REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'étude de Master

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

L'effet MHD d'un injecteur sur l'atomisation d'un jet liquide injecté dans un cylindre. Application a un moteur diesel

Présenté par :

Sayah Monsuef

Sebti Abdelkrim

Proposé et Dirigé par :

Pr. ZIRARI Mounir

Dr.Tahar Souad

Promotion 2024/2025

Remerciements :

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Nos vifs remerciements s'adressent plus particulièrement à notre promoteur Monsieur M.ZIRARI et madame TAHAR de son aide compétente, de ces conseils précieux, son assistance, son suivi et son soutien pour mener à tenir nos différents travaux de notre travaille.

Nos tous sincères remerciements vont également à tous les enseignants Pédagogiques du département du génie mécanique de l'université de Médéa qui Ont contribué à notre formation.

Dédicace:

Je dédie ce travail

A ma très chère mère qui m'a soutenu durant Toute ma vie.

A mon père qui m'a bien construit.

A mes frères

A toute ma famille.

A mon binôme MONSUEF

A tous les professeurs et enseignants

A tous mes amis sans exception.

SABTI ABDELKRIM

Dédicace:

A mon cher Père et ma chère Mère pour l'éducation et le Grand amour dont ils m'ont entouré depuis ma naissance.

A mes chers frères.

A ma chère sœur

A toute ma famille.

A mon cher Binôme ABDELKRIM

A tous mes amis sans exceptions.

Sans oublies toutes les professeures que soit du primaire, du moyen du Secondaire ou de l'enseignement supérieure.

SAYAH MONSUEF

Résumé :

Le processus de fusion, ou atomisation, est crucial pour obtenir une taille optimale des gouttelettes de carburant. En interagissant avec l'air, le carburant liquide se transforme en une fine pulvérisation de petites gouttes, augmentant ainsi la surface de contact avec l'oxydant. Cette meilleure dispersion favorise un mélange plus homogène air-carburant, essentiel pour une combustion efficace, ce qui améliore les performances du moteur et réduit la consommation de carburant.

Dans cette étude, la technique CFD a été utilisée pour simuler la dynamique des jets liquides en tenant compte des paramètres géométriques, d'ingénierie, ainsi que de l'effet d'un champ magnétique appliqué. Ce dernier agit sur le comportement du jet via les phénomènes magnétohydrodynamiques (MHD), influençant la trajectoire et la fragmentation du liquide, et permettant ainsi une atomisation plus fine. Ces résultats offrent des perspectives importantes pour les ingénieurs et chercheurs qui œuvrent à rendre les moteurs à combustion interne plus propres et performants, en phase avec les exigences actuelles de transition énergétique.

Mots clés : injection de liquide, paramètres géométriques, simulation numérique, écoulement, modélisation, dispersion, champ magnétique, MHD.

Summary:

The atomization process is crucial for achieving an optimal droplet size of the fuel. By interacting with air, the liquid fuel transforms into a fine spray of small droplets, thereby increasing the contact surface with the oxidizer. This enhanced dispersion promotes a more homogeneous air-fuel mixture, which is essential for efficient combustion, improving engine performance and reducing fuel consumption.

In this study, the CFD technique was used to simulate the dynamics of liquid jets, taking into account geometric and engineering parameters, as well as the effect of an applied magnetic field. The latter influences the jet behavior through magnetohydrodynamic (MHD) phenomena, affecting the trajectory and fragmentation of the liquid and thereby enabling finer atomization. These results provide valuable insights for engineers and researchers working to develop cleaner and more efficient internal combustion engines, in line with current energy transition goals.

Keywords: liquid injection, geometric parameters, numerical simulation, flow, modeling, dispersion, magnetic field, MHD.

ملخص:

ُعد عملية التفكك أو التفتيت (الذري) ضرورية للحصول على حجم مثالي لقطرات الوقود. فعند تفاعل الوقود السائل مع الهواء، يتحول إلى رذاذ دقيق مكوَّن من قطرات صغيرة، مما يزيد من مساحة التلامس مع العامل المؤكسِد. ويساهم هذا التشتت الأفضل في تحقيق مزيج أكثر تجانسًا بين الهواء والوقود، وهو أمر أساسي لاحتراق فعال، مما يؤدي إلى تحسين أداء المحرك وتقليل استهلاك الوقود.

في هذه الدراسة، تم استخدام تقنية المحاكاة العددية CFDباستخدام برنامج لمحاكاة ديناميكا نفث السوائل، مع الأخذ بعين الاعتبار المعايير الهندسية والهندسية الشكلية، بالإضافة إلى تأثير المجال المغناطيسي المطبَّق. حيث يؤثر هذا الأخير على سلوك النفث من خلال الظواهر المغناطيسية-الهيدروديناميكية ((MHD، مما يغيّر مسار وتفتت السائل، وبالتالي يسمح بتحقيق ذرّة أدق.

تقدم هذه النتائج آفاقًا مهمة للمهندسين والباحثين الذين يعملون على تطوير محركات الاحتراق الداخلي لتكون أكثر نظافة وكفاءة، تماشيًا مع متطلبات التحول الطاقوي الحالي.

الكلمات المفتاحية: حقن السوائل، المعايير الهندسية، المحاكاة العددية، الجريان، النمذجة، التشتت، المجال المغناطيسي، MHD.

Table des matières

Dédicaces

Remerciements

Résumé

Sommaire

Nomenclature

Sommaire

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale :	**1**
Chapitre I : Etude bibliographique	
I.1-Introduction :	**3**
I.2-Moteur diesel	**3**
I.2.1- Définition	**3**
I.2.2-Principe de fonctionnement	**4**
I.3.injection liquide	**5**
I.3.1. L'injection	**5**
I.3.2. Les types d'injection	**6**
I.3.2.2. Injection indirecte	**6**
I.3.2.1.1. Injection indirecte sur moteur essence	**6**
I.3.2.1.2. Injection indirecte sur moteur diesel	**7**

I.3.2.2. Injection directe	**8**
I.4.Comparaison entre les systèmes d'injection	**8**
I.5.Injecteur	**9**
I.6.Les types d'injecteur	**9**
I.6.1. Injecteur de type Common Rail	**9**
I.6.2. Injecteur à sac et injecteur VCO	**10**
I.6.3. Injecteur électrique électrovanne	**11**
I.7.Les combustibles	**11**
I.7.1. Combustibles liquides et gazeux	**11**
I.8.La chambre de combustion	**12**
I.8.1. Le rôle de la chambre de combustion	**12**
Conclusion	13
Chapitre II: l'état de l'art	
II.1 Introduction	15
II.2 État de l'art	**15**
Conclusion	17
Chapitre III : Modélisation mathématique	
III.1 Introduction	**19**
III.2. Modélisation de l'écoulement des fluides	**19**
III. 2.1 Equation de Navier stockes	19
III. 2.2 Equation de continuité	20
III. 2.3 Equation de quantité de mouvement	20
III.3. Equation de conservation d'énergie	**21**
III.4. Bilan d'énergie	**21**

III.5. Les différents modes de transfert de chaleur	**22**
III.5.1. Transfert de chaleur par conduction	**22**
III.5.2. Transfert de chaleur par convection	**22**
III.5.3. Transfert de chaleur par rayonnement	**23**
III.6. Le nombre de Reynolds	24
III.7. Le nombre de Prandtl	**24**
Conclusion	**25**
Chapitre IV : Méthodes numérique	
IV.1 Introduction	**27**
IV.2. Les trois grandes familles de méthodes	27
IV.2.1. Méthode des différences finies	**27**
IV.2.2. Méthode des éléments finis	**28**
IV.2.3. Méthode des volumes finis	**29**
IV.3. Méthodes numériques de discrétisation	**30**
IV.4. Présentation de la méthode	**31**
IV.5. Méthode des volumes finis pour la résolution numérique	**31**
IV.5.1. Présentation de la méthode des volumes finis	**31**
IV.5.2. Maillage dans la méthode des volumes finis	**32**
IV.6. Mise en œuvre de la méthode des éléments finis	**32**
IV.6.1. Formulation variation elle forte	**32**
IV.6.2. Formulation variation elle faible	**32**
IV.7. Forme générale des équations du système	**33**
IV.8. Discrétisation	**34**

IV.8.1. Discrétisation de l'équation de chaleur par élément fini	**34**
IV.8.2. Forme discrétisée : éléments finis	**35**
IV.9. Présentation et description du logiciel ANSYS	**36**
IV.9.1. Maillage	**37**
IV.10. La méthode VOF (Volume of Fluide)	**38**
IV.10.1. Principe de la méthode de VOF	**38**
IV.11. Effet du champ magnétique	**39**
IV.11.1. Définition plus fondamentale du champ magnétique	**39**
IV.11.2. Relation entre courant électrique et champ magnétique	**40**
IV.11.3. Formulation proposée	**40**
IV.11.4. Explications complémentaires	**41**
IV.11.5. Exemple d'application concrète	**41**
IV.11.5.1. Précautions sémantiques	**41**
IV.11.6. Combustibles hydromagnétiques	**42**
Conclusion	**43**
CHAPITRE V : Résultats et discussions	
V.1 Introduction :	**45**
V.2 Identification :	**45**
V.3 Etude de l`influence de la pression d`entrainement	**48**
V.4.Representation des profils des vitesses	**51**
V.5.Analyse des résultats des simulations numériques pour le cas référence	**52**
V.5.1. P=1bar	**52**

V.5.2. P=2bar	**58**
V.5.3. P=6bar	**61**
V.6.Representation des profils des vitesses différentes périodes	**63**
Conclusion partielle 1	**65**
Partie II	**62**
V.7.Etude l`influence la pression d`entrainement	**67**
V.8.Representation des profils des vitesses	**67**
V.9.Presentation des différentes périodes du temps de chaque géométrie	**70**
V.9.1. Géométrie 1	**70**
V.9.2. Géométrie 2	**72**
V.10.Representation de profils de vitesse dans différentes périodes de temps de chaque géométrie	**74**
V.11 Etude de l'effet de champ	**68**
V.12. Présentation des différents périodes du temps de chaque cas	**69**
V.12.1. Cas1 :100	**69**
V.12.2. Cas2 :1000	**70**
V.12.3. Cas3 :10000	**71**
V.13. Comparaison entre méthode VOF et méthode MHD	**72**
Conclusion partielle 2	**76**
Conclusion générale	
Conclusion générale	70
Référence et bibliographique	

Liste des figures	
Chapitre I :	
Figure I. 1 : Moteur diesel	***3***
Figure I.1.Évolution de l'injection Diesel au cours des trente dernières	4
Figure I.2: Cycle moteur diesel quatre temps	5
Figure I.3.L`injection	6
FigureI.4. Injection indirecte sur moteur essence	7
FigureI.5. Injection indirecte sur moteur diesel	7
Figure I.6. Injection directe	8
Figure I.7. Injecteur	9
Figure I.8. Injecteur de type Common Rail	10
Figure I.9. Injecteur à sac (à gauche) et injecteur VCO (à droite)	10
Figure I.10. Injecteur électrique a électrovanne	11
Chapitre III :	
Figure III.1 bilan énergétique	21
Figure III.2 Schéma du transfert de chaleur par conduction	22
Figure III.3 Schéma du transfert de chaleur par convection	23
Figure III. 4 : Schéma de transfert de chaleur par rayonnement	24
Chapitre IV :	
Figure IV.1. Méthode de discrétisations	**30**
FigureIV.2. Démarche éléments finis.	31
Figure IV.3. Volume contrôle	**32**
Figure IV.4. Bilan thermique	35
Figure IV.11. Domaine plan discrétisé en élément relies eux par nœuds.	35
Figure IV. 12. Représentation spatiale de L'interface d'ANSYS.	37
Figure IV. 13. Maillages structuré et non structuré.	37
Figure IV. 14. Méthode VOF	38
Chapitre V :	
Figure V.1. Présentations spatiales de la configuration géométrique.	42
Figure V.2. Présentation de maillage de domaine de calcul et d`injection	42

avec zoom.	
Figure V.3. Présentation spatiale de la vitesse axiale	43
Figure V.4. Présentation graphique de variation du Flux volumique liquide axial de L`injecteur	43
Figure V.5. Présentation spatiale de la vitesse et la pression pour diffèrent pressions d`injection	44
Figure V.6.la variation de la pression transversale pour trois différentes pressions d'injection.	45
FigureV.7. Présentation des profils des vitesses dans chaque pression et ça comparaison	46
Figure V.8. Présentation spatiale de la dynamique de diffusion du jet dans le cylindre pour une pression d'injection P= 1bar	49
Figure V.9. Présentation spatiale de la dynamique de diffusion du jet dans le cylindre pour une pression d'injection P= 2bar	51
Figure V.10. Présentation spatiale de la dynamique de diffusion du jet dans le cylindre pour une pression d'injection P= 6bar	53
Figure V.11. Présentation des profils des vitesses différentes périodes de temps de 3 cas	55
Figure V.12. Géométrie 1	58
FigureV.13. Géométrie 2	58
Figure V.14. Présentation spatial de la vitesse et la fraction volumique	59
Figure V.15. Présentation les profils de vitesse de deux géométries et ça comparaison	60
Figure V.16. Présentation des différents périodes du temps de géométrie 1	62
Figure V.17. Présentation des différents périodes du temps de géométrie 2	64
Figure V.18. Présentation des profils de vitesse dans différentes périodes de temps de chaque géométrie	66
Figure V.19. Représentation spatiale de la vitesse, la pression et la fraction volumique de l'effet de champ magnétique en 3 cas	68
Figure V.20. Présentation des différents périodes du temps pour la cas 1	70
Figure V.21. Présentation des différents périodes du temps pour la cas 2	72
Figure V.22. Présentation des différents périodes du temps pour la cas 3	74
Figure V.23. Représentation spatiale de comparaison de la vitesse et la fraction volumique du l'effet de champ magnétique et la méthode VOF	76

pour les 3 cas	

Liste des tableaux

Chapitre I :	
Tableau I.1. Les caractéristiques moyennes dans les Produits de distillation.	12
Chapitre IV :	
Tableau IV. 1. Les avantages et Inconvénients de méthode des différences finies	28
Tableau IV.2. Les avantages et Inconvénients de méthode des éléments finis	29
Tableau IV.2. Les avantages et Inconvénients de méthode des volumes finis	29
Tableau IV.3. Expression des coefficients d`échange et des termes sources pour les différentes variables.	34
Chapitre V :	
Tableau V.1 propriétés thermique et dynamique utilisé pour le calcul	41
Tableau V.2 conditions d'injection utilisé pour le calcul numérique.	42

Nomenclature

Lettres latines

Notation	Signification	Unité
Cp	Capacité calorifique massique à pression constante	$[m^2.s^{-2}.K^{-1}]$
α	Fraction de volume.	
P	La pression.	[Pa]
P_r	Nombre de Prandtl	
R_e	Nombre de Reynolds	
T	Température	[°K]
W_e	Nombre de Weber	
V	Vitesse	[m/s]
T	Temps	[s]
D	Diamètre	$[\mu m]$
S	La surface	$[m^2]$
V	Volume	$[m^3]$

Lettres grecques

δ	Fonction Dirac ou symbole de Kronecker
ϵ	Dissipation turbulente

θ	Angle	
k	Courbure	
μ	Viscosité dynamique	[Pa.s]
ρ	Densité volumique	[Kg/m^3]
σ	Tension de surface	
Σ	Densité volumique d'interface (liquide/gaz)	
φ	Richesse	
ψ	Fonction indicatrice dense/dilué	
Ω	Densité massique d'interface (liquide/gaz)	
$\Gamma_{\emptyset}$	Coefficient de diffusion	
$C_{\emptyset}$	Coefficient d'advection transitoire	
λ	Conductivité thermique	[W.m^{-1}.K^{-1}]
S_{ϕ}	Termes source	

Introduction générale

Introduction générale :

Les fabricants de moteurs cherchent constamment à innover pour améliorer le processus d'injection, ou pulvérisation, qui consiste à injecter directement le carburant dans la chambre de combustion. Cette injection crée un effet aérodynamique dans la chambre, permettant un mélange optimal du carburant avec l'air comprimé, ce qui est essentiel pour une combustion efficace. Les systèmes modernes utilisent des commandes électroniques pour contrôler précisément la quantité et le timing de l'injection, optimisant ainsi les performances du moteur, la consommation de carburant et les émissions polluantes.

L'efficacité de la combustion dépend fortement de l'homogénéité du mélange air-carburant, obtenu grâce à des systèmes d'injection capables de pulvériser le carburant sous haute pression. Ce système, souvent qualifié de « cœur du moteur », ajuste l'alimentation en carburant selon les besoins du moteur, garantissant ainsi une réponse optimale aux différentes conditions de fonctionnement.

L'objectif principal de l'étude est d'analyser l'influence des paramètres de forme et de géométrie de l'injecteur sur la dispersion du liquide injecté à haute pression. Pour cela, deux techniques numériques sont utilisées : EF/VOF pour les fluides miscibles et une méthode discrétisée basée sur les éléments finis pour les fluides non miscibles. Ces approches permettent de mieux comprendre et optimiser la conception des injecteurs pour améliorer la pulvérisation et la combustion.

Enfin, le mémoire est structuré en plusieurs chapitres :

Le premier présente la constitution du moteur, les indicateurs de performance, la phénoménologie de la combustion et les émissions polluantes.

Le deuxième détaille les équations des écoulements multiphasiques turbulents et réactifs ainsi que les méthodes numériques CFD.

Le troisième est consacré à la résolution numérique et aux méthodes de calcul.

Le quatrième met en lumière l'utilisation du code ANSYS (APDL), avec une analyse détaillée des démarches numériques, la comparaison, l'interprétation et l'analyse des résultats.

Chapitre I :
Etude bibliographique

Introduction :

L'injection est une méthode mise en œuvre dans le ravitaillement des moteurs à combustion interne, dont l'objectif est de délivrer du carburant directement ou légèrement en avance vers la chambre de combustion. Il est préférable d'opter pour des injecteurs plutôt que des carburateurs afin d'accroître l'efficacité du moteur. Initialement, l'injection était réalisée de manière mécanique, avant d'être perfectionnée grâce à l'intégration de la technologie électronique et l'utilisation d'un ordinateur électronique pour réguler avec précision la quantité de carburant injectée et le temps d'injection.

Les moteurs doivent être dotés de systèmes d'injection capables de fournir un mélange uniforme d'air et de carburant à des pressions élevées. Cela favorise une ignition rapide du carburant à un point précis dans la chambre, garantissant une distribution homogène du carburant et générant une combustion efficace pour optimiser les performances du moteur**[1].**

I.2-Moteur diesel :

I.2.1- Définition :

Le moteur Diesel est reconnu pour son excellent rendement énergétique et sa grande polyvalence d'utilisation. Ses performances — qu'il s'agisse de la puissance, de l'efficacité ou des émissions polluantes — dépendent en grande partie de la qualité de la combustion. Celle-ci est fortement influencée par le type de système de combustion adopté, la configuration de la chambre de combustion et la méthode d'injection du carburant. On distingue principalement deux types de moteurs Diesel : le moteur à injection indirecte, aujourd'hui peu utilisé dans le secteur automobile, et le moteur à injection directe **[2].**



Figure I.15: Moteur diesel

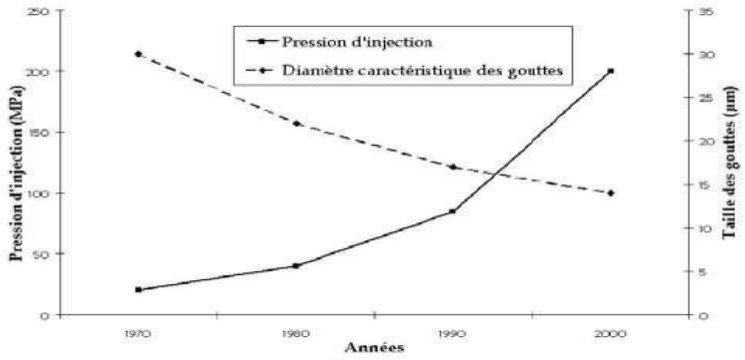


Figure I.16.Évolution de l'injection Diesel au cours des trente dernières années [3].

I.2.2-Principe de fonctionnement :

Le moteur Diesel se compose de pistons glissant dans des cylindres scellés par une tête de cylindre qui relie le cylindre aux collecteurs d'entrée et de sortie, dotée de soupapes contrôlées par un arbre à cames. Un cycle d'un moteur Diesel à quatre temps est effectué sur deux rotations du moteur. La figure 1.2 illustre le mouvement du piston dans le cylindre au cours du cycle moteur, alors que la figure 1.3 représente l'évolution simultanée du volume de la chambre de combustion et de sa pression interne.

Le cycle du moteur se divise en quatre phases, en débutant avec le piston en position de point mort haut et les deux soupapes fermées :

Admission (1) : la soupape d'admission s'ouvre, le piston descend, augmentant le volume de la chambre de combustion, qui se remplit alors d'air.

Compression (2) : arrivé au point mort bas, la soupape d'admission se ferme. Le piston remonte, réduisant le volume de la chambre et comprimant ainsi l'air, ce qui en élève la pression.

Combustion et détente (3) : juste avant que le piston atteigne à nouveau le point mort haut, le carburant est injecté dans l'air comprimé. La combustion qui s'ensuit génère des gaz chauds qui repoussent le piston vers le bas.

Échappement (4) : la soupape d'échappement s'ouvre, permettant l'évacuation des gaz brûlés, chassés par la remontée du piston.

L'ouverture et la fermeture des soupapes sont commandées mécaniquement, en synchronisation directe avec la position du vilebrequin.

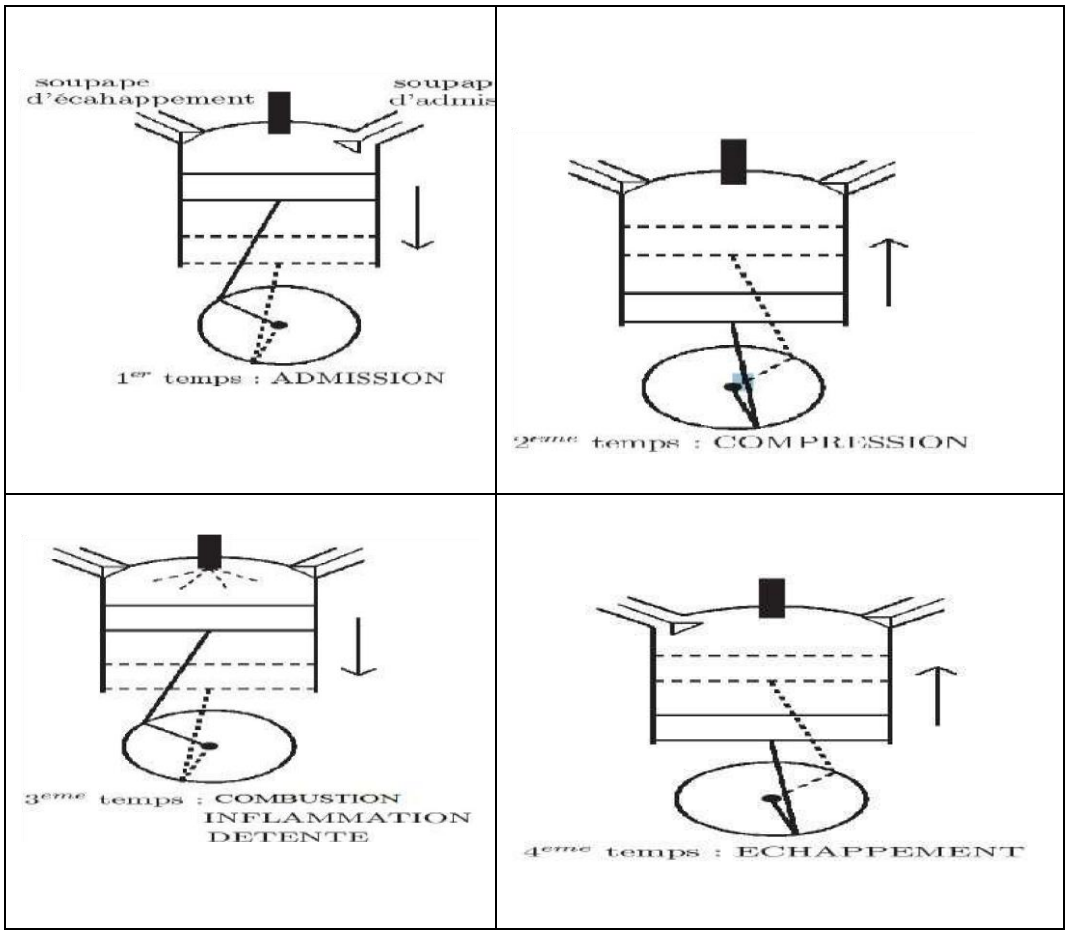


Figure I.17: Cycle moteur diesel quatre temps [2].

I.3.injection liquide :

I.3.1. L'injection :

L'injection, dans le contexte des moteurs à combustion interne, désigne l'introduction du carburant dans les cylindres du moteur à l'aide d'un système spécifique appelé système d'injection de carburant.

Ce processus permet de mélanger le carburant avec de l'air à l'intérieur des cylindres. Ce mélange est ensuite enflammé afin de produire de l'énergie. Pour assurer un fonctionnement optimal, efficace et fiable du moteur, l'injection de carburant doit être réalisée avec une grande précision et un contrôle rigoureux.

