi_1 \quad \Psi_2\rangle \begin{pmatrix} N_1' \\ N_2' \end{pmatrix} k \langle N_1' \quad N_2'\rangle \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} dx - \int_0^0 \langle \Psi_1 \quad \Psi_2\rangle \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \end{pmatrix} f\, dx} \qquad \textbf{[III -44]}$$

Soit :

$$\boldsymbol{W_{int}} = \int_0^L \langle \Psi_1 \quad \Psi_2 \rangle \, \boldsymbol{k} \begin{bmatrix} (\boldsymbol{N_1}')^2 & \boldsymbol{N_1}'\boldsymbol{N_2}' \\ \boldsymbol{N_1}'\boldsymbol{N_2}' & (\boldsymbol{N_2}')^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{T_1} \\ \boldsymbol{T_1} \end{pmatrix} \boldsymbol{dx} - \int_0^0 \langle \Psi_1 \quad \Psi_2 \rangle \begin{pmatrix} \boldsymbol{N_1} \\ \boldsymbol{N_2} \end{pmatrix} \boldsymbol{f dx} \quad \textbf{[III -45]}$$

$$\boldsymbol{W_{int}} = \int_0^L \langle \Psi_1 \quad \Psi_2 \rangle \, \boldsymbol{k} \begin{bmatrix} (\boldsymbol{1/L})^2 & -(\boldsymbol{1/L})^2 \\ -(\boldsymbol{1/L})^2 & (\boldsymbol{1/L})^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{T_1} \\ \boldsymbol{T_2} \end{pmatrix} \boldsymbol{dx} - \int_0^0 \langle \Psi_1 \quad \Psi_2 \rangle \begin{pmatrix} \boldsymbol{1-x/L} \\ \boldsymbol{x/L} \end{pmatrix} \boldsymbol{f \, dx} \quad \textbf{[III -46]}$$

✓ Obtention du système :

Soit :

$$\boldsymbol{W_{int}} = \langle \Psi_1 \quad \Psi_2 \rangle \, \frac{\boldsymbol{k}}{\boldsymbol{L}} \begin{bmatrix} \boldsymbol{1} & \boldsymbol{-1} \\ \boldsymbol{-1} & \boldsymbol{1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{T_1} \\ \boldsymbol{T_2} \end{pmatrix} - \langle \Psi_1 \quad \Psi_2 \rangle \frac{\boldsymbol{L}}{\boldsymbol{2}} \begin{pmatrix} \boldsymbol{1} \\ \boldsymbol{1} \end{pmatrix} \boldsymbol{f} \qquad \textbf{[III -47]}$$

✓ Pour le terme des conditions aux limites :

$$\boldsymbol{W_{CL}} = \Psi \boldsymbol{h}(\boldsymbol{T_2} - \boldsymbol{T_{ext}}) - \Psi . \boldsymbol{q_1} = \langle \Psi_1 \quad \Psi_2 \rangle \left(\begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{h} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{T_1} \\ \boldsymbol{T_2} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{hT_{ext}} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \boldsymbol{q_1} \\ \boldsymbol{0} \end{pmatrix} \right) \qquad \textbf{[III -48]}$$

$\boldsymbol{q_1}$ **: Flux inconnu**

✓ En regroupant les deux expressions :

$$\boldsymbol{W} = \boldsymbol{W_{int}} + \boldsymbol{W_{CL}} = \langle \Psi_1 \quad \Psi_2 \rangle \left([\boldsymbol{K}] \begin{pmatrix} \boldsymbol{T_1} \\ \boldsymbol{T_2} \end{pmatrix} - \{\boldsymbol{F}\} - \{\boldsymbol{R}\} \right) = 0, \forall \langle \Psi_1 \quad \Psi_2 \rangle \quad \textbf{[III -49]}$$

D'où :

$$[\boldsymbol{K}] \begin{pmatrix} \boldsymbol{T_1} \\ \boldsymbol{T_2} \end{pmatrix} = \{\boldsymbol{F}\} + \{\boldsymbol{R}\} \qquad \textbf{[III -50]}$$

avec :

$$[\boldsymbol{K}] = \begin{pmatrix} \frac{\boldsymbol{k}}{\boldsymbol{L}} & -\frac{\boldsymbol{k}}{\boldsymbol{L}} \\ -\frac{\boldsymbol{k}}{\boldsymbol{L}} & \frac{\boldsymbol{k}}{\boldsymbol{L}} + \boldsymbol{h} \end{pmatrix}, \{\boldsymbol{F}\} \begin{pmatrix} \frac{\boldsymbol{L}}{\boldsymbol{2}} \\ \frac{\boldsymbol{L}}{\boldsymbol{2}} + \boldsymbol{hT_{ext}} \end{pmatrix}, \{\boldsymbol{R}\} \begin{pmatrix} \boldsymbol{q_1} \\ \boldsymbol{0} \end{pmatrix} \qquad \textbf{[III -51]}$$

Vocabulaire : [K] = matrice de « rigidité »

{F} = vecteur des sollicitations externes

{R} = vecteur des réactions (ou flux) externes inconnus

Prise en compte de la condition à la limite : $T(x=0)=T_1=30$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{k}{L} & \frac{k}{L}+h \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 30 \\ \frac{L}{2}+hT_{ext} \end{pmatrix} \quad \textbf{[III -52]}$$

{R} disparaît avec cette méthode !

III-7.7/ Affichage et post-traitement de la solution :

- Résolution : outil informatique Matlab
- Post-traitement :
  - ☐ Affichage de la température
  - ☐ Calcul des réactions ou flux externes (*ie* inconnus)

$$\{R\} = \underbrace{[K]}_{\text{Avant C.L}} \underbrace{\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix}}_{\text{solution}} - \{F\}$$

  - ☐ Calcul du flux à l'intérieur du domaine
  - ☐ Premier élément de validation :
  - ☐ Respect ou non des conditions aux limites ?

III-8/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 était nécessaire.

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, et choisie la méthode des éléments finis pour discrétisé la forme générale des équations du system et l'équation de chaleur.

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.

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.

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.

IV -2/Introduction sur l'ANSYS :

Ansys est le premier éditeur mondial dans le domaine du calcul par éléments finis. Les outils proposés permettent de résoudre les problèmes de validations produits de manière efficace. Ils permettent d'optimiser le processus de conception (gain de temps énorme) et donc de proposer des produits plus innovants (intégration d'une pré-analyse dans le cycle de conception), de qualité plus élevée tout en minimisant les coûts.

Et ne s'est pas seulement établi comme une solution efficace dans les secteurs classiques de la simulation comme l'automobile, l'aviation civile, l'industrie spatiale ou la construction de machine mais également dans les branches plus récentes comme la microtechnique, la microélectronique ou l'industrie médicale.

Il couvre par ses caractéristiques multi-physiques pratiquement toutes les disciplines de la simulation numérique FEM à savoir le calcul statique, dynamique, de choc/chute, structurel, thermique, électromagnétique, électrostatique, piezo électrique, d'écoulements (CFD), d'optimisation topologique mais également d'acoustique, de matériaux composites etc. Chaque physique pouvant être de plus couplée l'une à l'autre.

Généralement , Une résolution par éléments finis comporte trois étapes :

1/ Préparation des données:

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).

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.

3/ Analyse et visualisation des résultats :

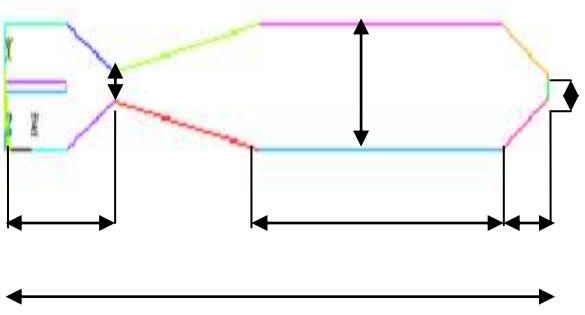
Lors de cette étape, on peut examiner :

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

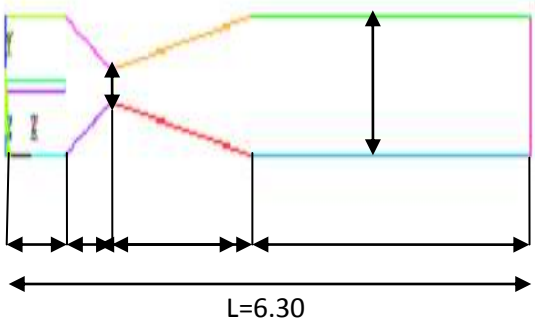
IV-3/Description :

Le projet porte sur l'étude de pression et l'écoulement de vapeur d'eau au niveau de tuyau primaire, vapeur secondaire au niveau de tuyau secondaire.

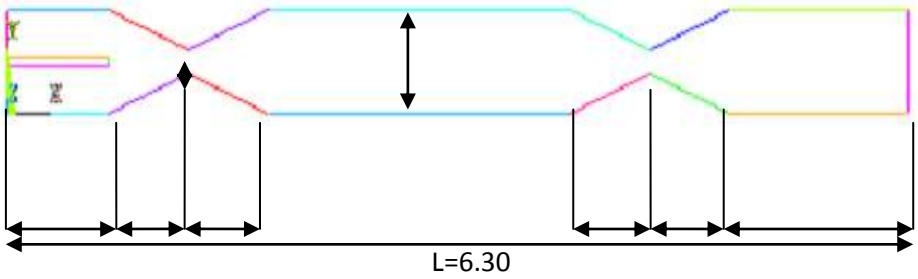
le travail a été effectué sous sept géométries différents : Le premier d'après l'article et le deuxième prend les même dimension avec variation de vitesse secondaire ,et dans la troisième géométrie nous avons modifies la sortie du tuyau mais, dans la quatrième on a ajouté d'autre divergence et dans les autre (5,6,7) on a fait des modifications sur les diamètres et la vitesse.



