

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER** en **GENIE CIVIL**

Spécialité : structure : Efficacité énergétique dans les bâtiments.

Par :

Melle ELHADJ-ALI Ahlem

MrBENSALAH Mohammed Alaeddine

Thème

**Analyse de la position des ouvertures sur l'écoulement d'air
dans une pièce d'habitation.**

Soutenu publiquement, le 11 / 06 /2024 , devant le jury composé de :

Mr RAS Abdelouahab abderrezzak	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mme RETRI Khadidja	Maitre de conférences B	Univ. Tlemcen	Examinatrice
Mr HENAOUI Mustapha	Docteur	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr SELKA Ghouti	Maitre de conférences A	Univ. Tlemcen	Co-Directeur de mémoire

Année universitaire 2023-2024

Remerciement

Nous exprimons notre plus profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire. En premier lieu, nous rendons grâce à Dieu pour Sa guidance, Sa force et Sa bienveillance tout au long de ce parcours académique.

Nous tenons également à remercier chaleureusement notre encadrant, Monsieur « ***Henaoui Mustapha*** », et notre co-encadrant, Monsieur « ***Selka Ghouti*** », pour leur accompagnement attentif, leurs orientations pertinentes et leur engagement indéfectible tout au long de ce processus.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers Monsieur « **RAS Abdelouahab Abderrezzak** », pour avoir accepté de superviser ce projet de fin d'étude et pour ses précieux conseils, son expertise et son soutien ont été essentiels pour la réussite de ce travail.

Je tiens également à remercier chaleureusement Madame « **Retri Khadidja** », notre examinatrice, pour son implication, ses suggestions constructives et ses remarques éclairées qui ont grandement enrichi ce projet.

Nous souhaitons exprimer notre reconnaissance à l'architecte « ***Narimane Bensalah*** » pour sa précieuse expertise et ses conseils éclairés qui ont grandement enrichi ce travail.

À notre famille, nous sommes infiniment reconnaissants pour leur soutien indéfectible, leur encouragement constant et leur amour inconditionnel qui ont été nos sources de motivation tout au long de cette aventure.

Enfin, nous remercions vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en évaluant ce mémoire et en partageant leurs précieuses observations et recommandations.

♥ Dédicace ♥

À tous ceux qui ont été mes piliers tout au long de ce voyage académique,

À **mes parents**, pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices sans fin. Vous êtes ma source d'inspiration et ma motivation constante.

À **mon binôme**, pour notre collaboration fructueuse, nos moments de travail acharné et de partage d'idées. Votre présence a rendu ce parcours encore plus enrichissant.

À **mes professeurs et encadrants**, pour leur guidance, leurs conseils avisés et leur expertise qui ont façonné mon apprentissage et ma croissance académique.

À mes sœurs « **Imene, Marwa, Radja, Douaa, Sirine** » et mes frère « **Akram , houssine**» mes amis, pour leur soutien moral, leurs encouragements et leur présence réconfortante dans les moments de doute et de difficulté.

Et enfin, à moi-même, pour ma persévérance, ma détermination et ma passion à poursuivre mes rêves et à atteindre mes objectifs.

À vous tous, je dédie ce travail avec gratitude et reconnaissance pour avoir été mes piliers dans cette aventure.

BENSALAH MOHAMMED ALAEDDINE

♥ Dédicace ♥

À ceux qui ont illuminé mon chemin tout au long de cette aventure académique,

À mes chers parents, où qu'ils soient, reposent en paix et sachent que leur amour et leur enseignement continuent de m'inspirer chaque jour, j'aurais souhaité que vous soyez présents à mes côtés aujourd'hui.

À toute ma famille et mes proches, pour être ma source de force et d'amour constant,

En particulier ma sœur **Aicha** et mon frère **karim**, mon oncle **abdelkader** et sa femme pour leur soutien indispensable.

À mon binôme, avec qui j'ai partagé les hauts et les bas de ce parcours, et dont la collaboration a enrichi chaque étape de ce voyage.

À mes professeurs et encadrants, pour leur expertise, leur patience et leur guidance précieuse qui ont éclairé ma route vers la réussite.

À moi-même, pour ma détermination inflexible et ma passion ardente à poursuivre mes aspirations avec audace et persévérance.

À chacun de vous, je dédie ce travail avec profonde gratitude et reconnaissance, car c'est grâce à votre présence et votre appui que j'ai pu atteindre de nouveaux sommets.

ELHADJ-ALI AHLEM

Résumé.

Ce travail présente une analyse approfondie des phénomènes de convection mixte turbulente dans différentes configurations de cavités ventilées, en se penchant sur leur impact sur la dynamique et la thermique des écoulements. À travers une étude numérique bidimensionnelle, nous avons examiné les effets de la géométrie, des conditions aux limites et des paramètres de turbulence sur les performances des systèmes de ventilation. En utilisant la méthode des volumes finis et le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ standard. La résolution des équations mathématiques du modèle physique a été réalisée par la méthode des volumes finis dans le code de calcul numérique FLUENT. Les résultats obtenus ont permis de visualiser les contours de vitesse, les profils de vitesses, les valeurs moyennes de l'énergie cinétique turbulente et les distributions de température à l'intérieur et à la sortie de chaque configuration. L'analyse de notre travail nous a permis comprendre les mécanismes de l'écoulement et de l'échange thermique, ainsi que d'identifier les paramètres influençant l'efficacité de la ventilation.

Mots clés : convection mixte, cavités ventilées, dynamique des écoulements, méthode des volumes finis, modèle de turbulence $k-\varepsilon$.

Abstract.

This work presents an analysis of turbulent mixed convection phenomena in different configurations of ventilated cavities, by looking at their impact on the dynamics and thermals of flows. Through a two-dimensional numerical study, we examined the effects of geometry, boundary conditions and turbulence parameters on the performance of ventilation systems. By using the finite volume method and the standard k - ϵ turbulence model, The resolution of the mathematical equations of the physical model was carried out by the finite volume method in the digital calculation code FLUENT. The results obtained carried out to visualize the velocity contours, velocity profiles, average values of turbulent kinetic energy and temperature distributions inside and at the outlet of each configuration. The analysis of our work allowed us to understand the mechanisms of flow and heat exchange, as well as to identify the parameters influencing the effectiveness of ventilation.

Keywords: mixed convection, ventilated cavities, flow dynamics, thermal behavior, finite volume method, k - ϵ turbulent model.

ملخص.

يقدم هذا العمل تحليلاً لظواهر الحمل الحراري المختلط المضطرب في تكوينات مختلفة للتجاويف المهواة، من خلال النظر في تأثيرها على ديناميكيات التدفقات وحرارياتها. من خلال دراسة عددية ثنائية الأبعاد، قمنا بدراسة آثار الهندسة والظروف الحدودية ومعلمات الاضطراب على أداء أنظمة التهوية. باستخدام طريقة الحجم المحدود ونموذج الاضطراب $k-\epsilon$ القياسي، تم حل المعادلات الرياضية للنموذج الفيزيائي بطريقة الحجم المحدود في كود الحساب الرقمي FLUENT تم إجراء النتائج التي تم الحصول عليها لتصور ملامح السرعة ومتوسط قيم الطاقة الحركية المضطربة وتوزيعات درجات الحرارة داخل وخارج كل تكوين. سمح لنا تحليل عملنا بفهم آليات التدفق والتبادل الحراري، وكذلك تحديد العوامل التي تؤثر على فعالية التهوية.

الكلمات الدالة: الحمل الحراري المختلط، تجاويف مهواة، ديناميكيات التدفق، السلوك الحراري، طريقة الحجم المحدود، نموذج $k-\epsilon$ المضطرب.

Sommaire

Remerciement	II
Dédicace	III
Dédicace	IV
Résumé.....	V
Abstract.	V
.ملخص.....	VI
Sommaire.....	VII
Table des illustrations	XI
NOMENCLATURE	XII
Introduction générale	14

CHAPITRE I : Généralités sur l'importance de la ventilation dans le confort et l'efficacité énergétique du bât

Introduction.	17
I.1 Principe de la ventilation :.....	17
I.2 La fonction de la ventilation :	18
I.3 Les types de la ventilation :.....	19
I.4 Les différents systèmes de la ventilation :	23
I.4.1 Ventilation Naturelle :.....	24
I.4.2 Ventilation Mécanique :.....	24
I.4.3 Ventilation Mixte :.....	24
I.4.4 Ventilation à Récupération d'Énergie (VRE) :.....	24
I.5 La notion du confort :.....	25
I.6 Comment faire la ventilation et l'aération :	26
▪ Ventilation :.....	26

▪ Aération :	26
I.7 Les différentes cavités utilisées en la ventilation naturelle :	27
1. Entrées d'air :	27
2. Ouvertures de transfert :	27
3. Bouches d'extraction :	27
4. Conduits de ventilation :	28
5. Lucarnes, auvents et puits de lumière :	28
I.8 L'efficacité du renouvellement d'air :	29
I.8.1 Indice d'efficacité de renouvellement d'air :	29
I.8.2 Taux de renouvellement d'air :	30
Conclusion.	30

CHAPITRE II : Formulation du problème.

Introduction.	32
II.1 Hypothèses simplificatrices :	32
II.2 Calcul numérique :	32
II.3 Les différentes méthodes numériques de discrétisation :	33
II.3.1 La méthode des différences finies (MDF) :	33
II.3.2 La méthode des éléments finis (MEF) :	34
1. Approximation nodale des fonctions inconnues :	34
2. Utilisation de la méthode des résidus pondérés :	34
II.3.3 La méthode de volumes finis (MVF) :	35
II.4 Principe de la méthode des volumes finis :	36
II.4.3.1 Équation de continuité :	37
II.4.3.2 Équation de la conservation de la quantité de mouvement :	37
II.4.3.3 Équation de la conservation de l'énergie :	37
II.5 Approximation de Boussinesq :	38

II.6	Le modèle de turbulence :	38
II.7	Les nombres adimensionnels :	39
II.7.1	Le nombre de Reynolds :	39
II.7.2	Le nombre de Prandtl :	39
II.7.3	Le nombre de Nusselt :	40
II.7.4	Nombre de Rayleigh :	40
II.8	Les Modèles physiques :	41
II.8.1	Premier Cas :	41
II.8.2	Deuxième Cas :	41
II.8.3	Troisième Cas :	42
II.8.4	Quatrième cas :	42
II.9	Les conditions aux limites :	43
	Conclusion.	43

CHAPITRE III : Simulation Numérique.

	Introduction.	46
III.1	Les domaines d'utilisation de CFD dans l'industrie : [22]	47
III.2	Présentation du logiciel GAMBIT [GM] :	47
III.3	Définition de Fluent :	52
III.3.1	Lancement de Fluent :	52
III.3.2	Importation de la géométrie :	52
2)	Define - Models –Energy.....	53
3)	Define- Materials.	54
4)	Define-Operating conditions.....	55
5)	Define- Boundary conditions.	55
➤	Température paroi bas du local.	56
➤	Vitesse d'entrée.	56

6) Solve-Controls solution.	57
7) Solve-monitors-Residual.....	57
8) Solution initialization: solve-initialize-initialize.....	58
9) Allures de l'évolution des résidus de calcul.....	58
Conclusion	59

CHAPITRE IV : Résultats et Interprétations.

Résultats et interprétations.....	61
IV.1 Maillages :	61
IV.2 Lignes de courant :	61
IV.3 Distribution de la vitesse :	63
IV.4 Distribution de l'Energie cinétique turbulente :	65
IV.5 Distribution de la température :	66
Conclusion.	69
 Conclusion générale.....	 70
Références.....	71

Table des illustrations

Figures.

Figure I. 1 Notion de la ventilation dans un bâti. [27].....	17
Figure I. 2 ventilation : poumon du bâtiment. [3]	18
Figure I. 3 le confort thermique dans un bâti. [18].....	19
Figure I. 4 Ventilation simple flux par extraction HYGROREGLABLE. [7]	20
Figure I. 5 La ventilation simple flux par soufflage. [8]	21
Figure I. 6 Principe de La ventilation double flux. [9]	22
Figure I. 7 Ventilation par effet Venturi.....	23
Figure I. 8 Ventilation par cheminées solaires.	23
Figure I. 9 Ventilation par atriums.	23
Figure I. 10 Les différents systèmes de ventilation. [12]	25
Figure I. 11 Entrées d'air par ouvertures. [23].....	27
Figure I. 12 Circulation d'air entre les espaces. [23]	27
Figure I. 13 Les bouches d'extraction. [24]	27
Figure I. 14 Conduite de ventilation. [25]	28
Figure I. 15 Différents ouvertures d'aération. [19]	28
Figure IV. 1 Le maillage des quatre configurations.	61
Figure IV. 2 Contours des lignes de courants.....	62
Figure IV. 3 Contours de distributions de vitesse à la position $y=0.2$ m et $y=0.6$ m le long de l'axe des abscisses pour les quatre configurations.	63
Figure IV. 4 Profils de distributions de vitesse à la position $y=0.2$ m et $y=0.6$ m le long de l'axe des abscisses pour les quatre configurations.	64
Figure IV. 5 Contours des distributions de l'énergie cinétique turbulente.....	65
Figure IV. 6 Contours de distributions de la température pour les quatre configurations. .	66
Figure IV. 7 Profils de distributions de la température vitesse à la position $y=0.2$ m et $y=0.6$ m le long de l'axe des abscisses pour les quatre configurations pour les quatre configurations.	67

Tableaux.

Tableau 1 Propreté thermo-physique de l'air ...	43
Tableau 2 Valeurs moyennes : vitesse, énergie cinétique, température.	68

Schémas.

Schéma II. 1 Principe de calcul numérique.	33
Schéma II. 2 Premier cas étudié.	41
Schéma II. 3 Deuxième cas.	41
Schéma II. 4 Troisième cas étudié.	42
Schéma II. 5 Quatrième cas étudié.	42

NOMENCLATURE

Symboles Grandeurs Unités.

H : Hauteur de local [m].

L : La Longueur de Local [m].

R : Le Rayon [m].

D : Le Diamètre [m]

HT : La Hauteur Total [m].

U : La Vitesse [m/s].

V : La Vitesse [m/s].

g : La Constante de la Gravité [m/s²].

ρ : La Masse Volumique [Kg/m³].

T : Température De Local [K].

λ : Conductivité Thermique [W/m.k].

P : Pression [pas].

C_p : Chaleur Spécifique [J/Kg.K].

h : Coefficient d'échange Convectif [W/m².K].

Q : Débit Volumique [m³/s].

K : Energie Cinétique Turbulente.

S : Surface D'échange [m²].

ACH : Air Change Par Heur [L/h].

α : Diffusivité thermique [m²/s].

Lettres Gracques.

β: Coefficient de la dilatation.

ε : taux de dissipation de l'énergie cinétique.

μ : viscosité dynamique [Kg/ m .s].

Nombres adimensionnels.

Re: Nombre de Reynolds.

Pr : Nombre de Prandtl.

Nu : Nombre de Nusselt.

Ra : Nombre de Rayleigh.

Gr:Nombre de Grashoff.

Introduction générale

Au cœur des préoccupations contemporaines en matière d'efficacité énergétique et de confort, la ventilation dans les espaces habités revêt une importance cruciale. Ce mémoire entreprend une exploration approfondie du comportement thermique des espaces de vie, en mettant particulièrement en lumière le rôle déterminant de la ventilation. Nous analysons en détail comment une ventilation efficace contribue à améliorer le confort thermique et à optimiser la consommation énergétique. En assurant une meilleure répartition de la chaleur et en réduisant les pertes énergétiques, une ventilation bien conçue joue un rôle essentiel dans la création d'environnements intérieurs sains et éco énergétiques.

Dans cette étude, nous nous attelons à comprendre comment la distribution des températures et des vitesses de l'air à l'intérieur des bâtiments, en particulier dans les espaces ventilés, influence le confort thermique des occupants et l'efficacité énergétique des structures.

La ventilation efficace dans les bâtiments offre un équilibre subtil entre le maintien d'un environnement intérieur sain et confortable et la réduction significative de la consommation d'énergie. Historiquement, la ventilation naturelle a joué un rôle fondamental dans l'architecture traditionnelle, incarnant un pilier essentiel de la conception climatique des bâtiments. Outre son rôle dans l'élimination des odeurs et des polluants, elle régule également l'humidité excessive et assure un apport en oxygène vital pour les appareils de combustion, contribuant ainsi à un cadre de vie sain et sécurisé.

Pour appréhender la circulation de l'air dans les espaces habités, plusieurs approches sont envisageables, parmi lesquelles l'expérimentation, la simulation numérique et l'utilisation de modèles théoriques occupent une place prépondérante. Ces méthodes permettent d'analyser les vitesses et les températures de l'air dans les espaces, deux paramètres cruciaux pour évaluer le niveau de confort des occupants.

Le présent mémoire s'articule autour de quatre chapitres, chacun explorant une facette spécifique de la question de la ventilation dans les bâtiments :

- Le Chapitre 01 : offre une vue d'ensemble des principes fondamentaux de la ventilation.
- Le Chapitre 02 : se penche sur la formulation précise du problème à étudier.
- Le Chapitre 03 : se concentre sur l'application de simulations numériques pour appréhender le comportement thermique des espaces ventilés.

- Enfin, le Chapitre 04 présente les résultats obtenus au cours de cette recherche et propose des interprétations éclairantes.

Ce mémoire aspire ainsi à apporter une contribution significative à la compréhension et à l'optimisation de la ventilation dans les bâtiments, dans une perspective d'amélioration du confort thermique des occupants et de la performance énergétique des structures.

CHAPITRE I :

**Généralités sur l'importance de la ventilation dans le
confort et l'efficacité énergétique du bâti.**

Introduction.

Un bâtiment du futur, conçu pour le confort et l'efficacité énergétique, est une symphonie d'ingénierie. Leur conception méticuleuse garantit une enveloppe protectrice qui maintient un environnement intérieur stable et agréable. À travers une ventilation minutieusement pensée, ces structures assurent une qualité d'air irréprochable, essentielle pour le bien-être des occupants. Ainsi, ces édifices se présentent comme des symboles de l'innovation technologique au service du confort humain et de la durabilité. [1]

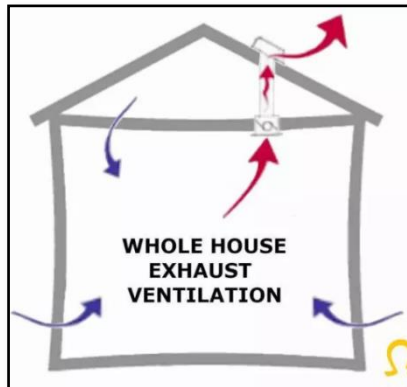


Figure I. 1 Notion de la ventilation dans un bâti. [27]

Les êtres humains passent la majeure partie de leur temps dans des environnements intérieurs, où la qualité de l'air peut souvent être plus préoccupante que celle de l'extérieur. Afin de préserver notre bien-être respiratoire et notre santé, une ventilation adéquate est indispensable. Les bâtiments futurs sont ainsi équipés de systèmes de ventilation sophistiqués, ajustant automatiquement le débit d'air pour garantir un environnement intérieur sain et confortable, tout en optimisant l'efficacité énergétique.

I.1 Principe de la ventilation :

La qualité de l'air dans les environnements intérieurs est d'une importance capitale. Malgré leur rôle de refuge contre les éléments extérieurs, ces espaces peuvent être affectés par une pollution souvent plus élevée que celle de l'extérieur. Les matériaux de construction, les meubles et même les occupants contribuent à cette pollution.

