



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Centre Universitaire El-wancharissi de Tissemsilt



Institut de Sciences et de la Technologie
Département de Sciences et de la Technologie

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

Filière : **Génie mécanique**

Spécialité : **Installation Energétique et Turbomachine**

Présentée par :

BENBIAD HAYET

HADOUD SARA

Thème

**Investigation numérique de la thermo-
compression par éjecteur supersonique d'un
banc de réfrigération**

Soutenu le, 05/11/2020.

Devant le Jury :

KHERRIS S	Examineur M.C.B.	Prof	CU-Tissemsilt.
BENLEFKI Aek	Encadreur M.C.A.	Dr	CU-Tissemsilt.
TRARI T	Co-Encadreur M.C.A.	M	CU-Tissemsilt.
MOSTAFA K	Examineur M.C.B.	Dr	CU-Tissemsilt.

Année universitaire : 2019-2020

Remerciements

On remercie Dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas assez riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide de l'encadrement de Dr. BENLEFKI ABDELKRIM et M.TRARI TAYAB, nous les remercions pour la qualité de leur encadrement exceptionnel, pour leur patience ; leur rigueur et leur disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nos remerciement s'adresse aux membres de jury Prof KHERRIS S, Dr MOSTAFA K d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail

Nos remerciement s'adresse également a nos familles pour leurs grand soutien et patience au courant de la réalisation de ce mémoire.

On remercie tous nos professeurs pour leur générosité et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Dédicace

C'est avec plein de joie que je dédie ce mémoire :

*A mes chers parents, pour leur soutien depuis mon enfance, que Allah puisse les
garder éternellement heureux,*

A ma précieuse famille pour ses sacrifices et encouragements

*A mes très chers amis pour leur support moral et matériel, leurs prières et leurs
aides, et a promotion installation énergétique et turbomachine 2020.*

Merci pour votre existence dans ma vie.

HADOUD SARA

Dédicace

Avec l'aide de dieu tout puissant, j'ai achevé ce modeste travail que je dédie :

A tous les personnages séculaires dans ce monde : à l'esprit de ma mère et de

Mon père, que dieu ait pitié d'eux.

A tous ma famille BENBIAD, des plus grands aux plus jeunes,

A tous mes amis et mes proches

*Et toute la promotion master spécialité Installation Energétique et Turbomachine
2020.*

BENBIAD HAYET

Sommaire

Remerciements	2
Dédicace	3
Dédicace	4
Sommaire.....	5
Liste des figures.....	7
Liste de tableau.....	8
Nomenclature	9
Abréviations	9
Liste des symboles.....	10
Introduction générale.....	11
Chapitre 1 : Etude bibliographique.....	12
Introduction	13
Conclusion.....	19
Chapitre 2 : Généralité sur cycle frigorifique.....	20
Introduction :	21
2.1 Installation frigorifique classique (simple).....	21
2.1.1 Les constituants du cycle de réfrigération avec compresseur	22
2.1.1.1 L'évaporateur	22
2.1.1.2 Le compresseur.....	22
2.1.1.3 Le condenseur.....	23
2.1.1.4 Le détendeur	24
2.2 Installation frigorifique à éjection	24
2.2.1 Principe de fonctionnement du système de réfrigération à éjecteur (SRE):	24
2.2.2 Les constituants du cycle de réfrigération avec éjecteur.....	25
2.2.2.1 Le générateur	25
2.2.2.2 Le condenseur.....	25
2.2.2.3 L'évaporateur	26
2.2.2.4 Ejecteur.....	26
2.2.2.4.1 Historique	26
2.2.2.4.2 Définition.....	26
2.2.2.4.3 Principe de fonctionnement de l'éjecteur :	27
2.2.2.4.4 Éléments constitutifs d'un éjecteur	28
2.2.2.4.5 Modèles de fonctionnement des éjecteurs.....	28

2.2.2.4.6 Différentes types des éjecteurs	29
2.2.2.4.7 Grandeurs caractéristiques des éjecteurs	31
2.2.2.4.8 L'application de l'éjecteur	34
2.2.2.4.9 Avantages et inconvénients de l'éjecteur	35
Conclusion.....	36
Chapitre 3 : Etude de cas	37
Introduction	38
3.1 Présentation des logiciels du calcul utilisés dans ce travail.....	38
3.1.1 Logiciel de maillage gridmesh « GMSH » :	38
3.1.1.1 Le module géométrie :.....	39
3.1.1.2 Le module mesh :	39
3.1.1.3 Le module solver :	40
3.1.1.4 Le module post-processing.....	40
3.1.1.5 Les étapes d'un GMSH	41
3.1.1.6 La géométrie :.....	42
3.1.1.7 La génération du maillage (2-D)	42
3.1.2 Code saturne :.....	43
3.1.2 .1 Les étapes Code saturne :	44
3.1.3 EnSight.....	46
3.1.4 ParaView :	46
Chapitre 4: Résultats et discussion	47
Introduction	48
4.1 Études de maillage.....	48
4.2 Validations.....	49
4.3 Présentation et discussions des résultats	50
Conclusion.....	54
Conclusion générale	55
Bibliographie	56
Résume	58

Liste des figures

Figure2.1	Le circuit frigorifique.....	21
Figure2.2	L'évaporateur.....	22
Figure2.3	le compresseur.....	23
Figure2.4	Le condenseur.....	23
Figure2.5	Le détendeur.....	24
Figure2.6	Schéma du système de réfrigération à éjecteur.....	24
Figure2.7	Les processus du système à éjecteur avec ça courbe (P, h)	25
Figure2.8	représentation d'éjecteur.....	26
Figure2.9	Coupe d'un éjecteur et évolution des vitesses et pressions.....	27
Figure2.10	Éléments constitutifs d'un éjecteur.....	28
Figure2.11	Éjecteur à section de mélange constante.....	29
Figure2.12	Éjecteur à pression de mélange constante.....	29
Figure2.13	schéma de principe d'un éjecteur à liquide avec mélangeur cylindrique.....	30
Figure2.14	Schéma de principe d'un éjecteur à gaz avec mélangeur convergent-divergent.....	31
Figure2.15	Paramètres géométriques de l'éjecteur.....	31
Figure3.16	GMSH.....	39
Figure3.17	le module géométrie.....	39
Figure3.18	Menu du module mesh.....	40
Figure3.19	Le module solver.....	40
Figure3.20	La géométrie.....	42
Figure3.21	La génération du maillage (2-D).....	42
Figure3.22	Code saturne.....	43
Figure4.23	Profil de vitesse dans le convergent a la position $y=0.7$ pour les grilles G1 G2.....	49
Figure4.24	une comparaison qualitative du comportement de l'écoulement à l'intérieur de l'éjecteur.....	50
Figure4.25	le champ de nombre de mach.....	50
Figure4.26	la variation de nombre de mach en fonction de x.....	51
Figure4.27	le champ de pression.....	52
Figure4.28	la variation de pression en fonction de x.....	52
Figure4.29	le champ de température.....	53
Figure4.30	La variation de température en fonction de x.....	53
Figure4.31	le champ de température stagnation.....	54

Liste de tableau

Tableau 3.1- les propriétés du fluide SES36.....	44
--	----

Nomenclature

d^*	Diamètre au col de la tuyère primaire [mm]
d_s	Diamètre à la sortie de la tuyère primaire [mm]
X	Distance [mm]
d_m	Diamètre du mélangeur [mm]
L_m	Longueur du mélangeur [mm]
D_d	Diamètre à la sortie du diffuseur [mm]
L_d	Longueur du diffuseur [mm]
m	Débit massique [kg /s]
ρ	La masse volumique [kg/m^{-3}]
P	Pression relative [Pa]
T	Température [K]
M	Masse molaire [kg/mol]
μ	la viscosité dynamique [Pa.s]
C_p	Capacité thermique massique [$\text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$]
R	Constante du gaz
U	Taux d'entraînement
RC	Rapport de compression
ε	Rapport des pressions amont et aval
Γ	Rapport des pressions génératrices

Abréviations

CFD	Computational Fluid Dynamics
COP	Coefficient of performance
DIEF	Dipartimento di Ingegneria Industriale Firenze
TPERC	Cycle de Réfrigération Et de Puissance à éjecteur Transacritique
BP	Basse Pression
HP	Haute Pression
BF	Boucle Frigorifique
BM	Boucle Motrice
SRE	Systèmes de Refroidissement Ejecteur
GPL	Licence Publique Générale
LGPL	Licence Publique Générale Limité

Liste des symboles

CO_2	Dioxyde de carbone
P_{exit}	Pression de sortie
P_{Ge}	Pression de générateur
P_{Ev}	Pression d'évaporateur

Introduction générale :

Les éjecteurs supersoniques sont soumis à un processus de recompression par chocs qui influe sensiblement sur leurs performances. Son rôle est compression des réfrigérants qui permette une absorption à pression supérieure. L'importance de ce composant est la compression avec moins consommation d'énergie extérieure. Les éjecteurs aident l'industrie à réutiliser la chaleur perdue en augmentant le niveau de température et en améliorant la performance d'un système de refroidissement ou de réfrigération.

Le fluide est accéléré dans un convergent-divergent créant une baisse pression dans la zone de mélange, ce qui a pour effet d'aspirer le fluide secondaire. Les deux fluides sont mélangés et une onde de choc peut prendre place dans la zone suivante (col). Ça se réfère par une augmentation de la pression du mélange et une diminution de sa vitesse et devient subsonique. Le diffuseur permet de convertir la vitesse résiduelle en augmentation de pression.

Les éjecteurs trouvent de nombreuses applications, dans l'industrie du vide, l'aéronautique, la production de froid, l'industrie chimique, ils utilisent ces éjecteurs pour améliorer la performance.

Ce mémoire s'articulé autour de 4 chapitres :

Dans le chapitre 1, une étude bibliographique sur les travaux de quelques chercheurs expérimentale et numérique, ils ont testé un système de réfrigération à éjecteur pour plusieurs cas, afin de montrer l'importance de tels systèmes.

Le chapitre 2 commencera par une définition de la production de froid, et une petite comparaison entre le cycle frigorifique simple et à éjection. Ainsi qu'on a défini l'installation frigorifique simple et à éjection avec leurs composantes schématisées.

Puis on a cité historique de l'éjecteur et le principe de fonctionnement éléments constitutifs et différent types des éjecteurs et l'application dans l'industrie et tester des différentes géométries et grandeurs pour obtenir un bon résultat.

Le chapitre 3 contient une définition de la mécanique des fluides numérique CFD qui consiste à étudier les mouvements d'un fluide, la présentation des logiciels commerciaux qu'on a utilisés dans cette étude, nous avons commencé par la création de maillage en utilisant le **GMSH** étape par étape. Après la création de maillage en 3D, puis faire lancer les calculs sur **code saturne** et tester le maillage s'il va donner des bons résultats ou détecter des erreurs.

Les résultats numériques défini dans le chapitre 4, ensuite faire une étude de maillage trouve deux géométries grille G1 et G2 de référence important (nombre de mailles) qui donne les mêmes résultats. Appliquée l'analyse du processus de recompression par chocs qui prennent place dans l'éjecteur puis les résultats numériques sont comparés aux à une étude expérimentale de **AlaBouhanguel** qui donne un bon accord, et les performances avec discussion des profils et les graphes.

Chapitre 1 :

Etude bibliographique

Introduction

Compte tenu de l'importance des systèmes de réfrigération à éjecteur, qui a fait l'objet d'études par de nombreux scientifiques et chercheurs, dans ce chapitre nous discuterons de plusieurs études liées à ce sujet :

Les résultats expérimentaux ont été rapportés par **Eames et al., 1995[1]** qui ont testé un système de réfrigération à éjecteur utilisant de la vapeur à basse pression (2 à 3,6 bar, ou 120 à 140 °C, au générateur de vapeur). Ils ont constaté que les données expérimentales étaient environ 85 % des valeurs théoriques. Ces expériences ont également montré que l'étranglement de l'écoulement secondaire (entraîné) joue un rôle important dans la performance du système. Un (COP) maximum a été obtenu lorsque l'éjecteur a été opéré à sa condition d'écoulement critique.

Aphornratana et Eames., 1997[2] cet article décrit une étude expérimentale d'un réfrigérateur à éjecteur de vapeur utilisant un éjecteur avec une buse principale qui pourrait être déplacée axialement dans la section de la chambre de mélange. Les effets sur le coefficient de performance et la capacité de refroidissement produits par le réglage de la position de la buse ont été étudiés. La plateforme expérimentale et la méthode sont décrites et les résultats sont présentés qui montrent clairement l'avantage d'utiliser une telle buse primaire.

Selon **Chen et al., 1998[1]** le fluide de travail pour un système de réfrigération à éjecteur peut être classé comme vapeur humide et vapeur sèche. Pour le fluide à vapeur humide, sa ligne de vapeur saturée forme une pente négative dans le diagramme T-s. Quant au fluide à vapeur sèche, il n'y a pas de changement de phase au cours du processus d'expansion à travers la tuyère primaire. D'autre part, pour le fluide à vapeur humide, de petites gouttelettes peuvent être formées à la sortie de la buse, ce qui peut bloquer la surface effective et peuvent se heurter contre le mur et affecter le bon fonctionnement de l'éjecteur. Cela peut être éliminé par la surchauffe du liquide avant d'entrer dans la buse. Cependant, l'utilisation de la vapeur surchauffée motrice entraîne une légère diminution de l'efficacité de l'éjecteur. Ainsi, le fluide à vapeur sèche est plus souhaitable que le fluide à vapeur humide.

Boumaraf et Lallemand., 1999[1] ont utilisé un programme de simulation en régime permanent pour étudier l'effet de différents mélanges de réfrigérants et fluides frigorigènes purs sur la performance des systèmes de refroidissement à éjecteur. Leurs résultats montrent que l'utilisation d'un mélange binaire n'augmente pas toujours la performance du système. En règle générale, lorsque le mélange est fortement zéotropique comme dans le cas de (R22/RC318), l'efficacité du refroidissement du système diminue. Toutefois, lorsque le mélange est légèrement zéotropique (R134a/R142b), ou presque azéotropique (R134a/R152a), la capacité de réfrigération et l'efficacité exergetique augmentent.

Huang et Chang., 1999[3] dans cette étude, on a établi deux corrélations empiriques à partir des résultats expérimentaux obtenus utilisant 15 éjecteur ; ces corrélations ont été utilisées

ensuite pour prédire la performance d'éjecteurs utilisant le R141b comme fluide frigorigène. Les rapports A_e/A_t (section de passage du fluide entraîné rapporté à la section théorique du col l'éjecteur), et A_3/A_t (section de sortie de l'éjecteur rapporté à la section théorique du col l'éjecteur) et les relations entre pressions P_g/P_e et P_c^*/P_e sont utilisés pour trouver la corrélation de la performance de l'éjecteur. La prévision du taux d'entraînement ω à partir des corrections est précise à la hauteur de $\pm 10\%$. Les auteurs ont également développé une méthode de calcul permettant de concevoir des éjecteurs à partir des corrélations. On a montré dans cette étude que le R141b s'avère être un fluide actif efficace pour cette utilisation. Le ω mesuré des éjecteurs utilisés dans cette étude peuvent atteindre 0.54 à $P_g=0.465$ MPa (84°C), $P_c^*=0.087$ MPa (28°C), et $P_e=0.040$ MPa (8°C). Pour $P_g=0.538$ MPa (90°C), $P_c^*=0.101$ MPa (32°C), et $P_e=0.040$ MPa (8°C), ω atteint 0.45.

Eames et Shenyi Wu., 2000[4] ont étudié théoriquement un réfrigérateur innovant à cycle d'absorption-recompression à éjecteur. Cet article présente une machine frigorifique à éjecteur qui peut fonctionner avec beaucoup des fluides frigorigènes, y compris des halos carbures.

L'intérêt d'un tel système est qu'on peut le faire fonctionner avec une source de chaleur de valeur basse telle que l'énergie solaire ou récupérée. Ils ont fait l'analyse théorique pour choisir un frigorigène adapté. L'influence des températures du bouilleur, du condenseur et de l'évaporateur sur le transfert de chaleur dans le système a été étudiée expérimentalement dans diverses conditions.

Cizungu et al., 2001[5] ont simulé un système de réfrigération à éjecteur avec différents fluides frigorigènes, y compris, R123, R134a, R152a et R717. Il a été trouvé qu'avec le même éjecteur, R134a et R512a étaient appropriés pour une source de chaleur de 70-85 °C et l'ammoniac était approprié pour la source de chaleur dont la température était supérieure à 90 °C.

Aidoun et Ouzzane., 2004[6] ont étudié l'impact des conditions de fonctionnement sur la performance d'un éjecteur supersonique dans un système de réfrigération à éjecteur.

Un modèle unidimensionnel développé précédemment, basé sur une technique de solution de marche avant des équations de conservation a été utilisé pour étudier le fonctionnement et les performances des éjecteurs dans une large gamme de conditions de travail en réfrigération. Plusieurs caractéristiques de fonctionnement de l'éjecteur ont été simulées. Les valeurs globales des paramètres, leurs distributions locales le long de l'éjecteur, y compris la température, la pression et le nombre de Mach, ont été calculées pour les conditions de conception. Paramètres de fonctionnement tels que le rapport d'entraînement (ω), les rapport de compression : $P_{\text{sortie}}/P_{\text{Ev}}$ (Pression de sortie/ Pression de Evaporateur). $P_{\text{Ge}}/P_{\text{sortie}}$ (Pression de Générateur/Pression de sortie), et au paramètre géométrique (D/D_c) sont avérés affecter de manière significative les performances. L'impact du générateur, de l'évaporateur, du condenseur et

des paramètres thermodynamiques associés, qui ont été évalués dans cette étude, sont résumés comme suit :

Les conditions de mélange de fluide dictées par le type de fluide, la géométrie de la chambre de mélange, les contraintes d'entrée et de sortie, peuvent conduire à une opération hors conception avec une stabilité et une dégradation des performances associées

La génération de surchauffe interne, due à un mélange inefficace et à des ondes de choc normales, est très importante dans le fonctionnement hors conception

Un certain degré de surchauffe à l'entrée (environ 5°C) est nécessaire pour empêcher la condensation interne, mais une surchauffe excessive nuit à l'efficacité du condenseur à la sortie

Les conditions de pression du générateur et la température de l'évaporateur affectent considérablement les performances de l'éjecteur.