-A-



-B-



-C-

Figure IV-1 : les différents éjecteurs à étudier (A, B, C).

Ejecteur A	dimensions (m)							
	l_1	l	L_1	L	D	d	d_1	l_4
	0.559	1.68	0.711	6.30	0.508	0.0508	0.127	3.35

-A-

Ejecteur B	dimensions (m)						
	l_1	l	L_1	L	D	d	l_4
	0.559	1.68	0.711	6.30	0.508	0.0508	3.35

-B-

Ejecteur C	dimensions (m)								
	l_1	l_2	L_1	L	D	d_1	d_2	l_5	d
	0.559	1.68	0.711	6.30	0.508	0.127	0.127	1.67	0.0508

-C-

Tableau IV-1: Dimensionnement des différent éjecteurs à étudié (A, B, C).

Le fluide qui circulé dans l'éjecteur thermique c'est la vapeur d'eau, le tableau suivant représente les principaux paramètres de la vapeur d'eau qu'ils sont nécessaire à déclarer avant l'exécution de programme :

Vapeur d'eau	
Pression atmosphère [atm]	1
Conductivité thermique [w/m °k]	0.0261
Chaleur spécifique [kj/kg °k]	2.014
Densité [kg/ m^3]	0.732
Viscosité [kg/m s]	0.008723

Tableau IV-2 : Les propriétés thermiques des différents paramètres.

IV-4/Conditions aux limites :

IV-4-1/ Maillage de système :

En fait le même maillage pour les trois géométries (A, B, C)



Figure IV-2 : Maillage de l'éjecteur.

Présentation des nœuds :

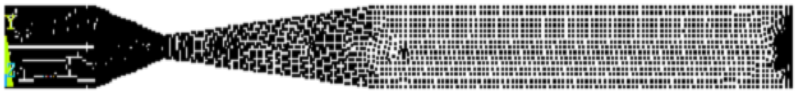


Figure IV-3: Présentation des nœuds de l'éjecteur.

IV-4-2/ Condition d'entre :

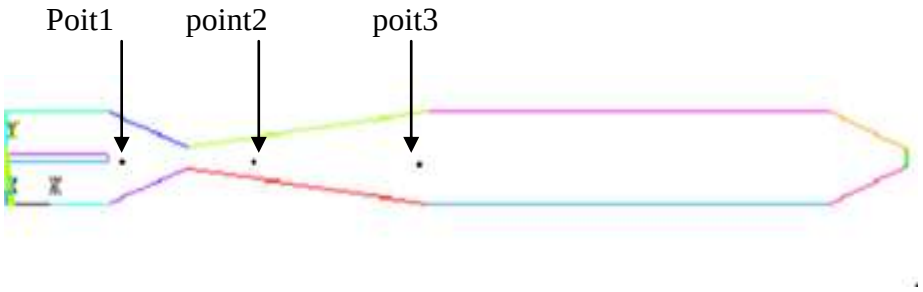
Les conditions initiales sont nécessaires au début ou bien démarrage de calcul ; Dans la section d`entrée de la conduite, les profils de vitesse, pression et température initiaux sont considérés comme uniformes.

Entre de vapeur primaire		Entre de vapeur secondaire	
Vitesse [m/s]	Température [°K]	Vitesse [m/s]	Température [°K]
100	450	5	373

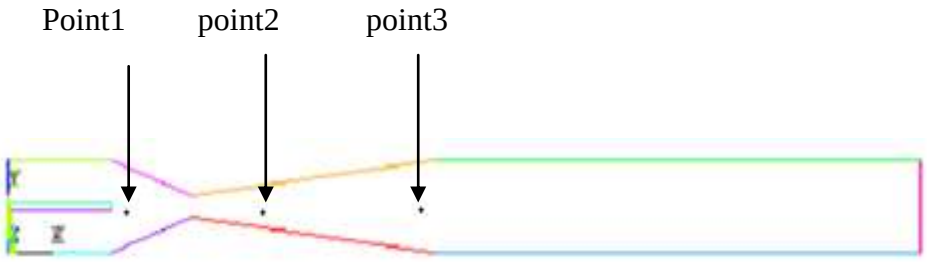
Tableau IV-3 : Les conditions d'entre des vapeurs d'eau dans différents tuyaux.

IV-5/Interprétation des résultats :

Pour mieux connue que ce passe dans l'éjecteur thermique; on a choisir quelque point différents dans le système et lire ces résultats suivant la position et présenter sur des diagrammes:



-A-



-B-

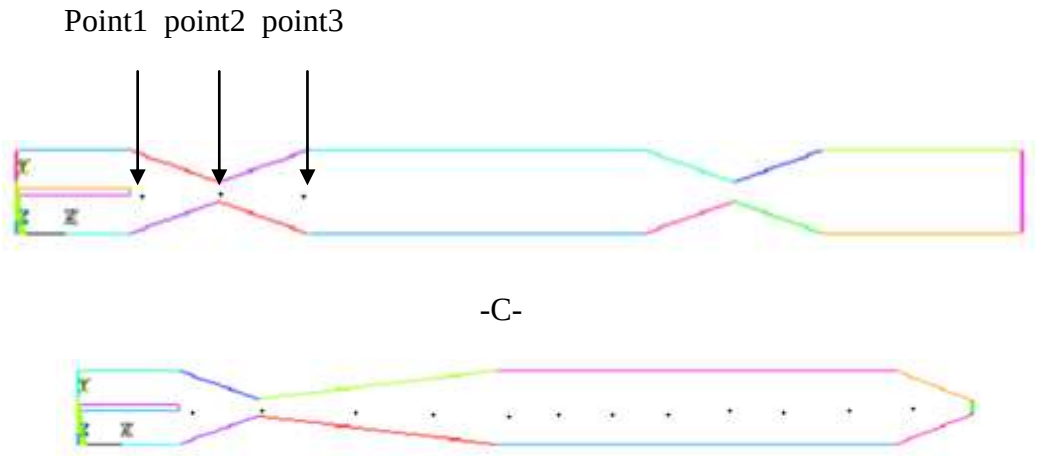


Figure IV-8: Présentation des différents points pour présenté ces résultats.

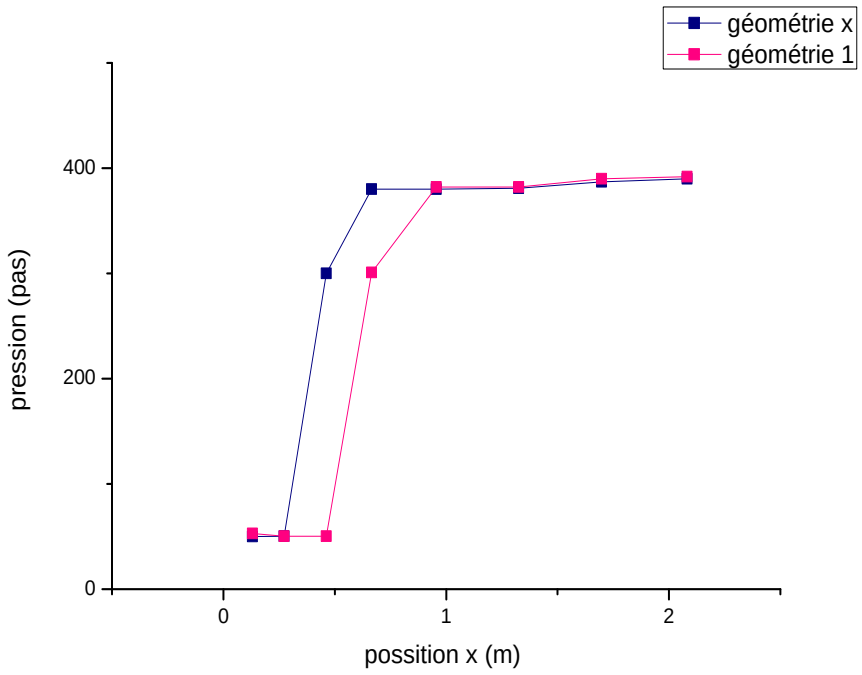


Figure IV-9:Représentation de la pression en fonction de la position axial (x).

Géométrie (x): notre travaille réalisée a l'aide du logicielle ; ANSYS.