La ventilation est comme le souffle de vie d'un bâtiment. Elle apporte de l'air frais, évacue les polluants et les produits de combustion, contribue à l'équilibre thermique du bâtiment et fournit l'oxygène nécessaire à notre respiration. Son objectif ultime est de renouveler l'air intérieur, créant ainsi un environnement sain et confortable. [2]

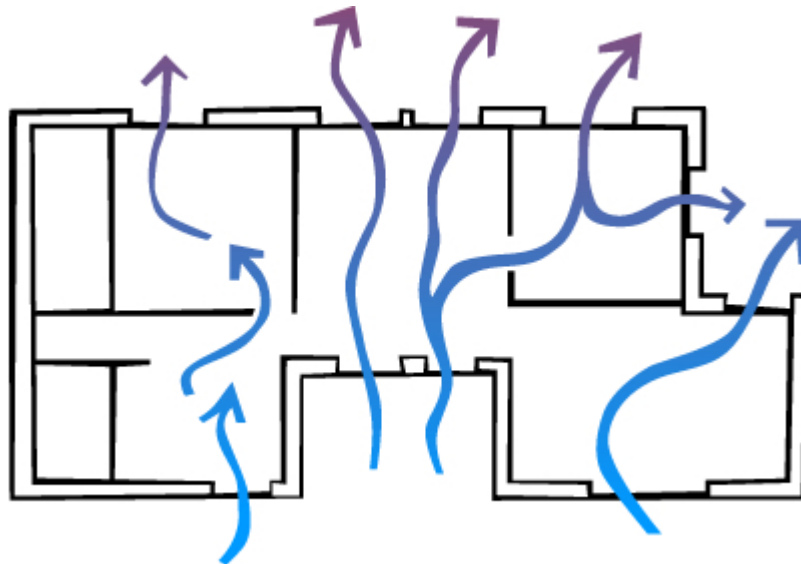


Figure I. 2 ventilation : poumon du bâtiment. [3]

L'importance de la ventilation dans les bâtiments réside dans sa capacité à maintenir un environnement intérieur sain et confortable. Alors que la ventilation naturelle utilise les différences de pression et de température pour faire circuler l'air, elle peut parfois s'avérer insuffisante. C'est là que la ventilation mécanique contrôlée (VMC) intervient, avec des systèmes tels que des ventilateurs et des extracteurs, pour garantir une ventilation adéquate. Cette technologie moderne permet un réglage précis en fonction des besoins spécifiques de chaque espace, assurant ainsi un environnement intérieur optimal. [3]

I.2 La fonction de la ventilation :

La ventilation est une fonction vitale dans tout espace intérieur. Elle est comparable aux poumons d'un bâtiment, inspirant de l'air frais et expirant l'air vicié. En plus d'assurer notre confort thermique, elle joue un rôle crucial dans notre santé en éliminant les polluants intérieurs et en fournissant l'oxygène nécessaire à notre respiration.

Par ailleurs, la ventilation contribue à maintenir un équilibre thermique optimal dans le bâtiment, en aidant à stabiliser la température intérieure. Elle intervient également dans le contrôle de l'humidité, ce qui permet de prévenir la formation de moisissures et d'autres problèmes liés à l'excès d'humidité.

En résumé, la ventilation est un élément essentiel pour créer un environnement intérieur sain, confortable et écoénergétique. Elle représente le souffle de vie qui anime nos

espaces intérieurs, assurant ainsi notre bien-être et notre confort au quotidien.

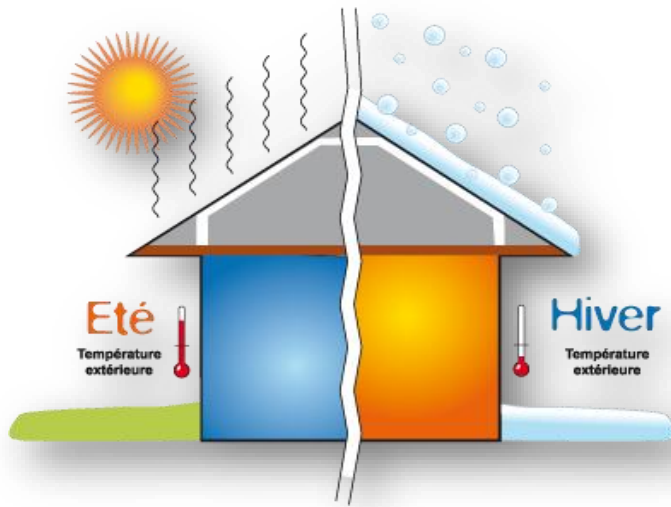


Figure I. 3 le confort thermique dans un bâti. [18]

I.3 Les types de la ventilation :

Dans le monde de la ventilation, il existe une variété de systèmes, chacun avec ses forces et ses faiblesses. Voici quelques-uns des systèmes les plus couramment utilisés :

- a) **Ventilation Naturelle** : Imaginez un système qui tire parti des cadeaux de la nature, comme le vent et les différences de température, pour faire circuler l'air. C'est le genre de système simple et économique à installer, mais il peut parfois être capricieux, selon le temps qu'il fait. [4]
- b) **Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC) Simple Flux** : Voici un système qui fait appel à la technologie, avec des ventilateurs et d'autres équipements mécaniques pour assurer une circulation d'air constante. Dans les bâtiments bien isolés, où l'air naturel a du mal à circuler, c'est une solution efficace pour maintenir une atmosphère fraîche. [4]
- c) **Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC) Double Flux** : Ce système va encore plus loin, en récupérant l'énergie de l'air évacué pour préconditionner l'air entrant. Cela permet des économies d'énergie appréciables, une sorte de boucle énergétique intelligente. [5]

- d) **Ventilation Hybride** : C'est un peu comme avoir le meilleur des deux mondes. Ce système peut jongler entre la ventilation naturelle et mécanique, s'adaptant aux conditions pour offrir le confort optimal. [4]

Chaque système a ses atouts et ses points faibles, et le choix dépend de divers facteurs tels que le climat, le type de bâtiment et même les préférences personnelles. En matière de ventilation, trouver le bon équilibre entre efficacité et confort est essentiel.

I.3.1 La ventilation simple flux par extraction :

Les systèmes de ventilation simple flux par extraction constituent une méthode couramment adoptée dans les bâtiments résidentiels neufs pour assurer un renouvellement efficace de l'air intérieur. Dans ce système, l'air frais provenant de l'extérieur est introduit dans les pièces principales, telles que le séjour, le salon et les chambres, par le biais d'ouvertures positionnées sur les menuiseries ou dans les coffres de volets roulants. Pendant ce temps, l'air vicié est extrait des pièces de service, comme la salle de bains, la cuisine et les toilettes, grâce à un groupe d'extraction équipé d'un ventilateur. Cette méthode offre l'avantage d'une régulation indépendante du débit d'air renouvelé par rapport aux conditions climatiques extérieures.

1) La ventilation simple flux autoréglable :

La ventilation autoréglable permet un ajustement automatique du débit d'extraction d'air dans les différentes pièces en fonction des besoins.

2) La ventilation hydro-réglable

Module les débits d'air en réaction au taux d'humidité, ce qui contribue à réduire les déperditions énergétiques liées à une ventilation excessive et à prévenir les risques de condensation dans le logement.

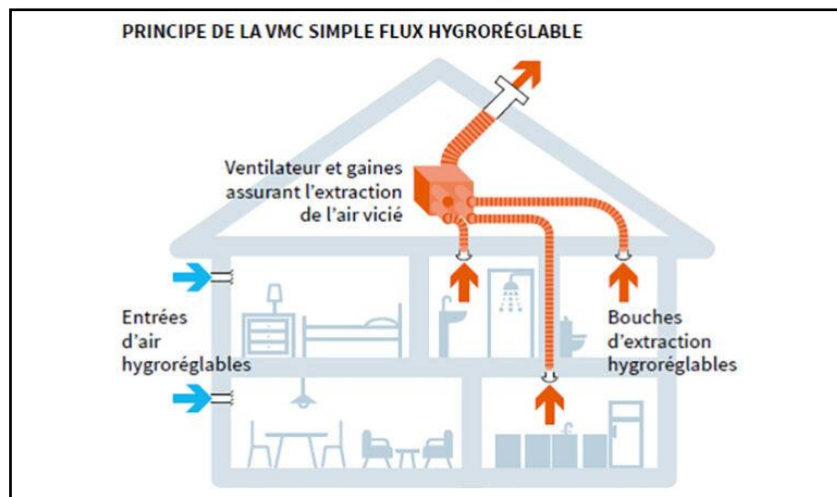


Figure I. 4 Ventilation simple flux par extraction HYGROREGLABLE. [7]

3) La ventilation simple flux par soufflage :

Implique l'utilisation d'un seul ventilateur pour distribuer l'air purifié dans différentes zones à traiter, est généralement considérée comme moins adaptée à un usage résidentiel. Bien que cette méthode puisse évacuer l'air vicié vers l'extérieur par le biais de bouches ou de volets de surpression, elle reste relativement rarement utilisée dans les habitations.

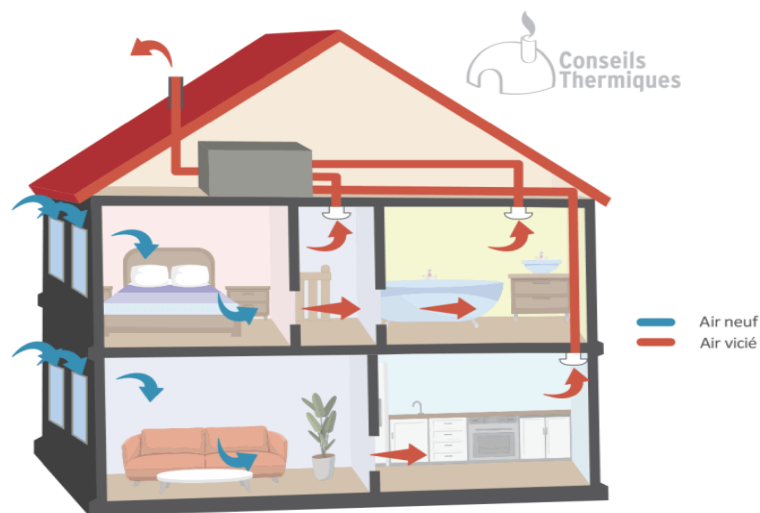


Figure I. 5 La ventilation simple flux par soufflage. [8]

I.3.2 La ventilation double flux :

La ventilation double flux représente une approche sophistiquée de la ventilation mécanique contrôlée, impliquant l'utilisation de deux systèmes distincts pour l'insufflation

et l'extraction d'air dans les espaces habités. Cette méthode se distingue par l'emploi de deux ventilateurs autonomes fonctionnant à travers des réseaux de conduits séparés. L'un de ces ventilateurs est chargé de fournir de l'air frais dans les pièces principales, tandis que l'autre est spécifiquement dédié à l'évacuation de l'air vicié des espaces de service. En somme, la ventilation double flux offre une solution avancée et efficace pour garantir un renouvellement d'air optimal tout en préservant un confort thermique et une qualité de l'air intérieur optimale dans les bâtiments.

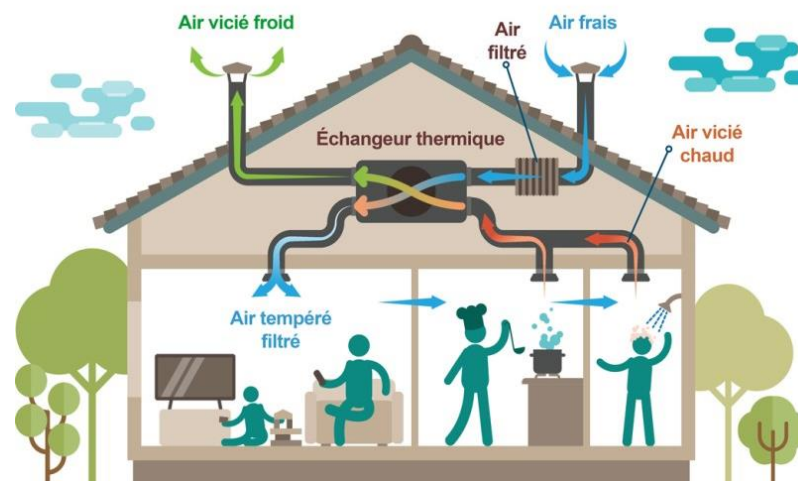


Figure I. 6 Principe de La ventilation double flux. [9]

I.3.3 Le traitement d'air par centrale à mélange air neuf / air repris :

La technique de traitement de l'air par une centrale à mélange air neuf / air repris se révèle particulièrement adaptée pour assurer le chauffage, la ventilation, voire le rafraîchissement de vastes espaces tels que les salles de réception, les gymnases, les établissements de restauration et les magasins, entre autres. Le débit d'air expulsé est généralement supérieur au débit d'air purifié, ajusté en fonction des exigences thermiques et de la nécessité de diffuser l'air de manière confortable dans l'environnement. Les volets de mélange permettent de réguler le débit d'air frais selon les besoins. Par ailleurs, ce système offre une solution prometteuse pour le rafraîchissement estival grâce à une ventilation adéquate, simplement en ouvrant les volets de mélange d'air neuf pendant les périodes favorables.

I.3.4 Les types de ventilation naturelle :

- **Ventilation par fenêtres ouvertes :** C'est le type le plus simple et le plus courant de ventilation naturelle. Il implique l'ouverture des fenêtres pour permettre à l'air

extérieur de circuler à travers les espaces intérieurs, évacuant ainsi l'air vicié et fournissant de l'air frais.

- **Ventilation par tirage thermique :** Ce type de ventilation exploite les différences de température entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment pour créer un flux d'air ascendant. L'air chaud à l'intérieur du bâtiment s'élève, créant une dépression qui attire l'air frais de l'extérieur à travers des ouvertures spécifiques, comme des fenêtres en partie haute ou des lucarnes.
- **Ventilation par effet Venturi [6] :** Ce mécanisme de ventilation naturelle repose sur le principe de la réduction de pression dans un conduit étroit, créant ainsi un flux d'air qui circule à travers un bâtiment. Cela peut être réalisé en utilisant des ouvertures stratégiquement placées pour exploiter les différences de pression et favoriser le mouvement de l'air.

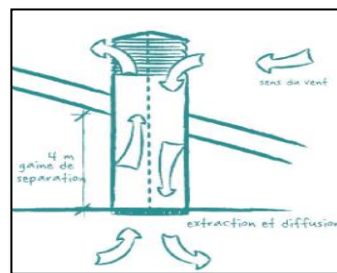


Figure I. 7 Ventilation par effet Venturi.

Ventilation par cheminées solaires [6] : Les cheminées solaires, également appelées puits de lumière solaire, captent la chaleur du soleil pour chauffer l'air à l'intérieur d'un conduit vertical. Cette chaleur crée un courant ascendant qui extrait l'air vicié de l'intérieur du bâtiment et le remplace par de l'air frais provenant de l'extérieur.

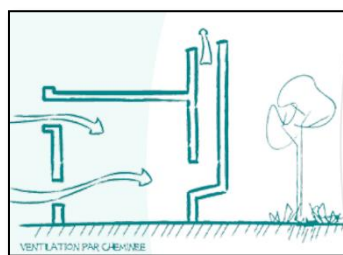


Figure I. 8 Ventilation par cheminées solaires.

- **Ventilation par atriums [6] :** Les atriums sont des espaces ouverts à plusieurs étages à l'intérieur d'un bâtiment, conçus pour permettre à l'air de circuler verticalement. L'air chaud monte vers le haut de l'atrium, créant une dépression qui tire l'air frais de l'extérieur vers le bas, assurant ainsi une ventilation naturelle efficace

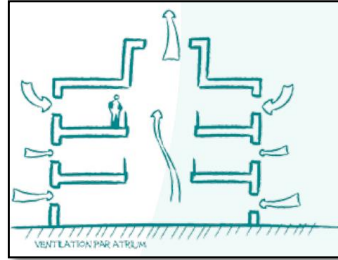


Figure I. 9 Ventilation par atriums.

I.4 Les différents systèmes de la ventilation :

La ventilation est un aspect essentiel de tout environnement intérieur, agissant comme le système respiratoire d'un bâtiment, assurant non seulement le bien-être des occupants, mais également l'efficacité opérationnelle des équipements et la réduction des risques liés aux odeurs désagréables et aux allergènes.

Il existe plusieurs systèmes de ventilation, chacun offrant ses avantages et ses inconvénients, adaptés à diverses configurations et besoins. Voici une hiérarchie des principaux systèmes :

I.4.1 Ventilation Naturelle :

- Ce système exploite les forces naturelles telles que le vent et les différences de température pour faire circuler l'air.
- Son avantage réside dans sa simplicité et son coût moindre, mais son efficacité peut fluctuer en fonction des conditions météorologiques.

I.4.2 Ventilation Mécanique :

- Utilise des équipements mécaniques tels que des ventilateurs pour faire circuler l'air.
- Peut être plus efficace que la ventilation naturelle, surtout dans les bâtiments bien isolés où la circulation naturelle de l'air est limitée.

I.4.3 Ventilation Mixte :

- Intègre à la fois des éléments de ventilation naturelle et mécanique.
- Utilise la ventilation naturelle lorsque possible et bascule vers la ventilation mécanique au besoin.

I.4.4 Ventilation à Récupération d'Énergie (VRE) :

- Ce système récupère l'énergie de l'air évacué pour préchauffer ou pré-refroidir l'air entrant, permettant des économies d'énergie significatives.

Les systèmes de ventilation sont classés selon différents critères [7]

- Système A :** Ventilation Naturelle - apport d'air par des ouvertures naturelles.
- Systèmes B et C :** Ventilation Mécanique Contrôlée à simple flux (VMCSF) - différenciés par la manière dont l'air entre et sort.
- Système D :** Ventilation Mécanique Contrôlée à double flux (VMCDF) - circulation mécanique d'air entrant et sortant.
- Ventilation Hybride :** Combine avantages de la ventilation naturelle et mécanique avec une régulation adaptative.

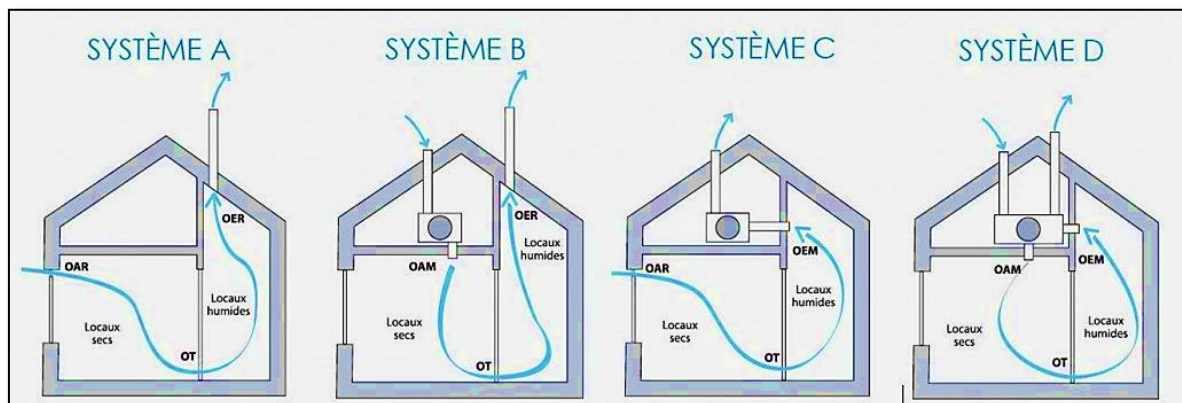


Figure I. 10 Les différents systèmes de ventilation. [12]

- Le choix du système dépend de plusieurs facteurs, dont le climat, le type de bâtiment et les préférences individuelles. Chaque système contribue à maintenir un environnement intérieur sain, confortable et écoénergétique, en assurant une circulation d'air efficace et un contrôle précis de la qualité de l'air.