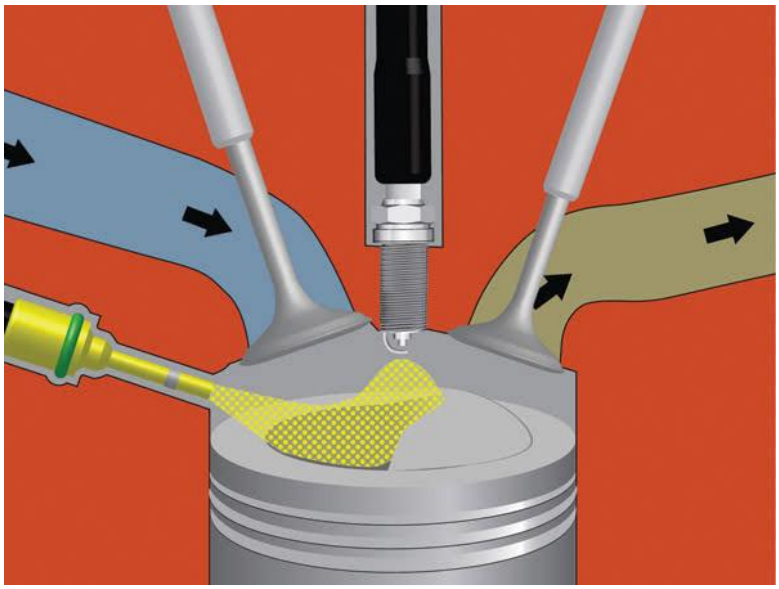


Figure I.18.L`injection

I.3.2. Les types d'injection :

Dans les moteurs à combustion interne Il existe deux grands types d'injection. On distingue :

I.3.2.2. Injection indirecte :

L'injection indirecte est une méthode d'injection de carburant utilisée dans certains moteurs à combustion interne. Dans ce système, le carburant est d'abord injecté dans une chambre de précombustion, située en dehors de la chambre principale. Il y est mélangé à de l'air et partiellement brûlé avant d'être transféré dans la chambre de combustion principale, où la combustion se termine.

Bien que ce type d'injection soit devenu moins courant en raison de l'adoption des moteurs à injection directe, plus performants et économes, il reste utilisé dans certains moteurs diesel et à essence. Il est essentiel de distinguer les moteurs essence et diesel, car leurs principes de fonctionnement diffèrent sensiblement.

I.3.2.1.1. Injection indirecte sur moteur essence :

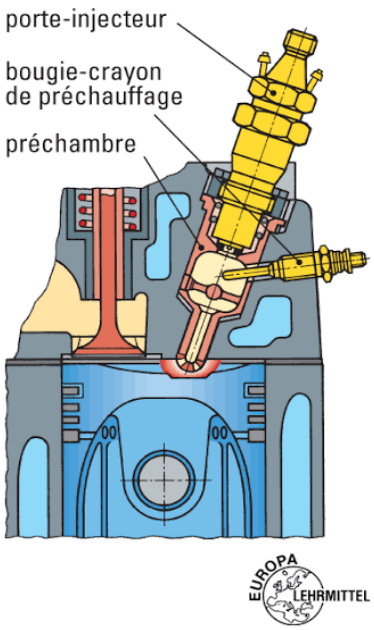
Dans les moteurs à essence à injection indirecte, le carburant est injecté dans le collecteur d'admission, avant la soupape d'admission. Le carburant est vaporisé avant d'entrer dans le cylindre. Cette méthode, qui permet un mélange optimal air-carburant, est couramment utilisée dans les moteurs à essence pour assurer une bonne atomisation du carburant.



FigureI.19. Injection indirecte sur moteur essence

I.3.2.1.2. Injection indirecte sur moteur diesel :

L'injection indirecte dans les moteurs diesel utilise une chambre de combustion séparée, située à côté du cylindre principal. Le carburant est injecté dans cette chambre et s'enflamme grâce à la chaleur de l'air comprimé. Cette méthode permet une meilleure combustion malgré une faible pression d'injection. L'utilisation de bougies chauffantes est plus avantageuse dans ce type d'injection que dans l'injection directe. L'injection indirecte dans les moteurs diesel utilise une chambre de combustion séparée, située à côté du cylindre principal. Le carburant est injecté dans cette chambre et s'enflamme grâce à la chaleur de l'air comprimé. Cette méthode permet une meilleure combustion malgré une faible pression d'injection. L'utilisation de bougies chauffantes est plus avantageuse dans ce type d'injection que dans l'injection directe.



FigureI.20. Injection indirecte sur moteur diesel

I.3.2.2. Injection directe :

L'injection directe injecte le carburant directement dans le cylindre, contrairement à l'injection indirecte qui le disperse dans l'air ou le dépose sur les parois du cylindre. Cette différence impacte directement les émissions et la consommation de carburant. L'injection directe, bien qu'elle présente des avantages en termes d'émissions d'azote et de réduction du bruit de combustion, peut augmenter la consommation de carburant et les émissions de carbone. L'injection directe est utilisée dans les moteurs à essence pour un mélange air-carburant plus précis.

Cela améliore l'efficacité de la combustion et réduit les émissions grâce à un mélange air-carburant plus précis. Dans les moteurs diesel, l'injection directe à haute pression provoque l'inflammation spontanée du carburant, conduisant à une combustion plus complète et une augmentation de la puissance. L'injection directe dans les moteurs à essence et diesel permet une meilleure atomisation du carburant et un contrôle précis du temps d'injection, optimisant les performances et la consommation de carburant. Globalement, l'injection directe offre des avantages significatifs en termes de performances et d'économie de carburant par rapport à l'injection indirecte **[4]**.

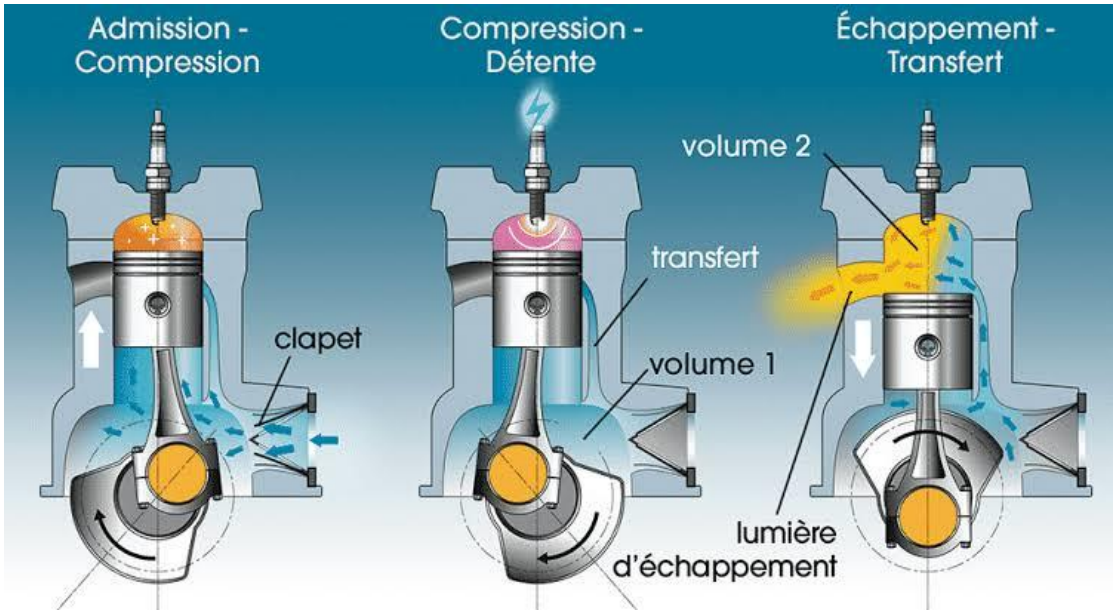


Figure I.21. Injection directe

I.4.Comparaison entre les systèmes d'injection :

Le système d'injection joue un rôle essentiel dans le fonctionnement du moteur. Il régule la quantité de carburant injectée selon les besoins et assure une pression suffisante pour une atomisation optimale, influençant directement la consommation et les émissions.

L'injection directe se distingue par une meilleure efficacité, liée à un rapport surface/volume plus faible dans la chambre de combustion et à un temps de combustion réduit. Toutefois, elle peut engendrer du bruit et une hausse des émissions d'oxydes d'azote, en raison d'un échange thermique moins efficace.

À l'inverse, l'injection indirecte permet de limiter les émissions de NOx, notamment grâce à la présence d'air en début de combustion, favorisant une combustion plus douce.

I.5.Injecteur :

Le procédé d'injection est un mécanisme qui permet d'alimenter le moteur à combustion interne en carburant, en l'introduisant dans la chambre de combustion sous haute pression et sous forme atomisée. Le carburant est ainsi délivré de manière précise, soit directement dans la chambre de combustion, soit indirectement via un conduit, sous forme d'un fin brouillard. Cette atomisation permet une répartition homogène du carburant, favorisant une combustion plus efficace et performante.



Figure I.22. Injecteur

I.6.Les types d'injecteur :

I.6.1. Injecteur de type Common Rail :

Le système Common Rail, également connu sous le nom d'injection directe à rampe commune, est une technologie d'injection de carburant utilisée pour les moteurs à combustion interne. Il permet une pulvérisation précise du carburant dans la chambre de combustion, ce qui améliore l'efficacité du moteur. L'injecteur Common Rail se compose de deux parties : une partie supérieure électrique qui contrôle l'aiguille de l'injecteur et une partie inférieure multi-trous, semblable aux injecteurs conventionnels utilisés dans les moteurs à injection directe.

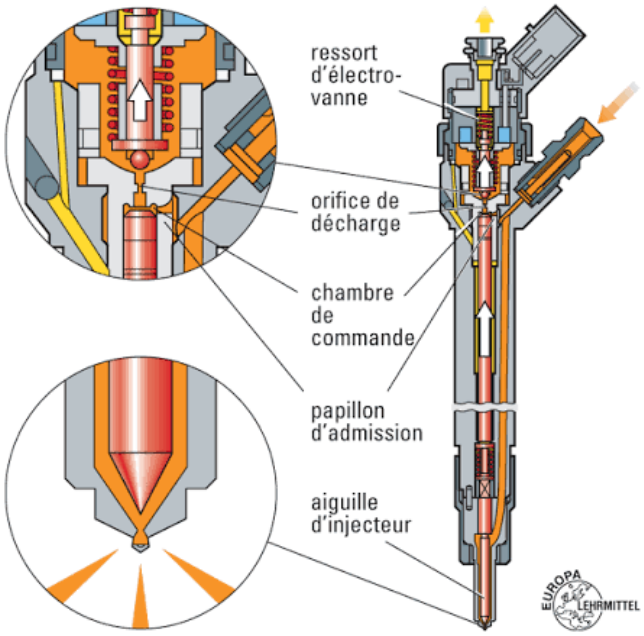


Figure I.23. Injecteur de type Common Rail

I.6.2. Injecteur à sac et injecteur VCO :

Les injecteurs à sac possèdent une cavité, appelée « sac », située à la base de l'aiguille lorsqu'elle est en position fermée. Une augmentation de la capacité de cette cavité aggrave les émissions d'hydrocarbures imbrûlés. En effet, à la fin de l'injection, lorsque l'aiguille se referme, le carburant résiduel dans cette cavité s'échappe dans la chambre de combustion. Ce carburant brûle lentement et de manière incomplète, générant ainsi des polluants.

Pour pallier ce défaut, les fabricants ont développé des injecteurs VCO (Valve Covered Orifice), qui ne comportent pas de cavité. Toutefois, à faibles et moyennes charges, l'aiguille ne s'ouvre que partiellement, ce qui engendre une répartition asymétrique du jet de carburant. Ce déséquilibre favorise la création de zones riches en carburant dans la chambre de combustion, augmentant ainsi la formation de particules de suie dans les gaz d'échappement.

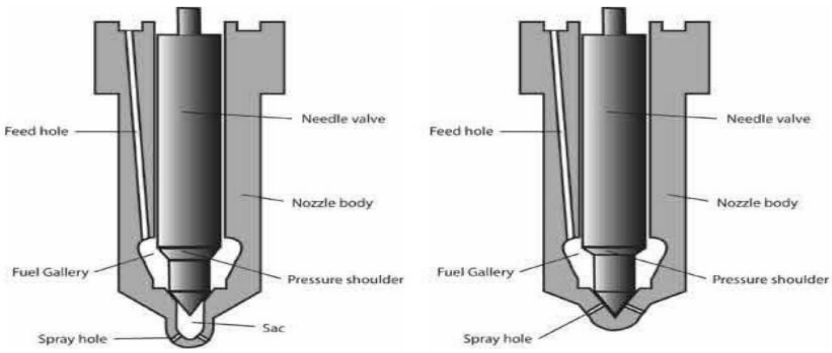


Figure I.24. Injecteur à sac (à gauche) et injecteur VCO (à droite) [5]

I.6.3. Injecteur électrique électrovanne :

L'injecteur électrique à électrovanne est un composant essentiel des systèmes d'injection de carburant modernes. Il permet de contrôler avec précision la quantité de carburant injectée dans le moteur. Ce type d'injecteur fonctionne grâce à une électrovanne, qui s'ouvre et se ferme sous l'action d'un signal électrique, autorisant ou interrompant le passage du carburant.

Son fonctionnement précis, commandé électroniquement, permet d'ajuster l'injection en fonction des besoins du moteur, optimisant ainsi les performances, la consommation de carburant et la réduction des émissions polluantes. Ce contrôle précis favorise également une combustion plus propre et plus efficace.

Les injecteurs électriques à électrovanne sont largement utilisés dans des domaines variés tels que l'automobile, l'aéronautique, ou encore dans certaines applications industrielles, où les exigences de performance, de fiabilité et d'efficacité énergétique sont particulièrement élevées.

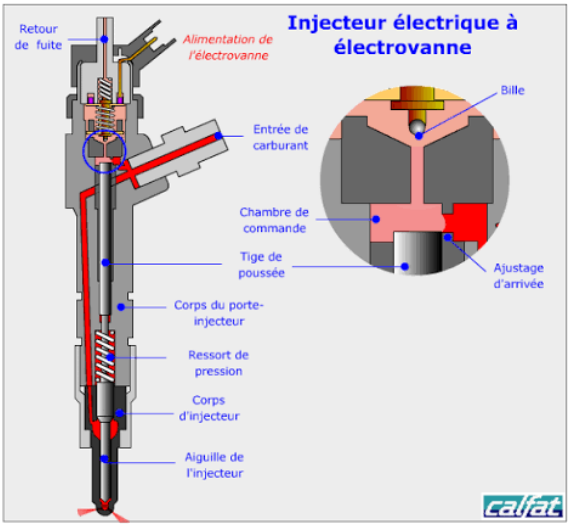


Figure I.25. Injecteur électrique a électrovanne

I.7.Les combustibles :

La composition chimique du carburant est un facteur crucial pour déterminer la composition de la fumée produite lors de sa combustion. En effet, les différents éléments présents dans le carburant, tels que le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le soufre et les métaux, contribuent à la formation de divers composés dans la fumée.

La classification des carburants selon leur nature permet de mieux comprendre leur composition chimique et de prédire les produits de combustion.

I.7.1. Combustibles liquides et gazeux :

Les combustibles gazeux, aujourd'hui principalement issus du pétrole, sont extraits en même temps que ce dernier. L'origine du pétrole reste un mystère, mais il est bien plus

ancien que le charbon et provient de la décomposition de micro-organismes dans les anciens océans. Le pétrole brut, qu'il soit liquide ou gazeux, contient une quantité importante de soufre et nécessite un traitement de désulfuration avant d'être utilisé comme combustible.

a. Produit de distillation :

La distillation fractionnée du pétrole permet de séparer les différents hydrocarbures en fonction de leur volatilité, qui est directement liée à la température d'ébullition. Ainsi, les produits les plus légers et volatils, comme le gaz de pétrole liquéfié (GPL), sont récupérés en haut de la colonne de distillation, tandis que les produits plus lourds, comme les carburants lourds, sont récupérés en bas. La composition du GPL est généralement de 65% de butane et 35% de propane.

	GPL	Essence	Kérosène	Gasoil	Fuel lourd
C%	82,5	85,5	85,7	86	87
H%	17,5	14,5	14,3	13,3	11,35
S%	0	0	<0,3	0,3	1
N%	0	0	0	0,2	0,25
O%	0	0	0	0,2	0,4
Ma	15,4	15	15	14,3	14
D	0,55	0,75	0,8	0,844	0,99
Ip	46 MJ /kg	44MJ/kg	43,5MJ/kg	42MJ/kg	42MJ/kg

Tableau I.4. Les caractéristiques moyennes dans les Produits de distillation [6].

I.8.La chambre de combustion :

La chambre de combustion est un élément crucial des moteurs à combustion interne à combustible liquide, notamment dans l'industrie aérospatiale. C'est là que le carburant, comme l'essence ou le diesel, est mélangé à l'air et brûlé pour produire l'énergie de propulsion. Le processus commence par l'injection du carburant dans la chambre, suivi de la combustion complète. La quantité de produits de combustion et l'énergie de poussée résultante dépendent de la manière dont le carburant est injecté et brûlé dans la chambre [7].

I.8.1. Le rôle de la chambre de combustion :

- La combustion du carburant dans l'air augmente l'énergie totale de l'air en convertissant l'énergie chimique en énergie thermique.

- Cette énergie thermique est utilisée pour entraîner le moteur.

- La chambre de combustion permet de contrôler la combustion et de garantir un flux de gaz chaud et uniforme vers la turbine.

Conclusion :

L'étude des injecteurs de carburant dans les moteurs de voitures est essentielle pour améliorer les performances et la consommation de carburant. Les technologies d'injection avancées peuvent optimiser le processus d'injection, conduisant à une efficacité accrue du moteur et à une réduction des émissions nocives. En d'autres termes, des injecteurs de carburant plus performants peuvent permettre une meilleure expérience de conduite et un impact environnemental réduit.

Chapitre II : l'état de l'art

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue l'état de l'art, composé de diverses études réalisées par des chercheurs scientifiques sur le sujet que nous étudions, en nous appuyant notamment sur les travaux du chercheur M.F. Zheng.

II.2 État de l'art :

F. Piscaglia et al ont réalisé une comparaison entre des simulations CFD à haute résolution et des visualisations expérimentales. Pour valider la précision du cadre multiphasique Rabbit basé sur l'interaction LES-VOF, ils ont utilisé une visualisation par ombres en temps réel sur une buse d'imitation transparente, appliquée à des modèles similaires en verre du système d'injection haute pression. Les résultats obtenus, tant par simulation que par expérimentation via le solveur, ont mis en évidence la formation d'une structure de vapeur instable, de taille comparable à celle d'un cratère, désignée sous le nom de cavité en chaîne, située au cœur des zones de resurfaçage **[8].**

H. Ghassemi et al. Ont exploré une nouvelle technique visant à réduire davantage la taille des gouttelettes ainsi que l'étendue de la dislocation, en utilisant un injecteur de type Pps innovant, combinant différentes méthodes d'injection par ultrasons. Le dispositif de pulvérisation a été spécialement conçu et fabriqué pour Hafo Mazzotti. La distribution de la taille des gouttelettes a été étudiée à la fois de manière expérimentale et numérique. L'impact de la pression d'injection du fluide sur l'angle de pulvérisation et l'épaisseur du jet a également été analysé **[9].**

Ahmed et al. Ils ont reproduit la cavité numérique du processus d'injection de liquide dans le gaz sans condensation. Dans cette recherche, une méthode d'examen de la lumière a été proposée, ainsi que l'élaboration d'un cadre numérique harmonieux basé sur des techniques de capture d'interface. Deux types de cavité, la cavité et la cavité lumineuse très fine, sont prévus pour des simulations numériques du jet du fluide de cavité. Par la suite, ils ont confronté les résultats chiffrés des mesures expérimentales issues de publications sur le champ de vitesse à l'intérieur de l'injecteur, et ont effectué une comparaison qualitative entre l'acquisition de portes liquides et de vapeur lors des tests et simulations **[10].**

Feichi Zhang et al. Ont utilisé des simulations numériques à haute résolution pour étudier l'effet de la haute pression sur la désintégration initiale de jets liquides visqueux dans un réacteur. Leur travail a montré que la haute pression provoque une instabilité du plan liquide, entraînant la séparation du fluide en fragments sous différentes pressions. Cette séparation est causée par des structures symétriques qui perturbent la surface du jet et pénètrent dans son noyau. Pour améliorer la dispersion des gaz d'échappement, l'utilisation d'une grille fine est recommandée **[11].**

Moneib, H. et al. Cet article présente une recherche expérimentale basée sur la technologie de mesure laser PIV, effectuée pour analyser la pulvérisation de divers combustibles (diesel léger, huile alimentaire et leur combinaison) en recourant à différents ratios air-liquide et taux de flux Co-air. Les observations ont révélé que le taux d'évaporation maximal est supérieur pour le diesel léger et que l'huile de cuisson usagée n'interagit pas avec l'air environnant en raison de sa viscosité, de sa densité et de la taille plus importante des gouttelettes **[12].**

Pandal, A., García-Oliver, J. M., et al. Étude de la mise en œuvre et de la validation d'un modèle. Utilisation du modèle Σ-Y ADF couplé pour la simulation CFD de l'injection diesel. Le modèle de diffusion approché de Flamelet (ADF) utilise la description de pulvérisation proposée par le modèle de désintégration eulérienne Σ-Y. Le modèle est capable de prévoir des paramètres caractéristiques de la réaction de pulvérisation, tels que le retard d'allumage et la longueur du collage, ainsi que la structure interne en termes de répartition spatiale du formaldéhyde et de l'OH. Les résultats de la modélisation ont été mis en parallèle avec les mesures obtenues par vélocimétrie d'images de particules (PIV). On a utilisé le modèle pour saisir la diminution de l'épuisement provoqué par la combustion **[13].**

Zhang, Feichi, et al. Des simulations et des mesures ont été réalisées afin d'examiner l'impact de la pression sur l'atomisation initiale d'un jet de liquide visqueux à l'aide d'une buse de mélange externe assistée par air. On observe une instabilité de position pulsatile pour la rupture initiale, suivie d'une décomposition de type fibreux des ligaments fluides sous-jacents. Sous forte pression, les particules fines de liquide se fragmentent et le liquide principal se rétracte. Les simulations ont démontré une croissance marquée de l'énergie cinétique du fluide sous haute pression, signalant un transfert contraint de Momentum de la phase gazeuse vers la phase liquide **[14].**

Wachter S et al. Une recherche qui analyse l'impact de la pression sur la qualité de pulvérisation d'un nébuliseur à double liquides. On a employé la technique de la buse à pression ajustée, en utilisant deux fluides newtoniens aux viscosités distinctes, car les résultats ont révélé que l'emploi de buses à pression ajustée associé à une hausse de la pression du système provoque une réduction suivie d'une expansion du volume des gouttelettes, avec une pression dynamique maximale de la phase gazeuse. Les images obtenues par la caméra à haute vitesse ont dévoilé une modification dans le modèle de rupture sous haute pression du système **[15].**

Vankeswaram, S. K. et al. L'étude a porté sur l'importance de comprendre les caractéristiques de dégradation des carburants d'aviation durables, comme les biocarburants d'aviation, pour combattre les émissions de dioxyde de carbone liées à l'aviation. Les chercheurs ont étudié la dimension des gouttelettes de biocarburants pour l'aviation, dérivés de la cameline et du jatropha, en utilisant un évaporateur hybride à jet. Ils ont effectué des tests pour expliquer l'atomisation de l'hybride, suivie d'un approvisionnement en aérosol, dans six scénarios. Les conclusions majeures de l'étude ont révélé que le courant d'air ambiant du vaporisateur d'air hybride altère significativement la forme et la longueur du film liquide ainsi que l'inclinaison du cône de pulvérisation **[16].**

Jin et al. Ont simulé le processus de désintégration à l'aide d'un modèle CFD combinant la méthode VOF, le modèle de phase discrète (DPM) et l'adaptation de maillage (AMR). Une approche de cartographie a permis de relier le flux interne dans la buse à petit volume au jet multiphasique externe à grande échelle. L'étude met en évidence l'influence significative de l'écoulement interne sur les caractéristiques d'atomisation. Toutefois, les résultats numériques ne concordent pas avec les données expérimentales. Il apparaît que l'angle d'impact et la distribution de vitesse jouent un rôle clé dans l'atomisation **[17].**

Wachter et al. Ont étudié l'influence de la pression du système, de la vitesse du gaz et de la largeur de l'intervalle annulaire sur la taille des gouttelettes formées. Pour cela, ils ont utilisé trois évaporateurs à double liquide avec mélange externe, en maintenant un débit massique de liquide constant et en variant les vitesses de gaz. Des caméras à haute vitesse ont permis de mesurer la taille des gouttelettes, et un modèle expérimental a été élaboré pour évaluer la pression du système. Les résultats indiquent que l'augmentation de la vitesse du gaz et de la pression diminue la taille des gouttelettes, tandis qu'un entrefer plus large entraîne également une réduction de cette taille **[18].**

Sun, H. et al. L'emploi de la buse de pulvérisation à broche se retrouve dans divers secteurs des industries chimiques et manufacturières. Afin d'examiner les caractéristiques d'atomisation de la buse à broche, un mécanisme d'atomisation haute pression a été conçu et une technique de visualisation optique a été suggérée pour observer l'impact de la réduction de pression et du diamètre de la buse de pulvérisation à broche. Les résultats ont démontré que la dimension et la vitesse des gouttelettes obéissent à une distribution log-normale et sont influencées de manière négative par la diminution de pression et de façon positive par le diamètre de l'orifice **[19].**

Zhang, Y et al. Cet article examine une buse bimodale pour atomisation à basse pression, connue pour son flux circulaire d'air dans la chambre de mélange. L'impact du diamètre de l'orifice d'injection d'air et de la pression d'injection d'air a été analysé. Les analyses ont démontré que la buse génère de petites gouttelettes et que la dimension moyenne de ces gouttelettes a tendance à diminuer puis à s'accroître **[20].**

Ménard et al. On étudie par simulation numérique la dynamique des aérosols, en s'appuyant sur des données expérimentales et théoriques. Leur approche combine la méthode level-set pour le suivi des interfaces avec la méthode VOF afin d'assurer la conservation de la masse. Pour une meilleure précision, ils intègrent également la méthode du fluide fantôme, permettant de capturer les discontinuités de pression, de densité et de viscosité. Ce couplage est validé à travers des cas tests en 2D et 3D, puis appliqué à l'instabilité de Rayleigh et à la séparation initiale d'un jet de liquide turbulent, dont les premiers résultats en 3D sont présentés **[21].**

Pandal, Adrian, et al. Cela concerne la modélisation de la pulvérisation du diesel, un problème complexe impliquant des interactions entre diverses zones d'écoulement. Diverses méthodes de modélisation ont été employées pour simuler certaines zones de la pulvérisation. On utilise le modèle d'interface à fluide unique S-Y pour simuler le réseau de combustion des moteurs Sprays A et D. On a réussi à modéliser le Spray D en mettant l'accent sur la zone proche de la buse, où les mesures ont été confirmées. Par la suite, les projections de modélisation sont examinées par rapport aux résultats antérieurs pour le Spray A, en prenant en considération l'impact de la forme de la buse **[22].**

Conclusion :

Chacune des expériences mentionnées ci-dessus comme référence de base pour mener à bien une étude portant sur le même sujet

Chapitre III :

Modélisation mathématique

III.1 Introduction :

Ce chapitre aborde la modélisation mathématique du transfert thermique et de l'écoulement des fluides incompressibles. Au fil des décennies, des chercheurs tels que Brandt, Navier, Stokes et Reynolds ont joué un rôle majeur dans l'élaboration des lois fondamentales de la mécanique des fluides. Aujourd'hui, les ingénieurs exploitent ces connaissances pour améliorer divers aspects de la vie quotidienne. La mécanique des fluides repose principalement sur trois équations essentielles : l'équation de continuité, l'équation de la quantité de mouvement et l'équation d'énergie. Ce chapitre présente ces équations ainsi que les lois fondamentales qui régissent la dynamique des fluides.