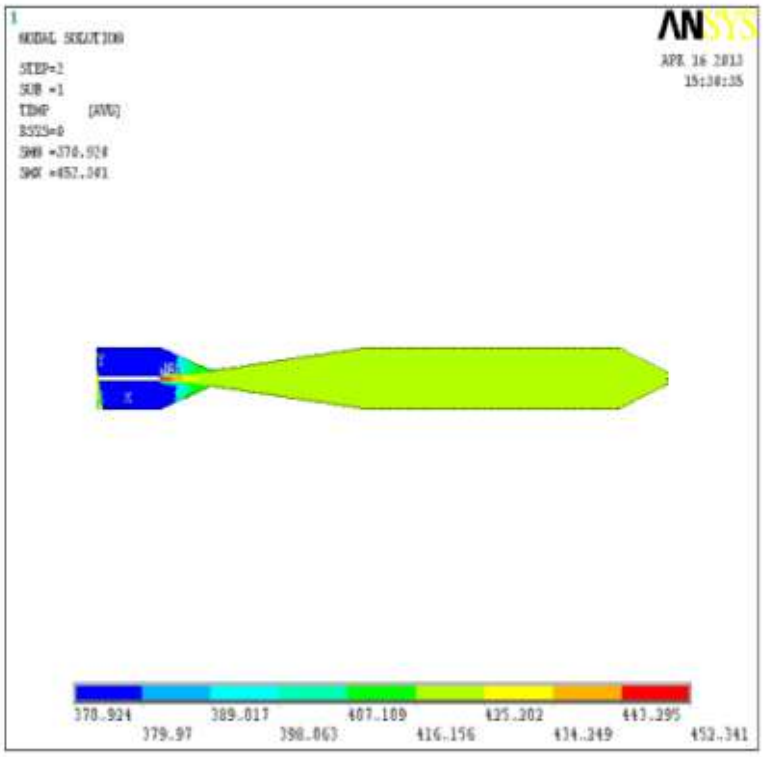
Géométrie (1) : travaille développer par Xianchang Li[a,*] ,Ting Wang [b] ,Benjamin Day[b]

D'après la convergence ; l'ANSYS donne les résultats qui sont interpréter comme suivant :

IV-5-1/ Champ de température :

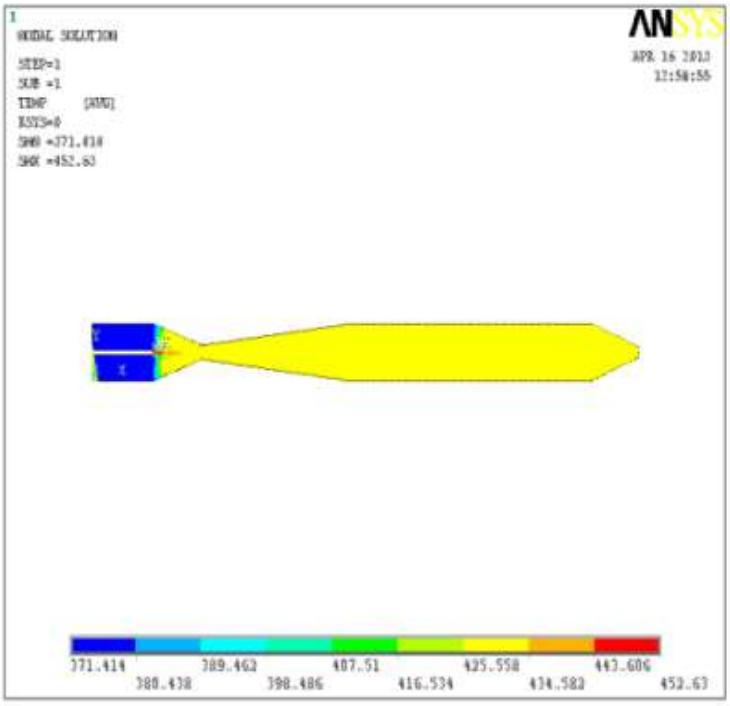
Les figures suivantes représentent la variation de la température dans les différents éjecteurs :

Géométrie 1 :



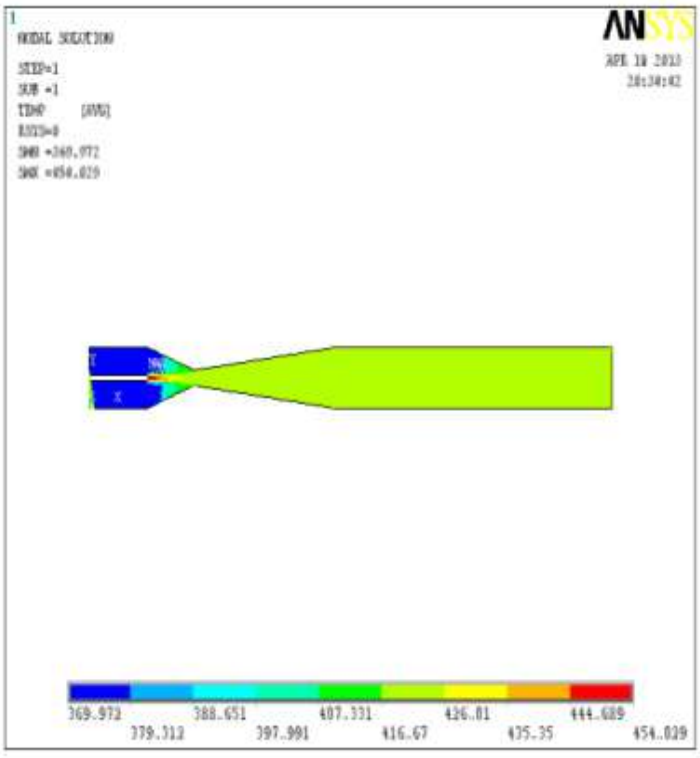
*d1=0.127; d3=0.102; v=5m/s

Géométrie 2 :



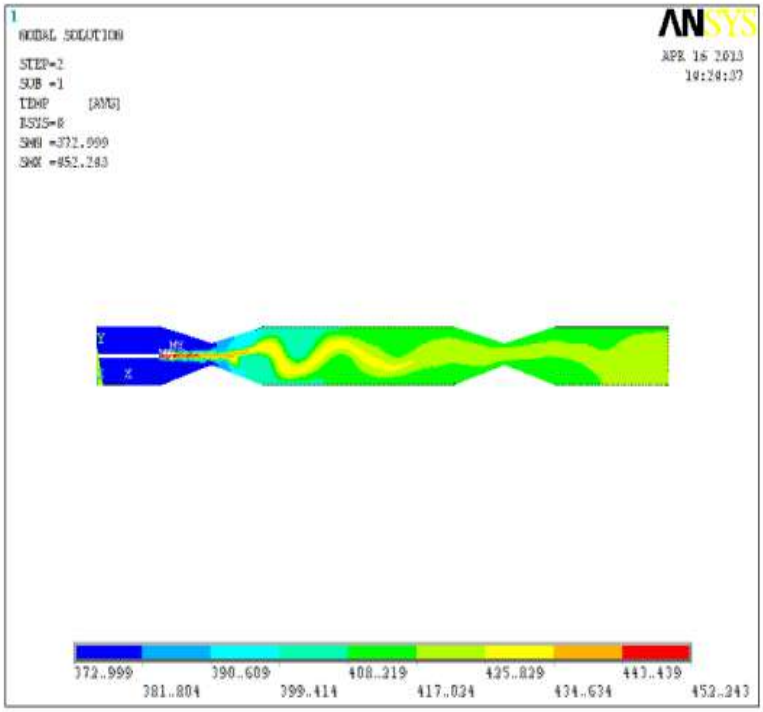
*d1=0.127; d3=0.102 vs=2m/s

Géométrie 3 :



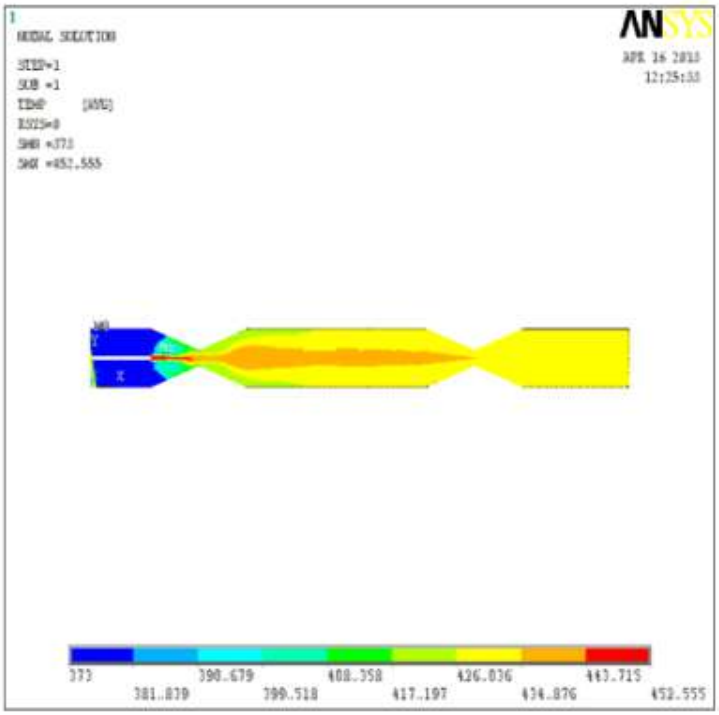
*d1=0.127m v=5m/s

Géométrie 4 :



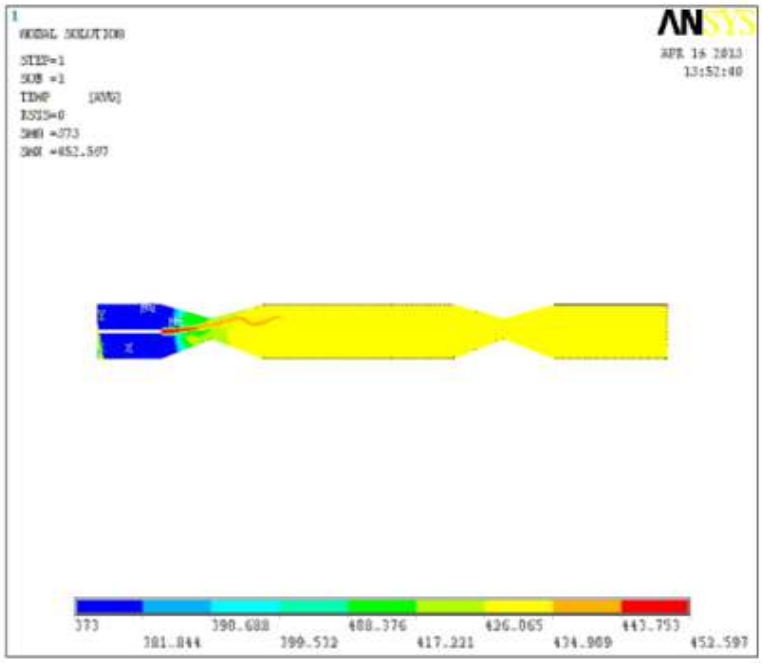
*d1=d2=0.127m Vs=5m/s

Géométrie 5 :



