REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème :

Etude numérique de la dispersion des polluants Lors d'incendie dans un tunnel tertiaire

Présenté par :

-AHMED HEDJALA Hamza

-KADACHE Omar

Proposé et Dirigé par :

Pr. ZIRARI Mounir

Dr Mme. BRAHIM BELHOUARI Ratiba

Promotion 2023- 2024

ملخص:

تعتبر سلامة الركاب والسائقين أمرًا بالغ الأهمية، وبالتالي، عملنا على تطوير حلول شاملة لتحقيق هذا الهدف. قمنا بدراسة العوامل المختلفة التي تؤثر على اندلاع الحرائق وانتشار الدخان داخل الأنفاق، بما في ذلك المواد المستخدمة في بناء الأنفاق وأساليب الإطفاء المناسبة باستخدام برنامج (ANSYS APDL) للمحاكاة. عملنا أيضًا على تطوير نظام شامل للإنذار المبكر وإجلاء الطوارئ، بالإضافة إلى تصميم نظام فعال للتهوية وتبريد الأنفاق. هدفنا النهائي هو تحقيق بيئة آمنة ومستدامة للمسافرين والمستخدمين في البنية التحتية.

الكلمات المفتاحية: التشتت، الملوث، الحاقن، بخار الماء، النفق

Résumé :

La sécurité des passagers et des conducteurs est une importance capitale. Par conséquent, nous travaillerons sur le développement de solutions globales pour atteindre cet objectif. Nous étudierons les différents facteurs qui influent sur le déclenchement des incendies et la propagation de la fumée à l'intérieur des tunnels, y compris les matériaux utilisés dans la construction des tunnels et les méthodes d'extinction appropriées en utilisant le logiciel (ANSYS APDL) de simulation. Nous travaillerons également sur le développement d'un système complet de détection précoce d'incendie et d'évacuation d'urgence, en plus de concevoir un système efficace de ventilation et de refroidissement des tunnels. Notre objectif ultime est de créer un environnement sûr et durable pour les voyageurs et les utilisateurs de l'infrastructure.

Les mots clé : dispersion, polluant, injecteur, vapeur d’eau, tunnel

Abstract :

The safety of passengers and drivers was of paramount importance. Therefore, we focused on developing comprehensive solutions to achieve this goal. We delved into various factors that influenced fire outbreaks and smoke propagation within tunnels, including the materials used in tunnel construction and appropriate extinguishing methods using simulation software such as ANSYS APDL. Additionally, we worked on establishing a complete early fire detection and emergency evacuation system, alongside designing an efficient tunnel ventilation and cooling system. Our ultimate objective was to create a safe and sustainable environment for travelers and infrastructure users.

Key words: dispersion, pollutant, injector, water vapour, tunnel

REMERCIEMENT

Nous remercions Allah avant tout de nous avoir donné l'occasion de présenter cet humble travail. Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre encadreur **Pr. ZIRARI MOUNIR** pour nous soutenir depuis si longtemps et nous aider sans relâche malgré sa mission quotidienne non-stop. Nous remercions également notre promotrice **Dr Mme BRAHIM BELHOUARY RATIBA** de nous avoir suivis et de nous avoir aidés à mener à bien ce travail.

Nous tenons également à remercier tous les professeurs qui nous ont éclairés sur le chemin de la science. Nous tenons à les remercier pour les connaissances qu'ils ont toujours su nous transmettre et pour leur présence dans la réalisation de ce travail, notre bonheur est de soyez vos élèves.

Nos sincères remerciements à nos chers parents qui rêvaient même de nous monter à l'étrier sans oublier nos chères femmes et nos enfants, nos collègues qui, par leurs suggestions et leur attitude humoristique et sérieuse, ont grandement facilité notre travail. Nous espérons au final que notre travail satisfera les membres du jury avec l'acceptation de leur évaluation qui nous fait plaisir.

DEDICAS AHMED HEDJALA Hamza

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 enfants : Walid, Nazih, Wail et surtout ma femme qui m'a soutenu et m'encouragé à réaliser ce travail

A mes chers frères Saad et mes sœurs

A toute ma famille.

A mon cher binôme Omar

A tous les professeurs et enseignants

A tous mes collègues de travail et mes amis sans exception spécialement :

Mustapha, Aissa, Samir et Moussa.

DEDICAS KADACHE Omar

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

A mes enfants et ma femme qui ma très soutenu et m'encouragé à réaliser ce travail

A mes chers frères.

A mes chères sœurs.

A toute ma famille.

A mon cher Binôme Hamza

A le monsieur respectueux mon directeur de travail

A tous mes amis : Abdelkader - Redha - Mohammed

Liste des figures :

Figure I.1 : La structure de cet article est basée sur le cycle des polluants atmosphériques…….. **15**

Figure I.2 : Illustration du Jet In Cross Flow - issue de la publication de CAMBONIE…….. **17**

Figure I.3 : Illustration des frontières du jet et des différents axes le caractérisant par BRIZZI….. **19**

Figure I.4 : Profils de vitesse et de température pour deux valeurs du facteur r différentes d'après KAMOTANI & GREBER…… **20**

Figure I.5 : Lignes caractéristiques issues de tests en eau avec une injection parabolique (pointillée) et carrée (trait plein) pour 4 valeurs du facteur r différents NEW …….. **22**

Figure I.6 : Evolution spatiale du centre du jet défini par les vitesses - pour 4 valeurs du facteur J différents et pour 4 rapports H/D, d'après KAMOTANI & GREBER ……. **23**

Figure I.7 : Structures tourbillonnaires types d'un JICF. Schéma d'après FRIC & ROSHKO…… **24**

Figure IV.1 : Présentation de la veine d'essais et ses dimensions..... **44**

Figure IV.2 : Géométrie globale du domaine de calcul…… **45**

Figure IV.3 : représentation de maillage du tunnel……... **46**

Figure IV.4 : Choix des conditions initiales et conditions aux limites…. **47**

Figure IV.5 : les champs moyens de composante de vitesse V…… **47**

Figure IV.6 : contour de la Pression ……... **48**

Figure IV.7 : Représentation spatiale de la circulation de l'air…… **48**

Figure IV.8 : Configuration de test pour les Profils de vitesse dans le tunnel amont……... **49**

Figure IV.9 : Profile de vitesse transversale dans le tunnel amont…… **49**

Figure IV.10 : Configuration de test pour les Profils de vitesse dans le tunnel aval……. **50**

.**Figure IV.11 :** Profil de vitesse transversale dans le tunnel aval……. **50**

Figure IV.12 : Représentation les points……... **52**

Figure IV.13 : Profil de température dans le tunnel……. **52**

Figure IV.14 : Profil de concentration de Co2 dans le tunnel……... **53**

Figure IV.15 : Représentation les points (sans accès)…….. **55**

Figure IV.16 : Profil de température dans le tunnel. (sans accès)…… **55**

Figure IV.17 : Profil de concentration de Co2 dans le tunnel (sans accès)……. **56**

Figure IV.18 : Représentation les points (1 accès)…… **58**

Figure IV.19 : Profil de température dans le tunnel. (1 accès)…… **58**

Figure IV.20 : Profil de concentration de Co2 dans le tunnel (1 accès)……. **59**

Figure IV.21 : Représentation les points (deux accès) ……. **61**

Figure IV.22 : Profil de température dans le tunnel. (deux accès)……. **61**

Liste des Tableaux :

Tableau I.1 : Composition moléculaire et caractéristiques des principaux polluants de l'air…… **16**

Tableau I.2 : Présentation non exhaustive des équations des positions centrales du jet dans la Littérature……. **21**

Tableau III-1 : expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables…….. **38**

Tableau IV.1 : propriétés de l'air et Co2…….. **46**

Tableau IV.2 : Représentation spatiale de la dispersion de la température, la pression, la vitesse et la concentration du Co2 dans le temps…… **51**

Tableau IV.3 : Représentation spatiale de la dispersion de la température, la Masse eau, la vitesse et la concentration du Co2 dans le temps (sans accès) …… **54**

Tableau IV.4 Représentation spatiale de la dispersion de la température, la Masse eau, la vitesse et la concentration du Co2 dans le temps (1 accès) **…… 57**

Tableau IV.5 Représentation spatiale de la dispersion de la température, la Masse eau, la vitesse et la concentration du Co2 dans le temps (deux accès)…… **60**

Tableau IV.6 : Comparaison de température dans le tunnel à chaque simulation dans chaque point ….. **64**

Tableau IV.7 : Comparaison de concentration de Co2 dans le tunnel à chaque simulation dans Chaque point…… **66**

Sommaire :

ملخص
Résumé
Abstract
Introduction générale …… **2**

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ET POSITIONNEMENT DE PROBLEME

I.1. Problématique d'incendie en station …… **7**
I.1.1. Le foyer …… **7**
I.1.2. Le confinement ……. **9**
I.1.3. La ventilation ……. **10**
I.2. Source de pollution et de différents polluants ……... **11**
I.2.1. Les sources naturelles …… **11**
I.2.2. Les sources dues aux activités industrielles ……... **12**
I.3. Les effets de la Pollution de l'air ……... **16**
I.3.1. Les Effets des polluants sur le cadre bâti **16**
I.3.2. Les Effets des polluants sur l'environnement ……... **16**
I.4. Jet dans un écoulement traversier ……. **17**
I.4.1. Généralités ……. **17**
I.4.2. Aspects stationnaires……. **19**
1.4.3. Aspects instationnaires ……. **24**
I.5. Conclusion …… **25**

CHAPITRE II : MODELISATION MATHEMATIQUES

II.1. Introduction …… **27**
II.2. Modélisation de la turbulence …… **27**
II.3. Equations mathématiques ……... **28**
II.3.1. Equation de continuité …… **28**
II.3.2. Equation de bilan de l'énergie ……. **29**
II.3.3. Equation de Navier-Stokes …….. **29**
II.3.4. L'équation de diffusion …… **30**
II.3.5. Equation de conservation de quantité de mouvement …….. **31**
II.3.6. Equation de conservation des espèces ……. **31**
II.3.7. Equation de conservation des espèces ……. **32**

CHAPITRE III : PROCEDURE DE LA SIMULATION NUMERIQUE

III.1. Introduction …… **34**
III.2. Logiciel ANSYS APDL) …… **34**
III.3. Les méthode numérique……. **34**
III.3.1. La méthode des différences finies …… **34**
III.3.2. La méthode des éléments finis ……... **35**
III.3.3. La méthode des volumes finis …… **36**
III.3.4. Présentation de la méthode ……. **36**
III.4. Méthode de Résolution des équations par éléments finis …….. **36**

III.4.1. Misse en œuvre de la méthode des éléments finis…….. **37**
III.4.2. Forme générale des équations du système…… **38**
III.5. Choix d'un maillage …….. **39**
III.5.1. Discrétisation ……. **39**
III.6. Conclusion…… **42**

CHAPITRE IV : RESULTAT ET DISCUSSION

IV.1. Introduction …… **44**
IV.2. Identification …….. **44**
IV.3. Configuration d'étude …… **45**
IV.4. Création de la géométrie …… **45**
IV.5. Génération de maillage …….. **45**
IV.6. Condition initial et condition aux limites …… **47**
IV.7. Description de l'écoulement ……. **48**
IV.8. Cas référence …… **51**
IV.9. Simulation 1 Avec des injecteurs d'eau « vapeur froid »sans accès …….. **54**
IV.10. Simulation 2 Avec des injecteurs d'eau « vapeur froid » avec accès …… **57**
IV.11. Simulation 3 Avec des injecteurs d'eau « vapeur froid » avec deux (02)……... **60**
IV.15. Comparaison ……... **63**
IV.15.1. Température …….. **63**
IV.15.2. Concentration de Co2 …… **65**
IV.16. Conclusion…… **67**
Conclusion générale …… **69**
Bibliographie ……. **71**

Nomenclatures

Notation	Signification	Unit
$\vec{U}$	Vitesse d'une particule de fluide	[m/s]
T	temps	[s]
$\vec{V}$	Vecteur de vitesse	[m/s]
Ω (t)	Vitesse angulaire de rotation de la terre	
E	L'énergie totale	[J/kg1]
C	La chaleur massique	
T	Température	[C°]
K	Energie cinétique turbulente	[J/Kg]
$\breve{u}j, \breve{u}i$	Tension de Reynolds	
Ui, Uj	Composante de la vitesse	[m/s]
Cp	Chaleur spécifique à pression constante	[j/kg.K]

Symboles grecs

Ɛ	dissipation de l'énergie cinétique turbulente	[m²/s²]
λ	La conductivité thermique	[J/s.m.k]
μ	La viscosité dynamique	[Kg/m.s]
μ t	La viscosité dynamique turbulente	[Kg/m.s]
ρ	Masse volumique	[Kg /m3]
τ	Contrainte de cisaillement	[N /m²]
ϕ	Variables généralisée par unité de masse	

Espèces chimiques

SO2	Dioxyde de soufre
O2	Oxygène
CO2	Dioxyde de carbone
CO	Monoxyde de carbone
HC	Hydrocarbures
HO2	Radicaux hydropéroxyles
HNO3	Acide nitrique
NO	Monoxyde d'azote
NO2	Dioxyde d'azote
NOx	NO+NO2
O3	Ozone

INTRODUCTION GENERAL

Introduction générale :

Dans les environnements urbains, les stations de métro et les tunnels routiers sont des infrastructures essentielles pour faciliter la mobilité et le transport des personnes et des marchandises. Cependant, ces structures souterraines peuvent présenter des défis en termes de qualité de l'air en raison de l'accumulation de polluants émis par les véhicules et les installations associées.

Les stations de métro, souvent situées à des profondeurs variables sous terre, sont confrontées à des problèmes de dispersion des polluants émis par les trains, les systèmes de freinage, et les systèmes de ventilation. De même, les tunnels routiers, qui voient passer un flux constant de véhicules, peuvent devenir des points de concentration pour les émissions de gaz d'échappement et les particules fines, les oxides d'azote (NOx) et les hydrocarbons.

Pour atténuer ces problèmes de pollution atmosphérique, plusieurs solutions de dispersion des polluants sont envisagées. Parmi celles-ci, on trouve l'amélioration des systèmes de ventilation dans les stations de métro et les tunnels routiers pour favoriser une circulation d'air efficace et réduire la concentration de polluants. L'installation de filtres à air et de systèmes de purification peut également aider à capturer les particules et les gaz nocifs avant qu'ils ne soient dispersés dans l'air environnant.

De plus, des mesures visant à réduire les émissions des véhicules, telles que l'utilisation de technologies de propulsion plus propres et l'encouragement de modes de transport alternatifs comme le covoiturage et les transports en commun, peuvent contribuer à réduire la charge de pollution dans les stations de métro et les tunnels routiers.

Dans cette introduction, nous explorerons plus en détail ces solutions de dispersion des polluants et leur impact sur la qualité de l'air dans les environnements souterrains, ainsi que les défis persistants à relever pour garantir un air plus sain pour les habitants des zones urbaines.

CHAPITRE I

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ET POSITIONNEMENT

L'état de l'art

Les objectifs de la ventilation dans les tunnels routiers vont au-delà de fournir simplement de l'oxygène respirable et de diluer les gaz toxiques. En effet, ces systèmes de ventilation sont essentiels pour assurer un environnement sûr et sain pour les conducteurs et les passagers tout en minimisant les risques liés aux émissions des véhicules et aux événements d'urgence potentiels.

Chung et al. [1] Cette étude a utilisé des modèles numériques pour simuler l'écoulement turbulent et la dispersion des polluants dans un tunnel routier. Leurs résultats montrent que les concentrations de polluants atmosphériques varient le long du tunnel, avec une augmentation proportionnelle à la distance parcourue en aval.

Ashrafi et ses collègue [2] ont mené une étude d'évalué l'efficacité de la ventilation des tunnels en simulant la dispersion de la pollution atmosphérique à l'intérieur. Leur analyse a montré un accord satisfaisant entre les données de modélisation et les mesures réelles. Ils ont également souligné les risques potentiels pour la santé dus à la pollution de l'air près des portails des tunnels routiers.

Lopez Gonzalez et ses collègues [3] ont mené une analyse numérique de l'effet piston dans le système de ventilation longitudinale des tunnels de métro. Leur étude, qui a utilisé une technique de maillage dynamique, a permis de quantifier divers paramètres influençant le système de ventilation du métro. Ils ont spécifiquement examiné l'impact de l'effet piston sur les performances globales de ventilation dans ces tunnels.

Migoya et ses collaborateurs [4] ont utilisé un modèle simplifié pour simuler un scénario d'incendie dans des tunnels routiers, puis ont comparé ces résultats avec ceux obtenus à partir d'une modélisation 3D. Ils ont résolu le modèle d'écoulement de fumée d'incendie en utilisant une équation turbulente conservatrice à une dimension. En parallèle, une simulation 3D à grande échelle a été réalisée en utilisant deux logiciels de dynamique des fluides numériques (CFD), à savoir Fluent et Phœnix.

En 2010 Wang et ses collègues [5] ont mené une étude démontrant que la courbure d'un tunnel a un impact significatif sur le champ d'écoulement d'air à l'intérieur du tunnel. Ils ont également examiné l'effet de différentes positions transversales des ventilateurs à jet sur ce champ d'écoulement. Leur recherche a révélé que le flux d'air des ventilateurs à jet se propage plus rapidement lorsque la distance entre ces ventilateurs et le plafond du tunnel augmente. De même, une distance plus longue est nécessaire pour que les jets d'air se développent lorsque les ventilateurs sont soit plus proches les uns des autres, soit proches de la paroi du tunnel. En ce qui concerne la variation de pression, ils ont observé qu'une distance d'environ 90 à 120 m est nécessaire pour que la montée en pression soit complète. Par conséquent, ils ont conclu que la

distance longitudinale optimale entre deux ventilateurs à jet est de 90 à 120 mètres. Ces résultats fournissent des informations cruciales pour optimiser la conception et la disposition des ventilateurs à jet dans les tunnels afin d'améliorer efficacement la ventilation.

En 2011, Wang et ses collaborateurs [6] ont mené une étude sur l'effet d'un véhicule en mouvement sur le champ d'écoulement d'air dans des tunnels droits et courbes. Les tunnels étudiés avaient une longueur de 200 m et une section transversale de 68,55 m2, mais avec des rayons de courbure différents. Leurs résultats ont montré que lorsque la courbure du tunnel augmente, la pression diminue également. Cette constatation met en évidence l'importance de prendre en compte la géométrie du tunnel lors de la conception de systèmes de ventilation efficaces, surtout lorsque des véhicules en mouvement sont présents, afin de maintenir des conditions de circulation d'air optimales et sécuritaires.

En 2013, Hu et ses collaborateurs [7] ont réalisé des études expérimentales visant à déterminer la température maximale des gaz dans un tunnel en cas d'incendie, avec des véhicules bloqués à différentes distances du foyer d'incendie. Leurs résultats ont révélé qu'en contraste avec la situation où le blocage se trouve au niveau du feu en amont, sa présence en aval n'avait aucun impact sur la température maximale observée. Cette constatation souligne l'importance de l'emplacement des blocages de véhicules lors de la gestion des situations d'urgence dans les tunnels, et fournit des informations précieuses pour améliorer les stratégies de sécurité et de gestion des risques dans de telles situations.

Dans leur étude, Bari et Naser [8] se sont penchés sur la dispersion du monoxyde de carbone (CO), du dioxyde de carbone (CO2) et de l'oxygène (O2) à l'intérieur d'un tunnel lorsqu'un véhicule est en feu, en tenant compte des émissions de polluants provenant des véhicules en embouteillage et du fonctionnement des ventilateurs à réaction. Leurs résultats ont révélé qu'après environ 8 minutes, les niveaux de pollution dépassaient les seuils admissibles. Ils ont également évalué l'efficacité des ventilateurs à réaction pour éliminer la pollution émise par les véhicules dans des conditions d'embouteillage sévères, soulignant que l'absence de ces ventilateurs représente une menace pour la santé des passagers et des conducteurs. Ces conclusions mettent en évidence l'importance critique de la ventilation efficace des tunnels pour atténuer les risques pour la santé publique en cas d'incidents impliquant des véhicules en feu ou des embouteillages.

Costantino et ses collègues en 2013 [9] dans leur étude publiée, ont employé la méthode de Froude pour modéliser un tunnel routier à échelle réduite. Ils ont simulé à la fois un tunnel réel et son homologue à échelle réduite, équipés de ventilateurs à jet, afin d'étudier les effets de la hauteur de rugosité du plafond et du sol sur le champ de vitesse à l'intérieur du tunnel. Leurs

recherches ont été conçues pour fournir des insights précieux pour la conception future d'appareils expérimentaux visant à étudier la dynamique de ventilation dans les tunnels routiers.
Kim et Kim [10] ont réalisé une étude approfondie sur les variations temporelles de la pression et de la vitesse de l'air en combinant des analyses expérimentales et numériques. Leur recherche visait à comprendre le comportement du flux d'air dans des environnements spécifiques, tels que les tunnels routiers. Les analyses expérimentales ont fourni des données empiriques directes, tandis que les simulations numériques ont permis d'explorer une gamme plus large de scénarios. Cette approche intégrée leur a permis d'identifier des tendances et des relations importantes dans le comportement du flux d'air, ce qui peut informer la conception et la gestion des systèmes de ventilation et autres infrastructures similaires.

L'étude [11] a également révélé que les performances de ventilation dans les tunnels sont affectées par l'emplacement de la gaine d'évent. Les chercheurs ont conclu que l'emplacement optimal de la gaine d'évent, qui maximise les performances de ventilation, doit être proche de la station. Cette constatation souligne l'importance de l'emplacement stratégique des équipements de ventilation pour assurer une circulation d'air efficace et une évacuation rapide des polluants dans les tunnels.

Tang et ses collègues [12] dans leur étude expérimentale, se sont penchés sur les effets d'un blocage de véhicules situé dans le feu en amont sur le phénomène de contre-couche et la vitesse critique dans un tunnel ventilé longitudinalement. Leurs résultats ont montré qu'initialement, l'augmentation de la distance entre le feu et le blocage entraîne une réduction à la fois de la longueur de la stratification arrière et de la vitesse critique. Cependant, avec le temps, ces valeurs convergent progressivement vers une constante, s'alignant sur celles observées lorsqu'aucun blocage n'est présent. Cette conclusion suggère que l'effet du blocage sur le phénomène de contre-couche et la vitesse critique diminue à mesure que la distance entre le feu et le blocage augmente.

Eftekarian et ses collaborateurs [13] dans leur étude, ont examiné les performances des ventilateurs à jet banane et des ventilateurs à jet traditionnels dans des embouteillages dans un tunnel urbain. Leurs résultats ont démontré que dans les embouteillages, les deux types de ventilateurs à réaction induisent presque un débit volumique identique dans le tunnel. De plus, ils ont évalué les impacts du vent défavorable sur le débit volumétrique du tunnel. Leurs analyses ont révélé que les résultats prédits par la simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) présentaient une différence remarquable par rapport à ceux de la conception technique dans ce contexte spécifique.

Ingason et Li [14] dans leur recherche, ont utilisé du bois pour simuler un incendie de camions dans un tunnel, en se basant sur le nombre de Froude. Ils ont choisi le bois comme combustible

en raison de ses avantages, notamment son faible coût et sa facilité de mise en œuvre. Cependant, ils ont souligné que la maîtrise de ce matériau est complexe, en partie à cause de sa teneur en humidité variable, qui peut influencer le processus de combustion.

Lea [15] L'étude menée d'explore les effets d'un incendie dans une mine britannique en utilisant trois modèles informatiques. En combinant des techniques de courant de gravité unidimensionnel et de modélisation numérique multidimensionnelle de la dynamique des fluides, l'auteur évalue l'écoulement stratifié jusqu'à la rupture et examine en détail l'écoulement près du foyer d'incendie. Les résultats des modèles concordent et suggèrent des mesures d'atténuation pour limiter la propagation des produits de combustion. Cependant, l'étude met également en lumière les défis persistants dans la gestion des risques d'incendie et de pollution dans les mines, soulignant le besoin de progrès supplémentaires, en particulier dans le développement de solutions biotechnologiques.

Braun [16] dans son étude, a analysé les méthodes d'essai et les données d'incidents liés aux incendies causés par les câbles électriques portables dans les mines de charbon souterraines. Les données recueillies sur les incidents ont révélé que la configuration groupée des câbles sur une bobine était responsable de la majorité des incendies depuis 1970.

Burnett [17] dans son étude, a passé en revue plusieurs problèmes complexes liés à la sécurité et aux incendies. Cela comprend la combustibilité et la toxicité des matériaux de construction des wagons de transport en commun, ainsi que des questions concernant la ventilation d'urgence et l'évacuation des tunnels. D'autres aspects examinés incluent les communications, l'équipement respiratoire et la mobilité, tous étant des éléments cruciaux à considérer dans la gestion des situations d'urgence liées aux incendies dans les transports en commun.

Keski-Rahkonen et ses collègues [18] dans leur étude, ont réalisé deux expériences pilotes d'incendie à grande échelle dans un tunnel. Le premier est visait à simuler un incendie dans une rame de métro bloquée dans un tunnel, tandis que la seconde reproduisait le scénario d'une file de voitures en feu dans un tunnel. Ces expériences fournissent des données précieuses pour évaluer et améliorer les protocoles de sécurité, la gestion des incendies et les stratégies d'évacuation dans les tunnels.

I.1. Problématique d'incendie en station

Le problème des incendies dans les gares et les tunnels est une préoccupation majeure pour toutes les parties impliquées, y compris les pouvoirs publics, les industriels, les opérateurs et les universitaires et les chercheurs. Dans le cadre de la planification, les études sur le développement des incendies dans ces environnements se concentrent sur les points suivants :

La source d'incendie, c'est-à-dire le foyer où l'incendie commence.

Le confinement, qui englobe l'environnement physique et les conditions aux limites définissant les zones géométriques où le feu peut se développer.

La ventilation, qui peut être naturelle ou souvent assurée par un système mécanique, jouant un rôle crucial dans la gestion de l'incendie et dans la sécurité des personnes dans ces infrastructures.

I.1.1. Le foyer

Il est effectivement observable à travers la littérature scientifique qu'il existe de nombreux systèmes pour modéliser un incendie, regroupés en deux catégories principales : ceux basés sur une approche avec combustion et ceux issus d'une approche sans combustion.