Une analyse d'un système de réfrigération à éjecteur avec des fluides frigorigènes respectueux de l'environnement a été mise en œuvre par **Selvaraju et Mani., 2004[1]**. Les comparaisons de la performance de l'éjecteur avec cinq fluides frigorigènes : R134a, R152a, R290, R600a et R717 ont été réalisées. Parmi ces fluides frigorigènes sélectionnés, R134a avec un (COP = 0,31) se révèle atteindre une meilleure performance suivie de R152a avec (COP = 0,27), R290 avec (COP = 0,25), R600a avec (COP = 0,23) et R717 avec (COP = 0,05) à la température du générateur de 85 °C, la température du condenseur étant 25 °C et la température de l'évaporateur vaut 5 °C.

Selvaraju et Mani., 2006[7] ont mené une étude expérimentale des performances d'un système de réfrigération à éjecteur de vapeur est décrite. Le système utilise le R134a comme fluide de travail et a une capacité de refroidissement nominale de 0.5Kw.

L'influence des températures du générateur, de l'évaporateur et du condenseur sur les performances du système est étudiée. Ce type de système peut fonctionner avec une énergie thermique de faible qualité telle que l'énergie solaire, la chaleur perdue ,etc. les conditions de fonctionnement sont choisies en conséquence comme : température du générateur entre 338K et 363K, température du condenseur entre 299 K et 310,5 K et évaporateur température entre 275 K et 285 ,5 K. six configurations d'éjecteurs de différentes dimensions géométriques sont sélectionnées pour l'étude paramétrique. Les performances du système de réfrigération à différentes températures de fonctionnement sont présentées.

Yu et al., 2006[1] ont également utilisé une approche unidimensionnelle similaire et les propriétés des fluides réels pour comparer les performances d'un système de réfrigération à éjecteur classique avec un nouveau système intégrant un éjecteur diphasique (liquide-vapeur). La variation du coefficient de performance de ce nouveau système avec la température du générateur et la pression du condenseur a été analysée pour deux fluides frigorigènes (R134a et R152a). Leurs

résultats montrent que le COP du nouveau système est plus élevé, mais qu'il nécessite également plus de puissance de pompage.

Les effets des paramètres sans dimension comme le taux de compression (rapport de pression du condenseur à celle de l'évaporateur) et le taux d'expansion (rapport de pression du générateur à celle de l'évaporateur) sur les performances du système de réfrigération à éjecteur ont également été étudiées par **Sankarlal et Mani., 2007[8]**. Les résultats ont montré que le COP a augmenté avec l'augmentation du taux d'expansion et a diminué avec le ratio de compression.

On trouve aussi dans la littérature le travail de **Yinhai Zhu et Yanzhong Li., 2009[9]** sur un nouveau modèle d'éjecteur pour l'évaluation des performances des éjecteurs de vapeurs sèches et humides. Dans cette étude un nouveau modèle d'éjecteur est proposé pour l'évaluation des performances des éjecteurs avec de la vapeur sèche et humide en mode de fonctionnement critique. Une fonction linéaire simple est définie afin d'approcher la distribution de vitesse réelle à l'intérieur de l'éjecteur. Les débits massiques du flux primaire et du flux secondaire sont dérivés en intégrant la fonction de vitesse à la section d'entrée de la chambre de mélange. En considérant les caractéristiques d'écoulement de l'éjecteur fonctionnant en mode critique, le modèle développé ne contient qu'une seule équation de conservation d'énergie indépendante du débit dans la chambre de mélange et le diffuseur. Les données expérimentales de différentes géométries d'éjecteurs et de diverses conditions de fonctionnement rapportées précédemment sont utilisées pour vérifier l'efficacité du nouveau modèle.

Boumaraf et Lallemand., 2009[1] ont réalisé un programme de simulation sur un système de réfrigération à éjecteur, avec les deux fluides R142b et R600a comme réfrigérants. Il a été démontré que R142b contribue mieux à la performance du système. Par ailleurs, R142b est un fluide plus lourd que R600a. Ces résultats viennent appuyer les constatations formulées par **Holton., 1951** qu'un éjecteur donne de bonnes performances avec un fluide à grande masse moléculaire.

La même conclusion a été présentée par **Ma et al., 2010[1]**. Les auteurs ont déclaré que l'augmentation de la température du générateur n'entraîne pas toujours l'augmentation de l'efficacité du système. Une étude expérimentale a été réalisée sur un système de réfrigération à éjecteur ayant une capacité de 5 kW adapté aux applications de l'énergie solaire. Une broche (spindle) a été mise en place afin de contrôler le flux primaire et fournir un réglage fin du système à éjecteur. Une capacité de refroidissement maximale a été obtenue pour une température du générateur de vapeur de 92,8 °C, tandis que la valeur maximale du COP a été constatée pour une température du générateur autour de 90 °C.

Christian Lucas et all ., 2012[10] ont fait une étude expérimentale sur l'amélioration du COP d'un cycle frigorifique à l'aide d'un éjecteur. Dans cette dernière, une comparaison expérimentale entre le cycle de réfrigération standard du détendeur à CO₂ et le cycle de

réfrigération de l'éjecteur est présentée. Des variations de pression élevées pour des différentes pressions d'évaporation et de températures de sortie du refroidisseur de gaz ont été effectuées. En plus, l'efficacité de l'éjecteur, le rapport d'entraînement et la récupération de pression par l'éjecteur ont été étudiés dans ces conditions. Les deux cycles étudiés ont été réalisés en utilisant le même banc d'essai, en minimisant ainsi les erreurs de comparaison. Par rapport au COP maximal du cycle de détenteur. Des améliorations de COP du cycle d'éjection de 17% ont été atteintes avec des rendements d'éjecteur allant jusqu'à 22%.

Toujours en ce qui concerne les travaux expérimentaux, **Dariusz Butrymowicz et al., 2014[11]** ont étudié un cycle de réfrigération à éjecteur entraînée à basse température fonctionnant avec l'isobutane. La croissance rapide de diverses applications des systèmes de réfrigération à éjecteur a pu être observée récemment. En raison de l'énergie solaire ou des déchets pour fournir l'énergie motrice, ils peuvent être considérés comme une véritable alternative aux appareils de comparaison dans les technologies de climatisation. Le système d'éjecteur peut concurrencer efficacement le système d'absorption à une température de la source de chaleur motrice inférieure à 80°C. Le document traite des investigations expérimentales menées sur un prototype stand spécialement construit pour le cas de l'isobutane comme fluide de travail sous une température de vapeur motrice inférieure à 75°C. Les effets des paramètres de fonctionnement sont analysés en plus de la présentation des performances de l'éjecteur et discutées des résultats.

Une étude d'un cycle combiné de puissance et de réfrigération a été réalisée par **Yang et Li Zhao., 2015[12]**. Le système de cogénération proposé consiste en un cycle organique de Rankine et un cycle de réfrigération, reliés par un éjecteur. La performance du cycle combiné est analysé lorsque le système fonctionne avec différents fluides de travail, y compris des fluides de travail purs, R245fa et R600a et le mélanges zootropes, R245fa / R600a. La fraction massique des mélanges varie de 10/90 à 70/30, et les résultats montrent que les mélanges génèrent plus de réfrigération que les fluides de travail purs, et ils ont de meilleures performances sous certaines conditions. En outre, l'effet de certains paramètres thermodynamiques, notamment la température de l'évaporateur, la température du condenseur, la température de la chaudière et la température de sortie de la turbine, sur les performances du système sont étudiées.

Shestopalov et Volovyk., 2015 [13] ont fait une étude pour faire fonctionner d'un système frigorifique expérimental à éjecteur avec le frigorigène R245fa aux conditions de travail de conception et hors-conception. Les principaux résultats d'une étude théorique et expérimentale des caractéristiques de performance d'un éjecteur et d'une machine de réfrigération à éjecteur (ERM) fonctionnant avec le réfrigérant R245fa dans des conditions de travail de conception et hors conception sont présentés. L'éjecteur et l'ERM ont été explorés théoriquement en utilisant un modèle 1D amélioré et les résultats calculés ont été validés expérimentalement sur un banc d'essai d'éjecteurs qui a été assemblé et exploité à la National Taiwan University. Pour les cas typiques, la

variation des caractéristiques de performance avec les températures de condensation, de génération et d'évaporation ainsi que les cartes de performance sont présentées. Les résultats théoriques sont comparés aux résultats d'un ensemble d'expériences et un bon accord qualitatif et quantitatif est observé.

k. Megdoui et A. Mhimid., 2016[14] : Dans cette étude une analyse thermodynamique d'un nouveau cycle frigorifique à éjecteur-en cascade pour la congélation et le conditionnement d'air a été présentée, avec la présentation aussi.

Un nouveau cycle à CO₂ de réfrigération éjecteur-cascade. Les effets de paramètres important sur les performances thermodynamiques du nouveau cycle sont théoriquement étudiés sur la base d'analyse énergétique et exégétique.

Une autre étude expérimentale a été présenté par **Guangming Chen et Xinyue Hao., 2017[15]**, dans la quelle un système de réfrigération à éjecteur à deux étages entraîné par deux sources de chaleur est réalisée impliquant la conception, la configuration, le fonctionnement et l'évaluation expérimentale du système. Il est examiné au moyen de l'évaluation des températures d'évaporation, de condensation, de génération de température basses et hautes indépendamment pour la tendance de variations des performances du système (y compris le rapport d'entraînement total et COP) et la comparaison avec le système de réfrigération à éjecteur à un étage classique à des températures de condensation variables qui est réalisé par la commutation de soupape dans ce système. En termes de réfrigérants, R236fa est sélectionné pour la stabilité du fonctionnement du système. Le rapport d'entraînement total et le COP augmentent à mesure que les températures d'évaporation, haute et basse température la génération monte. Différent du système réfrigération à éjecteur à un étage conventionnel, ce système à deux étages s'avère finalement capable de fournir plus d'effet de réfrigération dans les situations où la température de condensation est inférieure à 21.7°C.

Junjiang Bao Gaohong et He Yan Lin., 2017[16] : Dans ce travail une étude comparative a été effectuée pour une série de fluides frigorigènes suivie par une analyse thermodynamique du cycle de réfrigération et de puissance à éjecteur Transacritique (TPERC).

Cet article propose un cycle transarctique de puissance et de réfrigération à éjecteur pour améliorer la correspondance de la température entre la source de chaleur et le fluide de travail, sur la base de la modélisation du système TPERC, une comparaison des fluides de travail et effets des refroidissements sur la puissance travail, l'efficacité thermique et l'efficacité exégétique sont discutées. Les résultats montrent que parmi les sept fluides de travail sélectionnés, le R123ze à la plus grande efficacité thermique et efficacité, principalement en raison de la température critique la plus élevée.

Mohammad RezaSalimpour et all., 2019[17] ont mené une étude comparative sur l'analyse exergo-économique des systèmes frigorifiques solaire à éjecteur. Dans cet article, la

performance économique du système de réfrigération à éjecteur de vapeur à énergie solaire est abordée en raison de l'adoption bénéfique croissante de ce système en ce qui concerne l'utilisation de sources de chaleur de faible qualité.

Farzaneh Foroozesh et lakzian., 2020[18] dans cette recherche ,la performances d'un éjecteur a été étudiée comme une partie cruciale d'un système de réfrigération à éjecteur en appliquant des changements dans sa géométrie. La vapeur d'eau est considérée comme un modèle de réfrigérant et de vapeur humide non couteux, non toxique et disponible pour une simulation et une analyse numériques plus précises. Ils ont étudié l'effet de la modification des paramètres géométriques en fonction de la présence d'humidité dans le champ d'écoulement. Les paramètres géométriques sont la longueur et le diamètre de la section à aire constante de l'éjecteur et le diamètre de la gorge de la buse primaire. En plus du rapport d'entraînement ω et du taux de compression critique (CR) de l'éjecteur comme critères de conception conventionnels, le COP du système de réfrigération et la génération d'entropie totale (EG) dans le flux à l'intérieur de l'éjecteur sont également utilisés ; E générations ntropy, E rapport ntrainment et Coefficient de la méthode de performance) pour la conception d'éjection dans les systèmes de réfrigération d'éjecteur. Enfin, l'augmentation de la longueur et du diamètre de la section à aie constante et la diminution du diamètre de la gorge de la buse primaire sont considérées comme des changements souhaitables. Par conséquent, en appliquant ces changements, ω et COP se sont améliorés de 32% et la génération d'entropie totale est diminuée.

Conclusion

Dans ce chapitre ont a présenté une étude bibliographique de quelques chercheurs qui ont été réalisées leurs études sur système de réfrigération à éjecteur.

Chapitre 2 :
Généralité sur cycle
frigorifique

Introduction :

Production de froid est la création d'un air ambiant maîtrisé dont la température, l'humidité et la pureté sont régulées. La production du froid est basée sur le principe de l'extraction de la chaleur du milieu à refroidir. Nous appellerons « unités de réfrigération » des systèmes produisant uniquement un débit d'air froid filtré. Très utilisé dans la conservation d'aliments ou encore dans les systèmes autonomes de faible dimension.

Un système de réfrigération est composé de quatre éléments fondamentaux mis bout-à-bout en circuit fermé, c'est ce que nous appellerons de cycle frigorifique.[19]

De cycle frigorifique deux installation : installation simple et installation à éjecteur.

Après avoir fait une comparaison entre une installation simple et une installation à éjection, il a été constaté que dans le cas d'une installation simple le composant le plus important qui crée une différence de pression pour faire circuler le fluide frigorigène est le compresseur mais dans le cas d'une installation à éjection celui-ci est remplacé par un éjecteur de vapeur et une pompe à eau, dans cette partie le fluide frigorigène passe par le condenseur dans deux sens :

- Une partie du fluide frigorigène passe à travers une pompe pour rejoindre le générateur afin de se vaporiser à l'aide de la chaleur requise par les capteurs solaire.
- L'autre part subit une détente pour se vaporiser afin qu'il s'absorbera une quantité de chaleur du milieu à refroidir. Ces deux fluides traversent un éjecteur puis dans un condenseur pour se condenser.

2.1 Installation frigorifique classique (simple)

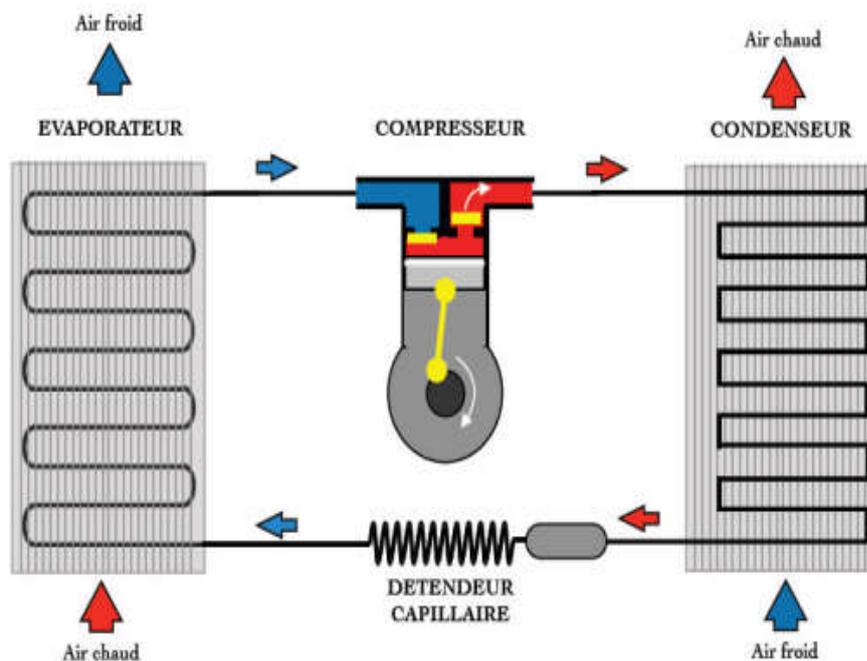


Fig2.1- Le circuit frigorifique.[19]

2.1.1 Les constituants du cycle de réfrigération avec compresseur:

2.1.1.1 L'évaporateur :

C'est un échangeur thermique entre le milieu à refroidir (air , eau) et le fluide frigorigène .

Son principe de fonctionnement consiste à faire passer de l'état liquide à l'état de vapeur le fluide frigorigène circulant à l'intérieur en absorbant de la chaleur au milieu à refroidir.