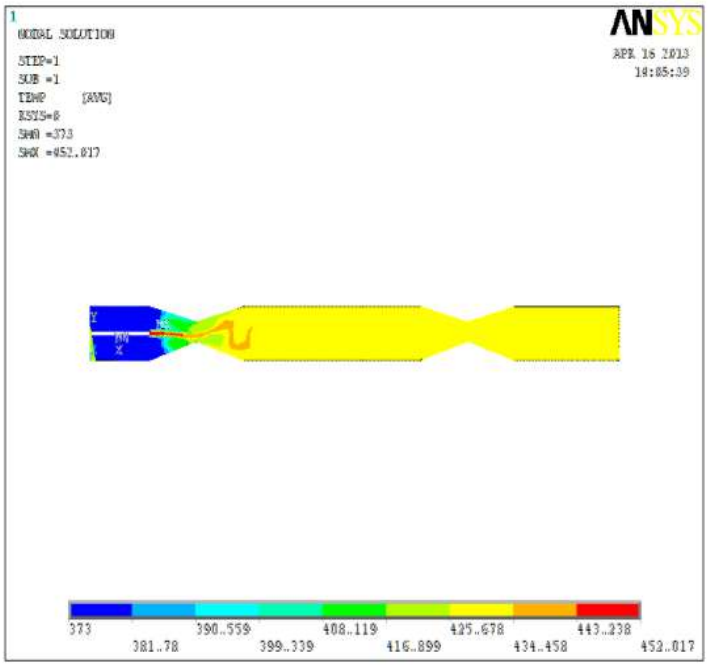
*d1=d2=0.127m vs=2m/s

Géométrie 6 :



*d1'=d2'=0.137m vs=2m/s

Géométrie 7:



*d1''=d2''=0.147m vs=2m/s

Figure IV-10: Représentation spatiale de la température pour les différentes géométries d'éjecteurs.

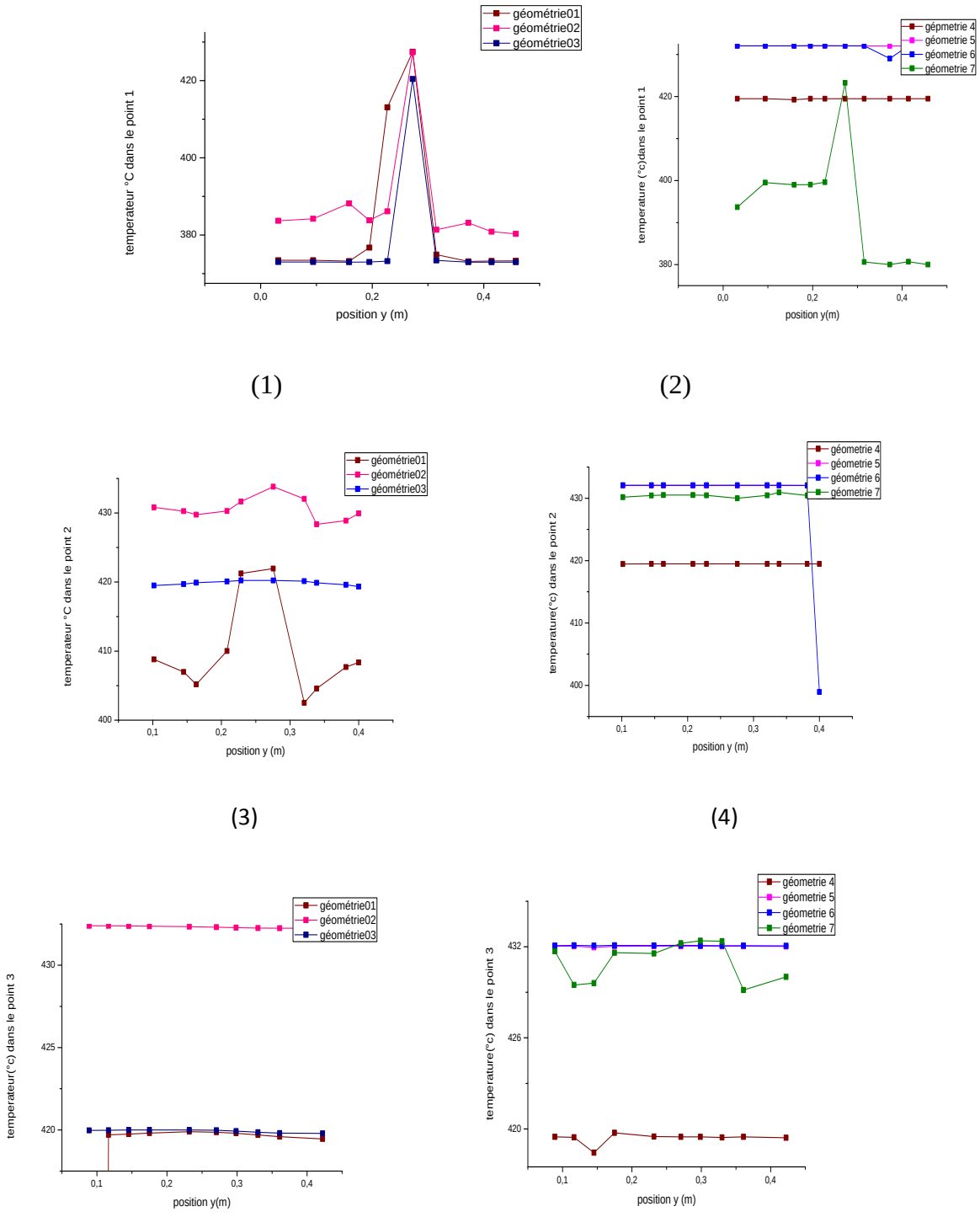


Figure IV-11: Diagrammes de température dans les différents points des éjecteurs.

La figure IV-10-1 et La figure IV-10-3 et La figure IV-10-5 représente la variation de la température de la vapeur d'eau en fonction de la coordonnées spatiale (y) pour les trois géométries différentes (1, 2 ,3).

À partir des résultats obtenus dans la figure (IV-10-1) la température sont très rapproché dans les trois éjecteurs, la seule différence entre les trois courbes de température modification dans la géométrie, quand on varie la vitesse secondaire et la sortie de l'éjecteur la température diminuée.

Et à partir les résultats obtenus dans la figure (IV-10-3) on observe que Dans la géométrie 3 la température reste presque constant mais dans l'éjecteur 2 la température augment et après certain valeur diminuée et le graphe augment par rapport la géométrie 1.

Dans la première géométrie un grande différant, les deux autres graphes la température diminuée après certain valeur le graphe devient décroissent donc il ya changement de température dans cette point .donc la variation de température et la vitesse secondaire augmente.

Et à partir les résultats obtenus dans la figure (IV-10-5) on observe que dans la géométrie 1 la température reste constant au long de l'axe des y et on remarque que la température dans la géométrie1 et 3reste approximativement constant (variation de sortie de éjecteur mais quant varie le Vs la température devient le plus grande que les autre géométries.

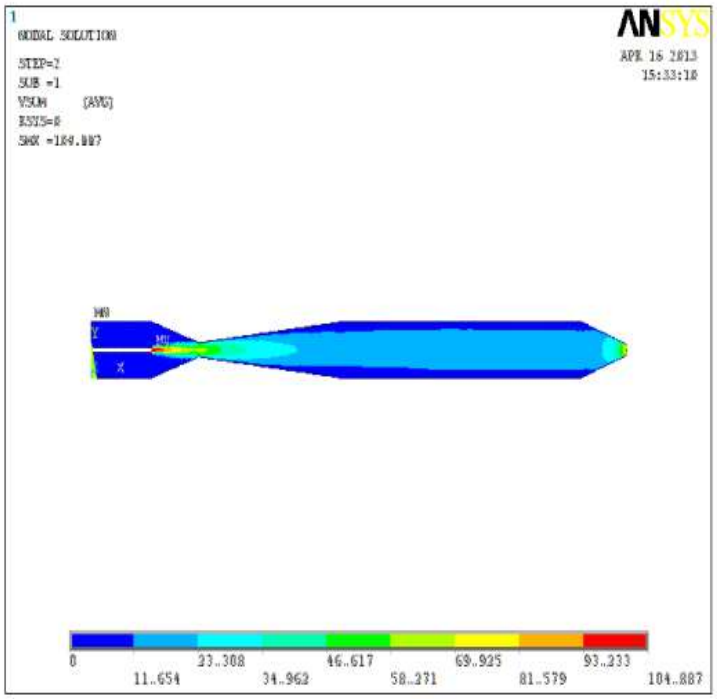
La figure (IV-10-2), La figure (IV-10-4) et La figure (IV-10-6) représente la variation de la température de la vapeur d'eau en fonction des coordonnées spatiales (y) pour les quatre géométries (4 ,5,6 ,7) dans les point (1,2,3).

On remarque que les valeurs des températures presque très rapprochés et faiblement variés a l'entré des vapeurs puis ils sont constantes le long des éjecteurs puisque il ya un faible transfert de chaleur mais dans la géométrie7 (du point 1) il ya une augmentation de la température puis une diminution a cause de transfert de chaleur entre les particules de fluide .donc on constat que dans ces cas la température est indépendamment a la variation géométrique et dynamique.