I.5 La notion du confort :

Le confort, véritable pilier de notre quotidien, revêt plusieurs facettes qui s'entrelacent pour créer un sentiment de bien-être global. Il englobe non seulement notre sensation

physique d'aise, mais aussi notre état de paix et d'harmonie psychologique avec notre environnement. [8]

Ce bien-être matériel se manifeste à travers divers éléments qui facilitent notre vie quotidienne, comme la qualité de notre logement et la fonctionnalité de nos équipements ménagers. Un aspect crucial du confort réside également dans la qualité de l'air que nous respirons, un élément souvent négligé mais essentiel à notre santé et à notre bien-être général.

Dans le domaine de l'ergonomie, le confort est une pierre angulaire pour garantir une bonne adaptation du travail à l'humain, que ce soit à travers des sièges ergonomiques, des poignées intuitives ou des cabines de passagers conçues pour offrir une expérience agréable.

Parallèlement, **le confort thermique** émerge comme un élément clé dans la conception énergétique des bâtiments. Il représente la satisfaction que ressent une personne par rapport à la température ambiante, jouant un rôle déterminant dans l'efficacité énergétique globale d'un édifice.

L'optimisation du confort thermique repose sur une compréhension approfondie de plusieurs paramètres, tels que la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent. Des méthodes sophistiquées d'évaluation et d'optimisation, basées sur des enquêtes, des expérimentations et des calculs thermiques, sont déployées pour garantir des conditions intérieures optimales tout en minimisant la consommation énergétique. [9]

Ainsi, que ce soit à travers des technologies d'isolation avancées, des systèmes de chauffage et de refroidissement efficaces, ou des solutions de ventilation adaptées, l'objectif demeure le même : créer des environnements intérieurs où le confort, sous toutes ses formes, est au cœur de la conception, offrant ainsi une véritable oasis de bien-être pour ses occupants.

I.6 Comment faire la ventilation et l'aération :

La ventilation et l'aération sont comme les gardiens de la qualité de l'air à l'intérieur d'un bâtiment, veillant à ce qu'il reste frais et purifié en tout temps. Voici comment vous pouvez les mettre en pratique :

- **Ventilation** : Imaginez que la ventilation soit une brise fraîche qui circule constamment à travers votre maison, apportant un souffle d'air pur là où vous en avez le plus besoin. Vous pouvez réaliser cela de plusieurs manières : [10]
- En installant des grilles dans les murs, les portes et les fenêtres pour permettre à l'air frais d'entrer et à l'air vicié de sortir.

- En optant pour un système de ventilation sophistiqué qui apporte de l'air frais dans les pièces sèches telles que le salon ou la chambre, puis le guide habilement jusqu'aux pièces humides comme la cuisine et la salle de bains, où il est ensuite évacué.
- **Aération** : L'aération, quant à elle, est comme une grande bouffée d'air frais qui pénètre dans votre maison pour éliminer les impuretés. Vous pouvez la réaliser en ouvrant largement les portes et les fenêtres pendant une courte période, permettant ainsi à l'air frais d'entrer par les pièces sèches et de sortir par les pièces humides. [10]

Dans certaines situations, une simple ventilation permanente peut ne pas suffire. Par exemple, après une douche chaude ou une séance de peinture, une aération supplémentaire peut être nécessaire. Dans ces cas, il est recommandé d'augmenter la puissance de la ventilation mécanique ou d'ouvrir largement les portes et les fenêtres pour permettre un échange d'air plus efficace.

Pour les maisons dépourvues de système de ventilation, il est conseillé de maintenir une aération de base en laissant une fenêtre entrouverte ou en position oscillo-battante, de jour comme de nuit. Cela assure un flux d'air constant pour maintenir une atmosphère saine et agréable à l'intérieur.

I.7 Les différentes cavités utilisées en la ventilation naturelle :

La ventilation naturelle constitue un mécanisme ingénieux utilisant divers éléments pour favoriser la circulation d'air à l'intérieur d'un bâtiment. Voici une présentation détaillée des composants clés de ce système :

1. **Entrées d'air** : Ces ouvertures stratégiquement positionnées sont spécialement conçues pour permettre à l'air frais de pénétrer dans le bâtiment. Elles sont habituellement situées dans les espaces secs tels que les chambres et les salons, assurant ainsi un apport continu d'air frais. [11]

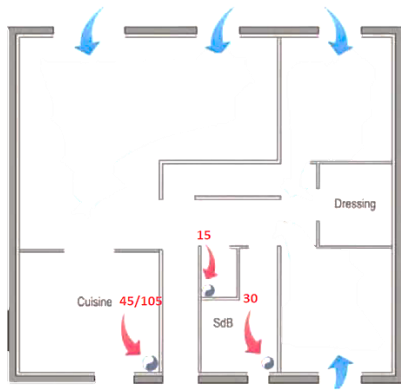


Figure I. 11 Entrées d'air par ouvertures. [23]

2. **Ouvertures de transfert** : Ces passages facilitent la circulation de l'air d'une pièce à l'autre à l'intérieur du bâtiment. Généralement placées dans les couloirs et les escaliers, elles favorisent une répartition homogène de l'air frais à travers toutes les zones habitables. [11]

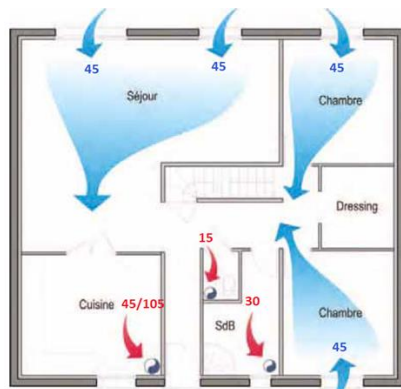


Figure I. 12 Circulation d'air entre les espaces. [23]

3. **Bouches d'extraction** : Ces dispositifs sont spécialement conçus pour extraire l'air vicié des espaces humides tels que la cuisine et la salle de bains. Leur emplacement stratégique assure une évacuation efficace des vapeurs et des odeurs indésirables, contribuant ainsi à maintenir un environnement intérieur sain. [12]

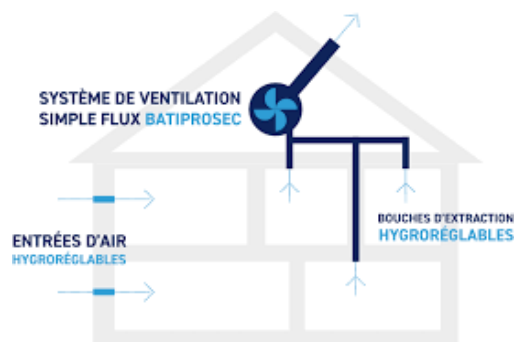


Figure I. 13 Les bouches d'extraction. [24]

4. **Conduits de ventilation** : Ces conduits verticaux jouent un rôle crucial en permettant à l'air vicié d'être évacué vers l'extérieur du bâtiment. Souvent débouchant en toiture, ils assurent une sortie efficace de l'air indésirable, contribuant ainsi à maintenir une atmosphère intérieure fraîche et propre. [12]

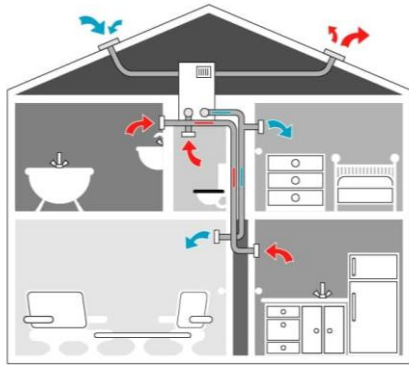


Figure I. 14 Conduite de ventilation. [25]

5. **Lucarnes, auvents et puits de lumière** : Ces éléments architecturaux peuvent également jouer un rôle dans le processus de ventilation naturelle. En plus d'apporter de la lumière naturelle, ils peuvent faciliter la circulation de l'air frais à l'intérieur du bâtiment et contribuer à l'évacuation de l'air vicié. [13]

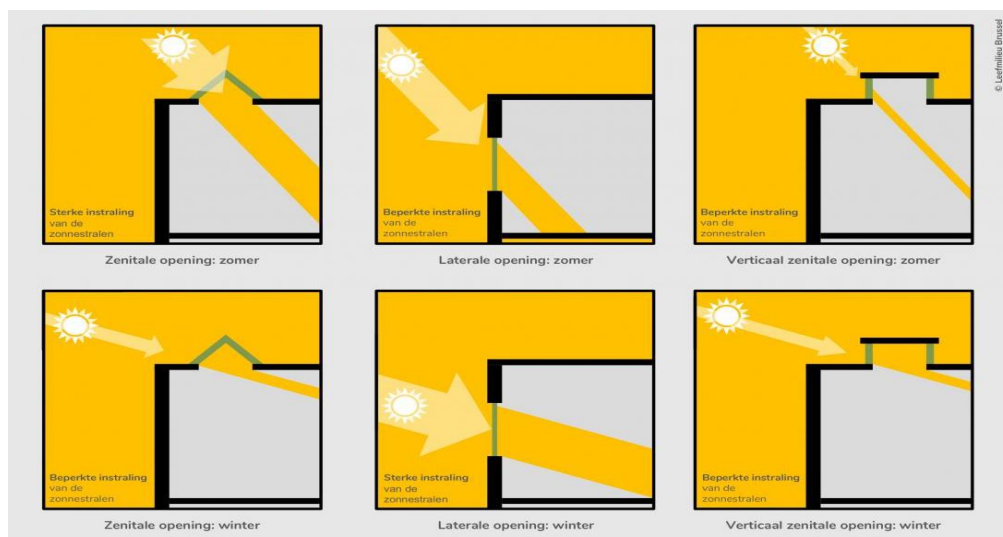


Figure I. 15 Différents ouvertures d'aération. [19]

Il convient de souligner que l'efficacité de la ventilation naturelle dépend de divers facteurs tels que la conception du bâtiment, la taille et l'emplacement des ouvertures, ainsi que les conditions météorologiques telles que la direction du vent et les différences de

température entre l'intérieur et l'extérieur. Ces éléments interagissent harmonieusement pour assurer un environnement intérieur confortable et sain.

I.8 L'efficacité du renouvellement d'air :

Assurer une qualité optimale de l'air intérieur repose sur un principe essentiel : le renouvellement efficace de l'air. Ce processus clé est influencé par divers facteurs tels que le débit d'air, le volume de la pièce et les écarts de température entre l'intérieur et l'extérieur [14].

Le renouvellement de l'air est orchestré par un système de ventilation, qui injecte de l'air frais dans les zones sèches telles que les chambres à coucher et les salons, tout en évacuant l'air vicié des espaces humides comme la cuisine et la salle de bains. Une gamme de systèmes de ventilation, allant de la ventilation naturelle à la ventilation mécanique contrôlée (VMC) à simple ou double flux, ainsi que la ventilation hybride, est disponible pour répondre à ces besoins. [15]

Un renouvellement d'air efficace est vital pour éliminer les sources de pollution intérieure, telles que le CO₂, les composés organiques volatils (COV) et les formaldéhydes. Il est impératif que l'air frais extérieur soit préalablement filtré et ajusté en température pour garantir la santé des occupants. Toutefois, cette quête de qualité d'air ne doit pas compromettre l'efficacité énergétique du bâtiment. C'est pourquoi le recyclage de l'énergie de l'air vicié revêt une importance capitale, tout en assurant la sécurité sanitaire des lieux. [15]

I.8.1 Indice d'efficacité de renouvellement d'air :

L'évaluation de l'efficacité du renouvellement d'air dans les bâtiments repose sur divers paramètres, dont l'indice d'efficacité de ventilation, échelonné de 0 à 1, où une valeur proche de 1 indique une ventilation optimale. Les systèmes de ventilation par piston se distinguent par leurs performances élevées, assurant un renouvellement efficace de l'air vicié par de l'air frais, généralement dirigé de bas en haut. En revanche, les systèmes de ventilation par mélange visent à homogénéiser l'air ambiant, mais peuvent être moins efficaces en présence de zones mortes créées par des phénomènes de recirculation ou de courts-circuits entre les points d'admission et d'extraction d'air. Les indicateurs tels que l'âge de l'air, le temps résiduel et le temps de résidence fournissent des mesures complémentaires de l'efficacité de

la ventilation en termes de renouvellement de l'air et d'élimination des polluants. Cependant, l'évaluation de l'efficacité de la ventilation peut être complexe, notamment dans les cas de ventilation naturelle ou dans des bâtiments très perméables, en raison de la variabilité accrue du renouvellement d'air.

I.8.2 Taux de renouvellement d'air :

La notion de taux de changement d'air (ACH), comme définie par l'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), représente le nombre de fois par heure où le volume total d'air d'un espace donné est renouvelé. Cette mesure est obtenue en divisant le débit d'air (exprimé en mètres cubes par heure) par le volume de la pièce (également en mètres cubes), et est exprimée en heures inverses. Un ACH de 1 indique que l'air de la pièce est renouvelé intégralement chaque heure, tandis qu'un ACH de 0,5 signifie que le renouvellement complet de l'air prend deux heures. Cette métrique est largement utilisée pour évaluer la qualité de l'air intérieur dans les bâtiments.

La formule pour calculer l'ACH est la suivante :

$$ACH = \frac{Q \times 3600}{\text{Volume totale de la pièce}} \quad (1)$$

Où :

- Q représente le débit d'air frais par heure (air d'appoint) dans la pièce.

Conclusion.

Certainement. L'adoption de la ventilation naturelle peut sembler attrayante dans certains contextes, mais son efficacité peut varier en fonction des conditions climatiques et des caractéristiques du bâtiment. Dans de nombreux cas, une approche de ventilation mécanique peut s'avérer indispensable pour maintenir une qualité d'air intérieur optimale et prévenir les risques pour la santé des occupants. Ainsi, une analyse rigoureuse de la situation spécifique est nécessaire pour déterminer la méthode de ventilation la plus appropriée. En prenant en compte les facteurs environnementaux et les besoins des occupants, il est possible de trouver une solution qui garantisse un environnement intérieur sain et confortable, tout en optimisant l'efficacité énergétique du bâtiment.

CHAPITRE II :
Formulation du problème.

Introduction.

Dans ce chapitre, nous avons exposé les diverses configurations spatiales du local qui seront soumises à simulation dans le troisième chapitre. Les dimensions du local sont spécifiées en mètres, avec une longueur et une hauteur de 1.04 mètres chacune. Pour aborder le problème de manière continue, nous avons examiné la discrétisation des équations aux dérivées partielles afin de le transformer en un problème discret, pouvant être résolu à l'aide de méthodes numériques telles que la méthode des éléments finis, la méthode des différences finies et la méthode des volumes finis. Parmi celles-ci, la méthode des volumes finis est couramment privilégiée dans les logiciels de simulation numérique de la dynamique des fluides (CFD - Computational Fluid Dynamics).

Dans cette étude, nous avons choisi d'utiliser le logiciel de calcul FLUENT version 6.3 comme solveur, ainsi que GAMBIT pour décrire la géométrie du domaine.

II.1 Hypothèses simplificatrices :

Les hypothèses simplificatrices considérées dans notre étude :

- **Fluide Newtonien.**
- **Incompressibilité.**
- **Bi-dimensionnalité.**
- **Écoulement stationnaire.**
- **Régime turbulent.**
- **Hypothèse de Boussinesq : Cette hypothèse stipule que toutes les propriétés de l'air sont constantes, à l'exception de la densité, qui peut varier en fonction des changements de température. Elle est particulièrement pertinente pour les problèmes de convection naturelle.**

Ces hypothèses simplificatrices permettent de rendre les équations de mouvement plus maniables et de faciliter l'analyse du système de ventilation. Cependant, il est important de garder à l'esprit que ces simplifications peuvent ne pas toujours refléter fidèlement la réalité et doivent être utilisées avec prudence dans l'interprétation des résultats.

II.2 Calcul numérique :

Le modèle mathématique est initialement formulé sous forme d'un ensemble d'équations aux dérivées partielles (EDP). Ensuite, ces équations sont converties en un

système d'équations algébriques à l'aide d'une méthode appropriée. Le processus de résolution numérique est illustré dans le schéma (5).

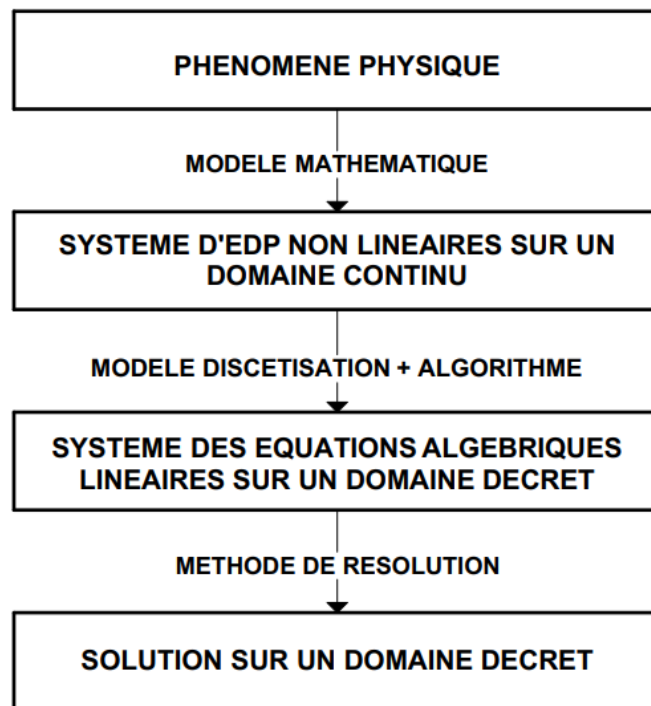


Schéma II. 1 Principe de calcul numérique.

II.3 Les différentes méthodes numériques de discrétisation :

Passer d'un problème mathématique théorique continu à une approche pratique discrète implique l'utilisation de diverses techniques, chacune avec ses propres caractéristiques et applications spécifiques. Parmi ces techniques, trois des plus couramment utilisées sont :

II.3.1 La méthode des différences finies (MDF) :

La méthode des différences finies divise le domaine continu en une grille discrète et approxime les dérivées spatiales en utilisant les valeurs de la fonction aux points voisins de cette grille. Elle est couramment employée pour résoudre des équations différentielles ordinaires et des équations aux dérivées partielles.

Son principe repose sur la discrétisation des équations aux nœuds d'une grille, calculant chaque dérivée partielle grâce au développement de Taylor. Cela génère des équations linéaires reliant les variables inconnues à un nœud donné avec les valeurs de ces variables aux nœuds voisins.