L'efficacité de l'échange thermique est favorisée par les ailettes, augmentant ainsi la surface d'échange.[19]

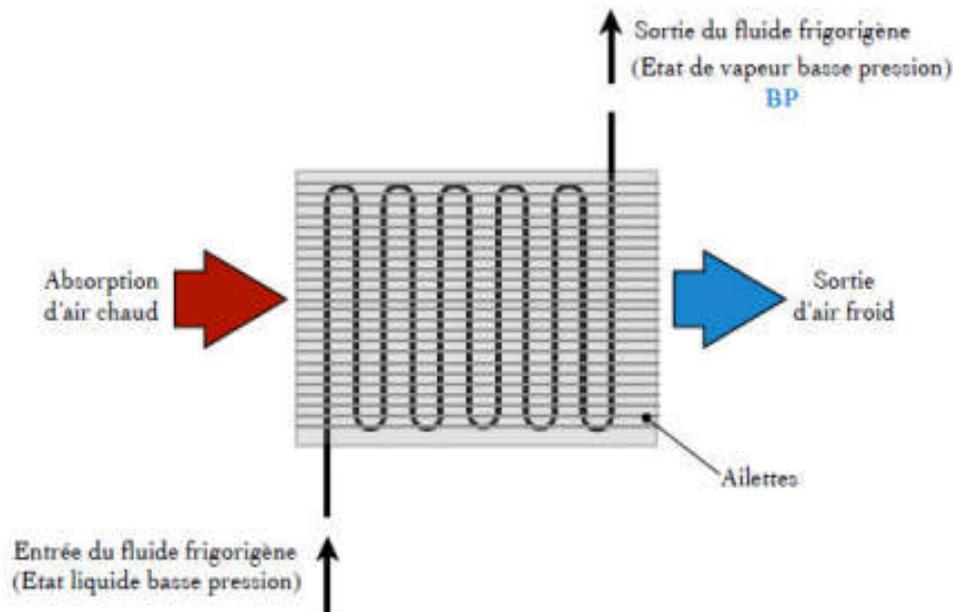


Fig2.2- L'évaporateur.[19]

2.1.1.2 Le compresseur :

Le compresseur aspire les vapeurs produites par l'évaporateur sous basse pression (BP), et les refoule sous haute pression (HP) vers le condenseur.

La compression du fluide frigorigène à l'état de vapeur à pour effet d'augmenter simultanément la température et la pression des vapeurs refoulées vers le condenseur.

Le fluide frigorigène entre dans le compresseur en basse pression (BP) à l'état gazeux avec une température basse (Schéma A) et en ressort en haut pression (HP) à l'état gazeux avec une température plus élevée (Schéma B)[19]

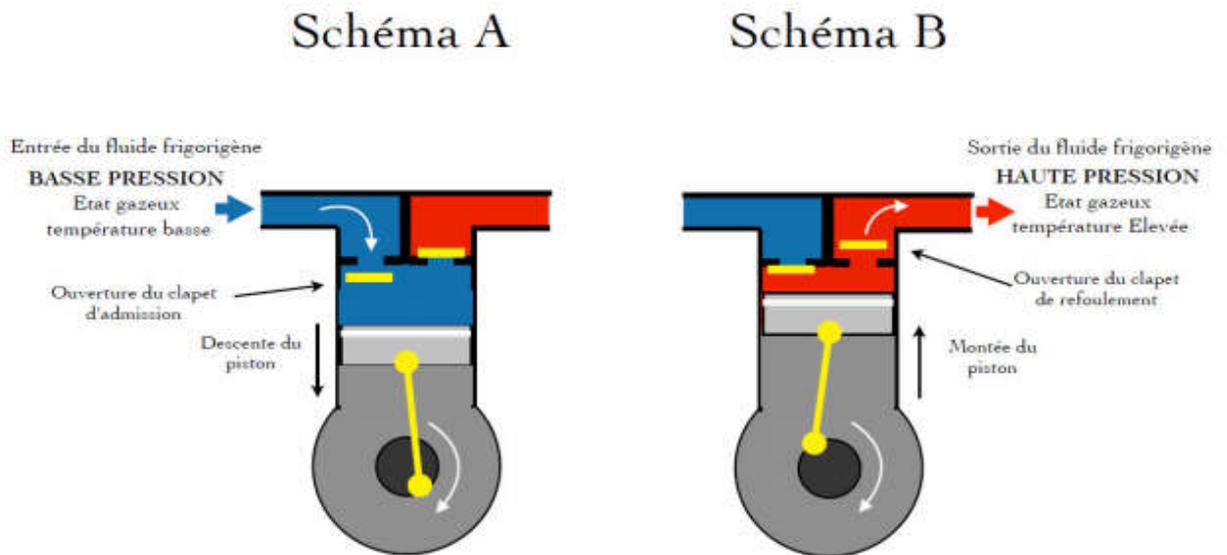


Fig2.3- Le compresseur.[19]

2.1.1.3 Le condenseur :

Le condenseur est un échangeur thermique, il récupère le fluide frigorigère à l'état gazeux sous haute pression venant du compresseur, pour refroidir le fluide frigorigère afin le rendre à l'état liquide ou saturant (ou état sous-refroidi) en cédant de la chaleur.

L'efficacité de l'échange thermique est favorisée par les ailettes, augmentant ainsi la surface d'échange.

Pour ne pas confondre le condenseur et l'évaporateur dans un schéma, le condenseur est dessiné avec des tubes rectangulaires.[19]

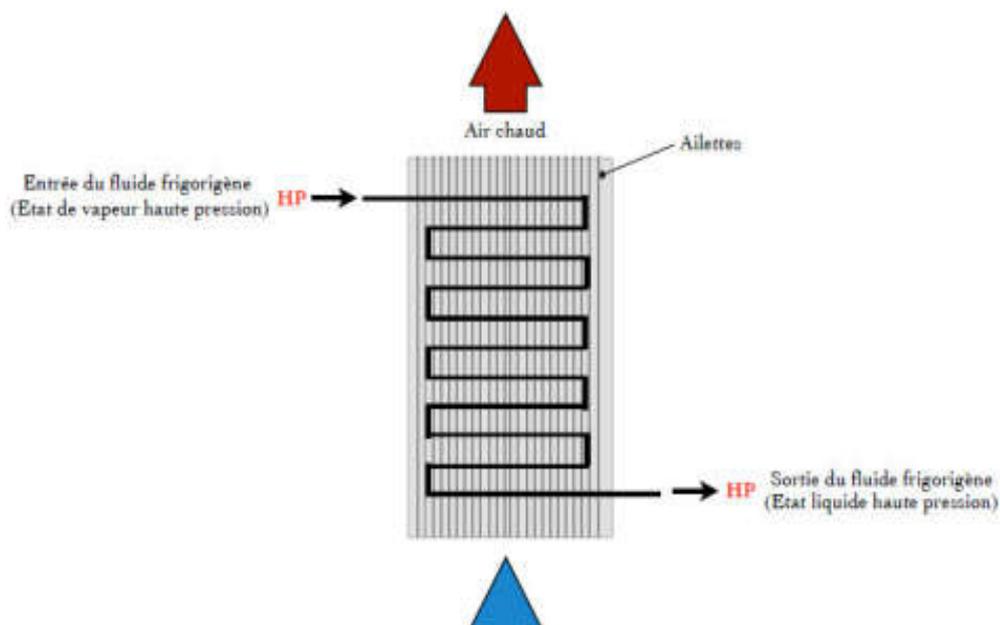


Fig2.4- Le condenseur.[19]

2.1.1.4 Le détendeur :

Le détendeur positionné à la sortie du condenseur et à l'entrée de l'évaporateur, a comme rôle de régler le débit de liquide frigorigène admis à l'évaporateur. Par conséquent, cela fixe la puissance du système de climatisation.[19]

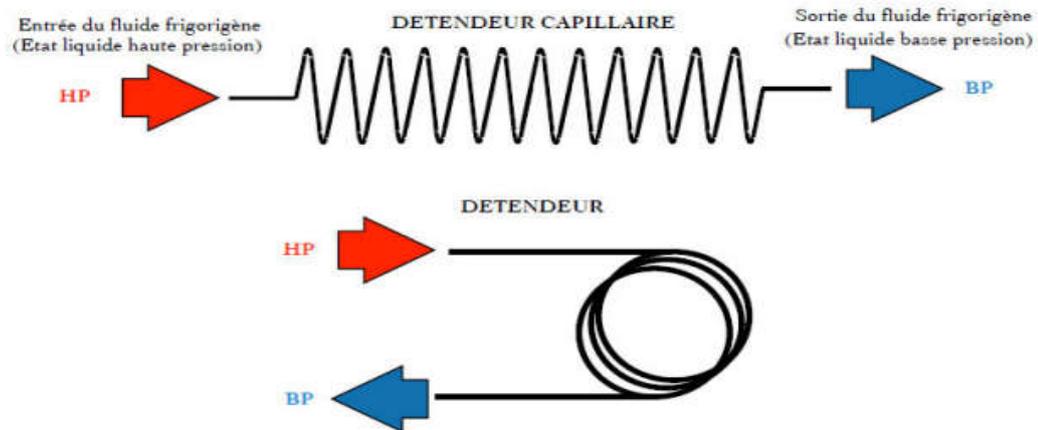


Fig2.5- Le détendeur.[19]

2.2 Installation frigorifique à éjection :

Le cycle de réfrigération à éjecteur est similaire au système conventionnel de réfrigération à compression, sauf que, le compresseur est remplacé par une pompe, un générateur de vapeur et un éjecteur. La figure suivante représente la machine de réfrigération à éjecteur.[20]

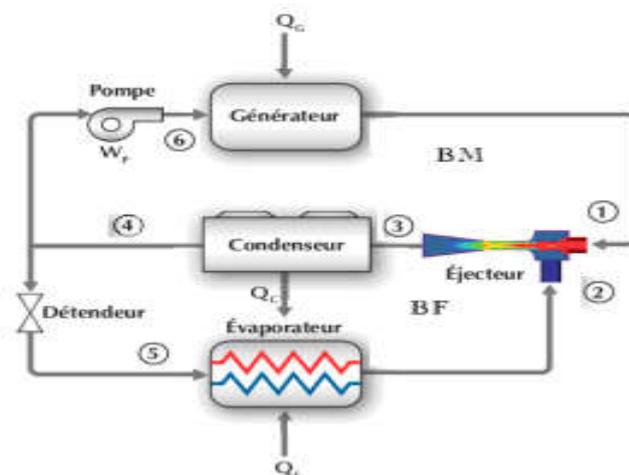


Fig2.6- Schéma du système de réfrigération à éjecteur.[20]

2.2.1 Principe de fonctionnement du système de réfrigération à éjecteur (SRE):

Le système de réfrigération à éjecteur est composé de deux boucles : la boucle frigorifique (BF) et la boucle motrice (BM) (fig2.7).

La boucle frigorifique (BF) : constituée des éléments suivants : l'éjecteur, le condenseur, la vanne de détente et l'évaporateur. Le fluide frigorifique sous forme liquide à sortie du condenseur(4) subit une détente isenthalpique (5) à travers un détendeur avant d'être acheminé vers l'évaporateur pour la production du froid. A la sortie de l'évaporateur (2), le fluide frigorifique est aspiré par le fluide moteur (3) dans l'éjecteur.[20]

La boucle motrice (BM) : constituée des éléments suivants : l'éjecteur, le condenseur, la pompe et le générateur. Le générateur produit la vapeur (fluide moteur) (1) qui pénètre dans la tuyère primaire de l'éjecteur ou elle est accélérée. A la sortie du divergent, le fluide moteur entraine la vapeur issue du circuit secondaire (BF), permettant ainsi le mélange des deux fluides. Le mélange est ensuite comprimé jusqu'à l'état 3. Il est ensuite acheminé vers le condenseur(4) ; puis vers le générateur (6) par une pompe.[20]

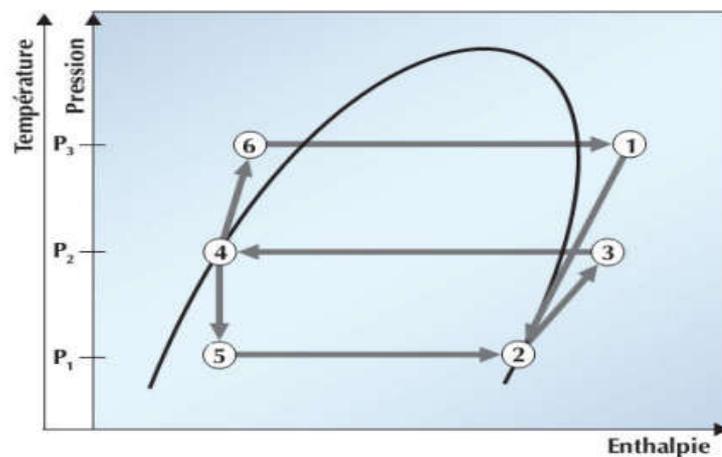


Fig2.7- Les processus du système à éjecteur avec ça courbe (P, h)Correspondante.[20]

2.2.2 Les constituants du cycle de réfrigération avec éjecteur:

Le système de réfrigération avec éjecteur est illustré sur la fig2.6.

2.2.2.1 Le générateur : Dans le cycle de réfrigération avec éjecteur une quantité d'énergie Q_g est fournie au générateur pour évaporer le réfrigérant qui est à haute pression à l'état (6). La vapeur à l'état (1), qui représente le fluide primaire, traverse l'éjecteur où elle est mélangée à la vapeur à l'état (2) qui représente le fluide secondaire, provenant de l'évaporateur.

Le mélange des deux vapeurs se fait dans la section du diffuseur où s'effectue un recouvrement de pression. Fig2.7. [21]

2.2.2.2 Le condenseur: La vapeur à l'état (3) passe à travers le condenseur à haute pression où elle est condensée jusqu'à l'état liquide.

A la sortie du condenseur, le fluide réfrigérant est à l'état liquide et à haute pression une partie du débit est pompée vers le générateur constituant le fluide primaire et le restant se détend dans la valve pour s'évaporer par la suite et produire l'effet frigorifique désiré au niveau de l'évaporateur. Fig2.7. [21]

2.2.2.3 L'évaporateur: Dans le cycle de réfrigération, le réfrigérant liquide à l'état (4) passe à travers une vanne de détente à un état de basse pression l'état (5). Le réfrigérant entre par la suite dans l'évaporateur où il produit, en s'évaporant, le froid désiré Q_e . Le réfrigérant à l'état mélange liquide vapeur (5) se vaporise dans l'évaporateur, état (2) puis est mélangé avec le fluide primaire dans l'éjecteur où il est comprimé. Fig2.7 [21]

2.2.2.4 Ejecteur :

2.2.2.4.1 Historique :

L'éjecteur, qui est le cœur du système de réfrigération à éjection, a été inventé par Charles Parsons en 1901, pour éliminer l'air du condenseur de la machine à vapeur. En 1910, Maurice Le blanc l'emploie pour la première fois dans un système de réfrigération à jet de vapeur. Au commencement, la conception de l'éjecteur était principalement basée sur des expériences, jusqu'en 1950 quand Keenan et al. ont publié l'une des premières théories analytiques du calcul des performances des éjecteurs, de l'écoulement isentropique monodimensionnel, employé couramment pour prévoir les propriétés du fluide le long de l'axe de l'éjecteur basée sur des équations thermodynamiques des gaz parfaits et les lois de conservation de la masse, et de l'énergie, en ignorant les pertes dues au transfert de chaleur et au frottement, elle était accompagnée d'une étude expérimentale. Stoecker (1958), propose une des premières méthodes de conception itératives d'éjecteur impliquant des données de propriété prises des tables de vapeur.[22]

2.2.2.4.2 Définition :

L'éjecteur est un appareil de compression thermique qui convertit l'énergie de pression du fluide en énergie cinétique et crée une zone de basse pression (fluide primaire) qui aspire et entraîne un fluide d'aspiration (fluide secondaire). Après leur passage (mélange) à travers du l'éjecteur, la pression de mélange fluide augmente et la vitesse diminue, ce qui entraîne la conversion de l'énergie cinétique en énergie de pression. L'éjecteur est plus avantageux que les pompes classiques en termes de certaines caractéristiques, notamment pas de pièces mobiles, aucune alimentation externe nécessaire, faible coût de maintenance, simple, compact et facile à installer.[23]

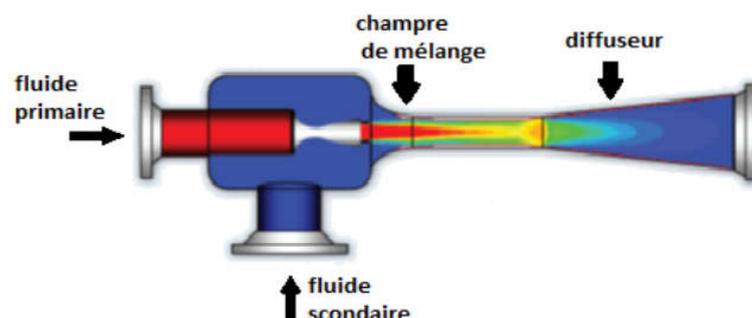


Fig2.8- Représentation d'éjecteur [23]

2.2.2.4.3 Principe de fonctionnement de l'éjecteur :

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

Un éjecteur supersonique fig.9- reçoit en entrée deux fluides généralement gazeux, mais qui peuvent aussi être liquides ou diphasiques:

- Le fluide à haute pression, appelé fluide moteur ou fluide primaire.
- le fluide à basse pression, appelé fluide entraîné ou fluide secondaire.

Le fluide moteur est accéléré dans un convergent-divergent (tuyère primaire), créant une baisse de pression dans la zone de mélange, ce qui à pour effet d'aspirer le fluide secondaire. Les deux fluides sont alors mélangés et une onde de choc peut prendre place dans la zone suivant la gorge sur la fig.9-II en résulte une augmentation de la pression du mélange et une baisse de sa vitesse, qui devient subsonique. Le diffuseur permet de convertir la vitesse résiduelle en une augmentation de pression.