IV-5-2/ Champ de vitesse :

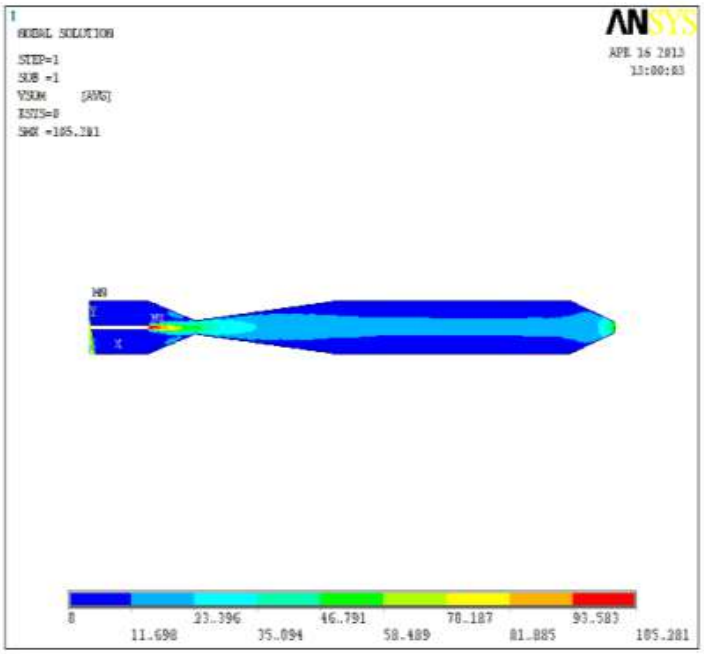
Les figures suivantes représentent la variation de la vitesse dans les différents éjecteurs :

Géométrie 1 :



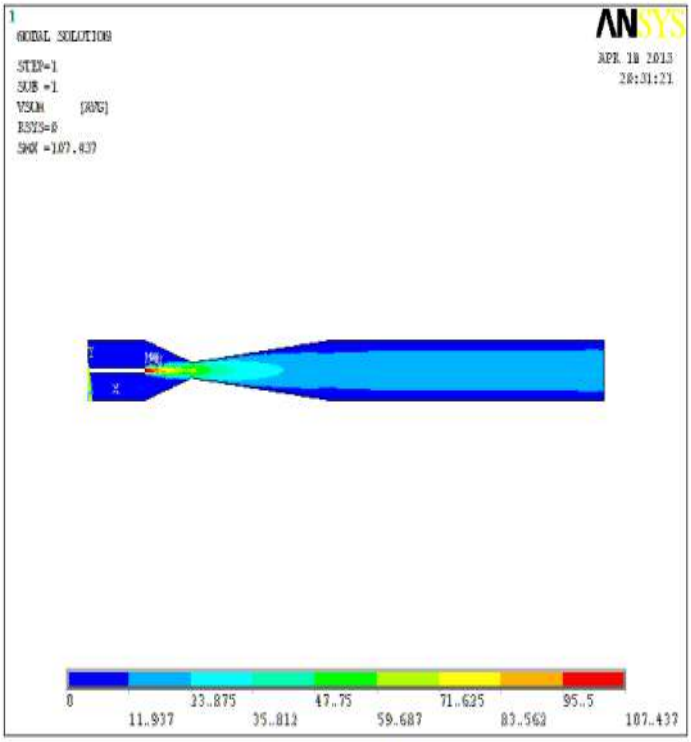
*d1=0.127; d3=0.102 ; v=5m/s

Géométrie 2 :



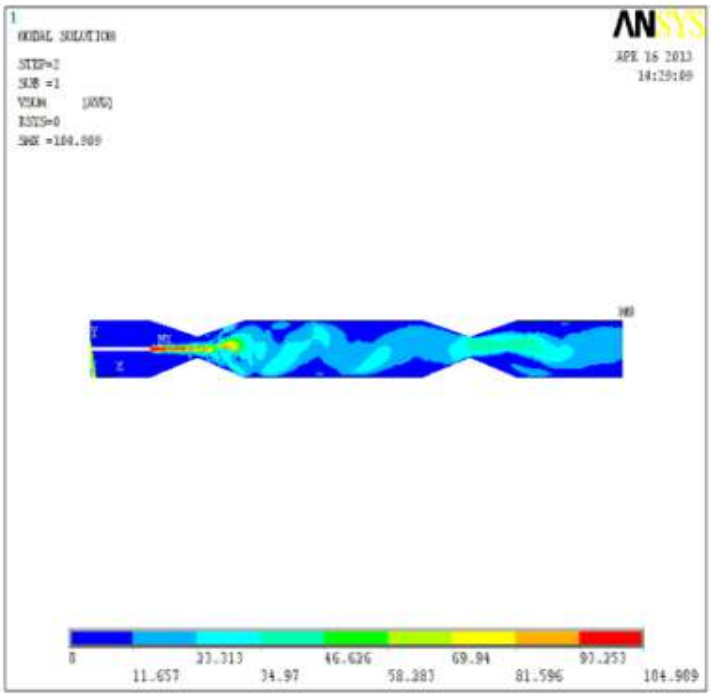
*d1=0.127 ;d3=0.102 ; vs=2m/s

Géométrie 3 :



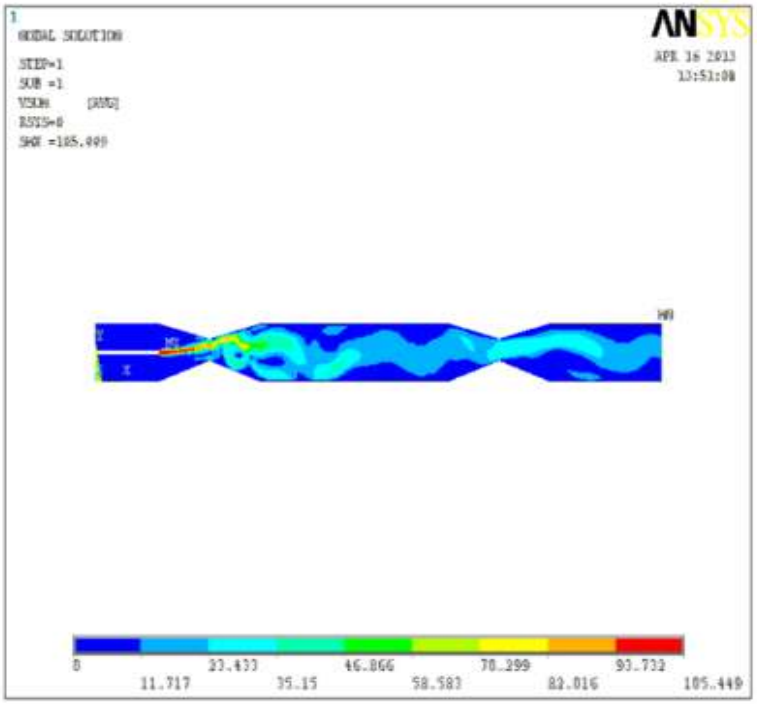
*d1=0.127m; vs=5m/s

Géométrie 4 :



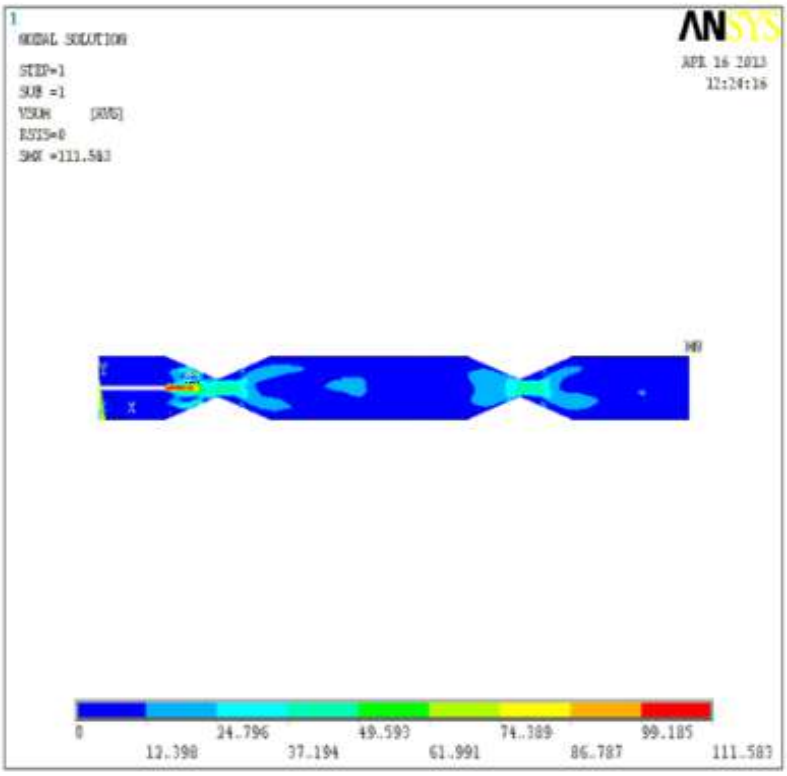
*d1=d2=0.127m; Vs=5m/s

Géométrie 5 :