Les modèles basés sur une approche avec combustion sont réalistes mais génèrent souvent beaucoup de suie et des températures très élevées. En revanche, les modèles issus d'une approche sans combustion simplifient les aspects réactionnels et radiatifs de la flamme, offrant une approche plus simple mais moins réaliste.

Parmi les modèles les plus utilisés dans le domaine de la combustion figurent la piscine de combustible liquide. Ces dispositifs sont couramment utilisés comme sources car les caractéristiques du combustible, telles que sa taille, son volume et ses propriétés, sont bien connues, ce qui facilite la modélisation et la compréhension des incendies.

Hu et ses collaborateurs [7] ont réalisé des études expérimentales pour déterminer la température maximale des gaz dans un tunnel en cas d'incendie, en tenant compte de la présence d'un blocage de véhicules à différentes distances du foyer d'incendie. Cette recherche visait à évaluer l'impact de la localisation du blocage sur la température maximale des gaz, fournissant ainsi des données cruciales pour comprendre la dynamique des incendies dans les tunnels et pour améliorer les stratégies de gestion des risques et d'évacuation.

Ingason et Li [14] dans leur étude, ont utilisé du bois pour simuler un incendie de camions dans un tunnel, en se basant sur le nombre de Froude. Le choix de ce combustible présente des avantages, notamment son coût peu élevé et sa facilité de mise en œuvre. Cependant, la manipulation de ce matériau s'avère complexe en raison de sa teneur variable en humidité, pouvant influencer le processus de combustion. Cette recherche met en lumière l'importance de prendre en compte les propriétés du combustible utilisé dans les simulations d'incendie pour obtenir des résultats précis et représentatifs de la réalité.

Braun [16] dans son étude, a analysé les méthodes d'essai et les données d'incidents concernant les incendies liés aux câbles électriques portables dans les mines de charbon souterraines. Les données recueillies sur les incidents ont révélé que la configuration groupée des câbles sur une bobine était responsable de la majorité des incendies depuis 1970. Cette constatation souligne l'importance de prendre des mesures préventives pour réduire les risques

d'incendie liés à la manipulation et à la disposition des câbles électriques dans les environnements miniers souterrains.

Burnett [17] dans son étude, a examiné plusieurs problèmes complexes liés à la sécurité et aux incendies dans les transports en commun. Cela comprend la combustibilité et la toxicité des matériaux de construction des wagons, ainsi que des aspects tels que la ventilation d'urgence et les stratégies d'évacuation des tunnels. D'autres considérations importantes incluent les systèmes de communication, l'équipement respiratoire disponible et les questions de mobilité des passagers lors d'une évacuation d'urgence. Cette analyse globale permet de mieux comprendre les défis et les mesures nécessaires pour assurer la sécurité dans les situations d'incendie dans les transports en commun.

I.1.2. Le confinement

Le confinement de l'incendie est un aspect crucial à considérer dans les études sur les incendies, car il influence la propagation du feu et la sécurité des personnes à proximité. L'efficacité du confinement dépend de la taille du bâtiment par rapport à la taille de la pièce la plus proche, et elle est étroitement liée à la manière dont l'incendie se développe et est contenu.
Keski-Rahkonen et al. [18] ont mené deux expériences pilotes d'incendie à grande échelle dans un tunnel pour étudier le confinement de l'incendie dans ce contexte spécifique. La première expérience visait à simuler un incendie dans une rame de métro bloquée dans un tunnel, tandis que la seconde reproduisait le scénario d'une file de voitures en feu dans un tunnel. Ces expériences fournissent des données cruciales pour évaluer la manière dont les incendies se propagent et sont contenus dans les tunnels.

D'autre part, Lea [15] a utilisé trois modèles informatiques pour étudier les effets d'un incendie dans une mine britannique. En utilisant des techniques de courant de gravité unidimensionnel pour mesurer l'écoulement stratifié jusqu'à la rupture, ainsi que la modélisation numérique multidimensionnelle de la dynamique des fluides, l'étude examine en profondeur la propagation de l'incendie et propose des mesures d'atténuation pour limiter la propagation des produits de combustion. Cependant, l'étude souligne également que malgré les progrès récents dans la biotechnologie pour lutter contre les risques d'incendie et de pollution dans les mines, il reste encore beaucoup à faire, les progrès étant principalement limités au développement matériel.

La résolution de problèmes liés aux incendies et à la pollution dans les mines par des techniques physico-chimiques classiques est actuellement limitée. Cela suggère que ces approches traditionnelles ne parviennent pas à résoudre efficacement les défis complexes rencontrés dans ce domaine. Cette impasse peut encourager l'exploration de nouvelles approches et technologies plus avancées pour relever ces défis de manière plus efficace.

I.1.3. La ventilation

Les recherches sur les milieux semi-confinés et ventilés, notamment dans les tunnels, sont principalement axées sur les cas typiques rencontrés dans les tunnels de métro. Lopez Gonzalez et ses collègues [3] ont réalisé une analyse numérique de l'influence de l'effet piston sur le système de ventilation longitudinale de ces tunnels. En utilisant une technique de maillage dynamique, ils ont examiné différents paramètres affectant la ventilation du métro et ont évalué l'impact de l'effet piston sur ses performances globales. Cette étude met en lumière l'importance de comprendre et de maîtriser cet effet pour assurer une ventilation efficace et sécurisée dans les tunnels de métro.

Les recherches de Wang et ses collègues [5] ont mis en évidence l'impact significatif de la courbure d'un tunnel sur le champ d'écoulement d'air à l'intérieur. Leur étude a également examiné les effets de différentes positions transversales des ventilateurs à réaction sur cet écoulement d'air. Ils ont observé que le flux d'air des ventilateurs à jet se propage plus rapidement lorsque la distance entre les ventilateurs et le plafond augmente. De même, une distance plus grande est nécessaire pour que les jets se développent lorsque les ventilateurs sont plus proches les uns des autres ou proches de la paroi du tunnel. En ce qui concerne la variation de pression, ils ont constaté que la distance nécessaire pour que la montée en pression soit complète est d'environ 90 à 120 m. Ces résultats suggèrent qu'une distance longitudinale optimale entre deux ventilateurs à jet est également de 90 à 120 m. Ces conclusions soulignent l'importance de la conception précise de la disposition des ventilateurs pour garantir une ventilation efficace et sûre dans les tunnels.

En 2011, Wang et ses collègues [6] ont examiné l'impact des véhicules en mouvement sur le champ d'écoulement d'air dans des tunnels, qu'ils soient droits ou courbes. Leurs recherches, menées sur des tunnels de 200 m de longueur et d'une section transversale de 68,55 m2 mais avec des rayons de courbure variables, ont révélé une diminution de la pression à mesure que la courbure du tunnel augmentait.

En 2013, Costantino et ses collaborateurs [9] ont employé la méthode de Froude pour simuler un tunnel routier à échelle réduite. Leur étude portait sur l'impact de la hauteur de rugosité du plafond et du sol sur le champ de vitesse à l'intérieur du tunnel. En modélisant à la fois un tunnel réel et un tunnel à échelle réduite équipé de ventilateurs à jet, ils ont fourni des données précieuses pour des expériences futures dans ce domaine.

Kim et Kim [10] ont réalisé des analyses expérimentales et numériques pour étudier les variations de pression et de vitesse de l'air dans le temps. Leurs recherches ont révélé que les performances de ventilation sont sensibles à l'emplacement de la gaine d'évent, et ils ont

déterminé que l'emplacement optimal de celle-ci, pour maximiser les performances de ventilation, devrait être proche de la station.

Eftekarian et ses collaborateurs [10] ont évalué les performances des ventilateurs à jet banane et traditionnels dans des embouteillages à l'intérieur d'un tunnel urbain. Leurs résultats ont montré que, dans de telles conditions, les deux types de ventilateurs à réaction induisent presque le même débit volumique dans le tunnel. De plus, ils ont examiné l'impact du vent défavorable sur le débit volumétrique du tunnel et ont constaté une différence significative entre les résultats prédits par la simulation CFD et ceux de la conception technique.

I.2. Source de pollution et de différents polluants

Les sources de pollution sont diverses, pouvant être d'origine naturelle, comme les éruptions volcaniques, les émissions océaniques et les émissions de biomasse, ou d'origine humaine, telles que les émissions industrielles, les feux de forêt, les déchets domestiques et les émissions de véhicules…..etc.

I.2.1. Les sources naturelles

Les éruptions volcaniques sont parmi les événements naturels les plus spectaculaires et les plus influents en termes de pollution atmosphérique. Elles éjectent d'importantes quantités de gaz, de particules et de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Par exemple, le volcan Etna en Sicile, l'un des volcans les plus actifs au monde, émet en moyenne 3 000 tonnes de dioxyde de soufre par jour, mais ce chiffre peut atteindre jusqu'à 10 000 tonnes pendant les périodes d'activité intense. L'éruption du Tambora en 1815 en Indonésie a été l'une des plus importantes de l'histoire, entraînant l'éjection de près de 100 milliards de tonnes de produits volcaniques dans l'atmosphère. Les émissions massives de particules et de gaz volcaniques ont eu un impact significatif sur le climat mondial, provoquant une chute de température moyenne de près de 0,7°C à l'échelle planétaire.

Les incendies de forêt sont une autre source majeure de pollution atmosphérique, en particulier dans les zones rurales. Lors de ces incendies, d'importantes quantités de particules fines (PM) sont libérées dans l'air, contribuant à la détérioration de la qualité de l'air et à des problèmes de santé publique. Les éclairs peuvent également produire des quantités importantes d'oxydes d'azote (NOx) en déclenchant des réactions chimiques dans l'atmosphère.

Les algues marines peuvent émettre du sulfure d'hydrogène (H_2S) lorsqu'elles se décomposent, contribuant ainsi à la pollution de l'air dans les zones côtières. L'érosion éolienne transporte des particules de sol et de poussière à travers l'atmosphère, surtout dans les régions arides ou lors de tempêtes de sable. Les zones humides telles que les marécages, les tourbières et les lacs peu profonds émettent du méthane (CH_4), un gaz à effet de serre potentiellement puissant.

Enfin, les réactions entre les oxydes d'azote (NOx) et les composés organiques volatils (COV) en présence de la lumière solaire peuvent produire de faibles concentrations d'ozone (O3) au niveau du sol. Ces réactions se produisent principalement dans les zones urbaines et industrielles où les émissions de NOx et de COV sont importantes.

I.2.2. Les sources dues aux activités industrielles

Les activités industrielles ont considérablement contribué à la pollution atmosphérique en générant divers déchets qui ont eu un impact significatif sur l'environnement. La pollution de l'air, en grande partie d'origine anthropique, provient principalement de sources fixes et mobiles. Les sources mobiles, telles que les véhicules automobiles, les avions et les trains, ainsi que les sources fixes, comme les usines, les centrales électriques et les stations d'essence, émettent une variété de polluants.

Actuellement, le trafic routier est la principale source de pollution de l'air dans les zones urbaines des pays industrialisés. La combustion incomplète de combustibles carbonés comme le charbon, le fioul, le bois et le gaz naturel produit du monoxyde de carbone (CO) et des hydrocarbures. Les oxydes d'azote (NOx) résultent de la combustion à haute température des carburants fossiles, combinant l'azote et l'oxygène de l'air.

Les activités humaines ont accru les émissions de composés organiques volatils (COV) provenant du pétrole, des industries chimiques et des transports, ainsi que les émissions de NOx provenant de la combustion dans les centrales électriques et les véhicules. En conséquence, la concentration d'ozone (O3) est plus élevée, et davantage de smog se forme dans les zones densément peuplées et industrielles.

Les activités humaines contribuent également aux particules en suspension dans l'air. En milieu urbain, ces particules proviennent principalement de la combustion des sources fixes et mobiles. Les combustibles comme le charbon et les fiouls contenant du soufre produisent du dioxyde de soufre (SO2) lors de leur combustion, étant largement utilisés pour le chauffage, le transport et divers processus industriels.

De plus, l'industrie génère des polluants spécifiques tels que les dérivés du fluor et l'aluminium, tandis que le traitement des minerais libère des métaux lourds tels que le cadmium, le zinc et le plomb. L'incinération des déchets ménagers produit du mercure, et l'utilisation d'engrais azotés en agriculture contribue à la formation de monoxyde d'azote (N2O) et d'ammoniac (NH3), qui participent aux processus d'acidification.

I.2.2.1. Les principaux polluants et leurs sources

- **Le dioxyde de soufre (SO2)**

Le dioxyde de soufre (SO2) est un gaz polluant produit principalement par la combustion de combustibles fossiles. Bien qu'invisible, il présente des risques pour la santé humaine, notamment des problèmes respiratoires et cardiovasculaires. Le SO2 contribue également à la pollution de l'air et à l'acidification des sols et des eaux, affectant les écosystèmes. Pour réduire ses émissions, des technologies de combustion plus propres et des réglementations sont nécessaires.

- **Les oxydes d'azote (NO et NO2)**

Les oxydes d'azote sont des produits de la combustion qui ont un impact significatif sur l'environnement et la santé humaine. Ils contribuent à la formation de smog, notamment pendant l'été, lorsque les rayons ultraviolets du soleil décomposent ces gaz pour former de l'ozone, un polluant dangereux. Les oxydes d'azote sont toxiques et ont des effets néfastes sur la qualité de l'air et la santé respiratoire, nécessitant des mesures de réglementation et des technologies pour réduire leurs émissions.

- **Particules**

Les particules atmosphériques, qu'elles soient solides ou liquides, sont émises dans l'air par une multitude de sources, naturelles et anthropiques, présentant une diversité de tailles, de formes, de couleurs et de compositions chimiques. Leur impact sur les cycles environnementaux et la santé dépend non seulement de leur composition chimique, mais aussi de leur taille, qui influence leur trajectoire et leurs effets sur les êtres vivants et les objets inanimés. Ces particules peuvent avoir des diamètres allant de 0,0001 à 500 micromètres et peuvent demeurer en suspension dans l'air pendant des durées variables, allant de quelques secondes à plusieurs années.

- **métaux lourds**

La présence de minéraux dans le corps peut avoir des effets variés, certains bénéfiques tandis que d'autres peuvent être nocifs. Des niveaux élevés de métaux lourds, comme l'arsenic, le cadmium, le mercure, le cuivre et le chrome, peuvent entraîner un empoisonnement, pouvant avoir des conséquences graves, voire mortelles, s'ils ne sont pas traités. Il est important de surveiller et de contrôler les niveaux de ces métaux dans le corps pour éviter tout risque pour la santé.

- **Les composés organiques volatils**

Les composés organiques volatils (COV) sont des substances chimiques organiques qui s'évaporent facilement à température ambiante et pénètrent dans l'atmosphère. Ils

proviennent de diverses sources telles que les solvants, les carburants, les peintures, les produits de nettoyage et les émissions industrielles. Les COV comprennent une grande variété de composés, tels que les aldéhydes, les cétones et les hydrocarbures, qui peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine et contribuer à la pollution de l'air.

- **Le monoxyde de carbone**

Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz incolore, inodore et insipide, produit lors de la combustion incomplète de combustibles fossiles. Il se lie à l'hémoglobine, réduisant ainsi la capacité du sang à transporter l'oxygène, ce qui peut entraîné des symptômes graves voire la mort en cas d'exposition prolongée. Il est présent dans les émissions des véhicules à moteur, des appareils de chauffage au gaz, des poêles à bois, entre autres. Des détecteurs de monoxyde de carbone sont essentiels pour prévenir les intoxications accidentelles.

- **Gaz ammoniac**

Le gaz ammoniac, également appelé ammoniac, est incolore et a une odeur piquante qui peut irriter les voies respiratoires et les yeux. Il se présente généralement sous forme gazeuse mais peut être liquéfié sous haute pression. Bien qu'il ne soit pas inflammable, il peut provoquer une explosion si le contenant est soumis à une forte pression.

- **Ozone et polluants photochimiques**

L'ozone troposphérique, un gaz à effet de serre, peut contribuer au réchauffement climatique. Sa formation est le résultat de réactions chimiques et photochimiques dans la troposphère, à la fois de jour et de nuit. Cependant, à des concentrations anormalement élevées, principalement dues aux émissions de la combustion des combustibles fossiles, l'ozone devient un polluant atmosphérique et contribue au smog. Depuis la révolution industrielle, les niveaux d'ozone troposphérique ont considérablement augmenté en raison des émissions d'oxydes d'azote et de composés organiques volatils. Pendant les mois d'été, lorsque la chaleur et la lumière du soleil sont plus intenses, la formation d'ozone est accrue, expliquant les pics de pollution observés à cette période. Bien que chimiquement identique, l'ozone troposphérique est nocif pour la santé humaine.

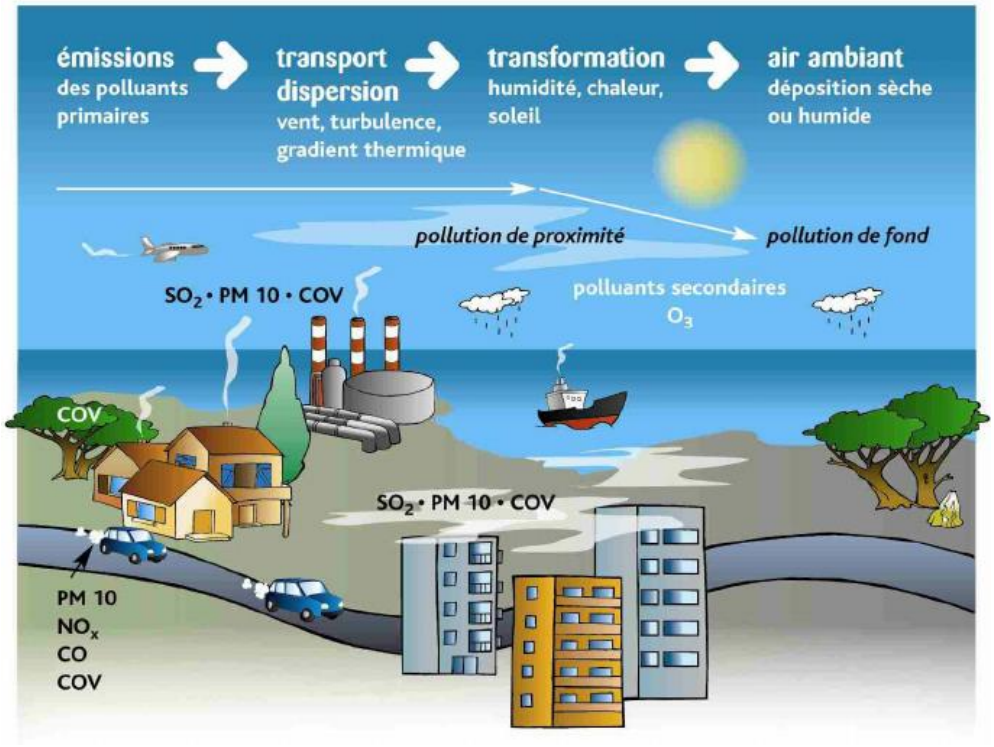


Figure I.1 : La structure de cet article est basée sur le cycle des polluants atmosphériques. [21]

On peut classer quelques polluants et ses caractéristiques suivant le tableau au-dessus :

Pollution	**composition**	**Caractéristique**
Oxyde de Carbone	CO	Gaz incolore, inodore, toxique et légèrement soluble dans l'eau.
Ozone	O3	Gaz bleu pâle, soluble dans l'eau, instable, odeur douceâtre.
Anhydride Sulfureux	SO2	incolore, lourd, soluble dans l'eau et doté d'une odeur irritante.
Oxyde nitrique	NO	Gaz incolore, légèrement soluble dans l'eau.
Hydrogène Sulfureux	H2S	Gaz incolore avec une odeur repoussante d'œufs pourris, et il est légèrement soluble dans l'eau.
Oxydes d'azotes	NOX	Gaz brun rougeâtre légèrement soluble dans l'eau.
Hydrogène Sulfureux	H2S	gaz incolore avec une odeur caractéristique de « d'œufs pourris ». légèrement soluble dans l'eau. toxique et peut être dangereux pour la santé humaine, même à de faibles concentrations.
Les composés Organiques Volatiles	VOC	Ces composés parfois dotés d'un fort caractère odorant. Sont représentés par de nombreux composés : le butane, propane, acétylène, isoprène, benzène, le toluène, le méthanol, éthanol et les éthers.

Mercure	Hg	Métallique, peut exister dans les composés chimiques variés (différentes caractéristiques).
Plomb	Pb	Métallique, peut exister dans les composés chimiques variés avec différentes caractéristiques.
Fluore	Variable	Irritants, incolore, gaz solubles dans l'eau.
Particule	Variable	Particules solides ou gouttelettes liquides incluant vapeurs, fumées, poussières et aérosols.
Hydrocarbures	Variable	Nombreux composés hydrogènent et de carbone

Tableau I.1 : Composition moléculaire et caractéristiques des principaux polluants de l'air Source : (MACKENZIE et al, 2000)

I.3. Les effets de la Pollution de l'air

La pollution de l'air est un problème grave avec des répercussions étendues sur la santé humaine et l'environnement. Elle affecte tous les organismes vivants, y compris les êtres humains, les animaux et les plantes. Les effets de la pollution de l'air sur la santé peuvent inclure des problèmes respiratoires, pulmonaires, cardiaques, ainsi que des risques accrus de cancer. De plus, elle peut entraîner des irritations oculaires et des réactions allergiques. En fin de compte, la pollution de l'air peut avoir des conséquences mortelles, accélérant le décès dans les cas les plus graves.

I.3.1. Les Effets des polluants sur le cadre bâti

La pollution acide, provenant notamment des émissions industrielles et des gaz d'échappement des véhicules, corrode et dégrade les matériaux de construction utilisés dans les édifices, monuments et façades d'immeubles. Elle entraîne la décoloration, l'érosion et la dissolution des surfaces, fragilisant les structures et compromettant leur intégrité. Pour protéger notre patrimoine culturel, des travaux coûteux de ravalement de façades et de restauration des monuments sont nécessaires. La réduction des émissions polluantes est essentielle pour préserver notre cadre bâti et notre patrimoine culturel. [22]

I.3.2. Les Effets des polluants sur l'environnement

Le passage cite Kalaora, qui souligne que la gestion de l'environnement est souvent orientée vers une rationalisation administrative plutôt que vers une communication et une participation écologiques. En ce qui concerne l'effet de la pollution atmosphérique sur l'environnement, il est complexe et varié. Bien que les arbres puissent naturellement vieillir et dépérir, le phénomène de dépérissement observé depuis les années 1980 semble être causé par des facteurs inhabituels.

En France, le programme DEFORPA (dépérissement des forêts attribué à la pollution atmosphérique) et des recherches en laboratoire ont identifié plusieurs causes complexes de ce dépérissement, notamment la mauvaise qualité des sols, les sécheresses anormales et la présence de polluants dans l'atmosphère, en particulier la pollution acide et l'ozone. Ces éléments soulignent l'importance de prendre en compte divers facteurs environnementaux dans la compréhension et la gestion des problèmes liés à la pollution atmosphérique et au dépérissement des forêts. [22].

I.4. Jet dans un écoulement traversier

I.4.1. Généralités

Le phénomène de la confrontation entre deux écoulements perpendiculaires, connu sous le nom de Jet In Cross Flow (JICF), a été largement étudié depuis les années 1970 et trouve de nombreuses applications pratiques. Parmi celles-ci, on peut citer la dispersion des fumées à la sortie des cheminées industrielles (SAID et al. [23]), la décharge des eaux usées dans l'océan (MORTON & IBBETSON [24]), l'injection de carburant dans les moteurs (SCHLÜTER & SCHONFELD [25]), ainsi que des applications telles que le film-cooling pour le refroidissement (LALIZEL et al. [26]) et la protection des parois dans les réacteurs lors de la combustion.

Cette étude vise à comprendre la relation entre un jet et un écoulement transversal, caractérisé par la présence de deux masses volumiques différentes ou non, comme illustré dans la figure (1.2). Ce type de recherche permet de mieux appréhender les mécanismes de mélange, de dispersion et d'interaction entre différents fluides, ce qui est crucial pour de nombreuses applications industrielles et environnementales.

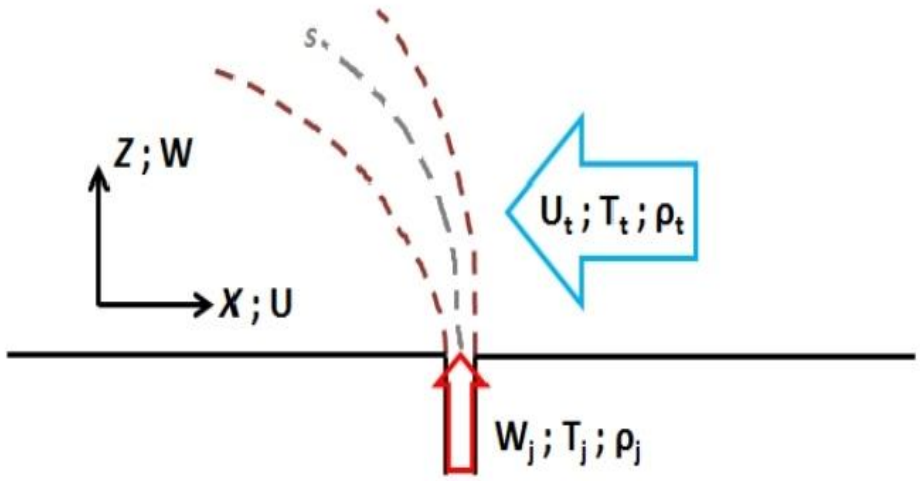


Figure I.2 : Illustration du Jet In Cross Flow - issue de la publication de CAMBONIE et al. [27].