L'éjecteur réalise ainsi une compression du fluide secondaire au prix d'une baisse d'enthalpie du fluide primaire.[24]

Les trois paramètres les plus importants pour caractériser le fonctionnement global d'un éjecteur sont :

1. Le rapport d'entraînement, rapport du débit masse secondaire au débit masse primaire.
2. Le rapport de compression, égal au rapport de la pression statique en sortie du diffuseur à la pression statique du fluide secondaire.
3. Le rapport de sections (minimale sur maximale, ou du flux moteur au flux entraîné...) de l'éjecteur, qui détermine sa géométrie.[25]

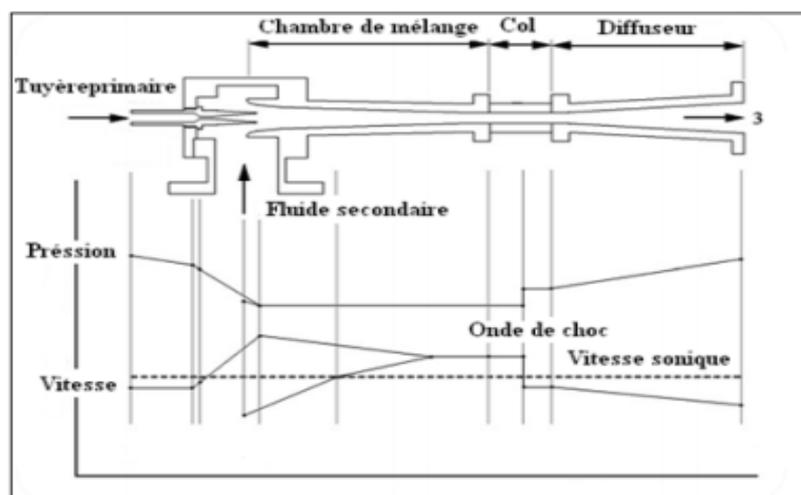


Fig2.9- Coupe d'un éjecteur et évolution des vitesses et pressions. [24]

2.2.2.4.4 Éléments constitutifs d'un éjecteur :

L'éjecteur est l'élément essentiel de l'installation frigorifique à éjecto-compression il comporte trois éléments principaux :

a- Tuyère primaire : c'est une tuyère convergente divergente, à travers laquelle passe le fluide primaire [26]. Il permet au fluide moteur de la conversion de son enthalpie en énergie cinétique pour entraîner le fluide secondaire. [27]

b. Tuyère secondaire : porte du vapeur qui vient de l'évaporateur pour être entraîné et aspiré par le fluide moteur (fluide primaire). [27]

c. Chambre de mélange : après la décompression du fluide moteur dans la tuyère motrice et l'aspiration du fluide secondaire par le fluide primaire, les deux fluides se mélangent dans la chambre de mélange (dans le convergent) et ensuite ce dernier se comprime à travers le diffuseur. [27]

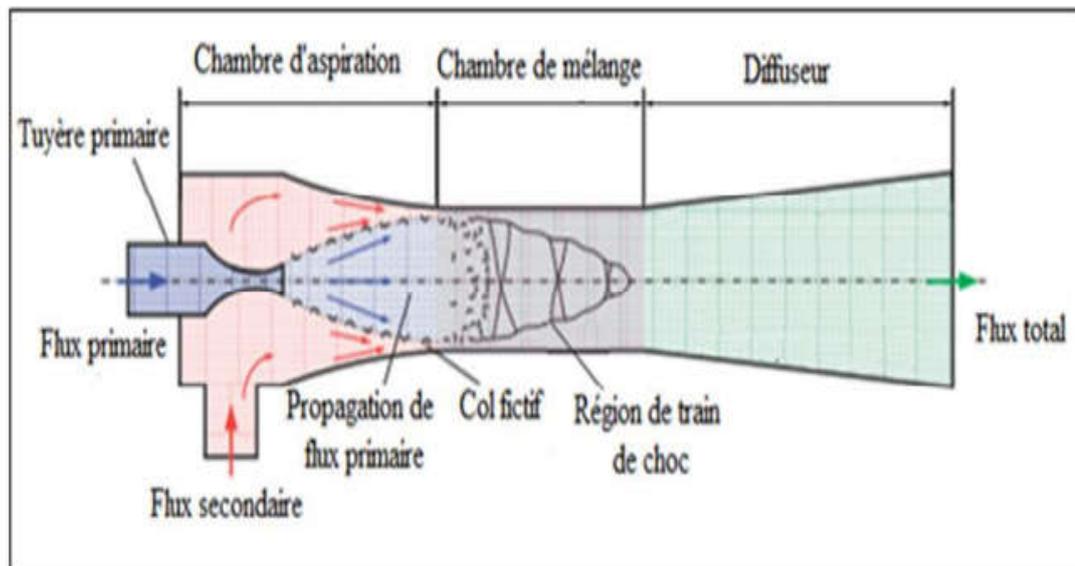


Fig2.10- Éléments constitutifs d'un éjecteur [23]

2.2.2.4.5 Modèles de fonctionnement des éjecteurs

Selon leur design, les éjecteurs peuvent être classés en deux catégories, suivant la position de la tuyère primaire.

a. Éjecteur à section de mélange constante :

La fig2.11 montre un type d'éjecteur qui est conçu de façon à ce que la sortie de la tuyère primaire se situe dans la zone à section constante de l'éjecteur, le mélange des deux flux, primaire et secondaire se produit dans cette zone de l'éjecteur, d'où l'appellation «éjecteur à section de mélange constante». [26]

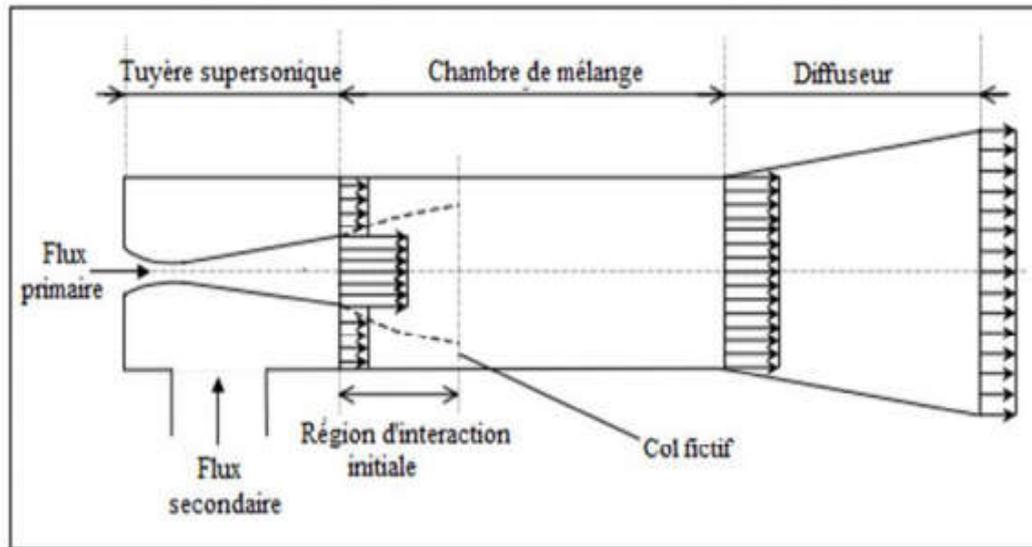


Fig2.11- Éjecteur à section de mélange constante.[26]

b. Éjecteur à pression de mélange constante :

Pour ce cas, montré par la fig2.12 la sortie de la tuyère primaire se situe dans la chambre d'aspiration, concernant ce type d'éjecteurs, les chercheurs ont supposé que le mélange des deux flux se produit dans la chambre d'aspiration avec une pression constante. D'où le nom «éjecteur à pression de mélange constante». [26]

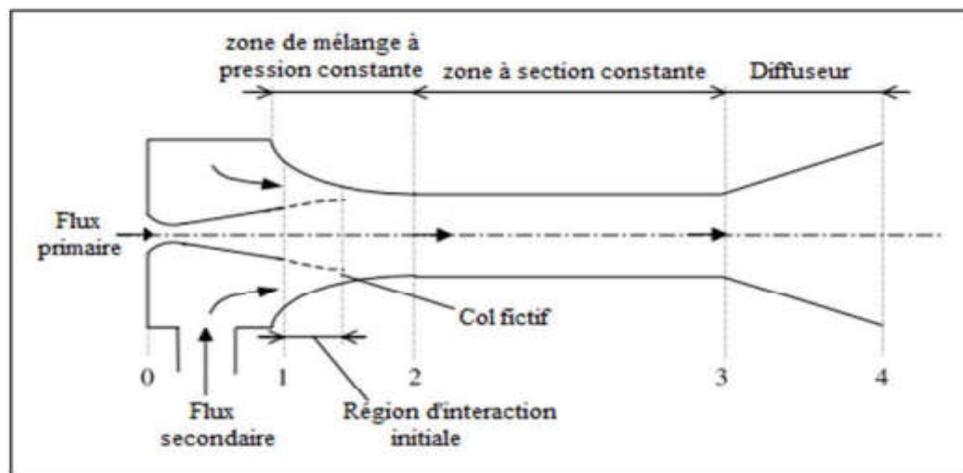


Fig2.12- Éjecteur à pression de mélange constante.[26]

2.2.2.4.6 Différentes types des éjecteurs :

Selon leur géométrie, on peut distinguer les éjecteurs en deux types principaux : les éjecteurs à mélangeur cylindrique et les éjecteurs à mélangeur convergent- divergent.

a. Éjecteurs à mélangeur cylindrique :

La fig.13-montre le schéma de principe d'un éjecteur à liquide et à mélangeur cylindrique. Dans cet éjecteur, la tuyère motrice qui accélère le fluide est donc simplement convergente alors que, dans le cas d'un éjecteur à air ou à vapeur, le flux moteur est généralement supersonique ; la

tuyère motrice est donc convergente-divergente. Dans ce cas, la tuyère transforme l'énergie de pression du flux moteur en énergie cinétique et le jet primaire, à grande vitesse, entraîne le fluide secondaire dans le mélangeur par échange de quantité de mouvement. Ce mélange des flux primaire et secondaire s'effectue à pression sensiblement constante dans le mélangeur cylindrique, puis la pression croît dans le diffuseur de sortie comme le montre également la fig.13- sur laquelle l'évolution des vitesses des deux flux est également représentée.[22]

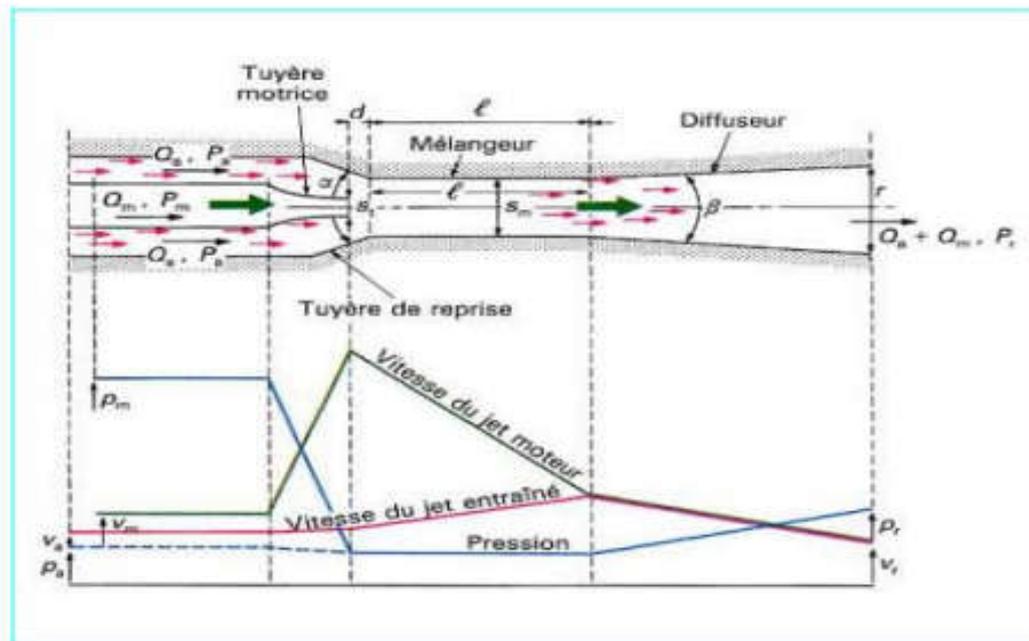


Fig2.13- schéma de principe d'un éjecteur à liquide avec mélangeur cylindrique [22]

b. Éjecteurs à mélangeur convergent-divergent :

La fig2.14 montre le schéma de principe d'un éjecteur à gaz et à mélangeur convergent-divergent. Le principe de base du fonctionnement est bien sûr le même que précédemment : l'entraînement du flux secondaire se fait toujours par échange de quantité de mouvement jusqu'à l'obtention d'une veine de vitesse pratiquement uniforme et en général supersonique. L'énergie cinétique de cette veine se transforme de façon quasi isentropique en pression dans le convergent supersonique qui réduit la vitesse jusqu'à un nombre de Mach voisin de l'unité au col, puis dans le diffuseur final subsonique. Ce type de géométrie permet de :

Réduire la longueur de l'éjecteur.

Diminue les pertes par frottement et donc améliore le rendement.[22]

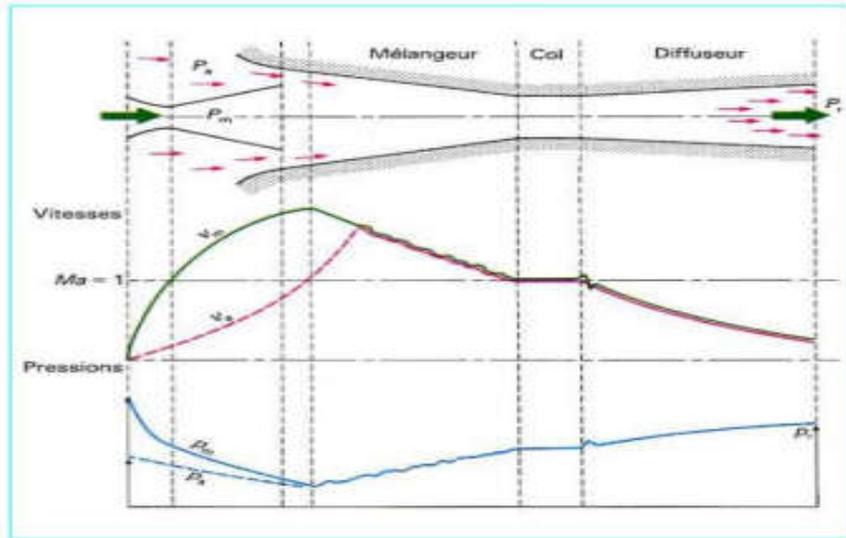


Fig2.14- Schéma de principe d'un éjecteur à gaz avec mélangeur convergent-divergent.[22]

2.2.2.4.7 Grandeurs caractéristiques des éjecteurs :

a. Grandeurs géométriques adimensionnelles :

Il existe une grande variété d'éjecteurs de configurations géométriques parfois fortes différentes. Outre l'assemblage classique de deux tuyères coaxiales, on rencontre des géométries beaucoup plus évoluées utilisant des tuyères primaires de forme lobée (ou encore à pétales) ou pouvant comporter plusieurs tuyères motrices en position pariétale. Il existe même des éjecteurs au sein desquels l'écoulement est mis en rotation en vue d'en améliorer les performances. La fig2.15 montre les paramètres utilisés pour caractériser la géométrie de l'éjecteur. [28]

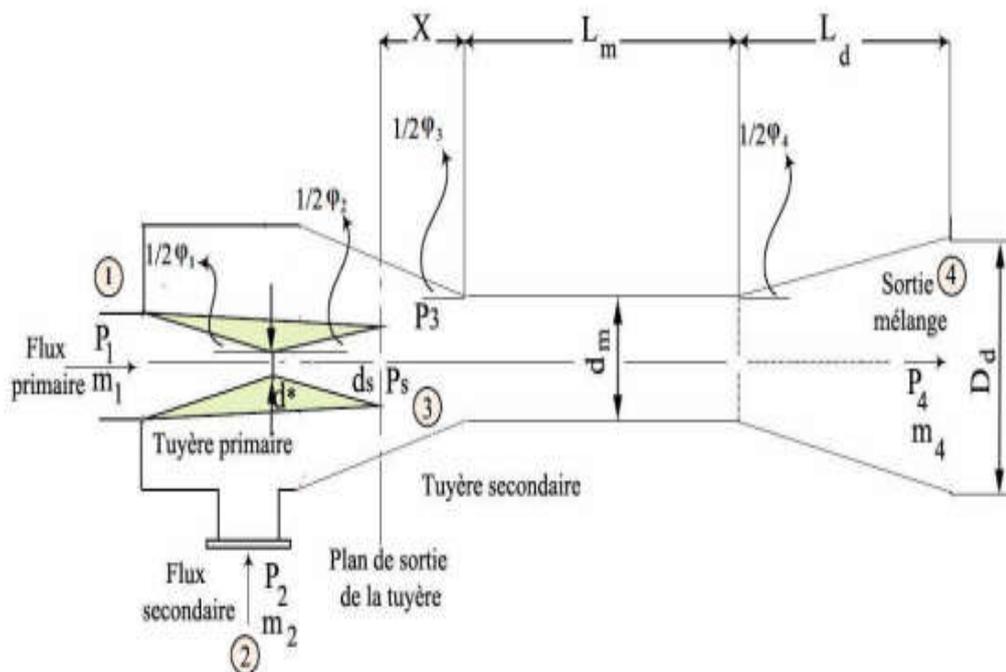


Fig2.15- Paramètres géométriques de l'éjecteur[28]

Sur la fig2.15 la zone correspondant à la longueur X est appelée chambre de prémélange. Sur cette figure sont également indiqués les principaux paramètres géométriques caractéristiques d'un éjecteur, à savoir :

d^* : Diamètre au col de la tuyère primaire ;

d_s : Diamètre à la sortie de la tuyère primaire ;

X : Distance entre le plan de sortie de la tuyère primaire et la section d'entrée du tube de mélange ;

d_m : Diamètre du mélangeur ;

L_m : Longueur du mélangeur ;

D_d : Diamètre à la sortie du diffuseur ;

L_d : Longueur du diffuseur ;

φ_1 : Angle convergent tuyère primaire ;

φ_2 : Angle divergent tuyère primaire ;

φ_3 : Angle du convergent de la tuyère secondaire ou de la chambre de prémélange ;

$\varphi_4 = \alpha_{dif}$: angle de divergent de la tuyère secondaire ou du diffuseur.