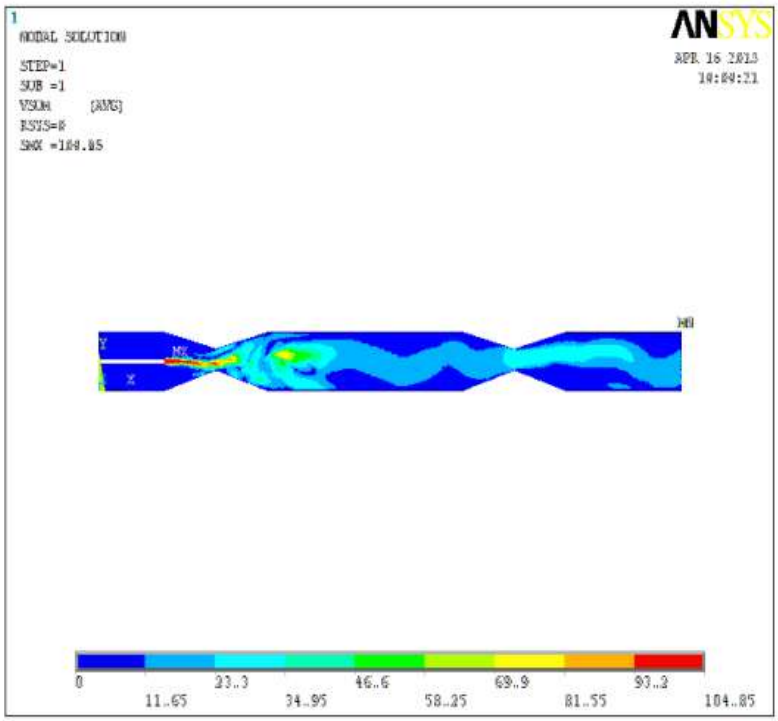
*d1=d2=0.127m vs=2m/s

Géométrie 6 :



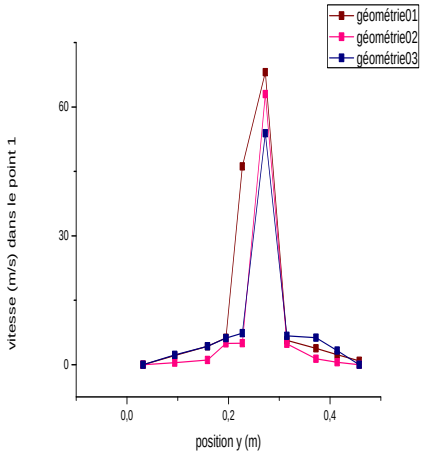
*d1'=d2'=0.137m ; 2m/s

Géométrie 7 :

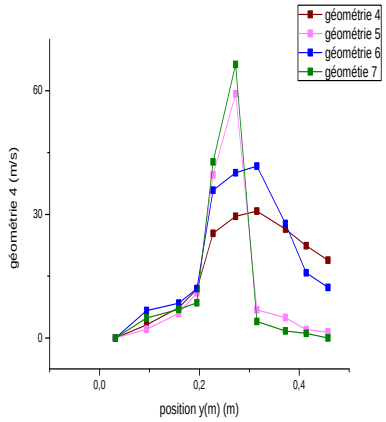


*d1''=d2''=0.147m; 2m/s

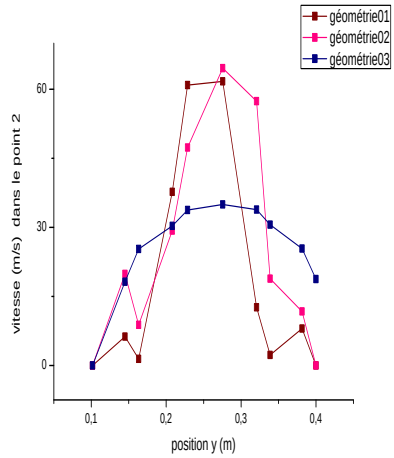
Figure IV-12: Représentation spatiale de la vitesse pour les différentes géométries d'éjecteurs.



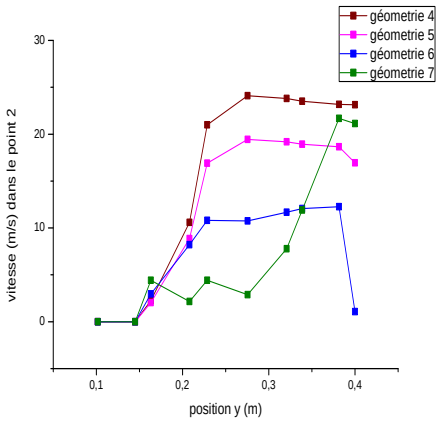
(1)



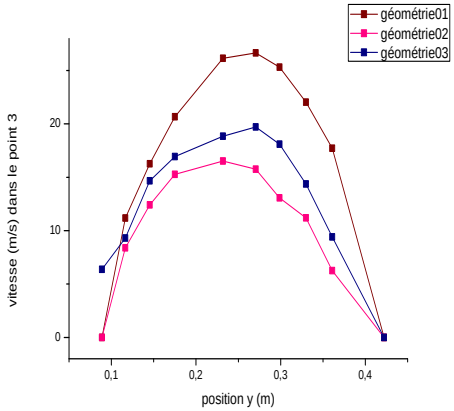
(2)



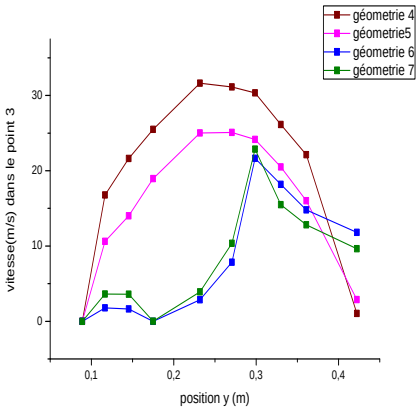
(3)



(4)



(5)



(6)

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

La figure (IV-12-1), La figure(IV-12-3)et La figure(IV-12-5) représente la variation de vitesse en fonction des coordonnées spatiale (y) pour les trois points dans les différentes géométries (1, 2 ,3).

Dans La figure (IV-12-1) on constat que _pas de grand différance entre les trois graphes .puisque il sont très rapproché, avec petite diminution de valeur de pression quant on fait la variation de l'ouverture de refoulement (3) et la vitesse secondaire (02). donc la vitesse dans le éjecteur (01) est grande par apport les autre géométries.

Et dans La figure (IV-12-3) on remarque que tous les géométries la vitesse augment est après certain valeur décroissent, la géométrie (1) prendre le grande valeur de vitesse donc la vitesse est indépendant de la géométrie de éjecteur et comme les autre graphe quand on varie de sortie ou de vitesse secondaire la vitesse aussi varie.

Et a partir La figure (IV-12-5) de profile de vitesse on constat que la vitesse augment et avec certain valeur maximal les valeurs décroissent, la vitesse dans la géométries (1) est le plus grand.

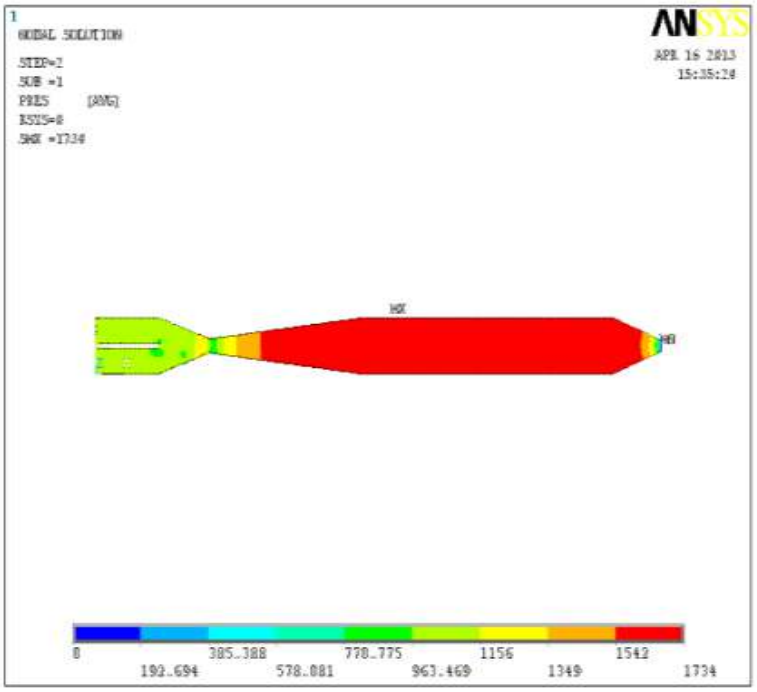
La figure (IV-12-2), La figure (IV-12-4) et La figure (IV-12-6) représente la variation de la vitesse de la vapeur d'eau en fonction des coordonnées spatiales (y) pour les quatre géométries (4 ,5,6 ,7) dans les point (1,2,3).

On observe que la vitesse des vapeurs d'eau a l'aspiration d'éjecteur puisque il ya un choc avec les des conduites puis il se dégradé et on constate que la vitesse de la géométrie 7 et le plus faible parmi les autres puisque il ya un grand choc avec les parois du tuyau et pour la géométrie 4 on remarque que la vitesse au niveau de la conduite est élevé par rapport les autres (au point 2).