La précision de cette méthode dépend du nombre de nœuds utilisés pour chaque dérivée et de la finesse du maillage. Habituellement, un maillage régulier et structuré est privilégié pour sa mise en œuvre aisée. Cependant, la qualité du maillage peut affecter la précision et l'efficacité de la méthode, notamment en termes de résolution des gradients et de représentation des caractéristiques physiques du phénomène étudié.

II.3.2 La méthode des éléments finis (MEF) :

La méthode des éléments finis représente une approche avancée pour la discrétisation de domaines en éléments géométriques simples, tels que des triangles ou des quadrilatères. Cette méthode est grandement appréciée en raison de sa capacité à modéliser des formes complexes, en faisant ainsi un outil précieux dans divers domaines de l'ingénierie. Initialement développée dans les années 1970 pour résoudre les équations de Navier-Stokes, la méthode des éléments finis a depuis été étendue pour aborder une multitude de problèmes physiques.

Dans cette approche, les équations du problème sont reformulées dans une forme "faible", où les inconnues sont exprimées comme des combinaisons linéaires de fonctions de base ayant un support local sur chaque élément. Ces fonctions d'interpolation sont ensuite utilisées pour estimer les solutions sur chaque élément du maillage.

Le processus de résolution des problèmes par la méthode des éléments finis peut être divisé en deux étapes principales :

1. Approximation nodale des fonctions inconnues : Pendant cette phase, les fonctions inconnues sont estimées à partir de données nodales en utilisant des fonctions d'interpolation. Ces fonctions sont soigneusement sélectionnées pour assurer une représentation précise des solutions à l'intérieur de chaque élément.

2. Utilisation de la méthode des résidus pondérés : Cette étape repose sur des principes visant à minimiser les erreurs résiduelles. La méthode de Galerkin, une forme spécifique de la méthode des résidus pondérés, est souvent employée. Elle permet de construire une formulation intégrale à partir des équations aux dérivées partielles, garantissant ainsi la conservation des quantités physiques sur le domaine considéré.

En combinant ces deux étapes, la méthode des éléments finis offre une approche robuste et flexible pour résoudre une vaste gamme de problèmes d'ingénierie, allant de la mécanique des fluides à la thermodynamique. Son utilisation permet de modéliser avec précision des

phénomènes physiques complexes et de fournir des solutions numériques fiables pour des applications pratiques.

II.3.3 La méthode de volumes finis (MVF) :

La méthode des volumes finis divise le domaine physique de l'écoulement en volumes de contrôle, qui sont des éléments de volume plus ou moins réguliers. Ces volumes de contrôle sont utilisés pour intégrer les équations conservatives qui décrivent l'écoulement à l'intérieur du domaine. L'objectif principal de cette méthode est de transformer les équations différentielles générales en un ensemble d'équations algébriques, en reliant les valeurs des variables telles que la pression, la vitesse ou la température aux points adjacents des volumes de contrôle.

Pour appliquer la méthode des volumes finis, plusieurs étapes sont généralement suivies :

1. Le domaine de calcul est subdivisé en volumes de contrôle discrets à l'aide d'un maillage.
2. Les équations gouvernantes sont intégrées sur chaque volume de contrôle individuel, ce qui conduit à la construction des équations algébriques pour les variables discrètes telles que les vitesses, les pressions, les températures, et d'autres grandeurs scalaires conservées.
3. Les équations discrétisées sont linéarisées, et le système résultant d'équations linéaires est résolu pour déterminer les valeurs des variables dépendantes.

La méthode des volumes finis est largement utilisée dans la résolution numérique des équations aux dérivées partielles qui décrivent des phénomènes de transport, tels que la convection et la diffusion. Elle se concentre sur la discrétisation du domaine en volumes finis et considère les flux à travers les faces de ces volumes. Cette approche constitue la base de nombreux logiciels de simulation numérique en mécanique des fluides, comme Fluent, Star CD, CFX et Fine turbo.

- Chaque méthode a ses avantages et ses limitations, et le choix dépend souvent de la nature du problème à résoudre, de la précision requise et des ressources informatiques disponibles. Par exemple, la MEF est souvent préférée pour des problèmes de structure mécanique, tandis que la MVF est plus adaptée pour des problèmes de transfert de chaleur ou de fluide.

II.4 Principe de la méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis est une approche de résolution numérique qui implique plusieurs étapes pour discrétiser un domaine et intégrer les équations régissant l'écoulement. Voici un aperçu détaillé de ces étapes :

II.4.1 Maillage :

La technique consiste à diviser le domaine d'étude en une grille de segments longitudinaux et transversaux. Chaque intersection de ces segments forme un nœud où sont localisées les composantes de la vitesse vectorielle U et V . Ces composantes sont situées au milieu des segments reliant deux nœuds adjacents. Pour obtenir cette discrétisation, le domaine est maillé, formant un réseau de points.

Les grandeurs scalaires telles que la pression et la température sont stockées au niveau des nœuds P du maillage, tandis que les grandeurs vectorielles U et V sont stockées au milieu des segments reliant les nœuds. L'équation du transport est ensuite intégrée sur le volume de contrôle associé aux variables scalaires, tandis que les équations de quantité de mouvement sont intégrées sur le volume de contrôle associé aux composantes de vitesse.

Le volume de contrôle de la composante longitudinale U est décalée le long de la direction X par rapport au volume de contrôle principal, tandis que celui de la composante transversale V est décalée le long de la direction Y . Ce type de maillage, appelé maillage décalé, permet une meilleure approximation des flux convectifs et une évaluation plus précise des gradients de pression, contribuant ainsi à la stabilité numérique de la solution.

II.4.2 Discrétisation des équations gouvernantes :

L'étape centrale de la méthode des volumes finis implique l'intégration des équations qui gouvernent le comportement de l'écoulement pour chaque volume de contrôle discret. Cette intégration aboutit à des équations algébriques qui simplifient considérablement la résolution des équations de transport associées.

Dans cette méthode, chaque nœud du maillage est entouré par un ensemble de surfaces, définissant ainsi un volume de contrôle. À ces nœuds sont associées les variables du problème ainsi que les propriétés du fluide. Les équations qui décrivent le comportement de l'écoulement sont exprimées sous forme moyennée dans un repère cartésien (x, y, z) . Cette approche permet une représentation précise des interactions entre les différents éléments de

volume et fournit une base solide pour la résolution numérique des équations de la mécanique des fluides.

II.4.3 Les équations gouvernantes :

Le problème étudié concerne les équations de Navier-Stokes couplées, qui décrivent le comportement d'un fluide incompressible. Ces équations prennent en compte l'effet de la gravité à travers l'hypothèse de Boussinesq. De plus, le modèle considère l'équation de l'énergie, où le terme représentant la dissipation visqueuse est négligé.

II.4.3.1 Équation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

u et v étant les composantes du champ de vitesse V (u, v) dans la direction x et y respectivement.

II.4.3.2 Équation de la conservation de la quantité de mouvement :

Suivant l'axe x :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

Suivant l'axe y :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_0) \quad (4)$$

II.4.3.3 Équation de la conservation de l'énergie :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

Où :

u : composante de la vitesse suivant la direction x.

v : composante de la vitesse suivant la direction y.

ρ : La masse volumique.

T : Température du local.

T0 : Température de référence ϑ .

α : Diffusivité thermique.

II.5 Approximation de Boussinesq :

L'approximation de Boussinesq est une méthode largement employée en mécanique des fluides pour simplifier la modélisation des écoulements de fluides incompressibles confrontés à de légères fluctuations de densité engendrées par les changements de température. En ce qui concerne l'air, cette approximation considère que sa densité reste généralement constante, sauf dans le terme de flottabilité, où l'impact des variations de température sur la densité est pris en compte.

En se limitant à un développement du premier ordre :

$$\rho = \rho_0(1 - \beta(T - T_0)) \quad (6)$$

β : coefficient d'expansion thermique.

Pour un gaz parfait :

$$\beta_{\text{gaz parfait}} = \frac{1}{T} \quad (7)$$

Où :

T : température absolue (température du film) $T = T_{\min} + T_{\max}/2$.

T0 : température de référence P_0 est la masse volumique de l'air.

II.6 Le modèle de turbulence :

Dans cette recherche, le modèle standard k-ε a été employé. Ce modèle repose sur les équations de transport de l'énergie cinétique turbulente (k) et de sa dissipation (ε). Dans le

cadre du modèle k-ε, la viscosité turbulente est déterminée en fonction de k et ε à travers la formule suivante : « Ce modèle offre une approche précise pour caractériser les phénomènes turbulents dans le système étudié. ».

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

Où :

ε : taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente.

k : énergie cinétique turbulente.

C_μ : une constante égale à 0.09.

II.7 Les nombres adimensionnels :

II.7.1 Le nombre de Reynolds :

Le nombre de Reynolds est le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité. Il est défini comme suit :

$$Re = \rho V L / \mu \quad (9)$$

ρ : la densité du fluide (en kg/m³).

V : la vitesse du fluide (en m/s).

L : une longueur caractéristique (en m).

μ : la viscosité dynamique du fluide (en Pa·s ou N·s/m²).

II.7.2 Le nombre de Prandtl :

Le Nombre de Prandtl est le rapport de la viscosité cinématique μ/ρ et la diffusivité thermique α=λ/ρC_p.

On le définit par :

$$Pr = \mu C_p / \lambda \quad (10)$$

C_p : Capacité calorifique massique (J/bc. d)

λ : Conductivité thermique du fluide (en W/(m·K)).

II.7.3 Le nombre de Nusselt :

Le Nombre de Nusselt Nu est le rapport du flux thermique e, transmis par convection à un flux

$$Nu = \frac{hL}{\lambda}$$

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection (en W/(m²·K)).

(11)

L : Longueur caractéristique (en m).

II.7.4 Nombre de Rayleigh :

Le nombre de Rayleigh (Ra) est un nombre adimensionnel utilisé pour caractériser les écoulements de la convection naturel.

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L_3 \cdot Pr}{\nu^2}$$

(12)

g : L'accélération due à la gravité (en m/s²).

β : Coefficient de dilatation thermique (en 1/K).

ΔT : Variation de la température (entre température de surface et température ambiante du fluide loin de la surface).

L : Longueur caractéristique (en m).

ν : Viscosité cinématique du fluide (en m²/s).

α : Diffusivité thermique du fluide (en m²/s).

II.8 Les Modèles physiques :

II.8.1 Premier Cas :

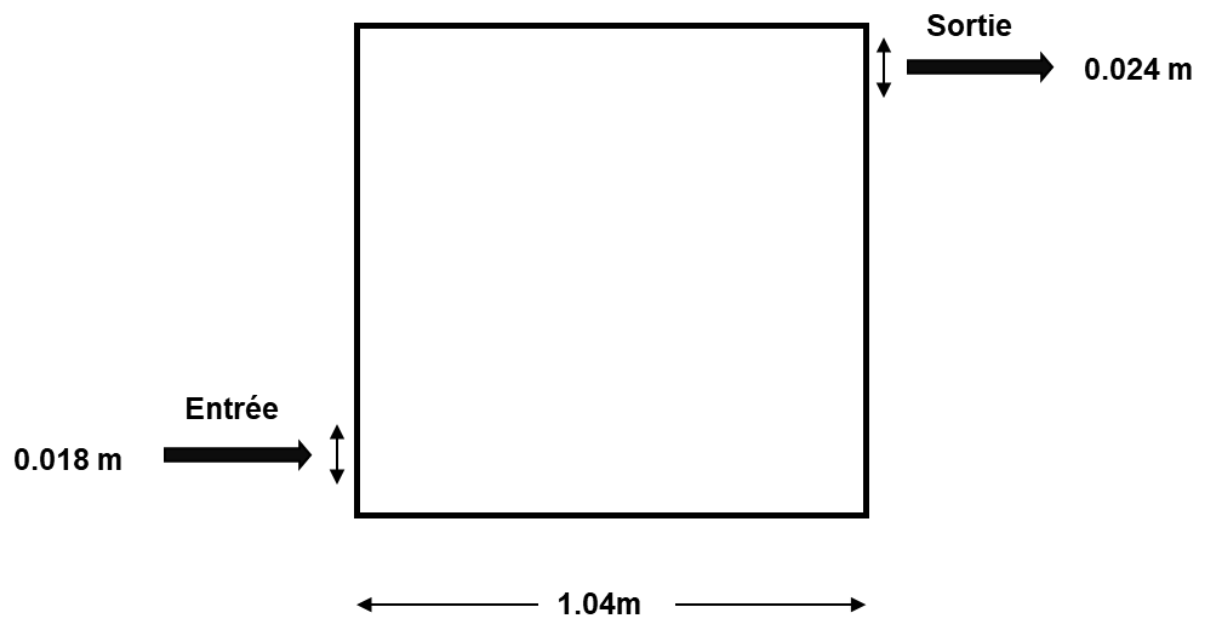


Schéma II. 2 Premier cas étudié.

II.8.2 Deuxième Cas :

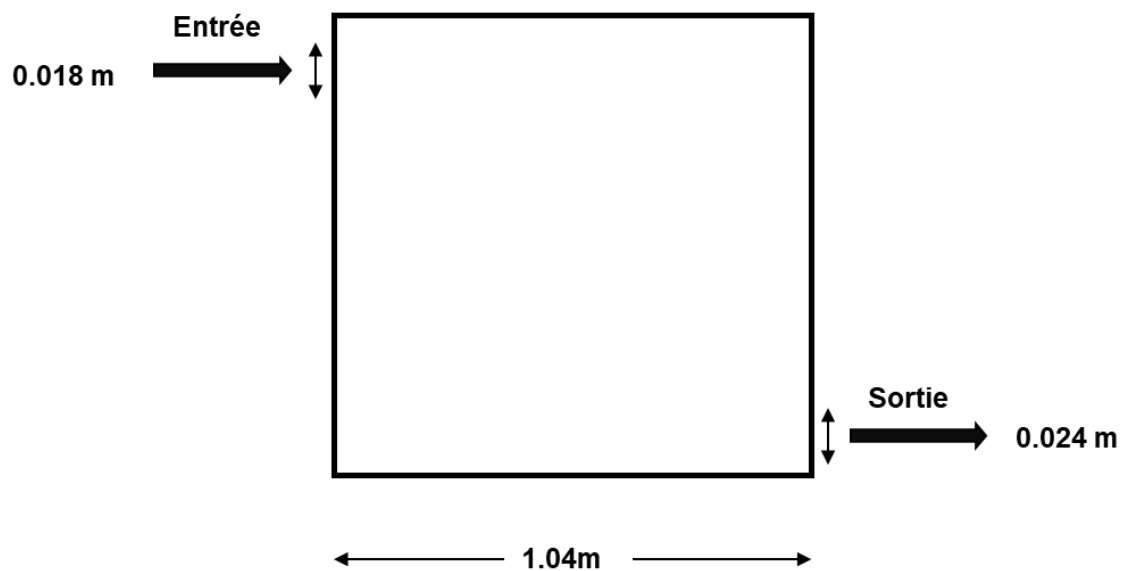


Schéma II. 3 Deuxième cas étudié.

II.8.3 Troisième Cas :

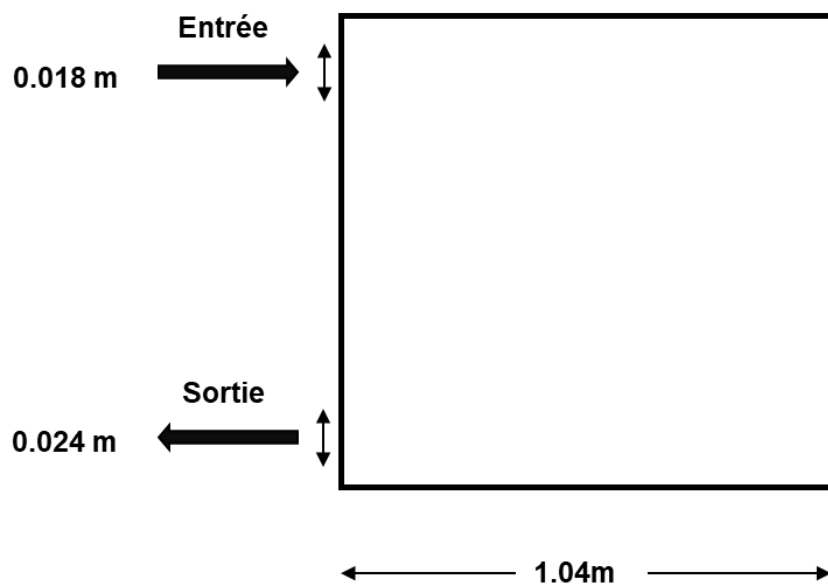


Schéma II. 4 Troisième cas étudié.

II.8.4 Quatrième cas :

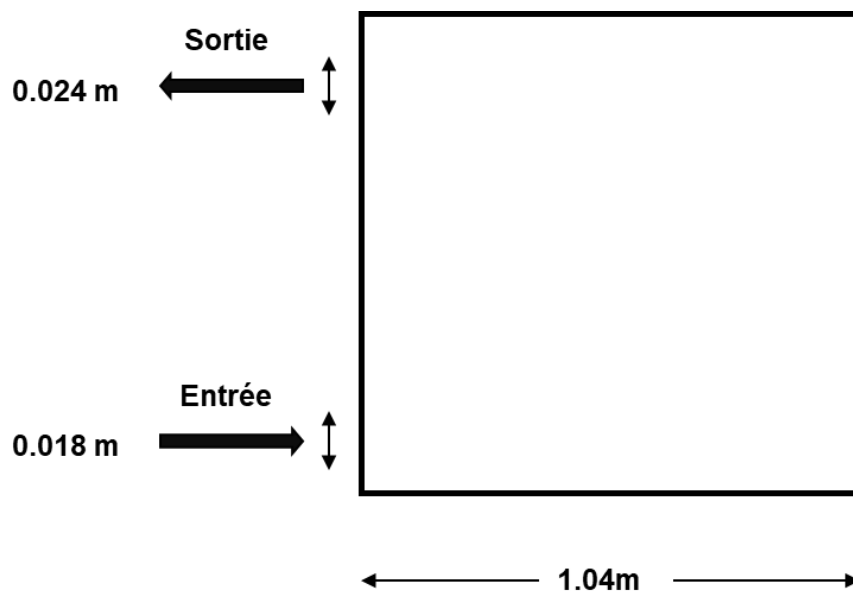


Schéma II. 5 Quatrième cas étudié.

II.9 Les conditions aux limites :

A L'entrée

$u=1.2\text{m/s}$; $v=0$; $T=300\text{ K}$.

- Paroi haut : $u= 0$; $v=0$; $T=293\text{K}$.
- Paroi bas : $u=0$; $v=0$; $T=308\text{K}$.
- Paroi droite : $u= 0$; $v=0$; $T=293\text{K}$.
- Paroi gauche : $u= 0$; $v=0$; $T=293\text{K}$.

A la sortie

$p = p_{\text{atmosphérique}}$

Tous les gradients sont nul.

Tableau 1 Propreté thermo-physique de l'air.

PROPRETES	SYMBOLE	UNITE	VALEUR
CAPACITE THERMIQUE	C_p	J/Kg.K	1006.43
MASSE VOLUMIQUE	ρ_0	Kg/m ³	1.225
CONDUCTIVITE THERMIQUE DU FLUIDE	λ_f	W/m.K	0.0242
COEFFICIENT DE DILATATION	β	1/K	0.0033
VISCOSITE CINEMATIQUE	ϑ	m ² /s	1.7894×10^{-5}
NUMIRO DE PRANDTL	Pr	-	0.70

Conclusion.