À partir de ces grandeurs géométriques, on définit les paramètres adimensionnels suivants :

L'aire du mélangeur/ l'aire de la tuyère motrice ou module de l'éjecteur :

$$A = \left(\frac{d_m}{d^*}\right)^2 \quad (2.1)$$

Le module de la tuyère motrice :

$$\Psi = \left(\frac{d_s}{d^*}\right)^2 \quad (2.2)$$

Le module du diffuseur :

$$\Lambda = \left(\frac{d_m}{D_d}\right)^2 \quad (2.3)$$

La position relative de la tuyère motrice :

$$\frac{X}{d_m} \quad (2.4)$$

La longueur relative du tube de mélange :

$$\frac{L_m}{d_m} \quad (2.5)$$

La longueur relative du diffuseur :

$$\frac{L_d}{d_m} \quad (2.6)$$

Le paramètre géométrique essentiel est le module A de l'éjecteur. La pénétration relative de la tuyère motrice, paramètre X/d_m joue aussi un rôle important.[28]

b. Grandeurs thermodynamiques adimensionnelles :

Parmi les plus anciennes études traitant des éjecteurs, bon nombre faisaient déjà appel à des paramètres thermodynamiques adimensionnelles afin de faciliter la comparaison des résultats et pour décrire les performances d'un éjecteur. Les principaux nombres adimensionnels utilisés pour caractériser le fonctionnement global d'un éjecteur sont définis à l'aide de la fig.15-. Pour les applications de réfrigération, les paramètres thermodynamiques fondamentaux les plus importants du système sont « le taux d'entraînement » et « le rapport de compression »[28] définis par :

Taux d'entraînement

$$U = \frac{\text{débit massique secondaire}}{\text{débit massique primaire}} = \frac{m_2}{m_1} \quad (2.7)$$

Rapport de compression

$$RC = \frac{\text{Pression statique à la sortie du diffuseur}}{\text{Pression statique du flux secondaire}} = \frac{P_4}{P_2} \quad (2.8)$$

Le taux d'entraînement est lié à l'efficacité énergétique du cycle de réfrigération et le rapport de compression limite la température à laquelle la chaleur peut être rejetée. Ces performances dépendent le plus souvent du mode de fonctionnement de l'éjecteur, des conditions de pression mais aussi de la géométrie.

Par conséquent, il n'y a aucun doute qu'un éjecteur fonctionnant pour des conditions de fonctionnement données avec un taux d'entraînement le plus élevé et qui permet de maintenir les pressions à la sortie du diffuseur les plus hautes possibles sera l'éjecteur le plus recherché.

Deux autres paramètres d'une importance secondaire sont :

Le rapport moteur ε qui correspond au rapport des pressions amont et aval.[28]

$$\varepsilon = \frac{P_1}{P_4} \quad (2.9)$$

Le rapport des pressions génératrices Γ défini par le rapport entre les pressions amont primaire et secondaire

$$\Gamma = \frac{P_1}{P_2} \quad (2.10)$$

2.2.2.4.8 L'application de l'éjecteur :

Les éjecteurs présentent plusieurs intérêts dont le plus important est l'absence de pièces mécaniques mobiles. L'absence de piston ou d'élément rotatif offre un système fiable qui nécessite peu d'entretien ou de maintenance particulière. Les éjecteurs trouvent des applications dans de nombreux domaines. De manière non exhaustive, nous pouvons citer :

a. Mise sous vide : Les éjecteurs peut être utilisé comme pompe à vide dans des applications ne nécessitent pas des vides pousses, par exemple l'emballage de produits alimentaires ou l'extraction de fluides agressifs. Pour des applications nécessitant les dépressions plus importantes, il est possible d'utiliser des éjecteurs multi-étages comme dans le procédé de désodorisation des huiles comestibles par exemple.[29]

b. Transport de diverses matières solides : Les éjecteurs sont parfois employés dans l'industrie alimentaire ou pharmaceutique pour transporter des matières solides telles que poudres ou granules. Grace à leur fiabilité et leur robustesse, les éjecteurs sont en effet souvent préférés à d'autres systèmes mécaniques qui risquent de s'encrasser et de tomber en panne. L'éjecteur pour la transmission pneumatique de Ding.[23]

c. Séparation de matières : Les éjecteurs sont également rencontrés lors de certaines opérations de filtrage et de séparation de matières. Leur fonctionnement repose sur le principe de séparation par effet inertiel de matières de densité et de propriétés mécaniques différentes. A titre d'exemple, le processus de traitement du sable souille par du pétrole utilisant un système à éjecteur (système GENFLO-EUROPE SA). Par ailleurs, il est possible de citer dans le cadre de la lutte contre la pollution, l'utilisation de filtres à particules bases sur la technique des éjecteurs, ainsi que l'emploi d'éjecteurs dans les processus de dissociation et de distribution de particules de graisse dans des fluides alimentaires.[23]

d. Mélange des fluides : l'éjecteur sont souvent employés pour leur capacité à assurer le mélange de fluides et ce quelles que soient la nature ou les propriétés physiques des fluides (gaz, liquides, chauds, froids...). Ils sont notamment utilisés dans l'industrie chimique pour le mélange de fluides réactifs en raison de leur fiabilité.[29]

e. Production de froid : L'utilisation du principe de l'éjecto-compression dans un cycle frigorifique tri-therme remonte au début du 20ème siècle. On rencontre également les éjecteurs dans le domaine de la production de froid dans le rôle de thermo-compresseurs assurant une partie de la compression du fluide frigorigène. Ces systèmes frigorifiques sont tri-thermes et présentent

comme principal avantage de pouvoir tirer profit d'une source de chaleur gratuite telle que le soleil, ou de la récupération de chaleur de machines dans les complexes industriels. Cette source de chaleur assure l'élévation en température. [23]

f. Applications en aéronautique : Le secteur de l'aéronautique est un grand utilisateur d'éjecteurs. Des éjecteurs ont ainsi été utilisés pour simuler des altitudes élevées lors de tests de moteurs fusées. Ils servent à simuler le fonctionnement des propulseurs destinés à évoluer à très hautes altitudes, donc à basses pressions environnantes. Le développement d'engins à décollage vertical a également eu recours à l'emploi d'éjecteurs supersoniques. Ceux-ci s'avèrent particulièrement efficaces comme moyen d'augmentation de poussée pour des avions de types V/STOL (avions à décollage court et atterrissage vertical). De manière générale, dans les applications aéronautiques, l'apport d'un débit massique secondaire par le biais d'un éjecteur à flux induit présente plusieurs intérêts. Il produit bien sûr une augmentation de la poussée qui peut être amplifiée par l'utilisation de tuyères de géométries évoluées (forme lobée ou à pétales). Le flux induit peut également permettre d'atténuer les bruits produits et ainsi de réduire les nuisances sonores et la signature infrarouge d'un propulseur ou d'un conduit d'échappement. Le l'éjecteur du système de gestion thermique pour l'application d'aéronautique.[23]

g. Les piles à combustibles : Les éjecteurs peuvent être utilisés en remplacement de la pompe dédiée à la récupération de l'hydrogène non consommé dans un système pile à combustibles. L'intégration de l'éjecteur sur le circuit d'alimentation en hydrogène permet la réduction de la consommation d'électricité et donc l'amélioration du rendement global de la pile.[30]

h. Le boosting : Le boosting des gaz est utilisé pour l'acheminement du gaz naturel dans les pipelines. Les éjecteurs servent alors à renforcer ce processus en utilisant le gaz sortant à haute pression pour entraîner le gaz à faible pression sans faire appel à des compresseurs trop gourmands en énergie.[29]

i. Le dessalement de l'eau : On rencontre également les éjecteurs dans des systèmes solaires de dessalement de l'eau de mer où ils contribuent au processus de recompression de la vapeur destinée à être condensée en eau distillée.[30]

j. Le chauffage : L'application de l'éjecteur dans le système de chauffage centralisé a aussi attiré certaine attention, comme l'application de la pompe à jet d'eau dans le système immeuble de grande hauteur directe connectée.[30]

2.2.2.4.9 Avantages et inconvénients de l'éjecteur :

Parmi les avantages de l'éjecteur supersonique à un cycle de production de froid est : au lieu d'utiliser les énergies nobles (Énergie électrique, Énergie cinétique...), il utilise des énergies thermiques gratuites ou non nocives (énergie solaire) 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 coûteuse (pas de lubrification ou de friction), Aussi:

- 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 cou-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 de fluides frigorigènes inédits comme par exemple l'eau.

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

Il s'ensuit qu'un éjecteur s'adapte mal à un fonctionnement hors des conditions de design.[31]

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons comparé les systèmes de refroidissement des compresseurs avec des systèmes de refroidissement éjectables et conclu que les systèmes de refroidissement éjecteur (SRÉ) sont plus attrayants que les systèmes conventionnels de refroidissement sous pression de vapeur, avec l'avantage de la simplicité dans la construction, l'installation et l'entretien. De plus, dans un (SRÉ), la pression peut être obtenue directement sans consommation d'énergie mécanique. En outre, l'utilisation d'énergie thermique à basse température (comme l'énergie solaire et la chaleur provenant des rejets industriels) dans le système de refroidissement peut aider à atténuer les problèmes environnementaux, y compris la réduction des émissions de dioxyde de carbone provenant de la combustion de combustibles fossiles et contribuant ainsi à la réduction du réchauffement climatique et de la dégradation de la couche d'ozone.

Chapitre 3 :

Etude de cas

Introduction

La mécanique des fluides numérique, plus souvent désignée par le terme anglais computational fluid dynamics (CFD), consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par la résolution numérique des équations régissant le fluide. En fonction des approximations choisies, qui sont en général le résultat d'un compromis en termes de besoins de représentation physique par rapport aux ressources de calcul ou de modélisation disponibles, les équations résolues peuvent être les équations d'Euler, les équations de Navier-Stokes, etc.

La mécanique des fluides numérique a grandi d'une curiosité mathématique pour devenir un outil essentiel dans pratiquement toutes les branches de la dynamique des fluides, de la propulsion aérospatiale aux prédictions météorologiques en passant par le dessin des coques de bateaux. Dans le domaine de la recherche, cette approche est l'objet d'un effort important, car elle permet l'accès à toutes les informations instantanées (vitesse, pression, concentration) pour chaque point du domaine de calcul, pour un cout global généralement modique par rapport aux expériences correspondantes. [32]

3.1 Présentation des logiciels du calcul utilisés dans ce travail :

Plusieurs logiciels ont été utilisés dans le cadre de cette étude :

- Le générateur de maillage GridMesh « GMSH »,
- Le code de calcul « Code_Saturne »,
- Le poste traitement « EnSight/ParaView ».

3.1.1 Logiciel de maillage gridmesh « GMSH » :

Est un générateur de maillage par éléments finis développé par Christophe Geuzaine et Jean-François Remacle , publié sous une licence GPL (avec une licence LGPL pour permettre l'utilisation et la liaison avec des manilleurs externes). Gmsh est un logiciel libre.

Gmsh contient 4 modules :

- Un module de géométrie,
- Un module de maillage,
- Un module solver,
- Un module de post-traitement.

Gmsh dispose d'une capacité à prendre en compte des équations paramétriques simples dans son pré-traitement, et d'un système de visualisation efficace dans son mécanisme de post-traitement.[33]



Fig3.16- GMSH.

3.1.1.1 Le module géométrie :

Le module géométrie est disponible sur le menu par la liste de sélection ou le raccourci (g).

[34].

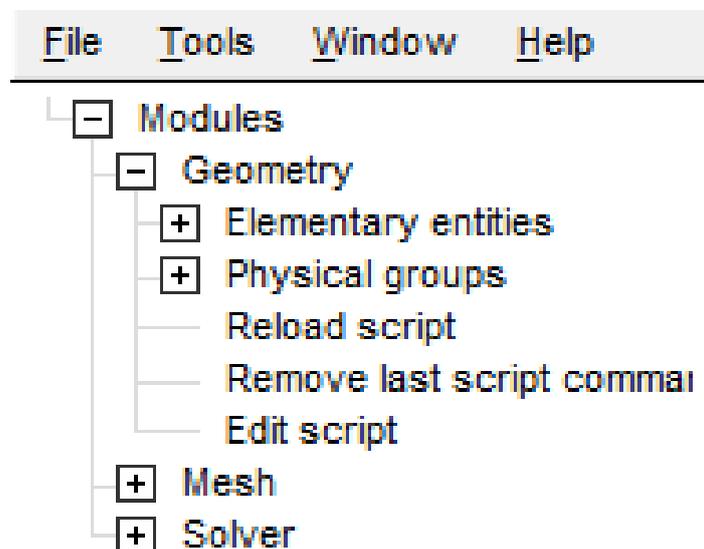


Fig3.17- le module géométrie.[34]

3.1.1.2 Le module mesh :

Une fois la surface géométrique définie, on va générer le maillage. Pour cela, on choisit le module mesh, soit grâce à la liste de sélection. A partir de ce menu, on va pouvoir mailler les contours, surfaces et volumes en précisant l'ordre d'approximation des éléments finis, effectuer

des opérations de partitionnement, de raffinement et d'homogénéisation des mailles. C'est ici également que l'on va sauvegarder le maillage au format msh.[34]

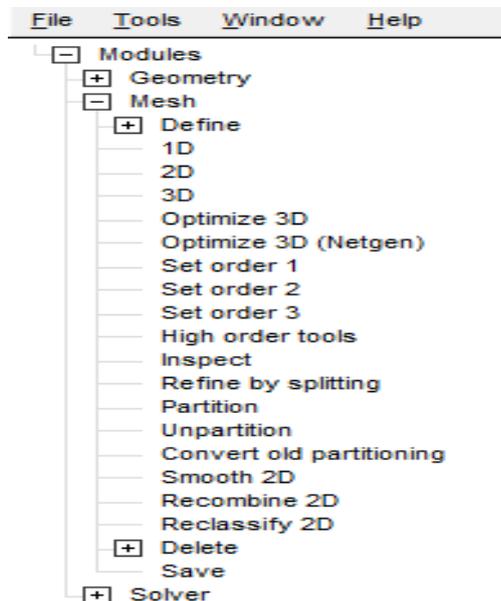


Fig3.18- Menu du module mesh. [34]

3.1.1.3 Le module solver :

Gmsh peut être interfacé avec un solveur C++. Pour cela, il suffit d'inclure Gmsh Socket.il dans le code. 5 solveurs peuvent être interface simultanément avec Gmsh. [34]

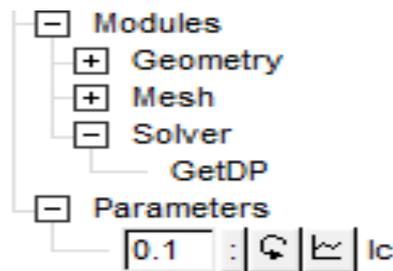


Fig3.19- Le module solver. [34]

3.1.1.4 Le module post-processing :

Comme nous l'avons vu en présentant le format msh, il existe la possibilité de tracer des données à condition qu'elles soient données dans le bon format. Le module post-processing permet de tracer ces données et de les visualiser dans l'interface de Gmsh.[34]

3.1.1.5 Les étapes d'un GMSH:

- Lancer GMSH,
- Crées un nouveau cas(ejecteur.geo):file/new,
- Sélectionner dans le menu déroulant Geometry.
- Cliquer sur

Elementary, Add, Parameter

- Crées la valeur et cliquer sur Add ,
- Cliquer ensuite Elementary, Add, Point,
- Après avoir saisi les trios coordonnées du point, cliquer sur Add pour une creation effective des points,
- Créer les autres points.
- Pour la creation d'une ligne

Elementary, Add, Straight line ou spline,

- Relier les points 1 et 2, faire de même pour les points (2,3), (3,4).....

On doit maintenant créer une surface plane.

- Cliquer sur

Elementary, Add, plane surface

- Cliquer sur l'une des lignes créées précédemment (il suffit de cliquer une seule fois, Gmsh reconnait une surface fermée),
- Vérifier bien que la surface a été définie (ligne avec pointillés indiquant la surface),
- Sélectionner Mesh dans le menu déroulant,
- Choisir Define/ Transfinite/Line,
- Cliquer sur Define/ Transfinite/Surface,
- Cliquer sur la surface,
- Cliquer sur les points natifs formant le carré,
- Dans Mesh cliquer sur Define/Recombine,
- Sélectionner la surface,
- Sortir de Recombine (touché q),
- Utiliser Geometry cliquer sur Elementary/Extrude surface,
- Pour cela, ajouter la commande Recombine avant Layer.
- Cliquer sur Elementary/Physical groups/add :

Surface (Entrée, sortie, paroi, symétrie, périodique),

Volume.

- Enregistré mesh en 3D.

3.1.1.6 La géométrie :

La géométrie créée est présentée ci-dessous

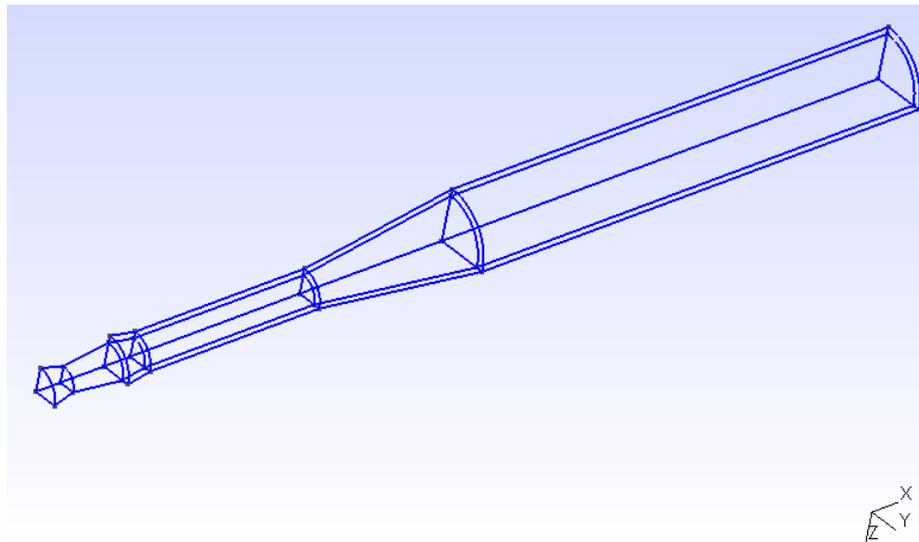


Fig3.20- La géométrie.