IV-5-3/ Champ de pression :

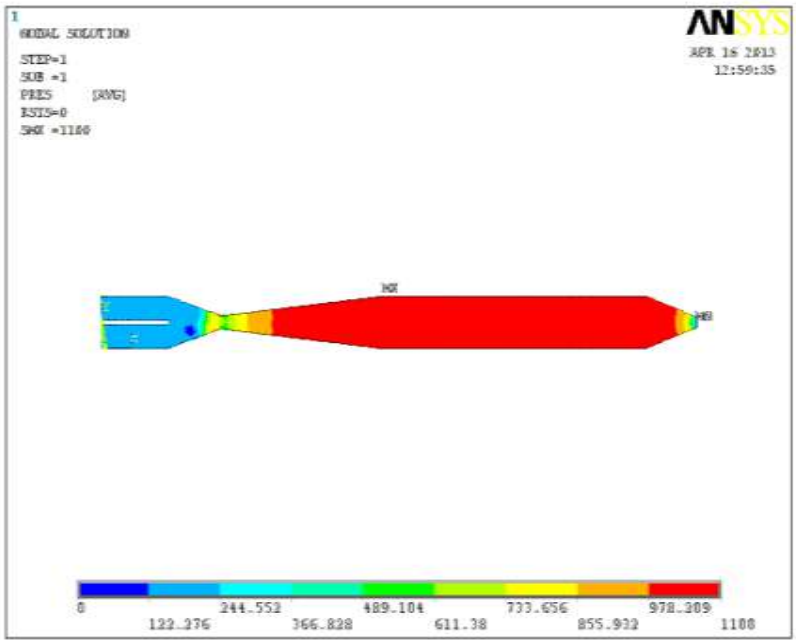
Les figures suivantes représentent la variation de la pression dans les différents points des éjecteurs :

Géométrie 1 :



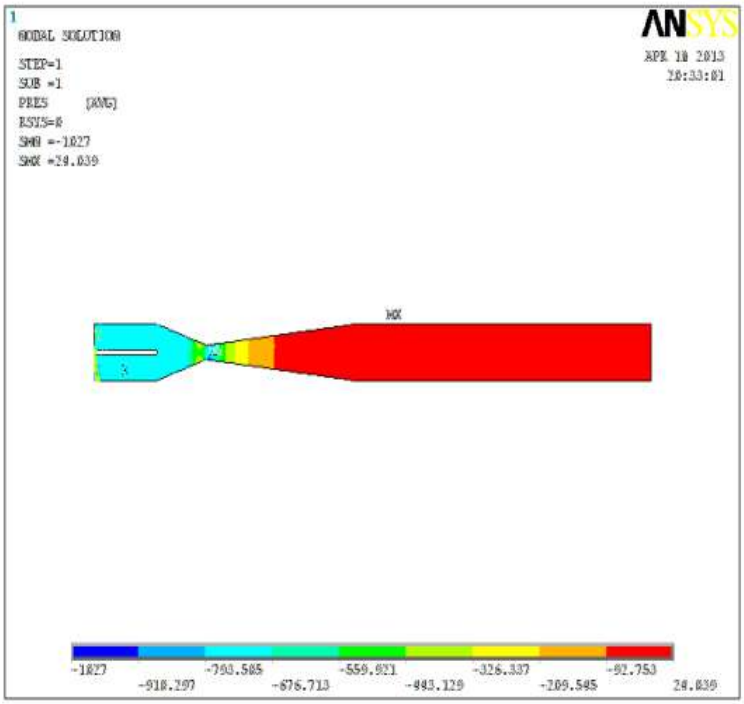
*d1=0.127 ; d3=0.102 ;v=5m/s

Géométrie2 :



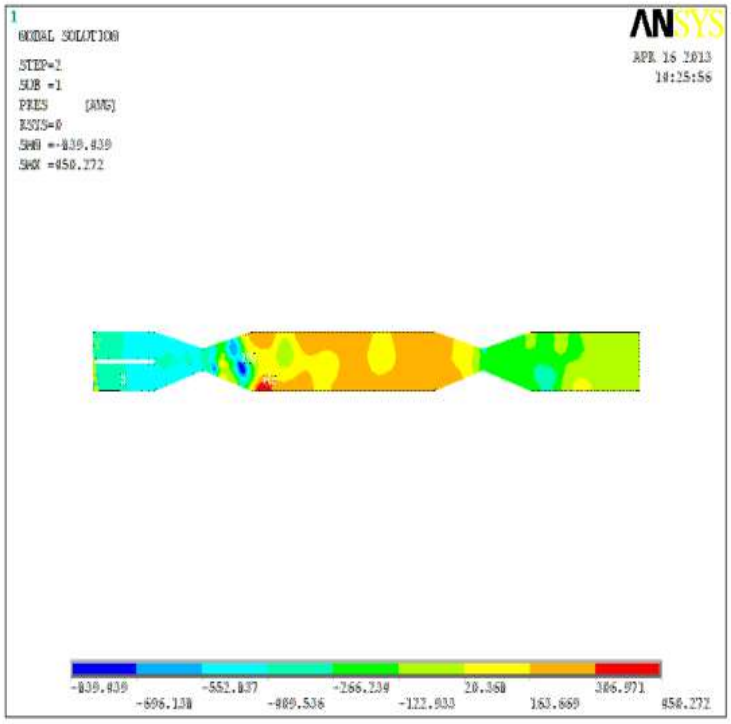
*d1=0.127 ;d3=0.102 ;vs=2m/s

Géométrie 3 :



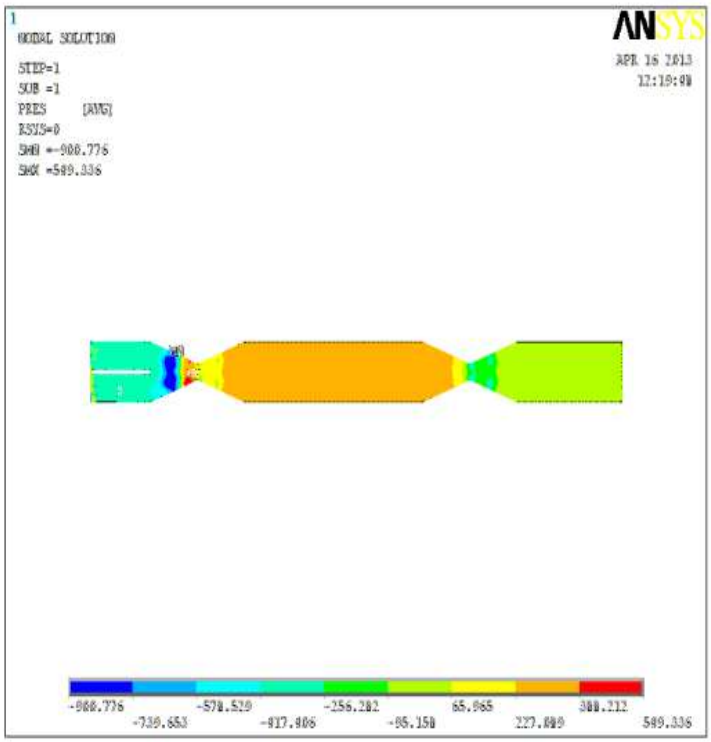
*d1=0.127m vs=5m/s

Géométrie 4 :



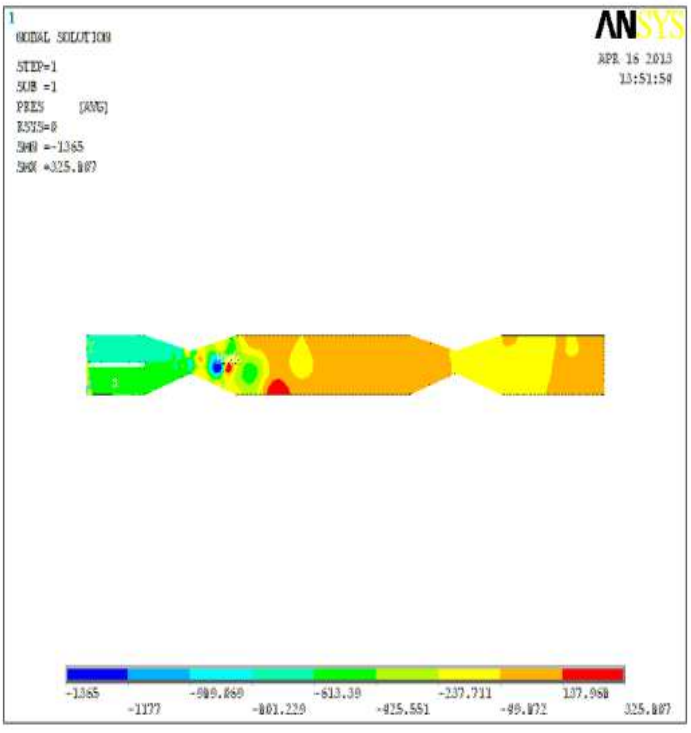
*d1=d2=0.127 m; Vs=5m/s

Géométrie 5 :



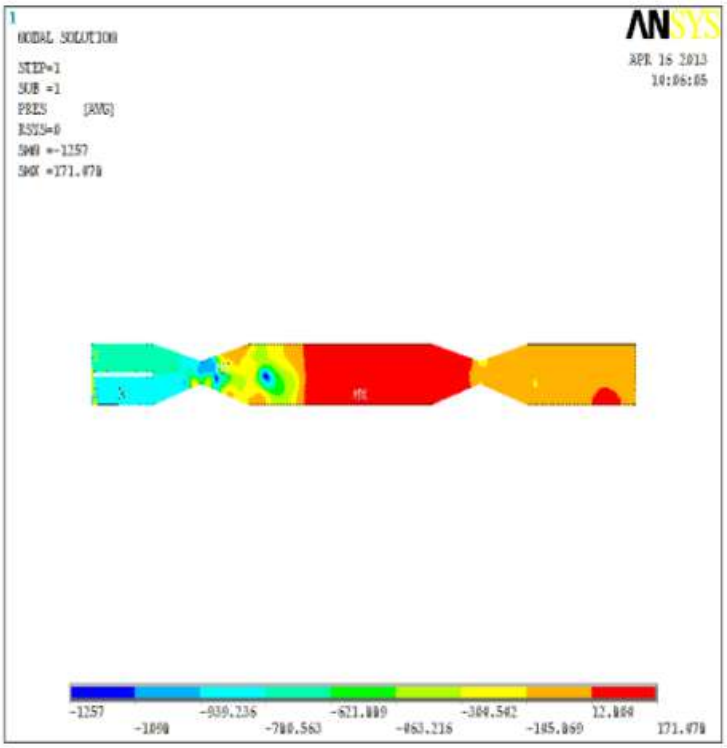
*d1=d2=0.127m ; vs=2m/s

Géométrie6 :