III.2. Modélisation de l'écoulement des fluides :

La résolution des problèmes de dynamique des Fluides Numérique (CFD) s'appuie sur les lois fondamentales de la mécanique des fluides. Parmi celles-ci :

III. 2.1 Equation de Navier stockes :

On étudie l'écoulement de deux liquides incompressibles, newtoniens et non miscibles. Pour analyser la dynamique de cet écoulement, on utilise les équations de Navier-Stokes. Ces équations, qui forment un système d'équations aux dérivées partielles, décrivent le mouvement des fluides visqueux en s'appuyant sur les lois de Newton et en supposant que les deux liquides ne se mélangent pas.

L'équation de Navier-Stokes s'écrit alors :

$$\frac{\partial \rho_{kV_k}}{\partial t} + (\rho_k V_k V_k) = \rho_k g - \nabla \rho_k \nabla (2\mu_K s_k) \qquad \textbf{(III.1)}$$

III. 2.2 Equation de continuité :

Cette équation exprime le principe de conservation de la masse pour un élément de fluide. Elle traduit l'égalité entre la variation de la masse d'un élément et la différence entre la quantité de fluide qui entre et celle qui sort pendant un même intervalle de temps.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \qquad \textbf{(III.2)}$$

Ou dans une notation plus compacte

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{div}\,(\rho \mathbf{u}) = 0 \qquad \textbf{(III.3)}$$

Ainsi, l'incompressibilité d'un fluide $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ se traduit par la relation suivante :

$$\mathbf{div}\,u = 0 \qquad \textbf{(III.4)}$$

III. 2.3 Equation de quantité de mouvement :

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir un lien entre les caractéristiques du fluide en mouvement et les forces responsables de ce mouvement. Ce principe stipule que le taux de variation de la quantité de mouvement à l'intérieur d'un volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures appliquées à ce volume. Les équations de la quantité de mouvement, également appelées équations de Navier-Stokes, décrivent ce phénomène pour des fluides newtoniens incompressibles en régime laminaire. Elles s'expriment ainsi :

Suivant OX :

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{2x}}{\partial z}\right)+[\rho-\rho_0]g_x \quad \text{(III.5)}$$

Suivant OY:

$$\rho\left(\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{t}}+\mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{x}}+\mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{y}}+\mathrm{w}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{z}}\right)=-\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{y}}+\left(\frac{\partial \tau_{x\gamma}}{\partial \mathrm{x}}+\frac{\partial \tau_{\mathrm{yy}}}{\partial \mathrm{y}}+\frac{\partial \tau_{\mathrm{zy}}}{\partial \mathrm{z}}\right)+[\rho-\rho_0]g_y \quad \text{(III.6)}$$

Suivant OZ :

$$\rho\left(\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{t}}+\mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{x}}+\mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{y}}+\mathrm{w}\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{z}}\right)=-\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{z}}+\left(\frac{\partial \tau_{\mathrm{xz}}}{\partial \mathrm{x}}+\frac{\partial \tau_{\mathrm{yz}}}{\partial \mathrm{y}}+\frac{\partial \tau_{\mathrm{zz}}}{\partial \mathrm{z}}\right)+[\rho-\rho_0]g_z \quad \text{(III.7)}$$

Où les composants du tenseur des contraintes visqueuses sont donnés par :

$$\tau_{yx}=\tau_{xy}=\mu\left[\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right];\qquad \tau_{yz}=\tau_{zy}=\mu\left[\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right];\qquad \tau_{xz}=\tau_{zx}=\mu\left[\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right];$$

$$\tau_{xx}=\mu\left[2\frac{\partial u}{\partial x}\right];\tau_{yy}=\mu\left[2\frac{\partial v}{\partial y}\right];\tau_{zz}=\mu\left[2\frac{\partial w}{\partial z}\right].$$

III.3. Equation de conservation d'énergie :

L'équation de conservation de l'énergie découle du premier principe de la thermodynamique. Ce principe relie les différentes formes d'énergie à travers l'expression suivante :

$$\rho C_p\frac{DT}{Dt}+\rho C_p U.\nabla T=\mathrm{div}(\lambda grad)+\emptyset \quad \text{(III.8)}$$

Ou :

$$\emptyset=\tau_{xx}\frac{\partial u}{\partial x}+\tau_{yx}\frac{\partial u}{\partial y}+\tau_{zx}\frac{\partial u}{\partial z}+\tau_{yy}\frac{\partial v}{\partial y}+\tau_{zy}\frac{\partial v}{\partial z}+\tau_{xz}\frac{\partial w}{\partial x}+\tau_{yz}\frac{\partial w}{\partial y}+\tau_{zz}\frac{\partial w}{\partial z} \quad \text{(II.9)}$$

Avec :

$\boldsymbol{\rho c_P \frac{DT}{Dt}}$**:** La variation totale d'énergie.

$\boldsymbol{\rho c_P U \cdot \nabla T}$**:** La variation d'énergie par convection.

$\mathbf{div}(\boldsymbol{\lambda grad})$ **:**La variation d'énergie par conduction.

$\boldsymbol{\emptyset}$: La dissipation irréversible due au frottement visqueux **[23].**

III.4. Bilan d'énergie :

Il est d'abord nécessaire de définir un système (S) en précisant ses frontières spatiales. Ensuite, il convient d'identifier les différents flux de chaleur qui interviennent et modifient l'état du système. Ces flux peuvent être :

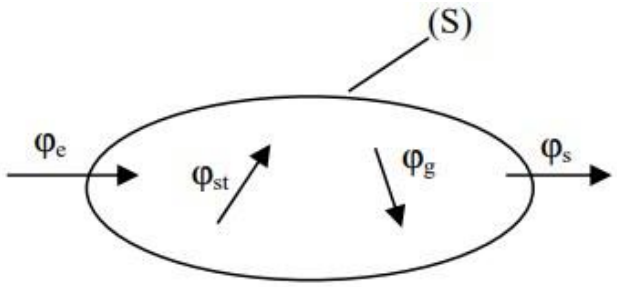


Figure III.1. Bilan énergétique

$\boldsymbol{\varphi_{st}}$ **:** Flux de chaleur stocké

$\boldsymbol{\varphi_g}$ **:** Flux de chaleur généré dans le système (S)

$\boldsymbol{\varphi_e}$ **:** Flux de chaleur entrant

$\boldsymbol{\varphi_s}$ **:** Flux de chaleur sortant

On applique alors le 1er principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S) : $\varphi_e + \varphi_s = \varphi_g + \varphi_{st}$(III.10)

III.5. Les différents modes de transfert de chaleur :

Lorsqu'il y a un échange de chaleur, deux systèmes possédant des températures différentes interagissent. La chaleur se déplace alors spontanément du système le plus chaud vers le système le plus froid. Ce phénomène intervient dans de nombreux domaines, comme les moteurs thermiques et électriques, ainsi que dans les centrales électriques utilisant des combustibles fossiles ou du gaz **[24].**

Le transfert d'énergie sous forme de chaleur consiste à déplacer l'énergie d'une zone chaude vers une zone froide. On distingue trois principaux modes de transfert thermique : la conduction, la convection et le rayonnement.

III.5.1. Transfert de chaleur par conduction :

La conduction désigne le transfert de chaleur à l'intérieur d'un matériau opaque, sans mouvement global de la matière, sous l'effet d'une différence de température. À l'intérieur d'un solide, la chaleur se propage par conduction selon deux mécanismes principaux : la transmission due aux vibrations des atomes ou des molécules, et celle due au déplacement des électrons libres. La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier , selon laquelle la densité du flux thermique est proportionnelle au gradient de température.

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T)$$

Ou sous forme algébrique :

$$\varphi = -\lambda \, S \frac{\partial T}{\partial x}$$

Avec :

$\boldsymbol{\varphi}$ Flux de chaleur transmis par conduction (W)

$\boldsymbol{\lambda}$ Conductivité thermique du milieu $(W\ m^{-1}\ °C^{-1})$

$\boldsymbol{x}$ Variable d'espace dans la direction du flux (m)

S Air de la section de passage du flux de chaleur (m^2)

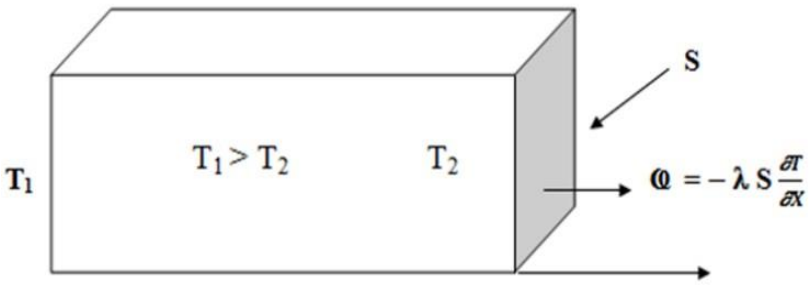


Figure III.26. Schéma de transfert de chaleur par conduction

III.5.2. Transfert de chaleur par convection :

Le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, où l'énergie thermique est transportée par le mouvement du fluide, correspond au phénomène de convection thermique. Ce transfert implique un déplacement macroscopique des molécules du fluide, qui transportent ainsi l'énergie thermique d'une zone à une autre. Il existe deux types principaux de convection : la convection naturelle, due aux variations de densité du fluide provoquées par des différences de température, et la convection forcée, où le fluide est mis en mouvement par une force extérieure comme un ventilateur ou une pompe

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton **[25]** :

$\varphi = hS(T_P - T_\infty)$

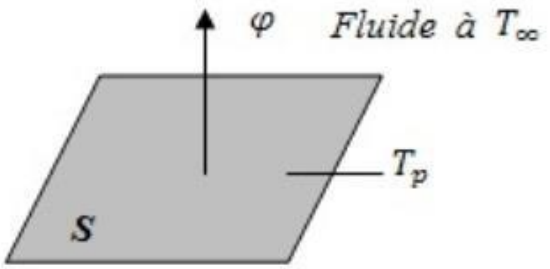


Figure III 27. Schéma du transfert de chaleur par convection

Avec :

$\boldsymbol{\varphi}$ Flux de chaleur transmis par convection (W)

$\boldsymbol{h}$ Coefficient de transfert de chaleur par convection ($W m^{-2\circ} C^{-1}$)

$\boldsymbol{T_p}$ Température de la surface ($°C$)

$\boldsymbol{T_\infty}$ Température du milieu environnant la surface ($°C$)

S Aire de la surface de contact solide / fluide (m^2)

III.5.3. Transfert de chaleur par rayonnement :

Le transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces, même en l'absence de milieu matériel (dans le vide), correspond au rayonnement thermique. Ce mode de transfert se fait par émission et absorption d'ondes électromagnétiques émises par tout corps en fonction de sa température.
Dans les problèmes de conduction, on prend en compte ce rayonnement entre un solide et son environnement, qui s'ajoute au transfert par conduction. La relation qui décrit ce transfert par conduction est donnée par la loi de Fourier, qui établit que le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température dans le solide.
Ainsi, le transfert thermique total peut inclure à la fois la conduction (transfert par contact et diffusion thermique) et le rayonnement (transfert par ondes électromagnétiques), ce dernier étant essentiel notamment lorsque la transmission se fait à travers un vide ou un gaz transparent et dans ce cas nous avons la relation **[24]** :

$\varphi = \sigma \varepsilon_P S(T_p^4 - T_\infty^4)$

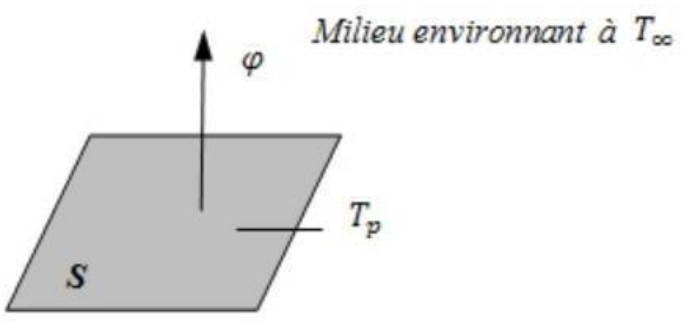


Figure III.28. Schéma de transfert de chaleur par rayonnement.

Avec :

φFlux de chaleur transmis pa rayonnement (W)

σ Constant de Stephan ($5.67 \times 10^{-8} \mathrm{W} m^{-2} K^{-4}$)

$\boldsymbol{\varepsilon_p}$ Facteur d'émission de la surface

$\boldsymbol{T_p}$Température de la surface(K)

$\boldsymbol{T_\infty}$Température de milieu environnant la surface(K)

S Air de la surface (m^2)

III.6. Le nombre de Reynolds :

C'est un concept important pour caractériser les écoulements. Il est défini par cette formule **[26]** :

$$\mathrm{Re} = \frac{u_m\, d}{v} \qquad \text{(III.15)}$$

Avec v est la viscosité cinématique du fluide.

- Si Re < 2400 on est en régime laminaire.
- Pour des vitesses plus élevées, Re >> 2400, le régime turbulent apparaît

III.7. Le nombre de Prandtl :

C'est un autre nombre important pour caractériser les fluides. Comme tu l'as mentionné, il est entièrement caractéristique du fluide considéré **[26].** En fait, l'inverse du nombre de Prandtl est appelé le nombre de Stanton par les thermiciens français. Dans le cas des gaz,

$\mathbf{p_r}$il est généralement constant avec la pression et la température, mais il varie en fonction des changements thermiques $\mathbf{C_p}$ (T).

$$p_r = \frac{\mu C_p}{k} \text{(III.16)}$$

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales équations mathématiques qui décrivent le comportement des écoulements fluides, ainsi que les différents modes de transfert thermique, à savoir la conduction, la convection et le rayonnement.

Le chapitre suivant sera consacré aux méthodes numériques employées pour résoudre ces équations. Nous y étudierons notamment la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis et la méthode des volumes finis. Ces approches permettent de discrétiser les équations continues afin d'obtenir des solutions approximatives par calcul numérique.

Chapitre IV : Méthodes numériques

IV.1 Introduction :

Pour résoudre un problème de physique, il est essentiel de distinguer un modèle physique d'un modèle mathématique. Différentes méthodes numériques sont employées pour obtenir des solutions approximatives des équations aux dérivées partielles (EDP) qui régissent ces écoulements. Parmi ces méthodes, on trouve la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis et la méthode des volumes finis.

Le principe commun à ces approches est de transformer les équations différentielles en un système d'équations algébriques plus facile à résoudre.

Dans ce chapitre, nous nous focaliserons sur la méthode des éléments finis, que nous utiliserons pour résoudre notre problème thermique à l'aide du logiciel de simulation CFD ANSYS.

IV.2. Les trois grandes familles de méthodes :

Les méthodes numériques couramment utilisées pour résoudre les systèmes d'équations aux dérivées partielles régissant les écoulements sont :

- La méthode des différences finies
- La méthode des éléments finis
- La méthode des volumes finis

IV.2.1. Méthode des différences finies :

La méthode des différences finies consiste à remplacer les dérivées dans les équations différentielles par des différences entre valeurs de la fonction sur une grille discrète. Le domaine est ainsi divisé en points ou nœuds, et les dérivées sont approximées par des différences finies entre ces points.

Cette transformation convertit les équations différentielles en un système d'équations algébriques pouvant être résolu numériquement. La méthode est appréciée pour sa simplicité de formulation et son faible coût de calcul.

Cependant, elle demande une attention particulière à la définition du maillage, notamment pour gérer des géométries complexes, et peut présenter des difficultés dans la mise en œuvre des conditions aux limites impliquant des dérivées ou gradients inconnus.

Avantages :	Inconvénients :
✓ Simplicité de mise en œuvre et de compréhension, adaptée à un large éventail de problèmes. ✓ Faible coût de calcul, ce qui la rend efficace pour des simulations de grande échelle. ✓ Approche directe pour transformer les équations différentielles en équations algébriques. ✓ Peut gérer efficacement des géométries régulières et des conditions aux limites simples.	✓ Nécessite une grille structurée, ce qui complique son application aux géométries complexes ou irrégulières. ✓ La précision dépend fortement de la taille du maillage et de l'ordre du schéma de différences finies utilisé. ✓ Difficultés à traiter les discontinuités ou forts gradients, pouvant provoquer des oscillations non physiques dans les résultats. ✓ Ne garantit pas toujours la conservation stricte des grandeurs physiques comme la masse ou l'énergie, contrairement à d'autres méthodes comme les volumes finis.

Tableau IV. 1. Les avantages et Inconvénients de méthode des différences finies

IV.2.2. Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis (MEF) consiste à transformer les équations différentielles régissant un système en un système d'équations algébriques. Le domaine étudié est divisé en éléments géométriques simples reliés par des nœuds, où sont appliquées les forces internes et externes. Cette méthode, initialement développée pour la mécanique des structures, s'est étendue à de nombreux domaines, notamment la mécanique des fluides et la thermique. Elle est populaire en raison de sa facilité de programmation et de sa capacité à gérer des géométries complexes.

Avantages	Inconvénients
✓ Mise en œuvre relativement facile et bien documentée. ✓ Adaptée aux géométries complexes et aux domaines irréguliers. ✓ Permet une bonne flexibilité dans le choix des éléments et des fonctions d'approximation. ✓ Offre une bonne précision pour un large éventail de problèmes physiques.	✓ Moins précise que les méthodes spectrales pour certains problèmes. ✓ Peut nécessiter un maillage fin et complexe, augmentant le temps de calcul. ✓ La construction et la résolution des grandes matrices peuvent être coûteuses en ressources informatiques. ✓ La qualité des résultats dépend fortement de la qualité du maillage et du choix des éléments.

Tableau IV.2. Les avantages et Inconvénients de méthode des éléments finis

IV.2.3. Méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis est une technique numérique utilisée pour résoudre des équations aux dérivées partielles, notamment celles régissant les écoulements fluides. Contrairement aux méthodes des différences finies ou des éléments finis, elle repose sur l'intégration des lois de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie) sur des volumes de contrôle discrets. Grâce au théorème de divergence d'Ostrogradski, les intégrales volumétriques sont transformées en intégrales de surface, ce qui permet d'évaluer précisément les flux aux interfaces entre volumes.

Avantages	Inconvénients
✓ Assure une conservation intégrale rigoureuse des quantités physiques, quelle que soit la taille des mailles. ✓ Adaptée aux géométries complexes et aux maillages non structurés. ✓ Permet une détermination naturelle et précise des conditions aux limites. ✓ Dispose de fondements mathématiques solides avec des preuves de convergence et d'estimation d'erreurs.	✓ Mise en œuvre plus complexe que les méthodes des différences finies. ✓ Coût en temps de calcul et en mémoire plus élevé, notamment pour des maillages fins ou tridimensionnels. ✓ La précision peut dépendre fortement de la qualité du maillage et des schémas numériques employés pour l'évaluation des flux.

Tableau IV.5. Les avantages et Inconvénients de méthode des volumes finis

IV.3. Méthodes numériques de discrétisation :

Les méthodes numériques de discrétisation consistent en une série d'étapes permettant de résoudre numériquement des équations différentielles, notamment aux dérivées partielles. Ces méthodes transforment les équations continues en systèmes algébriques approchés, adaptés au calcul informatique.

Pour chaque problème, un programme numérique est développé en tenant compte de la géométrie, des propriétés physiques et des conditions aux limites. Il existe aussi des logiciels polyvalents, comme PDETOOL dans MATLAB ou ANSYS, qui permettent de modéliser un large éventail de problèmes similaires. Ces outils offrent la possibilité de définir le problème d'ingénierie, ses caractéristiques physiques, le maillage et les conditions aux limites, puis d'appliquer une méthode numérique appropriée, telle que les différences finies, les éléments finis ou les volumes finis.

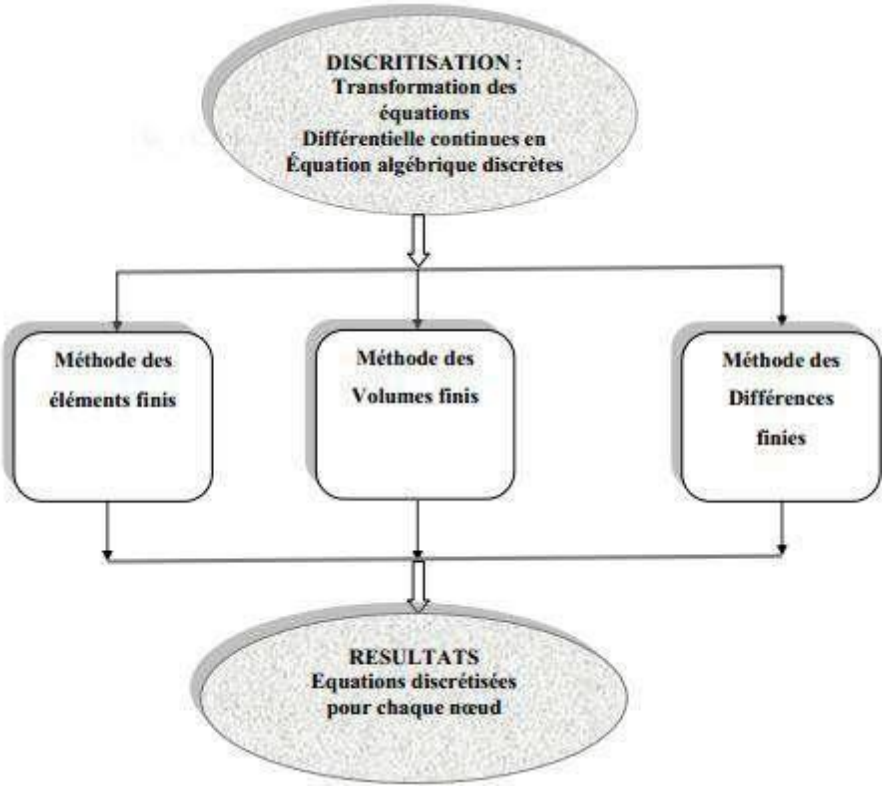


Figure IV.1. Méthode de discrétisations

Dans ce contexte, l'accent est mis sur la méthode des éléments finis, dont l'approche globale a été brièvement présentée. Les étapes mathématiques principales de la discrétisation de l'équation de la chaleur par cette méthode seront détaillées par la suite.