Où, U_t et $W_j$représentent respectivement la vitesse horizotérature regorge de publications sur cette thématique. Beaucoup de ramifications ont été apportées au cas classique du jet chaud vertical dans un écoulement froid horizontal, comme par exemple : le fait de confiner le jet par un «plafond», de changer l'angle d'injection (KOLLA et al. [28), le nombre de MACH des écoulements (KAWAI & LELE [29]), le nombre d'injecteurs (HOLDEMAN et al. [30]), la nature des écoulements (CLERX et al. [31]), la présence d'obstacles (RUNDSTRÖM & MOSHFEGH [32])..... Afin de traiter des configurations proches de celles attendues dans l'écoulement à étudier, seules les études concernant le JICF avec un jet vertical unique seront étudiées de l'écoulement traversier et la vitesse verticale du jet, T_t et T_j les températures des écoulements, ρ_t et ρ_j leurs masses volumiques. L'axe suivant la ligne de description du jet, par rapport au centre du jet [0 ; 0], est classiquement notée « s ».

Que ce soit par approche numérique ou expérimentale, le lit

Afin de pouvoir comparer les différentes études réalisées sur ce sujet, l'utilisation de plusieurs nombres adimensionnels, mis en place au cours des décennies précédentes, a été privilégiée. Ces nombres sont principalement :

– le rapport des vitesses entre le jet et l'écoulement principal « α » également noté VR dans la littérature : $\alpha = \frac{W_j}{U_t}$ (1.1)

– le rapport des densités de flux de quantités de mouvement volumique « J » ou CR :

$$J = \frac{\rho_j}{\rho_t}\left[\frac{W_j}{U_t}\right]^2 \quad (1.2)$$

– plus récemment, c'est le facteur r qui est le plus utilisé :

$$R = \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_t}\left[\frac{W_j}{U_t}\right]^2} = \sqrt{J} \quad (1.3)$$

A noter que si les écoulements traversiers et d'injection sont à la même température, les trois grandeurs identifiées (α, J et r) sont identiques. Il est facile de comprendre que pour des rapports ρ_j/ρ_téquivalent, c'est le rapport de vitesses $W_j/\ U_t$ qui pilote le facteur. Il est alors naturel d'observer que plus le facteur r est grand ($W_j > U_t$ à densité équivalente), plus le jet pénètre loin dans l'écoulement traversier comme le souligne ANDREOPOULOS [33].

Il est donc nécessaire d'approfondir les études dédiées aux écoulements de jet soumis à un écoulement traversier et notamment en soulignant l'influence de certains paramètres afin de mieux approfondir l'organisation potentielle des écoulements résultants, comme :

1. les conditions aux limites des deux écoulements.

2. la hauteur sous plafond.

3. les structures tourbillonnaires.

Deux approches sont donc possibles et surtout complémentaires. Dans un premier temps, l'aspect stationnaire sera souligné. Il permet d'observer l'inclinaison du jet en fonction des différents paramètres caractéristiques. Dans un second temps, les aspects instationnaires Seront présentés notamment par le biais de la topologie des structures tourbillonnaires mises en jeu.

I.4.2. Aspects stationnaires

Les JICF sont généralement caractérisés dans une première approche par leurs trajectoires (cf. Fig. I.3). Ces dernières, directement liées au facteur r les caractérisant, servent notamment :

– à décrire l'inclinaison du jet dans l'écoulement traversier.

– à définir l'expansion du jet par la description de ses frontières amont et aval (Lignes OD et OE - Fig. I.3)

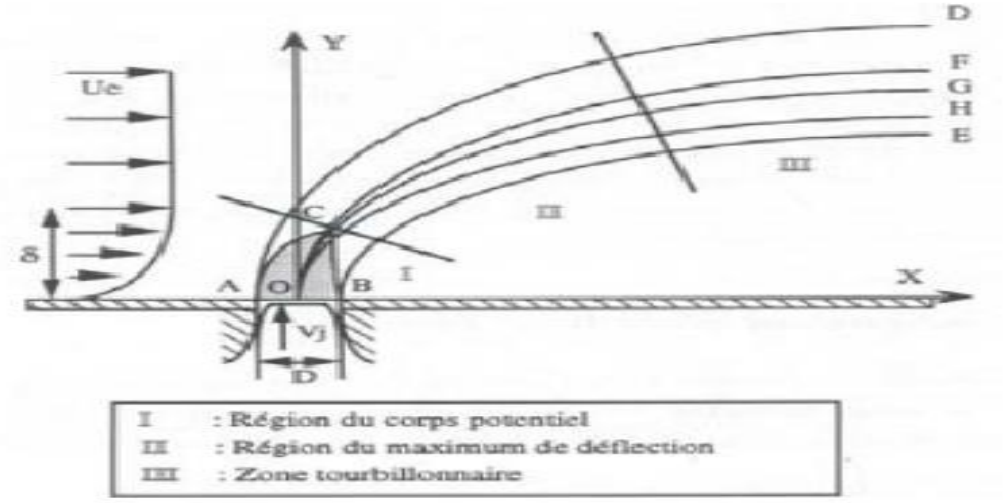


Figure I.3 : Illustration des frontières du jet et des différents axes le caractérisant par BRIZZI [34].

L'axe du jet peut revêtir quatre définitions différentes : soit il correspond à la ligne passant par les vitesses maximales (ligne OF), soit par le traceur maximum (température ou concentration - ligne OH), soit par les maximales de verticité (CVP) ou encore la ligne passant par le centre des lignes amont et aval (ligne OG).

Il est généralement admis que les lignes décrites par les structures tourbillonnaires et celles suivant les maxima thermiques se confondent, comme le rappelle par ailleurs MARGASON [35] lors de sa revue bibliographique en 1993 dans le cas où la température du jet est différente de celle de l'écoulement principal. La ligne de vitesse maximale est généralement différente des autres déflexions. Elle s'en trouve décalée vers le haut par rapport aux autres définitions (cf. Fig. I.4).

En fait, à partir de la compilation des résultats sur le positionnement de l'axe du jet, des approches analytiques ont été proposées pour le définir et les formes les plus souvent utilisées sont celles présentées par les équations (I.2) et (I.3) :

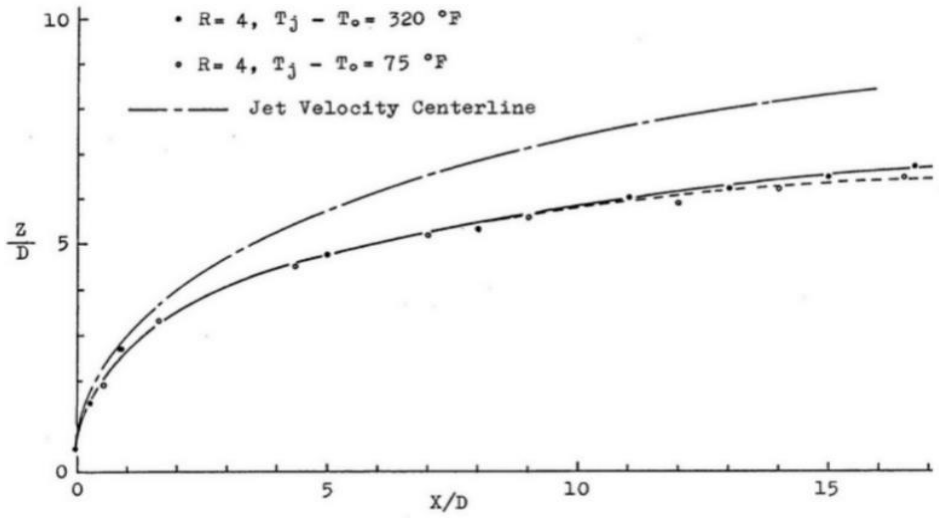


Figure I.4 : Profils de vitesse et de température pour deux valeurs du facteur r Différentes d'après KAMOTANI & GREBER [36].

- Par le rapport X/D :

$$\frac{Z}{D} = \alpha r^{\beta\left(\frac{X}{D}\right)^{\gamma}} \tag{1.4}$$

- Par le rapport X/rD :

$$\frac{Z}{rD} = A\left(\frac{Z}{rD}\right)^{\beta} \tag{1.5}$$

Sous ces formes analytiques, chaque auteur a proposé son jeu de paramètres optimisés (cf. TAB. I.2) ; et une multitude de corrélations existent, MARGASON de 1993 [34] donnant notamment plus de détails

Auteurs	**Jeu de paramètres**	**Grandeur**	**Année**
KAMOTANI & GREBER [36]	**α**= 0,89 ; **β**= 0,94 ; **γ**= 0,36 α= 0,89 ; **β**= 0,94 ; **γ**= 0,36	Vitesse Vitesse	1972 1972
PATRICK [37]	**α**= 1 ; **β**= 0,85 ; **γ**= 0,38	concentration	1967
FEARN & WESTON [38]	**α**= 0,347 ; **β**= 1,127 ; **γ**= 0,429	CVP	1974
PRATTE & BAINES [39]	A = 2,05 ; B = 0,28	concentration	1967
MARGASON [35]	2 < A < 2,6 ; 0,28 < B < 0,34		1993
HASSELBRINK & MUNGAL [40]	A = $\left(2/c_{ej}\right)^{0.5}$; B = 0,5 (champ proche) A = $\left(3/c_{ej}\right)^{\frac{1}{3}}$; B = 1/3 (champ lointain) c_{ej}, le coefficient d'entraînement = 0,32 d'après RICOU & SPALDING [41]	centre	2001

Tableau I.2 : Présentation non exhaustive des équations des positions centrales du jet dans la Littérature.

L'inclinaison du jet et la caractérisation des lignes caractéristiques dans le phénomène du Jet In Cross Flow (JICF) dépendent principalement du rapport entre la vitesse du jet et celle de l'écoulement traversier, ainsi que d'autres paramètres spécifiques à chaque expérience tels que la forme de l'injecteur, le profil de vitesse d'injection et la hauteur de la couche limite. Une compréhension précise de ces aspects est essentielle pour étudier le comportement global du JICF et ses applications industrielles.

Le premier élément crucial pour caractériser le jet et influencer son comportement dans l'écoulement, surtout près de la sortie, est la forme de l'injecteur. Des recherches menées par HAVEN & KUROSAKA [42] ont démontré que le rapport d'aspect de l'injecteur, c'est-à-dire la taille de l'orifice dans le sens de l'écoulement par rapport à l'autre dimension, joue un rôle déterminant. Leur étude indique que plus le rapport d'aspect est faible (l'orifice est plus long que large dans le sens de l'écoulement), plus le jet tend à pénétrer profondément dans l'écoulement traversier, ce qui a un impact sur la formation et la séparation des tourbillons contrarotatifs. Cette observation souligne l'importance de la conception précise de l'injecteur dans la compréhension et le contrôle du comportement du jet dans le JICF.

Le développement initial du jet dans ce qu'on appelle la "zone potentielle" est principalement influencé par le processus d'injection lui-même. Dans cette région, l'écoulement traversier a peu d'impact car la vitesse du jet est très proche de celle de l'injection () et la

température y est maximale. La taille de cette zone potentielle varie en fonction du facteur r ainsi que du profil d'injection de l'air chaud. Des études ont montré que le profil d'injection, qu'il soit parabolique ou carré dans l'écoulement traversier, à un impact direct sur l'évolution et la pénétration du jet dans l'écoulement principal. Par exemple, des recherches menées par NEW et al. [43] dans l'eau ont révélé que la pénétration du jet dans l'écoulement est plus importante lorsque le profil d'injection est de type parabolique que lorsqu'il est de type carré.

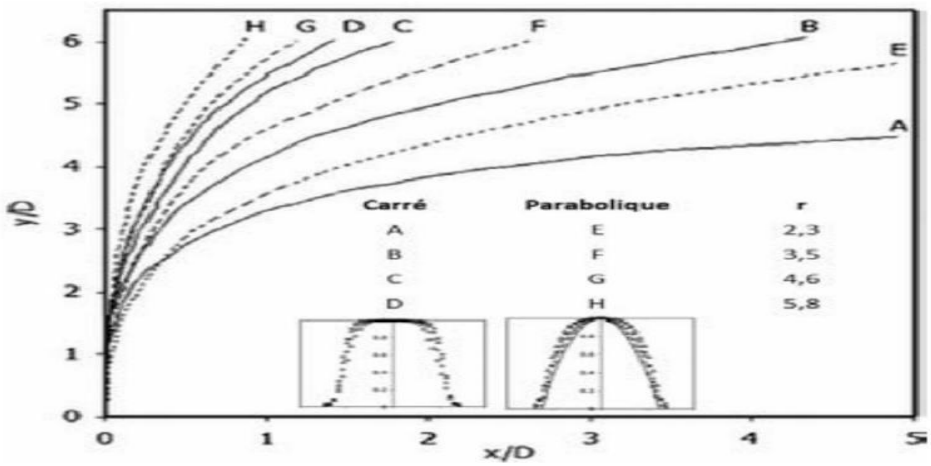


Figure I.5 : Lignes caractéristiques issues de tests en eau avec une injection parabolique (pointillée) et carrée (trait plein) pour 4 valeurs du facteur r différents T. H. NEW, T. T. LIM, S. C. LUO et al. [43].

MUPPIDI et al. [44,45] ont également travaillé sur ce sujet. La trajectoire de la ligne centrale (jet / traversier) est fortement dépendante de la forme du profil du jet et des conditions initiales de l'écoulement traversier. Effectivement, ils observent qu'un jet avec un profil parabolique pénètre plus facilement dans l'écoulement traversier (relevant la trajectoire) qu'un jet avec un profil plat (pour des facteurs **r** et des couches limites de l'écoulement traversier identiques). Parallèlement, pour des jets identiques à valeurs de **r** données, le jet évolue plus facilement lorsque la couche limite est grande que lorsque celle-ci est fine. En se basant sur les travaux de SU & MUNGAL [46] où le rapport de quantité de mouvement r est égal à 5,7 pour des nombres de **Reynolds** de jet d'environ 5000, MUPPIDI et al. [45] ont cherché à valider leur approche numérique. En plus d'avoir trouvé une bonne ressemblance entre l'expérience et la simulation numérique, ils ont pu mettre en évidence l'influence des paramètres de la turbulence [46] et l'énergie cinétique de turbulence qui subit une très forte variation aux abords du jet. En effet, l'énergie de turbulence augmente jusqu'à une hauteur équivalente à 4 fois le diamètre (4 D), diminue alors rapidement (vers 8D) puis se stabilise en s'éloignant de la sortie.

Bien que la majorité des études à lieu dans un environnement semi-infini ou sans interaction avec éventuellement la présence d'un plafond, KAMOTANI & GREBER [36] ont montré que la présence d'un plafond, pour un facteur r donné, limite le développement du jet. Dès lors qu'il n'y a pas d'interaction possible entre le plafond et le jet, la hauteur H/D n'a aucune influence sur l'axe du Jet. Par exemple, pour r = 2,83 (J = 8), quelle que soit la valeur prise par le rapport H/D (→∞, 16 ou 12) dans leur étude, le positionnement du jet est strictement identique. Pour des valeurs plus faibles, H/D = 8, une légère déviation est observée (cf. Fig. I.6).

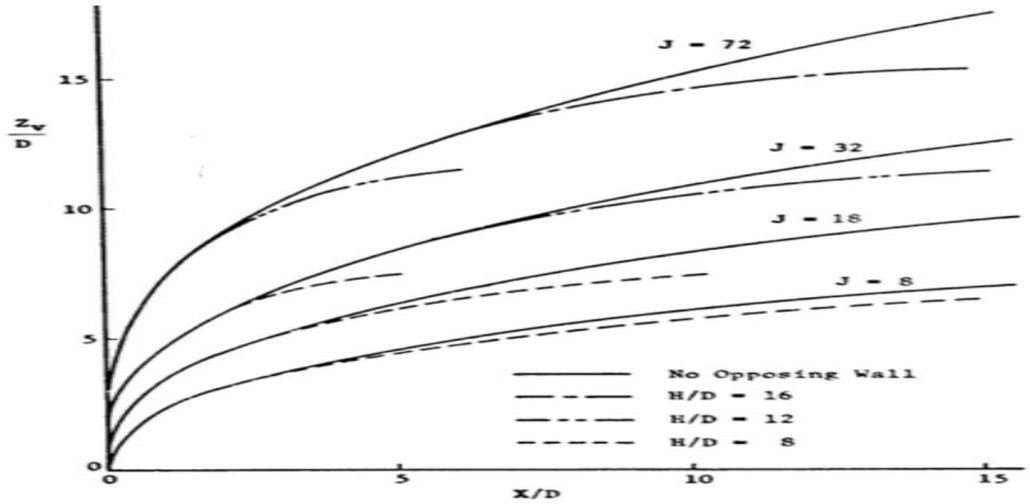


Figure I.6 : Evolution spatiale du centre du jet définir par les vitesses - pour 4 valeurs du facteur J différents et pour 4 rapports H/D, d'après KAMOTANI & GREBER [47].

Effectivement, peu d'études se sont penchées sur le cas du jet impactant une paroi en présence d'un écoulement traversier. En l'absence d'écoulement traversier, en revanche, un grand nombre d'études ont été menées sur l'impact du jet dans un environnement ouvert et stable. Par exemple, les travaux de ROUX [48] se sont concentrés sur cette configuration afin d'analyser l'amplification des échanges thermiques se produisant à la paroi. L'objectif principal était d'assurer un meilleur refroidissement de la paroi en comprenant les mécanismes d'échange de chaleur induits par le jet. Ce type de recherche revêt une importance significative dans divers domaines, notamment dans le domaine de la thermique industrielle et de la gestion de la chaleur dans les systèmes de refroidissement.

1.4.3. Aspects instationnaires

Le Jet In Cross Flow (JICF) est intrinsèquement un phénomène aérodynamique tridimensionnel complexe. Cette complexité se manifeste par un comportement essentiellement instationnaire, dans lequel quatre types de structures tourbillonnaires peuvent être identifiés :

1. Les tourbillons en fer à cheval (I).

2. Les tourbillons de couche de cisaillement (II).

3. Les paires de tourbillons contrarotatifs (III).

4. Les tourbillons de sillage (IV).

Ces structures sont schématiquement présentées dans la Figure I.7 (basée sur FRIC & ROSHKO [49]), et seront par la suite examinées en détail.

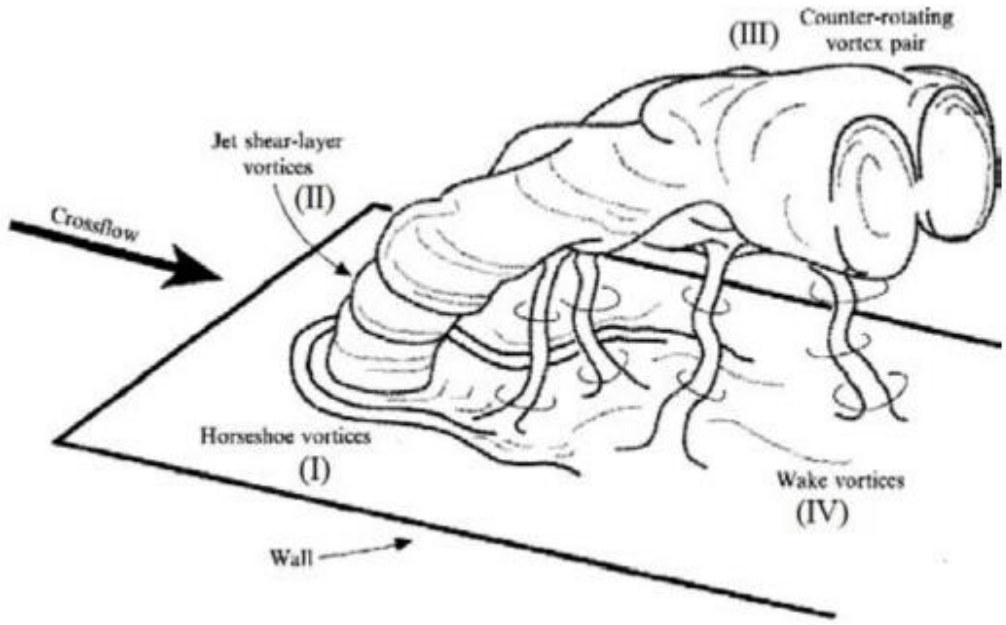


Figure I.7 : Structures tourbillonnaires types d'un JICF. Schéma d'après FRIC & ROSHKO[49].

I.5. Conclusion

Dans ce travail, nous abordons la question cruciale de la sécurité des voyageurs et des conducteurs à l'intérieur des tunnels, en particulier face aux risques d'incendie des véhicules. La récurrence des accidents de véhicules en feu à l'intérieur des tunnels souligne l'urgence de trouver des solutions pour assurer la sûreté et la sécurité de tous les usagers.

Nous proposons de simuler l'incendie d'un véhicule à l'intérieur d'un tunnel, en variant les conditions pour étudier leur impact sur la propagation des fumées et des gaz polluants. Notre attention se concentrera spécifiquement sur la propagation du dioxyde de carbone et l'effet de la température sur ces conditions.

L'objectif est de déterminer les meilleures stratégies pour réduire la température à l'intérieur du tunnel et limiter la propagation des gaz et des vapeurs toxiques. En comprenant mieux ces phénomènes, nous pourrons proposer des mesures efficaces pour atténuer les risques et assurer la sécurité des usagers des tunnels confrontés à de tels incidents.

CHAPITRE II

MODELISATION MATHEMATIQUE

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous explorons la modélisation mathématique du transfert de chaleur et de l'écoulement turbulent des fluides incompressibles en régime variable, en se penchant sur les modèles de fermeture associés. Nous commençons par examiner les lois fondamentales du transfert de chaleur, aboutissant à l'équation de la chaleur, qui régit le comportement thermique d'un système. Ensuite, nous abordons les équations de Navier-Stokes, qui décrivent le mouvement turbulent d'un fluide visqueux incompressible, en mettant en évidence les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie. Nous approfondissons également les modèles de fermeture nécessaires pour rendre ces équations solubles numériquement, soulignant leur importance dans la précision des simulations du transfert de chaleur et de l'écoulement turbulent. Ce chapitre fournit ainsi une base théorique essentielle pour comprendre et modéliser ces phénomènes complexes.

II.2. Modélisation de la turbulence

Les avancées dans la résolution des équations de la mécanique des fluides, combinées à l'évolution des capacités de calcul, ont rendu la modélisation numérique largement accessible. Aujourd'hui, la modélisation numérique est devenue un complément indispensable aux études expérimentales, notamment dans le domaine de la modélisation des écoulements turbulents. Celle-ci s'avère être un outil considérable pour comprendre les mécanismes physiques sous-jacents, ainsi que pour la conception et le développement industriels.

En effet, la modélisation numérique permet de réduire le nombre d'essais en soufflerie, entraînant ainsi une réduction des coûts et des délais de conception. De ce fait, elle représente un enjeu économique majeur pour de nombreuses industries.

Actuellement, les applications de la modélisation numérique couvrent un large éventail de domaines, notamment la prévision atmosphérique et la qualité de l'air dans les zones urbaines. Ces applications impliquent des phénomènes complexes tels que la transition laminaire, la turbulence et les décollements, nécessitant une modélisation précise pour obtenir des résultats fiables.

II.3. Equations mathématiques

II.3.1. Equation de continuité

L'équation de continuité peut être exprimée de différentes manières : sous forme locale conservative (dérivée en temps normale), locale non conservative (la dérivée en temps suit la particule dans son mouvement), ou intégrale. Selon le contexte du problème, l'une de ces formes peut être utilisée, mais elles sont équivalentes.

On note ici :

- $\rho = \rho(\vec{x}, t)$ $(II.1)$

La masse volumique du fluide au point repéré par le vecteur $\vec{x}$ l'instant ***t.***

- $\vec{U} = (\vec{U}, t)$ $(II.2)$

La vitesse d'une particule de fluide se trouvant au point repéré par le vecteur $\vec{x}$à l'instant t.

II.3.1.1. Forme locale

Cette écriture est la plus générale et la plus répandue.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho \vec{U}) = 0 \qquad (II.3)$$

En faisant intervenir la notion de dérivée particulaire, on a l'écriture équivalente suivante :

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \div (\vec{U}) = 0 \qquad (II.4)$$

II.3.1.2. Forme intégrale

Cette formulation permet l'étude d'un "bloc" de fluide $\Omega(t)$ pouvant éventuellement se déformer au cours du temps.

Elle traduit le fait que la masse du fluide enfermé dans le volume $\Omega(t)$ est constante.

$$\frac{d}{dt}\int_{\Omega(t)} \rho(\vec{x}, t) d\Omega(t) = 0 \qquad (II.5)$$

II.3.1.3. Ecoulement incompressible

Dans le cas où la masse volumique est constante au cours du temps et uniforme dans l'espace (écoulement incompressible), l'équation de conservation se réduit à

$$(\vec{U}) = 0 \qquad (II.6)$$

II.3.1.4. Conditions de saut

Lorsque le composé étudié est constitué de deux parties des fluides différentes séparés par une interface $\sum(t)$ se déplaçant à une vitesse de propagation locale $\overrightarrow{W}(\vec{x},t)$, la conservation de la masse s'exprime par la relation suivante :

$$\Delta\text{-}\overrightarrow{W}) \ ] \ . \ \vec{n} = 0 \qquad (II.7)$$

Ou : $\Delta(b)= b_2 - b_1$ si b_1 et b_2 sont les valeurs respectives de la grandeur ***b*** dans les deux fluides 1 et 2 et $\vec{n}$ est le vecteur normal à $\sum(t)$orienté du fluide 1 vers le fluide 2.

II.3.2. Equation de bilan de l'énergie

$$\frac{\partial(\overline{\rho e})}{\partial t} + \vec{\nabla}.\left[(\rho e + p)\vec{V}\right]=\overrightarrow{\nabla}.\left(\acute{\tau}.\vec{V}\right)+\rho\vec{f}.\vec{V} - \vec{\nabla}.\left(\vec{q}\right)+r \qquad (II.8)$$

Dans ces équations :

- t : représente le temps (unité SI : s).
- ρ : désigne la masse volumique du fluide (unité SI : Kg.m^{-3}).
- $\vec{V}$= (v1, v2, v3) désigne la vitesse eulérienne d'une particule fluide (unité SI : N.Kg^1).
- P : désigne la pression (unité SI : Pa).
- $\acute{\tau}$: (τijij est le tenseur des contraintes visqueuses (unité SI : Pa).
- $\vec{f}$: désigne la résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide (unité SI : N/Kg^1).
- e : est l'énergie totale par unité de masse (unité SI : J.Kg^{-1}).
- $\vec{q}$: est le flux de chaleur perdu par conduction thermique (unité SI J.$m^{-2}.s^{-1}$).
- : Représente la perte de chaleur volumique due au rayonnement (unité SI : J·$m^{-3}.s^{-1}$).