Dans ce chapitre, nous avons exposé la formulation mathématique du modèle physique, en mettant en avant les équations de Navier-Stokes et l'équation de l'énergie, tout en prenant en considération l'hypothèse de Boussinesq. Ces équations fournissent la base théorique pour comprendre et modéliser les phénomènes de transfert de masse, de quantité de mouvement et d'énergie dans le système étudié. En incorporant ces équations dans notre analyse, nous sommes en mesure de décrire de manière rigoureuse le comportement du fluide, en tenant compte des interactions entre les différentes variables telles que la pression, la vitesse et la température. Cette approche nous permet d'aborder les problèmes de manière

systematique et de formuler des solutions appropriées pour répondre à nos objectifs de recherche. En comprenant la base théorique sous-jacente et en utilisant les outils mathématiques appropriés, nous sommes mieux équipés pour interpréter les résultats expérimentaux, tirer des conclusions pertinentes et formuler des recommandations pour des applications pratiques dans divers domaines d'ingénierie et de recherche. Ce chapitre jette ainsi les fondations nécessaires pour la suite de notre étude, en fournissant un cadre conceptuel solide sur lequel nous allons construire notre analyse et nos conclusions ultérieures.

CHAPITRE III :

Simulation Numérique.

Introduction.

Computational Fluid Dynamics (CFD), est l'acronyme qui correspond à la Mécanique des Fluides Numérique (MFN) en français. Cette discipline consiste à analyser les mouvements et les effets des fluides en utilisant des méthodes numériques pour résoudre les équations qui les décrivent. Ces équations, telles que les équations d'Euler ou de Navier-Stokes, sont adaptées en fonction des besoins spécifiques, souvent en trouvant un équilibre entre la précision physique et les contraintes de calcul ou de modélisation disponibles.

La MFN a évolué d'un intérêt mathématique initial pour devenir un outil indispensable dans une multitude de domaines de la dynamique des fluides. Allant de la propulsion spatiale à la prévision météorologique en passant par la conception de coques de bateaux. Cette approche est particulièrement appréciée dans la recherche car elle permet d'obtenir des informations complètes et instantanées (telles que la vitesse, la pression et la concentration) pour chaque point de la zone d'étude, à un coût global généralement plus abordable que les expériences physiques équivalentes.

III.1 Les domaines d'utilisation de CFD dans l'industrie : [22]

- **Aérospatiale et défense** : écoulement subsonique et supersonique, aérodynamique des véhicules, échange thermique conjugué.
- **Automobile** : climatisation de la cabine, bruits aéro-acoustiques, ballonnement des liquides, gaz d'échappement, aérodynamique, refroidissement du moteur, dégivrage, boîte de vitesses.
- **Biens de consommation** : acoustique, refroidissement passif/actif, casques de vélo.
- **Électronique** : pièces détachées, analyse thermique de circuit imprimé, refroidissement, analyse de la partie LED.
- **Construction navale** : acoustique, conception des hélices, études de cavitation.
- **Machinerie** : grands ventilateurs, turbines à gaz, éoliennes, turbines à vapeur, pompes, machines de lavage, turbocompresseurs.

III.2 Présentation du logiciel GAMBIT [GM] :

GAMBIT est un logiciel de prétraitement., utilisé dans le domaine de la simulation numérique, notamment en Computational Fluid Dynamics (CFD). Ce logiciel est conçu pour créer, modifier et mailler des géométries en vue de simulations numérique. [23]

III.2.1 Fonctionnalités de Gambit :

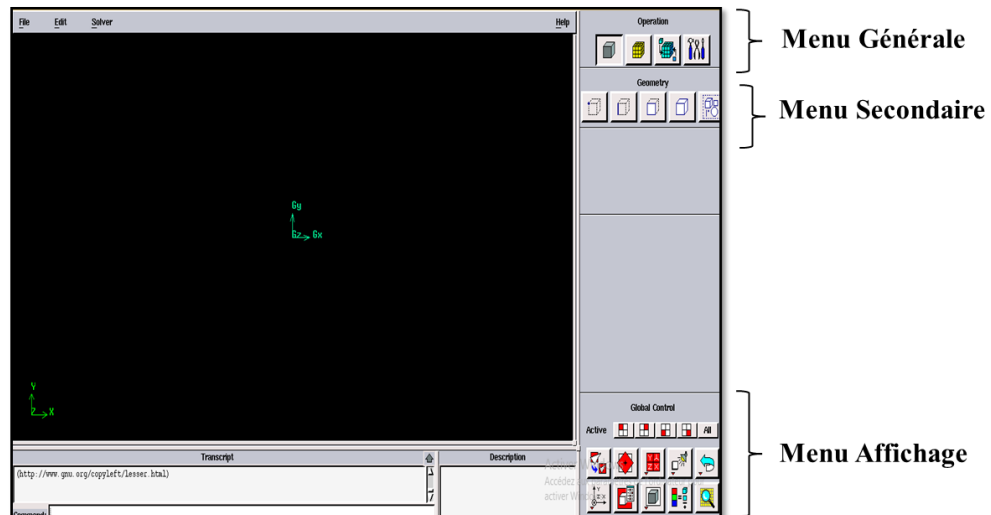


Figure III. 1 Interface graphique de Gambit.

Dans le coin supérieur droit, nous pouvons trouver les différentes opérations qui peuvent être effectuées sur le logiciel, comme le montre la Figure III. 2.

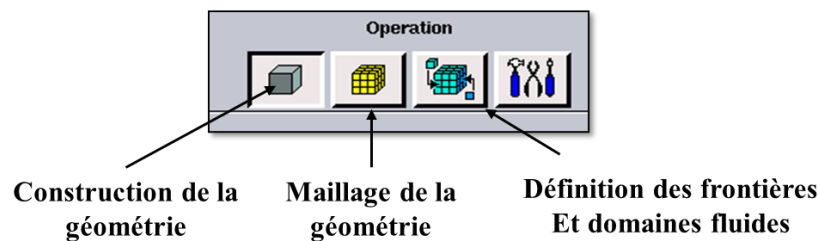


Figure III. 2 Fonction principales du menu générale de Gambit.

- La première opération est une opération géométrique. Ce menu vous permet de créer des volumes, des surfaces, des lignes et des points. Vous pouvez également modifier la géométrie importée.
- La deuxième opération est le maillage de la géométrie. Ce menu permet de mailler des volumes et des surfaces et également de discrétiser des lignes.
- La troisième opération permet de définir les conditions aux limites et les domaines fluides.
- Le quatrième bouton est le menu outil. [23]

En cliquant sur chaque fonctionnalité du Menu **général** un Menu **secondaire** correspondant s'affichera juste en dessous (Figure III. 3).

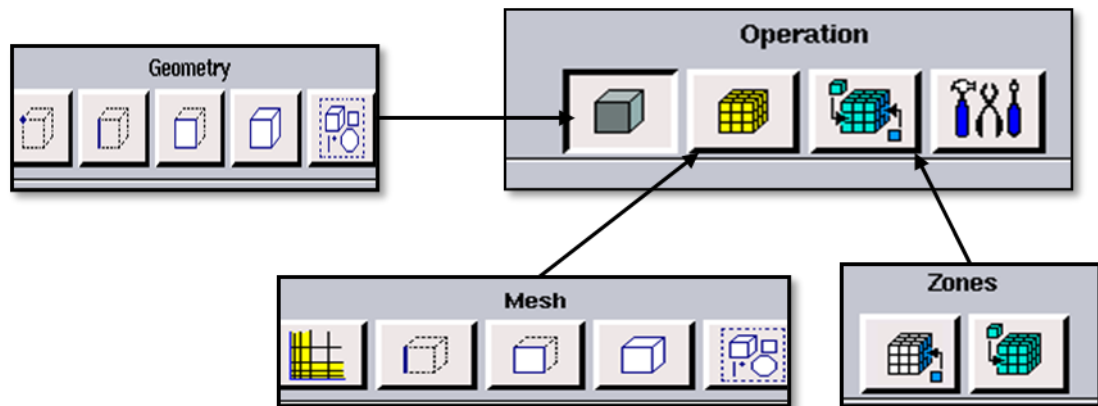


Figure III. 3 Menu secondaires de Gambit.

III.2.2 Création de la géométrie :

La géométrie de notre modèle :

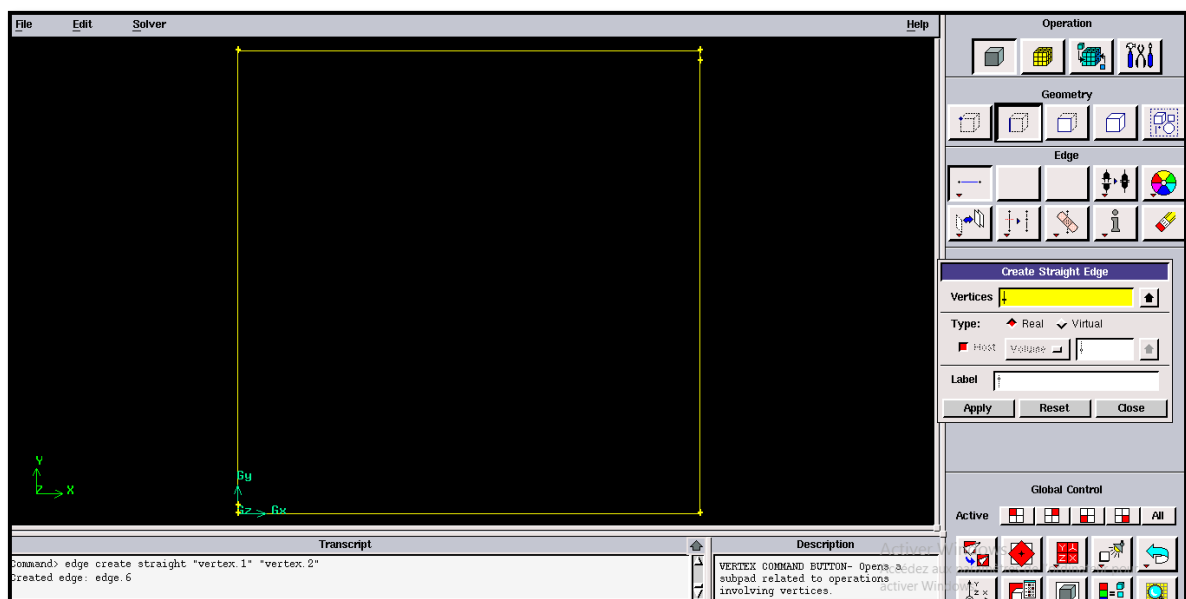


Figure III. 4 Création de la géométrie.

III.2.3 Maillage :

La génération du maillage 2D

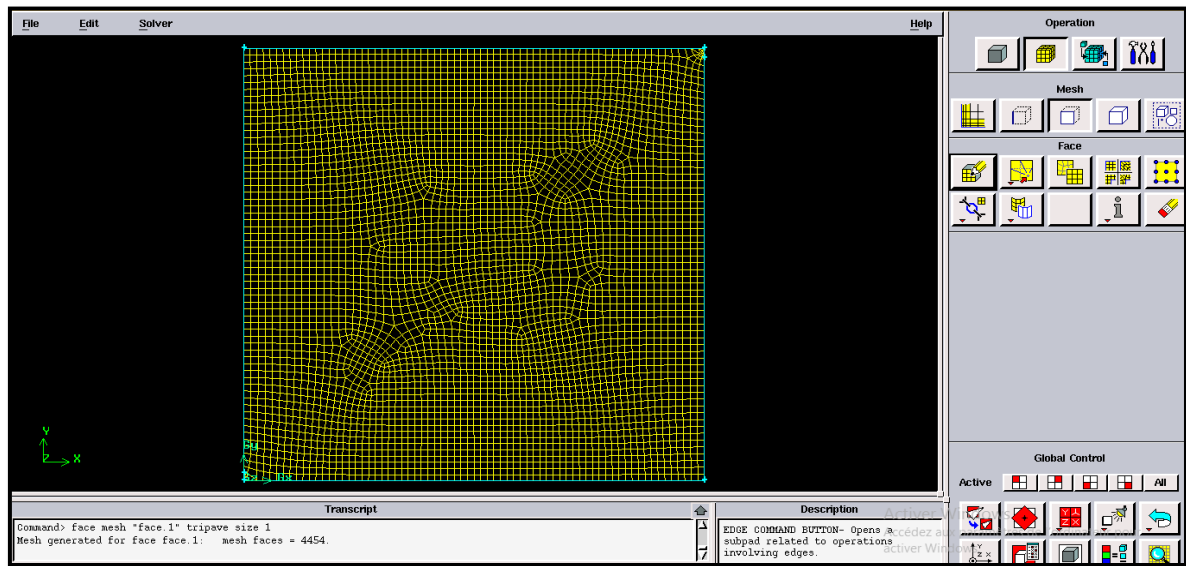


Figure III. 5 Choix du maillage final.

III.2.4 Condition aux limites :

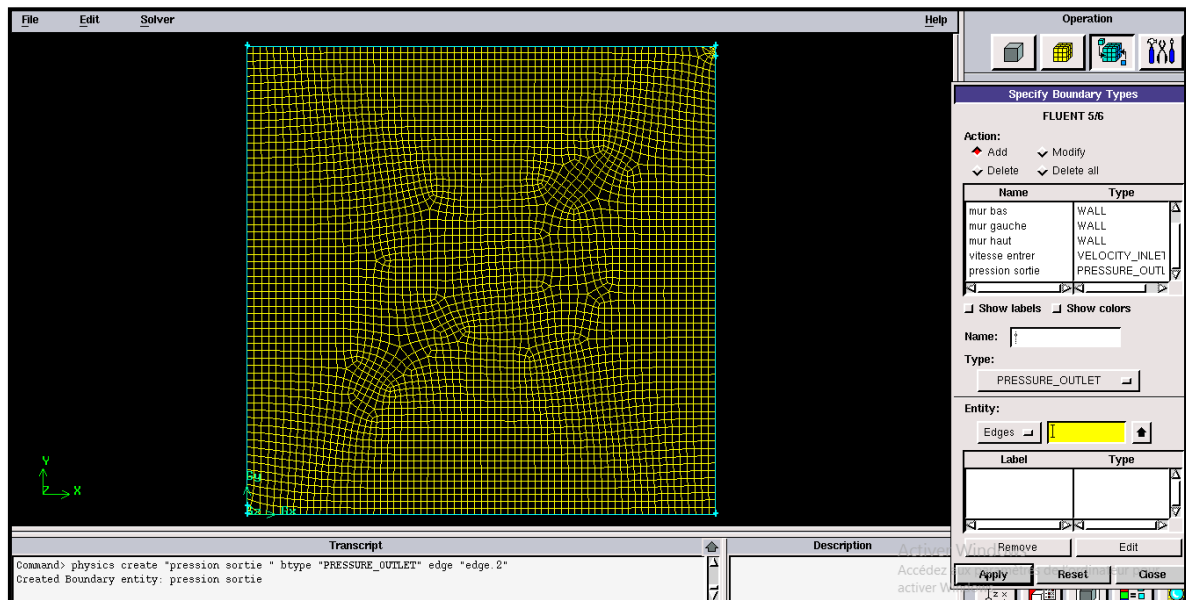


Figure III. 6 Choix de la condition aux limites.

III.2.5 Exportation du maillage de Gambit :

Après la création de la géométrie et les conditions aux limites, on exporte le maillage au Solveur Fluent suivant l'étape : File -export- mesh.

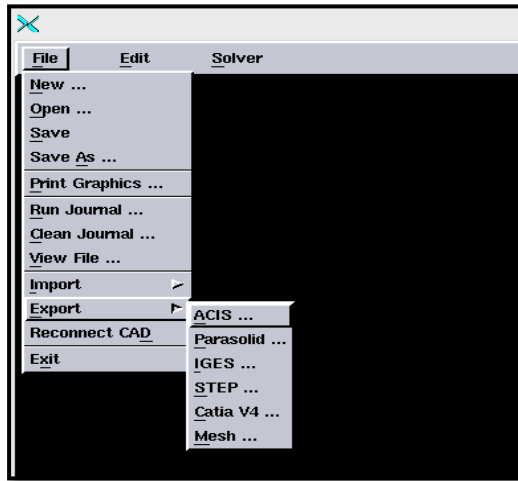


Figure III. 7 Exportation du maillage.

Il nécessite d'exporter le maillage, en format «. msh » pour que le Fluent soit compétent de le lire et de l'utiliser après enregistrement, comme suit :

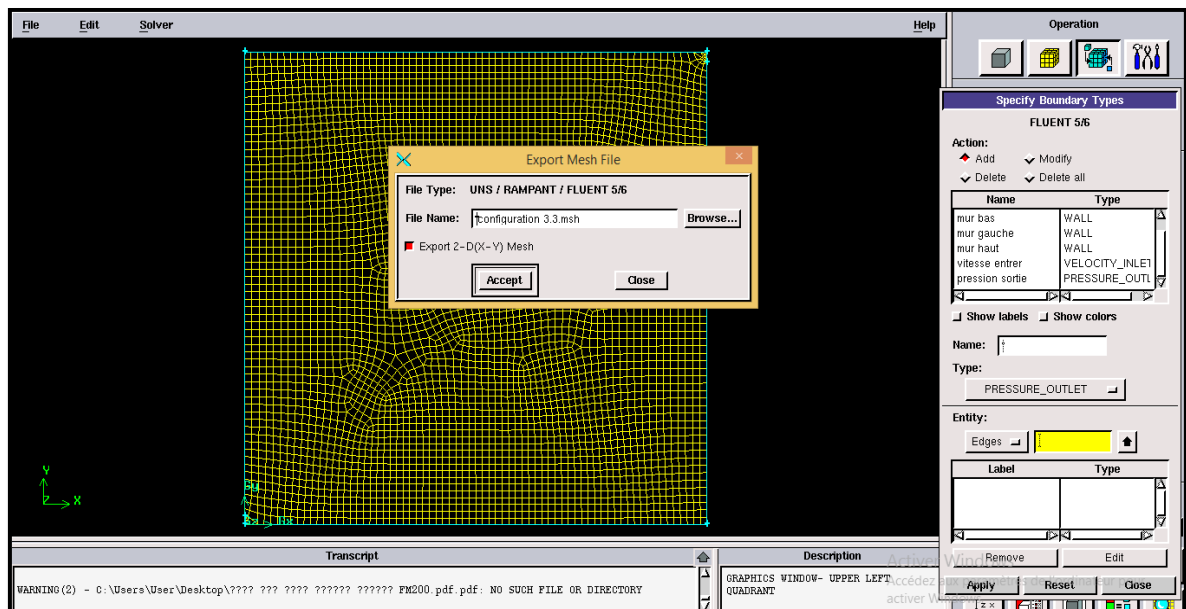


Figure III. 8 Enregistrement de fichier.

III.3 Définition de Fluent :

Fluent est un logiciel de simulation spécialisé dans l'analyse des écoulements de fluides au sein de configurations géométriques complexes. Programmé en langage C, il tire parti de la flexibilité et de la puissance de ce langage pour des tâches telles que la gestion dynamique de la mémoire. Son architecture permet également l'exécution simultanée de multiples processus sur une même machine ou sur des machines distinctes, ce qui améliore significativement son efficacité.