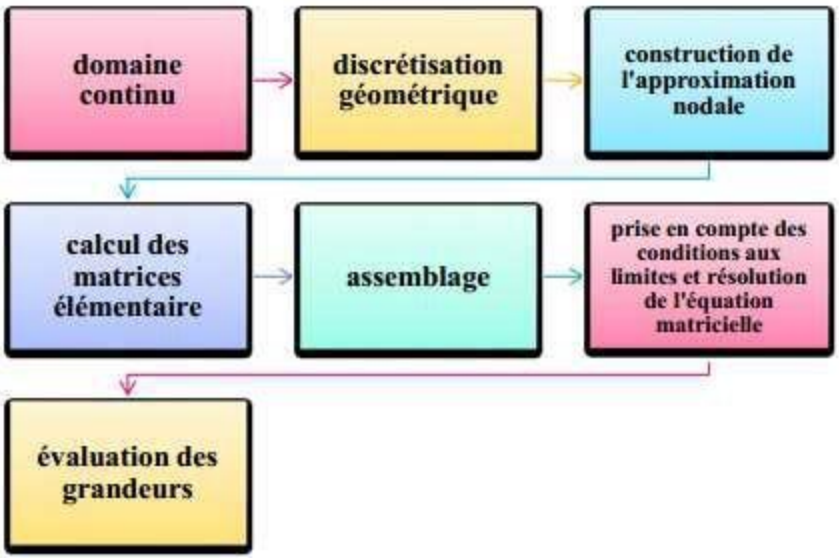
IV.4. Présentation de la méthode :

La méthode des éléments finis vise à remplacer un problème mathématique continu, formulé par des équations différentielles ou intégrales, par un problème discret sous forme matricielle ré solvable numériquement. Pour cela, le domaine continu est discrétisé en un assemblage d'éléments finis de formes et tailles variées.

Le calcul de la solution prend en compte plusieurs paramètres essentiels :

- La géométrie discrétisée en éléments finis.
- Les contraintes appliquées sur le système.
- Les excitations présentes (charges, sources, etc.).
- Les propriétés des matériaux constituant le dispositif.

Les principales étapes de construction d'un modèle par éléments finis comprennent :



FigureIV.2. Démarche éléments finis.

IV.5. Méthode des volumes finis pour la résolution numérique :

IV.5.1. Présentation de la méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis divise le domaine de calcul en petits éléments appelés volumes de contrôle. L'équation d'évolution est intégrée sur chacun de ces volumes, ce qui permet de transformer les équations aux dérivées partielles en équations discrètes reliant les valeurs centrales des volumes à celles de leurs voisins. Cette discrétisation spatiale est essentielle pour garantir la précision et la stabilité des calculs. La méthode exploite le théorème de divergence pour convertir les intégrales volumétriques en intégrales de

surface, assurant ainsi la conservation stricte des grandeurs physiques (masse, énergie, quantité de mouvement) à l'échelle locale.

IV.5.2. Maillage dans la méthode des volumes finis :

Le domaine est subdivisé en volumes de contrôle dont la somme couvre l'ensemble du domaine. Chaque volume possède un centre, appelé point de contrôle ou nœud central, noté P. Les volumes adjacents sont désignés par des points voisins selon leur position relative : N (nord), S (sud), E (est), W (ouest), T (haut), B (bas) en 3D. Cette organisation facilite le calcul des flux entre volumes adjacents et l'approximation des gradients aux interfaces

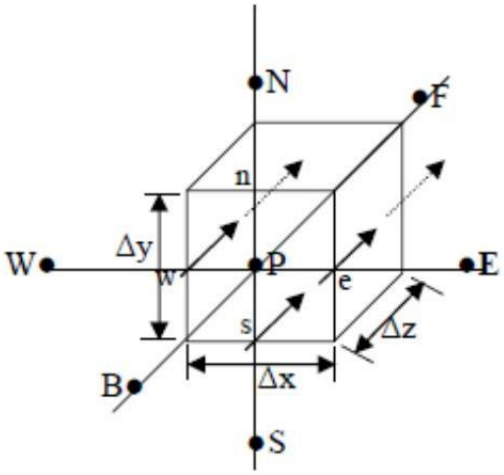


Figure IV.3. Volume contrôle

IV.6. Mise en œuvre de la méthode des éléments finis :

IV.6.1. Formulation variation elle forte :

La formulation forte d`un problème aux conditions aux limites s`écrit alors comme suit

Trouver $(x)U(x)\epsilon$ espace des solutions US tel que **[27]**

$\mathcal{L}(u) - F = 0 \; \forall$ x $\epsilon \Omega B(u) = u_0 \forall$ x $\epsilon \Gamma u0$ **(IV.1)**

On note que l'espace Us dans lequel nous recherchons la fonction u, doit être défini judicieusement.

IV.6.2. Formulation variation elle faible :

La formation vibrationnelle faible peut être obtenue par l'étable suivante

: 1- Approcher la solution u. partout dans le domaine Ω, par u tel que

$\bar{u} = \sum_{i=1}^{n} Ni\ \overline{Ui}$ (IV-2)

On Ni =Ni (x, y) désignent les fonctions $\bar{U}$ et des valeurs nodales interminées

2- Introduire (III-2) dans (III-1) il en résulte une erreur ou un résidu tel que

$= (\bar{U}) - F \neq 0$ (IV -3)

3- Obstiner une valeur nulle de en introduisant une fonction de point arbitraire w tel que

$\int w\ (\ (\bar{U}) - F)\ d\Omega = 0$, k= 1, 2, 3……..N (IV-4)

On N nombre d'inconnues indépendants du système (IV-1)

En formulation de Galerkine les fonctions tests sont assimilées aux fonctions de forme.

On pose

$W_k = N_k \Rightarrow \int Nk\ \zeta(\sum_{i=1}^{n} Ni\bar{ui})\ d\Omega = 0$ (IV-5)

On dit que u $H^1{}_0$ (Ω) est une solution faible de (IV-4)

Si:

∀ v ϵH_0^1 (Ω) a ($\bar{U}$, V) (IV-6)

A($\bar{U}$, V) est la forme bilinéaire associée à ( ) soit Ω un ouvert borné R^d et dΩ est régulie .on considéré alors le problème :

Lu = f sur Ω et u= 0 sur dΩ= 0

IV.7. Forme générale des équations du système [28]

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_\phi \phi) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho V_X C_\phi \phi) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho V_Y C_\phi \phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y}\right) + S_\phi \quad \text{(IV-7)}$$

Ou :

Φ : Variable généralisée

C_ϕ: Coefficient d'advection transitoire.

ΦΓ : Coefficient de diffusion.

S_ϕ: Termes source

Variable∅	Coefficient d'advection $c_\emptyset$	Diffusivité$\Gamma_\emptyset$	Termes source $S_\emptyset$
V_x	1	μ_t	$-\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{x}}+\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}\left(\mu\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}}\right)+\frac{\partial}{\partial \mathrm{y}}\left(\mu\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{y}}\right) - \sigma\nabla\left\lvert\frac{\nabla_c}{\lVert\nabla_c\rVert}\right\rvert\frac{\nabla_c}{\lVert\nabla_c\rVert}\rvert$
v_y	1	μ_t	$-\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{y}}+\frac{\partial}{\partial \mathrm{y}}\left(\mu\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{y}}\right)+\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}\left(\mu\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}}\right) - \sigma\nabla\left\lvert\frac{\nabla_c}{\lVert\nabla_c\rVert}\right\rvert\frac{\nabla_c}{\lVert\nabla_c\rVert}\rvert$
T	1	$\frac{k}{\rho c^{\mathrm{e}}}$	$\frac{\varphi}{\rho \mathrm{C}^{\mathrm{e}}}$
ρ	1	0	0

Tableau IV.6. Expression des coefficients d`échange et des termes sources pour les différentes variables.

IV.8-Discrétisation *:*

La discrétisation par la méthode des éléments finis (MEF) consiste à transformer les équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques résolubles numériquement. Après intégration, l'équation généralisée est exprimée sous une forme matricielle élémentaire propre à chaque élément du maillage. Cette approche repose sur la formulation dite « faible » de l'équation, où l'on intègre l'équation différentielle multipliée par des fonctions test sur chaque élément, ce qui permet d'abaisser l'ordre des dérivées à traiter.

Concrètement, le domaine continu est découpé en éléments finis, sur lesquels l'équation est approximée et linéarisée. Chaque élément fournit une matrice locale, qui est ensuite assemblée pour former une matrice globale représentant l'ensemble du problème. Les conditions aux limites sont appliquées sur la matrice globale, et la résolution numérique de

ce système matriciel fournit une solution approchée de l'équation aux dérivées partielles initiale.

Ainsi, la discrétisation par éléments finis transforme un problème continu complexe en un problème discret plus simple à résoudre par des méthodes numériques classiques. Cette méthode garantit la convergence vers la solution exacte lorsque le maillage est raffiné et les fonctions d'approximation choisies adéquatement **[29].**

$$([A_B^{transient}] + [A_e^{Advection}] + [A_e^{transien}])(\phi e) = (S_e^{\phi}) \quad \text{(IV-8)}$$

IV.8.1-Discrétisation de l'équation de chaleur par élément fini *:*

a. **Bilan Thermique** : **Equation De Chaleur**

Soit v une partie quelconque de **V** limitée par

la surface

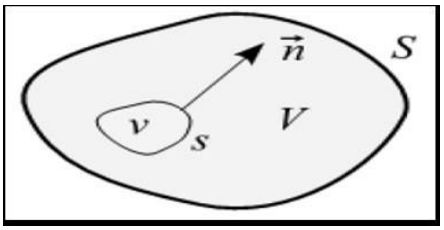


Figure IV.4. Bilan thermique

La puissance thermique stockée dans **v** est égale à la somme de la puissance thermique q générée par les sources volumiques contenues dans **V** et de la puissance thermique reçue sous forme de flux a travers la surface **S [29] :**

$$\int \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dv = \int q dv + \int -n(-\overline{\lambda grad}\, T) \quad ds \quad \text{(IV-9)}$$

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

$$\rho C_p \dot{T} - \text{div}(\overline{\overline{\lambda}} \overline{\overline{grad}} T)\, q = 0 \quad \text{(IV-10)}$$

Pour un matériau homogène et isotrope, l'équation (III-21) s'écrit dans le repère orthonormé

(x,y)[24] :

$$\rho C_p \dot{T} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q \quad \text{(IV-11)}$$

IV.8.2- Forme discrétisée : éléments finis

Le domaine V est décomposé en sous-domaines Ve de forme géométrique simple (les éléments) relies entre eux en des points appelés nœuds. Cette opération s'appelle maillage [28].

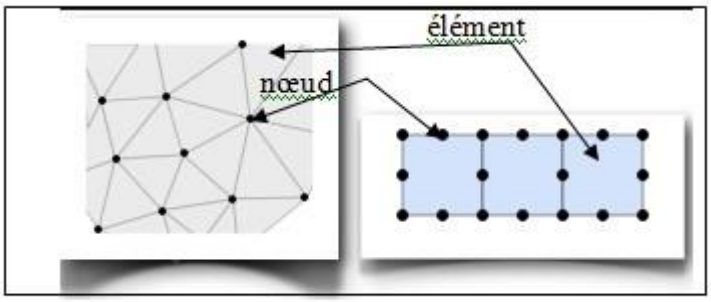


Figure IV.29. Domaine plan discrétisé en élément relies eux par nœuds.

IV.9. Présentation et description du logiciel ANSYS :

Le logiciel ANSYS, développé par Dr. John Swanson et édité par la société ANSYS basée à Houston (USA), est un outil majeur d'analyse d'ingénierie utilisant la méthode des éléments finis. Il est largement employé dans divers secteurs tels que l'automobile, l'aérospatiale, l'électronique et la chimie pour modéliser des structures, composants ou systèmes et étudier leurs réponses physiques, comme les contraintes, les distributions de température ou les effets électromagnétiques **[30].**

ANSYS offre également des fonctionnalités avancées d'optimisation, de calcul de régressions linéaires et non linéaires, et de génération de courbes de haute qualité. Le logiciel intègre de nombreuses fonctions mathématiques et thermodynamiques essentielles en ingénierie, ce qui en fait le leader mondial du calcul par éléments finis.

Grâce à ANSYS, il est possible d'optimiser le processus de conception, réduisant considérablement les délais et les coûts tout en améliorant la qualité et l'innovation des produits. La simulation s'intègre directement dans le cycle de conception, permettant des itérations rapides et une validation efficace des produits. **[31].**

Les différentes étapes nécessaires à la simulation d'un problème physique :

- Type de calcul (2D ou 3D) ;
- Choix du maillage ;
- Équations résolues ;
- Conditions aux limites ; □ Conditions initiales ;
- Mise en place d'obstacles ;
- Méthodes et paramètres numériques (choix des schémas, résidus…). **[32]**

ANSYS propose aussi des modules spécialisés, par exemple ANSYS Mechanical pour la mécanique et la thermique, ANSYS Fluent pour la dynamique des fluides, et la plateforme ANSYS Workbench qui intègre toutes les étapes de la simulation dans un environnement unifié, facilitant la gestion des projets multiphysiques

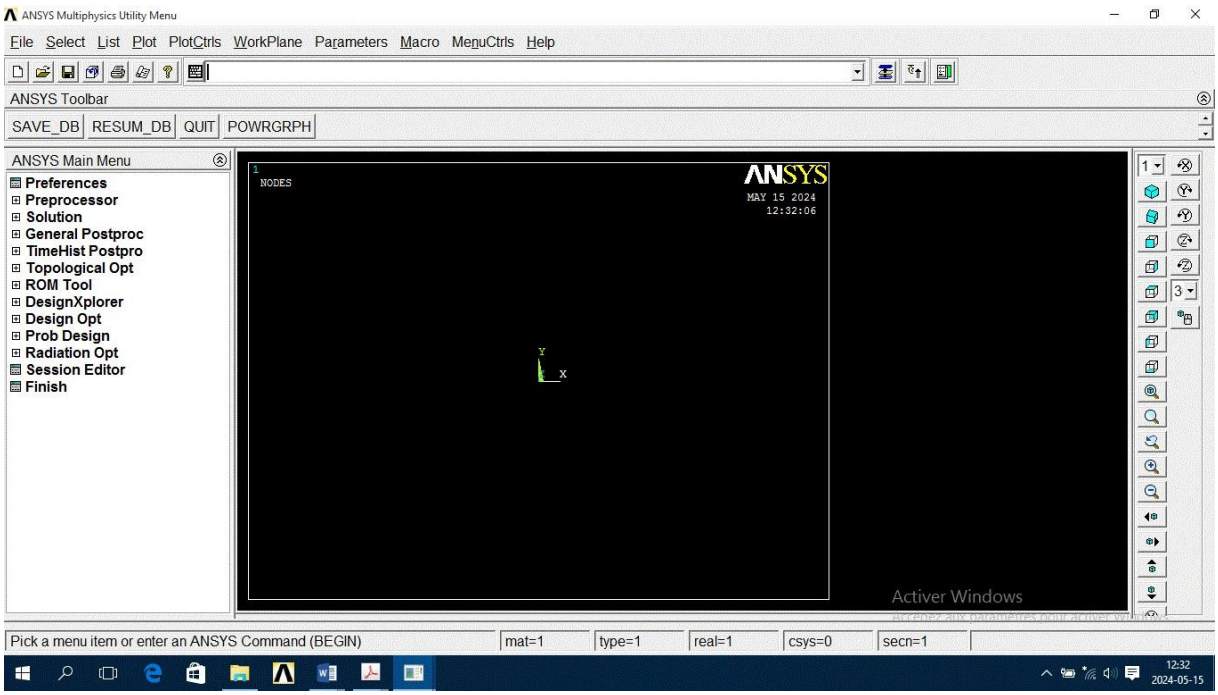


Figure IV. 30. Représentation spatiale de L'interface d'ANSYS.

IV.9.1. Maillage :

Le maillage dans la méthode des éléments finis consiste à diviser le domaine en éléments (carrés, triangles ou formes plus complexes) qui peuvent être irréguliers. Il est courant de raffiner le maillage dans les zones où la solution varie beaucoup, tout en veillant à ce que les éléments restent peu déformés (proches de polygones réguliers) pour garantir la précision.

Un maillage de bonne qualité est crucial pour obtenir des résultats précis, robustes et fiables. Il influence fortement la convergence, la précision et le temps de calcul. La qualité repose sur la minimisation des éléments très déformés (skewness faible) et sur une résolution suffisante dans les régions à forts gradients (couches limites, ondes de choc, etc.). Un maillage doit aussi être suffisamment lisse pour éviter les erreurs numériques.

Les logiciels comme ANSYS assistent la génération de maillages adaptés, permettant d'équilibrer précision et coût de calcul en affinant localement le maillage aux zones d'intérêt tout en gardant des éléments plus gros ailleurs. Cette approche optimise la qualité des simulations tout en maîtrisant les ressources informatiques.

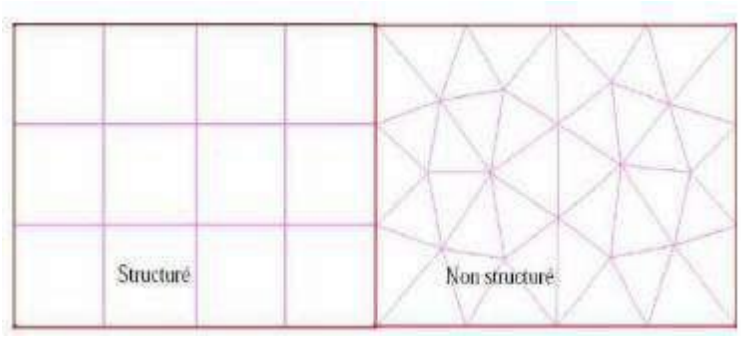


Figure IV. 31. Maillages structuré et non structuré.

IV.10. La méthode VOF (Volume of Fluide) : La méthode VOF (Volume of Fluid) est une technique puissante pour simuler des écoulements multiphasiques non miscibles, permettant de suivre l'évolution temporelle des fractions volumiques de chaque fluide dans un domaine maillé en remplissant les cellules de calcul. Introduite par Hirt et Nichols dans les années 1980, elle résout les équations de quantité de mouvement pour chaque phase et est couramment utilisée pour modéliser des phénomènes comme la rupture de jets, le mouvement de bulles, ou le déplacement d'interfaces liquide-gaz.

Cette méthode traite le milieu multiphasique comme un fluide unique dont les propriétés sont moyennées selon la fraction volumique de chaque phase dans les cellules. Elle garantit la conservation des quantités physiques et utilise le théorème de divergence pour gérer les interfaces.

Cependant, certaines limites doivent être prises en compte :

Chaque cellule du maillage doit contenir au moins une phase (aucune cellule vide).

Une seule phase peut être compressible, l'autre doit rester incompressible.

Les écoulements périodiques ne sont pas compatibles avec le modèle VOF.

En simulation transitoire, le nombre de Courant (rapport entre le pas de temps et le temps caractéristique de déplacement du fluide dans un volume) doit être spécifié pour assurer la stabilité.

La méthode nécessite un maillage fin dans les zones d'interface pour bien capturer la transition entre phases, et la gestion de la fraction volumique peut entraîner des difficultés de stabilité et de précision, notamment dans la représentation nette de l'interface.

IV.10.1. Principe de la méthode de VOF :

La méthode VOF est particulièrement adaptée pour modéliser des écoulements où les interfaces subissent de fortes déformations. Elle permet de localiser la surface libre à chaque instant grâce à une fonction discrète représentant la fraction volumique de chaque phase dans chaque cellule du maillage. Dans cette approche, le liquide est caractérisé par C_k= 1 et le gaz (air) parC_k= 0, tandis que les cellules situées à l'interface ont une valeur de C_k comprise strictement entre 0 et 1. Cette représentation facilite le suivi dynamique des déplacements et déformations des interfaces.

C_k= 0 si x ∉ phase k

C_k (x_i, t) =0.5

C_k = 1 si x ∉ phase k

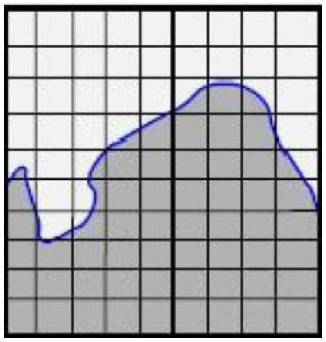


Figure IV. 32. Méthode VOF **[33]**

La fonction C_k est transportée par le champ de vitesse u, selon l'équation d'advection pour un écoulement incompressible **[33]**

$$\frac{\partial c_k}{\partial t} + u.\nabla C_k \quad (IV.12)$$

Cette équation, de nature hyperbolique et conservative, garantit la conservation de la masse pendant le transport.

Cependant, le traitement numérique des discontinuités, comme les interfaces, peut engendrer une diffusion numérique qui étale la fonction C_k, rendant la conservation précise de l'interface plus difficile. Pour pallier cela, des algorithmes spécifiques sont mis en œuvre afin de réduire cette diffusion et d'améliorer la précision de la méthode dans la modélisation des interfaces fortement déformées.

IV.11. Effet du champ magnétique :

Un champ magnétique est un champ vectoriel : en tout point M de l'espace il existe un vecteur $\vec{B}(M)$ décrivant localement le champ magnétique.

- Le sens et la direction du vecteur indique comment la boussole se positionne.
- La norme du vecteur renseigne sur l'intensité du champ magnétique au point M considéré. Elle s'exprime en tesla (T).

Un champ magnétique peut avoir diverses origines : un aimant permanent, la Terre ou un courant électrique (expérience d'Œrsted en 1820).

En réalité, toutes ces sources sont liées au même phénomène : des particules chargées en mouvement.

IV.11.1. Définition plus fondamentale du champ magnétique :

Le champ magnétique $\vec{\boldsymbol{B}}$ est défini par la composante magnétique de la force de Lorentz $\boldsymbol{F_L}$ qu'il exerce sur une particule chargée de charge $\boldsymbol{q}$ et animée d'une vitesse $\vec{\boldsymbol{v}}$ dans le référentiel du champ : $\boldsymbol{F_L = q.v.B}$

$\boldsymbol{F_L}$: La force électromagnétique [N].

q: La charge électrique de l'ion [C].

$\boldsymbol{\nu}$: La vitesse de charge [m s-1].

$\boldsymbol{B}$: Champ magnétique [T]

La force électromotrice est proportionnelle au produit vectoriel de la vitesse d'écoulement souhaitée (v), du champ magnétique externe (B) et de la constante de proportionnalité (charge) (q) transportée par le liquide.

Et, selon la loi d'Ohm, la densité de courant peut être exprimée comme suit :

$$\boldsymbol{j = \sigma(\upsilon \times \beta)}$$

Où **J** représente la densité de courant traversant le canal et **σ** la conductivité électrique.

En supposant que la différence de potentiel soit directement proportionnelle à la vitesse locale du liquide :

$$\boldsymbol{\nabla \Phi = \Delta x V B}$$

L'amplitude et la direction de la vitesse locale de fusion peuvent être déterminées à l'aide d'une sonde magnétique qui mesure cette différence de potentiel induite sur les électrodes lorsqu'un fluide conducteur s'écoule autour d'un aimant cylindrique.

Des aimants permanents adaptés aux besoins spécifiques du milieu liquide étudié permettent des mesures de vitesse à des températures allant jusqu'à 670 °C, à une vitesse maximale de 10 m/s et avec une sensibilité de 1 mm/s. Cependant, cette sonde n'a pas permis de mesurer la vitesse à des températures supérieures à 720 °C et n'est donc pas pertinente pour la coulée de métaux. De plus, cette technique est également inefficace dans l'aluminium liquide agité à l'argon (c'est-à-dire en écoulement diphasique) à des températures inférieures à 700 °C.

La tomographie inductive de flux sans contact (CIFT) repose sur un principe de reconstruction tridimensionnelle de la vitesse inductive, particulièrement avantageux pour la détermination sans contact des champs de vitesse tridimensionnels à plein débit. Ce principe repose sur le champ magnétique induit supplémentaire et le potentiel électrique dans la FEM générée lors des écoulements MHD. Le champ magnétique peut être mesuré à l'extérieur du volume de fluide, tandis que le potentiel électrique peut être mesuré.

IV.11.2. Relation entre courant électrique et champ magnétique :

Le courant électrique, plus généralement tout mouvement de charge électrique, produit un champ magnétique dont la valeur dépend de la quantité et de la vitesse de la charge électrique en mouvement. La valeur du champ magnétique généré par le courant

traversant un seul fil est assez faible, mais en raison de l'enroulement du fil qui forme la bobine, un champ magnétique puissant peut être obtenu.

IV.11.3. Formulation proposée :

Le combustible MHD est un plasma ionisé (généralement composé de gaz combustibles comme l'hydrogène, le gaz naturel ou des produits de gazéification) traversé par un champ magnétique intense. Sous l'effet de la chaleur et de la pression, ce plasma devient conducteur d'électricité. En se déplaçant à haute vitesse dans le champ magnétique, il génère un courant électrique direct par induction, selon le principe de la magnétohydrodynamique. Cette conversion directe d'énergie thermique en électricité, sans pièces mécaniques mobiles, permet un rendement accru dans les centrales MHD hybrides (combinées à des turbines à gaz.

IV.11.4. Explications complémentaires :

1. **Combustible utilisé** :

- Gaz ionisé (hydrogène, argon enrichi, gaz naturel, ou produits de combustion dopés aux alcalins pour améliorer la conductivité).
- Température requise : **> 2 500°C** pour maintenir l'état plasma.

2. **Principe MHD** :
   - **Effet Faraday** : Le mouvement du plasma conducteur dans le champ magnétique induit une tension perpendiculaire au flux et au champ.
   - **Électrodes** : Captent le courant continu produit, qui est ensuite converti en courant alternatif.
3. **Applications** :
   - Centrales électriques à haut rendement (couplage MHD + turbines).
   - Propulsion spatiale avancée (propulseurs MHD pour atmosphères denses).