II.3.3. Equation de Navier-Stokes

En mécanique des fluides, les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles non linéaires qui décrivent le mouvement des fluides dans l'approximation des milieux continus. Elles gouvernent divers phénomènes tels que les mouvements de l'air dans l'atmosphère, les courants océaniques, l'écoulement de l'eau dans un tuyau, ou encore le mouvement d'air dans les locaux.

Ces équations sont nommées d'après deux physiciens du XIXe siècle, Claude Navier et Stokes. Il existe différentes formes des équations de Navier-Stokes, qui dépendent des notations et des conventions utilisées. Elles résultent directement du théorème de la quantité de mouvement.

$$\overbrace{\underbrace{\frac{\partial U_j}{\partial t}}_{(3)} + U_j \underbrace{\frac{\partial U_i}{\partial X_j}}_{(4)}}^{(1)} = \overbrace{\frac{-1}{\rho}\underbrace{\frac{\partial p}{\partial X_i}}_{(5)} + \underbrace{\frac{\partial^2 U_i}{\partial X_i \partial X_j}}_{(6)}}^{(2)} \qquad (II.9)$$

(1) : terme force d'intertie.

(2): terme force appliqué.

(3) : terme in stationnaire.

(4): terme convective.

(5): terme pression.

(6): terme visqueux.

II.3.4. L'équation de diffusion

Le point de départ est l'hypothèse selon laquelle la substance est conservée, ce qui signifie que, une fois générée par une source, elle n'est pas détruite. En conséquence, la densité ou la concentration de cette substance obéit à une équation de conservation.

$$\frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t} + \nabla . \vec{J}(\mathrm{x, t}) = 0 \qquad (II.10)$$

Le moteur de la diffusion est une différence locale de concentration qui génère naturellement un courant de substance, (vec {j} (x, t)), en ce lieu, vers l'extérieur si la concentration \ (y \) est plus élevée, et vers l'intérieur si la concentration (y) est moins élevée. Nous postulons ici que ce courant est proportionnel au gradient de densité, avec le signe négatif pour respecter la direction du courant (il descend la pente). Ainsi, nous donc :

$$\vec{J}(\mathrm{x, t}) = -\mathrm{D}\nabla\Psi(x,t) \qquad (II.11)$$

Où (D) est un coefficient de proportionnalité appelé coefficient de diffusion, et dont la valeur dépend des substances en contact. Il est fonction de la substance diffusante et du milieu dans lequel elle diffuse, prenant en compte de manière globale l'interaction (viscosité, fugacité, etc.) entre les deux milieux. En le remplaçant, nous obtenons :

$$\frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t} - \mathrm{D}\nabla^2\Psi(x,t) = 0 \qquad (II.12)$$

C'est l'équation homogène de diffusion, dont la solution nous donnera la concentration (Psi(x, t)) en tout lieu et en tout temps, dans les limites pertinentes à notre problème. En fait, cette équation est générale et s'applique donc à tous les phénomènes de diffusion, allant de la crème dans le café jusqu'aux photons dans la masse d'une étoile. Pour spécialiser la solution au

problème particulier auquel nous faisons face, il nous faut ajouter les conditions initiales qui peuvent être, par exemple, la distribution de la concentration au temps (t = 0).

Plus généralement, lorsque (D) est une matrice symétrique définie positive, l'équation décrit la diffusion anisotrope, qui est écrite (pour les trois dimensions de diffusion) comme suit :

$$\frac{\partial \phi(r,t)}{\partial t} = \sum_{i=1}^{3} \sum_{i=1}^{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[D_{ij}(\phi, r) \frac{\partial \phi(t,r)}{\partial x_i} \right] \qquad (II.13)$$

Si D est constante, l'équation se réduit à l'équation différentielle linéaire suivante :

$$\frac{\partial \phi(r,t)}{\phi t} = D\nabla^2 \phi) \qquad (II.14)$$

Si D est constante, l'équation se réduit à l'équation différentielle linéaire suivante :

$$\frac{\partial \phi(t,r)}{\partial t} = \mathrm{D}\nabla^2 \phi(t,r) \qquad (II.15)$$

Également appelé l'équation de la chaleur

II.3.5. Equation de conservation de quantité de mouvement

La conservation de la quantité de mouvement désigne, dans un référentiel inertiel, l'absence de variation de la quantité de mouvement du centre d'inertie d'un système dans certaines situations physiques, où l'on parle alors d'un système isolé. Par exemple, dans un référentiel inertiel et en l'absence de frottement, un système de corps soumis à aucune force extérieure mais entrant en collision les uns avec les autres.

Mathématiquement, la quantité de mouvement est conservée lorsque sa variation instantanée est nulle.

Ce principe est équivalent au principe d'inertie, mais fait intervenir la masse des corps (par définition), ce qui permet d'introduire la notion de force (par définition) dans le cas où le mouvement n'est pas rectiligne uniforme.

La formule associée à la conservation de la quantité de mouvement est :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho}\tilde{u}i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\overline{\rho}\tilde{u}j\tilde{u}i) = \frac{-\partial \overline{\rho}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\overline{\tau}ij - \overline{\rho u \} \mathrm{rsub} \{1 \ \} \rho \{\mathrm{u}_2}\right) + (\overline{\rho_\infty} - \overline{\rho})\mathrm{g}\delta ij \qquad (II.16)$$

II.3.6. Equation de conservation des espèces

Un système qui n'échange ni énergie ni force avec l'extérieur est appelé isolé. Cela signifie qu'aucune force externe n'agit sur le système et qu'il n'échange pas d'énergie avec son environnement. Par exemple, un système isolé n'échange pas de photons avec un autre système,

ni n'en reçoit d'un autre système. En d'autres termes, il est complètement autonome et indépendant de son environnement en ce qui concerne les échanges d'énergie et de force.

La formule est comme suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t}\vec{\rho}\vec{T} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\vec{\rho}\vec{u}j\vec{T}\right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \qquad (II.17)$$

II.3.7. Equation de conservation des espèces

Exprime dans cette formule :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho}\mathcal{C}^m) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho}\vec{u}j\mathcal{C}^m) = \frac{\partial}{\partial x_j} \qquad (II.18)$$

La fermeture du système d'équations nécessite simplement la définition des équations pour l'énergie cinétique turbulente (k) et le taux de dissipation de cette énergie turbulente (varepsilon). Ces équations sont essentielles pour modéliser les écoulements turbulents de manière précise.

$$\frac{\partial}{\partial t}(Pk) + \frac{\partial}{\partial x_j}(Pjkuj) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(u + \frac{u_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial t}{\partial x_j}\right] + Gk + Gb - \rho\varepsilon - YM + Sk \qquad (II.19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon uj) = \frac{\partial}{\partial X_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu}{\delta_K}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial X_j}\right] + \rho C1\mathrm{S}\varepsilon - \rho C2\frac{\varepsilon^2}{\sqrt{\vartheta\varepsilon}} + \mathrm{C3}\varepsilon Gb + S\varepsilon \qquad (II.20)$$

CHAPITRE III

PROCEDURE DE LA SIMULATION NUMERIQUE

III.1. Introduction

La modélisation numérique des flux, des transferts de chaleur et de la masse est désormais un outil essentiel et incontournable dans divers secteurs tels que l'aérospatiale, les turbines, et l'industrie automobile. Il est important de souligner que cette approche a considérablement optimisé l'utilisation des ressources en économisant du temps, des efforts et des coûts substantiels.

L'exploration scientifique d'un phénomène physique implique souvent l'établissement de lois décrivant ce dernier sous forme d'équations aux dérivées partielles. La résolution de ces équations est généralement effectuée au moyen de méthodes numériques telles que la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis et la méthode des volumes finis. Ces approches sont largement employées dans le domaine de la dynamique des fluides computationnelle (CFD) pour analyser et simuler une gamme variée de phénomènes, offrant ainsi des outils précieux pour la recherche et l'ingénierie.

III.2. Logiciel ANSYS APDL)

ANSYS est un logiciel d'analyse qui englobe la résolution de problèmes linéaires et non linéaires dans divers domaines tels que la mécanique des structures, la mécanique des fluides, l'acoustique, la thermodynamique, la piézoélectricité et l'électromagnétisme classique. Le logiciel propose une gamme complète d'outils pour résoudre des problèmes unidimensionnels, bidimensionnels et tridimensionnels. Il existe actuellement deux versions du logiciel : la version classique, connue sous le nom d'ANSYS Classique, et la version graphique avec interface utilisateur (GUI) appelée ANSYS Workbench. Ces deux versions offrent des fonctionnalités avancées pour la modélisation, la simulation et l'analyse dans un large éventail d'applications en ingénierie et en recherche.

III.3. Les méthode numérique

Trois approches numériques sont couramment employées pour résoudre les systèmes d'équations aux dérivées partielles qui régissent les écoulements :

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

III.3.1. La méthode des différences finis

La méthode des différences finies est une approche largement utilisée pour obtenir des solutions approximatives aux équations aux dérivées partielles. Elle implique la résolution d'un système de relations, également appelé schéma numérique, qui relie les valeurs des fonctions inconnues à des points voisins les uns des autres.

La méthode des différences finies est souvent considérée comme la plus simple à mettre en œuvre. Elle se déroule en deux étapes : tout d'abord, la discrétisation par différences finies des opérateurs de dérivation ou de différenciation, puis la convergence du schéma numérique ainsi obtenu à mesure que la distance entre les points de discrétisation diminue.

III.3.2. La méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis vise à transformer les équations différentielles régissant un système en un ensemble d'équations algébriques portant sur un nombre restreint de variables. Cette approche est populaire car elle peut être facilement mise en œuvre grâce à la programmation. Initialement développées pour résoudre des problèmes structuraux, les techniques des éléments finis ont été étendues à de nombreux domaines d'application. Dans cette méthode, le solide est subdivisé en éléments de forme géométrique simple, partageant des côtés communs et ayant des sommets ou nœuds correspondant aux points d'intersection de plusieurs éléments. Ces nœuds servent de points d'application pour les forces internes ou externes. Le processus de subdivision est appelé maillage, et un maillage efficace doit faciliter les calculs effectués par le programme informatique. Par conséquent, une numérotation systématique des éléments et des nœuds est essentielle pour garantir la précision et l'efficacité de la méthode.

Avantage

La méthode des éléments finis offre plusieurs avantages significatifs :

- Elle permet de traiter des géométries complexes, ce qui en fait une méthode polyvalente pour divers types de problèmes.
- Elle offre une manière plus naturelle de spécifier les conditions aux limites, ce qui simplifie la modélisation de situations réelles.
- Permet souvent des démonstrations mathématiques de convergence, ce qui est crucial pour garantir la précision des résultats obtenus.

Ces avantages font de la méthode des éléments finis un outil puissant et largement utilisé dans de nombreux domaines de l'ingénierie et des sciences appliquées.

Inconvénients

Cependant, la méthode des éléments finis présente également quelques inconvénients :

- Tout d'abord, sa mise en œuvre peut être complexe, nécessitant une expertise technique et une compréhension approfondie des principes sous-jacents.
- Peut entraîner des coûts élevés en termes de temps de calcul et de mémoire, en particulier pour des modèles complexes ou des simulations à haute résolution.

Ces inconvénients doivent être pris en compte lors de la sélection et de l'utilisation de la méthode des éléments finis pour résoudre des problèmes d'ingénierie ou scientifiques.

III.3.3. La méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis est une technique utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles, similaire à la méthode des différences finies et à celle des éléments finis. Cependant, contrairement à la méthode des différences finies qui repose sur des approximations des dérivées, les méthodes des volumes finis et des éléments finis se basent sur des approximations d'intégrales. La méthode des volumes finis se distingue en ce sens qu'elle repose directement sur la forme dite forte de l'équation à résoudre, tandis que la méthode des éléments finis s'appuie sur une formulation variationnelle de l'équation, également appelée formulation faible.

III.3.4. Présentation de la méthode

Comme évoqué précédemment, la méthode des éléments finis vise à transformer un problème mathématique formulé dans un milieu continu sous la forme d'équations différentielles ou d'intégrales en un problème discret exprimé sous forme matricielle, susceptible d'être résolu numériquement. En résumé, cette approche implique la discrétisation d'un continuum en un modèle constitué d'un assemblage d'éléments finis présentant diverses formes et tailles.

De plus, le calcul de la solution requiert la prise en compte de plusieurs paramètres essentiels, notamment :

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

III.4. Méthode de Résolution des équations par éléments finis

La méthode des éléments finis repose sur deux principes clés : l'interpolation et la variation, étant donnés un domaine continu et une fonction u solutions de $L(u) = 0$.

1- L’interpolation consiste à représenter la solution sur chaque élément fini par une fonction polynomiale, approximant ainsi la solution réelle. Cette fonction est déterminée en utilisant les valeurs connues de la solution aux nœuds de l'élément et en utilisant des techniques d'interpolation pour extrapoler la solution à l'intérieur de l'élément.

2- La variation est basée sur le principe du minimum d'énergie potentielle. Elle cherche à minimiser une fonctionnelle dérivée de l'énergie totale du système, en variant la solution dans un espace fonctionnel approprié.

- En combinant ces deux principes, la méthode des éléments finis discrétise le domaine continu en un ensemble d'éléments finis et formule un système d'équations algébriques. Une fois résolu, ce système fournit une approximation de la solution du problème continu.

La restriction de la fonction approchée à un élément K (quadratique) du maillage, notée $\emptyset_n^k$, est de la forme :

$\emptyset_n^k(x,y)=\sum_{i=0}^{nk} =\emptyset_i N_i(x,y)=0$ (III-1)

Ou $\emptyset_m^k$ désigne la valeur de la fonction approchée $\emptyset_i$au point xi de coordonnées (xi, yi),

Ni la fonction d'interpolation associée à xi, Nk le nombre de fonction utilisées pour l'élément k, Les coefficients Øi de cette combinaison linéaire sont les inconnues ou degré de liberté du problème discret, les fonctions d'interpolation sont les fonctions de base d'un espace vectoriel de dimension finie Nk dans lequel on cherche à priori la solution discrèteØ .

Afin de déterminer les inconnus du problème discret, une méthode de résidus pondérés est Utilisée : on minimise l'erreur commise est menuisée en remplacent dans les équations aux dérives partielles les fonctions exacte par la fonction approchée, pour cela, on projette l'air sur un espace de fonction Øh à précisé. La méthode de galerkin est un cas particulier de la méthode des résidus pondérés, l'espace Projection est le même que l'espace d'approximation de la solution du problème, autrement dit Øh = Nh.

III.4.1. Misse en œuvre de la méthode des éléments finis

III. 4.1.1. Formation variationnelle faible

La formation variationnelle faible peut être obtenue par l'étable suivante :

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

$\overline{U}=\sum_{i=1}^{n} N_i \overline{U}_l$ (III-2)

On Ni =Ni(x,y) désignent les fonctions $\overline{U}$ et des valeurs nodales in terminées.

2. introduire (III-3) dans (III-2) il en résulte une erreur ou un résidu tel que :

$\varepsilon = \zeta(\overline{U}) - F \neq 0$ (III-3)

3. obstiner une valeur nulle de en introduisant une fonction de point arbitraire w tel que :

$\int W\left(\zeta(\overline{U}-F)\right) d\Omega = 0$, K=1, 2, 3…N (III-4)

On N nombre d'inconnues indépendants du système (III-2)

En formulation de galerkine les fonctions tests sont assimilées aux fonctions de forme On pose :

$W_k=N_k=\int NK\, \zeta(\sum_{i=1}^{n} N_i\overline{u_1})d\Omega = 0$ (III-5)

On dit que u $\varepsilon H_0^1(\Omega)$ est une solution faible de (III-5) si :

$\forall v\ H_0^1(\Omega) a(\overline{U}, V)$ (III-6)

$À(\overline{U}, V)$est la forme bilinéaire associée à (ζ) soit Ω un ouvert borné R^det dΩ est régulier.

On considère alors le problème :

Lu = f sur Ω et u = 0 sur $d\Omega = 0$ (III-7)

III.4.2. Forme générale des équations du système [10]

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

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho c\emptyset + \frac{\partial}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x \emptyset\emptyset) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho V_y \emptyset\emptyset\right) = \frac{\partial}{\partial x}\left(T\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial y}\right) + S\emptyset \quad \text{(III-8)}$$

Ou :

∅: Variatible généralisée.

C∅:Coefficient d'advection transitoire.

T∅ : coefficient de diffusion.

S∅ : termes source.

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

Variable ∅	**Coefficient d'advection $C_\emptyset$**	**Diffusivité $\Gamma_\emptyset$**	**Termes source $S_\emptyset$**
V_x	1	μ	$\frac{-\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) - \delta\nabla \mid \frac{\nabla_c}{\vee\nabla_c\vee} \mid \frac{\nabla_c}{\vee\nabla_c\vee}$
V_y	1	μ	$\frac{-\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) - \delta\nabla \mid \frac{\nabla_c}{\vee\nabla_c\vee} \mid \frac{\nabla_c}{\vee\nabla_c\vee}$
T	1	$\frac{k}{\rho c^e}$	$\frac{\varphi}{pc^e}$
P	1	0	0

Tableau III-1 : expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables. . (PFE UNIV MEDEA)- Etude de la dispersion des gaz issus d'un foyer d'incendie mobile, application dans un tunnel tertiaire-2022

III.5. Choix d'un maillage

Le choix d'un maillage est une étape cruciale dans la méthode des éléments finis. Bien que les maillages carrés ou triangulaires soient couramment utilisés, il n'y a aucune restriction à utiliser des maillages plus complexes. Il est important de noter que le maillage n'a pas besoin d'être régulier, et il est souvent judicieux de resserrer le maillage près des zones d'intérêt où la solution est susceptible de varier considérablement.

Cependant, il est essentiel de veiller à ce que les éléments du maillage ne soient pas fortement déformés, c'est-à-dire qu'ils se rapprochent autant que possible de la forme d'un polygone régulier. Plus le maillage est resserrée, plus la solution obtenue par la méthode des éléments finis sera précise et se rapprochera de la solution réelle de l'équation aux dérivées partielles.

Pour les géométries complexes, il est possible d'utiliser des éléments tétraédriques, bien que cela puisse nécessiter un nombre important d'éléments et de ressources informatiques. Même pour des volumes de forme régulière, un maillage basé sur des éléments tétraédriques peut nécessiter un grand nombre d'éléments, surtout si le rapport entre les dimensions sont très élevées. C'est pourquoi il est souvent préférable de choisir le type de maillage en fonction de la géométrie et des caractéristiques du problème à résoudre.

III.5.1. Discrétisation

La discrétisation des équations aux dérivées partielles (EDP) dans la méthode des éléments finis permet de les convertir en un système d'équations algébriques, qui peut être résolu par des méthodes numériques. Ce processus consiste à découper l'espace en éléments finis et à écrire les équations pour chaque élément, puis à assembler ces équations pour former un système global. En résolvant ce système, on obtient une approximation numérique de la solution du problème.

Pour les intégrales élémentaire, la méthode galérien des résiduels pesés est employé.

$([A_B{}^{\text{Transirent}}] + [A_B{}^{\text{advections}}] + [A_e{}^{\text{diffusion}}])(\emptyset e) = (S_e^{\emptyset})$ (III-9)

III.5.1.1.Terme temporelle

Le premier des contributions de l'élémentaire est le terme de transition, sa forme générale est simplement :

Générale est simplement :

$$[A_e{}^{Transen]} = \int W^e \frac{a\rho c\emptyset}{\partial t}\, d(vol)$$ (III-10)

Avec :

W_e = la fonction pesante pour l'élément, qui est également la fonction de forme pour le nœud :

$$\int W^e \frac{(a\rho c\emptyset\emptyset)^2}{\partial t} d(vol) = \int W_i^e \rho c\emptyset W_i^e d(vol) \frac{\partial \emptyset_i^e}{\partial t} + \int W_i^e \frac{\partial \rho c\emptyset}{\partial t} W_j^e d(vol)\emptyset_j^e \quad \text{(III-11)}$$

Les indices inférieurs i et j indiquent le nombre de nœud, si la deuxième partie de l'équation (III-11) est négligée, la matrice de masse peut être exprimée comme :

$$M_{ij} = \int W_i^e \rho c\emptyset W_i^e \, d(vol) \quad \text{(III-12)}$$

Si l'approximation localisée de masse est employée.

$$M_{ij} = \delta_{ij} \int W_i^e \rho c\emptyset W_i^e \, d(vol) \quad \text{(III-13)}$$

Ou : δ_{ij} =delta de Kronecker (o si i≠ $j, 1sii = j$ il ya deux méthode d'intégration temporelles : Newmarket et (Packard différence) différence en arrière. La méthode d'interaction de temps de newmank ou, la formulation implicite de base onde, exprime l'étape de temps courant comme la nième étape de frios et l'expression comporte les résultats précédents d'une étape des temps.

$$(\rho\emptyset)_n = (\rho\emptyset)_{n-1} + \nabla t \left[\delta \left(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t}\right) + (1-\delta)\left(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t}\right)_{n-1}\right] \quad \text{(III-14)}$$

Ou :

$\delta =$ Coefficient d'intégration de temps pour la méthode newmark l'équation (III-14) est écrite comme suite :

$$\left(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t}\right)_n = \frac{1}{\nabla\delta t}(\rho\emptyset)_n - \frac{1}{\nabla\delta t}(\rho\emptyset)_{n-1} + \left(1 - \frac{1}{\delta}\right) \quad \text{(III-15)}$$

III.5.1.2. Terme d'advection

Il existe trois approches courantes pour la discrétisation du terme d'advection dans les méthodes numériques :

III.5.1.2.1. Monotone streamline upwind approach (MSU)

Cette méthode consiste à choisir la direction d'advection dominante et à utiliser une discrétisation "upwind" pour calculer le flux à travers les interfaces entre les cellules du maillage. Cette approche favorise la stabilité numérique en suivant la direction du flux dominant.

$$\frac{\partial(\rho v_x c\emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y c\emptyset)}{\partial y} = \frac{\partial(V_s c\emptyset)}{\partial s} \quad \text{(III-16)}$$

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

$$[A_e{}^{\text{Advections}}] = \frac{d(\rho VsC\emptyset\emptyset)}{dy} \int W^e d(vol) \quad \text{(III-17)}$$

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

$$\frac{d(\rho VsC\emptyset)u}{ds} = \frac{(\rho VsC\emptyset)u}{Ds} \quad \text{(III-18)}$$

Ou :

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

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

ds : la distance du point situé en amont à l'aval nœuds.

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

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

$$\left[A_e^{advection}\right] = \int W^e \left\{\frac{\partial(\rho VxC\emptyset\emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho VxC\emptyset\emptyset)}{\partial y}\right\} d(vol) + C_{2\tau}$$

$$\int \frac{zh}{2U_{mag}} \left\{V_x \frac{\partial W^E}{\partial X} + V_y \frac{\partial W^e}{\partial x}\right\} \left\{V_x \frac{\partial(\rho C\emptyset\emptyset)}{\partial X} + \frac{\partial(\rho C\emptyset\emptyset)}{\partial y}\right\} d(vol) \quad \text{(III-19)}$$

Ou :

$C_{2\tau}$:Coefficient global réglé à 1.0.

H : longueur d'élément le long de la direction d'advection.

$$U_{mag} = \sqrt{V_{X^2} + V_{Y^2}} \begin{cases} 1si0 \leq p \leq 3 \\ \frac{pe}{3} sipe \geq 0 \end{cases}$$

$pe = \frac{\rho CpU_{mag}}{2T}$ nombre de pellet

L'exactitude du second degré, et donc le terme de perturbation fournit la stabilité nécessaire qui est absente la discrétisation pure de Galerkine.

III.5.1.2.2. Approche colloquée de galérien (COLG)

Cette méthode combine l'approche upwind avec une méthode de Galerkine pour stabiliser les solutions aux problèmes de convection-diffusion. Elle utilise des fonctions de poids

pour améliorer la précision des résultats, en particulier dans les régions où le gradient de la solution varie rapidement.

$$\left[A_e^{advection}\right] = \int W^2 \left\{\frac{\partial(\rho V x C \emptyset \emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V x C \emptyset \emptyset)}{\partial y}\right\} d(vol) + C_{2\tau}$$

$$\int \frac{zh}{2U_{mag}^2}\left\{V_X^e \frac{\partial W^E}{\partial v} + V_Y^e \frac{\partial W^e}{\partial x}\right\}\left\{V_X^e \frac{\partial(\rho C \emptyset \emptyset)}{\partial X} + V_Y^e \frac{\partial(\rho C \emptyset \emptyset)}{\partial y}\right\} d(vol) \quad \text{(III-20)}$$

Dans cette approche, l'équation de pression est dérivée à partir des vitesses nodales, ce qui signifie qu'elle est basée sur les interactions entre les éléments du maillage. Contrairement à certaines méthodes où la discrétisation peut conduire à une perte de symétrie, cette méthode vise à préserver la conservation exacte même sur les maillages non structurés ou brutaux. Cela garantit que les propriétés de conservation sont respectées de manière précise, ce qui est crucial pour obtenir des résultats précis et physiquement cohérents dans les simulations numériques.

III.5.1.3. Terme de diffusion

Ces méthodes visent à réduire la diffusion numérique en utilisant des bases d'approximation locales et en minimisant les oscillations non physiques dans la solution. Elles sont particulièrement efficaces pour capturer les caractéristiques à haute fréquence des flux advectifs.

Chacune de ces approches présente des avantages et des inconvénients en fonction des caractéristiques du problème et des préférences de l'utilisateur en termes de précision, de stabilité et de coût computationnel.

$$\text{Diffusion contribution} = \int W^e \frac{\partial}{\partial x}\left(T\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial x}\right) d(vol) + \int W^e \frac{\partial}{\partial y}\left(T\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial y}\right) d(vol) \quad \text{(III-21)}$$

III.6. Conclusion

Les modèles physiques établis dans le chapitre précédent permettent de prendre en compte tous les interactions entre les principaux phénomènes physiques impliqués, ainsi que la transition du domaine continu au domaine discret pour la résolution du problème. Dans ce chapitre, les trois grandes méthodes numériques couramment utilisées pour résoudre les systèmes d'équations aux dérivées partielles ont été présentées. Parmi celles-ci, la méthode des éléments finis a été choisie pour discrétiser la forme générale des équations du système ainsi que l'équation de chaleur.