3.1.1.7 La génération du maillage (2-D)

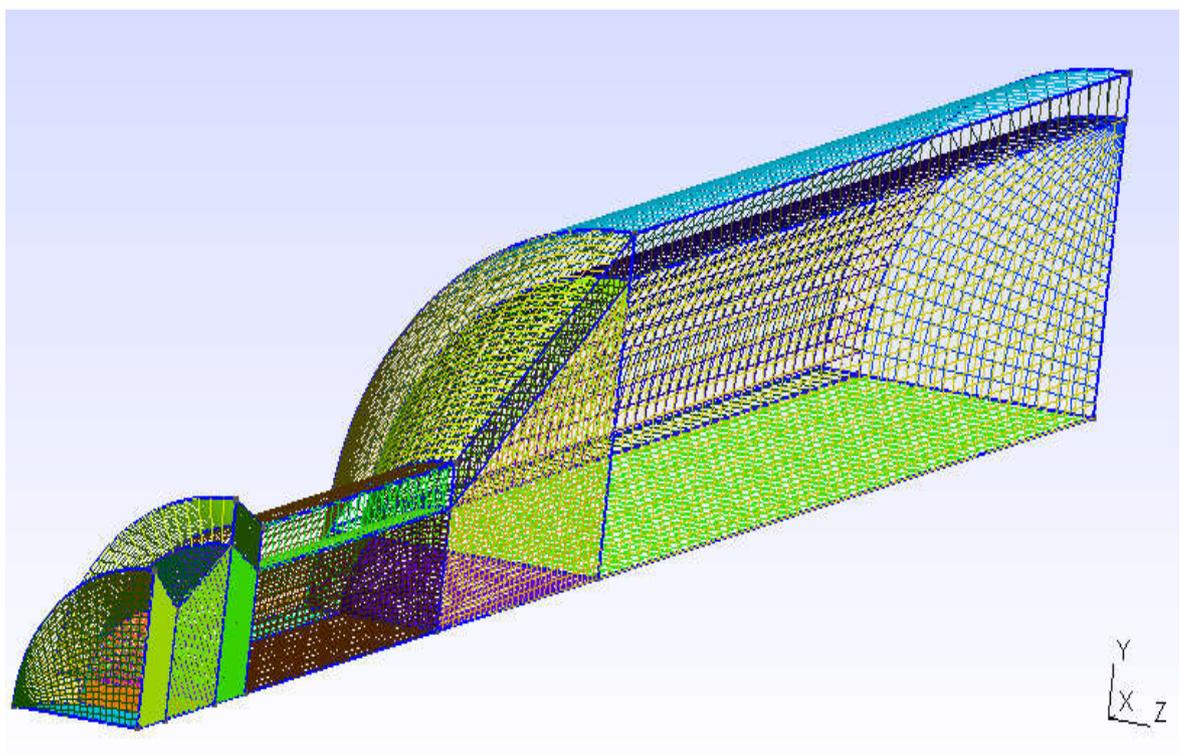


Fig3.21-La génération du maillage (2-D).

3.1.2 Code saturne :

Est un code destiné à la résolution des équations de Navier-Stokes dans des cas 2D, 2D axisymétriques et 3D, et basé sur la méthode des volumes finis. Il a été développé depuis 1997 par EDF (Electricité de France), et est devenu libre d'accès en 2007 sous une licence GPL.

Code saturne permet de modéliser des écoulements pouvant être stationnaire ou instationnaires, laminaires ou turbulents, incompressibles ou potentiellement dilatables, et avec ou sans transferts de chaleur. Des modules dédiés sont disponibles pour traiter des problèmes relatifs aux transferts radiatifs, à la combustion, aux écoulements compressibles ou à la magnéhydrodynamique.[35]

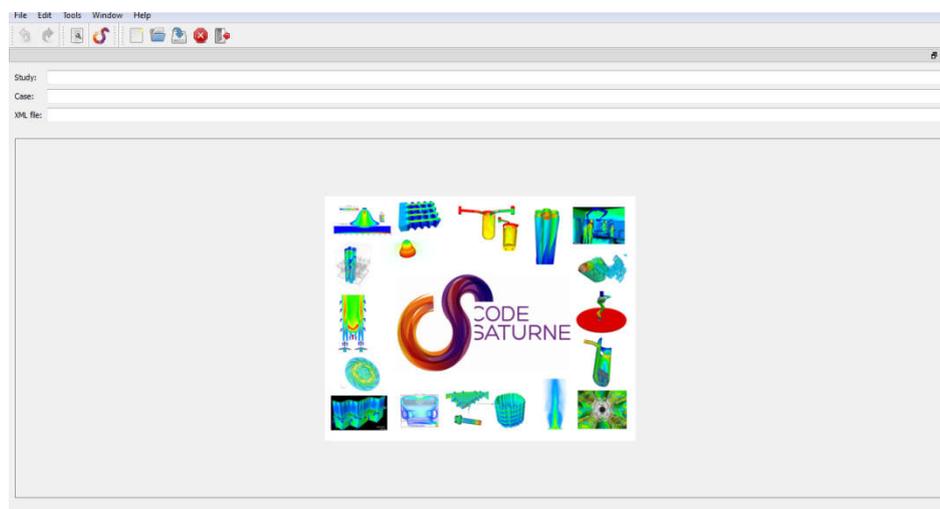


Fig3.22-Code_saturne.

Le code contient plusieurs modèles de turbulence, qui sont basés sur l'approche RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) ou LES (Large-Eddy Simulation). Il inclut également différents modules permettant de modéliser des physiques particulières, comme par exemple.[36]

- La combustion du gaz, du charbon et du fuel lourd,
- Le transfert radiatif semi-transparent,
- L'effet joule,
- Les arcs électriques,
- Les écoulements faiblement compressibles,
- Les écoulements atmosphériques.

Plusieurs modèles sont disponibles dans Code_Saturne, à savoir :

- Laminaire,
- Longueur de mélange,
- K-epsilon,

- K-epsilon à production linéaire,
- K-omegaSST,
- Rij-epsilon standard (LRR),
- Rij-epsilon (SSG),
- V2f (phi-model),
- LES (Smagorinsky),
- LES (Dynamique).

3.1.2 .1 Les étapes Code saturne :

Passer de lancer un calcul sous le solveur Code_Saturne on suit les étapes suivantes:

- Après lancer le logiciel et à partir de la barre des tâches on choisit File>New case,
- On donne un nom pour notre projet et cocher les deux premiers choix,
- Dans la première fenêtre (Calculation environment) on ajoute le fichier mesh créé précédemment et choisi check mesh pour la vérification avant le calcul,
- Dans notre cas on choisit instationnaire (unsteady flow) et compressible,
- Le modèle de turbulence à utiliser est K-epsilon,
- Remplissez Les propriétés physiques dans (Fluid properties). Le fluide de travail est SES36.

Les propriétés du fluide SES36:

Masse molaire (M), Température (T), Pression (P), La densité (ρ), les capacités thermiques (C_p , C_v), La conductivité thermique (λ), ...etc.

Tableau 3.1- les propriétés du fluide SES36. [37]

Propriété physique	Unité	Valeur
M	$g\ mol^{-1}$	184.53
$T_{critique}$	°C	177.55±0.5
$P_{critique}$	Bar	28.49±0.24
$\rho_{critique}$	$Kg\ m^{-3}$	538
$\rho_{liquide}$	$Kg\ m^{-3}$	1339.25
ρ_{vapeur}	$Kg\ m^{-3}$	6.95
$Cp_{liquide}$	$J\ kg^{-1}k^{-1}$	1167.2
Cp_{vapeur}	$J\ kg^{-1}k^{-1}$	641.9
Cp_{vapeur}/Cv_{vapeur}	–	1.01
Chaleur de vaporisation	$KJ\ kg^{-1}$	152.94

➤ Dans Boundary conditions

« Definition of boundaryregionson » ajoute les conditions aux limites de notre problème. Ces dernières se trouvent dans les résultats du préprocessing. « inlet en entrée, outlet un sortie, wall un paroi, symmetry un symétrie ».

« Boundary conditions » notre projet se trouve :

- Entrée principale (inlet1) « $P_1 = 320000 \text{ Pa}$ $T_1 = 353.6 \text{ K}$ $m_{TOTAL1} = 2.214 * 10^{-3} \text{ kg/s}$ $r_1 = 0.9145105 \text{ mm}$ ».

$$m_{TOTAL1} = \rho v S_{TOTAL1} \quad (3.11)$$

$$S_{TOTAL1} = \pi r_1^2 \quad (3.12)$$

Alors

$$m_1 = \frac{m_{TOTAL1}}{r_1} = \rho v \frac{S_{TOTAL1}}{r_1} \quad (3.13)$$

$$m_1 = \frac{2.214 * 10^{-3}}{0.9145105}$$

$$m_1 = 2.420967 * 10^{-3} \text{ kg/s}$$

- Entrée secondaire (inlet2) « $P_2 = 80000 \text{ Pa}$ $T_2 = 302.2 \text{ K}$ $m_{TOTAL2} = 0.086 * 10^{-3} \text{ kg/s}$ »

$$r_2 = r_3 - r_1 \quad (3.14)$$

$$r_2 = 1.183425 - 0.9145105 = 0.2689145 \text{ mm.}$$

$$m_{TOTAL2} = \rho v S_{TOTAL2} \quad (3.15)$$

$$S_{TOTAL2} = \pi(r_3^2 - r_1^2) \quad (3.16)$$

Alors

$$m_2 = \frac{m_{TOTAL2}}{r_3 + r_1} = \rho v \frac{S_{TOTAL2}}{r_3 + r_1} \quad (3.17)$$

$$m_2 = \frac{0.086 * 10^{-3}}{1.183425 + 0.9145105}$$

$$m_2 = 4.099268 * 10^{-5} \text{ kg/s}$$

- Sortie (outlet) « subsonique $P_3 = 130000 \text{ Pa}$ ».

- Puis choisi le Numerical parameter « Time step (variable) » « le nombre des itérations égales à 5000 ».
- Dans la dernière fenêtre « Calculation management » en choisit « Prepare batch calculation » , Avant lance le calcul enregistré le travail et renomme le dossier.
- Finalement on lance le calcul « Start calculation ».

Nous avons fait un post-traitement à l'aide du logiciel de ParaView/EnSight, qui nous a permis de visualiser les résultats et les valeurs calculées.

3.1.3 EnSight :

Est un logiciel pour la visualisation l'analyse et la commination des données à partir de simulations numériques et/ou d'expériences.

Les principaux marchés d'EnSight sont l'automobile, l'aérospatiale, la défense, la combustion, la production d'énergie, la fabrication de haute technologie et l'autres marchés qui nécessitent une très grande précision dans la modélisation numérique. Il est le plus souvent utilisé pour la mécanique des fluides numérique (CFD), la mécanique des structures numérique (CSM) et d'autres processus CAO (conception assistée par ordinateur).[38]

3.1.4 ParaView :

Est un logiciel libre de visualisation de données (voir par exemple Représentation graphique de données statistiques, représentation cartographique de données statistiques, visualisation scientifique). Il st fondé sur la bibliothèque VTK (pour Visualization Toolkit en anglais) et publié sous licence BSD(Berkeley Software Distribution License). Il est développé principalement par le Sandia National Laboratories (Lockheed Martin Corporation), le Los Alamos National Laboratory et la société kitware Inc.[39]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une généralité sur la simulation numérique pour étudier l'évolution des paramètres physiques (nombre de Mach, température et pression) au long de éjecteur, la simulation a été conduit a l'aide de code saturne 5 et fonctionnant avec SES36 comme réfrigérant.

Chapitre 4:

Résultats et discussion

Introduction

L'application des équations présentées dans la section précédente de ce chapitre pour calculer les performances de l'éjecteur supersonique. Elles présentent les caractéristiques des écoulements aux frontières de chaque zone de l'éjecteur.

L'amélioration des performances de l'éjecteur nécessite une bonne compréhension du comportement de l'écoulement dans tout le système. Une attention particulière est accordée à l'entraînement du fluide secondaire, au mélange et à l'interaction des ondes de choc. En raison des zones de vitesse supersonique et du flux très turbulent, il est difficile de prévoir analytiquement le comportement de l'écoulement à l'intérieur de l'éjecteur. Par conséquent, la CFD est devenue l'outil le plus efficace pour étudier le comportement de l'écoulement à l'intérieur de l'éjecteur avec rapidité et des coûts inférieurs par rapport à ceux engendrés par les méthodes expérimentales collectées par un certain nombre de chercheurs par exemple Ala Bouhanguel. Ont appliquée l'étude numérique et expérimentale de l'interaction entre deux écoulements compressibles dans un éjecteur supersonique ils ont trouvé un bon accord avec leurs résultats expérimentaux.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier le comportement de l'écoulement compressible dans un éjecteur afin de vérifier la thermo-compression réalisée par cet éjecteur, les conditions limites de l'éjecteur sont caractérisées par des débits massiques primaire et secondaire fixes et maintenus constants et le comportement de l'écoulement est forcé par la pression à la sortie. La simulation cible la mise en évidence et la compréhension de divers phénomènes existants dans les écoulements compressibles, tel que l'onde de choc normal, oblique et les détente.

4.1 Études de maillage :

La figure ci-dessous montre une comparaison entre les profils de vitesse exprimés en nombre de Mach pour deux grilles hexaédriques testées dans les mêmes conditions numériques de simulation ou nous avons sélectionné une position de l'éjecteur $y=0$ à $y=0.7\text{mm}$, La grille fine G1 caractérisée par un nombre de cellules de 298000 et la grille grosse G2 contient 988000 cellules. On remarque que les deux courbes sont très proches l'une à l'autre, qui nous conduit à conclure que l'augmentation de nombre de cellules donne une différence négligeable de paramètres thermodynamiques. Pour cela la grosse grille a été choisie dans la suite des calculs.

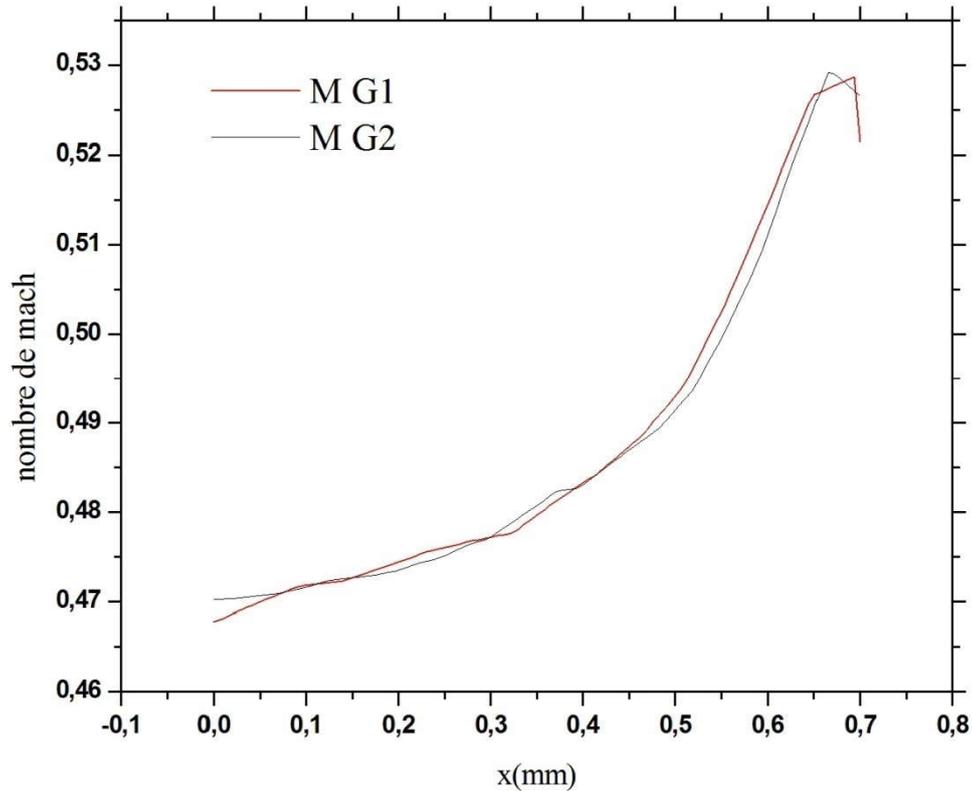


Fig4.23- Profil de vitesse dans le convergent a la position $y=0.7$ pour les grilles G1 G2.

4.2 Validations :

Les Fig4.24 Ci-dessous présentent une comparaison qualitative du comportement de l'écoulement à l'intérieur de l'éjecteur.

La fig4.24 (a) est une visualisation expérimentale réalisée par **Ala Bouhanguel.[40]**Le résultat numérique du champ de la vitesse exprime en nombre de Mach montre une simulation avec la visualisation expérimentale. Malgré que la premier partie convergent-divergent de l'éjecteur n'est pas claire dans l'image fig4.24 (a), dans la deuxième partie, après l'entrée secondaire la variation du régime d'écoulement et quasiment le même.

L'ensemble de l'éjecteur peut être divisé en 3 zones :

La première est un convergent-divergent, caractérisé par un écoulement isentropique le gaz entre à des conditions subsonique, l'écoulement s'accélère dans le convergent et attend la vitesse du son ou col (section min), l'énergie de l'écoulement est suffisante pour que la vitesse augmente dans le divergent qui donne un régime supersonique.

La 2^{ème} zone commence juste à l'entrée de flux secondaire pour cette raison cette zone est appelée zone de mélange par conséquence deux flux (principale et secondaire) change de paramètre d'une façon remarquable.