IV.11.5. Exemple d'application concrète :

Dans une centrale MHD à cycle combiné, un combustible gazeux (méthane) est brûlé pour produire un plasma à 3 000°C. Ce plasma, enrichi en particules ionisées (potassium ou césium), traverse un canal MHD soumis à un champ magnétique de 5 Tesla. Le courant généré est récupéré par des électrodes, tandis que les gaz résiduels alimentent une turbine à vapeur, portant le rendement global à plus de 60%.

IV.11.5.1. Précautions sémantiques :

- Éviter de confondre avec la **fusion nucléaire** (où le plasma est confiné pour des réactions atomiques).

- La MHD n’est pas un combustible en soi, mais une **méthode de conversion d’énergie** utilisant un fluide conducteur.

IV.11.6. Combustibles hydromagnétiques :

Les **combustibles hydromagnétiques** (ou hydromagnetics *fuels* en anglais) sont un concept

théorique souvent évoqué dans le domaine de l'énergie avancée, notamment en lien avec des

technologies supposées exploiter des réactions entre l'hydrogène et des champs magnétiques

pour produire de l'énergie. Cependant.

1. **Théories marginales** :

- Certaines propositions pseudo-scientifiques ou liées à des inventions controversées (comme celles de Nikola Tesla ou des dispositifs de "énergie libre") évoquent des réactions hydromagnétiques.
- Ces idées suggèrent que des combinaisons d'hydrogène, de plasma et de champs magnétiques pourraient générer une énergie propre et illimitée, mais sans bases expérimentales solides.

2. **Hydrogène et magnétisme** :

- L'hydrogène est effectivement utilisé dans des technologies comme la **fusion nucléaire** (ex : ITER), où des plasmas d'hydrogène sont confinés par des champs magnétiques. Cependant, cela ne produit pas un "combustible" classique.
- Le terme "hydromagnétique" est parfois employé en physique des plasmas pour décrire des phénomènes magnétohydrodynamiques (MHD), mais sans lien avec un carburant exploitable.

- **Technologies réelles proches :**

- **Hydrogène comme combustible** :

  L'hydrogène liquide ou gazeux est utilisé dans les piles à combustible (voitures) ou les fusées, mais sans implication de magnétisme.

- **Fusion nucléaire** :

  Elle utilise des isotopes de l'hydrogène (deutérium, tritium) dans un plasma chauffé et confiné magnétiquement, mais c'est une technologie encore en développement.

- **Prudence face aux arnaques :**

Des annonces de "combustibles hydromagnétiques miracles" circulent parfois sur internet, souvent associées à des **schémas d'investissement douteux**. Aucune technologie de ce type n'a été reconnue par la communauté scientifique.

Conclusion :

ANSYS-CFD est un logiciel performant qui combine la méthode des éléments finis et la méthode VOF pour résoudre efficacement les équations liées à l'écoulement des fluides. Il offre une interface intuitive qui facilite la modélisation et la simulation, éliminant ainsi la nécessité d'une programmation numérique complexe.

Si vous cherchez des alternatives énergétiques, tournez-vous vers des solutions validées (hydrogène vert, énergies renouvelables). Les "combustibles hydromagnétiques" relèvent pour l'instant de la **spéculation non prouvée**.

CHAPITRE V :

Résultats et discrétisation

V.1.Introduction :

Dans cette section du mémoire, nous nous penchons sur l'étude de la dispersion et de l'atomisation d'un jet liquide à haute pression injecté dans un cylindre, en utilisant des simulations numériques. L'objectif principal de cette étude est d'analyser comment les paramètres de forme et de géométrie de l'injecteur influent sur la dispersion du liquide injecté à haute pression. Les résultats numériques ont été obtenus en utilisant deux techniques : EF/VOF pour les fluides miscibles et une méthode de traitement discrétisé des écoulements de fluides non miscibles, également basée sur les éléments finis. Ces simulations numériques nous ont permis de mieux comprendre comment les paramètres géométriques de l'injecteur impactent la dispersion du liquide injecté. Cette compréhension revêt une importance cruciale pour la conception et l'optimisation des systèmes d'injection à haute pression.

V.2.Identification :

Plusieurs études ont présenté les premiers résultats et les simulations numériques visant à explorer le comportement et la performance des systèmes d'injection. Les résultats de ces études numériques constituent une source précieuse de données et de références pour la validation des modèles d'injection.

Dans la première partie de notre travail, nous proposons de comparer les résultats de simulation de l'atomisation et de la dispersion de mélanges air-glycérine/eau, considérés comme des liquides newtoniens, à l'intérieur de la chambre de combustion, en utilisant les mêmes conditions numériques et expérimentales que celles employées par MR. FEISCHI ZHANG et al **[11].**

Ensuite, toujours dans les mêmes conditions numériques, nous analysons l'influence de la forme et des paramètres géométriques de l'injecteur sur la dispersion du liquide injecté à haute pression. Cette approche vise à améliorer notre compréhension de l'impact des caractéristiques géométriques des injecteurs et à optimiser leur conception pour obtenir des performances optimales.

Tableau V.1. Propriétés thermique et dynamique utilisé pour le calcul **[11]**.

Propriétés	Densité (Kg /m^3)	Viscosité (pas)	Vitesse (m/s)	Température (K)	Chaleur spécifique (KJ/kg.k)	Conductivité Thermique (W/m.k)
Glycérol /eau	1223	0.0012	1.4	293	2.43	0.29
Acier	7800	/	/	/	0.5	50.2
Air	1.205	0.000018	60	293	1007	0.025

Tableau V.2. Conditions d'injection utilisé pour le calcul numérique **[11]**.

Diamètre d'injecteur (mm)	Vitesse d'injection (m/s)	Tension de surface (N/m)	Pression d'injection (KPa)
2	1.4	0.0648	1325

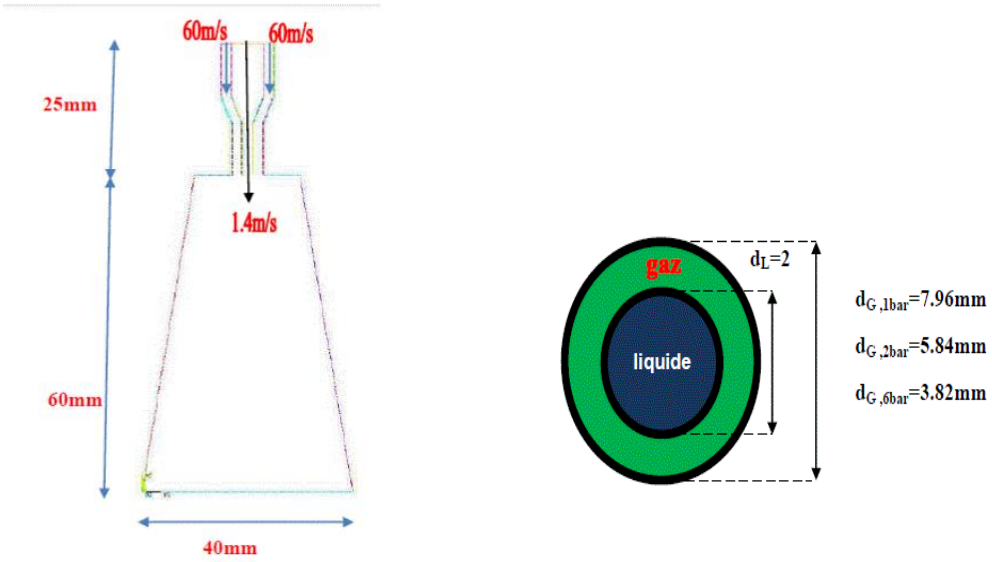


Figure V.1. Présentations spatiales de la configuration géométrique.

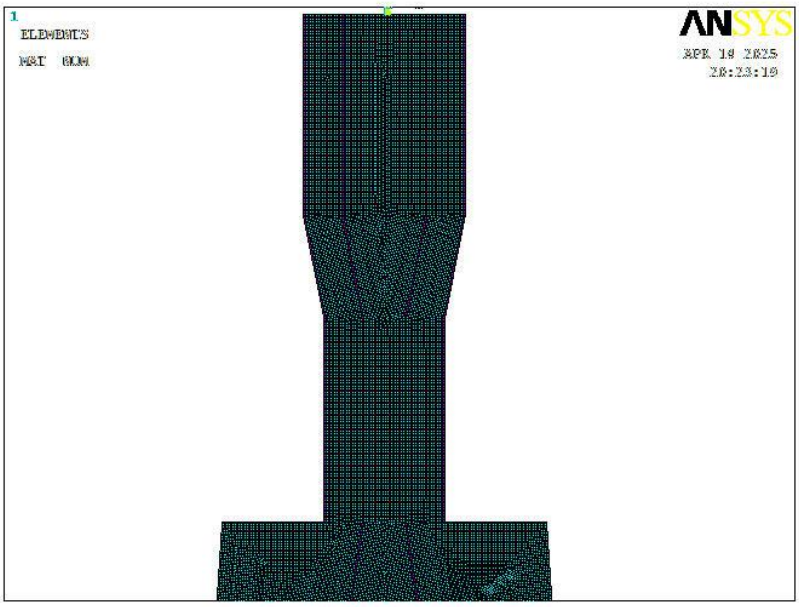


Figure V.2. Présentation de maillage de domaine de calcul et d`injection avec zoom.

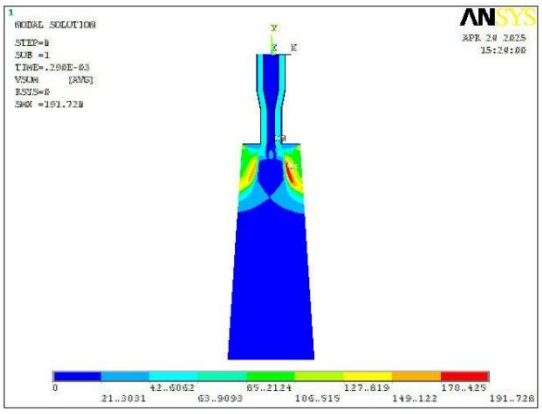


Figure V.3. Présentation spatiale de la vitesse axiale

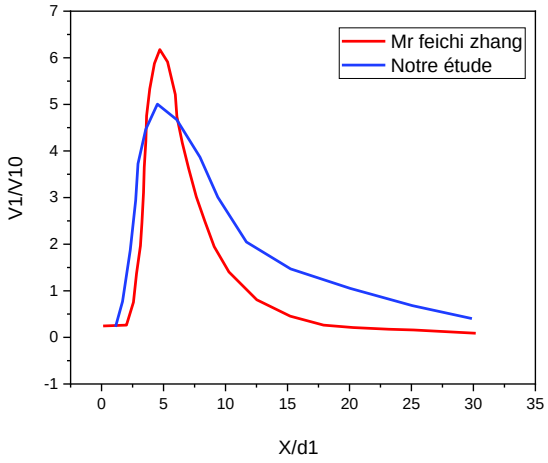


Figure V.4. Présentation graphique de variation du Flux volumique liquide axial de L`injecteur [11].

La figure V.4 montre comment évolue la vitesse axiale du jet liquide après sa sortie de l'injecteur. Nos résultats numériques s'alignent globalement bien avec ceux obtenus par Fieschi Zhang et ses collègues. Bien que les deux courbes présentent une tendance comparable, on note quelques différences mineures, probablement dues aux variations dans les méthodes de modélisation et de discrétisation utilisées.

De plus, avec un débit liquide fixé à 5 m^3/s, la vitesse du jet diminue progressivement en aval. Ce phénomène s'explique par la diffusion du jet et la fragmentation des ligaments primaires en structures plus fines, ce qui entraîne une perte d'énergie cinétique. Cette observation est conforme aux prédictions théoriques ainsi qu'aux résultats expérimentaux rapportés dans la littérature.

V.3.Etude de l'influence de la pression d'entrainement :

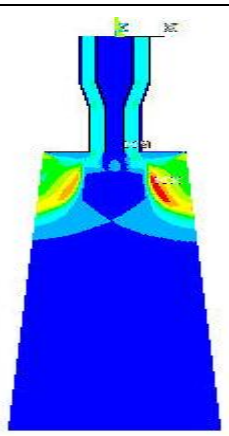
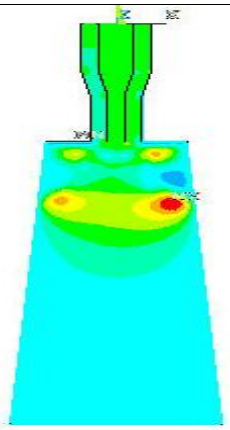
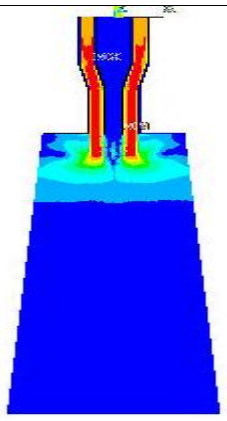
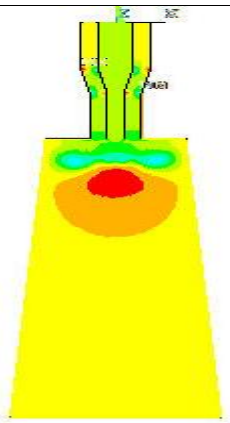
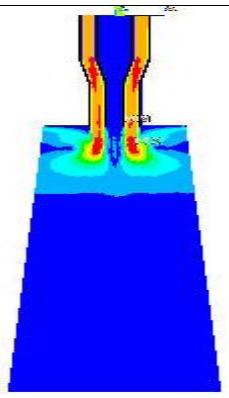
	Représentation spatiale de la vitesse	Représentation spatiale de la pression
P=1bar		
P=2bar		
P=6bar		

Figure V.5. Présentation spatiale de la vitesse et la pression pour diffèrent pressions d`injection

Les figures ci-dessus montrent l'évolution spatiale de la vitesse et de la pression pour trois pressions d'injection différentes : 1 bar, 2 bars et 6 bars. Ces représentations permettent de visualiser la dispersion du jet liquide à l'intérieur d'un cylindre.

Interprétation de la vitesse :

La distribution spatiale de la vitesse révèle une propagation initiale transverse du jet, suivie d'une dispersion à l'intérieur du cylindre. Cette propagation devient progressivement plus homogène, traduisant une stabilisation de la vitesse. Cette homogénéité est cruciale pour garantir une répartition uniforme du carburant, condition essentielle à une combustion efficace et complète.

Interprétation de la pression :

Les cartes de pression illustrent des variations notables en fonction de la pression d'injection. Une pression plus élevée, comme à 6 bars, induit une zone de haute pression plus marquée dans la chambre. Ces différences peuvent être dues :

A la quantité de carburant injectée,

Aux propriétés physico-chimiques du carburant,

Aux variations du volume de la chambre au cours du processus.

Une pression élevée indique une injection plus vigoureuse ou une combustion plus intense, tandis qu'une pression plus basse peut refléter une combustion moins optimale ou une injection plus modérée.

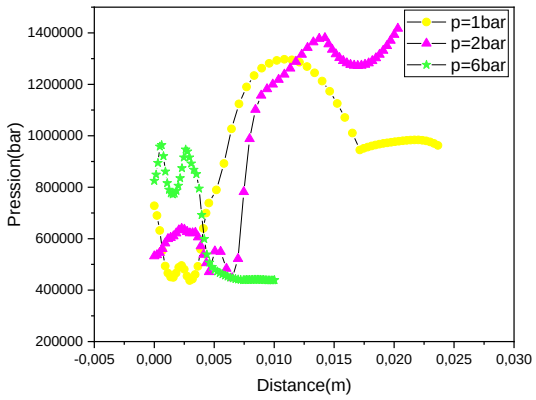


Figure V.6.la variation de la pression transversale pour trois différentes pressions d'injection.

La figure montre la variation de la pression transversale selon la distance pour trois pressions d'injection (1 bar,2 bar et 6 bar)

L'axe des abscisses représente la distance (en mètres) le long de l'axe de l'injecteur, et l'axe des ordonnées représente la pression transversale (en bar).

Analyse des courbes :

Injection à 6 bar :

Comportement : Courbe stable, pression proche de zéro après une courte distance.

Interprétation : Le jet traverse l'environnement sans grandes fluctuations de pression, indiquant un écoulement maîtrisé et stable.

Injection à 2 bar :

Comportement : Pic de pression vers 0,015 m, suivi d'une stabilisation.

Interprétation : Ce pic suggère une onde de pression ou instabilité locale due à l'interaction entre le jet et l'air.

Ensuite, la pression se stabilise à un niveau plus élevé que celui de l'injection à 6 bar.

Injection à 1 bar :

La courbe est plus irrégulière, avec des fluctuations importantes.

Interprétation probable : L'injection à faible pression provoque une turbulence accrue et un écoulement moins contrôlé.

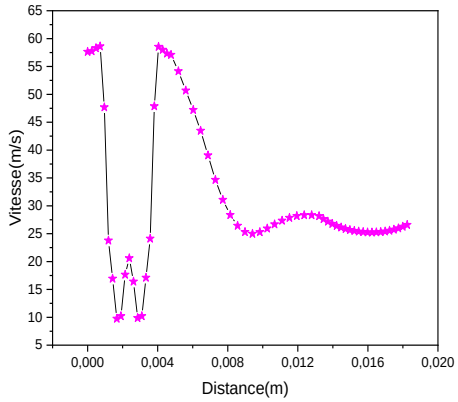
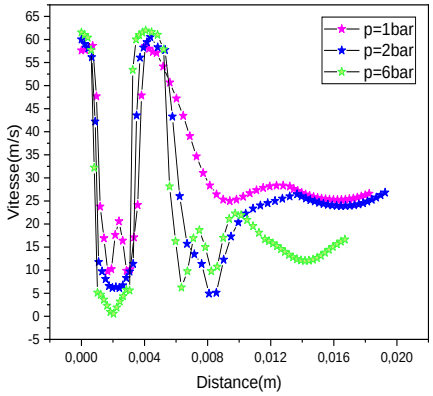
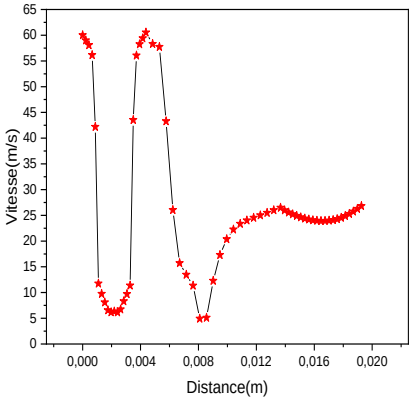
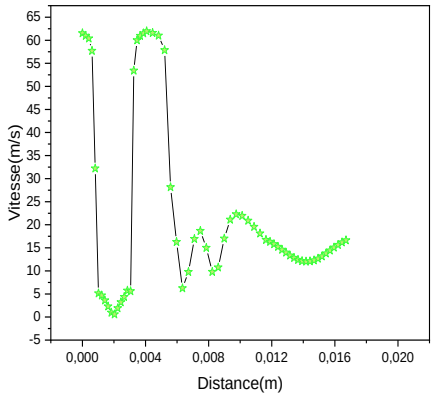
Conclusion :

Une pression d'injection élevée (6 bar) favorise un jet plus stable et mieux dirigé.

Des pressions plus faibles entraînent plus d'instabilités, ce qui peut réduire l'efficacité de la combustion ou du mélange dans certaines applications.

.

V.4.Représentation des profils des vitesses :

	Profil de vitesse	Comparaison
P=1bar		
P=2bar		
P=6bar		

FigureV.7. Présentation des profils des vitesses dans chaque pression et ça comparaison

La Figure 7 ci-dessous présente l'évolution du profil de vitesse du jet liquide en fonction de la distance le long de l'axe de l'injecteur, pour trois pressions d'injection : 1 bar, 2 bars et 6 bars. La sous-figure de droite permet une comparaison directe des trois courbes.

Analyse et Interprétation :

À 1 bar :

Un pic de vitesse très marqué (≈180 m/s) est observé autour de 0,012 m.

Suivi d'une diminution rapide.

Cela traduit une forte instabilité du jet à basse pression, avec une accélération soudaine puis une désintégration.

À 2 bars :

La vitesse varie entre 20 et 60 m/s.

Moins de fluctuations extrêmes que pour 1 bar.

Amélioration de la stabilité, bien que certaines instabilités persistent.

À 6 bars :

Vitesse régulière entre 40 et 80 m/s, sans pics extrêmes.

Le jet est beaucoup plus stable et la pénétration du carburant est plus homogène.

Conclusion Générale :

Ces résultats mettent en évidence l'impact crucial de la pression d'injection sur :

La stabilité du jet,

La dynamique de désintégration,

Et donc l'efficacité de la combustion.

V.5.Analyse des résultats des simulations numériques pour le cas référence :

V.5.1. P=1bar

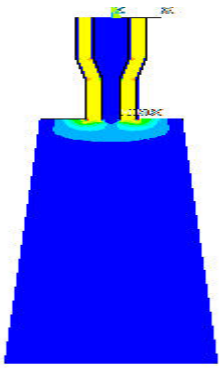
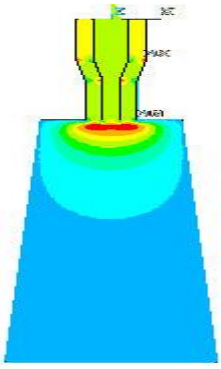
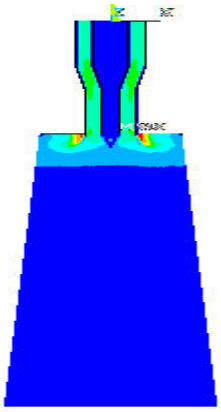
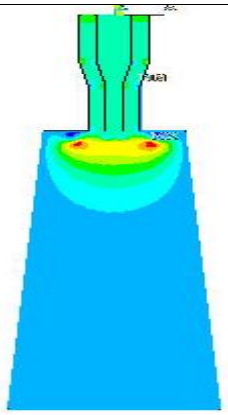
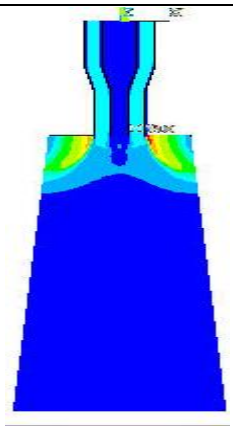
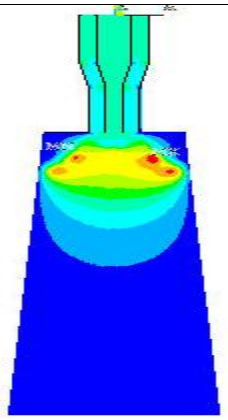
	Représentation spatiale de la vitesse	**Représentation spatiale de la pression**
$4*10^{-3}$s		
$1*10^{-4}$ s		
$2*10^{-4}$ s		

Figure V.8. Présentation spatiale de la dynamique de diffusion du jet dans le cylindre pour une pression d'injection P= 1bar

La Figure V.8 ci-dessous illustre l'évolution spatiale de la vitesse et de la pression du liquide injecté dans la chambre de combustion à une pression d'injection de 1 bar. Les résultats sont présentés pour trois instants différents (4×10^{-5} s, 1×10^{-4} s, 2×10^{-4} s), permettant d'observer la dynamique du jet au cours du temps.

Observations principales :

À chaque instant, on observe une progression de la zone colorée (représentant la vitesse du liquide) vers le bas de la chambre de combustion. Cela indique que le jet s'étend progressivement, occupant un volume de plus en plus important au fil du temps.

Les zones de pression (indiquées par différentes couleurs) montrent une diffusion de plus en plus homogène dans la chambre de combustion à mesure que le temps avance. La pression initialement concentrée autour de l'injecteur se répartit sur un volume plus large.

Interprétation physique :

La propagation progressive de la vitesse traduit la dispersion du jet liquide initialement injecté. À mesure que le temps passe, le liquide se mélange davantage avec le gaz ambiant, ce qui augmente la zone de vitesse élevée et favorise une meilleure homogénéisation du mélange air-carburant.

La diffusion uniforme de la pression est le résultat d'une répartition spatiale progressive de l'énergie d'injection. Cela contribue à éviter la formation de zones de surpression locales, ce qui est bénéfique pour une combustion plus régulière et contrôlée.

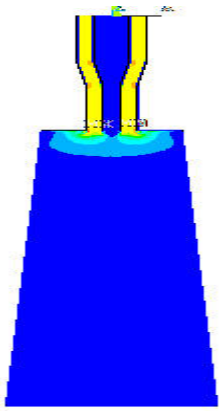
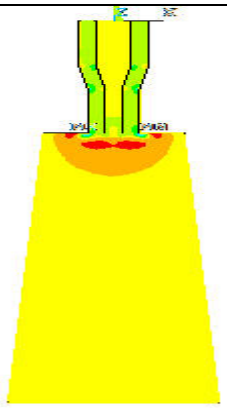
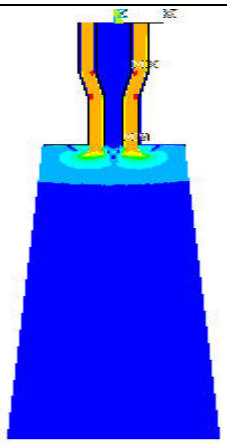
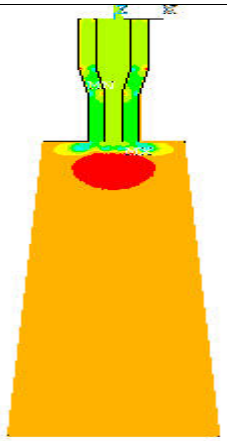
Aux premiers instants (4×10^{-5} s), la vitesse et la pression sont très localisées près de l'injecteur. À mesure que le temps avance (1×10^{-4} s, puis 2×10^{-4} s), la zone affectée par le jet s'élargit, témoignant d'une dynamique de mélange et de diffusion efficace.