CHAPITRE IV

RESULTAT ET DISCUSSION

IV.1. Introduction

L'avantage des simulations numériques réside dans la capacité à étudier de nombreuses configurations en un minimum de temps. Le présent chapitre met en avant l'application de l'outil ANSYS APDL pour la simulation de l'incendie en tunnel.

Ce chapitre est principalement dédié à l'exploitation des résultats des simulations numériques. Pour ce faire, nous présentons les résultats de notre étude de simulation numérique comparés avec les résultats expérimentaux de GIACHETTI [50]. De plus, ce chapitre inclut une analyse de l'influence des positions et des accès sur la dispersion des gaz issus d'un foyer d'incendie.

IV.2. Identification

Sur la base des quatre paramètres précédemment décrits, à savoir le changement de section, la source chaude, les accès et l'injecteur vapeur d'eau, une esquisse a rapidement pu être mise en place.

- La maquette a pris la forme d'un « pavé » possédant deux excroissances latérales, pour simuler les tunnels et deux canaux verticaux pour représenter les accès. Pour des raisons de simplification et de variation possible de leurs positions, les accès seront positionnés directement sur le plafond de la station. Dans une station réelle, le nombre et surtout la forme des accès est très complexe (couloirs, escaliers, ...). Ici, le cas est simplifié et seul deux accès seront considérés. Ils sont représentés par des canaux rectangulaires verticaux. Si généralement les accès sont connectés à la station au niveau des quais, donc en partie basse de la station, il a été décidé de se placer dans un cas plus « défavorable », avec potentiellement des effets de tirage thermique intervenant en partie supérieure de la veine.

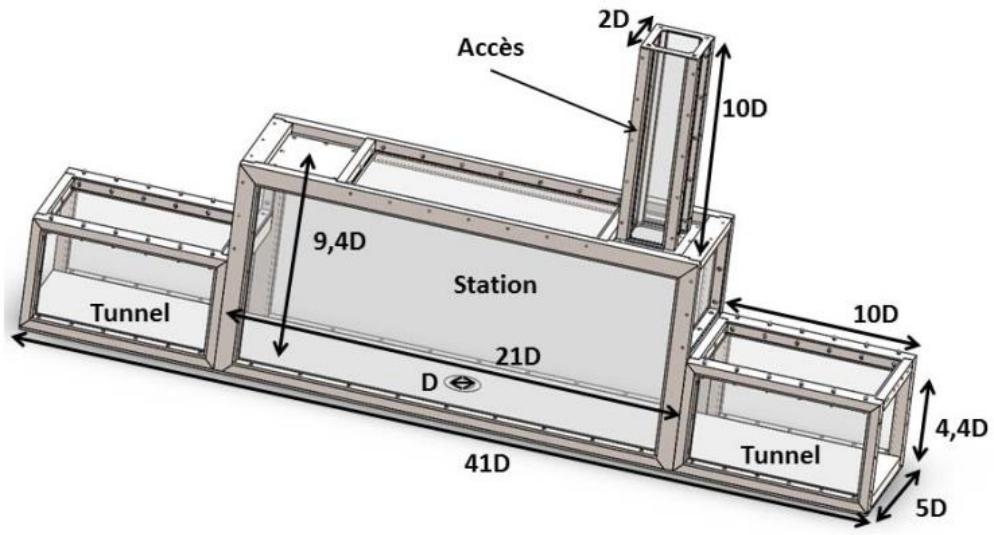


Figure IV.1 : Présentation de la veine d'essais et ses dimensions. de B.GIACHETTI [50]- Published 3 April 2015

IV.3. Configuration d'étude

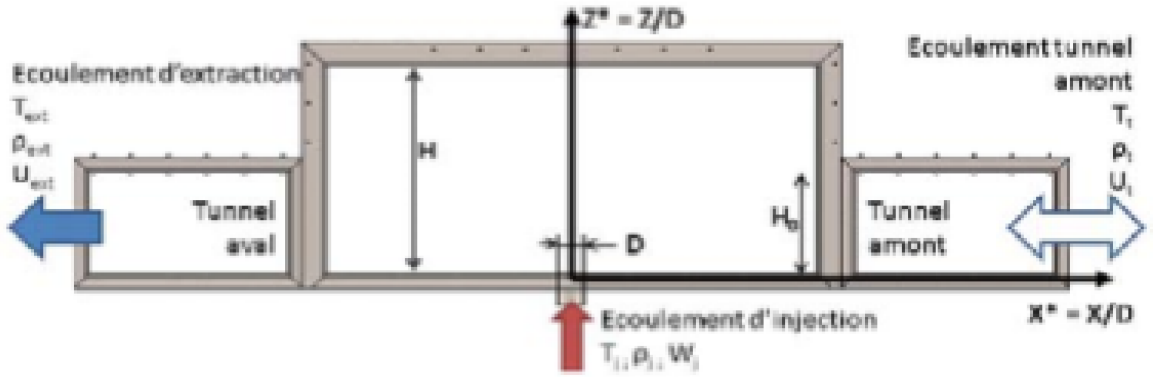


Figure IV.2 : Géométrie globale du domaine de calcul (Bastien Giachetti. Etude expérimentale et numérique du développement d'un écoulement chaud vertical en milieu semi-confiné sous l'influence d'une ventilation mécanique. Application à une station de métropolitain. Autre. ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - Poitiers, 2015.

La figure **IV.2** Présente la géométrie étudiée, composée d'une partie centrale rectangulaire d'une hauteur H représentant la station. De part et d'autre de la station, des ouvertures correspondent aux tunnels amont et aval de hauteur H_0=4.4D.

IV.4. Création de la géométrie

Initialement, l'utilisateur du logiciel doit sélectionner un système de coordonnées pour caractériser la géométrie. Étant donné que les domaines peuvent varier selon les études, ANSYS APDL permet d'établir la géométrie du système étudié. Cette géométrie est construite à partir de points qui servent à créer des lignes, puis les différentes surfaces de la géométrie, comme illustré dans la figure IV.2.

IV.5. Génération de maillage

La première étape cruciale dans la réalisation d'une simulation numérique est la définition d'un maillage adapté à l'écoulement. La précision des calculs dépend directement de la qualité de ce maillage. Un nombre de mailles insuffisant peut entraîner une divergence des calculs ou une diffusion numérique excessive. Il est essentiel de trouver un compromis entre le nombre de mailles et le temps de calcul, qui augmente significativement avec le raffinement de la discrétisation du domaine.

Une étude numérique portant sur l'impact du maillage sur l'écoulement de l'air est menée. Le domaine de calcul est bidimensionnel. Trois simulations sont réalisées avec trois maillages différents. Il est constaté que le raffinement du maillage n'entraîne aucune modification de l'écoulement dans la partie centrale du domaine. Le maillage utilisé pour ces simulations numériques est un maillage rectangulaire, jugé comme offrant le meilleur compromis entre précision et temps de calcul par rapport à d'autres types de maillages.

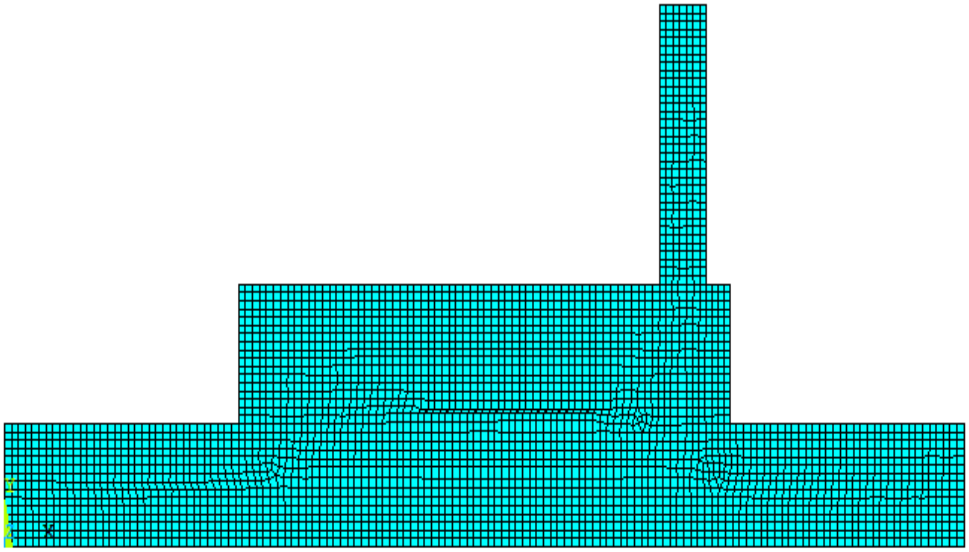


Figure IV.3 : représentation de maillage du tunnel.

Propriétés	**Air**	**Co2**	**Eau**
-+*Densité [kg/m^3]	1.2	0.977	998
Viscosité [pa/s]	0.2 e-5	1.49 e-5	1.002 × 10^-6
Conductivité [w/k°]	0.0234	0.0145	0,6
Chaleur spécifique [kj/kg.k°]	1004	0.848	4,186

Tableau IV.1 : propriétés de l'air, eau et Co2. (PFE UNIV MEDEA)- Etude de la dispersion des gaz issus d'un foyer d'incendie mobile, application dans un tunnel tertiaire-2022

IV.6. Condition initial et condition aux limites

Les conditions initiales décrivent l'état de base du modèle au début de la simulation et sont appliquées sur des surfaces du domaine de calcul.

À l'entrée de la maquette, une condition de pression nulle est imposée, tandis que la température est fixée conformément aux conditions d'essai. Le schéma suivant présente les conditions limites imposées.

Schéma de Configuration de l'étude avec deux accès.

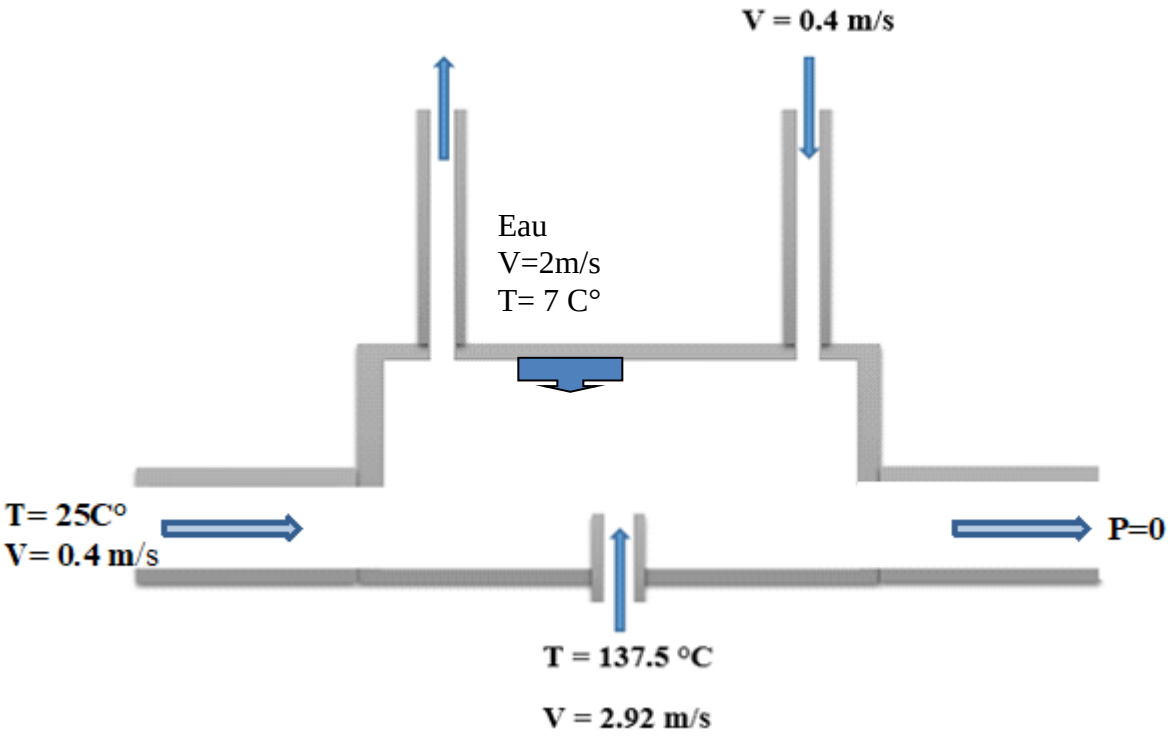


Figure IV.4 : Choix des conditions initiales et conditions aux limites.

IV.7. Description de l'écoulement

Dans le but de comprendre l'organisation des écoulements, les champs de vitesse ont principalement été mesurés dans le plan médian de la station.

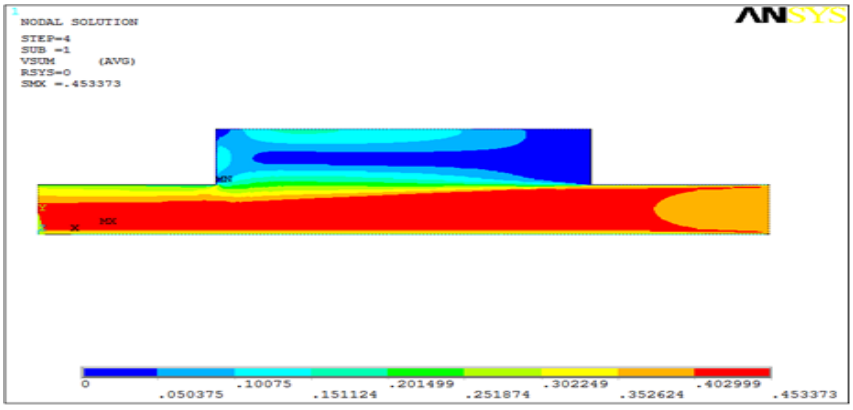


Figure IV.5 : les champs moyens de composante de vitesse V.

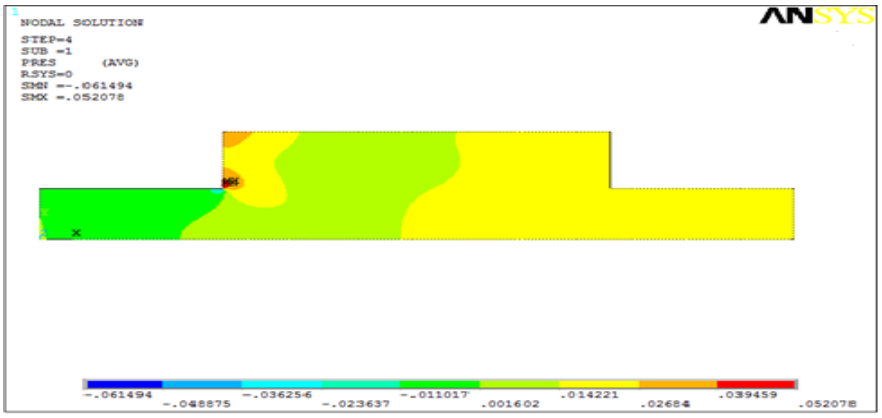


Figure IV.6 : contour de la Pression

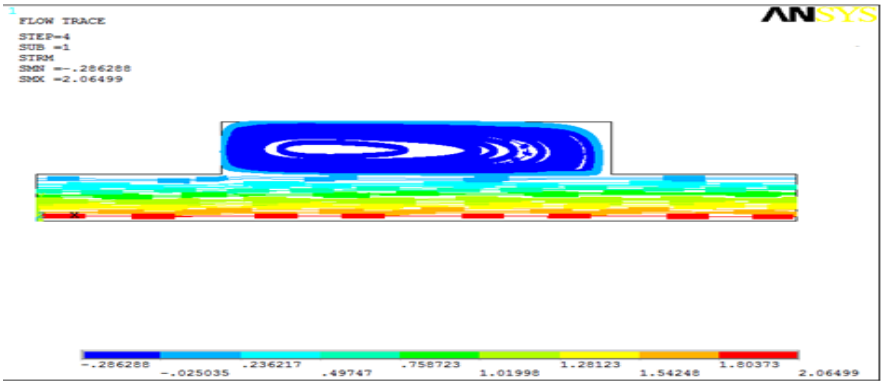


Figure IV.7 : Représentation spatiale de la circulation de l'air

Les **Figures IV.5** et **IV.6** illustrent respectivement les champs moyens de la composante de vitesse V et la dispersion de la pression. L'écoulement transversal provenant du tunnel amont et se dirigeant vers le tunnel aval occupe la majeure partie des tunnels ainsi que la moitié inférieure de la veine. Dans la partie centrale (au niveau de la station) et dans la partie supérieure, l'écoulement adopte une orientation horizontale. Trois emplacements stratégiques de la veine sont identifiés (cercles rouges - Figure IV.6), à savoir dans le tunnel amont, au centre de la station et dans le tunnel aval. La Figure IV.7 représente la configuration de l'écoulement pour la vitesse horizontale dans le tunnel amont. Nous avons modifié les points de mesure et l'écoulement présent un mouvement de l'extérieur vers l'intérieur du tunnel.



Figure IV.8 : Configuration de test pour les Profils de vitesse dans le tunnel amont.

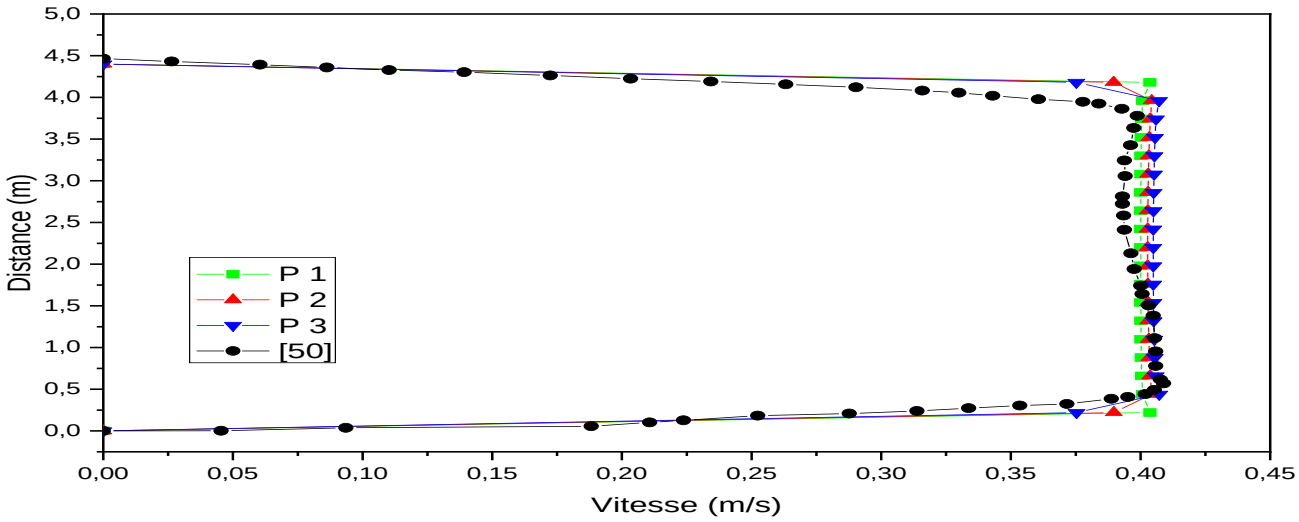


Figure IV.9 : Profile de vitesse transversale dans le tunnel amont

Dans le cadre de l'étude menée, la Figure IV.9 illustre une comparaison des profils de vitesse longitudinale pour une vitesse V=0.4 m/s. Il est remarquable que les résultats numériques obtenus

concordent bien avec les observations expérimentales [50]. Les données de vitesse présentées dans la Figure IV.9 démontrent une grande stabilité en dehors des couches limites. Cependant, lorsque les vitesses de l'air sont extrêmement faibles, autour de 0.4 m/s, le flux reste fortement influencé par les oscillations externes."

La **figure IV.10** indique l'endroit de mesure de vitesse dans le tunnel aval.



Figure IV.10 : Configuration de test pour les Profils de vitesse dans le tunnel aval.

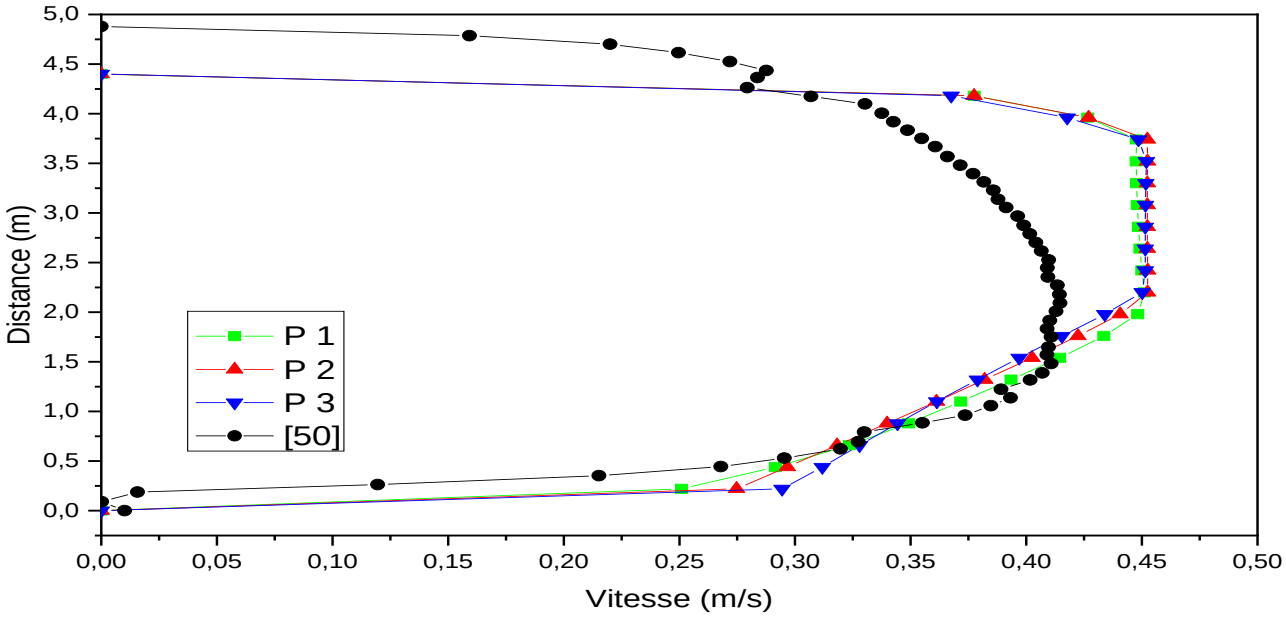


Figure IV.11 : Profil de vitesse transversale dans le tunnel aval.

Dans la section aval du tunnel, la **Figure IV.11** révèle la présence d'une augmentation de la vitesse, particulièrement notable sur le tiers supérieur de la hauteur. Cette accélération s'explique par la configuration du flux qui contraint une partie du débit à se comprimer brusquement de haut en bas, induisant une orientation du flux vers le fond du tunnel.

Cette modification de l'orientation crée des fluctuations importantes, se traduisant par des niveaux de turbulence élevés avoisinant les 22 % avant de diminuer par la suite

IV.8. Cas référance

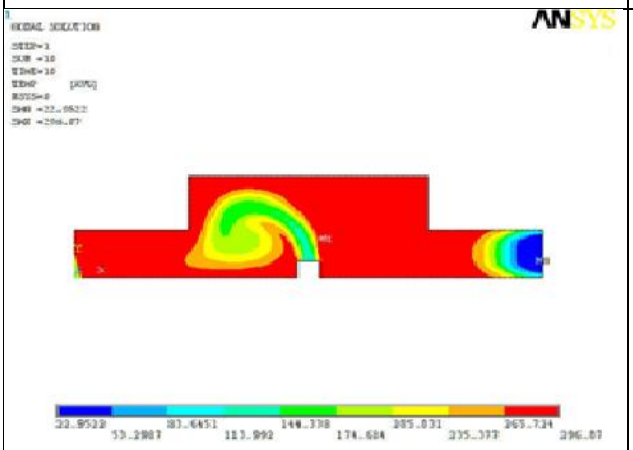
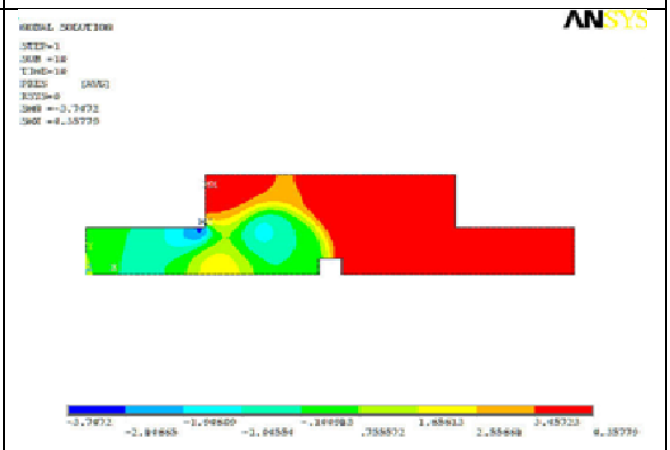
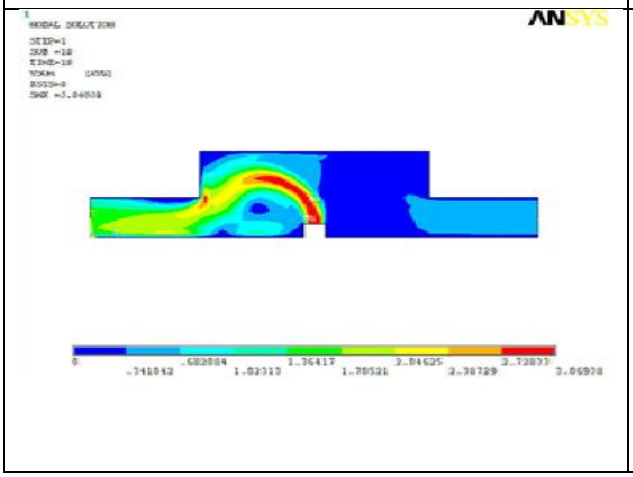
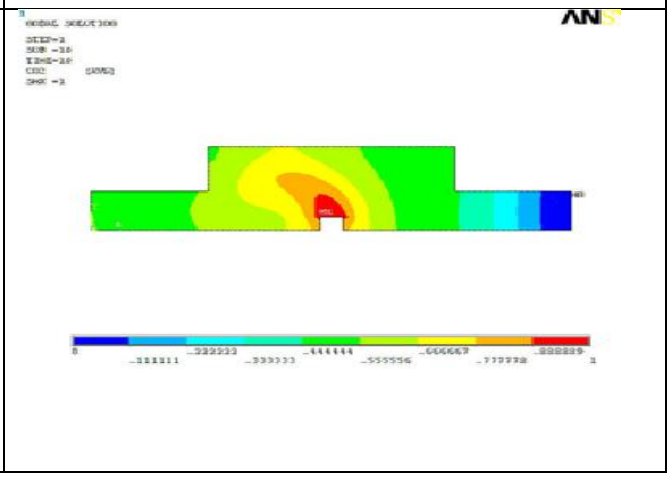
Température	Pression
	
Vitesse	CO2
	

Tableau IV.2 : Représentation spatiale de la dispersion de la température, la pression, la vitesse et la concentration du Co2 dans le temps.