La déformation de la géométrie présentée par le convergent (juste après l'entrée secondaire) provoque une onde de choc oblique avec une chute brusque de la vitesse et une augmentation de pression, en suite une détente se produit, cela résulte la naissance d'un train de choc avec un amortissement allons vers la direction de l'écoulement jusqu'à ce que le régime deviens stable est subsonique après de divergent.

La 3^{eme} zone qui commence après la zone de mélange. A ce moment la pression augment par diminution de vitesse.

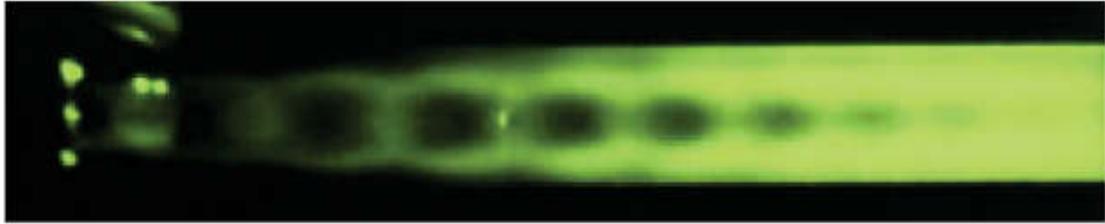


Schéma (a) : Expérimentale

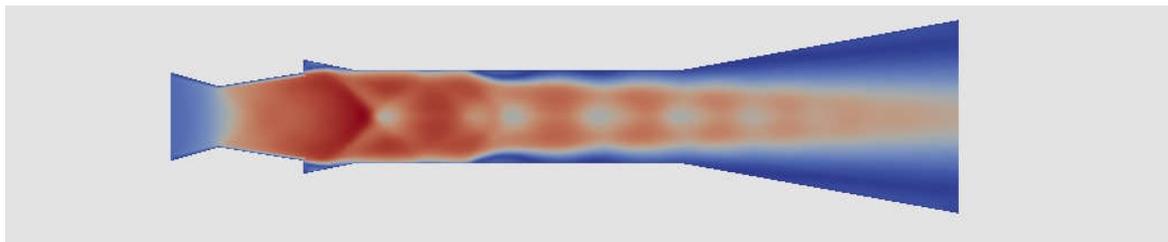


Schéma (b) : Numérique

Fig4.24-une comparaison qualitative du comportement de l'écoulement à l'intérieur de l'éjecteur.

4.3 Présentation et discussions des résultats :

Nombre de mach :

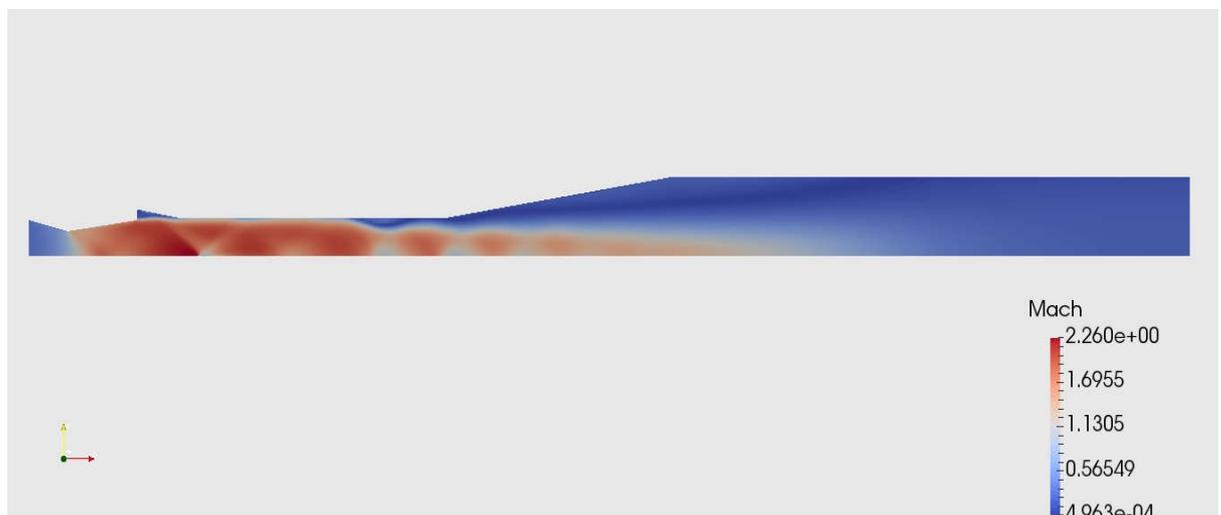


Fig4.25-Le champ de nombre de mach.

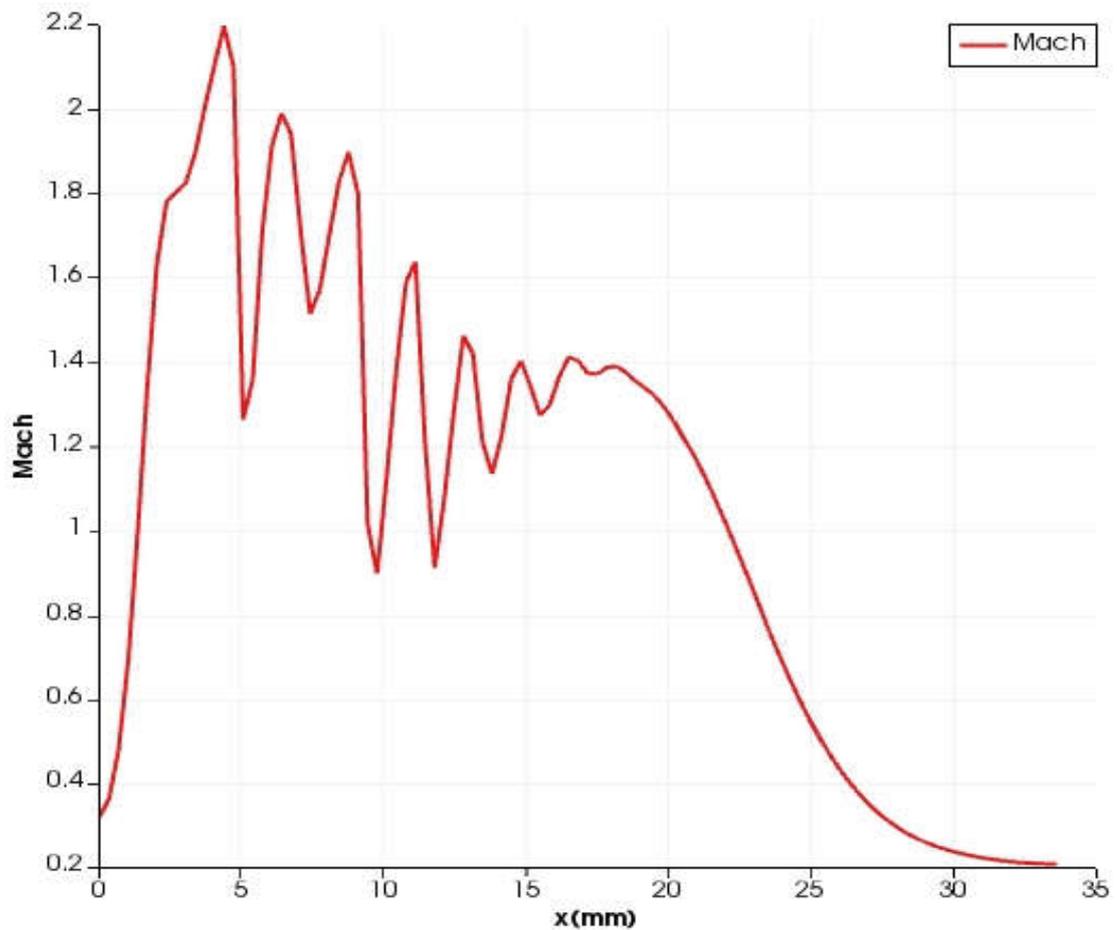


Fig4.26- La variation de nombre de mach en fonction de x.

La fig4.25 et la fig4.26 représentent le champ et le graphe de nombre de mach dans l'éjecteur respectivement, Il contient 3 parties :

Dans la première partie convergent-divergent l'écoulement est isentropique :

- Le gaz entre dans l'éjecteur avec une vitesse subsonique de la tuyère primaire.
- Que le flux s'écoule dans la partie convergente de l'éjecteur, la vitesse augmente, le flux atteint une vitesse sonique au col de la tuyère primaire, ou son nombre de mach est égal à l'unité.
- L'augmentation de la section transversale dans la partie divergente de la tuyère aboutit à une augmentation de sa vitesse aux conditions supersoniques.

La 2^{ème} partie après l'entrée le flux secondaire (section de mélange)

- Le mélange se passe par un choc oblique à l'intérieur de la section transversale constant du diffuseur. Le choc est associé à une augmentation de pression de mélange et réduction de la vitesse de mélange à des conditions subsoniques.

De la 3^{ème} partie entrée de diffuseur on remarque que la vitesse diminue.

La Pression :

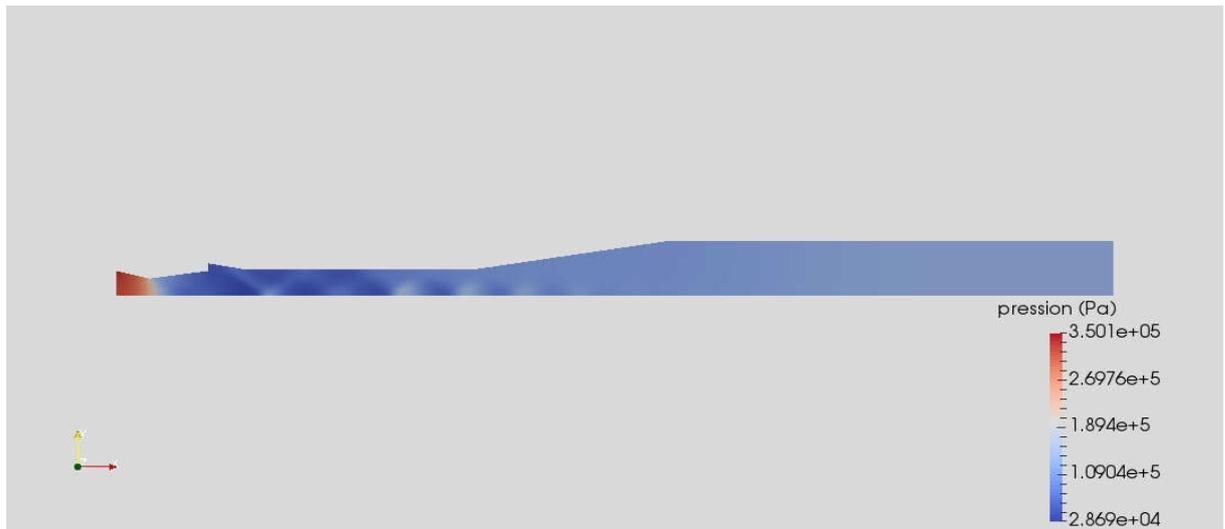


Fig4.27- Le champ de pression.

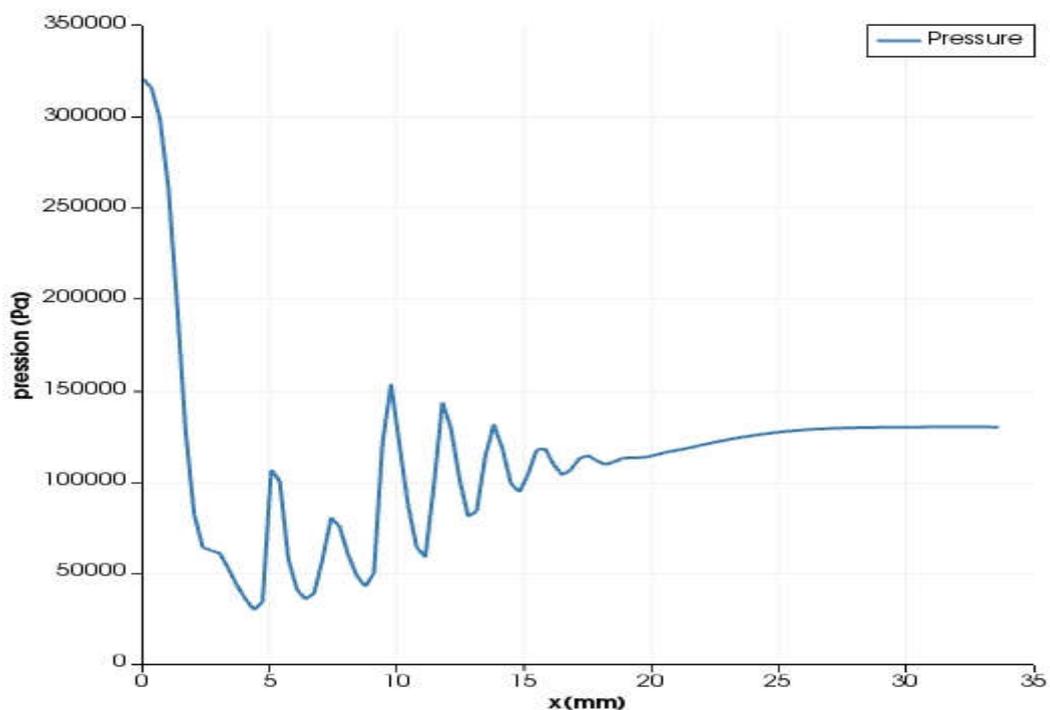


Fig4.28- La variation de pression en fonction de x.

Fig4.27 et fig4.28 montrent le champ et la variation de la pression Dans l'éjecteur, Il contient 3 parties :

Dans la première partie convergent-divergent l'écoulement est isentropique :

- Le gaz entre dans l'éjecteur avec une augmentation de pression.
- L'augmentation de pression transversale dans la partie convergente.
- Dans la partie divergent la pression décroissant.

La 2^{eme} partie après l'entrée le flux secondaire (section de mélange) :

Dans la zone mélange les deux jets sont mélangés, le jet devient un jet supersonique les ondes des chocs transversal se produit au long de zone constante.

De la 3^{eme} partie entrée de diffuseur :

La pression va augmentation et c'est le rôle de diffuseur qui convertit partie d'énergie cinétique à une pression.

La Température

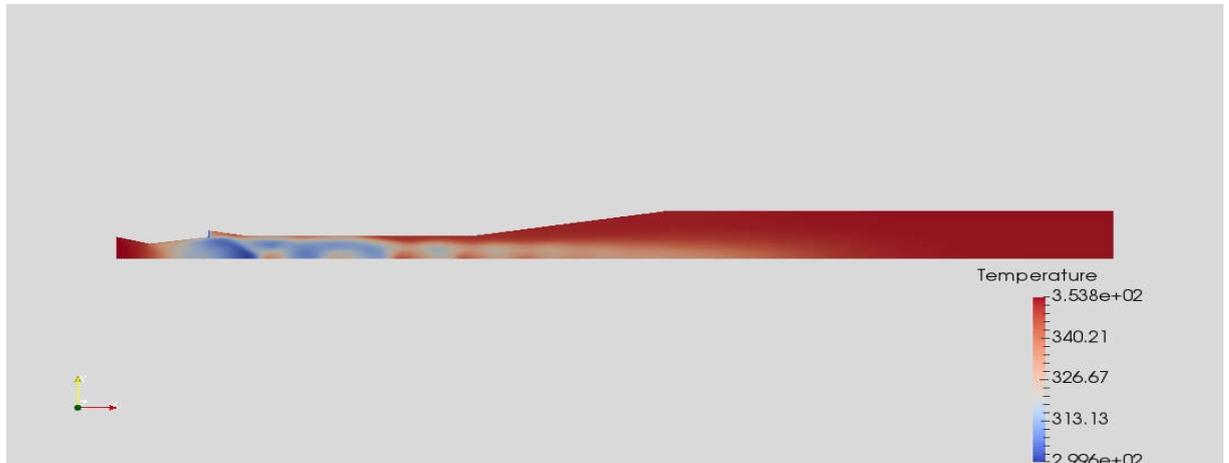


Fig4.29- Le champ de température.

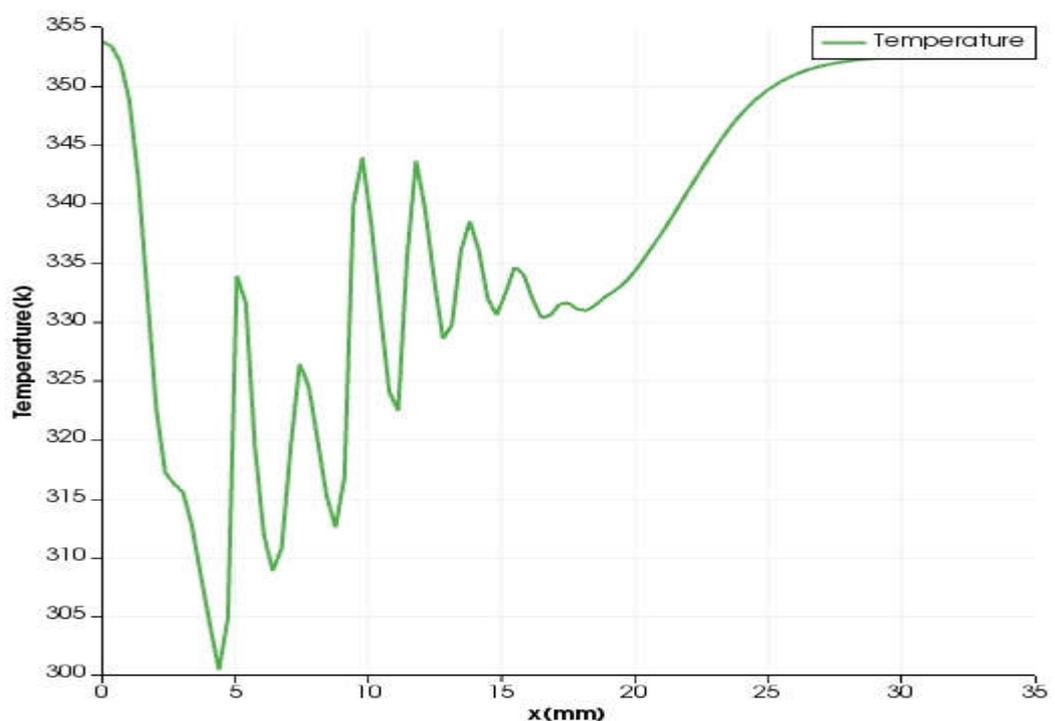


Fig4.30- La variation de température en fonction de x.