Une propagation progressive et une diffusion uniforme de la pression favorisent un mélange air-carburant homogène, essentiel pour une combustion efficace et une réduction des émissions polluantes.

Comprendre ces évolutions permet d'optimiser la géométrie de l'injecteur et les paramètres d'injection pour améliorer la performance globale du moteur.

En résumé, la Figure V.8 met en évidence l'importance de la dynamique d'injection à basse pression pour la dispersion et la répartition du carburant dans la chambre de combustion. L'analyse de ces phénomènes est cruciale pour le développement de moteurs à combustion interne plus performants et plus propres

V.5.2. P=2bar

	Représentation spatiale de la vitesse	Représentation spatiale de la pression
$4*10^{-5}$ s		
$1*10^{-4}$ s		

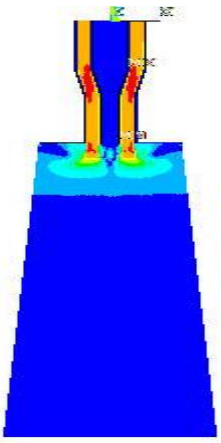
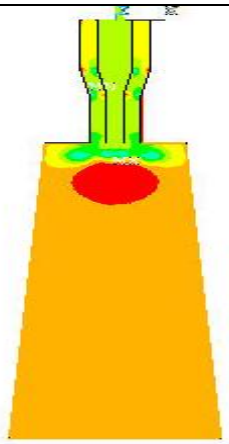
$2*10^{-4}$ s		

Figure V.9. Présentation spatiale de la dynamique de diffusion du jet dans le cylindre pour une pression d'injection P= 2bar

La Figure V.9 illustre l'évolution spatiale de la vitesse et de la pression du liquide injecté dans le cylindre pour une pression d'injection de 2 bars, à trois instants différents : 4×10^{-5} s, 1×10^{-4} s et 2×10^{-4} s.

Observations principales :

1. **La vitesse du fluide :**

- Propagation transversale : On observe que la zone colorée représentant la vitesse s'élargit latéralement à chaque instant. Cela signifie que le jet ne se contente pas de progresser axialement, mais diffuse également de manière transversale dans le cylindre.
- Évolution temporelle : Plus le temps avance, plus la zone de vitesse élevée s'étend, indiquant une dispersion progressive du jet liquide dans la chambre de combustion.

2. **La pression :**

- Propagation retardée : Aux deux premiers instants (4×10^{-5} s et 1×10^{-4} s), la pression reste localisée près de la zone d'injection. Ce n'est qu'au troisième instant (2×10^{-4} s) que la pression commence à se diffuser plus largement dans la chambre.
- Distribution non instantanée : Contrairement à la vitesse, la pression met un certain temps à se répartir de façon homogène, traduisant une dynamique différente entre la propagation du mouvement du fluide et celle de la pression.

Interprétation physique :

- Diffusion transversale de la vitesse est due à la dispersion initiale du jet, influencée par les forces d'inertie, la turbulence générée par l'impact du jet avec le gaz ambiant, et les variations locales de pression. Cela favorise un mélange plus homogène du carburant avec l'air, essentiel pour une bonne combustion.
- Le retard dans la diffusion de la pression s'explique par la résistance de l'environnement (gaz déjà présent, parois du cylindre) et la dynamique de l'écoulement. La géométrie de la chambre et la viscosité du fluide jouent également un rôle important dans la manière dont la pression se propage.

Conclusion :

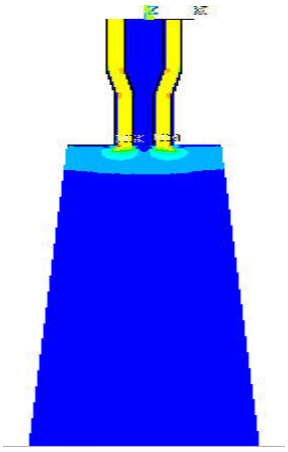
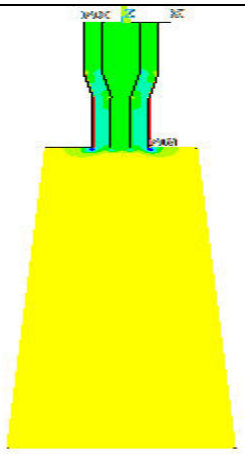
La Figure V.9 met en évidence deux phénomènes clés lors de l'injection à 2 bars :

Une diffusion transversale marquée de la vitesse du jet, favorisant le mélange du carburant.

Une propagation retardée de la pression, qui dépend de la dynamique de l'écoulement et de la géométrie de la chambre.

Ces observations sont essentielles pour affiner la conception des systèmes d'injection et améliorer les performances des moteurs à combustion interne.

V.5.3. P=6bars

	Représentation spatiale de la vitesse	**Représentation spatiale de la pression**
$4*10^{-5}$ s		

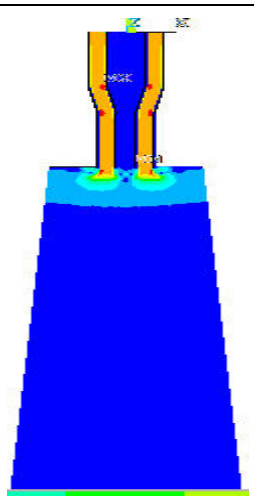
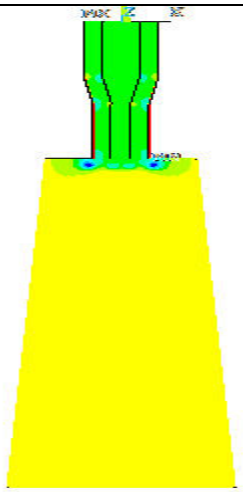
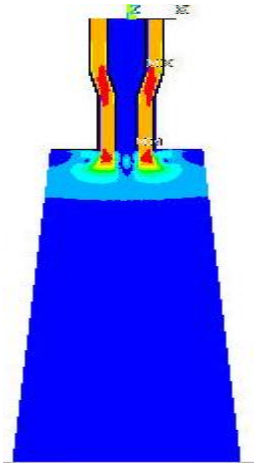
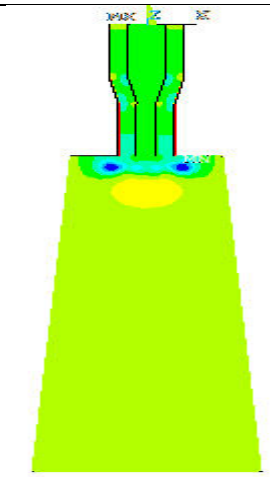
$1*10^{-4}$ s		
$2*10^{-4}$ s		

Figure V.10. Présentation spatiale de la dynamique de diffusion du jet dans le cylindre pour une pression d'injection P= 6bar

La figure montre la représentation spatiale de la vitesse et de la pression du liquide à trois instants différents :

T1=4*10-^{5} s

T2=1*10^{-4} s

T3=2*10^{-4} s

On observe que :

La vitesse maximale est localisée au niveau de l'orifice d'injection, avec un gradient de vitesse décroissant au fur et à mesure que l'on s'éloigne de ce point.

La pression est élevée dans les premières zones d'injection, puis décroît progressivement avec la distance.

À mesure que le temps avance, la zone influencée par l'écoulement du fluide s'élargit, indiquant une diffusion temporelle du fluide dans la chambre.

Interprétation physique :

Similitude avec la pression de 2 bars : Les profils de vitesse et de pression montrent un comportement similaire à ceux obtenus pour une pression d'injection de 2 bars, malgré une pression initiale plus élevée. Cela suggère que la pression d'injection n'est pas le seul facteur dominant dans la dynamique d'écoulement.

Rôle de la géométrie et des propriétés du fluide : Ces résultats mettent en évidence l'influence majeure de la géométrie de la chambre de combustion et des caractéristiques du fluide (viscosité, densité, etc.) sur la répartition du fluide.

Diffusion temporelle : La progression du front de fluide avec le temps confirme une diffusion continue, probablement facilitée par des mécanismes de turbulence et de mélange fluide-fluide. Cela favorise un mélange homogène du fluide injecté avec le gaz présent dans la chambre.

V.6.Représentation des profils de vitesses différentes périodes :

	Profile de vitesse

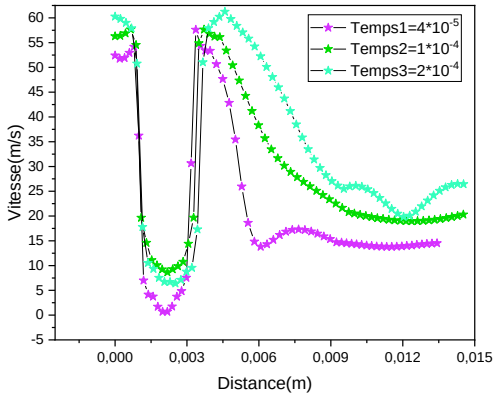
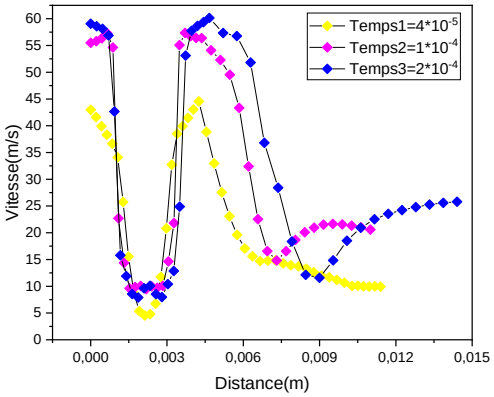
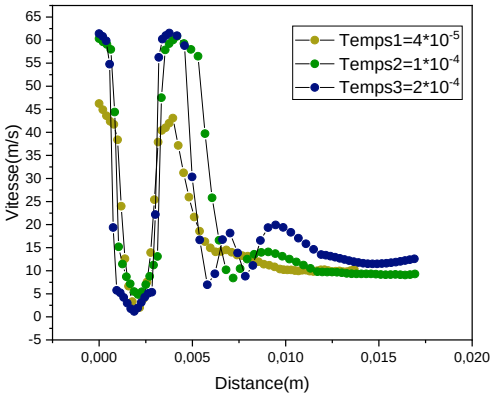
P=1bar	
P=2bar	
P=6 bar	

Figure V.11. Présentation des profils des vitesses différentes périodes de temps de 3 cas

La figure V.11 illustre le profil de vitesse du fluide en fonction de la distance axiale dans le cylindre moteur, à différents moments de la phase de compression, pour trois pressions d'injection : 1 bar, 2 bars et 6 bars.

À P = 1 bar :

Le fluide présente une vitesse globalement faible, ce qui est typique d'une injection à basse pression.

On observe plusieurs pics de vitesse désordonnés le long de l'axe.

Ces irrégularités reflètent un écoulement instable dû à des phénomènes de turbulence et à une dispersion aléatoire de fragments liquides.

Le mélange n'est pas bien structuré, ce qui peut nuire à la qualité de la combustion ultérieure.

À P = 2 bars :

La courbe montre une structure plus nette de l'évolution de la vitesse.

Après une légère chute initiale, la vitesse augmente progressivement, indiquant que le fluide commence à accélérer dans le cylindre.

Ce comportement traduit un meilleur couplage entre l'injection et la dynamique de compression.

À P = 6 bars :

L'effet de l'injection sous haute pression est nettement amplifié.

Le fluide atteint des vitesses plus élevées (jusqu'à environ 70 m/s), et la montée est plus franche et plus rapide qu'à 2 bars.

Cette dynamique est le signe que le fluide est fortement influencé par la compression du cylindre, qui agit comme un moteur d'accélération.

La structure de l'écoulement est plus régulière et homogène, ce qui favorise un meilleur mélange air-carburant.

Interprétation physique :

Plus la pression d'injection est élevée, plus l'énergie initialement fournie au fluide est grande.

Cela se traduit par une accélération plus marquée et une meilleure cohérence du profil de vitesse.

Ces résultats mettent en évidence l'importance d'un bon réglage de la pression d'injection pour optimiser les phases de compression et de combustion.

Conclusion partie I :

Les résultats issus des simulations numériques apportent un éclairage précieux sur la dynamique de l'écoulement dans la chambre de combustion des moteurs à combustion interne. En analysant l'évolution spatiale de la vitesse et de la pression du fluide pour différentes pressions d'injection, plusieurs observations significatives ont pu être mises en évidence.

Premièrement, une instabilité notable de la vitesse a été détectée, principalement due aux ondes instables générées par la séparation des fragments liquides. Ces instabilités peuvent perturber l'homogénéité de l'écoulement et affecter les performances globales du moteur, soulignant ainsi l'importance d'une maîtrise fine du processus d'injection.

Deuxièmement, les résultats ont mis en évidence l'influence directe de la pression d'injection sur l'évolution de la vitesse. Une pression plus élevée, comme 6 bars, induit une accélération plus marquée du fluide après la phase de compression. Ce comportement suggère un potentiel d'amélioration de l'efficacité de combustion à travers l'optimisation de la pression d'injection.

Enfin, bien que des profils similaires aient été observés pour différentes pressions, des variations locales subsistent. Cela démontre à la fois la robustesse des phénomènes globaux et la sensibilité des détails d'écoulement aux conditions d'injection. Ces différences doivent être prises en compte pour adapter le système d'injection aux besoins spécifiques du moteur.

En résumé, les analyses réalisées confirment le rôle clé de la pression d'injection dans le contrôle des mécanismes de dispersion, de mélange et de combustion. Ces résultats constituent une base solide pour améliorer la conception des moteurs et maximiser leur performance énergétique tout en réduisant les émissions.

En conclusion, ces résultats fournissent des informations précieuses pour la conception et l'optimisation des systèmes d'injection dans les moteurs à combustion interne, en mettant en lumière l'impact de la pression d'injection sur les dynamiques de l'écoulement et la combustion.

Partie II

En nous appuyant sur l'étude de FEISCHI Zhang, qui a révélé des résultats encourageants dans l'optimisation du procédé d'injection, nous avons réalisé plusieurs expériences sous différentes configurations en employant la méthode VOF. Nous avons aussi ajouté un champ magnétique et utilisé la méthode MHD pour étudier cet effet.

Les résultats obtenus sont les suivants :

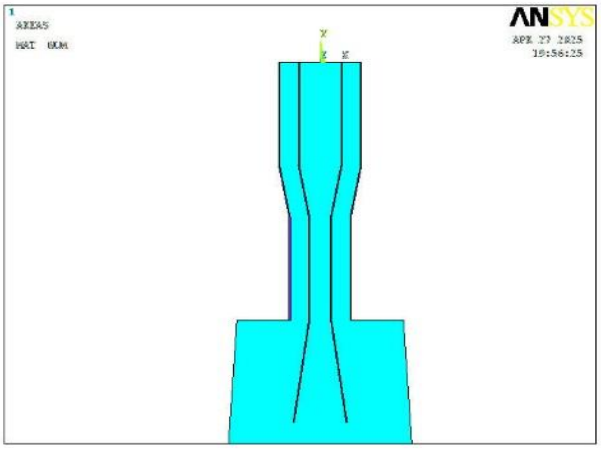
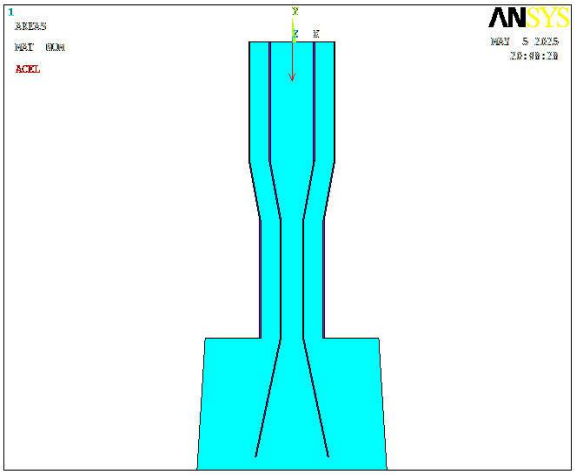


Figure V.12. Géométrie 1



FigureV.13. Géométrie 2

V.7.Etude de l'influence la pression d'entrainement :

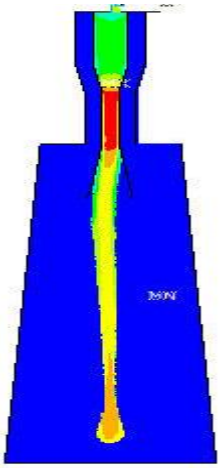
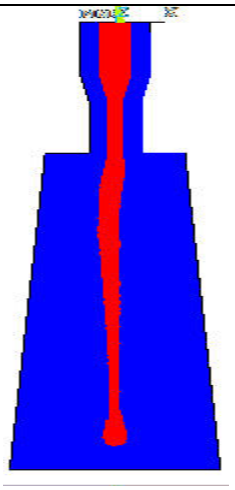
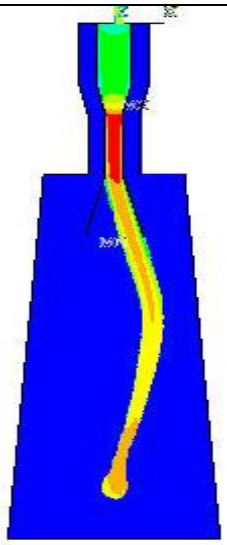
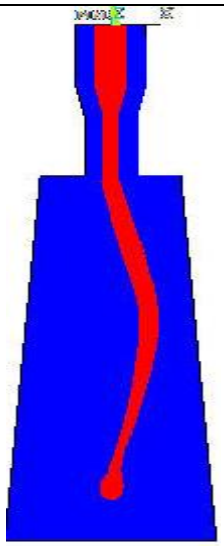
	Représentation spatiale de la vitesse	**Représentation spatiale de la fraction volumique**
Géométrie 1		
Géométrie 2		

Figure V.14. Présentation spatial de la vitesse et la fraction volumique

La figure V.14 illustre l'effet de deux géométries d'injecteur sur la distribution spatiale de la vitesse et de la fraction volumique du liquide injecté. Chaque géométrie influence de manière significative la dynamique du jet au sein de la chambre.

Pour la Géométrie 1, on observe une propagation principalement axiale du liquide. La distribution de la vitesse est concentrée le long de l'axe central, suggérant une injection fortement dirigée. Ce comportement est corroboré par la fraction volumique, qui montre une colonne liquide dense suivant une trajectoire rectiligne. La ramification visible à une certaine distance traduit une phase secondaire de dispersion, possiblement induite par des effets de turbulence ou de perte de stabilité après la phase initiale d'accélération. Cela indique un mode d'injection qui favorise la pénétration en profondeur avant mélange.

Dans le cas de la Géométrie 2, le fluide adopte une trajectoire incurvée, tant dans la représentation de la vitesse que dans celle de la fraction volumique. La courbure du jet révèle une influence géométrique plus marquée sur l'orientation du flux, probablement en

raison de parois inclinées ou d'une section d'injection divergente. La fraction volumique montre une distribution plus élargie et plus homogène du liquide dès l'amont, ce qui pourrait faciliter un mélange rapide et efficace avec l'air environnant.

Interprétation physique :

Ces résultats mettent en lumière l'importance de la géométrie de l'injecteur dans le contrôle de la direction et de la dispersion du fluide. La Géométrie 1 favorise une injection axiale avec une dispersion différée, adaptée à des applications nécessitant une portée accrue du jet. En revanche, la Géométrie 2 engendre une dispersion latérale précoce, potentiellement avantageuse pour un mélange rapide et homogène, favorisant une meilleure combustion.

V.8.Représentation des profils des vitesses :

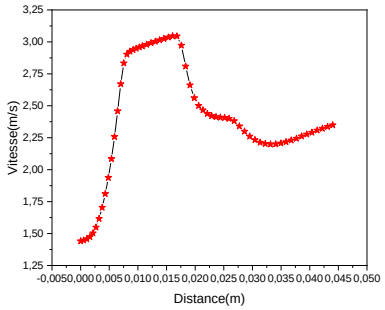
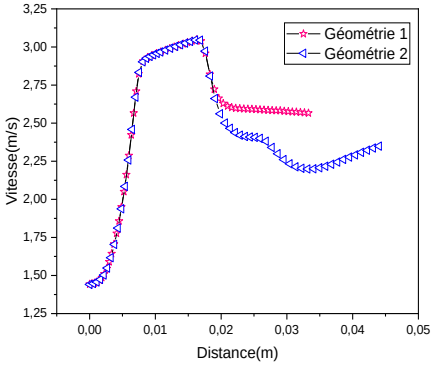
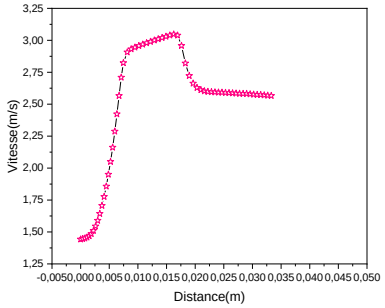
	Profile de vitesse	**Comparaison**
Géométrie 1		
Géométrie 2		

Figure V.15. Présentation les profils de vitesse de deux géométries et ça comparaison

La figure V.15 illustre les profils de vitesse du fluide pour deux géométries différentes après un processus d'injection, ainsi qu'une comparaison directe des deux cas. On observe pour chaque géométrie l'évolution de la vitesse en fonction de la distance, ce qui permet d'identifier les différences de comportement du fluide selon la configuration.

Analyse de la Géométrie 1

La courbe de la géométrie 1 montre une augmentation rapide de la vitesse du fluide dès le début de l'injection, atteignant un pic d'environ 4,5 m/s à une distance de 0,03 m.

Cette la vitesse chute brusquement jusqu'à 0 m/s, puis repart à la hausse pour atteindre environ 4 m/s.

Cette évolution suggère un phénomène de ramification du liquide, où une partie du flux principal se sépare, provoquant une augmentation momentanée de la vitesse. La chute à 0 m/s suivie d'une remontée pourrait être due à une réorganisation du fluide, puis à un retour à un écoulement plus stable et uniforme.

Analyse de la Géométrie 2

Pour la géométrie 2, la vitesse augmente progressivement jusqu'à 4 m/s, valeur qui reste stable sur une courte distance (jusqu'à environ 0,005 m).

Ensuite, une nouvelle accélération apparaît, menant à un maximum d'environ 8 m/s, avant une chute à 0 m/s puis une remontée à 4 m/s.

Cette évolution indique une libération de liquide du flux principal, générant une accélération supplémentaire du fluide restant. Les variations rapides qui suivent (chute à 0 puis remontée) peuvent être attribuées à des phénomènes de turbulence ou à des interactions avec l'environnement immédiat du fluide injecté.

Comparaison des deux géométries :

La comparaison met en évidence des différences marquées dans la dynamique du fluide : la géométrie 2 présente une accélération plus importante et un pic de vitesse plus élevé que la géométrie 1.

Ces différences traduisent l'influence de la géométrie sur la distribution de la vitesse et la stabilité de l'écoulement après injection.

Comprendre ces variations permet d'optimiser les paramètres d'injection pour des applications spécifiques, en choisissant la géométrie la plus adaptée au résultat souhaité.

Conclusion :

L'analyse des profils de vitesse met en lumière l'importance de la géométrie sur le comportement du fluide après injection. Les phénomènes observés (ramification, accélération, turbulence) fournissent des informations précieuses pour l'optimisation des procédés d'injection dans divers domaines industriels et scientifiques

V.9. Présentation des différents périodes du temps de chaque géométrie :

V.9.1. Géométrie 1 :

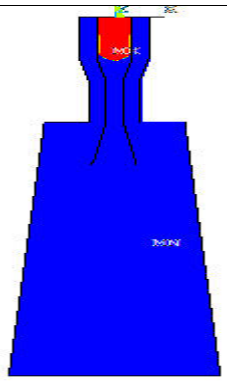
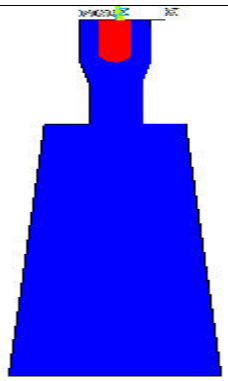
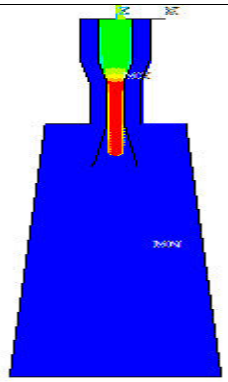
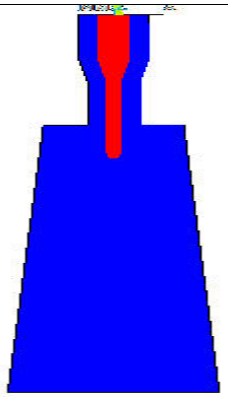
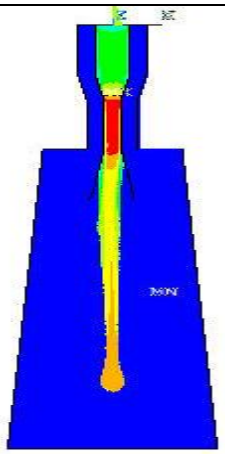
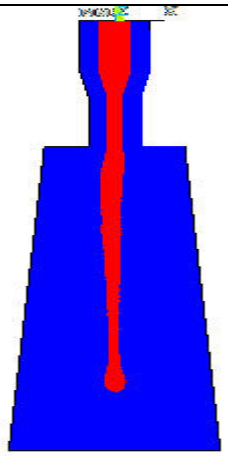
	Représentation spatiale de la vitesse	Représentation spatiale de la fraction volumique
$6.9*10^{-3}s$		
$1.59*10^{-2}s$		
$3.15*10^{-2}s$		

Figure V.16. Présentation des différents périodes du temps de géométrie 1

La figure V.16 présente, à travers trois instants différents, la distribution spatiale de la vitesse (à gauche) et de la fraction volumique (à droite) d'un liquide s'écoulant dans une chambre de mélange comportant un obstacle central. On observe l'évolution du mouvement du fluide à mesure qu'il progresse dans la chambre.