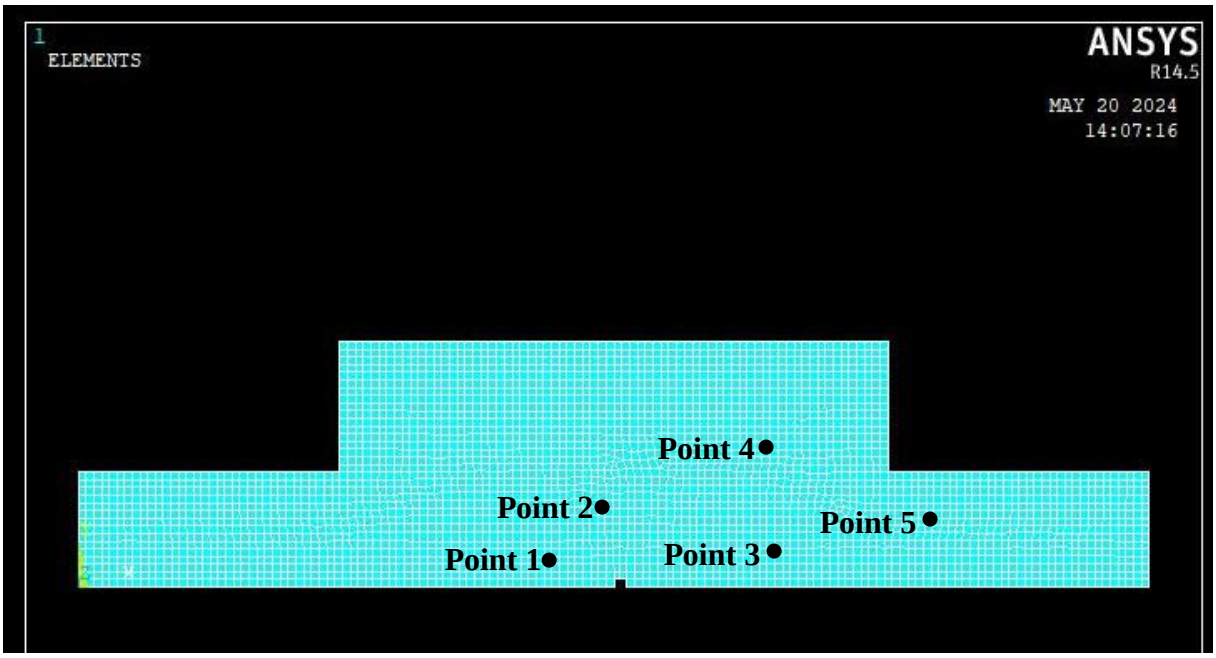


Figure IV.12 : Représentation les points.

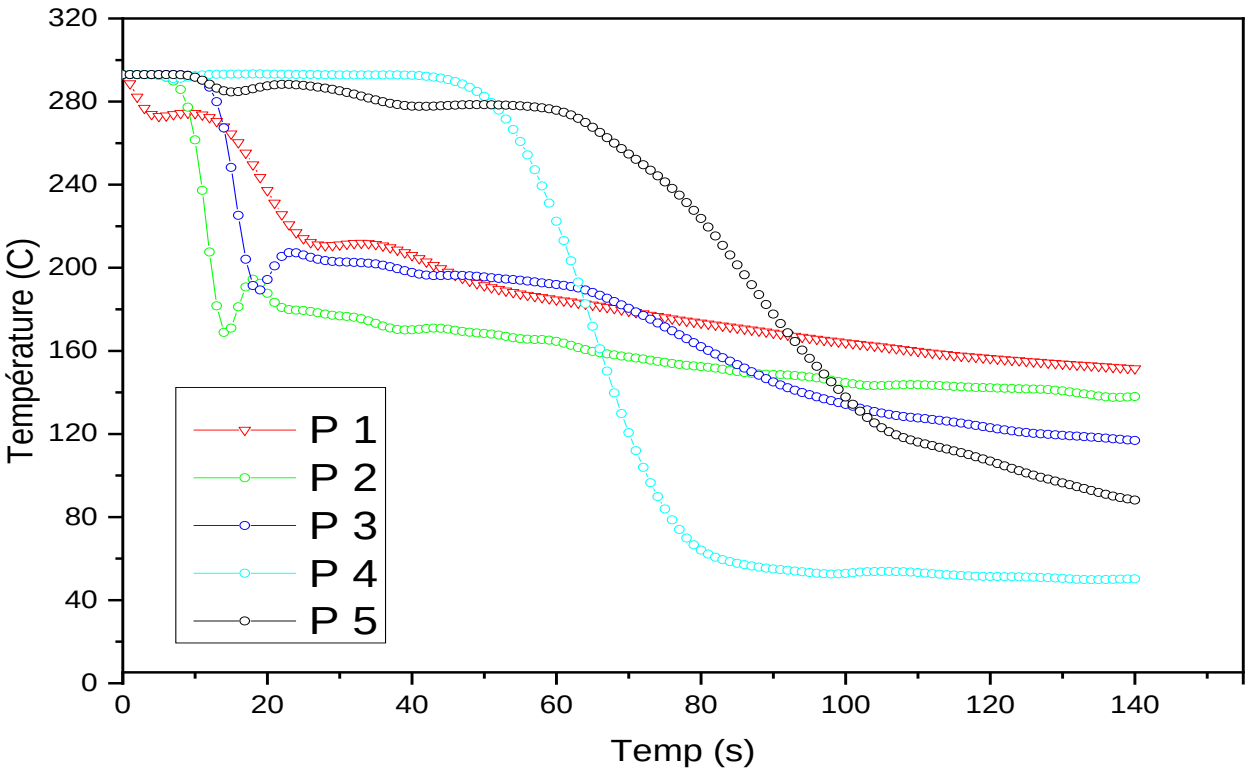


Figure IV.13 : Profil de température dans le tunnel.

La **Figure IV.13** illustre la diminution de la température à cinq (05) positions différentes. Cette représentation met en évidence une augmentation de cette diminution à mesure que l'on s'éloigne de la source de chaleur « incendie ».

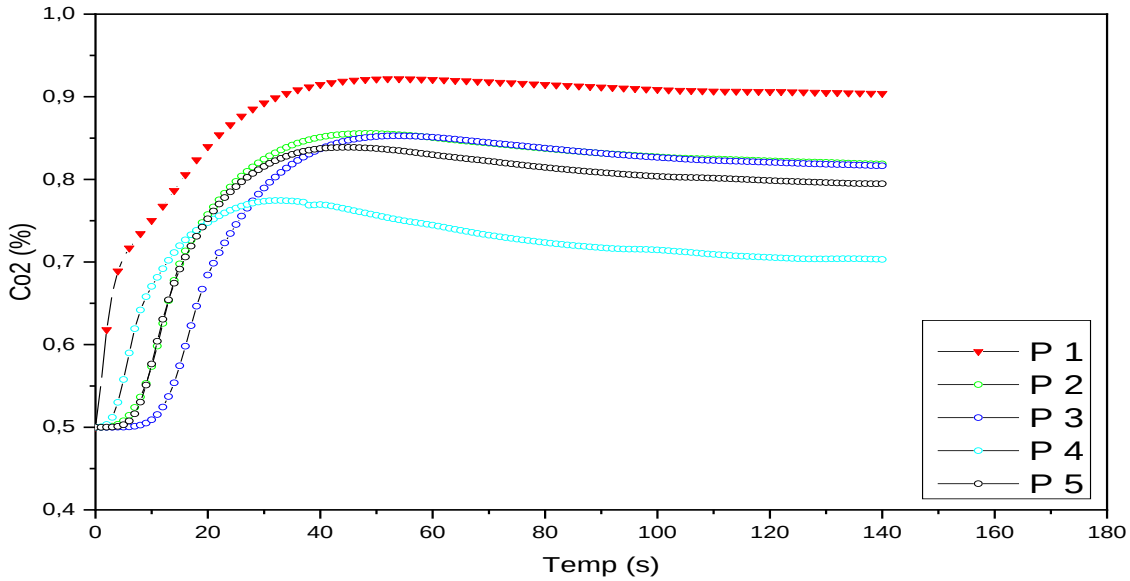


Figure IV.14 : Profil de concentration de Co2 dans le tunnel.

La **figure IV.14** représente les niveaux de dispersion de CO2 à cinq positions distinctes. Cette représentation montre que ces niveaux de dispersion augmentent à mesure que l'on s'éloigne de la source d'émission des gaz."

IV.9. Simulation 1 : Avec des injecteurs d'eau « vapeur froid »sans accès : Cette simulation s'attache à étudier en profondeur la dispersion du CO2 ainsi que les variations de température (T) au moyen d'une analyse numérique (ANSYS APDL). Elle prend en considération la présence d'injecteurs d'eau fonctionnant à une température constante de 7 degrés Celsius et à une vitesse de 2 m/s. Ces injecteurs sont installés dans un tunnel tertiaire spécifique, qui se distingue par son absence d'accès, mettant en lumière les implications de telles configurations sur la dispersion des gaz et les conditions thermiques à l'intérieur de ce tunnel.

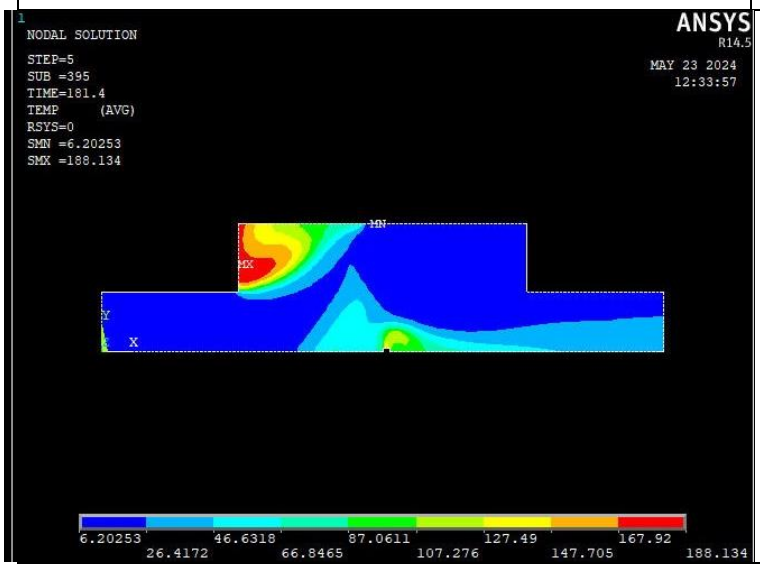
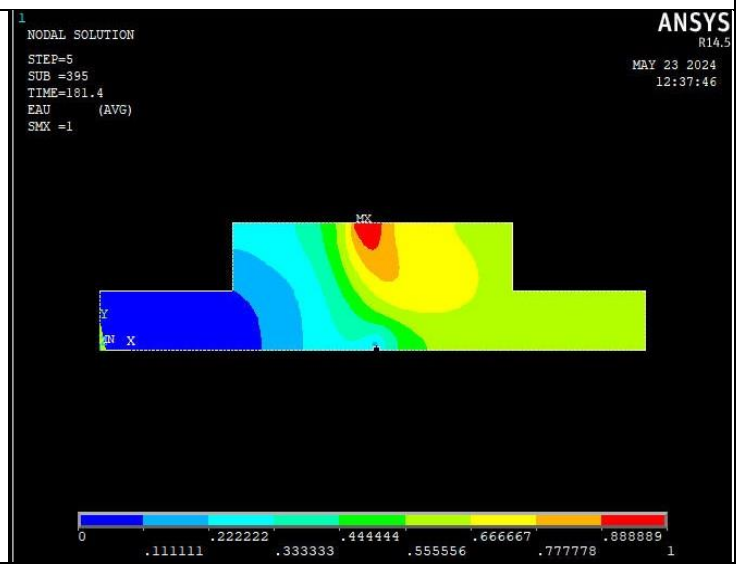
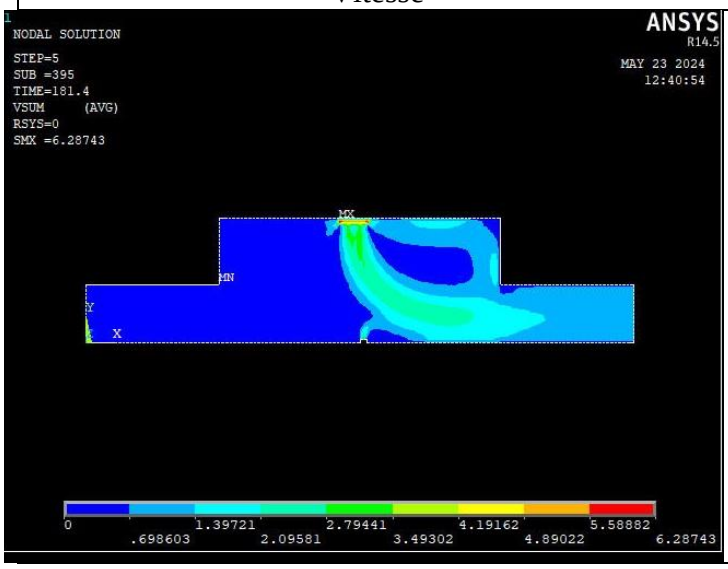
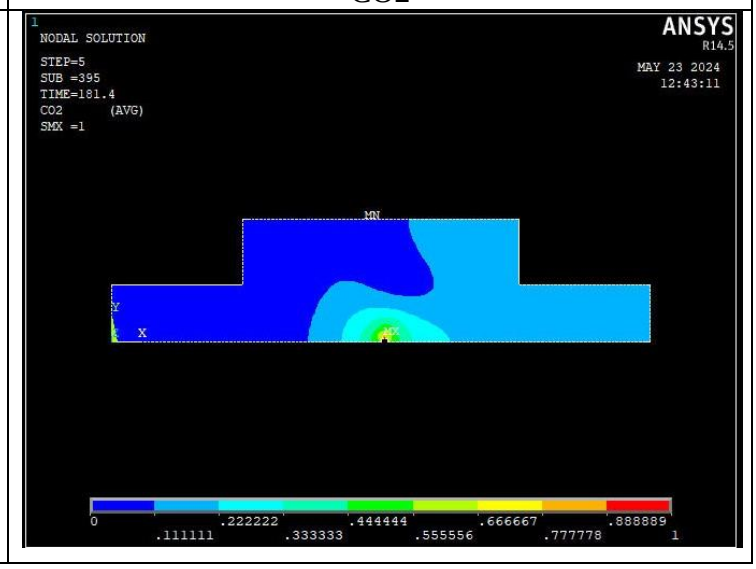
Température	Eau
	
Vitesse	CO2
	

Tableau IV.3 : Représentation spatiale de la dispersion de la température, la Masse eau, la vitesse et la concentration du Co2 dans le temps (sans accès).

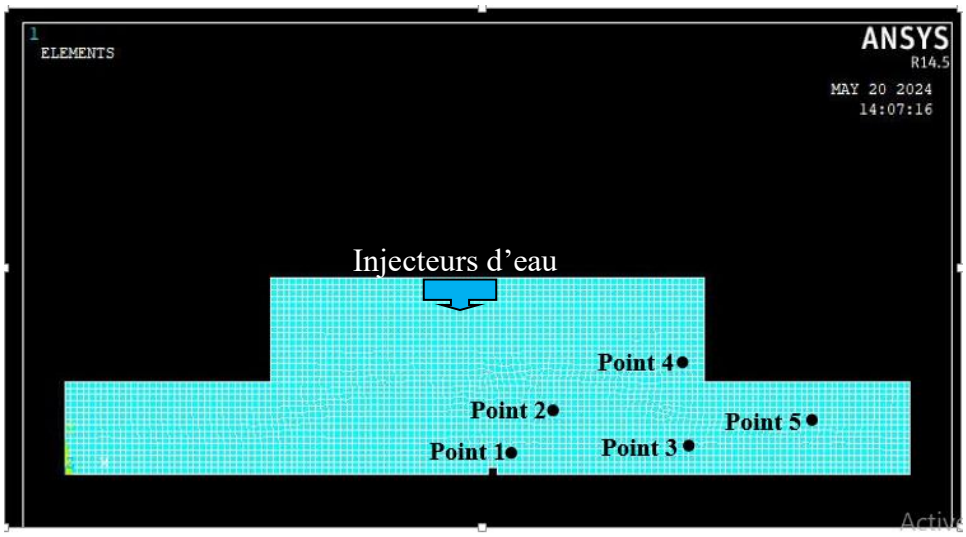


Figure IV.15 : Représentation les points (sans accès).

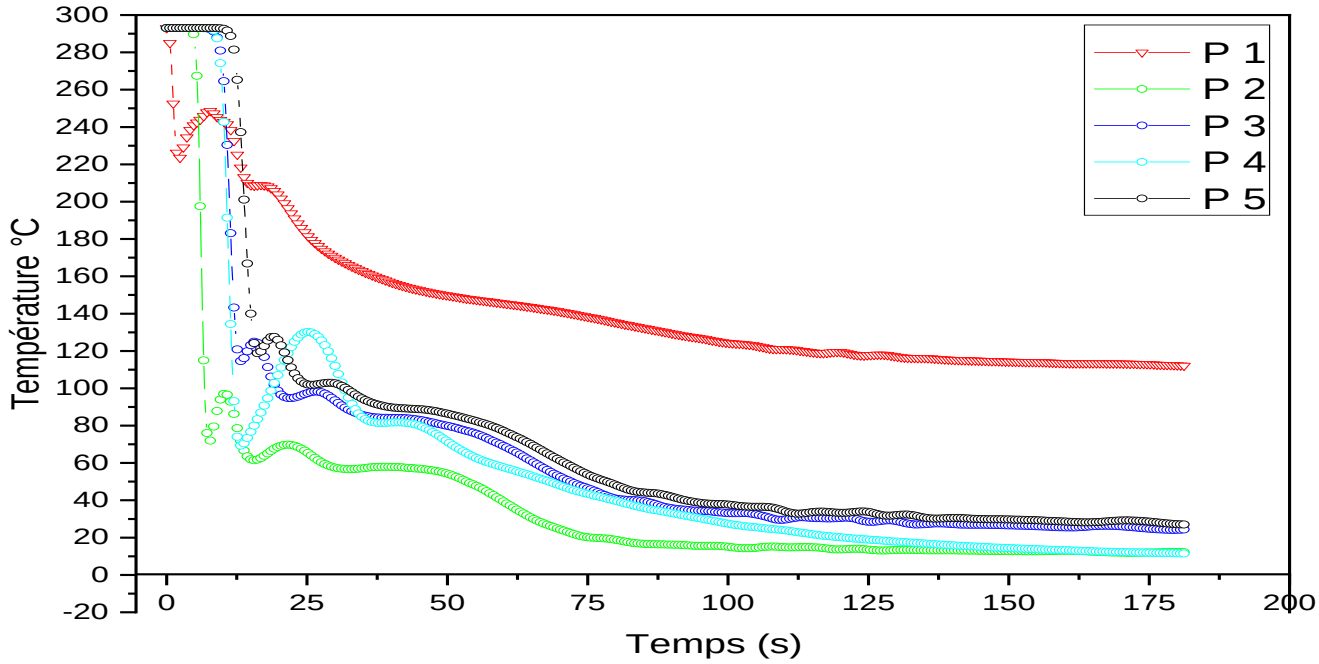


Figure IV.16 : Profil de température dans le tunnel (sans accès).

La **figure IV.16** Cette analyse met en évidence la baisse graduelle de la température à cinq points spécifiques dans le tunnel. Elle démontre clairement l'impact des injecteurs d'eau sur cette diminution progressive au fil du temps dans le tunnel tertiaire.

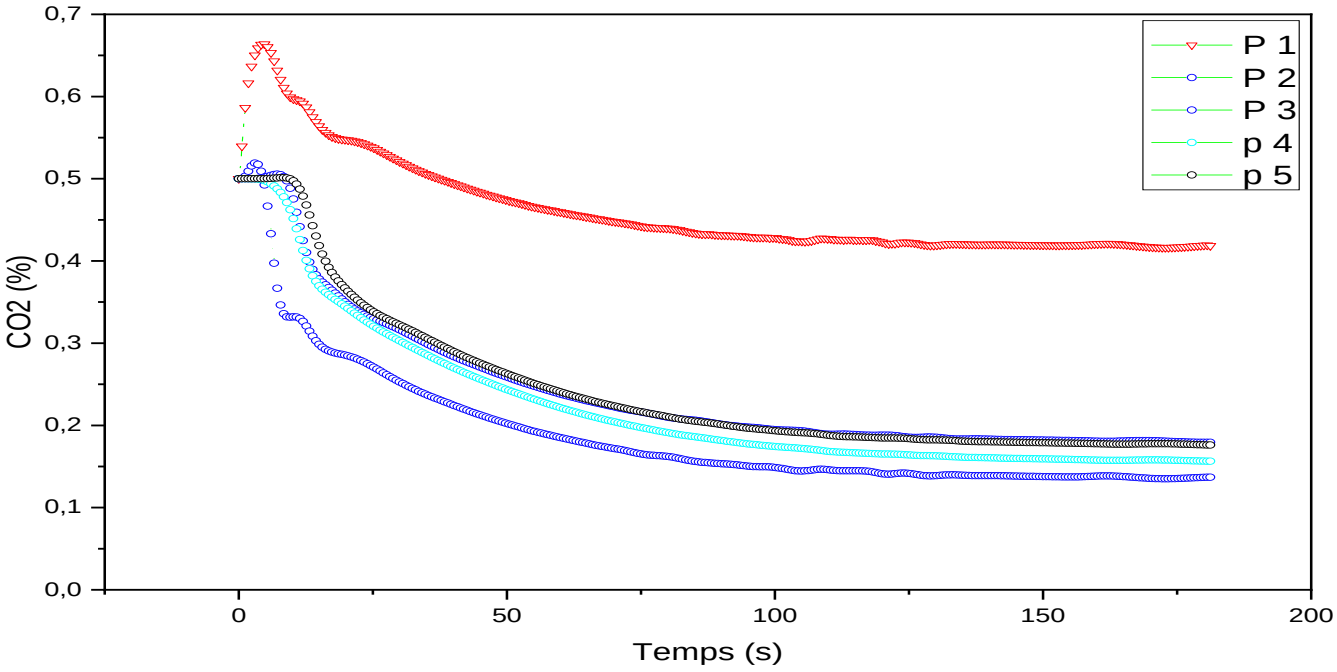


Figure IV.17 : Profil de concentration de Co2 dans le tunnel (sans accès).

La **figure IV.17 :** Cette analyse approfondie révèle la dispersion progressive du CO2 à cinq points précisément identifiés dans le tunnel. Elle met en évidence l'influence significative des injecteurs d'eau sur cette diminution graduelle au fil du temps dans le tunnel tertiaire. En examinant les variations de concentration de CO2 à ces cinq points à intervalles réguliers, cette étude offre un aperçu détaillé de la manière dont les injecteurs d'eau contribuent à la réduction de la concentration de CO2 dans l'environnement du tunnel sur une période donnée.

IV.10. Simulation 2 : Avec des injecteurs d'eau « vapeur froid » avec accès : Cette simulation vise à approfondir l'étude de la dispersion du CO2 et des fluctuations de température (T) à travers une analyse numérique (utilisant ANSYS APDL). Elle prend en compte l'utilisation d'injecteurs d'eau opérant à une température constante de 7 degrés Celsius et à une vitesse de 2 m/s. Ces injecteurs sont positionnés dans un tunnel tertiaire spécifique, qui se distingue par la présence d'accès (01). Cette configuration permet d'examiner les répercussions de ces paramètres sur la dispersion des gaz et les conditions thermiques à l'intérieur du tunnel.