III.3.1 Lancement de Fluent :

Puisque notre géométrie est en 2D, pour le domaine de calcul le choix du 2D double précision le plus semblable notre étude, il est donc distingué comme suit :

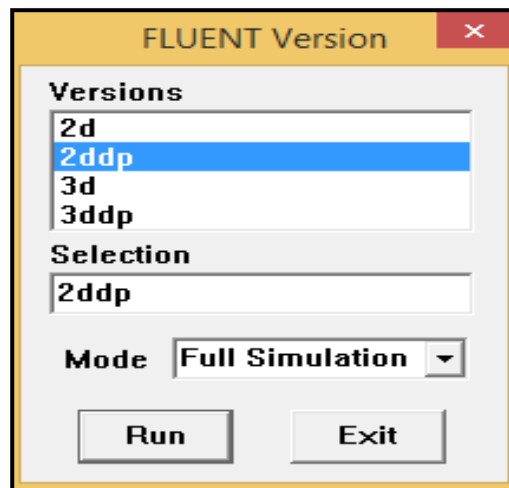


Figure III. 9 Lancement de Fluent.

III.3.2 Importation de la géométrie :

Pour commencer l'étude il faut importer le fichier (*.msh) généré sous Gambit par l'étape suivante : File → Read → Case.

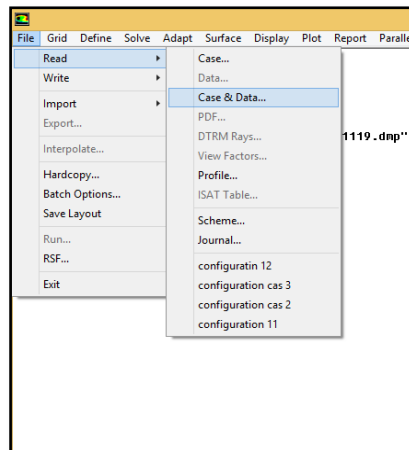


Figure III. 10 Importation de la géométrie.

1) Définir - Modèles – Visqueux.

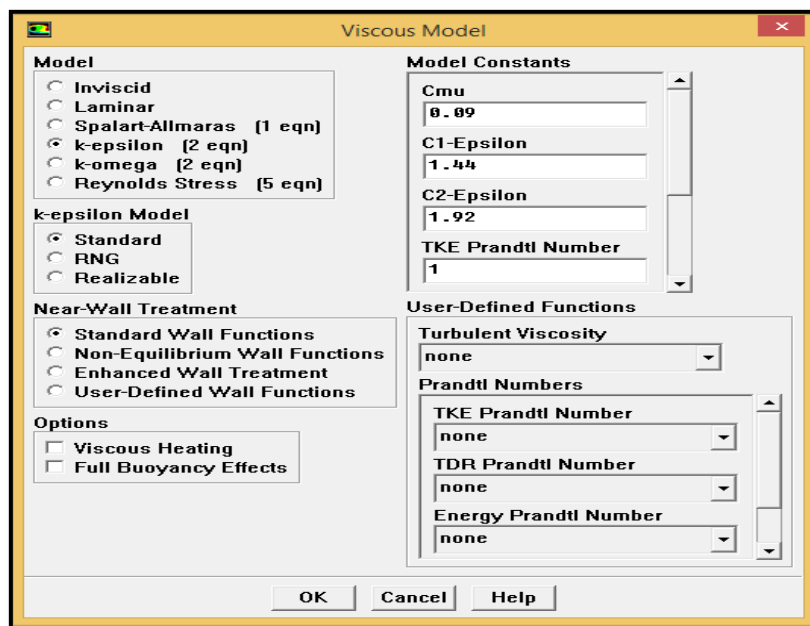


Figure III. 11 Activation de K-epsilon.

2) Définir - Modèles – Énergie.

Activer la fonctionnalité de l'équation de l'énergie :

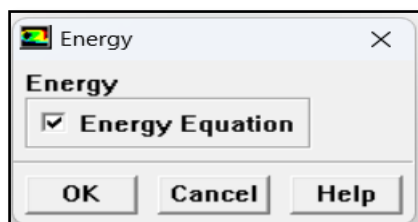
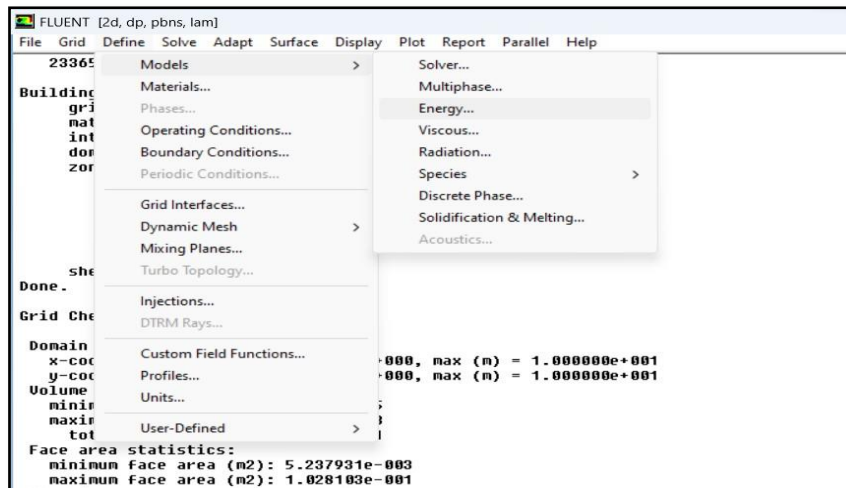


Figure III. 12 Equation de l'énergie.

3) Define- Materials.

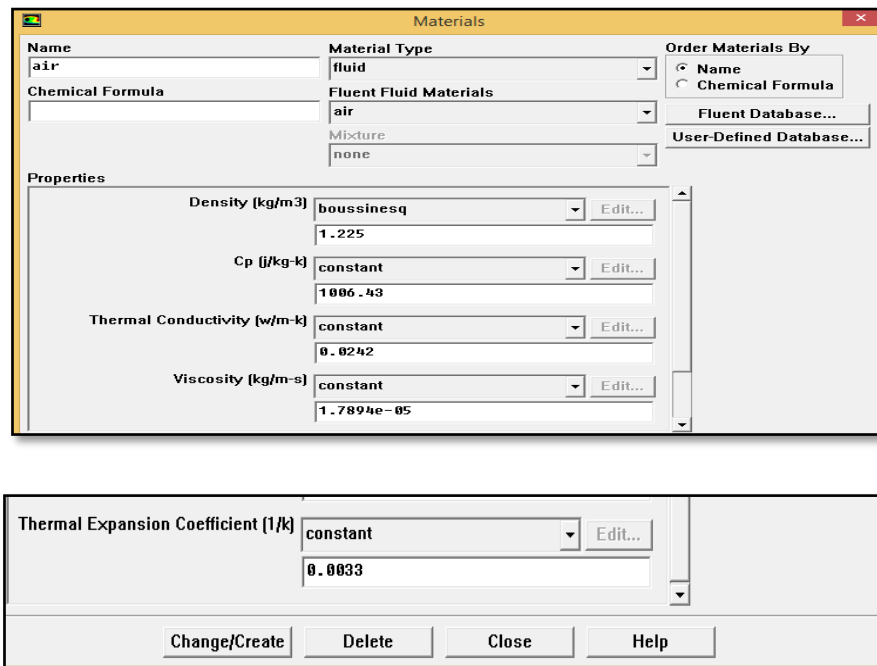


Figure III. 13 Définition des Materials.

4) Définir les conditions de fonctionnement.

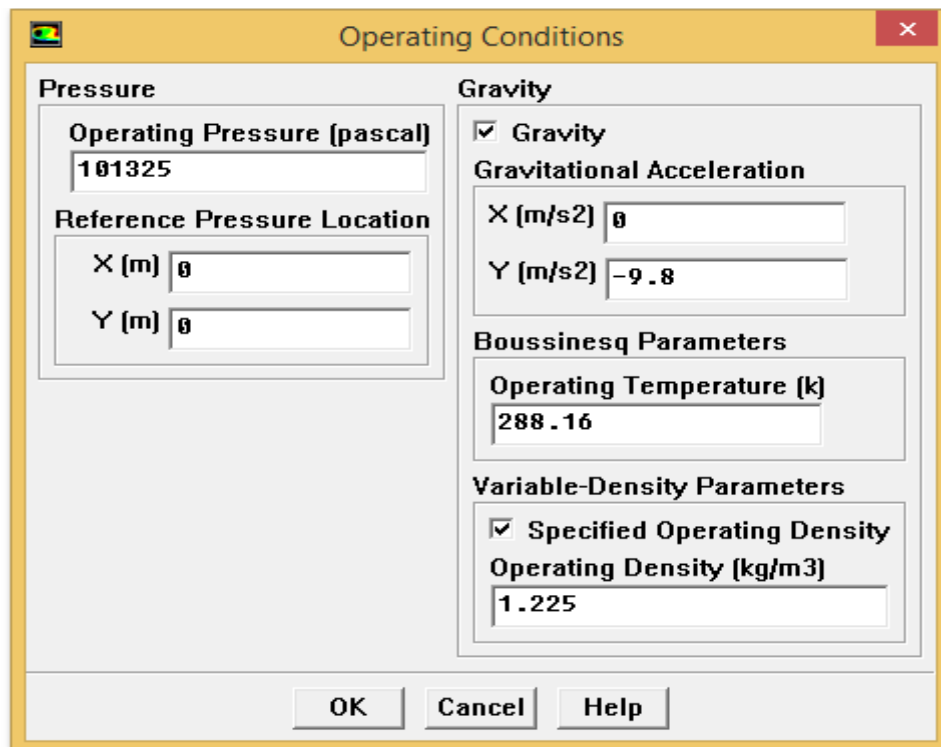


Figure III. 14 Activation de Gravity.

5) Define- Boundary conditions.

➤ Température des parois.

On fixe la température des parois (mur gauche, droit, haut) à une valeur de 293° K.

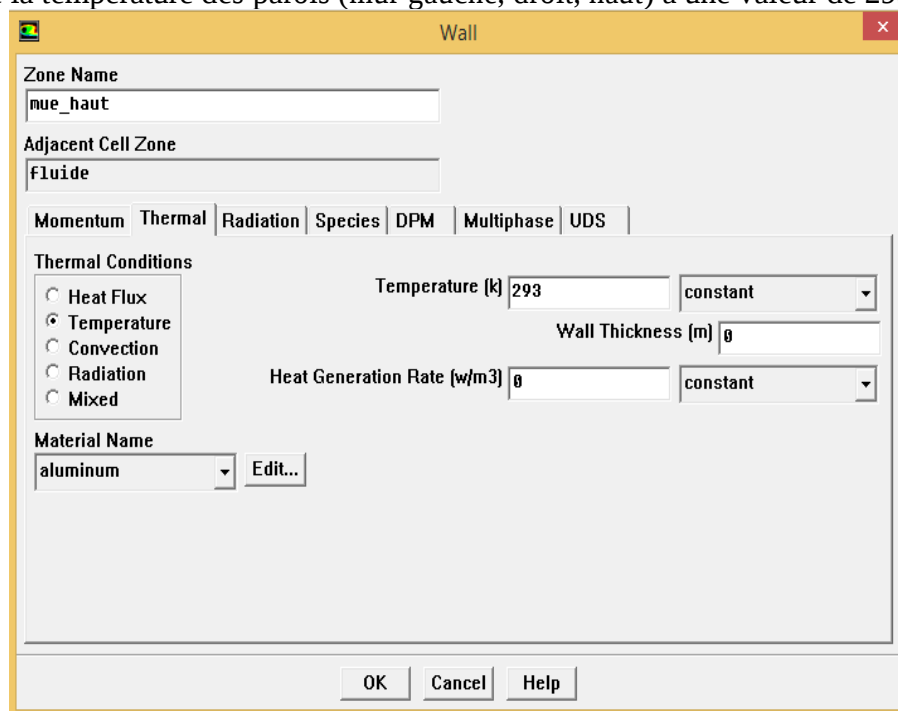


Figure III. 15 Température des parois.

➤ **Température paroi bas du local.**

On fixe la température de la paroi bas de local a une valeur de 308° K.

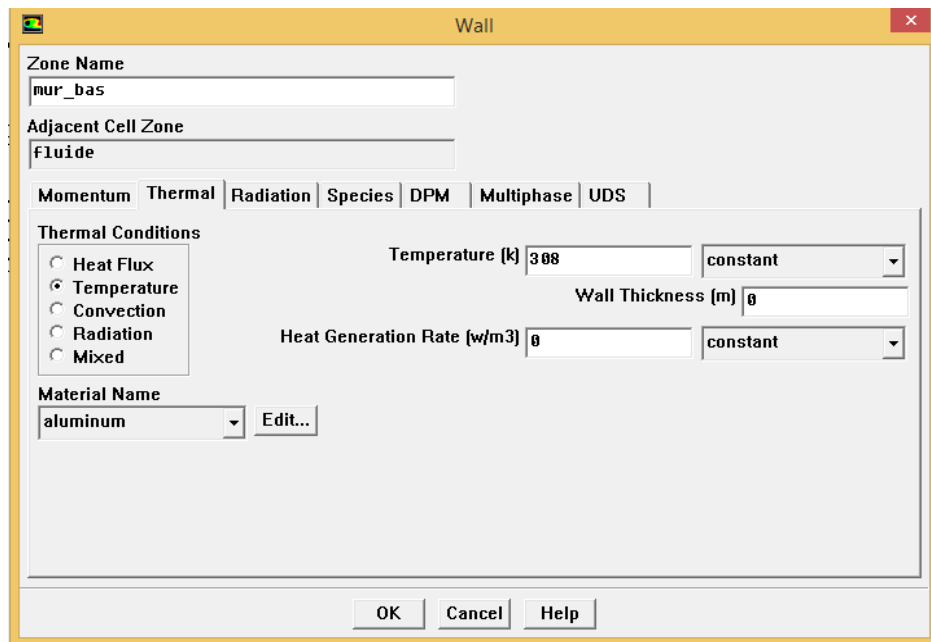


Figure III. 16 Température de paroi bas.

➤ **Vitesse d'entrée.**

On fixe la vitesse d'entrer d'air sur à valeur de 1,2m/s.

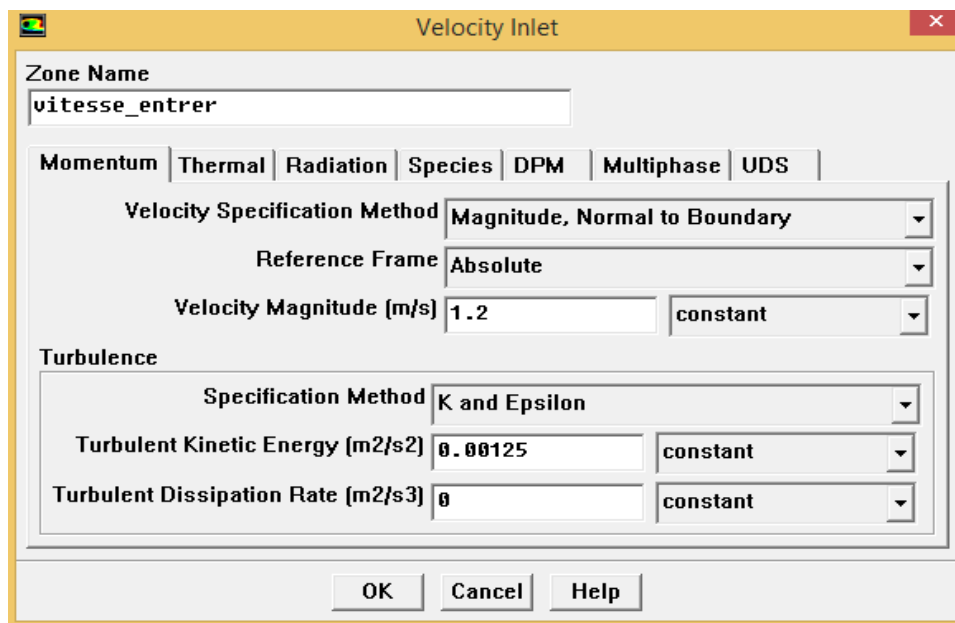


Figure III. 17 Vitesse d'entrée.

6) Solution Résoudre-Contrôles..

Cette étape nous a permis d'estimer les schémas de discrétisations, ainsi que le choix d'ordre des équations et l'algorithme (ou choix de solution).

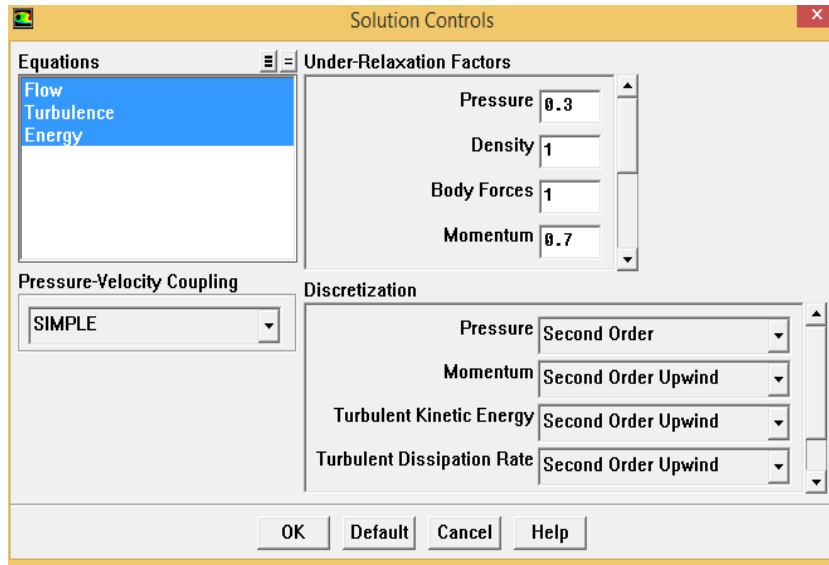


Figure III. 18 Choix d'ordre d'équation.

7) Résoudre les moniteurs résiduels..

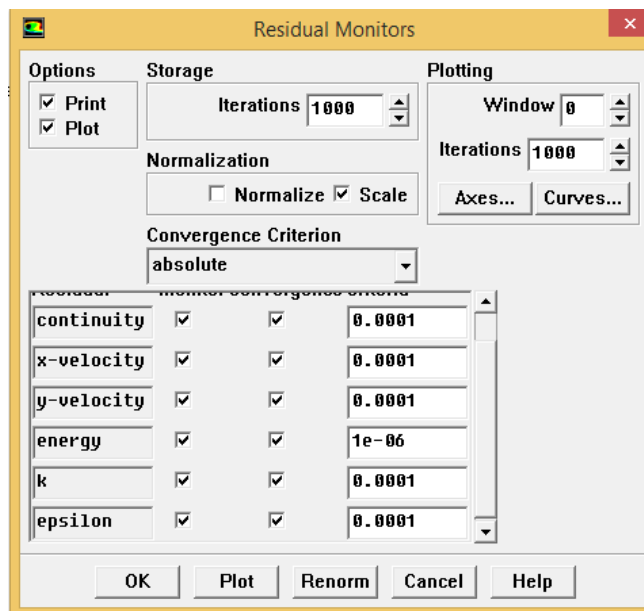


Figure III. 19 Residual monitor.

8) Initialisation de la solution : résoudre-initialiser-initialiser.