Observations principales :

Sur chaque image, le liquide s'écoule d'abord de façon axiale, puis subit une déviation nette à l'approche de l'obstacle. Cette déviation conduit à une séparation du flux principal, une partie du liquide étant forcée de contourner l'obstacle et de se disperser latéralement. Ce phénomène de ramification est visible à tous les instants étudiés, confirmant la cohérence du comportement induit par la présence de l'obstacle.

L'obstacle agit comme une perturbation majeure du flux. Selon la littérature, lorsqu'un fluide rencontre un obstacle, des phénomènes de séparation de couche limite, de recirculation et de formation de tourbillons latéraux peuvent apparaître. Cela entraîne une redistribution de la vitesse et de la fraction volumique, comme le montrent les images : le liquide se divise, et des zones de concentration plus faible apparaissent en aval de l'obstacle.

Les trois instants illustrés montrent que la ramification n'est pas un phénomène transitoire mais persiste durant toute la phase d'écoulement représentée. Cela indique que l'effet de l'obstacle est structurel et non ponctuel.

Explication physique :

La présence de l'obstacle modifie la dynamique interne du fluide :

Elle provoque une séparation du flux principal, forçant une partie du liquide à se dévier latéralement.

Cette séparation génère des zones de recirculation et de turbulence en aval de l'obstacle, comme le confirment des études sur l'écoulement autour d'obstacles.

La géométrie de la chambre de mélange devient ainsi un facteur déterminant du comportement du fluide, influençant la distribution de vitesse et la répartition volumique.

Conclusion :

La figure V.16 illustre de manière claire l'impact d'un obstacle sur l'écoulement d'un liquide dans une chambre de mélange. L'obstacle induit une ramification persistante du flux, soulignant l'importance de la géométrie dans la conception et l'optimisation des systèmes d'injection. Prendre en compte ces effets permet d'ajuster la performance et le contrôle des procédés fluidiques pour répondre à des besoins spécifiques

V.9.2. Géométrie2 :

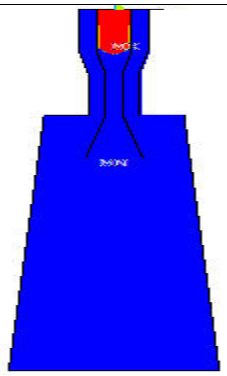
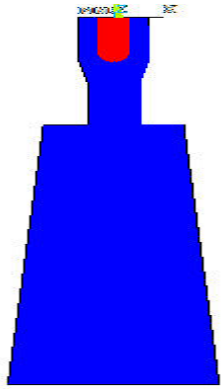
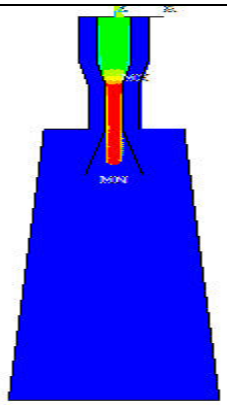
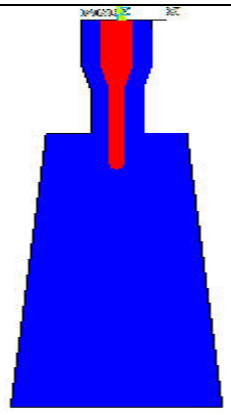
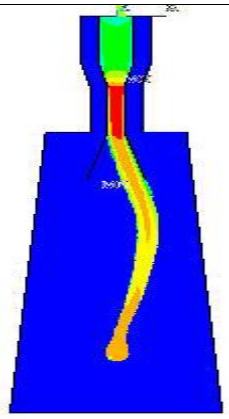
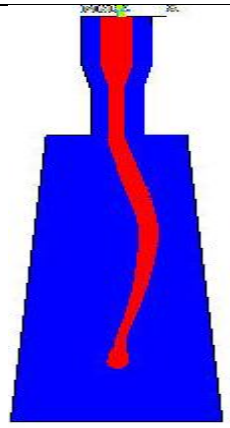
	Représentation spatiale de la vitesse	Représentation spatiale de la fraction volumique
6.9*10-^{3}s		
1.59*10-^{2}s		
3.15*10-^{2}s		

Figure V.17. Présentation des différents périodes du temps de géométrie 2

La figure V.17 présente, pour la deuxième configuration géométrique (géométrie 2), l'évolution spatiale de la vitesse (à gauche) et de la fraction volumique (à droite) du liquide à trois instants différents. Les images illustrent le comportement du fluide lors de son

passage à travers une chambre de mélange de type convergente-divergente, en présence d'un obstacle.

Aux premiers instants (en haut de la figure, temps court), le liquide est injecté de façon relativement uniforme dans la chambre. Les profils de vitesse et de fraction volumique montrent une propagation axiale, sans perturbation majeure apparente.

À mesure que le liquide progresse, il traverse une zone où la section varie. Dans cette zone convergente-divergente, la dynamique du fluide est modifiée : la variation de la section transversale entraîne des accélérations et des décélérations locales, modifiant la répartition de la vitesse et de la fraction volumique.

Après avoir quitté la zone convergente-divergente et rencontré un nouvel obstacle, la trajectoire du liquide devient nettement incurvée (visible sur la dernière ligne de la figure). Cette incurvation est due aux forces latérales exercées par l'obstacle et à la modification du champ de pression dans la chambre, forçant le jet à se dévier de l'axe principal.

Explication physique :

La géométrie convergente-divergente agit sur la dynamique du fluide en modifiant la distribution des vitesses et des pressions selon le principe de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie mécanique (Bernoulli). Lorsqu'un obstacle est ajouté dans cette configuration, il génère des gradients de pression latéraux et des forces de déviation, expliquant la trajectoire incurvée du jet observée sur les images.

Ces résultats soulignent l'importance de la géométrie de la chambre de mélange dans le contrôle du comportement du liquide. La présence d'une zone convergente-divergente, combinée à un obstacle, permet de moduler la direction, la vitesse et la distribution volumique du fluide, ce qui peut être exploité pour optimiser les performances dans des applications d'injection ou de mélange.

Conclusion :

La figure V.17 démontre que le passage du liquide dans une chambre de mélange convergente-divergente, suivi de la rencontre avec un obstacle, induit une incurvation marquée de la trajectoire du fluide. Cette dynamique résulte directement de l'interaction entre la géométrie de la chambre et les forces générées par l'obstacle, mettant en évidence le rôle crucial de la conception géométrique pour le contrôle précis des écoulements fluides dans les systèmes d'injection

V.10.Représentation des profils de vitesse dans différentes périodes de temps de chaque géométrie :

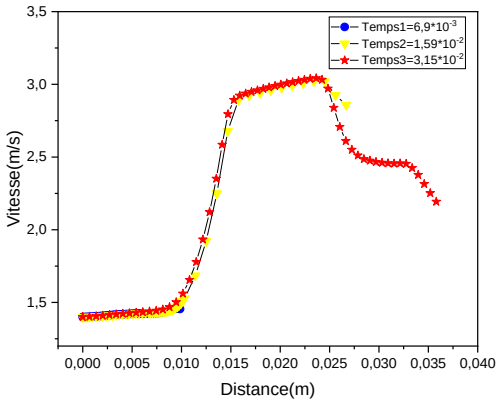
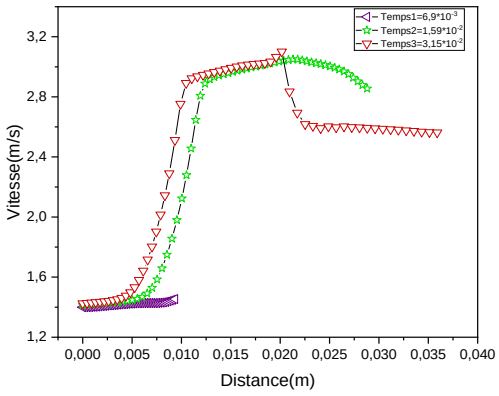
	Profils de vitesse
Géométrie 1	
Géométrie 2	

Figure V.18. Présentation des profils de vitesse dans différentes périodes de temps de chaque géométrie

La figure V.18 compare les profils de vitesse d'un liquide en fonction de la distance axiale pour deux géométries différentes (Géométrie 1 et Géométrie 2), à trois instants distincts. Chaque courbe représente l'évolution de la vitesse à un moment précis du processus d'injection.

Géométrie 1 :

Pour les trois périodes de temps représentées, la vitesse du liquide augmente progressivement au début de l'écoulement, jusqu'à atteindre un plateau maximal d'environ 3,3 m/s.

Cette vitesse maximale est ensuite maintenue sur une certaine distance, indiquant une zone d'écoulement quasi-stationnaire.

Enfin, on observe une chute progressive de la vitesse en aval, traduisant une perte d'énergie du fluide.

Explication physique :

Cette évolution est caractéristique d'un écoulement soumis à un gradient de pression initial lors de l'injection. Le fluide subit une accélération due à cette pression, ce qui explique la montée rapide de la vitesse.

La zone où la vitesse reste constante traduit un régime établi, où les forces motrices et résistantes s'équilibrent temporairement.

La diminution en fin de parcours s'explique par les pertes de charge (liées aux frottements visqueux et aux interactions avec les parois du conduit), qui freinent progressivement le fluide à mesure qu'il s'éloigne de la zone d'injection.

Géométrie 2 :

Dans cette configuration, la vitesse augmente aussi progressivement pour les trois périodes de temps, mais atteint un maximum plus élevé, autour de 5,5 m/s.

Après ce maximum, la vitesse diminue légèrement pour se stabiliser autour de 4,8 m/s, sans atteindre 0 m/s comme dans la première géométrie.

Explication physique :

La différence s'explique par la géométrie de la chambre de mélange, probablement de type convergente-divergente, qui favorise une accélération supplémentaire du fluide.

Cette configuration réduit les pertes de charge et permet au liquide de conserver une vitesse plus élevée sur une plus grande distance, même après le pic initial.

Comparaison et implications

La comparaison met en évidence l'influence majeure de la conception de la chambre de mélange sur la dynamique de l'écoulement.

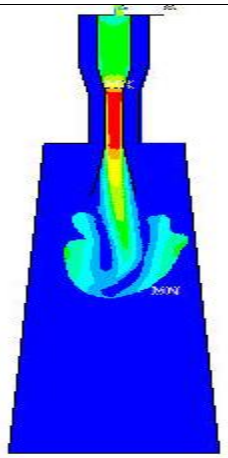
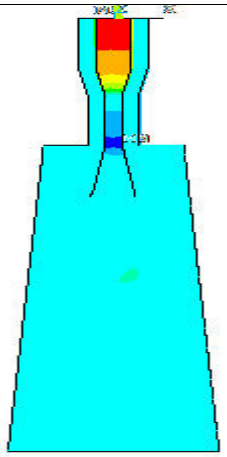
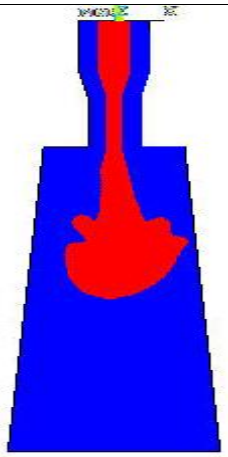
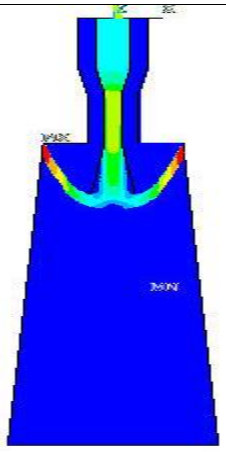
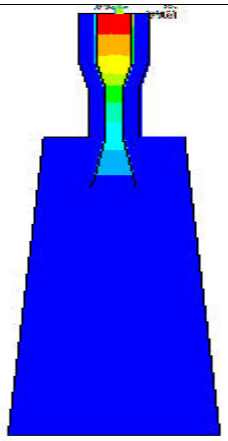
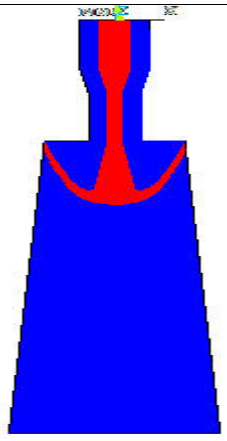
Une géométrie optimisée (comme la deuxième) permet d'atteindre des vitesses plus élevées et de limiter la décélération, ce qui peut être crucial pour améliorer l'efficacité des processus d'injection.

Ces résultats soulignent l'importance de bien choisir la géométrie de la chambre de mélange pour répondre aux objectifs de performance, que ce soit en termes de vitesse, d'homogénéité ou de stabilité de l'écoulement.

Conclusion :

La figure V.18 démontre que la géométrie de la chambre de mélange influe fortement sur la dynamique de la vitesse du liquide injecté. Une configuration optimisée permet non seulement d'atteindre des vitesses maximales plus élevées, mais aussi de maintenir un écoulement plus stable, ce qui constitue un atout pour les procédés d'injection nécessitant précision et efficacité.

V.11 Etude de l'effet de champ magnétique :

	Représentation spatiale de la vitesse	**Représentation spatiale de la pression**	**Représentation spatiale de la fraction volumique**
Cas 1: b=0,02 tesla			
Cas 2: b=0,08 tesla			

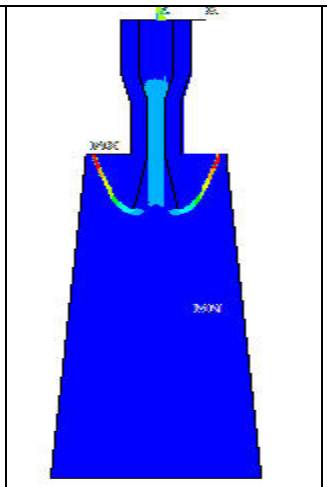
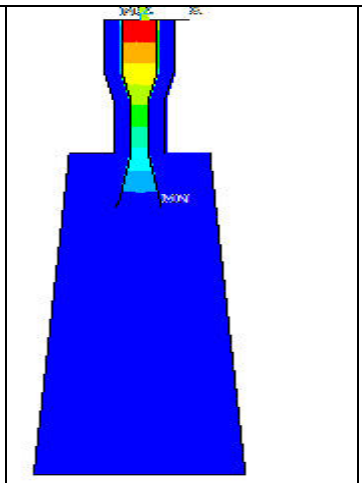
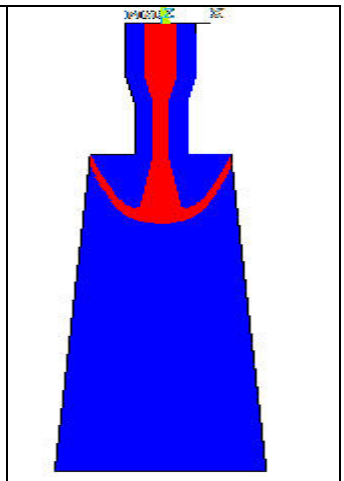
Cas 3: b=0,1 tesla			

Figure V.19. Représentation spatiale de la vitesse, la pression et la fraction volumique de l'effet de champ magnétique en 3 cas

L'image montre l'évolution de l'effet du champ magnétique sur un écoulement dans un moule, avec trois représentations : la vitesse, la pression et la fraction volumique du fluide.

Interprétation physique :

Effet sur la vitesse :

b=0,02 tesla : On observe une vitesse plus élevée avec un écoulement plus

b=0,08 tesla :La vitesse diminue, l'écoulement devient plus dirigé et contrôlé.

b=0,1 tesla : L'écoulement est encore plus ralenti et symétrique — signe que le champ magnétique a un fort effet de freinage (effet MHD ou freinage magnétique).

Explication :

Le champ magnétique génère une force de Lorentz qui s'oppose au mouvement du fluide conducteur, réduisant ainsi la vitesse.

Effet sur la pression :

La pression maximale diminue au fur et à mesure que l'intensité du champ augmente.

A b=0,1 tesla la distribution de pression est plus localisée au centre, ce qui traduit une perte de dynamique de l'écoulement.

Interprétation : Le champ magnétique freine l'écoulement, donc une moindre pression est nécessaire pour pousser le fluide.

Effet sur la fraction volumique :

b=0,02 tesla le fluide s'étale largement dans la cavité.

b=0,08 tesla l'écoulement est plus contenu et localisé.

Conclusion : Le champ magnétique contrôle mieux la pénétration du fluide dans le moule, limitant les défauts de remplissage (comme les turbulences ou les piégeages d'air).

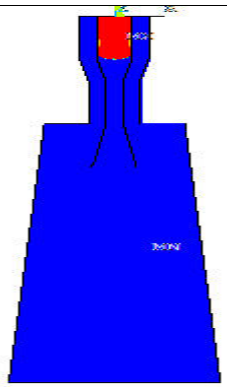
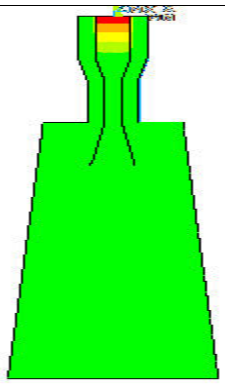
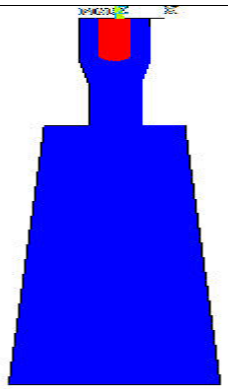
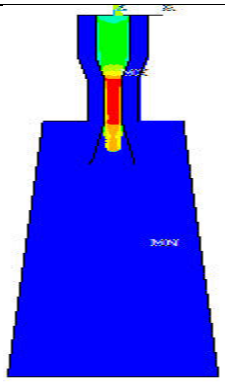
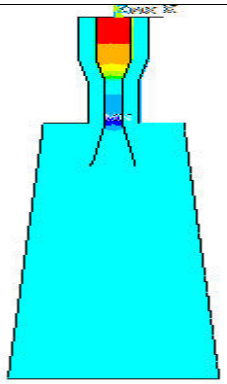
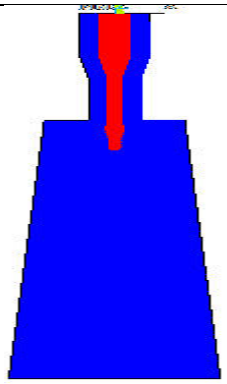
Conclusion générale :

- L'application d'un champ magnétique :

- Réduit la vitesse de l'écoulement (effet de freinage).
- Stabilise la pression.
- Contrôle le remplissage en rendant l'écoulement plus symétrique et régulier.
- Cela peut être utile dans les procédés comme le moulage de métaux liquides pour éviter les défauts et améliorer la qualité de la pièce obtenue.

V.12. Présentation des différents périodes du temps de chaque cas :

V.12.1. Cas1 : b=0,02 tesla

	Représentation spatiale de la vitesse	**Représentation spatiale de la pression**	**Représentation spatiale de la fraction volumique**
$6.9*10^{-3}$s			
1.59*10 -2 s			

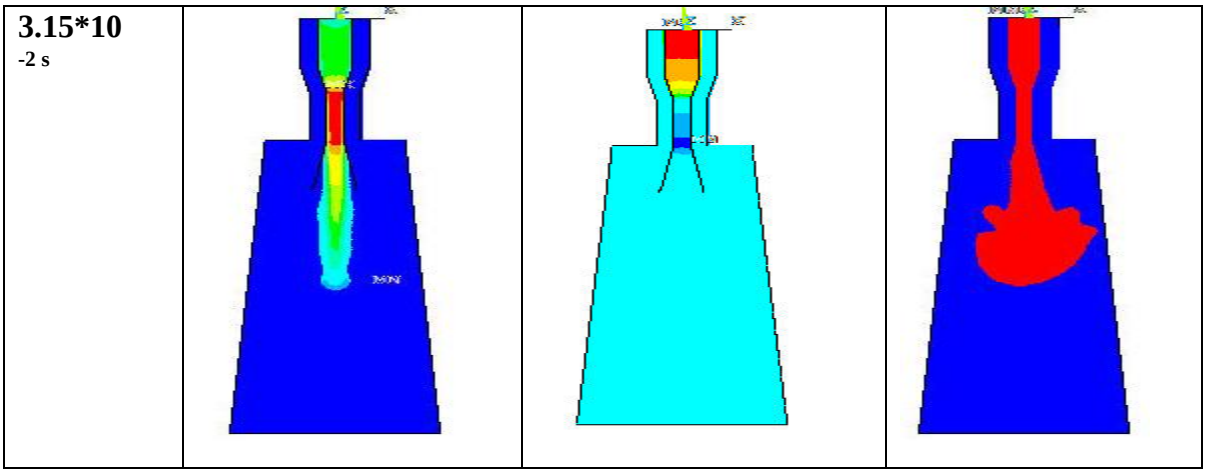


Figure V.20. Présentation des différents périodes du temps pour la cas 1

La figure montre l'évolution du remplissage d'une cavité sous l'effet d'un champ magnétique appliqué, à trois instants différents. Chaque ligne présente la distribution de la vitesse, de la pression, et de la fraction volumique du fluide à un instant donné.

À $t = 6.9 \times 10^{-3}$ s :

- Le champ magnétique influence déjà l'écoulement dès l'entrée. On observe une accélération initiale du fluide (zone rouge en vitesse).
- La pression est concentrée à l'entrée avec une forme caractéristique de canalisation sous effet MHD (Magnétohydrodynamique).
- La fraction volumique indique le début du remplissage : le fluide commence à remplacer l'air dans la cavité.

À $t = 1{,}59 \times 10^{-2}$ s :

- L'effet du champ magnétique se traduit par un écoulement plus structuré, avec une propagation plus homogène de la vitesse dans la cavité.
- La distribution de la pression montre une dissipation plus douce, indiquant une réduction des turbulences.
- Le fluide avance de manière plus stable, réduisant les risques de formation de bulles.

À $t = 3{,}15 \times 10^{-2}$ s :

- Le remplissage est presque complet ; l'effet du champ magnétique a permis une progression régulière du fluide.
- La pression reste bien répartie, ce qui favorise un remplissage uniforme
- La fraction volumique montre une cavité bien remplie (zone rouge), signe d'un écoulement contrôlé et efficace.

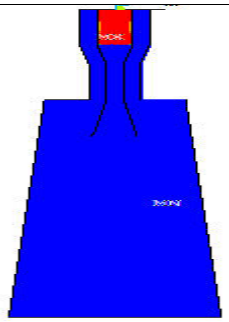
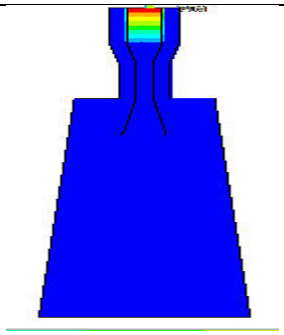
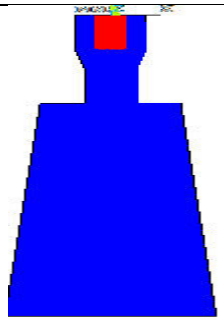
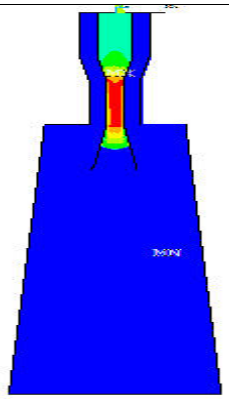
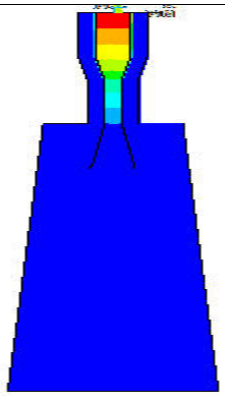
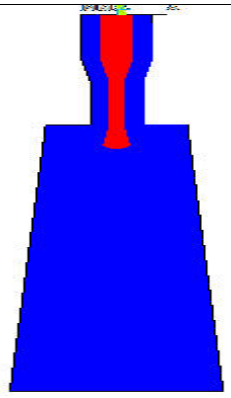
Conclusion

- L'application du champ magnétique améliore le comportement de l'écoulement en :
- Accélérant l'injection,
- Réduisant les gradients de pression brusques,

- Favorisant un remplissage progressif et homogène.

Cela confirme l'intérêt de la méthode MHD dans les procédés d'injection pour améliorer la qualité finale des pièces moulées.