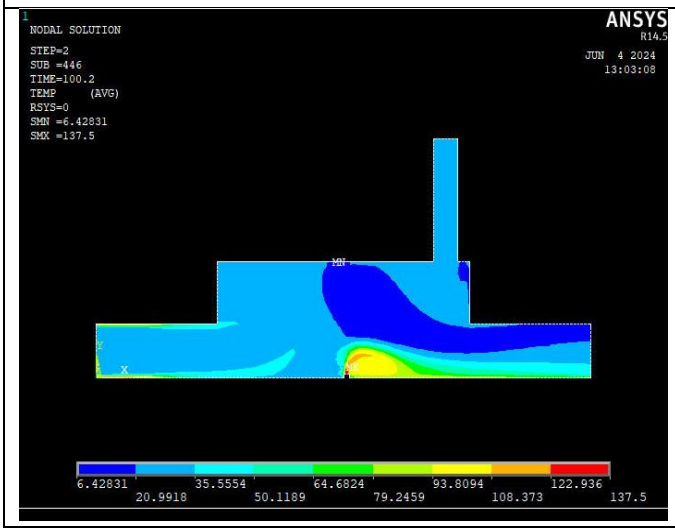
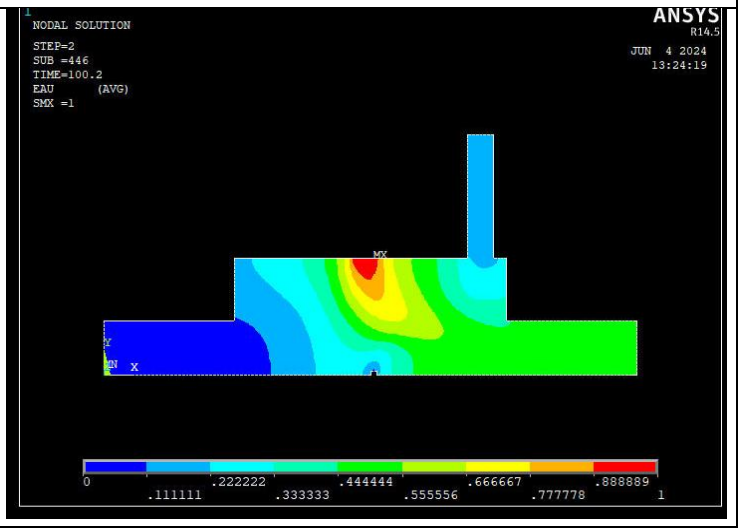
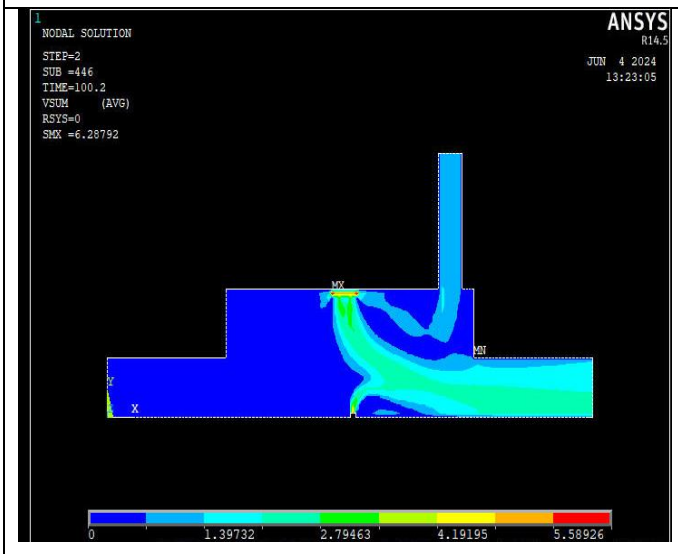
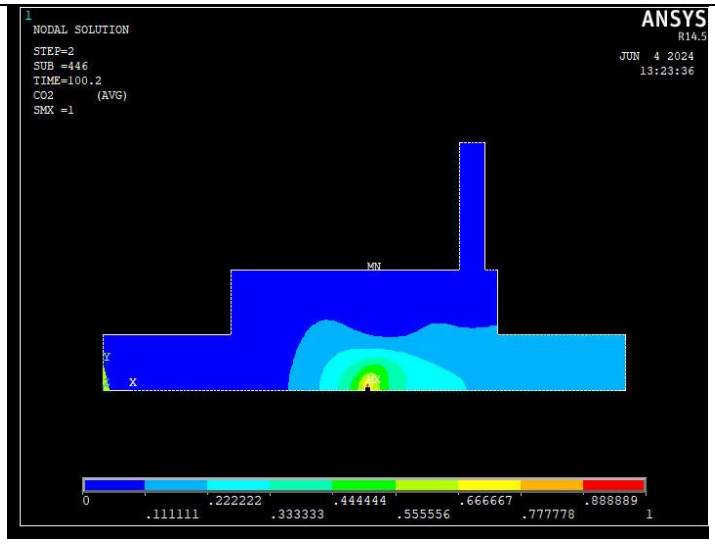
Température	Eau
	
Vitesse	**CO2**
	

Tableau IV.4 : Représentation spatiale de la dispersion de la température, la Masse eau, la vitesse et la concentration du Co2 dans le temps (1 accès)

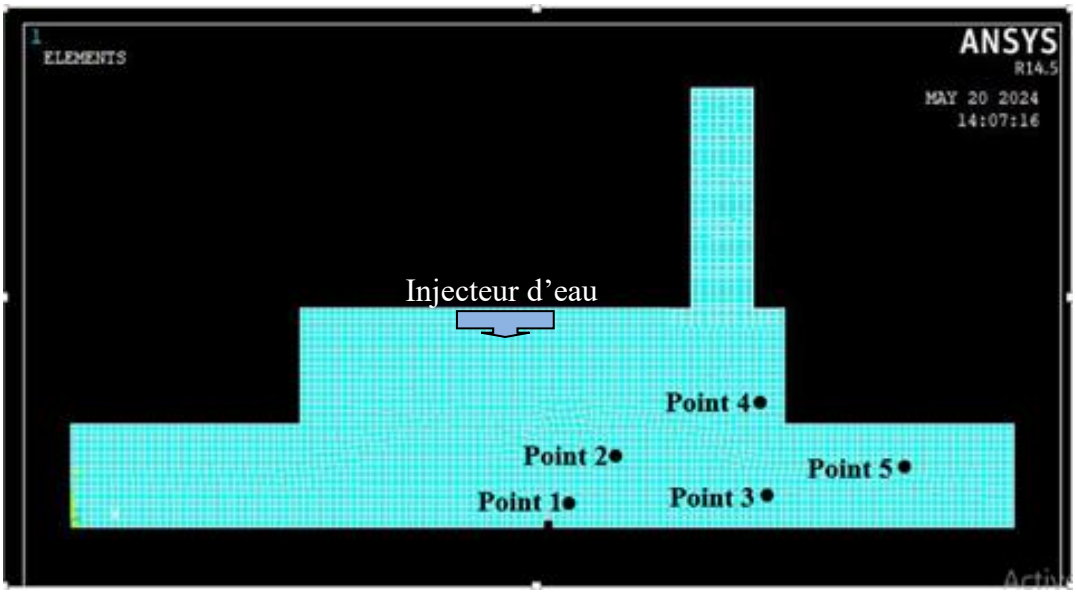


Figure IV.18 : Représentation les points (1 accès).

.

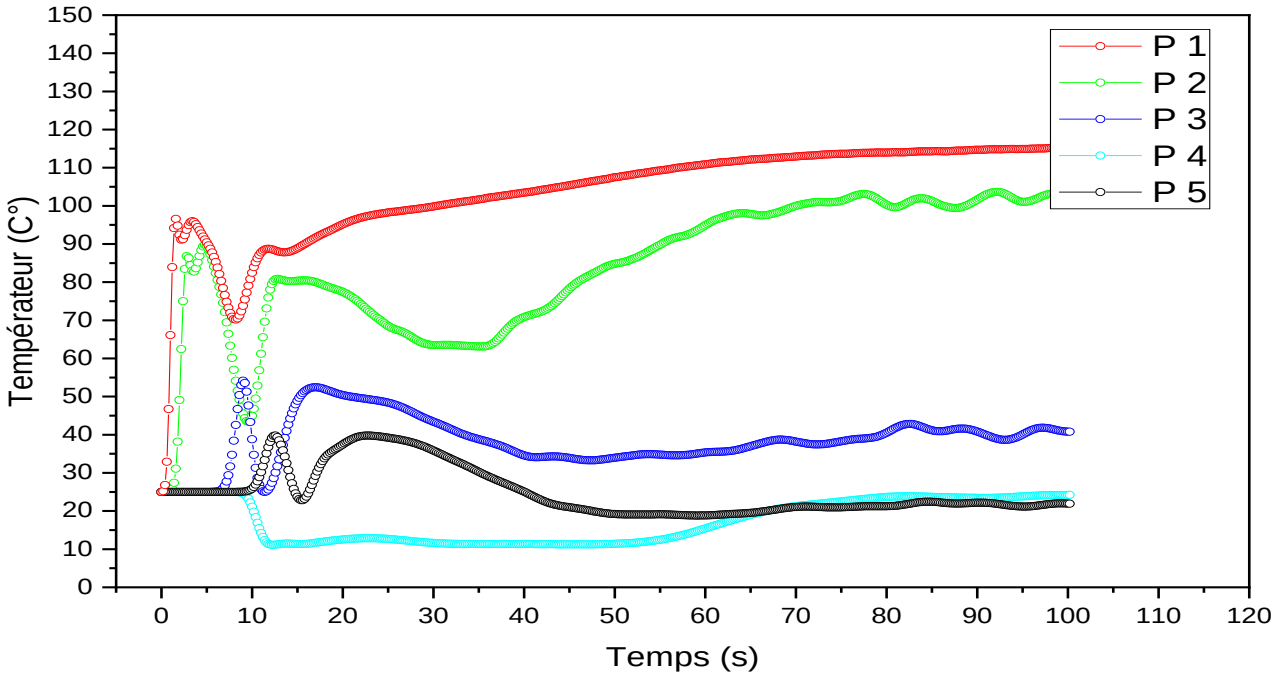


Figure IV.19 : Profil de température dans le tunnel (1 accès).

La **figure IV.19** Cette simulation analyse l'impact de la turbulence et son influence sur les variations de température à chaque point spécifique du système. Elle vise à comprendre comment la turbulence affecte

la distribution de la température à travers le système, fournissant ainsi des informations cruciales sur la dynamique thermique du système dans son ensemble.

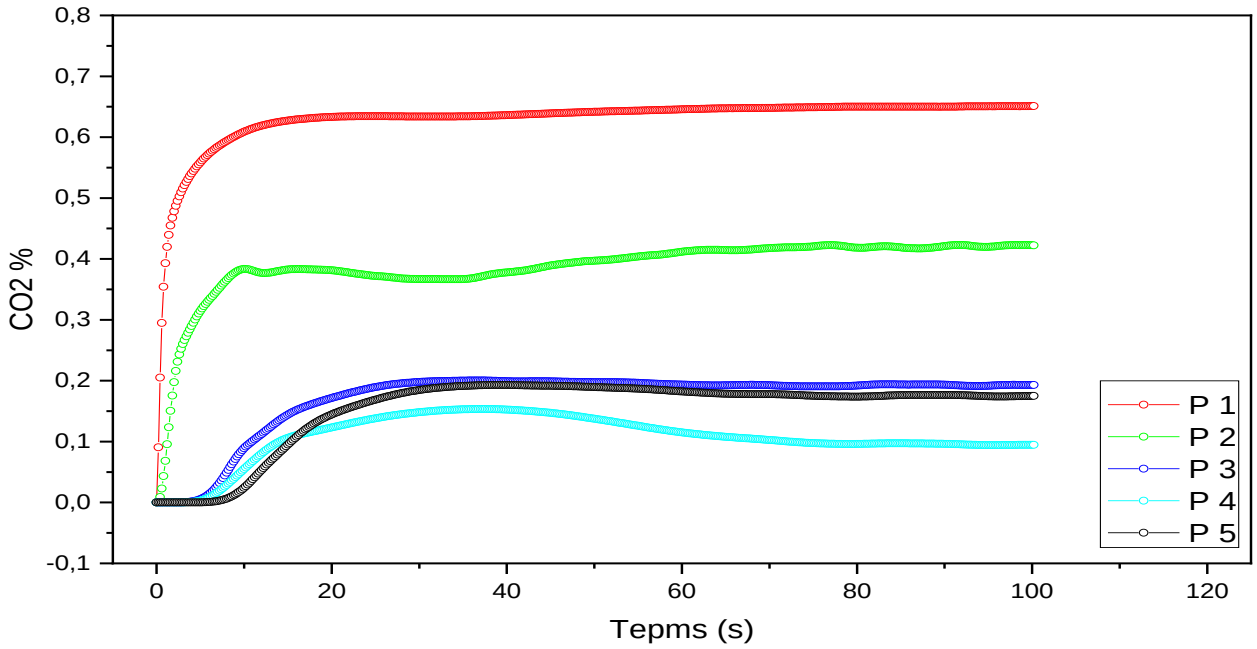


Figure IV.20 : Profil de concentration de Co2 dans le tunnel (1 accès).

La **figure IV.20 :** Les résultats de cette simulation mettent en évidence une augmentation progressive de la concentration de CO2 au fil du temps, suivie d'une tendance à la stabilisation. Cette observation souligne la complexité d'un processus dynamique où la concentration de CO2 évolue de manière graduelle, éventuellement atteignant un état d'équilibre. Cette tendance suscite des interrogations sur les mécanismes sous-jacents régissant la dispersion et la dissipation du CO2 dans le système étudié. Elle offre ainsi un aperçu plus approfondi de la dynamique de ce processus et de ses implications à long terme sur l'environnement et la sécurité du système en question.

IV.11. Simulation 3 : Avec des injecteurs d'eau « vapeur froid » avec deux (02) accès :

Cette simulation a pour objectif d'approfondir l'étude de la dispersion du dioxyde de carbone (CO2) et des variations de température (T) en utilisant une analyse numérique avec ANSYS APDL. Elle prend en considération l'utilisation d'injecteurs d'eau fonctionnant à une température constante de 7 degrés Celsius et à une vitesse de 2 m/s. Ces injecteurs sont placés dans un tunnel tertiaire spécifique, caractérisé par la présence de deux (02) accès. Cette configuration permet d'explorer les effets de ces paramètres sur la dispersion des gaz et les conditions thermiques à l'intérieur du tunnel.

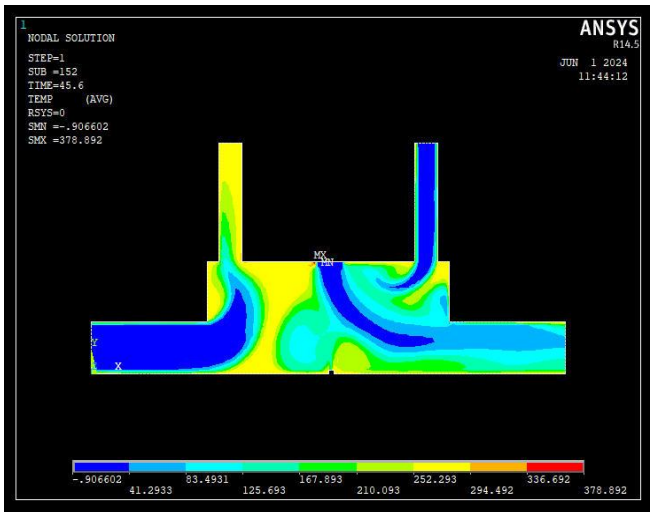
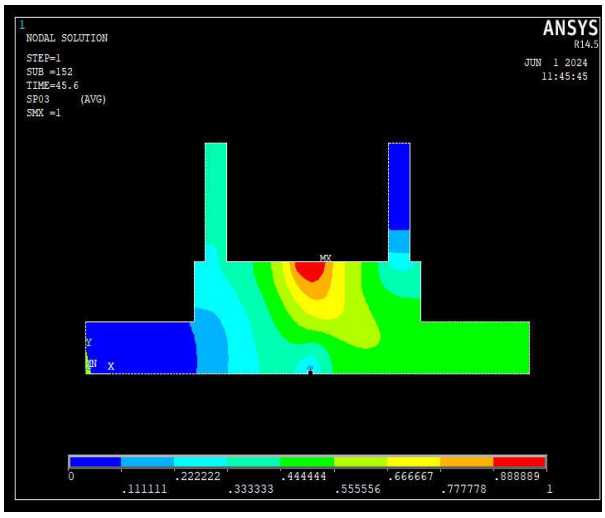
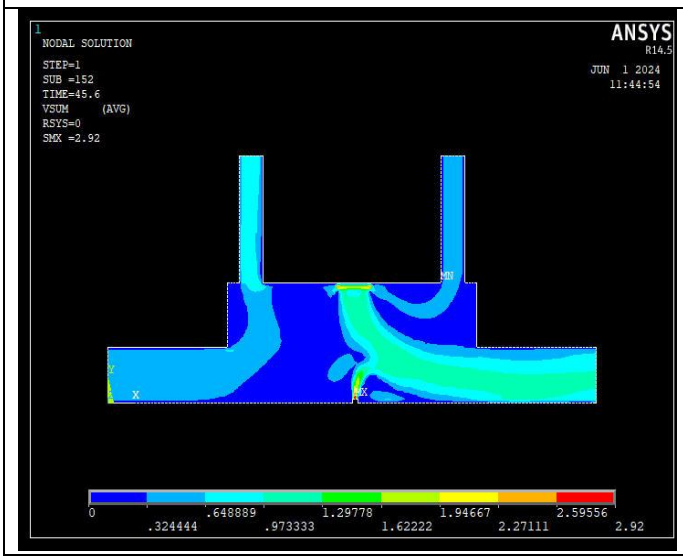
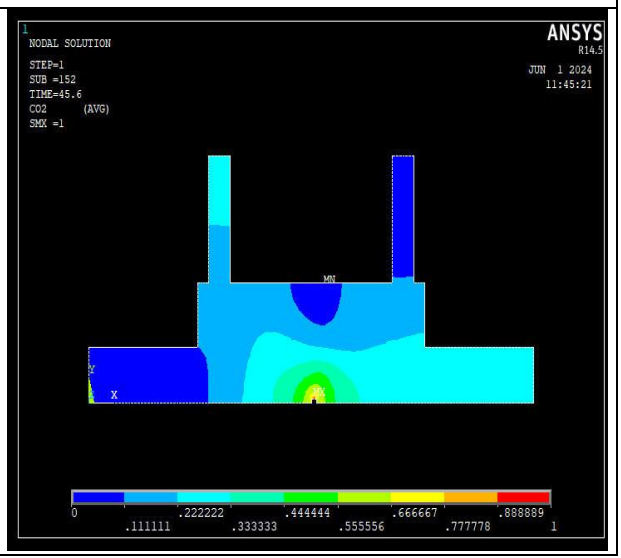
Température	Eau
	
Vitesse	**CO2**
	

Tableau IV.5 : Représentation spatiale de la dispersion de la température, la Masse eau, la vitesse et la concentration du Co2 dans le temps (deux accès).

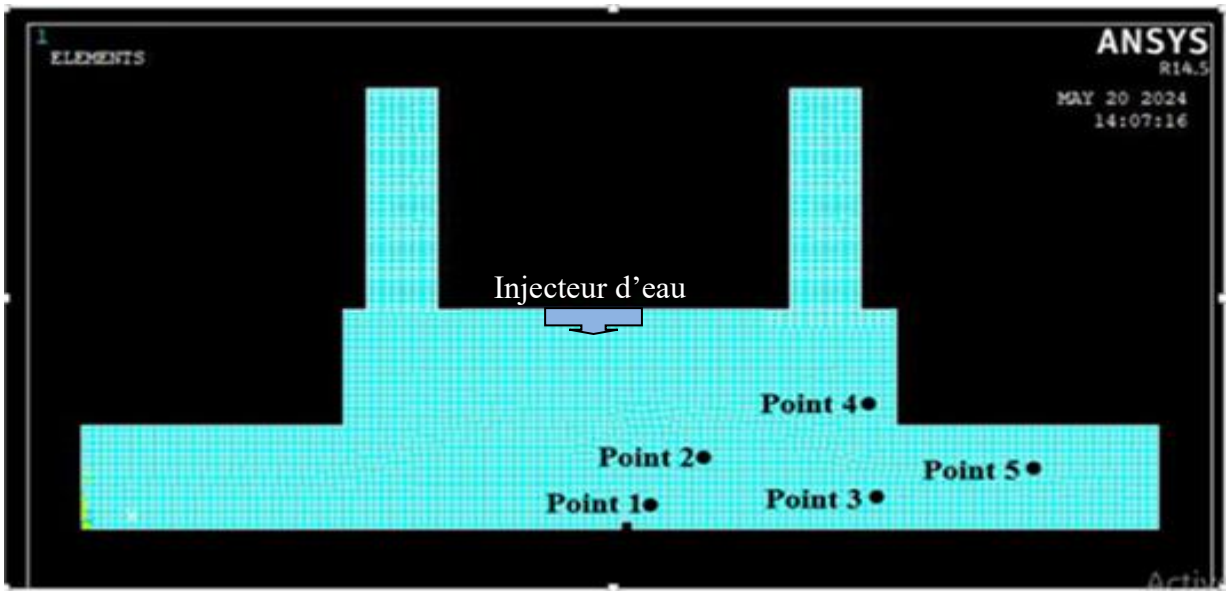


Figure IV.21 : Représentation les points (deux accès)

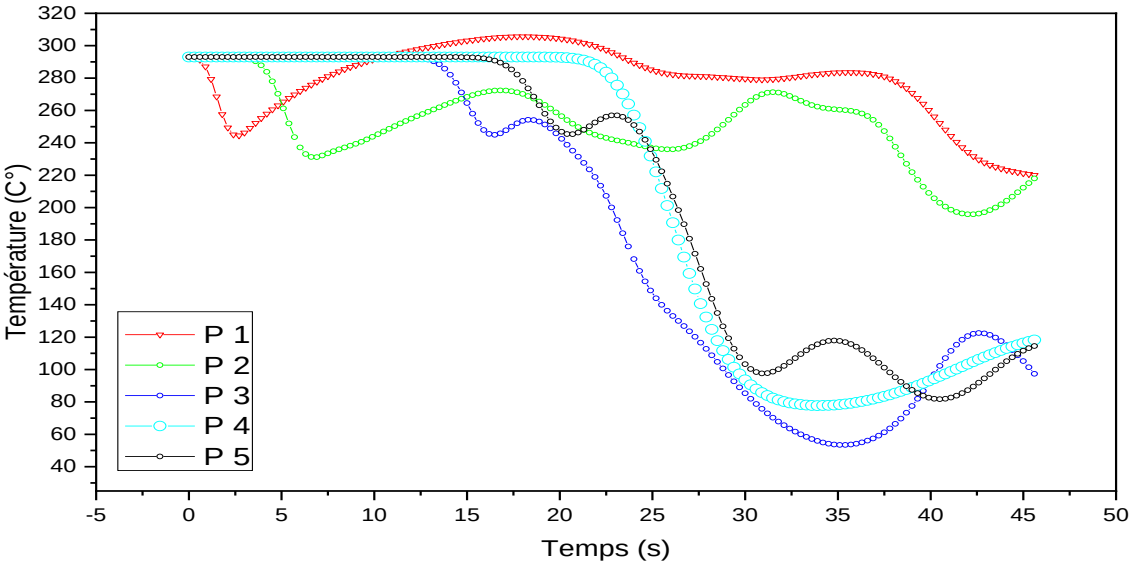


Figure IV.22 : Profil de température dans le tunnel (deux accès)

Figure IV.22 : Dans le tunnel, la température diminue légèrement près de la source d'incendie (points 1 et 2) en raison de la chaleur générée par celle-ci. Cette chaleur est dissipée par convection et conduction, entraînant une baisse de température dans les zones avoisinantes. Les autres points du tunnel voient

également leur température diminuer en raison de l'effet des courants d'air et l'injection d'eau froide qui déplacent la chaleur loin de la source d'incendie.

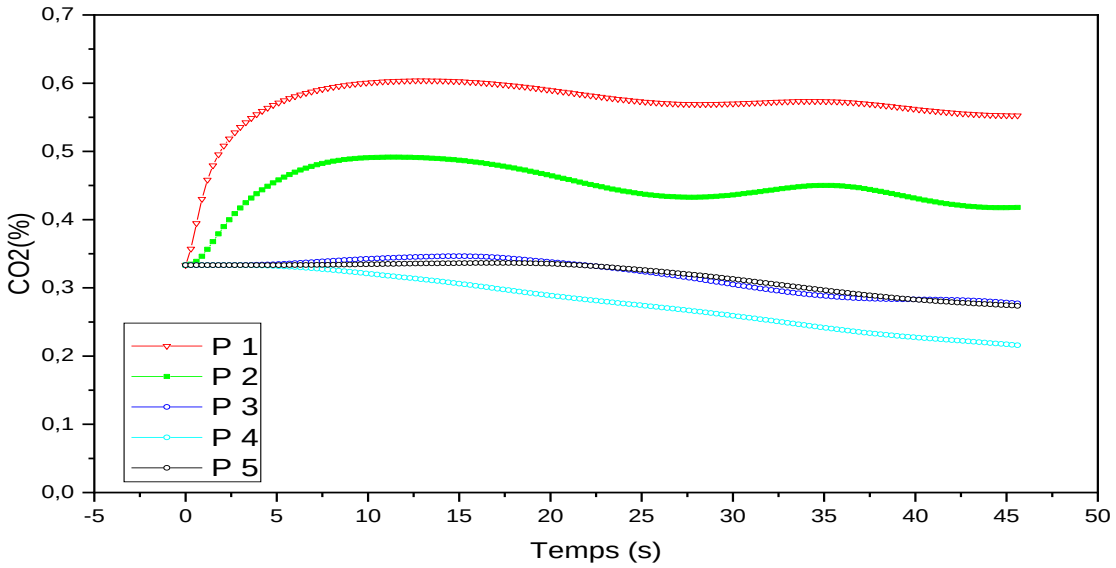
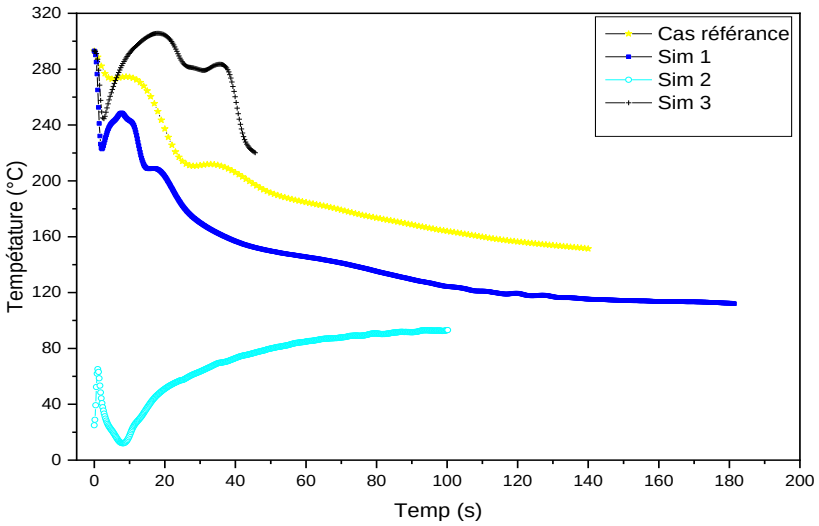
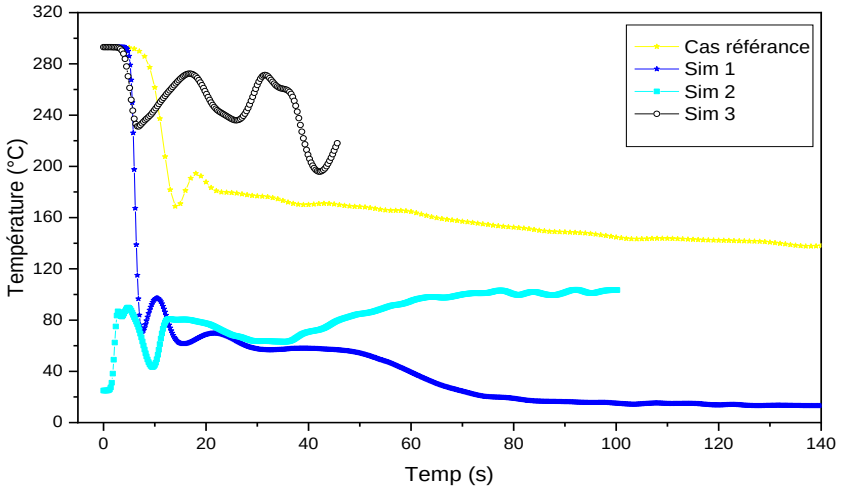


Figure IV.23 : Profil de concentration de Co2 dans le tunnel (deux accès).