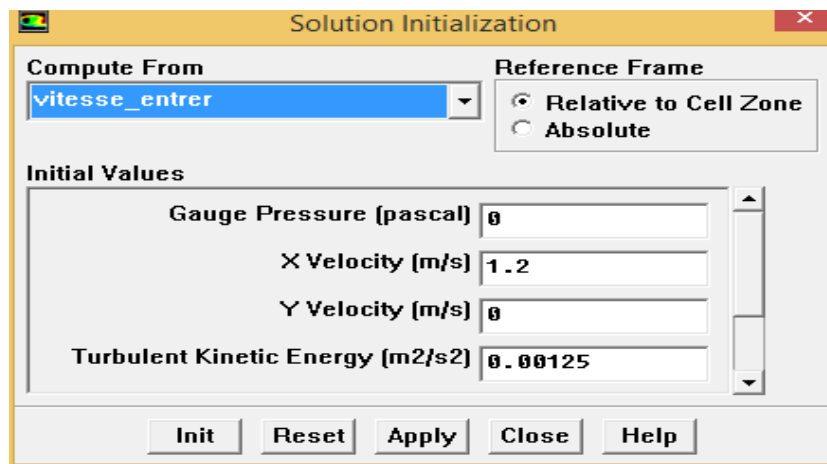


Figure III. 20 Initialization de solution.

9) Allures de l'évolution des résidus de calcul.

Solve-iterate.

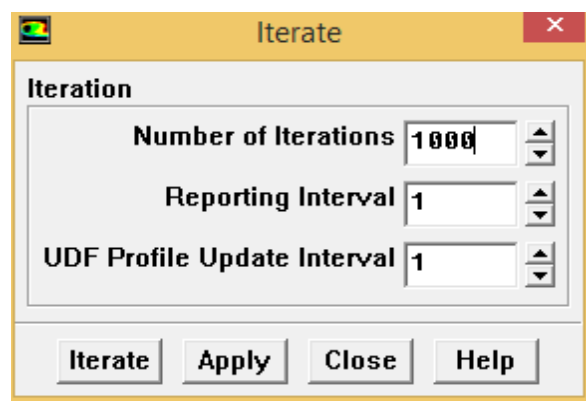


Figure III. 21 Iteration.

Le calcul convergé quand le résidu est stable :

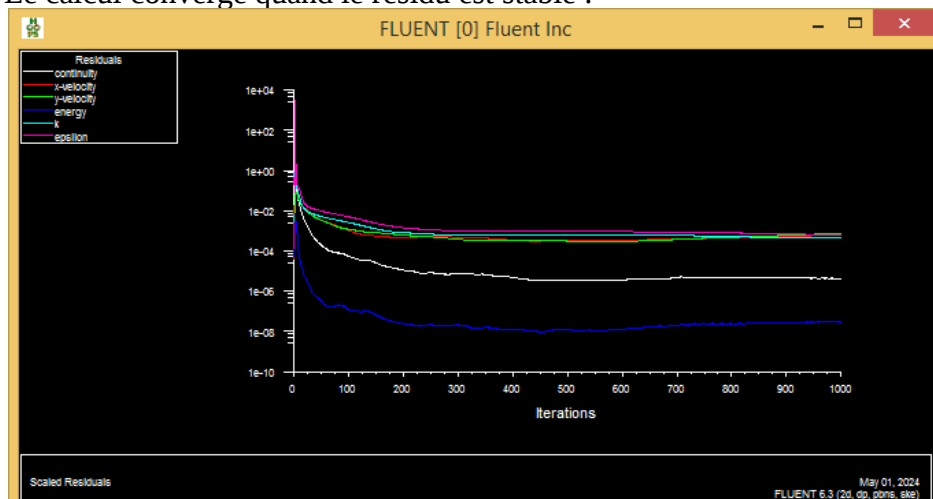


Figure III. 22 Allures de l'évolution des résidus de calcul.

```

Done.
Reading "C:\Users\User\Desktop\configuration 3.3\configuration3.3.dat"...
Done.

iter continuity x-velocity y-velocity      energy          k      epsilon      time/iter
? 1652 solution is converged
1652 8.5742e-07 3.0852e-05 2.7145e-05 5.2681e-09 9.9720e-05 6.8234e-05 0:00:00 1000
? 1653 solution is converged
1653 8.4382e-07 3.0787e-05 2.7225e-05 5.4092e-09 9.8889e-05 6.5721e-05 0:00:00 999

```

Figure III. 23 Nombre des itérations pour la convergence.

Conclusion

Les étapes essentielles pour la réalisation la simulation sont : le logiciel Gambit est utilisé pour créer la géométrie et le maillage, La résolution des équations de Navier-Stokes et de l'équation d'énergie, ainsi que le post-traitement des résultats, ont été effectués avec le logiciel Fluent.

CHAPITRE IV :

Résultats et Interprétations.

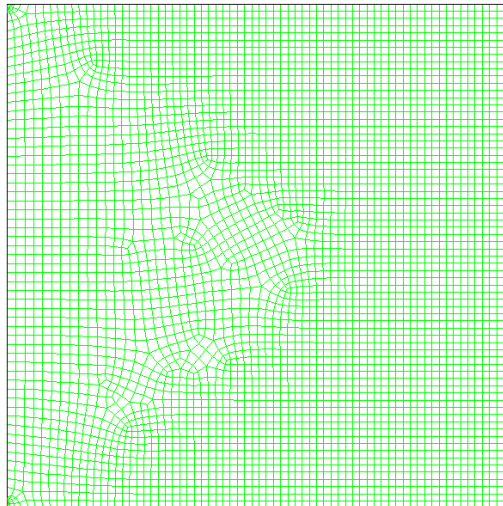
Résultats et interprétations.

Ce travail présente une simulation de l'écoulement de l'air et de la distribution de la température en régime turbulent, ainsi que les effets de différents facteurs influençant le mouvement de l'air à l'intérieur des locaux. Parmi ces facteurs, on peut citer la vitesse de l'air, l'emplacement et les dimensions des ouvertures. Les résultats de notre étude ont été validés par des travaux antérieurs.

IV.1 Maillages :

La figure suivant **FigureIV.1** illustre le maillage utilisé pour les quatre configurations.

- **Le maillage utilisé :** maillage Quad/Tri **type :** pave



Grid

May 16, 2024
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, ske)

Figure IV. 1 Le maillage des quatre configurations.

IV.2 Lignes de courant :

Les figures suivantes illustrent l'effet du changement de l'emplacement des ouvertures. La modification de la position des ouvertures d'entrée et de sortie entraîne différents types d'aération

- Nous observant une structure principale des zones de recirculations situé au centre de la cavité **Figure IV. 2, cas 1, cas 4**, la vitesse des lignes de courant au centre de la cavité est importante.
- Pour la deuxième configuration, **Figure IV. 2 cas 2**, la vitesse des lignes de courant au centre de la cavité tend vers zéro.
- Pour la troisième configuration **Figure IV. 2 cas 3** en plus de la zone de recirculation au centre de la cavité à une vitesse de lignes de courant importante, nous avons une autre zone de recirculation de l'air à une vitesse qui tend vers zéro à côté de l'entrée de l'air dans la cavité.

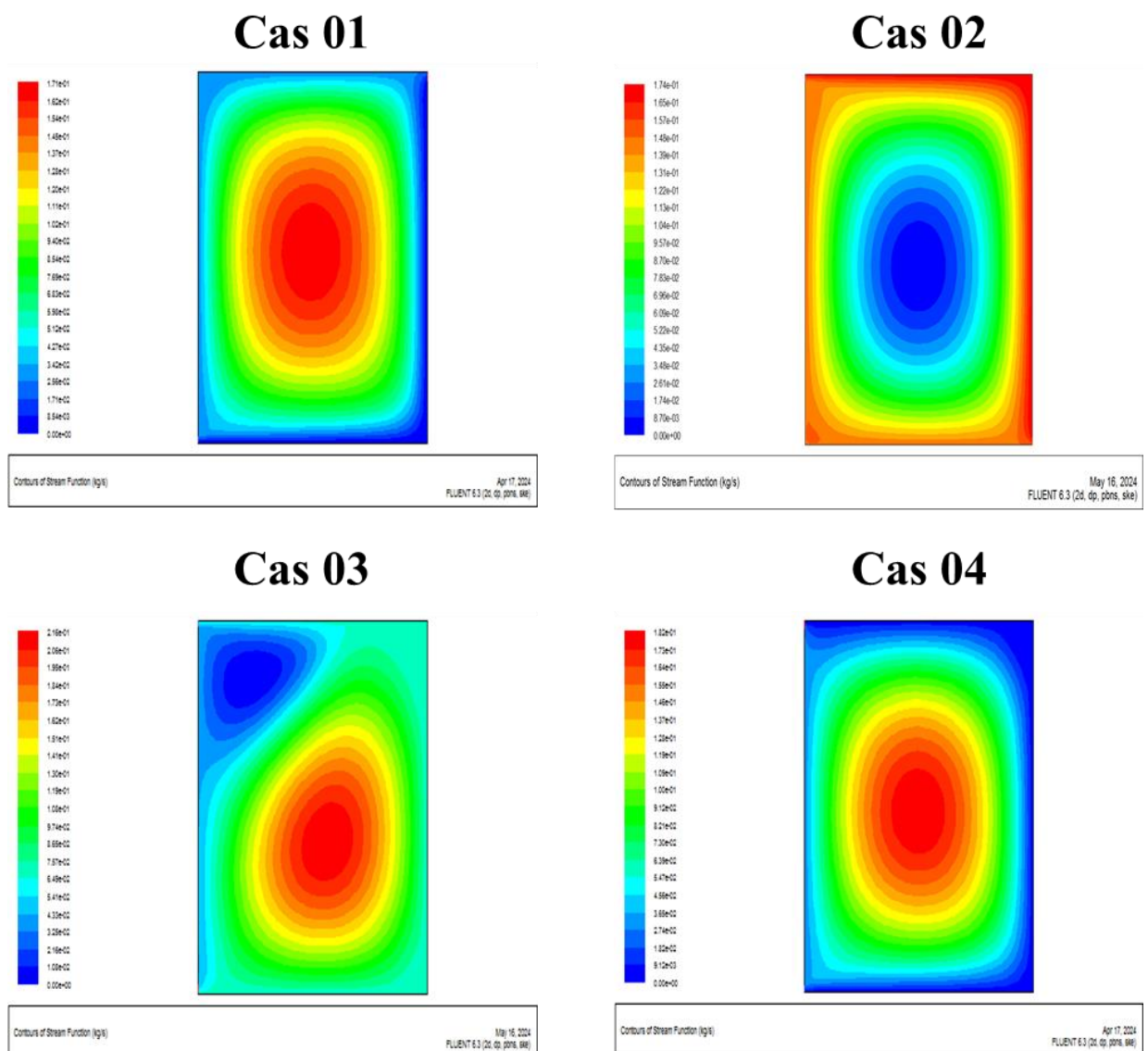


Figure IV. 2 Contours des lignes de courants.

IV.3 Distribution de la vitesse :

Les contours de la figure suivant (**Figure IV. 3**) présente l'évolution de la vitesse axiale des quatre configurations.

On remarque que pour la configuration du cas 2 le courant d'air est très faible à côté de la surface chauffée.

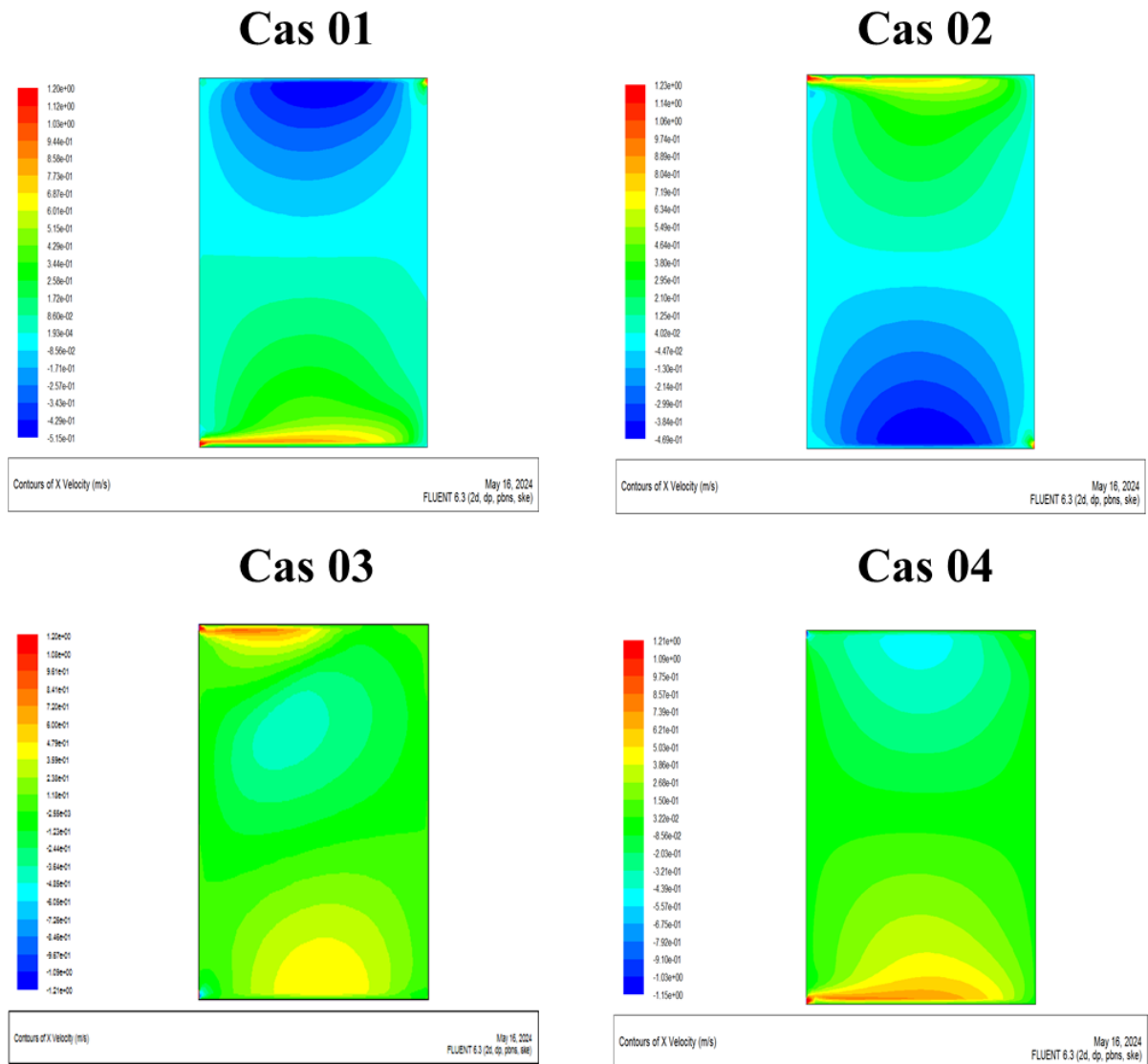


Figure IV. 3 Contours de distributions de vitesse .

Les profils de la **Figure IV. 4** montre les évolutions de la vitesse à la position $y=0.2$ m et $y=0.6$ m le long de l'axe des abscisses nous remarquons que :

- Les valeurs des vitesses sont inférieures pour la position $y=0.2$ m par rapport au position $y=0.6$ m par rapport à toutes les configurations.

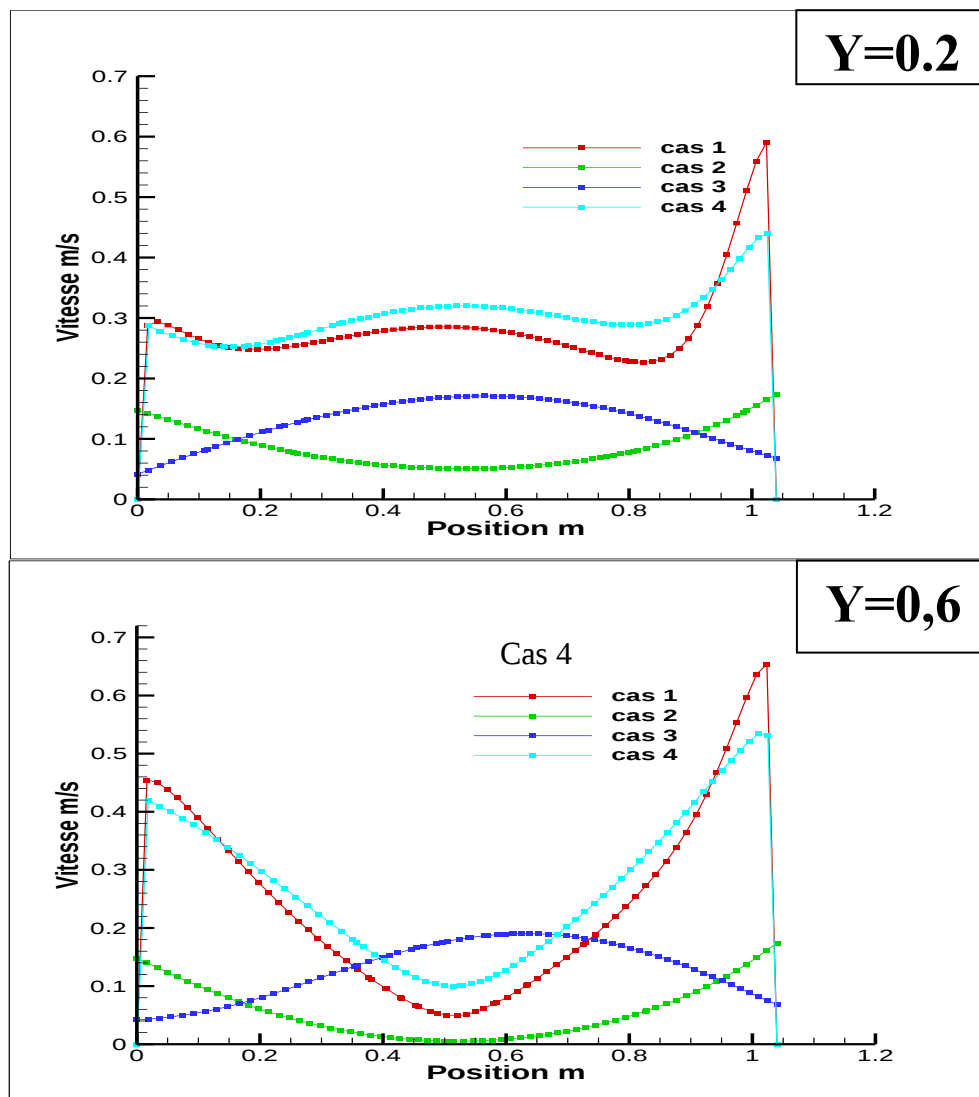


Figure IV. 4 Profils de distributions de vitesse à la position $y=0.2$ m et $y=0.6$ m le long de l'axe des abscisses pour les quatre configurations.

IV.4 Distribution de l'Energie cinétique turbulente :

La figure suivant **Figure IV. 5** montre la distribution des valeurs de l'énergie cinétique turbulente pour les quatre configurations.

Pour les deux configurations cas1 et cas2 le développement de l'énergie cinétique turbulente est développe à l'entrée et la sortie de la cavité, il est important à l'entrée par rapport à la sortie.

Pour les autre configuration cas 3 et cas 4, l'énergie cinétique turbulente est développe sur toute la structure de la cavité surtout pour le cas3, cela est dû à la position de l'entrée et de la sortie de l'air sur une même vertical suivants la direction y.