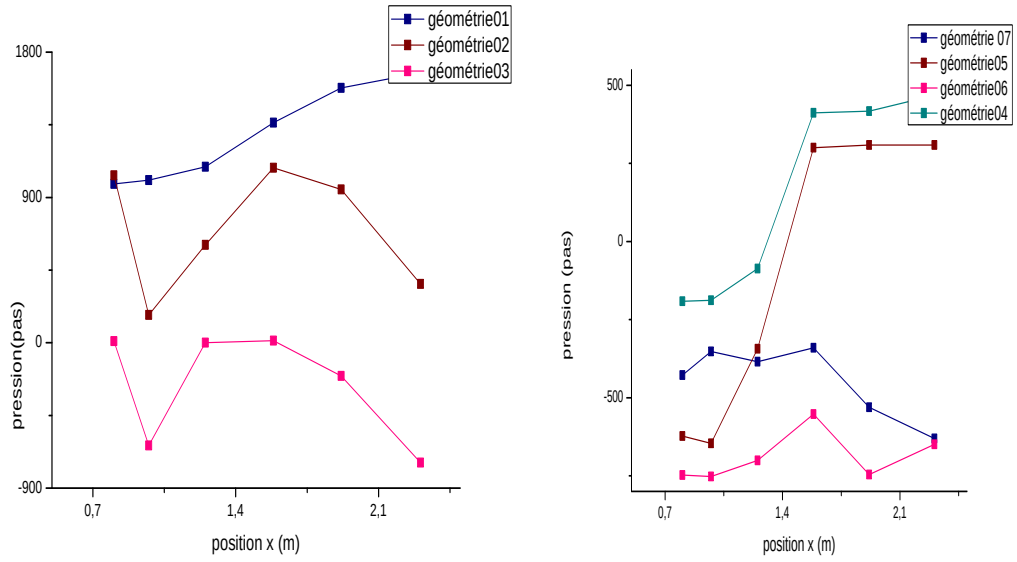
*d1'=d2'=0.137m vs=2m/s

Géométrie7:



*d1''=d2''=0.147m ; vs=2m/s

Figure IV-14: Représentation axial de la pression pour les différentes géométries d'éjecteurs.



(1) (2)

Figure IV-15: Diagrammes de pression dans les différents points des éjecteurs.

La figure (IV-14-1) représente la variation de pression de la vapeur d'eau en fonction de la coordonnée axial (x) pour différentes points des géométries (1,2,3).

Les valeur des pression dans la géométrie 1augment au long de l'axe des x , dans les deux autre géométrie (2,3) presque même courbe mais avec un variation des valeur de pression , et a partir les deux graphe on constat que le pression de la géométrie (3)est le plus faible que les autre .car Louverture de sortie de l'éjecteur et dans la deuxième éjecteur la diminution de vitesse secondaire et quand le vitesse secondaire diminuée donc le pression aussi diminue .

La figure (IV-14-2) représente aussi la variation de pression de la vapeur d'eau en fonction de la coordonnée axial (x) pour différentes points des géométries (4,5,6,7).

Dans la deuxième graphe le pression dans les géométries a partir de résultat , on remarque que le pression croissent au long de l'axe x .

Quand on minimisé la valeur de vitesse secondaire et on varie les valeurs de diamètre (valeur de diamètre croissent) les valeur de pression diminuée et les valeur de pression dans la géométries (6,7) est le plus faible par apport les autre géométries .

IV-6/Conclusion :

Ce chapitre était consacré à l'analyse des modèles numériques de différentes géométries d'éjecteurs développés sous l'ANSYS.

D'après les résultats ; on peut conclure que la géométrie jeu un rôle sur la performance de l'éjecteurs, lorsqu'elle avait un grand influence sur la pression et la vitesse des vapeurs circulants le long d'éjecteur.

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

Dans le présent travail en a étudie numériquement par éléments finies l'écoulement conjugué au transfert de chaleur dans des géométries différentes ainsi que l'étude de l'influence des paramètres dynamiques et géométrique sur les performances de l'éjecteur.

Finalement ; a partir la simulation des différents géométries des éjecteurs, on conclure que :

La géométrie et très importants pour la performance des éjecteurs ; tel que le rapport de diamètre et de diffuseur est le plus important que le rapport de diamètre de convergence et la sortie de tuyau.

Nomenclature

Notation	Signification	Unité
h	enthalpie massique	J/ kg
h'	longueur d'élément le long de la direction d'advection.	m
Q_e	puissance entre de la chambre d'aspiration	kw
u	Vitesse de l'écoulement	m/s
A	Aire de la section de la veine donnée.	m^2
v	vitesse moyenne.	m/s
D	diamètre de la conduite.	m
D'	Diffusivité massique moléculaire	m^2/s
d	l'indice de la valeur on niveau du noeud aval.	
U	l'indice de la valeur prise à l'endroit	
$\overline{U_i U_j}$	Tenseur de Reynolds.	
$[\tau_{ij}]$	le tenseur des contraintes visqueuse	
T_{ij}	Transport diffusif du à la fluctuation de vitesse et aux fluctuations de pression	
P	Pression instantanée	N/m^2
P'	Fluctuation de pression	N/m^2
$\bar{P}$	Pression moyenne	N/m^2
P_k	Production de l`énergie turbulente	
ε_{ij}	Dissipation visqueuse (car il constitue un puits du à la viscosité' moléculaire).	
D_{ij}	Diffusion visqueuse.	
L_m	Longueur de mélange	m

$\frac{\overline{U_i U_j}}{K}$	Le coefficient de proportionnalité.	
$\overline{U_i U_j U_k}$	Terme de diffusion	m/s
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 {ẃi}	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.	
h	une constante positive et s'appelle le pas.	
T	Température	$°C$
$\overline{R_{ij}}$	Tenseur de Reynolds	
t	temps	s
C_μ , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$	Coefficient du mode k-ε	
C_s , C_1, C_2	Constantes du modèle RSM	

C'_1, C'_2	Constantes du modèle ASM	
C2τ	coefficient global réglé à 1,0.	
$S_\emptyset$	Terme source	
u, v	Fluctuation de vitesse	m/s

Symboles grecs

α	La diffusivité thermique	
δ_{ij}	Symboles de Kronecker	
δ	coefficient d'intégration en temps pour la méthode Newmark	
Δs	la distance du point situé en amont à l'aval du nœud .	m
ε	taux de dissipation visqueuse de l'énergie cinétique turbulent.	m^2/s^2
λ	La conductivité thermique	j/s/m. k
μ	viscosité dynamique du fluide	Kg/m. s
μ_t	La viscosité dynamique turbulente	Kg/m. s
μ_{eff}	La viscosité dynamique effective	Kg/m. s
ν	la viscosité cinématique du fluide	m^2/s^2
σ_k , σ_ε	Constante numérique dans le modèle k- ε	
ρ	Masse volumique	kg/m^3
τ	Contrainte de cisaillement	N/m^2
ϕ	Le terme de dissipation visqueuse	
$\overline{\phi}$	Grandeur moyenne	
Γ	Coefficient d`échange dans les termes de transport	
Γ_ϕ	Coefficient de diffusion	

L_s	une échelle de longueur des grandes structures turbulentes.	
C_p	Chaleur massique	kj/kg.k

Abréviation

1D	Un dimension
2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
RSM	Reynolds stress model
ASM	Algebric stress model

Résumé:

Lorsqu'il s'agit de solutions aqueuses, la consommation d'énergie est importante parce que la chaleur de vaporisation de l'eau est particulièrement élevée. Étant donné la grande pratique des solutions aqueuses, dans cette étude on a cherché à réduire la dépense en vapeur d'eau de chauffage et d'améliorer la performance sans consommation d'énergie par l'utilisation d'un éjecteur de vapeur.

Cependant, la performance dépend d'un certain nombre de paramètres dynamique et géométrique, Pour améliorer les performances d'un éjecteur à vapeur une étude 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 liées à la compression thermique.

ملخص:

في حالة المحاليل المائية، واستهلاك الطاقة أمر مهم لأن حرارة التبخر من المياه مرتفع بشكل خاص .
وبالنظر إلى الممارسة الواسعة من المحاليل المائية، في هذه الدراسة سعينا إلى خفض تكلفة حرارة البخار لتحسين الأداء بدون استهلاك الطاقة من خلال استخدام القاذف البخار.

الأداء يعتمد على عدد من معلمات الحيوية والهندسية، لتحسين أداء قاذف البخار هناك دراسة عن طريق المحاكاة العددية تعتمد على أسلوب وحدات تامة لدراسة نقدية التي تسمح بفهم السلوك الديناميكي و الحراري للظواهر المتصلة بضغط الحرارية.

Abstract:

In the case of aqueous solutions, the energy consumption is important because the heat of vaporization of water is particularly high. Given the wide practice of aqueous solutions, in this study we sought to reduce the cost of steam heat and improve performance without power consumption through the use of a steam ejector.

However, the performance depends on a number of dynamic and geometric parameters, to improve the performance of a steam ejector studied by numerical simulation based on finite element method was carried out with the aim of a critical study which helps to understand the dynamic and thermal behavior of phenomena related to thermal compression.