Figure IV.23 : Dans le cadre initial de cette simulation, l'augmentation progressive de la propagation du CO2 au fil du temps est observée. Par la suite, cette propagation diminue sous l'influence de l'apport d'air frais et de l'extraction des polluants par les systèmes d'aération. De plus, l'injection d'eau joue un rôle crucial dans la diminution de la concentration de CO2, contribuant ainsi à maintenir un environnement sain et sécurisé.

IV.15. Comparaison

IV.15.1. Température

Point 1	
Point 2	

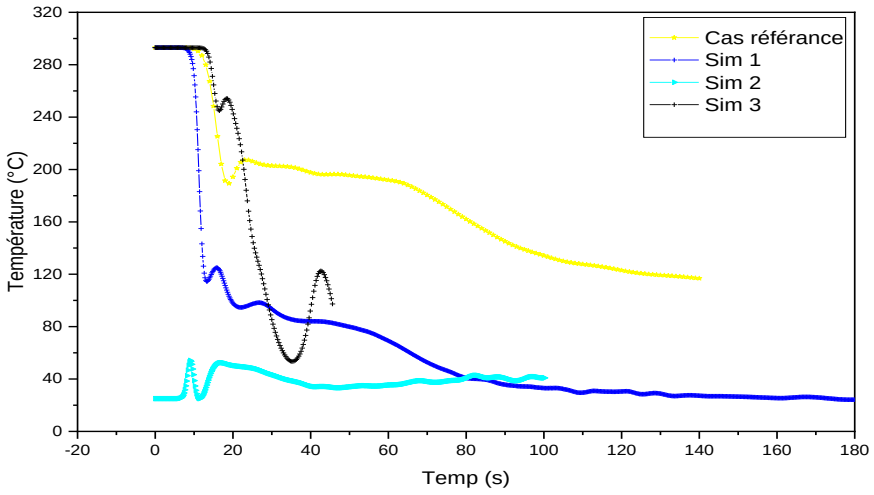
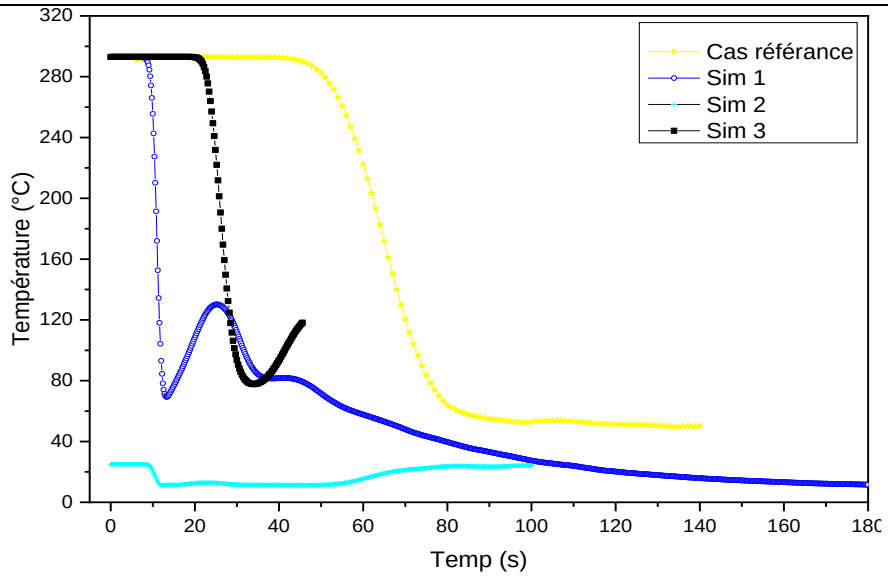
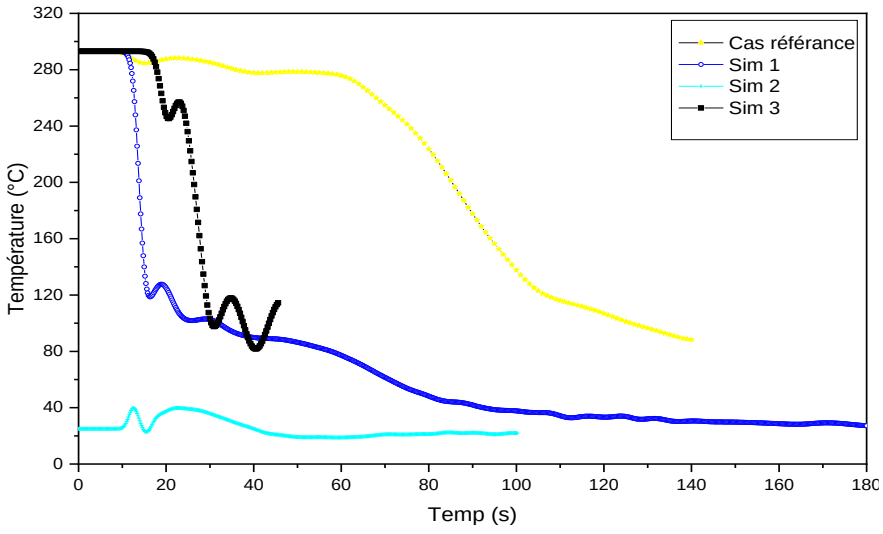
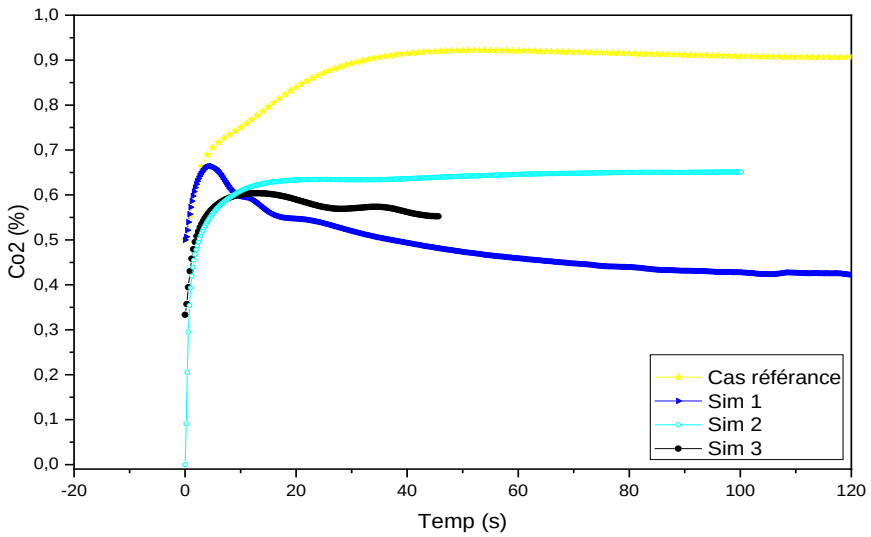
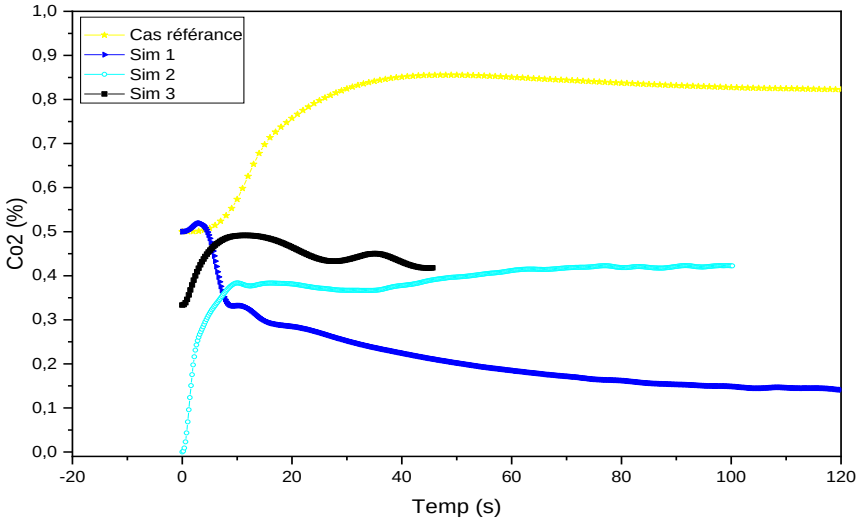
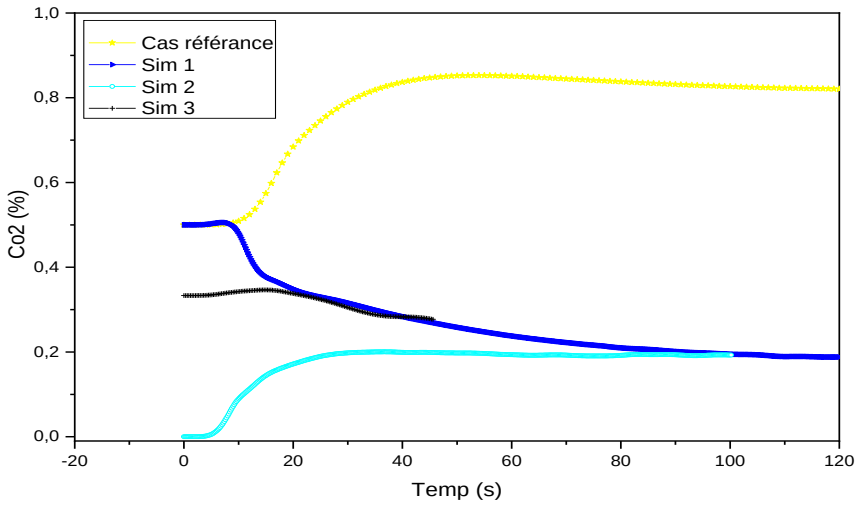
Point 3	
Point 4	
Point 5	

Tableau IV.6 : Comparaison de température dans le tunnel à chaque simulation dans chaque point

IV.15.2. Concentration de Co2 :

Point 1	
Point 2	
Point 3	

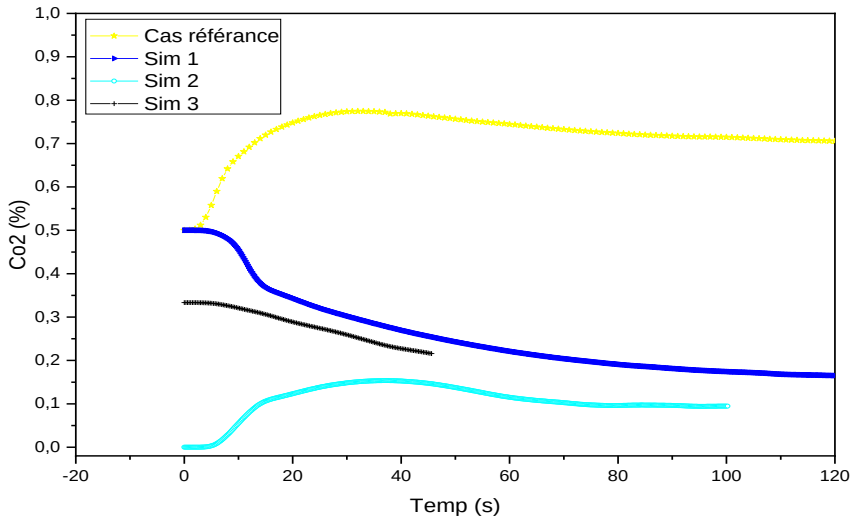
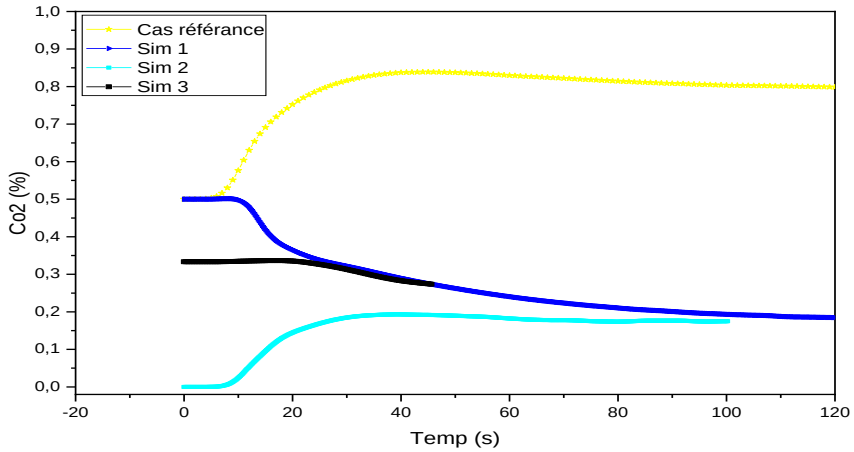
Point 4	
Point 5	

Tableau IV.7 : Comparaison de concentration de Co2 dans le tunnel à chaque simulation dans Chaque point.

- D'après cette comparaison que nous avons présentée et après voire les graphes des simulations précédents nous avons conclure que la présence et le nombre des accès jouent un rôle cruciale ainsi les positions et le sens (d'introduction d'air et l'extraction des polluants) aussi l''emplacement de système de refroidissement « l'injecteur vapeur d'eau » ont une grande importance sur la performance de l'installation. **«** dispersion des gaz polluant et la baisse de la température **».**

Nous pouvons conclure que la meilleure disposition des stations tertiaires consiste à augmenter le nombre d'accès le long du tunnel tout en installant des systèmes de refroidissement le long de ces tunnels.

Cette configuration optimale garantit la fiabilité des tunnels, assurant ainsi la sécurité des passagers et des voyageurs, tout en offrant les meilleures voies d'évacuation en cas d'incendie à l'intérieur des tunnels.

IV.16. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les phénomènes physiques qui régissent les écoulements dans des espaces confinés tels que les tunnels et les gares urbaines, sous l'influence de présence des accès et le système de refroidissement « l'injection de vapeur d'eau ». Cette étude a été menée dans le but d'assurer la protection et la sécurité des passagers dans ces zones, en cas d'incendie ou de fuite de gaz ou de polluants de toute nature. Nous en concluons que la présence d'un plus grand nombre d'accès et d'un système de refroidissement bien conçu et bien positionné le long de la station "tunnel" contribue à une dissipation rapide des gaz et de la chaleur.

Conclusion général

Conclusion générale

Notre travail dans le domaine de la sécurité incendie dans les tunnels routiers semble extrêmement important étant donné les risques associés aux incendies de véhicules. L'utilisation de la modélisation numérique CFD avec ANSYS APDL est une approche robuste pour évaluer les différents aspects de la sécurité incendie dans ces environnements confinés.

L'étude de la dispersion de gaz toxiques et de polluants dans les différends simulations précédentes, ainsi que la détermination de leur emplacement optimal, constituent des éléments cruciaux pour garantir la sécurité des passagers en cas d'incendie. De plus, la compréhension des différents régimes d'écoulement dans les accès en fonction du débit de soutirage et des pertes de charge du réseau dans les stations tertiaires est essentielle pour concevoir des voies d'évacuation efficaces et sécurisées.

En perspective, cela ouvre de nouvelles perspectives pour améliorer la sécurité et l'efficacité des systèmes d'évacuation dans les tunnels et les stations de métro, en utilisant une approche basée sur des données scientifiques et des simulations précises pour mieux comprendre et optimiser les conditions d'écoulement et de ventilation.

Bibliographie

Bibliographie

[1] Chung CY, Chung PL and Chen KS. Modeling air pollution in a road tunnel. J Chin Inst Environ Eng 2002 ; 12: 227–234.

[2] Ashrafi K, Shafie-Pour M, Kalhor M, et al. Numerical simulation of air polluant distribution in urban tunnels. Environ Model Assesse 2012 ; 17: 555–564.

[3] Lopez Gonzalez M, Galdo Vega M, Fernandez Oro JM, et al. Numerical modeling of the piston effect in longitudinal ventilation systems for subway tunnels. Tunn Undergr Space Technol 2014 ; 40: 22–37.

[4] Migoya, E., Crespo, A., Garcia, J., & Hernandez, J. (2009). A simplified model of fires in road tunnels comparison with three-dimensional models and full-scale measurements. Tunneling and Underground Space Technology, 24, 37–52.

[5] Wang, F., Wang, M., He, S., Zhang, J., Deng, Y., 2010. Computational study of effects of jet fans on the ventilation of a highway curved tunnel. Tunn. Undergr. Space Technol. 25, 382–390.

[6] Wang, F., Wang, M., He, S., Deng, Y., 2011. Computational study of effects of traffic force on the ventilation in highway curved tunnels. Tunn. Undergr. Space Technol. 26, 481–489.

[7] Hu, L.H., Tang, W., Chen, L.F., Yi, F., 2013. A non-dimensional global correlation of maximum gas temperature beneath ceiling with different blockage-fire distance in a longitudinal ventilated tunnel. Appl. Therm. Eng. 56, 77–82.

[8] Bari, S., Naser, J., 2010. Simulation of airflow and pollution levels caused by severe traffic jam in a road tunnel. Tunn. Undergr. Space Technol. 25, 70–77.

[9] Costantino, A., Musto, M., Rotondo, G., Zullo, A., 2013. Performance evaluation of alternative tunnel longitudinal ventilation systems using two inclined jets. In : Proceedings of the 68th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2013.

[10] KIM J. Y., KIM K. Y. Experimental and numerical analyses of train-induced unsteady tunnel flow in sub- way [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22(2): 166-172.

[11] KIM J. Y., KIM K. Y. Effects of vent shaft location on the ventilation performance in a subway tunnel [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aero- dynamics, 2009, 97(5-6) : 174-179.

[12] Tang, W., Hu, L.H., Chen, L.F., 2013. Effect of blockage-fire distance on buoyancy driven back-layering length and critical velocity in à tunnel : an experimental investigation and global correlations. Appl. Therm. Eng. 60, 7–14.

[13] Eftekharian, E., Dastan, A., Abouali, O., Meigolinedjad, J., Ahmadi, G., 2014. A numerical investigation into the performance of two types of jet fans in ventilation of an urban tunnel under traffic jam condition. Tunn. Undergr. Space Technol. 44, 56–67.

[14] H. INGASON, Y. Z. LI. Model scale tunnel fire tests with longitudinal ventilation. Fire Safety Journal, Vol. 45 :pp. 371-384, 2010.

[15] Lea CJ. Computational modeling of mine fires. Min Eng. (London) 1994 ; 154 (394) :17–21.

[16] Braun E. Review of fire test methods and incident data for portable electric cables in underground coal mines. National Bureau of Standards, NBSIR 81-2292, National Engineering Lab Corp, Washington, DC, USA, 1981.

[17] Burnett J. Fire safety concerns for rail rapid transit systems. Fire Safety J 1984 ; 8(1) :3–7.

[18] Keski-Rahkonen en O, Holmlund C, Loikkanen P, Ludvigsen H, Mikkola E. Two full scale pilot fire experiments in à tunnel. Valtion Teknillin en Tutkimuskeskus, VTT/RR-453, Palo tekniikan Lab, Espoo, Finland, 1986.

[19] Pénard-Morand C., Annesi-Maesano I., Natural sources. Breathe 2004 France ; Volume 1 No 2 109-110.

[20] Pénard-Morand C., Annesi-Maesano I., Human-made sources. Breathe 2004 France ; Volume 1 No 2 110.

[21] Pénard-Morand C., Annesi-Maesano I., Source of air pollution. Breathe 2004 France ; Volume 1 No 2 p : 110.

[22] KEBSA KHADIDJA. Utilisation du polluant du palmier dattier comme bio indicateur de la pollution atmosphérique dans la région d'Ouargla/2009.univ. D'Ouargla.

[23] N. M. SAID, S. HABLI, H. MHIRI, H. B. ET AL. Flow field measurement in a cross-flowing elevated jet. J. Fluid Eng., Vol. 129 and Num. 5 :pp. 551–562, 2006.

[24] B. R. MORTON, A. IBBETSON. Jets deflected in across flow. Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 12:112–133, 1996.

[25] J. U. SHLÜTER, T. SCHÖNFELD. LES of jets in cross-flow and its application to à gas turbine burner. Flow and Turbulence and Combustion, Vol. 65:177–203, 2000.

[26] G. LALIZEL, Q. SULTAN, M. FENOT, E. DORIGNAC. Experimental convective heat transfer characterization of pulsating jet in cross-flow : influence of Strouhal number excitation on film cooling effectiveness. Journal of Physics : Conference Series, Vol.395and Num. 012043 :6th European Thermal Sciences Conference, 2012.

[27] T. CAMBONIE, N. GAUTIER, J. L. AIDER. Experimental study of counter-rotating vortex pair trajectories induced by a round jet in cross-flow at law velocity ratios. Experiments in fluids, Vol. 56 :pp. 41275, 2013.

[28] H. KOLLA, R. W. GROUT, A. G. ET J. H. CHEN. Mechanisms of flame stabilization and blowout in a reacting turbulent hydrogen jet in cross-flow. Combustion and Flame, Vol. 159:2755–2766, 2012.

[29] S. KAWAI, S. K. LELE. Mechanisms of jet mixing in a supersonic cross-flow : a study using large-eddy simulation. Center of turbulent Research, Annual Research Briefs, 2007.

[30] J. D. HOLDEMAN. Mixing of multiple jets with a confine subsonic cross-flow. Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 19 :pp. 31–70, 1993.

[31] N. CLERX, C. W. M. V. DER GELD, J. G. M. KUERTEN. Turbulent stresses in a direct contact condensation jet in cross-flow in a duct with implications for particle break-up. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 66:684–694, 2013.

[32] RUNDSTRÖM, MOSHFEGH. Large-eddy simulation of an impinging jet in à cross-flow on à heated wall-mounted cube. International Journal of heat and mass transfer, Vol. 52 :pp. 921–931, 2009.

[33] J. ANDREOPOULOS, W. RODI. Experimental investigations of jets in a cross-flow. Journal of Fluide Mechanics, Vol. 138 :pp. 93–127, 1984.

[34] L. E. BRIZZI. Contribution à l'étude de l'instabilité générée par un jet cylindrique débouchant perpendiculairement à un écoulement transversal. Thèse de doctorat, Université de Poitiers, Décembre 1994.

[35] R. J. MARGASON. Fifty years of the jet in cross flow research. AGARD Conference Proceedings, Vol. 534, 1993.

[36] Y. KAMOTANI, I. GREBER. Experiments on a turbulent jet in à cross-flow. NASA Contractor Report, NASA CR-72893, 1971.

[37] M. A. PATRICK. Experimental investigation of the mixing and penetration of around turbulent jet injected perpendicularly into a transverse stream. Trans. Institute of Chemical Engineers, Vol. 45, 1967.

[38] R. FERAN, R. P. WESTON. Vorticity associated with à jet in a cross-flow. AIAA Journal, Vol. 12:1666–1671, 1974.

[39] B. D. PRATTE, W. D. BAINES. Profiles of the round turbulent jet in a cross-flow. Journal of the Hydraulics Division Proceedings of the ASCE, Vol. 92 :pp. 53–64, 1967.

[40] E. F. HASSELBRINK, M. G. MUNGAL. An analysis of the time-averaged properties of the far field of the transverse jet. AIAA34thAerospaceSciencesMeetingandExhibit. Vol. 96-0201, 1996.

[41] F. P. RICOU, D. B. SPALDING. Measurements of entrainment by axisymmetrical turbulent jets. J. Fluid Mech., Vol. 11 :pp. 21–32, 1961.

[42] B. A. HAVEN, M. KUROSAKA. Kidney and anti-kidney vortices in cross-flow jets. J.Fluid Mech., Vol. 352 :pp. 27–64, 1997.

[43] T. H. NEW, T. T. LIM, S. C. LUO. Effects of jet velocity profiles on a round jet in cross-flow. Experiments in Fluids, Vol. 40 :pp. 859–875, 2006.

[44] S. MUPPIDI. Study of trajectories of jets in cross-flow using direct numerical simulations. J. Fluid Mechanics, Vol. 50 :pp. 88–100, 2005.

[45] S. MUPPIDI, K. MAHESH. Direct numerical simulation of round turbulent jets in cross-flow. J. Fluid Mech., Vol. 574 :pp. 59–84, 2007.

[46] L. K. SU, M. G. MUNGAL. Simultaneous measurements of scalar and velocity field evolution in turbulent cross-flowing jets. J. Fluid Mech., Vol. 513 :pp. 1–45, 2004.

[47] Y. KAMOTANI, I. GREBER. Experiments on confined turbulent jets in a cross flow. NASA Contractor Report, NASA CR-2392, 1974.

[48] S. ROUX. Contribution expérimentale à l'aérothermique d'un jet en impact forcé acoustiquement. Thèse de doctorat, Université de Poitiers, août 2011.

[49] T. F. FRIC, A. ROSHKO. Vertical structure in the wake of à transverse jet. J.Fluid Mech., Vol. 279 :pp. 1–47, 1994.

[50] B.GIACHETTI. Etude expérimentale et numérique du développement d'un écoulement chaud vertical en milieu semi-confiné sous l'influence d'une ventilation mécanique – Application à une station de métropolitain. Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieur de mécanique et aérotechnique, 2015.