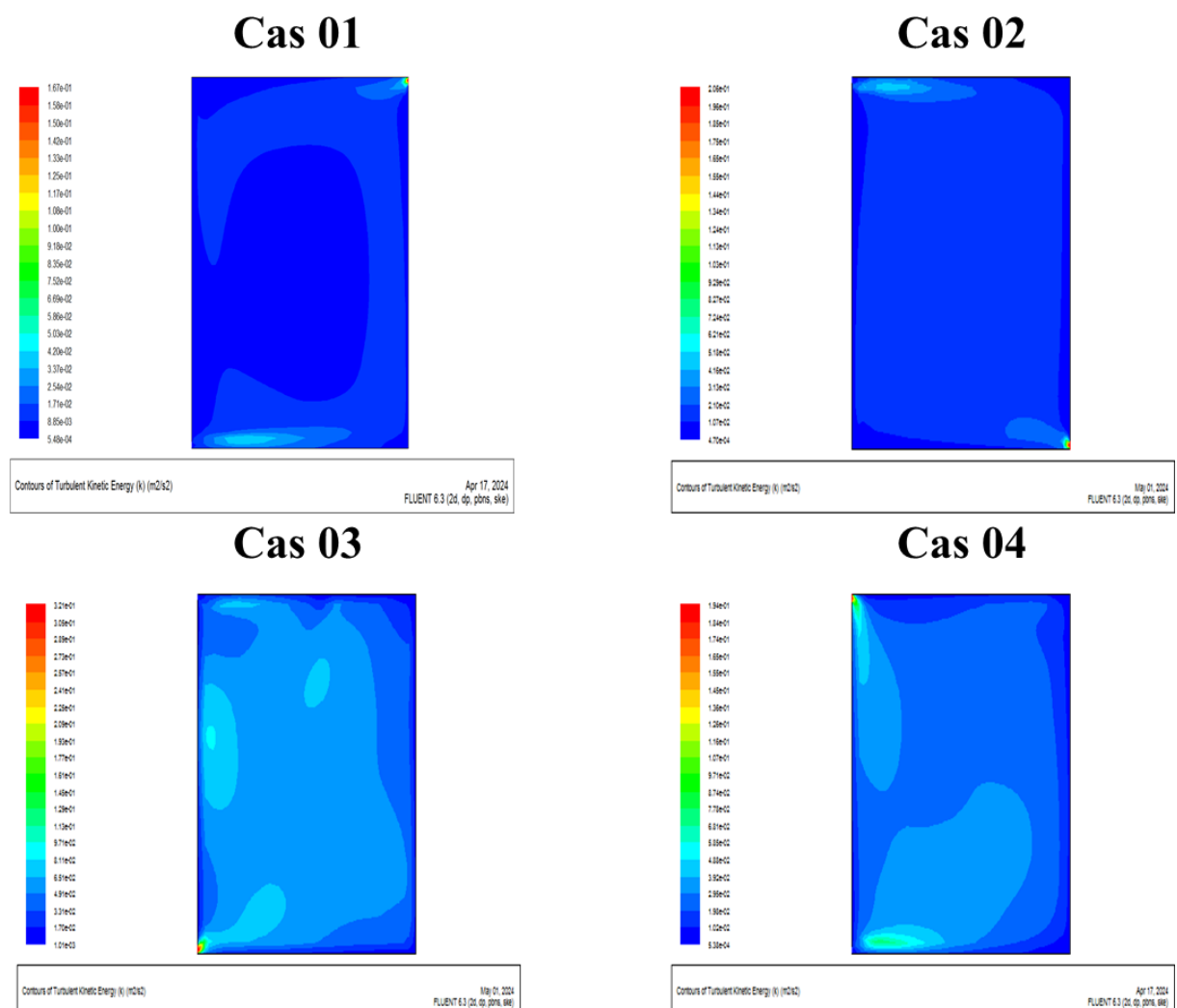


Figure IV. 5 Contours des distributions de l'énergie cinétique turbulente.

IV.5 Distribution de la température :

La figure suivante montre la distribution de la température des quatre configurations des quatre cavités. On observe une stratification de la distribution de la température au niveau des cavités,

Les températures moyennes de l'air à l'intérieur des cavités sont selon l'emplacement de l'entrée et la sortie d'air pour chaque configuration étudiée, le **Tableau 2**.

Dans le champ thermique, on observe que l'air au contact de la paroi chaude se réchauffe et s'élève vers le haut de la cavité, entraînant une certaine quantité de chaleur vers la sortie.

Le cas2 présente une température moyenne $T = 299.073 \text{ K}$ et une vitesse moyenne de l'air $v = 0.298 \text{ m/s}$, ce qui est considéré comme confortable thermiquement.

Nous observons que dans la cavité où l'entrée d'air est située en haut et la sortie en bas (cas 2), la température moyenne est de $299,073 \text{ K}$. En revanche, dans la cavité où l'entrée d'air est également en haut mais la sortie se trouve en bas, juste en dessous de l'entrée (cas 3), la température moyenne a diminué à $298,51 \text{ K}$.

Les profils de la figure IV.7 montrent l'évolution de la distribution de la température aux positions $y = 0,2 \text{ m}$ et $y = 0,6 \text{ m}$ le long de l'axe des abscisses x . Les valeurs de température sont particulièrement élevées à la position $y = 0,2 \text{ m}$ car elle est proche de la surface chauffée.

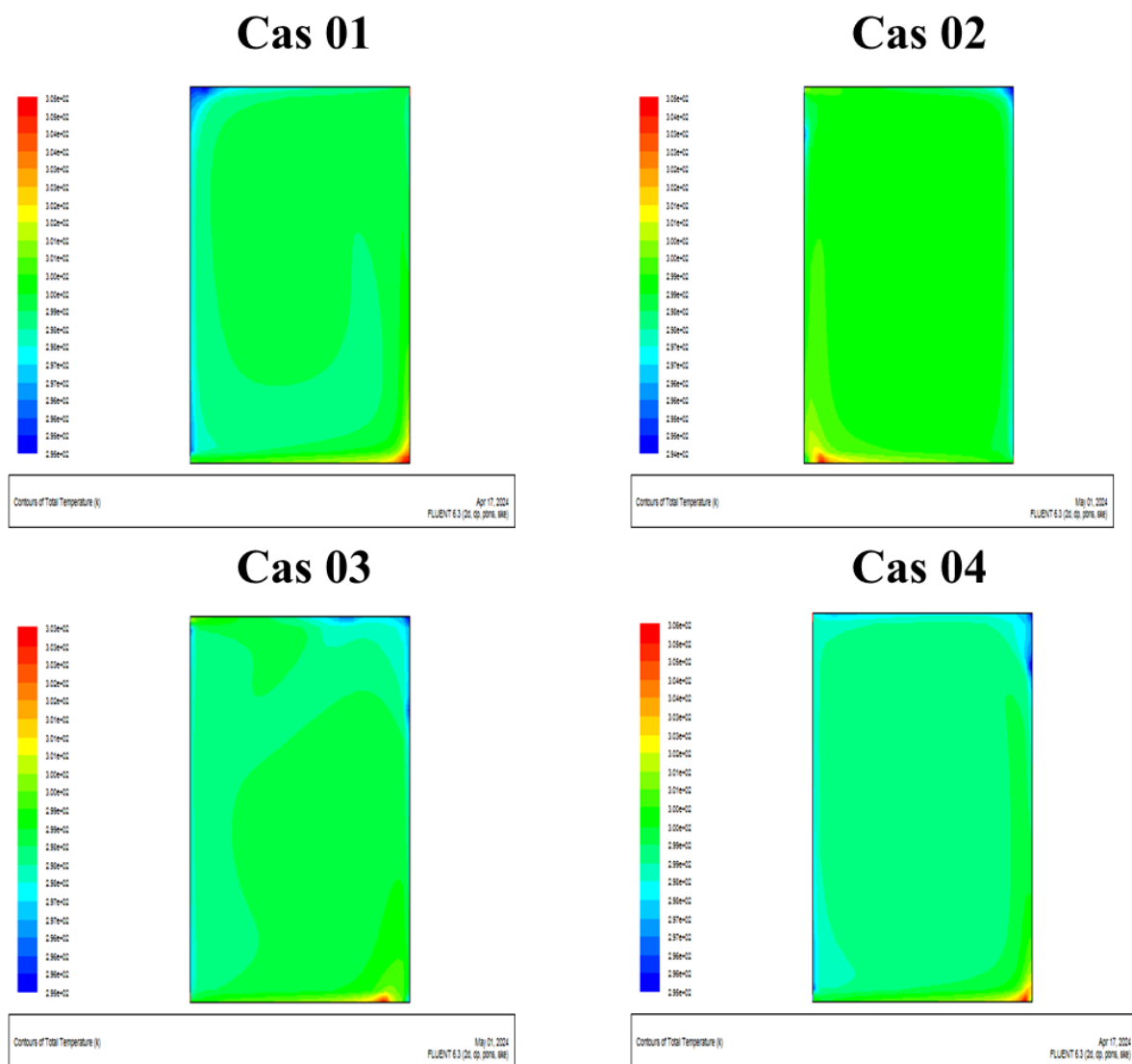


Figure IV. 6 Contours de distributions de la température pour les quatre configurations.

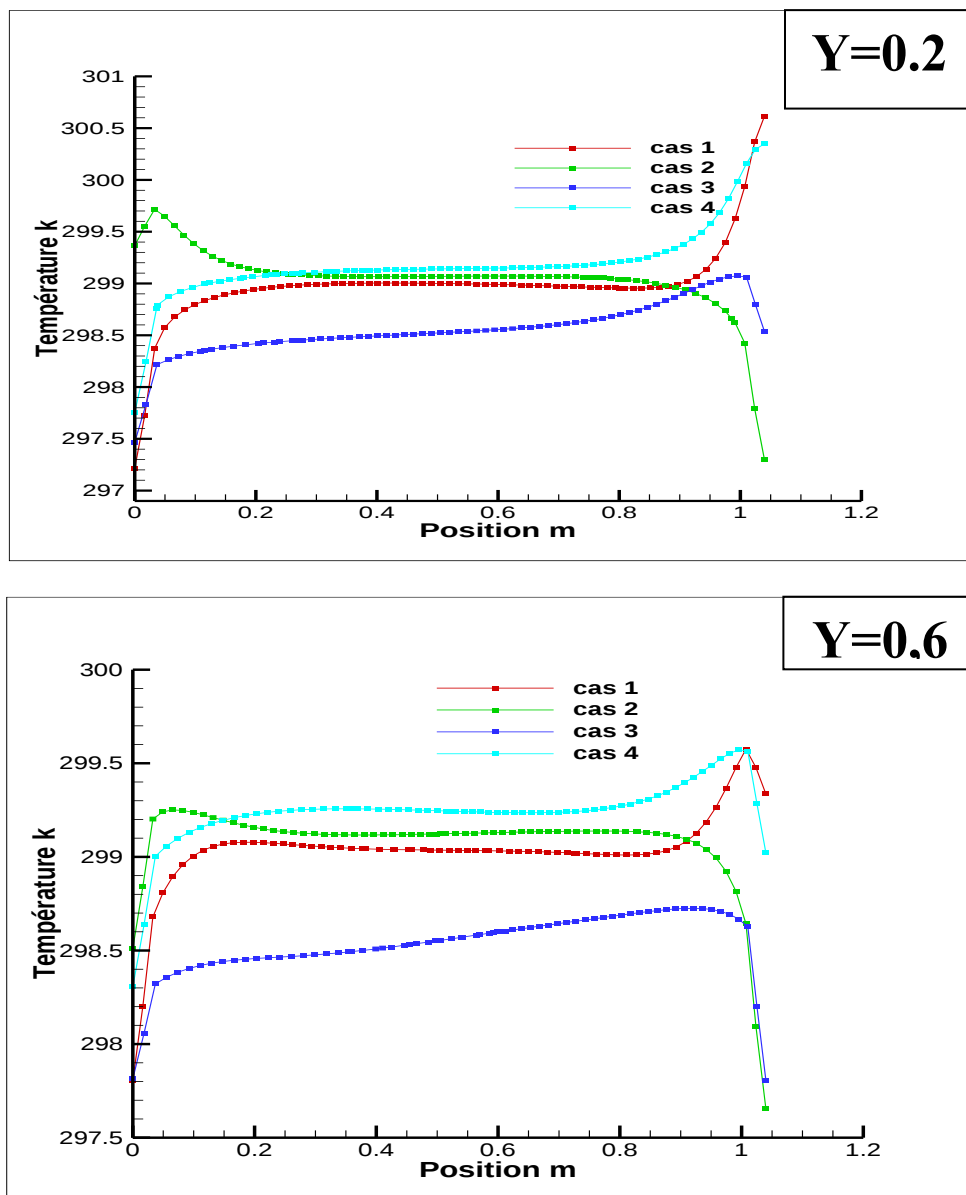


Figure IV. 7 Profils de distributions de la température vitesse à la position $y=0.2$ m et $y=0.6$ m le long de l'axe des abscisses pour les quatre configurations pour les quatre configurations.

Tableau 2 Valeurs moyennes : vitesse, énergie cinétique, température.

	Cas1	Cas2	Cas3	Cas4
Vitesse moyenne (m/s)	0.303	0.298	0.286	0.314
Energie cinétique moyenne (m ² /s ²)	0.0092	0.015	0.053	0.0268
Température moyenne (K)	299.05	299.073	298.51	299.228

Conclusion.

Les résultats obtenus de l'évolution dynamique et thermique de l'écoulement de l'air dans les différentes configurations ont été analysé dans ce chapitre.

La position des ouvertures de l'entrée et la sortie de l'air influe sur le comportement dynamique et thermique de l'air dans la cavité

Conclusion générale

Dans cette étude, nous avons entrepris une étude du comportement dynamique et thermique de l'air à l'intérieur de différentes configurations de locaux, en utilisant l'outil numérique CFD, le logiciel FLUENT6. 3 comme instruments de simulation. Notre objectif était d'analyser le transfert de chaleur pour un écoulement turbulent de l'air en convection mixte dans des environnements ventilés, en examinant quatre cas de configurations.

Il est intéressant de noter que la configuration 2 a émergé comme celle offrant la meilleure efficacité, notamment en termes de température moyenne, de vitesse moyenne. Ces résultats démontrent l'impact des dimensions, de la forme de la géométrie, ainsi que de l'emplacement des entrées et sorties d'air sur l'évolution dynamique et thermique de l'air dans un environnement ventilé.

Cette étude offre des perspectives importantes pour la conception et la gestion efficaces des systèmes de ventilation dans les bâtiments pour une, amélioration du confort et de l'efficacité énergétique des espaces intérieurs ventilés.

Références.

- [1] «iea,» [En ligne]. Available: <https://www.iea.org/commentaries/more-efficient-and-flexible-buildings-are-key-to-clean-energy-transitions>.
- [2] ventilation-efficiency-d_124.html, «engineeringtoolbox,» [En ligne]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/ventilation-efficiency-d_124.html.
- [3] wind-ventilation-and-cross-ventilation, «build,» [En ligne]. Available: <https://build.com.au/wind-ventilation-and-cross-ventilation>.
- [4] principles-mechanical-ventilation, «respiratorytherapyzone,» [En ligne]. Available: <https://www.respiratorytherapyzone.com/principles-mechanical-ventilation/>.
- [5] resources/publications/mechanical-ventilation-types, «hvi,» [En ligne]. Available: <https://www.hvi.org/resources/publications/mechanical-ventilation-types/>.
- [6] k. penycook, «the illustrated guide to ventilation,» 2009.
- [7] entretien-vmc-simple-flux, «entretienvmc.paris,» [En ligne]. Available: <https://entretienvmc.paris/entretien-vmc-simple-flux/>.

- [8] mon-conforthermicien, «nos-solutions/ventilation/,» [En ligne]. Available: <https://www.mon-conforthermicien.fr/nos-solutions/ventilation/>.
- [9] faire-des-economies-denergie-grace-a-la-vmc-double-flux, «mafuturemaison,» [En ligne]. Available: <https://www.mafuturemaison.fr/dossier/construire/faire-des-economies-denergie-grace-a-la-vmc-double-flux/>.
- [10] guide_bio_tech, «Ventilation naturelle».
- [11] C. a. D. o. a. V. o. D. S. i. K. Mine, «Civil Engineering, master's level».
- [12] Q. i. d. l. c. d. performance, «SPW».
- [13] J.-M. Robert, Confort (Ergonomie : 150 notions clés), cairn, 2021.
- [14] efficacite-energetique-et-batiments, «connaissancedesenergies,» [En ligne]. Available: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/efficacite-energetique-et-batiments>.
- [15] what-is-the-difference-between-ventilating-and-aerating, «energide,» [En ligne]. Available: <https://www.energide.be/en/questions-answers/what-is-the-difference-between-ventilating-and-aerating/753/> .
- [16] equipements-et-materiaux-maison/ventilation/ventilation-naturelle, «qualitel,» [En ligne]. Available: <https://www.qualitel.org/particuliers/equipements-et-materiaux-maison/ventilation/ventilation-naturelle/>
<https://www.qualitel.org/particuliers/equipements-et-materiaux-maison/ventilation/ventilation-naturelle/> .
- [17] tout-savoir-ventilation-naturelle, «francehygieneventilation.fr,» [En ligne]. Available: <https://francehygieneventilation.fr/tout-savoir-ventilation-naturelle/> .
- [18] les-principes-cles-de-la-ventilation-naturelle-guide-pratique-pour-les-concepteurs, «chauffage-clim,» [En ligne]. Available: <https://www.chauffage-clim.com/les-principes-cles-de-la-ventilation-naturelle-guide-pratique-pour-les-concepteurs/> .
- [19] limiter-charges-thermiques/limiter-gains-solaires, «guidebatimentdurable.brussels,» [En ligne]. Available: <https://www.guidebatimentdurable.brussels/limiter-charges-thermiques/limiter-gains-solaires>.

- [20] S. Rouchier, Manuel de performance énergétique des bâtiments, 2023.
- [21] quelques-conseils-pratiques-pour-un-renouvellement-dair-plus-efficace, «engie-vertuoz.fr,» [En ligne]. Available: <https://engie-vertuoz.fr/blog/quelques-conseils-pratiques-pour-un-renouvellement-dair-plus-efficace/> .
- [22] S. A. Y. B. M. Riad, «SIMULATION NUMERIQUE DE LA VENTILATION D’UN LOCAL 2022/2023».
- [23] alloui-zineddine, «staff.univ-batna2.dz,» [En ligne]. Available: <https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/alloui-zineddine/files/chap-2-ulcfd.pdf> .
- [24] s. gyamfi, «Considerations and Development of a,» Luleå University of Technology, 2020.
- [25] i. rayane, «l'isolation thermique».
- [26] jurad-bat, «professionnels/solution-3-diluer-le-radon,» [En ligne]. Available: <https://jurad-bat.net/professionnels/solution-3-diluer-le-radon>.
- [27] batiprosec.be, «traitements-humidite/ventilation-mecanique-controlee,» [En ligne]. Available: <https://www.batiprosec.be/traitements-humidite/ventilation-mecanique-controlee>.
- [28] bielen.pro, «/ventilation,» [En ligne]. Available: <https://www.bielen.pro/ventilation/>.
- [29] residential-building-ventilation, «ohmefficient,» [En ligne]. Available: <https://ohmefficient.com/residential-building-ventilation/>.
- [30]