Fig4.29 et fig4.30 représenté le champ et graph de température, dans la zone 1 convergent-divergent

La vitesse dans le convergent entrée subsonique donc la pression augment alors la température élevée par contre dans la section divergent a condition supersonique la vitesse augment, la pression et température diminué.

Dans la 2eme zone mélange une dégradation de température

De la dernière zone (diffuseur) on observe l'augmentation de température d'une façon remarquable

Donc on conclut la température à une relation corrélation direct avec la pression.

Température de stagnation :

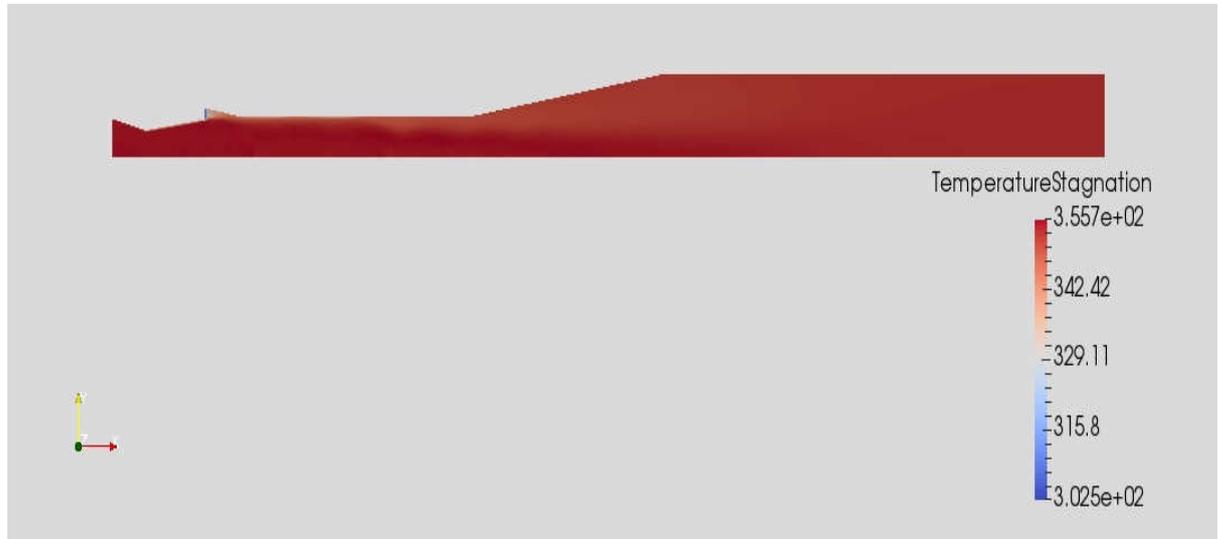


Fig4.31- Le champ de température stagnation.

Conformément à la théorie des écoulements compressible, dans la première zone de l'éjecteur la température de stagnation est constante et l'écoulement isentropique car il n'y a aucun transfert d'énergie dans cette partie d'éjecteur. Juste après la pénétration du flux secondaire qui rentre avec des paramètres thermodynamique différentes (Température statique et pression statique) qui se traduit par une variation remarquable des paramètres de stagnations, incluse la température de stagnation. Quand le mélange s'établis complètement, dans la zone mélange, la température de stagnation revient encore une fois constante. Les résultats du champ de température totale présente dans ce travail et les résultats de la pression totale qui n'a pas être présenter, le modèle numérique montre une capacité physique importante pour simuler les écoulements compressibles tel quels sont en réalité.

Conclusion :

Dans ce chapitre on a étudiée les résultats et les changements à l'intérieur de l'éjecteur numériquement et on a fait une comparaison avec l'étude expérimentale, l'écoulement est considéré comme supersonique, cette étude a permis de mieux comprendre et de savoir comment des logiciels de simulation numérique Open Source tel que CODE SATURNE, avec la relative efficacité et précision des mesures. Simulation numérique avait pour ambition d'étudier l'évolution de vitesse et de pression, température le long de l'éjecteur.

Les résultats numériques et expérimentaux ont montrés un bon accord entre eux, et le modèle numérique a pu donner de bonnes approches physiques au phénomène traité.

Conclusion générale :

Dans notre travail, nous avons fait une étude bibliographique sur la thermo compression par éjecteur supersonique d'un banc de réfrigération. Nous nous sommes intéressées par la suite à étudier le comportement de l'écoulement compressible dans un éjecteur afin de vérifier la thermo-compression réalisée par cet éjecteur.

L'écoulement était considéré comme supersonique et monophasique, l'approche de simulation numérique avait pour ambition d'étudier l'évolution de la vitesse, de la pression, le nombre de mach et la température le long de l'éjecteur. Cette simulation a été conduite à l'aide du code CFD open-source CODE SATURNE 5.0 version académique.

L'étude par simulation numérique CFD est importante à cause de plusieurs raisons, telle que, elle nous donne les contours et l'évolution de vitesse et de pression la température et le nombre de mach au long de l'éjecteur, ensuite on peut déterminer les points exacts d'une chambre de mélange au niveau de l'éjecteur où se passe l'onde de choc et même les valeurs exactes de plusieurs paramètres dans n'importe quel point dans l'éjecteur.

Les résultats expérimentaux et numériques ont un très bon accord après la comparaison qualitative du comportement de l'écoulement à l'intérieur de l'éjecteur.

Bibliographie

- [1]. Mohammed Khennich., 2016. Optimisation thermodynamique d'un procédé solaire utilisant un système de réfrigération à éjecto-compression pour la production du froid. Thèse de Doctorat, Université de SHERBROOKE.
- [2]. Satha Aphornratana et Ian W Eames., 1997. Réfrigérateur de petite puissance à éjection de vapeur : étude expérimentale d'un système utilisant un éjecteur à buse primaire mobile, (20), P. 352-358.
- [3]. Huang, B. J. et Chang, J. M., 1999. Empirical correlation for ejector design. *International Journal of Refrigeration* ,(22), P. 379-388.
- [4]. Ian W Eames et Shenyi Wu., 2000. a theoretical study of an innovative ejector powered absorption-recompression cycle refrigerator, *International Journal of Refrigeration*,(23), P . 475-484.
- [5]. Cizungu, K. et Mani, A. et Groll, M., 2001. Performance comparison of vapour jet refrigeration system with environment friendly working fluids. *Applied Thermal Engineering*, (21), P. 585–598.
- [6]. Aidoun, Z. et Ouzzane, M., 2004. The effect of operating conditions on the performance of a supersonic ejector for refrigeration. *International Journal of Refrigeration*, (27), P. 974–984.
- [7]. Selvaraju, A. et Mani, A., 2006. Experimental investigation on R134a vapour ejector refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, (29), P. 1160–1166.
- [8]. Sankarlal, T. et Mani, A., 2007. Experimental investigations on ejector refrigeration system with ammonia. *Renewable Energy*, (32), P. 1403–1413.
- [9]. Yin Hai Zhu et Yanzhong Li., 2009. nouveau modèle d'éjecteur pour l'évaluation des performances des éjecteurs de vapeurs sèches et humides. *International Journal of Refrigeration* (32), P. 21-31.
- [10]. Christian Lucas et Juergen Koehler., 2012. Etude expérimentale sur l'amélioration du COP d'un cycle frigorifique à l'aide d'un éjecteur. *International Journal of Refrigeration* (35), P. 1595-1603.
- [11]. Dariusz Butrymowicz, Jerzy et Kamil Smierciew., 2014. Etudié expérimentales du cycle de réfrigération à éjecteur entraînée à basse température fonctionnant avec l'isobutane. *International Journal of Refrigeration* (39), P. 196-209.
- [12]. Li Zhao, Zhixin et Xingyang Yang., 2015. Performance analysis of the ejector-expansion refrigeration cycle (EERC) using zeotropic mixtures, *International Journal of Refrigeration*, (57), P. 197-207.
- [13]. K.O. Shestopalov et O.S. Volovyk., 2015. une étude du fonctionnement d'un système frigorifique expérimental à éjecteur avec le frigorigène R245fa aux conditions de travail de conception et hors-conception, *International Journal of Refrigeration*, (55), P. 212-223.
- [14]. k. Megdoui , A. Mhimid et BM Tashtoush ., 2016 . thermodynamic analysis of a novel ejector-cascade refrigeration cycles for freezing process application and air-conditioning, *International Journal of Refrigeration* (70), P. 108-118.
- [15]. Guangming Chen et Xinyue Hao., 2017. Etude expérimentale sur un système de réfrigération à éjecteur à deux étages entraîné par deux sources de chaleur. *International Journal of Refrigeration* (74), P. 295-303.
- [16]. Junjiang Bao Gaohong et He Yan Lin., 2017. working fluids comparison and thermodynamic analysis of a transcritical power and ejector refrigeration cycle (TPERC). *International Journal of Refrigeration* , (82), P. 262-272 .
- [17]. Mohammad Reza Salimpour, Ahmed T et Alsammaraie., 2019. Comparative investigation on the exergoeconomic analysis of solar-driven ejector, *International Journal of Refrigeration*, (99), P. 80-93.
- [18]. Farzaneh Foroozesh Esmail et Lakzian Abdolamir Bak Khoshnevis., 2020. Amélioration des performances de l'éjecteur de vapeur humide dans un cycle de réfrigération via la l'odification de la géométrie de l'éjecteur par une nouvelle méthode CEE(génération d'entropie, taux d'entraînement et coefficient de performance). *International Journal of Refrigeration* , (110), P. 248-261 .

- [19]. <https://fr.scribd.com/document/316059202/5-La-Production-de-Froid-Les-Notions-de-Base.pdf>. 24 Novembre 2020.
- [20]. Merzak Nedjar., 2009. Etude de la production de froid par éjecteur fonctionnant avec de la vapeur d'eau produite par une chaudière solaire. Pour l'obtention du diplôme de Magister, université M'hamed Bougara, BOUMERDES.
- [21]. Benbia Leila., 2013. Ejecteur à vapeur d'eau pour la réfrigération : Etude, simulation et dimensionnement. Pour l'obtention le diplôme de Magister, université de Batna.
- [22]. Mameri Zoheir et Benkebbad Benamar., 2012, Etude de fonctionnement d'une installation frigorifique à éjecteur avec différents fluide frigorigène, Pour l'obtention du diplôme de Master en génie Mécanique, université ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEM.
- [23]. Kaoudja khaled et Zergoune abd elhakim., 2016. Amélioration d'un cycle de réfrigération tritherme (cycle à éjecteur), Pour obtenir le Diplôme de MASTER ACADEMIQUE, université KASDI MERBAH Ouargla
- [24]. Abdelkader Bouziane., 2009. Amélioration de l'efficacité des machines frigorifiques au CO2 à l'aide d'un éjecteur, Pour obtenir du diplôme de Magister, université M'hamed Bougara, Boumerdes.
- [25]. Abdelhakim Limane., 2009. Etude numérique d'un système de réfrigération à éjecteur. Pour obtenir du diplôme de Magister, université KASDI MERBAH Ouargla.
- [26]. Allek Youcefet Guers Said., 2015. Simulation numérique de l'écoulement d'un réfrigérant dans un éjecteur supersonique. pour obtenir du diplôme MASTER Académique, université Mouloud Mameri Tizi-Ouzou.
- [27]. Salah Aroua et Bachir Djouadi., 2017. Evaluation des performances d'une machine de climatisation solaire à éjecteur reliée à miroirs linéaires de Fresnel. pour obtenir du diplôme MASTER Académique, université Echahid Hamma LAKHDAR d'El-Oued
- [28]. Ali Bouzrara., 2018, Etude expérimentale des éjecteurs : Application à la récupération de l'énergie de détente des machines frigorifiques au CO2, Thèse de Doctorat, Université de Tunis El Manar.
- [29]. Hocine Amira et Naam Cheima., 2019. Simulation numérique d'un éjecteur, pour obtenir du diplôme MASTER Académique, université KASDI MERBAH OUARGLA.
- [30]. Hamaidi Chaima., 2017. Etude de l'influence de la nature d fluide frigorigène sur les performances d'une machine à éject-compression, pour obtenir du diplôme MASTER, université BADJI MOKHTAR ANNABA
- [31]. Rezoug Riadh., 2016. Etude et modélisation des performances d'une machine de climatisation solaire à éjecteur, Pour obtenir du diplôme de Magister, université BLIDA 1.
- [32]. Mécanique des fluides numérique : https://fr.m.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9canique_des_fluides_num%C3%A9rique 18 Octobre 2020.
- [33]. Gmsh : <https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Gmsh> 20 octobre 2020.
- [34]. Nicolas Kielbasiewicz. Introduction à GMSH//perso.ensta-paristech.fr/-kielbasi/docs/gmsh.pdf. 24Nouvmbre 2020.
- [35]. code_saturne : www.code-saturne.org 20 Octobre 2020.
- [36]. code_saturne :<https://www.edf.fr/groupe-edf/qui-sommes-nous/activites/notre-communautaire-scientifique/code-saturne>.22Octobre 2020.
- [37]. Marcello Riva, Felix Flohr et Andreas Froba., 2006. New fluid for high temperature application. International Refrigeration and Air Conditioning Conference, P. 4.
- [38]. EnSight : www.ensight.com 25Octobre 2020.
- [39]. ParaView : <https://fr.m.wikipedia.org/wiki/ParaView> 25 Octobre 2020.
- [40]. Ala Bouhanguel.,2013 .étude numérique et expérimentale de l'interaction entre deux écoulement compressible dans un éjecteur supersonique. pour obtenir grade de docteur, Université de Franche-Comté.

Résumé :

Le besoin croissant de confort thermique provoque une augmentation remarquable de l'utilisation des systèmes de refroidissement. Le système de réfrigération à éjecteur semble être une alternative prometteuse aux technologies de réfrigérations traditionnelles afin de réduire la consommation d'énergie par rapport aux compresseurs.

Ce travail présente une simulation numérique de l'éjecteur, l'écoulement interne est considéré comme supersonique, en utilisant la propriété des fluide SES36 et comparer les résultats de l'étude numérique avec les résultats expérimentaux de l'interaction entre deux écoulements compressibles dans un éjecteur supersonique réalisé par ALA Bouhanguel. Le code saturne a été utilisé pour réaliser cette simulation, l'écoulement est considéré compressible et le modèle K- ϵ été choisi pour être le modèle de turbulence et le gaz a été considéré comme parfait dans la résolution de l'équation de l'énergie. Le code utilisé a montré une capacité relativement importante pour détecter plusieurs phénomènes associés aux écoulements compressibles tels que l'onde de choc oblique et les détente des écoulements.

Les mots clé : cycle frigorifique, éjecteur, fluide SES36, l'onde choc oblique et les détente.

Abstract :

The need of the thermal comfort is causing a remarkable increase in the use of cooling systems. The ejector refrigeration system appears to be a promising alternative to traditional refrigeration technologies in order to reduce energy consumption compared to compressors.

The present work is a numerical simulation of a supersonic ejector, using the fluid property SES36 and compare the results of the numerical study with the experimental results of the interaction between two compressible flows in a supersonic ejector carried out by ALA Bouhanguel. the code saturn is used to perform this simulation, the flow is considered compressible and the K- ϵ model is chosen to be the turbulence model and the gas was considered perfect in solving the energy equation. The used code shows a relatively capacity to detect several phenomena associated with compressible flows such as oblique shock wave and flow expansion.

Keyword : refrigeration cycle, ejector, fluid SES36, oblique shock wave and relaxations.

المخلص

أدى تزايد الحاجة إلى الراحة الحرارية إلى زيادة سريعة و معتبرة في تطوير أنظمة التبريد باستعمال القاذف فوق صوتي كبديل للضاغط للحد من استهلاك الطاقة.

إن هذا العمل هو محاكاة رقمية لسلوك التدفق فوق صوتي داخل القاذف بمدخلين، الأول عبارة عن دخول رئيسي للغاز و الثاني يعتبر ثانويا لنفس الغاز و لكن بقيم فيزيائية (ضغط وحرارة) مختلفة، نتائج هذه المحاكاة قد تم مقارنتها نوعيا مع نتائج تجريبية منشورة من طرف ALA bouhanguel. تم تنفيذ هذه المحاكاة باستعمال Code-Saturne باعتبار أن الغاز قابلا للضغط و باعتبار أيضا أن التدفق مضطرب و لهذا تم استعمال النموذج $k-\epsilon$ ليكون نموذجا رقميا للاضطراب، و بجدد بنا أيضا أن نشير أن الغاز تم اعتباره مثاليا. أظهر الكود المستعمل قدرة نسبية في إظهار العديد من الظواهر المرتبطة للتدفقات المضغوطة مثل موجة الصدمة و التمديدات.

إن النتائج تشير إلى أن التدفق داخل القاذف يكمن في ثلاث مراحل أساسية، الأولى بين الدخول الأول و الثاني للغاز حيث يدخل الغاز بسرعة تحت صوتية لكن الشكل المتناقص للقاذف يؤدي إلى تسارع التدفق إلى أن يصل إلى سرعة الصوت عند مساحة أدنى لمرور التدفق، هذا الأخير يتمتع بالطاقة الكافية لاستمراره بالتسارع رغم زيادة المساحة. مرور التدفق و هو ما يتوافق مع التدفقات المتماثلة.

الكلمات المفتاحية: دورة التبريد, القاذف مائع SES36, موجة صدمة مائلة و الاسترخاء.