V.12.2. Cas2 : b=0,08 tesla

	Représentation spatiale de la vitesse	**Représentation spatiale de la pression**	**Représentation spatiale de la fraction volumique**
$6.9*10^{-3}$			
$1.59*10^{-2}$			

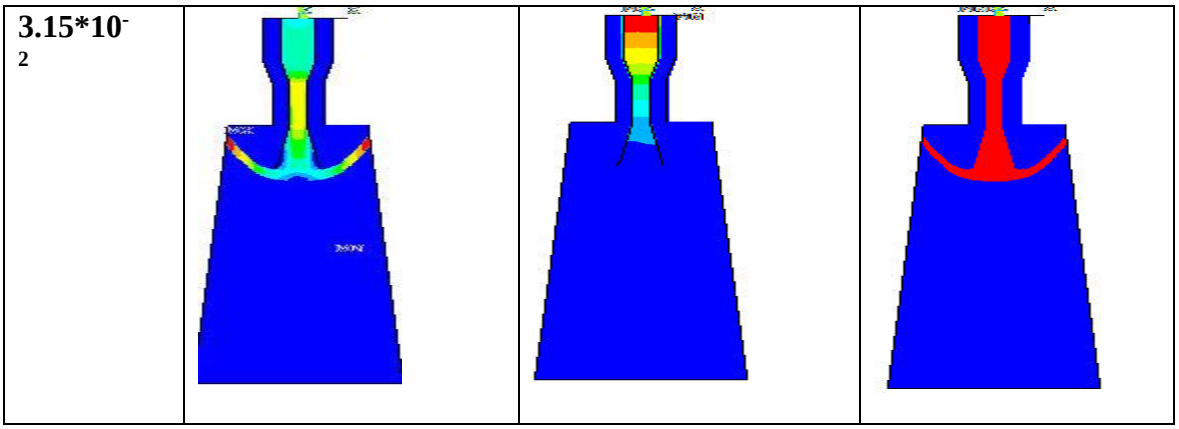


Figure V.21. Présentation des différents périodes du temps pour la cas 2

La figure montre l'évolution du remplissage d'une cavité sous l'effet d'un champ magnétique appliqué, à trois instants différents. Chaque ligne présente la distribution de la vitesse, de la pression, et de la fraction volumique du fluide à un instant donné.

À $t = 6.9 \times 10^{-3}$ s :

- Le champ magnétique influence déjà l'écoulement dès l'entrée. On observe une accélération initiale du fluide (zone rouge en vitesse).
- La pression est concentrée à l'entrée avec une forme caractéristique de canalisation sous effet MHD (Magnétohydrodynamique).
- La fraction volumique indique le début du remplissage : le fluide commence à remplacer l'air dans la cavité.

À $t = 1{,}59 \times 10^{-2}$ s :

- L'effet du champ magnétique se traduit par un écoulement plus structuré, avec une propagation plus homogène de la vitesse dans la cavité.
- La distribution de la pression montre une dissipation plus douce, indiquant une réduction des turbulences.
- Le fluide avance de manière plus stable, réduisant les risques de formation de bulles.

À $t = 3{,}15 \times 10^{-2}$ s :

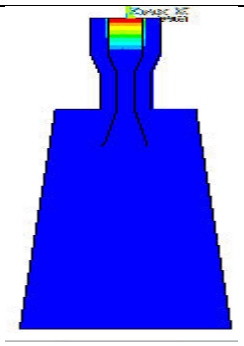
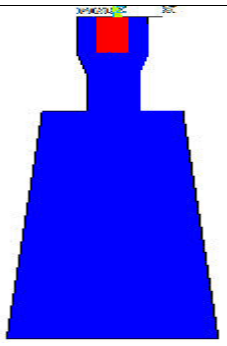
- Le remplissage est presque complet ; l'effet du champ magnétique a permis une progression régulière du fluide.
- La pression reste bien répartie, ce qui favorise un remplissage uniforme
- La fraction volumique montre une cavité bien remplie (zone rouge), signe d'un écoulement contrôlé et efficace.

Conclusion

- L'application du champ magnétique améliore le comportement de l'écoulement en :
- Accélérant l'injection,
- Réduisant les gradients de pression brusques,
- Favorisant un remplissage progressif et homogène.

Cela confirme l'intérêt de la méthode MHD dans les procédés d'injection pour améliorer la qualité finale des pièces moulées.

V.12.3. Cas 3 : b=0,1 tesla :

	Représentation spatiale de la vitesse	**Représentation spatiale de la pression**	**Représentation spatiale de la fraction volumique**
$6.9*10^{-3}$			

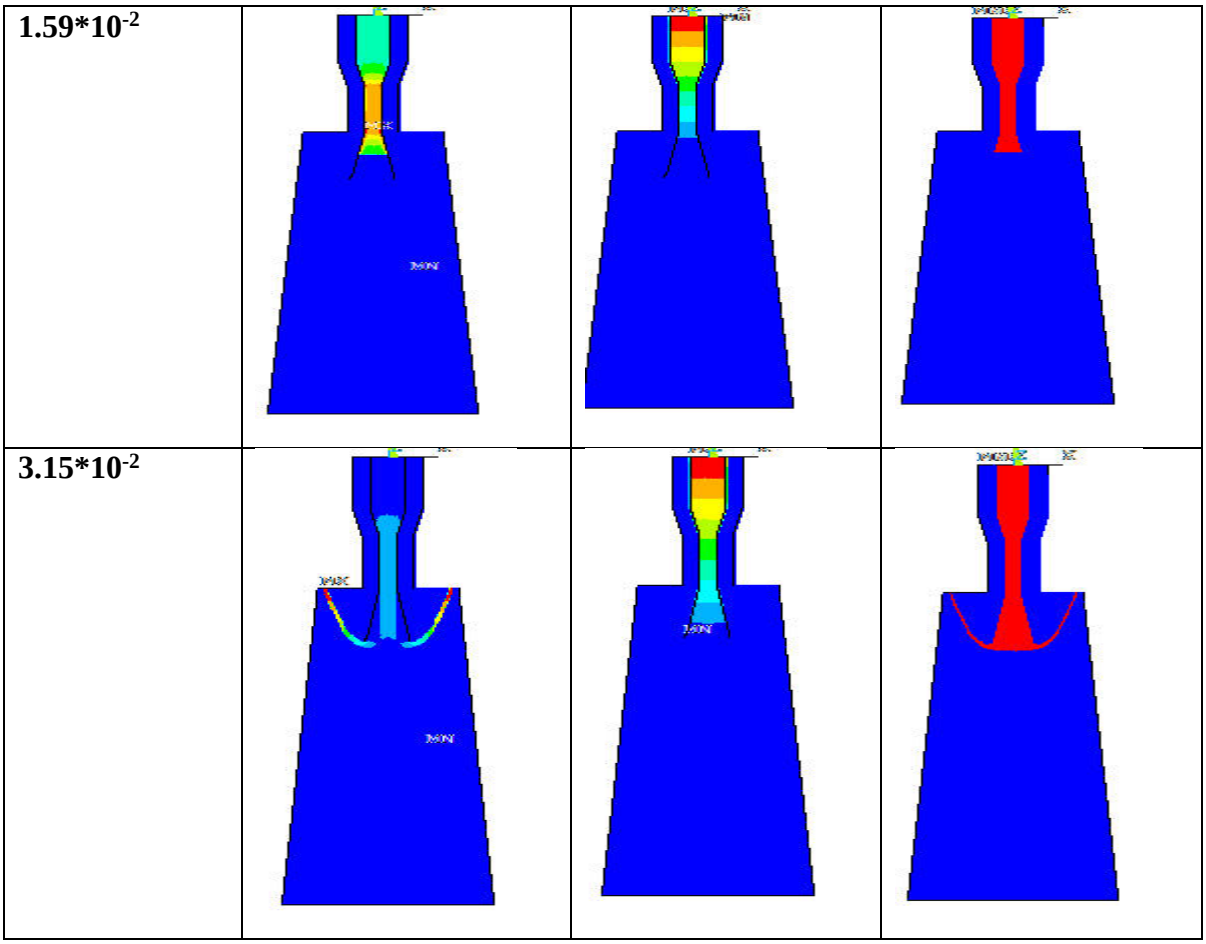


Figure V.22. Présentation des différents périodes du temps pour la cas 3

La figure montre l'évolution temporelle du jet d'un fluide à travers un injecteur à trois instants successifs et trois grandeurs sont analysées : vitesse, pression, et fraction volumique.

- **Évolution de la vitesse**

- Le fluide vient juste de sortir de l'injecteur, la vitesse est très élevée à l'orifice, concentrée au centre.
- Le jet commence à pénétrer la chambre. La zone de haute vitesse s'étire vers le bas.
- Le jet est bien développé et structuré, avec une vitesse centrée et une dispersion radiale très faible.

Conclusion : Le fluide est fortement accéléré en sortie d'injecteur. La vitesse est maximale sur l'axe central du jet, caractéristique d'un écoulement turbulent concentré.

- **Évolution de la pression**

- Haute pression à l'entrée du fluide. Forte chute au niveau du goulot.

- La pression diminue dans toute la zone du jet, ce qui traduit une conversion de l'énergie de pression en énergie cinétique.
- La pression est quasi constante dans le domaine, avec un gradient localisé uniquement à l'entrée.

Conclusion : Le comportement est conforme au principe de Bernoulli : la pression chute lorsque le fluide accélère. Le champ de pression devient stable une fois le jet établi.

- **Évolution de la fraction volumique**
- Le liquide est concentré à l'entrée du domaine.
- Le jet de liquide se propage, la fraction volumique augmente dans l'axe du jet.
- Le jet est bien formé et occupe une large portion du domaine. On observe une interface nette entre le liquide injecté et l'air environnant.

Conclusion : Le fluide pénètre progressivement dans le domaine. La forme du jet reste

Interprétation physique globale

Ces résultats montrent un écoulement dynamique typique d'un jet sous pression :

- Le fluide subit une forte accélération à l'injection.
- Il traverse une chute de pression importante, typique du passage à travers une section réduite.
- La fraction volumique confirme une injection efficace, avec une bonne pénétration du liquide dans la chambre.
- Ce comportement est essentiel dans les systèmes de pulvérisation, combustion ou injection moteur, où la forme, la vitesse et la pénétration du jet influencent fortement la performance du système.

V.13. Comparaison entre méthode l'effet de champ magnétique et les résultats de notre étude expérimentale :

	Représentation spatiale de la vitesse	**Représentation spatiale de la fraction volumique**

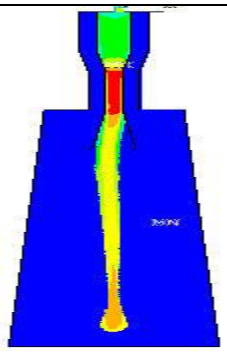
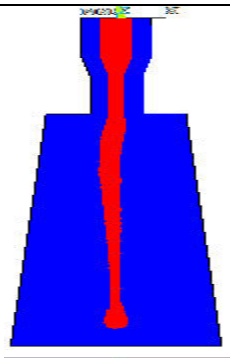
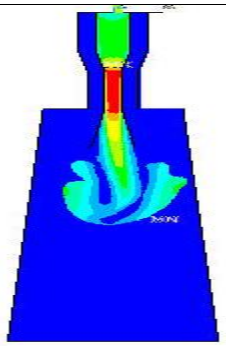
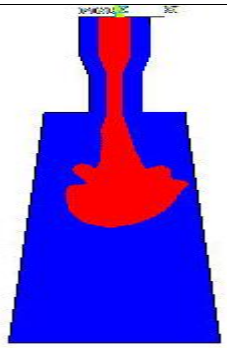
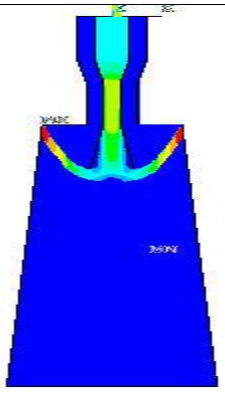
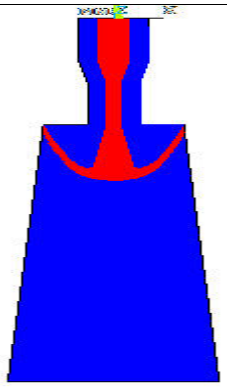
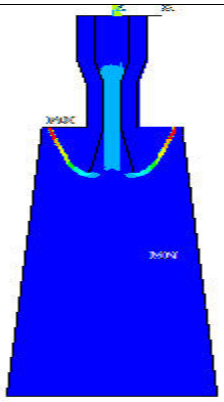
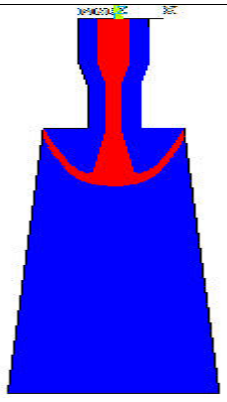
les résultats de notre étude expérimentale			
Effet de chamo magnétique	**b=0,02 tesla**		
	b=0,08 tesla		
	b=0,1 tesla		

Figure V.23. Représentation spatiale de comparaison de la vitesse et la fraction volumique du l'effet de champ magnétique et les résultats de notre étude expérimentale" pour les 3 cas

La figure montre une comparaison visuelle entre la méthode VOF et la méthode MHD en ce qui concerne l'écoulement d'un jet liquide. Elle présente à gauche la distribution de la vitesse et à droite la fraction volumique du fluide injecté.

Avec la méthode VOF le jet descend de façon continue, droite et bien concentrée. La vitesse reste élevée au centre, et le fluide pénètre profondément dans le domaine, sans dispersion. Cela traduit un écoulement contrôlé uniquement par la pression et la gravité, sans influence électromagnétique.

Les résultats obtenus avec la méthode MHD, pour différentes intensités de champ magnétique, représentées par le paramètre b :

- **À b=0,02 tesla**, on observe les premières perturbations du jet : la trajectoire est légèrement déviée, des mouvements circulaires apparaissent, et le fluide commence à s'élargir.
- **À b=0,08 tesla**, les effets magnétiques deviennent plus forts. Le jet est freiné, sa vitesse diminue au centre, et il s'étale davantage sur les côtés. La pénétration est plus courte.
- **À b=0,1 tesla :** l'écoulement est presque entièrement stoppé. Le fluide reste en haut sans s'infiltrer dans le domaine, ce qui indique un confinement dû à un champ magnétique très intense.

Cette figure montre clairement que l'augmentation du champ magnétique (via le paramètre b) permet de modifier et contrôler l'écoulement du fluide. Contrairement à la méthode VOF, la méthode MHD permet d'agir activement sur la forme et la vitesse du jet, ce qui peut être très utile dans des procédés industriels ou énergétiques impliquant des fluides conducteurs.

Conclusion partie II :

À la lumière des commentaires précédents, il apparaît clairement que la géométrie de la chambre de mélange joue un rôle déterminant dans le comportement du liquide après l'injection. Les différentes configurations étudiées ont mis en évidence que même des modifications géométriques minimes — telles que l'introduction d'obstacles ou des variations de section — peuvent provoquer des changements significatifs dans la dynamique d'écoulement et la distribution du liquide. Ces ajustements influencent non seulement la trajectoire du fluide, mais également les profils de vitesse observés, tant en termes de valeurs maximales que d'évolution le long de l'axe de la chambre.

Les résultats obtenus sont en accord avec les principes fondamentaux de la dynamique des fluides, notamment la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, ce qui confère à ces observations une assise théorique solide.

Par ailleurs, l'étude de l'effet du champ magnétique a montré que ce dernier constitue un levier de contrôle particulièrement efficace de l'écoulement. L'augmentation du champ magnétique permet d'agir activement sur la forme et la vitesse du jet, modifiant ainsi la trajectoire du fluide et ses caractéristiques dynamiques. Cette capacité de modulation s'avère particulièrement utile dans les systèmes faisant intervenir des fluides conducteurs, notamment dans les applications industrielles ou énergétiques où la précision de l'injection est cruciale.

En définitive, cette étude met en évidence l'importance d'intégrer pleinement la géométrie de la chambre de mélange dans toute démarche de conception ou d'optimisation des systèmes d'injection. Une compréhension fine des interactions entre l'écoulement, la configuration géométrique et l'effet du champ magnétique constitue une condition essentielle pour améliorer l'efficacité et la performance des dispositifs étudiés.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Conclusion générale :

Dans ce travail, nous avons examiné en détail le système d'injection, un élément crucial dans le fonctionnement des moteurs à combustion interne. En contrôlant l'alimentation en carburant, ce système influence directement les performances et les émissions des moteurs. Notre étude s'est concentrée sur la simulation numérique des phénomènes diphasiques, tels que la dispersion et l'atomisation, dans la chambre de combustion. Cette approche nous a permis de comprendre comment les liquides se dispersent et circulent dans la chambre, offrant ainsi des perspectives pour optimiser la conception des moteurs.

Dans le premier chapitre, nous avons fourni une vue d'ensemble de l'injection dans les moteurs à combustion interne et de ses différentes formes. Le deuxième chapitre a passé en revue les travaux antérieurs réalisés par divers chercheurs, mettant en évidence les résultats clés de leurs études.

Le troisième chapitre a détaillé notre méthodologie de simulation, où nous avons utilisé la méthode des éléments finis avec la méthode des types multiples et le modèle de réseau fixe dans le logiciel ANSYS pour résoudre les équations pertinentes. Une attention particulière a été accordée à l'effet du champ magnétique, introduit dans notre modélisation pour analyser son influence sur le comportement des jets liquides. Ce champ agit selon les principes de la magnétohydrodynamique (MHD), modifiant la trajectoire du liquide et favorisant une meilleure atomisation, grâce à la réduction de la taille des gouttelettes.

Dans le dernier chapitre, nous avons validé notre approche en comparant nos résultats de simulation avec ceux d'une étude antérieure menée par FEICHI ZHANG. Ensuite, nous avons présenté nos propres résultats de simulation pour analyser le phénomène de dispersion et d'atomisation dans la chambre de combustion, en examinant l'évolution de la pression d'entraînement et de la forme du col. L'introduction du champ magnétique a démontré une amélioration notable dans la finesse de la pulvérisation, renforçant l'efficacité de la combustion.

Grâce à notre expérience numérique, nous avons pu apporter une contribution significative à la compréhension de ces phénomènes. En particulier, nous avons amélioré l'étude initiale de FEICHI ZHANG en introduisant injecteur simultanément, basés sur nos résultats expérimentaux et en tenant compte des effets du champ magnétique.

En résumé, notre travail a permis de mieux appréhender les mécanismes complexes de dispersion et d'atomisation dans les moteurs à combustion interne. L'intégration du champ magnétique ouvre la voie à des améliorations innovantes dans la conception des systèmes d'injection, en vue d'une performance optimale et d'une réduction accrue des émissions polluantes.

Référence et bibliographique

Référence et bibliographique :

[1] JEAN-BAPTISTE Moreau, Modélisation de l'écoulement poly phasique à l'intérieure et en sortie des injecteur diesel, Thèse doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse 2005.

[2] CHRISTOPHE GAUTHIER docteur de L'INP Grenoble, Commande multi variable de la pression d'injection dans un moteur diesel Common rail, Automatique et Productique préparée au Laboratoire d'Automatique de Grenoble dans le cadre de l'Ecole Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du Signal, 2007

[3] Pierre-Arnaud Beau, Modélisation de l'atomisation d'un jet liquide Application aux sprays Diesel, Thèse doctorat Université de Rouen CoRIA , décembre 2006

[4] Marc Julien, performance à 4 temps v3.1, 2009/2012.

[5] PIERRE-ARNAUD BEAU (2008). Modélisation de l'atomisation d'un jet liquide Application aux sprays Diesel, thèse doctorat de l'école Doctorale de l'Université de Rouen, KOREA.

[6] ABDELLAOUI Amina et BENTAALLAH Yasser(2011), Simulation numérique de combustion dans un moteur Diesel turbocompressée, Mémoire professionnel (niveau M).Génie Mécanique à l'Université Tlemcen.

[7] ALLICHE Mounir, Article Etude et Dimensionnement d'une Chambre de combustion d'un Moteur à Jet utilisant un Propergol Liquide.

[8] Piscaglia, F., F. Giussani, et al. (2021). "Vortex Flow and Cavitation in Liquid Injection: A Comparison between High-Fidelity CFD Simulations and Experimental Visualizations on Transparent Nozzle Replicas." International Journal of Multiphase Flow 138: 103605.

[9] Najafi, S., P. Mikaniki, et al. (2020). "Numerical simulation of heavy fuel oil atomization using a pulsed pressure-swirl injector." Chinese Journal of Chemical Engineering

[10] Ahmed, A., B. Duret, et al. (2020)." Numerical simulation of cavitation for liquid injection in non-condensable gas" International Journal of Multiphase Flow 127: 103269.

[11] Feichi, Z., Z. Thorsten, et al. (2020). "Effect of elevated pressure on air-assisted primary atomization of coaxial liquid jets: Basic research for entrained flow gasification." Renewable and Sustainable Energy Reviews 134: 110411.

[12] Moneib, H. A., Mahfouz, A., El-Fatih, A., & Emara, A. (2021). Near-field spray characterization of a spill return atomizer using a PIV laser sheet. Fuel, 289, 119792.

[13] Pandal, A., García-Oliver, J. M., Novella, R., & Pastor, J. M. (2018). A computational analysis of local flow for reacting Diesel sprays by means of an Eulerian CFD model. International Journal of Multiphase Flow, 99, 257-27220.

[14] ZHANG, Feichi, et al. Numerical and Experimental Investigation of Primary Breakup of High-Viscous Fluid at Elevated Pressure. In: Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, December. 2019. p. 1-8.

[15] Wachter S ,Jakobs T ,Kolb T .Experimental investigation on the influence of system pressure on resulting spray quality and jet breakup applying pressure adapted twin-fluid nozzles.Int J Multiph Flow2020;125

[16] VANKESWARAM, S. K., et al. Evaluation of spray characteristics of aviation biofuels and Jet A-1 from a hybrid airblast atomizer. Experimental Thermal and Fluid Science, 2023, 142: 110820

[17] Jin, W., Xiao, J., Ren, H., Li, C., Zheng, Q., & Tong, Z. (2022). Three-dimensional simulation o impinging jet atomization of soft mist inhalers using the hybrid VOF-DPM model. Powder Technology, 407, 117622.

[18] Wachter, S., Jakobs, T., & Kolb, T. (2021). Towards system pressure scaling of gas assisted coaxial burner nozzles–An empirical model. Applications in Energy and Combustion Science, 5, 100019.

[19] Sun, H., Luo, Y., Ding, H., Li, J., Song, C., & Liu, X. (2021). Experimental investigation on atomization properties of impaction-pin nozzle using imaging method analysis. Experimental Thermal and Fluid Science, 122, 110322.

[20] Zhang, Y., Kang, C., GAO, K., & Zhao, H. (2020). Flow and atomization characteristics of a twin-fluid nozzle with internal swirling and self-priming

effects. International Journal of Heat and Fluid Flow, 85, 108632.23]] Piscaglia,

[21] Ménard ; T, S. Tanguy, and A. BERLEMONT. Coupling level set / VOF / ghost fluid Method Validation coupling level set / VOF / ghost fluid methods : Validation and application to 3d simulation of jet primary break-up. International Journal of Multiphase Flow, in press.

[22] PANDAL, Adrian; GARCIA-OLIVER, Jose M.; PASTOR, Jose M. Eulerian CFD modeling of nozzle geometry effects on ECN Sprays A and D: assessment and analysis. International Journal of Engine Research, 2020, 21.1: 73-88.

[23] korti Mohammed Chokri ; (simulation numérique des champs dynamique et thermique durant le moulage par injection à haute pression des métaux). Diplôme de magister université Abou Baker Belkaid Tlemcen, 2011-2012

[24] PHILIPE MARTY cours de transferts thermique conduction et rayonnement" Université Joseph Fourier Grenoble septembre 2001.

[25] YVESJANNOT transfert thermique école des mines Nancy 2009

[26] F KREITH "transmission de chaleur et thermodynamique université du colorado 1967

[27] B. E. LAUNDER, D, B. SPALDING, the numerical computation of turbulent transport, Adv. Géophysiques, vo118A, (1974).

[28] Paul FERREY, Modèles aux tensions de REYNOLDS avec prise en compte de l'intermittence de frontière, thèse pour l'obtention du Grade de docteur de l'université de POITIERS.

[29] Chapitre 2 : Modèle D'Etalement Et Traitement Numérique, Discrétisation la forme

[30] Présentée par Melle KAOUANE Malika ; mémoire de magister thème : analyse des contraintes mécaniques et de la fissuration des éléments en béton armé sous l'effet thermomécanique ; année2010/2011.

[31] Présentés par HANTZ Mathieu (Elève ingénieur, INSA de Strasbourg, Spécialité génie Civil), mémoire de fin d'étude, thème : Etude de l'optimisation du renforcement par des fibres de carbones des dalles en béton armé munies de trémies, en utilisant l'optimisation topologique ; Université Fédérale d'Uberlândia, Brésil.

Référence et Bibliographique :

[32] R.Vincent. Contribution à la Modélisation des Ecoulements Turbulents réactifs partiellement pré mélangés. Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2007.

[33] C. W Hirt, B.D. Nichols, « volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries » Journal of Computational Physics 39, 1 (1981), p201-225.